

Rijkswaterstaat-DWW

zand-watermengselstromingen

het storten van zand onder water, 5

CO-294750

Z261

augustus 1988

verslag experimentele vervolgstudie
middelgrof zand




GRONDMECHANICA
DELFT



waterloopkundig laboratorium | wl

Z0261

Rijkswaterstaat - DWW

	bibliotheek postbus 177 - 2600 MH Delft waterloopkundig laboratorium/WL
BB	3040
WL	70261
EXPL	

zand - watermengselstromingen

R0005755

CO-294750
Z261
augustus 1988

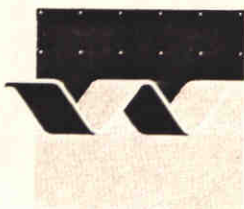
het storten van zand onder water, 5

verslag experimentele vervolgstudie
middelgrof zand

D.R. Mastbergen / A. Bezuijen



GRONDMECHANICA
DELFT



waterloopkundig laboratorium | WL

Inhoud

Blz.

Symbolenlijst

Definities

Lijst van figuren

1.	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	1
2.	INLEIDING EN OPDRACHT	5
3.	EXPERIMENTELE FACILITEIT	7
3.1	Zand	7
3.1.2	Randeffecten	8
3.1.3	Valsnelheidsanalyse	9
3.1.4	Valsnelheidsreductie bij hoge concentraties	11
3.2	Stroomgoot	12
3.3	Zandproductie- en leidingsysteem	13
3.4	Instrumentatie en fotografie WL	14
3.4.1	Data-acquisitiesysteem	14
3.4.2	Regel- en controle-instrumenten	15
3.4.3	Instrumentatie meetwagen	17
3.4.4	Fotografische registraties	17
3.5	Instrumentatie GD	18
3.6	Proevenprogramma	19
4.	BESCHRIJVING VAN DE WAARGENOMEN PROCESSEN	21
4.1	Typen zand-watermengselstroming	21
4.2	Stortontwikkeling	22
4.2.1	Proef Q01	23
4.2.2	Proef Q02	24
4.2.3	Proef Q03	25
4.2.4	Proef Q04	26
5.	HYDRAULISCHE ASPECTEN	28
5.1	Hydraulische metingen	28
5.1.1	Meetprocedure	28
5.1.2	Analyse periode a	29
5.1.2.1	Stortparameters	29
5.1.2.2	Positie meetwagen	29
5.1.2.3	Mengselstroomsnelheid	30
5.1.2.4	Zandconcentraties	30
5.1.2.5	Zandflux	32
5.1.3	Analyse periode b van proef Q01	33
5.2	Storthelling	34
5.2.1	Verband met de specifieke zandproductie	35
5.2.2	Verband met de korreldiameter	35

Inhoud (vervolg)

	<u>Blz.</u>	
5.3	Classificatie stortproeven	37
5.3.1	Grondmechanische kentallen	37
5.3.2	Hydraulisch kental	38
5.3.3	Classificatiematrix	40
5.4	Theoretische classificatietypen zand-watermengselstroming	40
5.4.1	Reynoldsgetal	41
5.4.2	Bagnoldgetal	41
5.4.3	Classificatie zan-watermengselstromingen	43
6.	GRONDMECHANISCHE ASPECTEN	45
6.1	Dichtheid	45
6.2	Sonderingen en elasticiteitsmodulus	46
6.3	Zettingsvloeiingen	48
6.3.1	Aantal vloeiingen	48
6.3.2	Invloed gebruikt zand volgens rekenmodel	49
6.3.3	Omvang en duur van de zettingsvloeiingen	51
6.4	Verloop dichtheid stort	53
7.	REFERENTIES	55

