

PROEVEN MET DE BODEMTRANS-
PORTMETER "DORDRECHT" IN
DE ZANDGOOT VAN HET WATER-
LOOPKUNDIG LABORATORIUM
"DE VOORST" IN MAART 1988

DBW/RIZA nota 88.022

B.P.C. Steenkamp

Dordrecht, juni 1988
DIENST BINNENWATEREN/RIZA
Hoofdafdeling Watersystemen
Afdeling Delta (WSD)

INHOUD

blz.

LIJST VAN BIJLAGEN	3
REFERENTIES	3
1. SAMENVATTING EN KONKLUSIES	4
2. INLEIDING	7
3. BESCHRIJVING VAN DE BODEMTRANSPORTMETER	8
4. UITVOERING VAN DE PROEVEN	9
4.1. Hydraulische en morfologische omstandigheden	9
4.2. Observatie van de aanzuigkonstruktie	10
4.3. Meetprocedure	11
5. RESULTATEN	12

LIJST VAN BIJLAGEN

1. Principe bodemtransportmeter "Dordrecht".
2. Meetvis met frame voor bodemtransportmetingen.
3. Overzicht grote zandgoot.
4. Korrelverdeling zand in zandgoot.
5. Bodemprofielen zandgoot tijdens metingen BTMD d.d. 2 maart 1988.
- 6.1 en 6.2 Waterspiegel en bodemligging vóór en na proef nr 36.
7. Resultaten van de proeven.
8. Relatieve frekwentieverdelingen.

REFERENTIES

1. Beschrijving zandtransportmeter "Dordrecht".
DBW/RIZA notitie 87.032X, mei 1987.
2. Straight sand flume: description, accuracy, data collection and pre-processing of data.
R657-XV/M1314 part VI.
Waterloopkundig Laboratorium, september 1984.
TOW-A37.
3. Bodemsamenstelling en hydraulische ruwheid Merweden.
DBW/RIZA notitie 87.068X, september 1986.
4. Oriënterende proeven met de bodemtransportmeter "Dordrecht" in de grote zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst".
DBW/RIZA notitie 87.059X, augustus 1987.

1. SAMENVATTING EN KONKLUSIES

Met als uiteindelijk doel natuurgegevens te verzamelen met betrekking tot het zandtransport en in het bijzonder het bodemtransport in het benedenrivierengebied, wordt bij DBW/RIZA in samenwerking met de Meetdienst Noordelijk Deltabekken van de directie Benedenrivieren gewerkt aan de ontwikkeling van een bodemtransportmeter. In de week van 29 februari t/m 4 maart 1988 zijn in de grote zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst" proeven gedaan met een prototype van deze bodemtransportmeter "Dordrecht" (BTMD). Het doel van de proeven was om een indruk te krijgen van de waarde van het meetsysteem als "point sampler" onder min of meer gekonditioneerde omstandigheden.

Ten opzichte van een eerdere versie (ref. 1) is de transportmeter op twee punten aangepast.

Het bezinkvat is vóór de pomp geplaatst, waardoor pomp en flow-meter gevrijwaard blijven van verstopping c.q. slijtage door het zand, en het plaatje, waarop de aanzuigmond voor het bodemtransport is gemonteerd, is zodanig aan het meetframe bevestigd dat dit zich binnen zekere grenzen kan aanpassen aan de bodemkonfiguratie (zie de bijlagen 1 en 2).

Op grond van de proeven kan ten aanzien van deze veranderingen het volgende worden gesteld. Het aanzuigsysteem (bezinkvat, pomp, flowmeter) werkt zonder problemen; de verandering is een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de vroegere opstelling met het bezinkvat na de pomp.

De bewegingsvrijheid die de onderste zuigmond nu heeft, zorgt ervoor dat het bodemplaatje in de meeste gevallen vrijwel vlak op de bodem terechtkomt. Daardoor is de kans dat een deel van het te meten bodemtransport onder het plaatje doorschiet aanzienlijk verkleind. De proeven zijn uitgevoerd bij een gootbreedte van 1,50 m, een gemiddelde waterdiepte van 0,38 m en een debiet van 0,386 m³/s.

In de goot bevond zich zand met een d₅₀ van 450 µm; qua samenstelling komt dit zand goed overeen met het zand op de Boven Merwede. Volgens metingen in de zandvang aan het einde van de goot bedroeg het gemiddelde totale zandtransport gedurende de meetweek 137 kg/uur.m¹ (gewicht onder water gewogen).

Het zwevende transport is, op grond van afzuigproeven op vier diepteniveaus, ingeschat op 34 kg/uur.m¹.

Het bodemtransport in de goot moet volgens deze gegevens dus gemiddeld circa 103 kg/uur.m^1 zijn geweest (= 75% van het totale transport).

Met de BTMD zijn de resultaten van 33 proeven beschikbaar gekomen, waarbij zowel het bodemtransport als het zwevend transport is gemeten. Dit laatste met behulp van een ronde afzuig-opening op (een arbitrair gekozen waarde van) 11 cm boven de bodem. Een meting bestond uit het gedurende 10 minuten opzuigen van het zand/watermengsel op beide niveaus met een debiet van 15 l/min. De zandvangsten zijn gewogen en omgerekend tot een transport in kg/uur.m^1 (gewicht onder water).

De gemiddelde waarde van alle proeven is voor het totale transport 170 kg/uur.m^1 en voor het bodem- en zwevend transport respectievelijk 143 en 27 kg/uur.m^1 . Deze waarden komen in orde van grootte redelijk goed overeen met de transporten zoals die uit de metingen in de zandvang aan het eind van de goot en de zwevend transportmeting zijn bepaald.

Tussen de meetresultaten voor het bodemtransport bevindt zich een viertal dat opvallend hoger is dan de overige waarden. Indien deze waarden (overigens zonder te beargumenteren of dit is toegestaan) bij het berekenen van het gemiddelde worden weggelaten, bedraagt het totale transport 131 kg/uur.m^1 , waarvan 105 kg/uur.m^1 bodemtransport en 26 kg/uur.m^1 zwevend transport.

Vooraf het bodemtransport ligt dan opvallend goed in de buurt van het bodemtransport berekend uit de gegevens van de zandvang en het zwevend transport (103 kg/uur.m^1).

Op grond van de verplaatsingssnelheid en de hoogte van de ribbels kan een schatting van het bodemtransport worden verkregen, indien wordt aangenomen dat de ribbelvormen driehoekig zijn. Bij een gemiddelde verplaatsingssnelheid van $2,2 \text{ m/uur}$ en een gemiddelde ribbelhoogte van $0,10 \text{ m}$ bedraagt deze schatting 109 kg/uur.m^1 (gewicht onder water). Deze waarde komt goed overeen met de eerder berekende gemiddelde bodemtransporten.

Resumerend kan op grond van de proevenserie het volgende worden gekonkludeerd.

In de gegeven morfologische en hydraulische omstandigheden is met de BTMD een bodemtransport gemeten dat gemiddeld in de juiste orde van grootte ligt.

Indien de meetresultaten worden geselecteerd, waarbij opvallend hoge waarden worden weggelaten, ligt het met de BTMD gemeten gemiddelde bodemtransport (105 kg/uur.m^1) zeer dicht bij het via de metingen in de zandvang bepaalde transport (103 kg/uur.m^1) en het via de verplaatsingssnelheid van de ribbels ingeschatte bodemtransport (109 kg/uur.m^1).

2. INLEIDING

Bij het morfologisch onderzoek in het Noordelijk Deltabekken is gebleken dat vooral met betrekking tot natuurgegevens voor het bodemtransport in de benedenrivieren vrijwel geen informatie aanwezig is. Van de bekende technieken voor het meten van bodemtransport blijkt bovendien geen enkele methode betrouwbare resultaten op te leveren. Ten behoeve van het beheer alsmede voor invoer van randvoorwaarde c.q. kalibratie van morfologische modellen zijn natuurgegevens zeer gewenst dan wel noodzakelijk.

In verband met het bovenstaande wordt bij DBW/RIZA in samenwerking met de Meetdienst Noordelijk Deltabekken van de Directie Benedenrivieren gewerkt aan de ontwikkeling van een bodemtransportmeter. Het principe van de meter berust op het opzuigen van het bodemtransport via een aanzuigmond die op de bodem van de rivier wordt neergelaten. Met de meter zijn, naast een aantal experimentele metingen op de Boven Merwede, in juni 1987 enkele oriënterende proeven gedaan in de zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst" met als doel een indruk te krijgen van de waarde van de meter als "point sampler" (ref. 4).