Tabellen

APPENDIX A IJking instrumentatie

APPENDIX B Eenvoudig model voor het begin van een zettingsvloeiing

Symbolenlijst

b	breedte	(m)
Ba	Bagnoldgetal (zie 5.4.2)	(-)
c	zand-volume concentratie	(-)
C	consolidatiecoëfficiënt	(m ² /s)
d	mediane korreldiameter	(m)
D	dikte van de verweekte laag, waterdiepte	(m)
d _x	diameter van de korrel waarvoor geldt dat x gewichts procent kleiner is	(-)
E	elasticiteitsmodulus	(Pa)
g	versnelling zwaartekracht	(m/s ²)
h	laagdikte of diepte mengselstroom,	(m)
h	waterdiepte, storthoogte	(m)
h	hoogte segment in verweekt mengsel (app. B)	(m)
h _{krit}	kritieke storthoogte (zie 5.3.1)	(m)
H	geometrisch kental (zie 5.3.1)	(-)
i	verhang	(-)
i, tan α	gemiddelde storthelling	(-)
k	doorlatendheid zandpakket	(m/s)
L _{sed}	sedimentatielengte	(m)
L	hydraulisch kental (zie 5.3.2)	(-)
n	porositeit (1-c)	(-)
n _{krit}	kritieke porositeit	(-)
N	grondmechanisch kental (zie 5.3.1)	(-)
p	wateroverspanning	(Pa)
p	specifieke zandproductie	(m ² /uur)
P	isotrope (korrel) spanning	(Pa)
P	zandproductie	(m ³ /uur)
q	filtersnelheid	(m/s)
q	specifiek mengseldebiet	(m ² /s)
Q	mengseldebiet	(m ³ /s)
Q	deviatorspanning	(Pa)
Re	Reynoldsgetal	(-)
s	specifieke zandproductie	(kg/sm)
t	tijdcoördinaat	(s)
T	temperatuur	(°C)

u	mengselstroomsnelheid	(m/s)
v_f	filtersnelheid	(m/s)
w_o	valsnelheid enkel deeltje	(m/s)
w_s	valsnelheid in suspensie	(m/s)
x	horizontale lengtecoördinaat	(m)
z	verticale lengtecoördinaat	(m)
β	compressibiliteit	(1/Pa)
ϵ_z	axiale rek	(-)
ϕ	helling natuurlijk talud	(°)
ϕ	wrijvingshoek	(°)
ϕ_1	wrijvingshoek tussen de wand en het zand	(°)
η	dynamische viscositeit	(kg/ms)
ν	kinematische viscositeit water	(m ² /s)
ν_m	idem, mengsel	(m ² /s)
λ_c	functie van de concentratie c (zie 5.4.2)	(-)
ρ_w	dichtheid water	(kg/m ³)
ρ_m	dichtheid zand-watermengsel	(kg/m ³)
ρ_s	dichtheid zand	(kg/m ³)
γ_s	soortelijk gewicht grond	(N/m ³)
γ_w	soortelijk gewicht water	(N/m ³)
ψ	horizontale zandflux	(kg/sm ²)
Δ	relatieve korreldichtheid	(-)

Definities

c	$= \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}$	zand-volumeconcentratie	(-)
Re	$= \frac{q}{v_m}$	Reynoldsgetal	(-)
s	$= \rho_s q c$	specifieke zandproductie, specifiek zandtransport	(kg/sm)
q	$= \frac{Q}{b}$	specifiek mengseldebiet	(m ² /s)
q	$= u h$	specifiek mengseldebiet	(m ² /s)
Δ	$= \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$	relatieve korrel dichtheid	(-)
Ψ	$= \rho_s u c$	horizontale zandflux	(kg/sm ²)
ρ_m	$= \rho_w (1 + \Delta c)$	mengseldichtheid	(kg/m ³)
p	$= \frac{P}{b}$	specifieke zandproductie	(m ² /uur)
P	$= \frac{3600 b s}{\rho_s (1-n)}$	zandproductie	(m ³ /uur)

LIJST VAN FIGUREN

HOOFDSTUK 3

- Fig. 3.1 Korrelverdelingsdiagram Wadzand
- Fig. 3.2 Korrelverdelingsdiagram Wadzand
- Fig. 3.3 Korrelverdelingsdiagram Wadzand
- Fig. 3.4 Natte kritieke dichtheid Wadzand
- Fig. 3.5 Droge kritieke dichtheid Wadzand
- Fig. 3.6 Wrijvingshoek
- Fig. 3.7 Doorlatendheid
- Fig. 3.8 V A T voor valsnelheidsanalyse
- Fig. 3.9 Valsnelheidsverdeling Wadzand
- Fig. 3.10 Valsnelheidsverdeling Haringvlietzand
- Fig. 3.11 Korrelverdelingsdiagram Haringvlietzand
- Fig. 3.12 Aanzicht glaspanelen goot
- Fig. 3.13 Leidingsysteem
- Fig. 3.14 Fluïdisatiesysteem
- Fig. 3.15 Data-acquisitiesysteem WL
- Fig. 3.16 Opstelling instrumentatie goot
- Fig. 3.17 Mengseldebiet (EMF mengtank)
- Fig. 3.18 Mengseldichtheid sleepwagen
- Fig. 3.19 Specifieke zandproductie
- Fig. 3.20 Instrumentatie meetwagen
- Fig. 3.21 Schema instrumentatie GD
- Fig. 3.22 Proevenmatrix