Deze proeven hebben geresulteerd in enkele aanpassingen aan de apparatuur; de meetresultaten waren zodanig dat een herhaling van de proeven verantwoord werd geacht.

In deze nota is verslag gedaan van de proeven die met de aangepaste versie van de bodemtransportmeter in de week van 29 februari t/m 4 maart 1988 zijn uitgevoerd in de zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst".

Het doel van de proeven is gelijk aan dat van de proeven in juni 1987.

3. BESCHRIJVING VAN DE BODEMTRANSPORTMETER

Het principe van de bodemtransportmeter berust op het opzuigen van het zand/water-mengsel via een op de stroom gerichte inlaatopening. Op bijlage 1 zijn de verschillende componenten van het meetsysteem aangegeven.

Met een elektrische centrifugaalpomp wordt het zand/water-mengsel opgezogen via een op de gewenste diepte gebracht, op de stroom gericht buisje of via een inlaatopening gemonteerd op een op de bodem neergelaten bodemplaat. In een bezinkvat sedimenteren de deeltjes > circa 50 μm . In tegenstelling tot de oorspronkelijke versie (ref. 1) is het bezinkvat thans vóór de pomp geplaatst, zodat de pomp en de daarachter geplaatste flow-meter gevrijwaard blijven van het zand. Daardoor komen verstoppingsproblemen in de pomp niet meer voor en is de slijtage van pomp en flow-meter tot een minimum beperkt. Het bezinkvat funktioneert dus als onderdrukvat. Het oorspronkelijke reservoir van polyethyleen is daarom vervangen door een roestvrijstalen vat. Het perspex deksel is voorzien van een rubberen rand; als gevolg van het drukverschil tussen het inwendige van het vat en de atmosfeer tijdens het afpompen wordt hierdoor het reservoir luchtdicht afgesloten.

Een rubberen manchet rondom de rand van het deksel en de bovenrand van het bezinkvat zorgt ervoor dat tijdens het opstarten van de pomp geen lucht in het vat kan toestromen.

Ook de bodemplaat is ten opzichte van de oorspronkelijke versie gewijzigd. De trechtervormige aanzuigmond is op een messing plaatje bevestigd van 15 x 10 cm; de voorrand van het plaatje is een weinig naar onderen rondgezet. Door een hefboommechanisme wordt ervoor gezorgd dat bij de landing van het frame op de rivierbodem het bodemplaatje pas kan dalen nadat het frame de bodem heeft bereikt. Het plaatje kan binnen zekere grenzen naar boven en beneden bewegen alsmede om de lengte-as roteren, zodat het zich kan aanpassen aan de bodemhelling. Bij de entree is de aanzuigmond inwendig 5 cm breed en 1 cm hoog. Bijlage 2 toont het frame gemonteerd onder een meetvis.

Tijdens de proeven in de zandgoot is het frame van de meetvis verwijderd. De bovenste aanzuigmond is met behulp van beugels op het frame bevestigd en bevond zich op 11 cm boven de onderkant van de slede. Deze afstand is volstrekt arbitrair en is in feite bepaald door de bevestigingsmogelijkheden.

4. UITVOERING VAN DE PROEVEN

4.1. Hydraulische en morfologische omstandigheden

De proeven zijn uitgevoerd in de grote zandgoot van het Waterloopkundig Laboratorium "De Voorst".

Bijlage 3 geeft een schematisch overzicht van de goot (ref. 2).

Ten behoeve van de proeven met de bodemtransportmeter was in de goot zand aangebracht met een korrelverdeling die redelijk goed overeenkomt met die van het zand op de bodem van de Boven Merwede, even bovenstrooms van het splitsingspunt Werkendam in het midden van de rivier. In tabel 4.1 zijn enkele kenmerkende korreldiameters weergegeven (de indices geven het gewichtspercentage aan van de deeltjes met een kleinere diameter dan de aangegeven waarde).

Tabel 4.1 Kenmerkende korreldiameters (in μm).

korrel- diameter	zandgoot	Boven Merwede (ref. 3)	
		kmr 960	kmr 960.5
d_{10}	380	300	290
d_{50}	450	430	415
d_{90}	605	610	610

Uit tabel 4.1 blijkt dat het zand in de goot gemiddeld iets grover is dan het zand op de bodem van de Boven Merwede nabij het splitsingspunt; het is bovendien iets uniformer van samenstelling. Bijlage 4 toont de korrelverdeling van het zand in de goot.

Gedurende twee weken voorafgaand aan de proeven is de zandgoot voortdurend in bedrijf geweest om het zand schoon te spoelen van fijne slibdeeltjes. Daardoor was het zicht door de goot tijdens de metingen voldoende voor visuele waarnemingen en video-opnamen.

Het totale debiet door de goot bedroeg $0,386 \text{ m}^3/\text{s}$; de gootbreedte was $1,50 \text{ m}$; de gemiddelde waterdiepte $0,38 \text{ m}$. De over het dwarsprofiel gemiddelde stroomsnelheid bedroeg volgens deze gegevens dus $0,68 \text{ m/s}$.

Onder invloed van genoemde stroom-omstandigheden worden op de bodem ribbels gevormd, die in lengterichting zeer onregelmatig van vorm zijn. Ook in dwarsrichting is de vorm niet overal gelijk.

Slechts bij uitzondering is er sprake van een min of meer loodrecht op de stroom gelegen ribbelfront. De ribbelhoogten varieerden van enkele cm's tot 2 dm. De gemiddelde hoogte is circa 10 cm.

De verplaatsingssnelheid van de ribbelfronten bedroeg gemiddeld circa 2,2 m/uur.

Bijlage 5 geeft een indruk van de verplaatsing van de ribbels in de tijd. Voor één van de meetdagen zijn de in het midden van de goot opgemeten lengteprofielen tegen de tijd uitgezet. Enkele toppen van een zelfde ribbel zijn door een rechte lijn met elkaar verbonden. De helling van deze lijn is een maat voor de verplaatsingssnelheid. Het zandtransport wordt aan het einde van de goot gemeten als totaal transport door de tijd te meten voor het opvangen van 25 kg zand (onder water gewogen). De gemiddelde dagwaarden zijn in tabel 4.2 weergegeven voor de periode 29 februari t/m 4 maart 1988 (de week waarin de proeven zijn gehouden).

Tabel 4.2 Gemiddelde dagwaarden.

datum	gemiddeld zandtransport in kg/uur (onder water gewogen)
29-02-1988	207
01-03-1988	208
02-03-1988	202
03-03-1988	203
04-03-1988	208
gemiddeld	206
het gemiddelde transport per m ¹ gootbreedte bedraagt 137 kg/uur.m ¹	

4.2. Observatie van de aanzuigkonstruktie

Gesteld kan worden dat, door de ten opzichte van de vorige versie verbeterde konstruktie van de zuigmond, de bodemplaat nu beter aansluit aan de bodem.

Niettemin kwam het voor dat gedurende een afzuigproef als gevolg van erosie tijdelijk een spleet ontstond tussen de bodemplaat en de zandbodem of dat de bodemplaat na zekere tijd onder een bodemribbel werd bedolven.

In het eerste geval zal de "vangst" te gering zijn, omdat een deel van het bodemtransport onder de bodemplaat doorgaat.

In het andere geval is de vangst te groot, omdat rechtstreeks van de bodem wordt opgezogen. Het eerste probleem is te ondervangen door de vorm van het bodemplaatje enigszins aan te passen. (Dit is op de laatste meetdag uitgeprobeerd door het plaatje voor de zuigmond onder een geringe hoek naar beneden te buigen, op het oog gaf dit een aanzienlijke verbetering). Het tweede probleem kan worden ondervangen door de meetduur te beperken. Het nadeel is dan echter dat de vangst geringer wordt en dus relatief minder nauwkeurig te wegen is. Voor de gedurende de meetweek uitgevoerde proeven is in verband met dit aspect gekozen voor een meetduur van 10 minuten. De overige onderdelen van het meetsysteem hebben tijdens de meetweek zonder problemen gefunctioneerd. De gekozen opstelling met het bezinkvat vóór de pomp blijkt een goede keus te zijn geweest.

4.3. Meetprocedure

De proeven zijn als volgt uitgevoerd.

Nadat de slede met behulp van een takel op de bodem van de goot was neergezet is telkens met een debiet van 15 l/min gedurende 10 minuten afgezogen via de mond op de bodemplaat en via een aanzuigmond op 11 cm daarboven. De plaats van de zuigmond is per proef voortdurend gevarieerd tussen top, flank en dal van een ribbel. Direct voorafgaand en na afloop van een proef is met de meetwagen in het meetgebied over een lengte van circa 6 m in drie langsvaarten het bodemprofiel opgemeten (- 0,50 m, midden en + 0,50 m). Bijlage 6 geeft een voorbeeld van deze opnamen.

De vangsten via de onderste zuigmond zijn na afloop van de proef onder water gewogen met behulp van een unster. De vangsten via de bovenste zuigmond waren voor deze procedure te gering.

Zij zijn na afloop van de proefweek in het laboratorium van DBW/RIZA te Dordrecht gedroogd en vervolgens gewogen.

5. RESULTATEN

Op bijlage 7 zijn de resultaten van de proeven vermeld. De vangsten via de onderste zuigmond zijn omgerekend tot transporten in kg/uur.m^1 (onder water gewogen). De metingen met behulp van de bovenste zuigmond zijn in kolom 2 uitgedrukt als concentratie (drooggewicht in mg/l). In kolom 3 zijn de meetwaarden omgerekend tot een transport in kg/uur.m^1 (gewicht onder water). Daartoe heeft de volgende omrekening plaatsgevonden. Verondersteld is dat de concentratie representatief is voor het zwevend transport over het gehele profiel. Dit transport kan dan worden ingeschat door vermenigvuldiging van de concentratie met het gemiddelde debiet in de goot ($0,386 \text{ m}^3/\text{s} = 1.389,6 \text{ m}^3/\text{uur}$). Voor omrekening naar gewicht onder water moet het produkt nog worden vermenigvuldigd met de faktor:

$$\frac{\phi_S - \phi_W}{\phi_S}$$

(ϕ_S = soortelijke massa van zand: 2.650 kg/m^3 ; ϕ_W = soortelijke massa van water: 1.000 kg/m^3). Voor de omrekening naar een breedte van 1 m dient het transport te worden gedeeld door 1,5 (gootbreedte = 1,5 m).

Uit bijlage 7 blijkt dat volgens de metingen het bodemtransport het grootste aandeel heeft in het totale transport (circa 85%). Het totale transport volgens 33 metingen met de BTMD heeft een gemiddelde waarde van $\bar{Z} = 170 \text{ kg/uur.m}^1$ met een standaardafwijking van 125 kg/uur.m^1 .

Uit het overzicht blijkt dat de meetwaarden van enkele proeven nogal sterk afwijken van de overige (proeven 11, 13, 17 en 39).

Als mogelijke oorzaken kunnen worden genoemd:

het direkt opzuigen uit de bodem als gevolg van een scheef duin of de aankomst van een ribbel(tje) of een lokale kleine verlaging in de bodem, waardoor de zuigmond onder het zand wordt bedolven.

In figuur a op bijlage 8 is de relatieve frekwentieverdeling van de bodemtransportmetingen met de BTMD in klassen ter grootte van 50 kg/uur.m^1 aangegeven.

Figuur b op bijlage 8 toont de frekwentieverdeling van het bodemtransport afgeleid uit de metingen in de zandvang aan het eind van de goot (totaal transport verminderd met zwevend transport).

Deze verdeling is opgesteld op grond van de metingen op 29 februari (op deze dag was het gemiddelde transport ongeveer gelijk aan het weekgemiddelde, zie tabel 4.1).

In figuur c op bijlage 8 is de frekwentieverdeling aangegeven van de metingen op 2 maart. Beide laatste figuren geven aan hoe het bodemtransport varieert als gevolg van de pulserende ribbels aan het eind van de goot.

Gekonkludeerd kan worden dat de frekwentieverdeling van de bodemtransportmetingen met uitzondering van die in de hogere klassen redelijk goed overeenkomt met de verdeling volgens de metingen in de zandgoot. Hierbij moet wel bedacht worden dat de verdeling van de bodemtransportmetingen op slechts 33 metingen is gebaseerd.

Indien de opvallend hoge waarden bij de berekening van het gemiddelde worden genegeerd dan vindt men:

$$\bar{Z} = 130 \text{ kg/uur.m}^1 \quad (\sigma = 69 \text{ kg/uur.m}^1).$$

Het gemiddelde totale transport volgens de metingen aan het eind van de goot bedraagt 137 kg/uur.m¹ (zie tabel 4.2). Uit een steekproef uit de momentane waarden blijkt dat de standaardafwijking in dezelfde orde van grootte ligt als die van de metingen met de bodemtransportmeter.

Gekonkludeerd mag worden dat de gemiddelde waarde voor het totale transport volgens de metingen met de BTMD redelijk goed overeenkomt met het gemiddelde totale transport aan het einde van de zandgoot. De BTMD geeft een 24% hogere waarde als alle 33 metingen worden gemiddeld en een 5% lagere waarde als een viertal hoge "uitschieters" niet wordt meegenomen.

In de zandgoot wordt het totale transport bepaald door middel van het meten van z.g. "droptijden" voor het verzamelen van 25 kg zand in de zandvang aan het einde van de goot. Om een indruk te krijgen welk aandeel het zwevend transport aan het totale transport levert zijn op de laatste dag van de meetweek enkele zwevend transportmetingen uitgevoerd, waarbij tevens snelheidsvertikalen zijn opgemeten.

Ten behoeve van deze zwevend transportmetingen is de bodemplaat van het frame verwijderd en is op 20 cm onder de bovenste zuigmond een ronde aanzuigmond gemonteerd met een inwendige diameter van 16 mm.

Door deze opstelling kon tegelijkertijd op twee niveaus worden gemeten. Met de aanzuigmondjes op respectievelijk 15 en 35 cm onder het wateroppervlak is gedurende 36 minuten afgezogen met een debiet van 15 l/min. (Na deze meetduur dreigde het onderste zuigmondje te verdwijnen in een aankomend ribbelfront). Vervolgens is met de zuigmondjes op respectievelijk 5 en 25 cm onder het wateroppervlak gedurende 60 minuten eveneens met 15 l/min afgezogen.

De zandvangsten zijn in het laboratorium van DBW/RIZA te Dordrecht gedroogd en gewogen. In tabel 5.1 zijn de sedimentconcentraties vermeld.

Tabel 5.1 Sedimentconcentraties.

diepte - wateroppervlak in cm	zwevend transport
	concentratie in mg/l (drooggewicht)
5	3,7
15	25,6
25	37,8
35	309,1

Om op grond van de concentraties in tabel 5.1 een transport door het dwarsprofiel te berekenen dient de snelheidsverdeling over de vertikaal bekend te zijn.

Met behulp van een miniatuur Ott-molen zijn daartoe ongeveer halverwege een ribbelflank op respectievelijk 5, 10, 15, 20, 25 en 30 cm beneden het wateroppervlak snelheidsmetingen gedaan (éénmaal in een neergaande slag en éénmaal in een opgaande slag). In tabel 5.2 zijn de resultaten vermeld.

Tabel 5.2 Resultaten snelheidsmetingen.

diepte - wateropp. in cm	snelheden in m/s		
	neergaand	opgaand	gemiddeld
5	0,76	0,79	0,78
10	0,84	0,82	0,83
15	0,81	0,80	0,81
20	0,79	0,79	0,79
25	0,73	0,73	0,73
30	0,73	0,73	0,73
bodem = ≈ - 35			

Uit tabel 5.2 blijkt dat er slechts een geringe afname van de snelheid met de diepte is. De gemiddelde snelheid in de meetvertikaal bedraagt 0,78 m/s. De gemiddelde snelheid in het dwarsprofiel berekend uit het debiet en de oppervlakte van het dwarsprofiel bedraagt 0,68 m/s. Het verschil tussen beide gemiddelden wordt veroorzaakt door de snelheidsverdeling in dwarsrichting (wand-invloed).

Voor een inschatting van de grootte van het zwevend transport op grond van de concentratiemetingen in het midden van de goot (tabel 5.1) lijkt het verantwoord uit te gaan van een gemiddelde snelheid van 0,68 m/s op elk diepteniveau. De drie bovenste concentratiemetingen zijn representatief gesteld voor een zone van 10 cm (5 cm boven en 5 cm onder het meetniveau); de onderste meting is representatief gesteld voor een zone van 5 cm boven het meetpunt.

In tabel 5.3 is het zwevend transport per zone en als totaal aangegeven.

Tabel 5.3 Zwevend transport per zone en als totaal.

zone beneden water- oppervlak in cm (breedte = 1 m)	zwevend transport		
	koncen- tratie in kg/m ³ (droog- gewicht)	gemid- delde snelheid in m/s	transport in kg/uur.m ¹ (gewicht onder wa- ter)
0 - 10	3,7.10 ⁻³	0,68	0,5
10 - 20	25,6.10 ⁻³	0,68	3,9
20 - 30	37,8.10 ⁻³	0,68	5,7
30 - 35	309,1.10 ⁻³	0,68	23,6
totaal			33,7
het transport is berekend met:			
$T = \frac{\phi_S - \phi_W}{\phi_S} \cdot 3600 \cdot A \cdot c \cdot v \quad [\text{kg/uur.m}^1]$			
A = oppervlakte zone			[m ²]
c = concentratie			[kg/m ³]
v = gemiddelde snelheid			[m/s]

Uit de resultaten van de zwevend transportmeting blijkt dat het totale zwevend transport door het dwarsprofiel circa 34 kg/uur.m¹ bedraagt.

Dit is circa 7 kg/uur.m¹ hoger dan de gemiddelde waarde bepaald uit de concentratiemetingen met behulp van het aanzuigbuisje op 11 cm boven de bodem. Uitgaande van een gemiddeld totaal transport berekend uit de "droptijden" zou volgens bovenstaande inschatting van het zwevend transport het bodemtransport 103 kg/uur.m¹ (137-34) moeten bedragen. Indien men de waarde van 34 kg/uur.m¹ voor het zwevend transport door het dwarsprofiel als korrek beschouwd, dient het gemiddelde totaal transport zoals aangegeven op bijlage 7 nog met 7 kg/uur.m¹ te worden verhoogd.

Het uit 33 proeven berekende gemiddelde totaal transport zou dan 177 kg/uur.m¹ bedragen (143 kg/uur.m¹ bodemtransport, 34 kg/uur.m¹ zwevend transport).

Als de vier hoogste meetwaarden worden weggelaten, bedraagt het gemiddelde totaal transport 139 kg/uur.m¹ (105 kg/uur.m¹ bodemtransport, 34 kg/uur.m¹ zwevend transport). Opmerkelijk is dat in dit geval het gemiddelde totale transport vrijwel overeenkomt met het gemiddelde totale transport berekend uit de "droptijden" aan het einde van de goot (137 kg/uur.m¹).

Tot slot is nog een inschatting gedaan van de grootte van het bodemtransport op grond van de verplaatsingssnelheid en de hoogte van de ribbels ("dune tracking"). In principe is het mogelijk het transport te bepalen op grond van de verplaatsing van één of meerdere ribbels. Omdat de ribbels in de goot onderling in hoogte sterk variëren en ook in dwarsrichting niet "homogeen" zijn, is gekozen voor een benadering van het transport op grond van de gemiddelde verplaatsingssnelheid en de gemiddelde hoogte van de ribbels in het midden van de goot.

Er vanuit gaande dat een ribbelform bij benadering driehoekig is, kan het bodemtransport worden berekend met:

$$\bar{S}_b = (1 - P) c_b \cdot \frac{1}{2} H (\phi_s - \phi_w)$$

Hierin is:

\bar{S}_b = het gemiddelde bodemtransport in kg/uur.m¹
(gewicht onder water);

P = het poriëngehalte van de ribbels;

c_b = de gemiddelde verplaatsingssnelheid van de ribbels in m/uur;

H = de gemiddelde ribbelhoogte in m;

ϕ_s = de soortelijke massa van zand in kg/m³;

ϕ_w = de soortelijke massa van water in kg/m³.

De gemiddelde ribbelhoogte is uit de langsprofielen van een aantal metingen vastgesteld op 0,10 m.

De gemiddelde verplaatsingssnelheid van de ribbels bedraagt 2,2 m/uur.

Met bovenstaande waarden en $P = 0,4$; $\phi_s = 2.650 \text{ kg/m}^3$ en $\phi_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$ vindt men voor het bodemtransport:

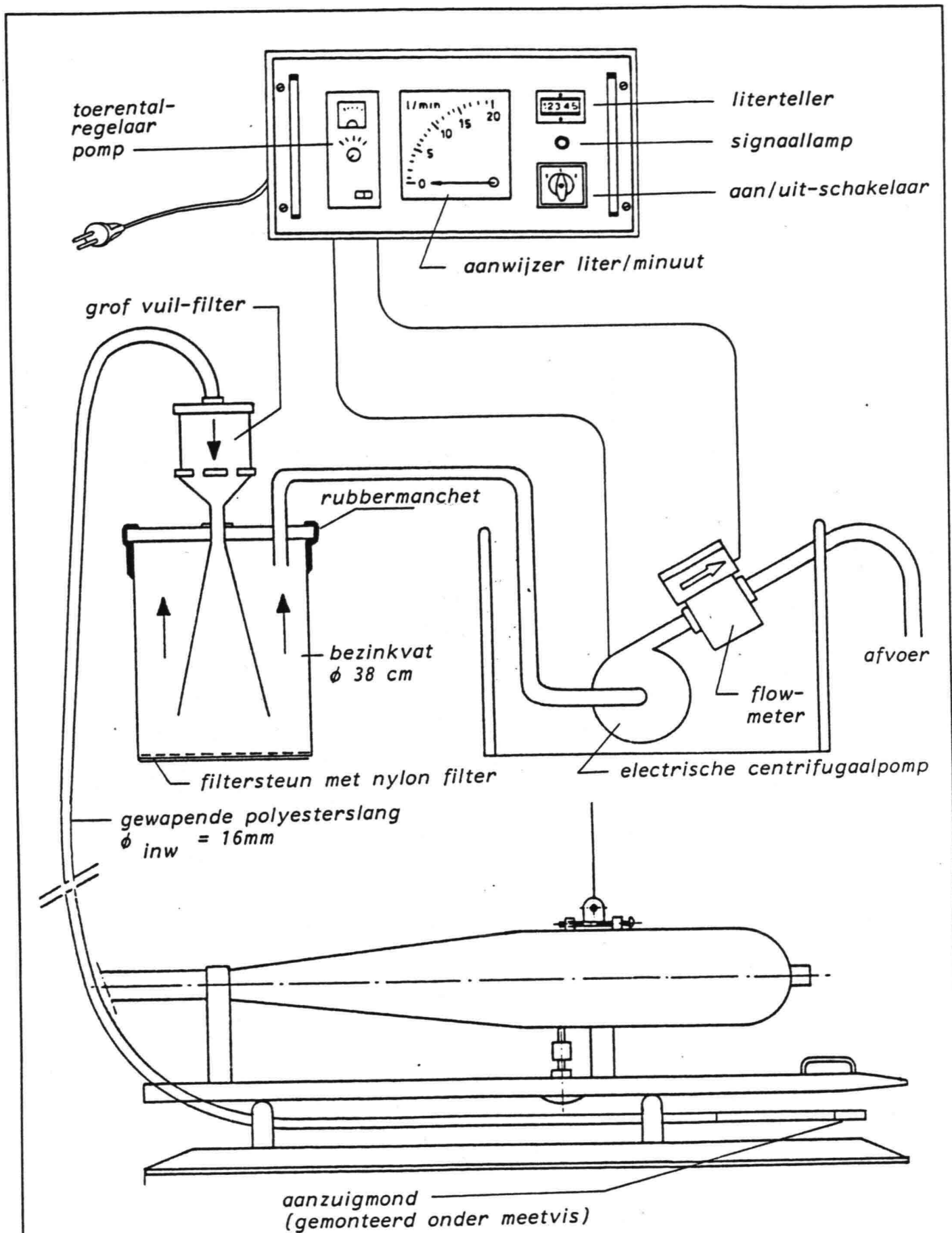
$$\bar{S}_b = 109 \text{ kg/uur.m}^1$$

De met de BTMD gevonden gemiddelde waarde voor het bodemtransport blijkt redelijk goed met deze inschatting overeen te komen. Indien de vier hoogste meetwaarden worden weggelaten, komt de gemiddelde waarde (105 kg/uur.m^1) zelfs zeer goed overeen met het via de verplaatsing van de ribbels berekende bodemtransport. Het uit de "droptijden" en de zwevend transportmeting berekende bodemtransport (103 kg/uur.m^1) en het via de ribbelverplaatsing berekende bodemtransport komen eveneens goed met elkaar overeen.

In tabel 5.4 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 5.4 Resultaten.

bodemtransport volgens:	kg/uur.m ¹
BTMD	105
weegstelsel	103 *
zandgoot	109
"dune tracking"	
* gemeten totaal transport	137 kg/uur.m ¹
gemeten zwevend transport	34 kg/uur.m ¹

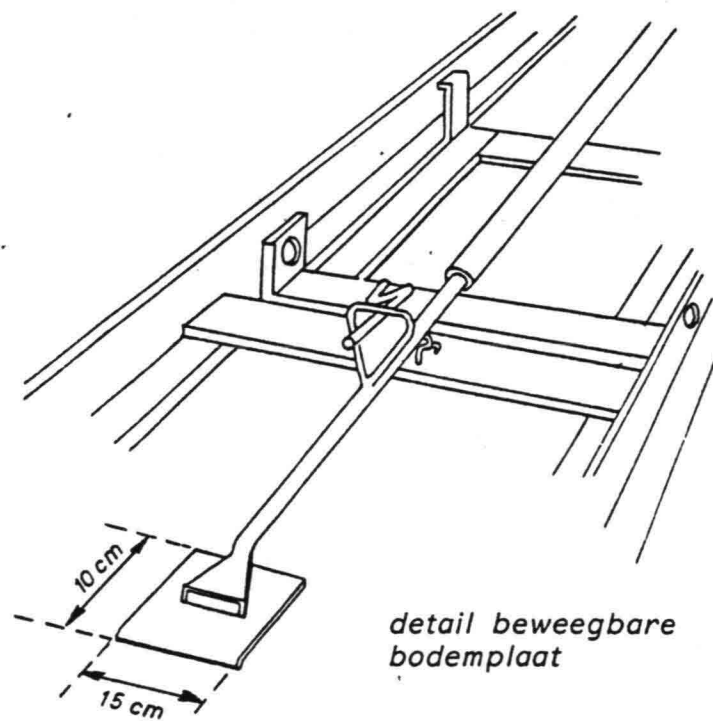
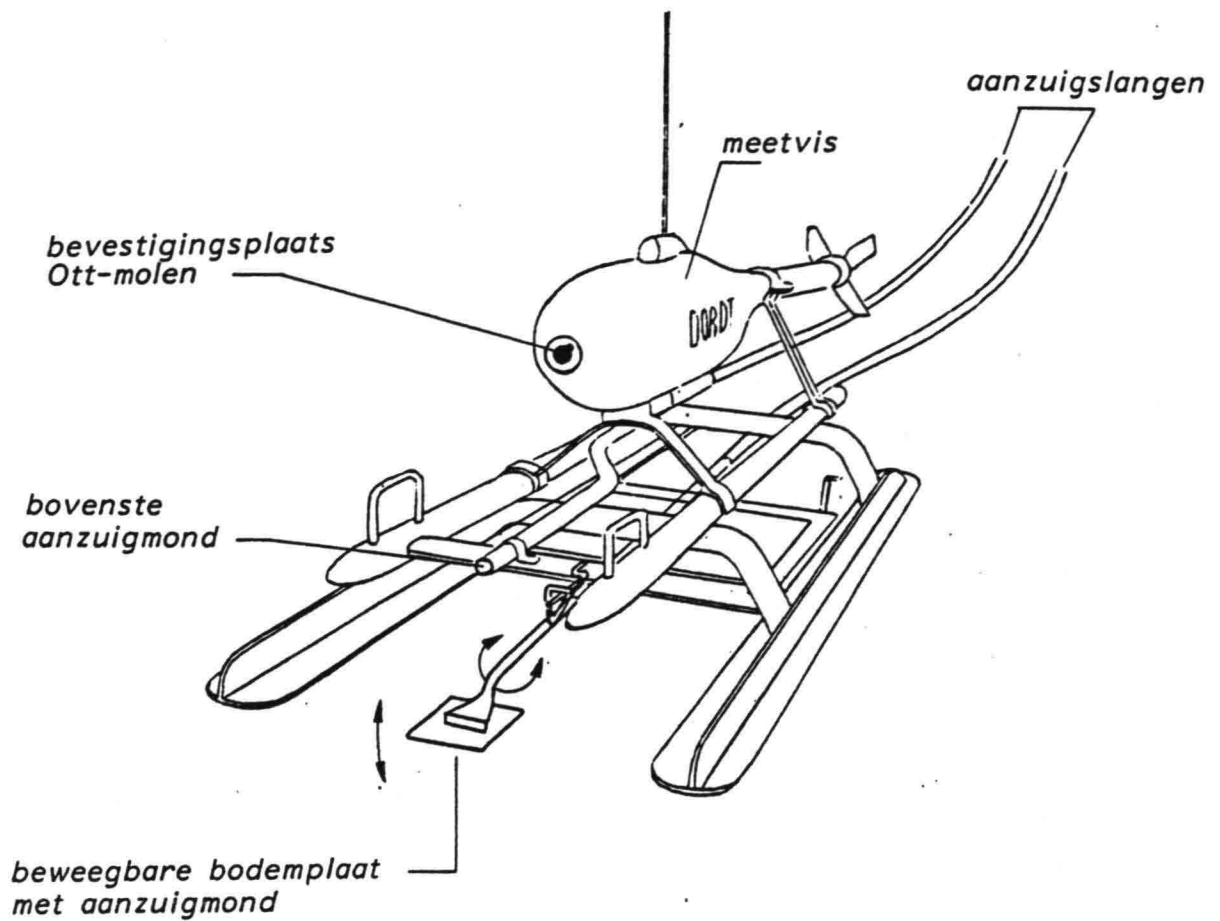


PRINCIPE BODEMTRANSPORTMETER "DORDRECHT"

RIJKSWATERSTAAT
DIENST BINNENWATEREN/RIZA
HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

nota 88.022

bijlage 1



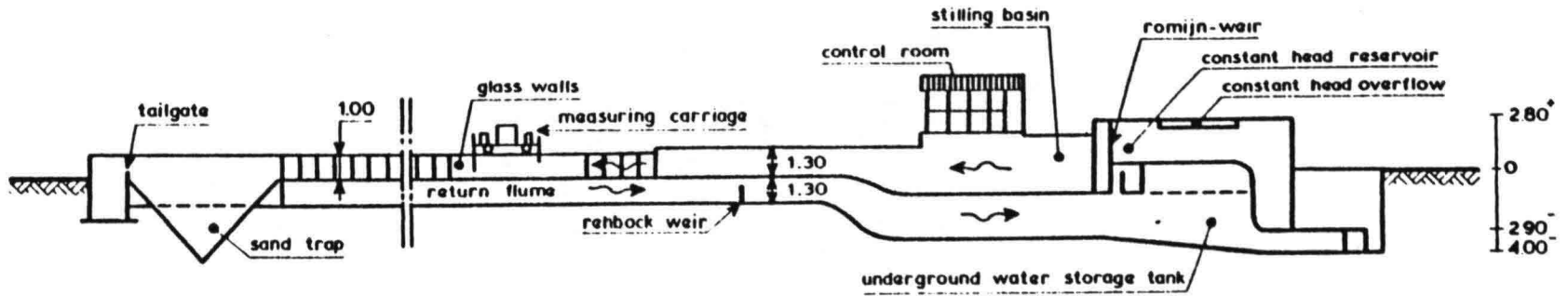
MEETVIS MET FRAME VOOR BODEMTRANSPORTMETINGEN

RIJKSWATERSTAAT
DIENST BINNENWATEREN/RIZA
HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

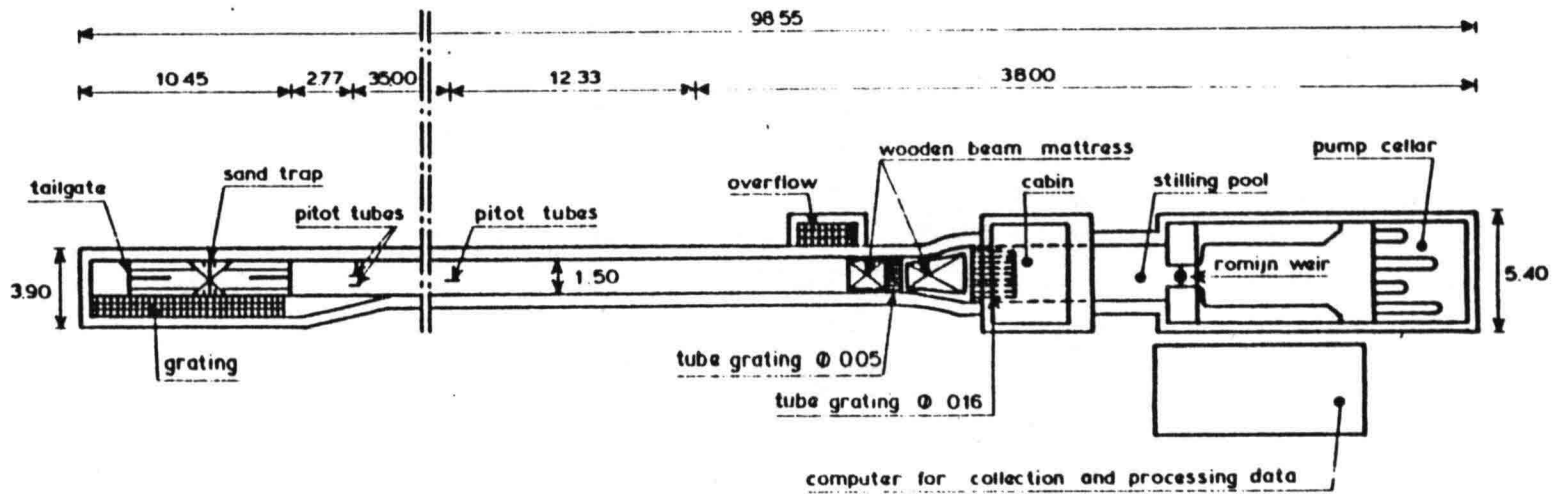
nota 88.022

bijlage 2

OVERZICHT GROTE ZANDGOOT

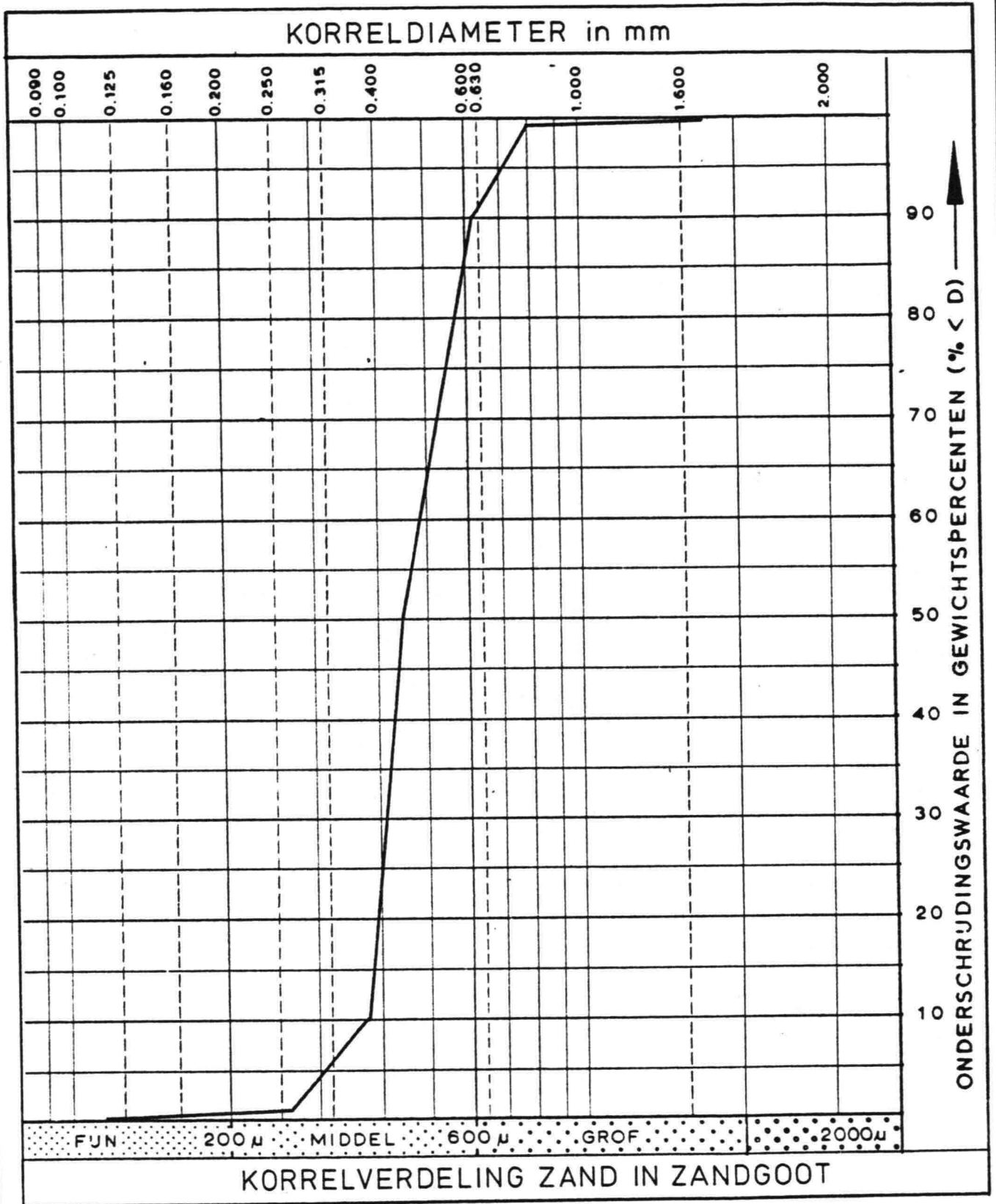


LONGITUDINAL SECTION



TOP VIEW

measurements in m

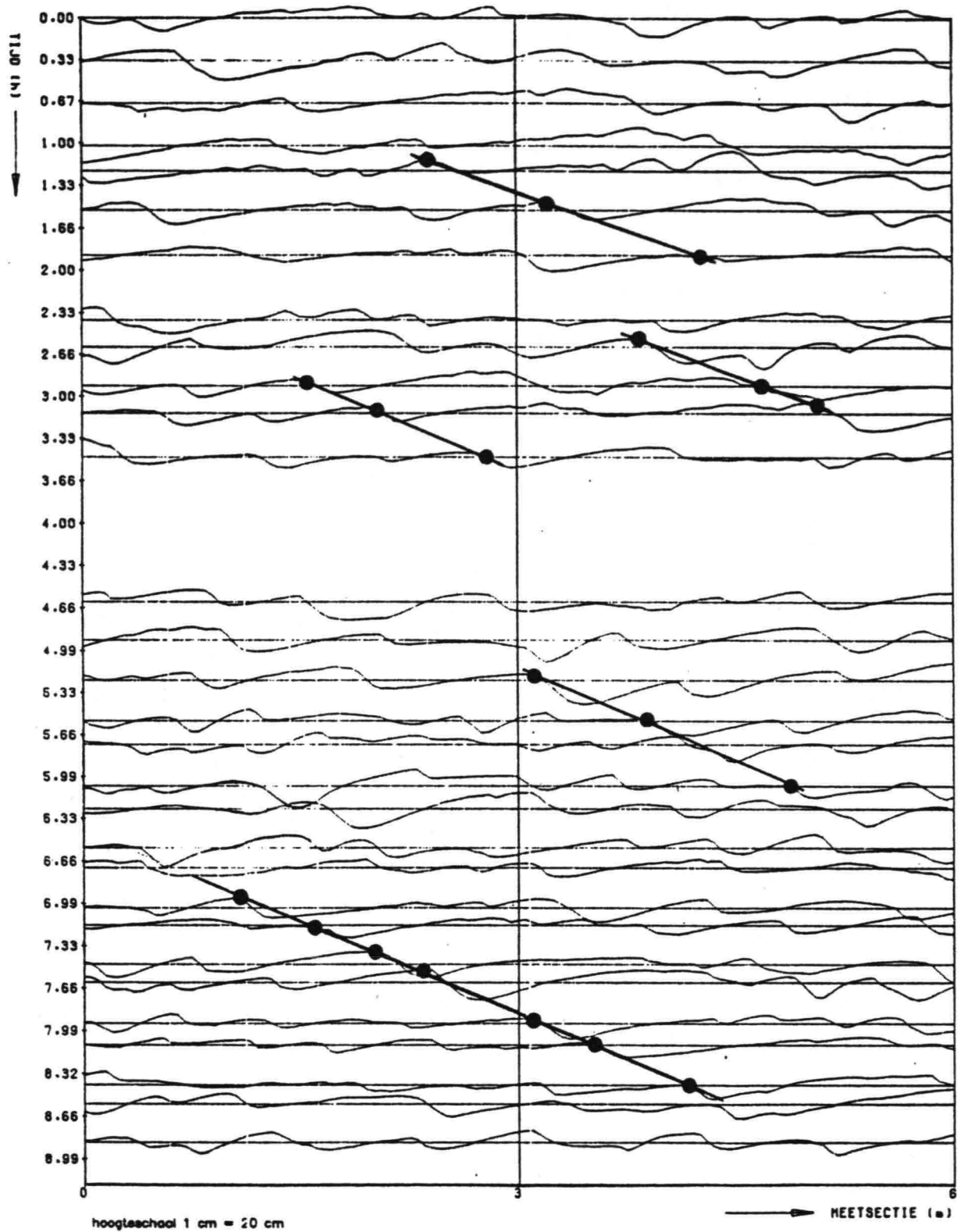


KORRELVERDELING ZAND IN ZANDGOOT

RIJKSWATERSTAAT
DIENST BINNENWATEREN/RIZA
HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

nota 88.022

bijlage 4

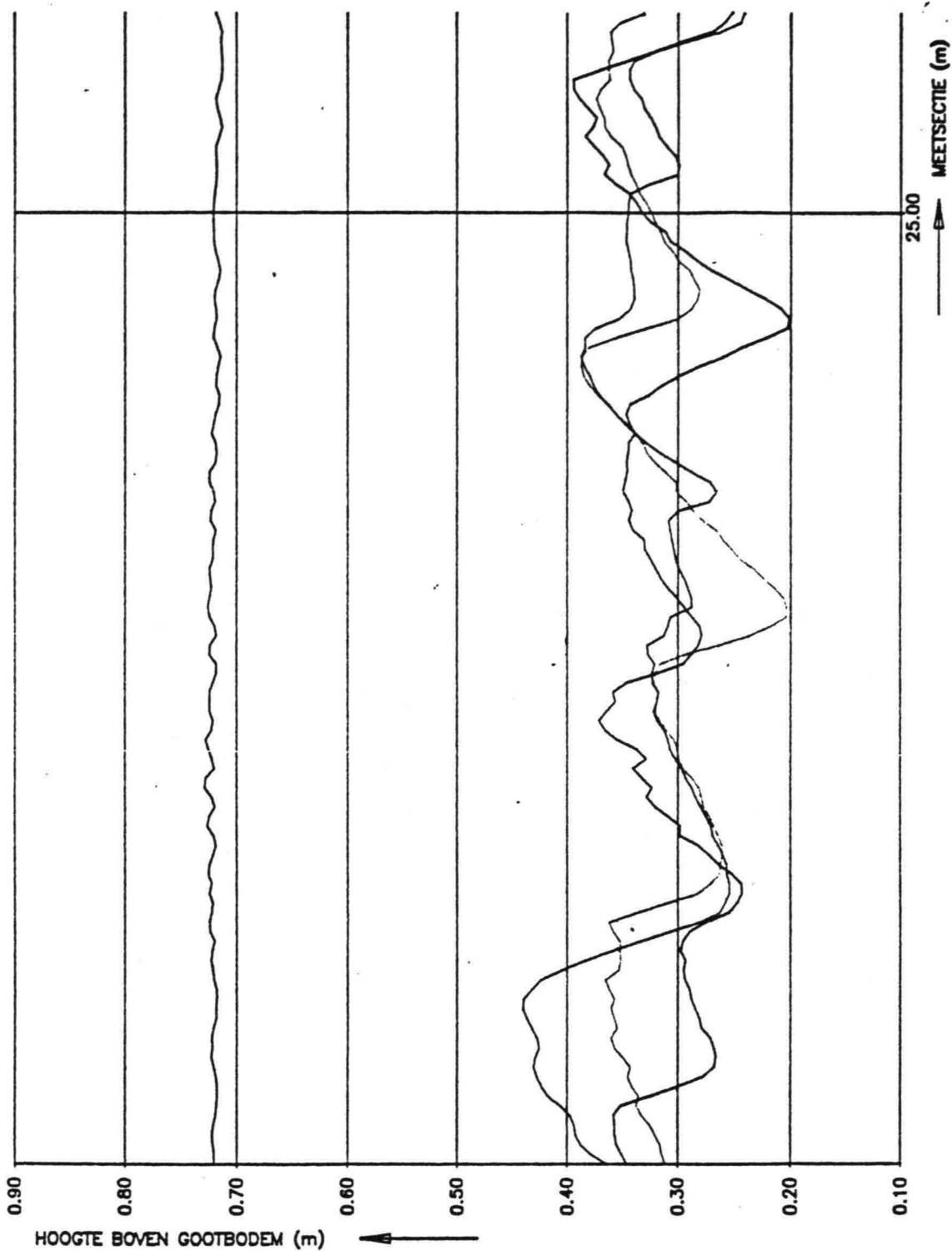


BODEMPROFIELEN ZANDGOOT TIJDENS METINGEN BTMD D.D. 2 MAART 1988

RIJKSWATERSTAAT
DIENST BINNENWATEREN/RIZA
HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

nota 88.022

bijlage 5



————— WAPRO
 ————— PROVO 1
 ————— PROVO 2

————— PROVO 3

DATUM : 04-03-88
 METING : 1

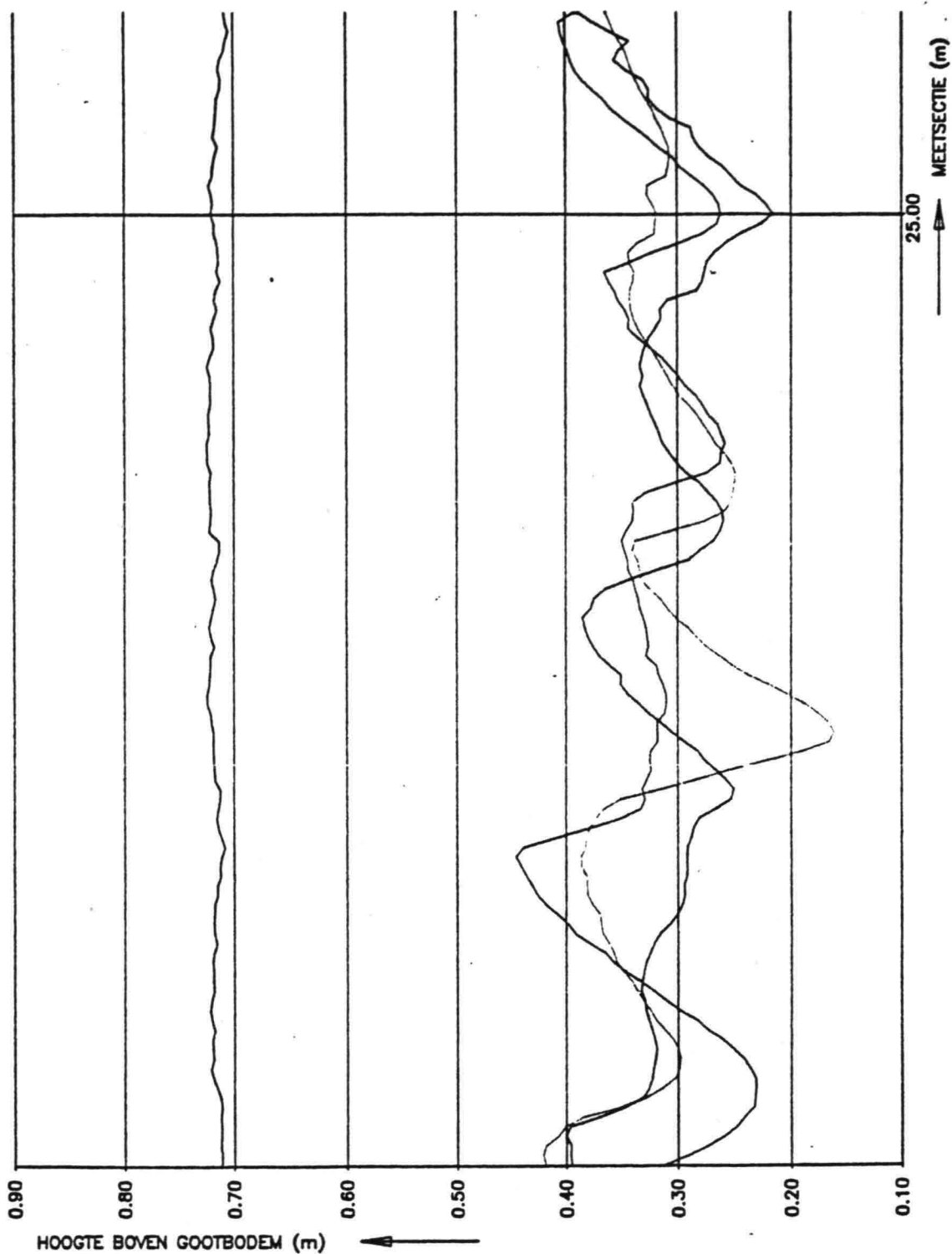
(WAPRO = opnemer waterpeil; PROVO = opnemer bodemprofiel)

WATERSPIEGEL EN BODEMLIGGING VOOR PROEF NR 36

RIJKSWATERSTAAT
 DIENST BINNENWATEREN/RIZA
 HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

nota 88.022

bijlage 6.1



——— WAPRO
 ——— PROVO 1
 ——— PROVO 2

————— PROVO 3

DATUM : 04-03-88

METING : 2

(WAPRO = opnemer waterpeil; PROVO = opnemer bodemprofiel)

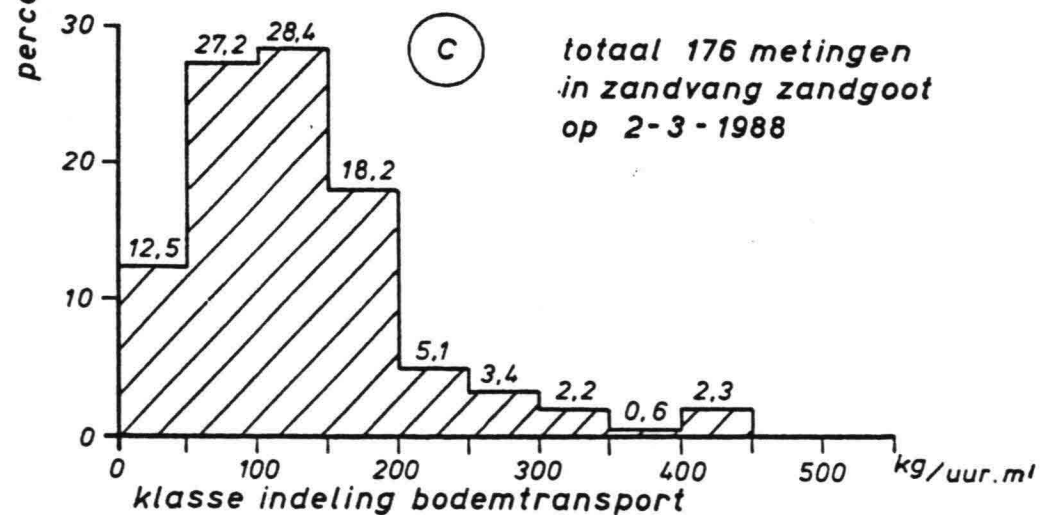
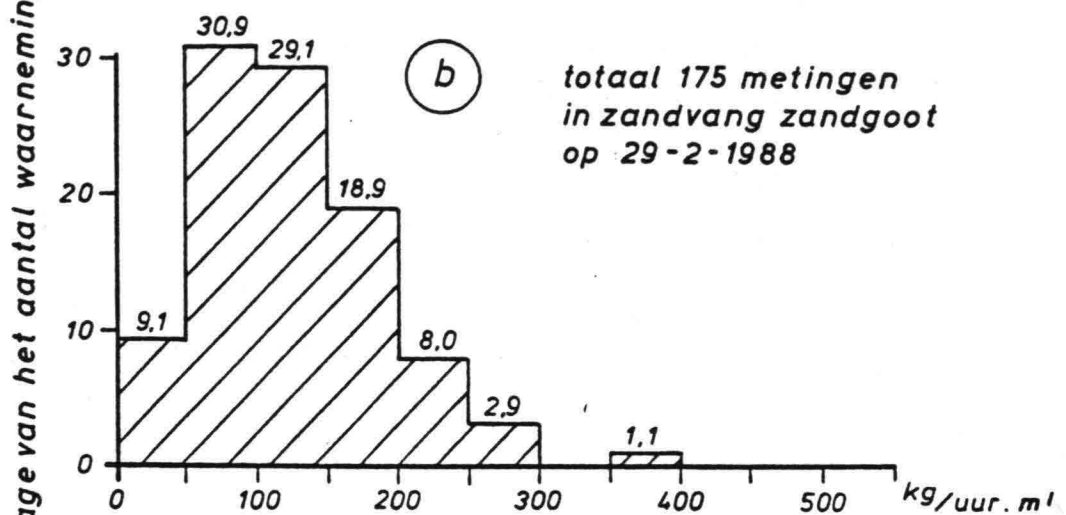
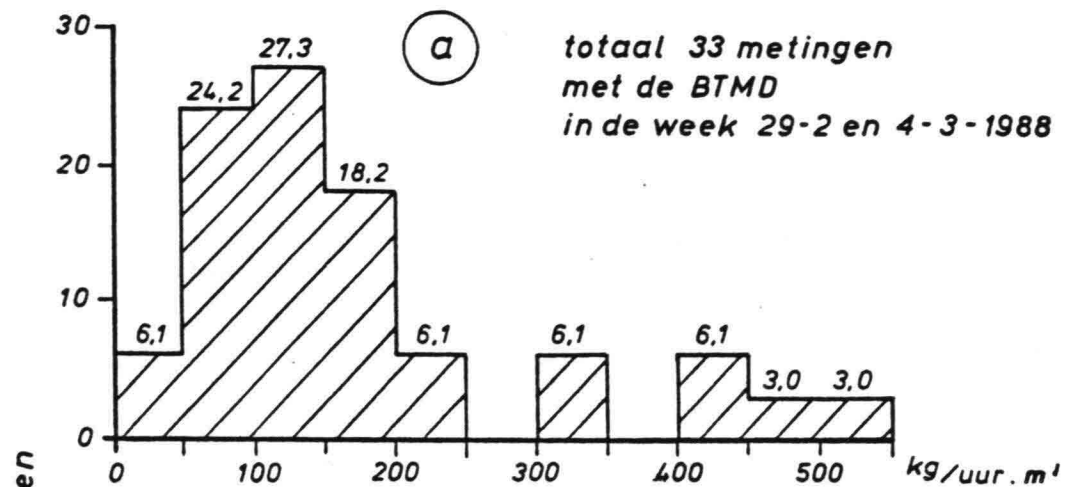
WATERSPIEGEL EN BODEMLIGGING NA PROEF NR 36

RIJKSWATERSTAAT
 DIENST BINNENWATEREN/RIZA
 HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

nota 88.022

bijlage 6.2

PROEF nr	ZUIGMOND ONDER kg/uur.m ¹ (gewicht onder water)	ZUIGMOND BOVEN koncentratie in mg/l (droogge- wicht)	ZWEVEND TRANSPORT kg/uur.m ¹ (gewicht onder water)	TOTAAL TRANSPORT kg/uur.m ¹ (gewicht onder water)
1	240	126,7	74	314
2	- - - - - m o n s t e r n a m e m i s l u k t - - - - -			
3	42	102,6	60	102
4	20	53,5	31	51
5	126	51,3	30	156
6	156	142,8	83	239
7	85	116,1	67	152
8	83	31,1	18	101
9	73	23,2	14	87
10	47	70,1	41	88
11	395	11,5	7	402
12	107	38,3	22	129
13	520	28,6	17	537
14	70	18,2	11	81
15	97	46,7	27	124
16	150	11,3	7	157
17	312	157,9	92	404
18	77	21,7	13	90
19	222	31,6	18	240
20	172	12,5	7	179
21	40	20,8	12	52
22	24	30,0	21	45
23	90	63,4	37	127
24	97	21,3	12	109
25	107	31,8	19	126
26	54	25,5	15	69
27	130	38,2	22	152
28	134	20,1	12	146
29	36	37,3	22	58
30	98	23,5	14	112
31	137	35,3	21	158
36	24	32,9	19	43
37	294	11,2	7	301
38	- - - - - m o n s t e r n a m e m i s l u k t - - - - -			
39	454	32,7	19	473
\bar{x}	143		27	170
σ	123		22	125
n	33		33	33
\bar{x} *)	105		26	131
σ	65		20	69
n	29		29	29
*) proefnrs 11, 13, 17 en 39 niet meegenomen				
RESULTATEN VAN DE PROEVEN				
RIJKSWATERSTAAT DIENST BINNENWATEREN/RIZA HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN			nota	88.022
			bijlage	7



RELATIEVE FREKWENTIEVERDELINGEN

RIJKSWATERSTAAT
DIENST BINNENWATEREN/RIZA
HOOFDAFDELING WATERSYSTEMEN

nota	88.022
bijlage	8