HOOFDSTUK 4

- Fig. 4.1 Vertikale opbouw
- Fig. 4.2 Horizontale uitbouw
- Fig. 4.3 Stortontwikkeling proef Q01
- Fig. 4.4 Stortontwikkeling proef Q02 sedimentatie
- Fig. 4.5 Stortontwikkeling proef Q02 erosie
- Fig. 4.6 Stortontwikkeling proef Q03
- Fig. 4.7 Stortontwikkeling proef Q04
- Fig. 4.8 Waterspanning en dichtheid proef Q01
- Fig. 4.9 Waterspanning proef Q02
- Fig. 4.10 Waterspanning en dichtheid proef Q01
- Fig. 4.11 Verloop waterspanning proef Q02
- Fig. 4.12 Verloop waterspanning proef Q02
- Fig. 4.13 Schets waterspanningsverloop
- Fig. 4.14 Vergelijking waterspanningen
- Fig. 4.15 Waterspanning proef Q02

HOOFDSTUK 5

- Fig. 5.1 Specifiek mengseldebiet (EMF)
- Fig. 5.2 Zand-volumeconcentratie (Sleepwagen)
- Fig. 5.3 Specifieke zandproductie (Sleepwagen)
- Fig. 5.4 Positie meetwagen proef Q01
- Fig. 5.5 Mengselstroomsnelheid (EMS)
- Fig. 5.6 Zand-volumeconcentratie (GCM I)

- Fig. 5.7 Zand-volumeconcentratie (GCM II)
- Fig. 5.8 Zand-volumeconcentratiegradiënt (GCM I - GCM II)
- Fig. 5.9 Zandflux
- Fig. 5.10 Positie meetwagen proef Q01
- Fig. 5.11 Mengselstroomsnelheid (EMS)
- Fig. 5.12 Zandvolumeconcentratie (GCM I)
- Fig. 5.13 Zandflux
- Fig. 5.14 Storthelling als functie van de specifieke zandproductie
- Fig. 5.15 Storthelling als functie van de korreldiameter
- Fig. 5.16 Sedimentatielengte Wadzand
- Fig. 5.17 Classificatiematrix stortproeven
- Fig. 5.18 Classificatiematrix typen zand-watermengselstroming

HOOFDSTUK 6

- Fig. 6.1 Porositeit gemeten met wanddichtheidsmeters
- Fig. 6.2 Posities sonderingen
- Fig. 6.3 Sonderingen
- Fig. 6.4 Waterspanningsverloop proef Q02
- Fig. 6.5 Natte kritieke dichtheidsproef Wadzand
- Fig. 6.6 Natte kritieke dichtheidsproef Haringvlietzand
- Fig. 6.7 Waterspanningsverloop; vergelijking met rekenmodel
- Fig. 6.8 Resultaat 1-dim model
- Fig. 6.9 Wanddichtheidsmeter (MPC 6) proef Q01
- Fig. 6.10 Wanddichtheidsmeter (MPC 5) proef Q01
- Fig. 6.11 Wanddichtheidsmeter (MPC 7) proef Q01

LIJST VAN TABELLEN

- Tabel 3.1 Resultaten diverse bepalingen
- Tabel 3.2 Overzicht stortparameters uitgevoerde proeven
- Tabel 5.1 Zandproductie, storthelling en sedimentatielengte
- Tabel 6.1 Toename conusweerstand met de diepte
- Tabel 6.2 Parameters gebruikt in 1-dim numeriek model

1. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Als vervolg op een eerste serie sedimentatieproeven met fijn zand, met een mediane korreldiameter van 135 μm , zijn onder vergelijkbare omstandigheden een viertal proeven uitgevoerd met een wat grovere zandsoort, met een mediane korreldiameter van 225 μm en een vergelijkbare zeefkromme. De proeven zijn uitgevoerd in een goot met afmetingen 2,5 m x 0,5 m x 32 m, waarvan één zijde was voorzien van glaspanelen. Gestroomd werd met een zand-watermengsel met specifieke mengseldebieten van 0,01, 0,025 en 0,1 m^2/s en zand-volumeconcentraties van 12 en 21 %. De resulterende specifieke zandproduktie varieerde van 3,2 tot 56 kg/sm . De waterdiepte was ingesteld op 1,75 m en bij de laatste proef op 1,95 m.

De ontwikkeling van het stort in de goot is vastgelegd met behulp van foto- en videoapparatuur. Er zijn continue hydraulische metingen uitgevoerd in de zand-watermengselstroming, betreffende debiet, mengsel dichtheid, stroomsnelheden en concentraties en continue grondmechanische metingen in het gesedimenteerde zandpakket, betreffende waterspanningen en dichtheden.

Doel van de proeven was, ter aanvulling van de eerste serie proeven, de invloed van de korreldiameter op de processen te onderzoeken.

De volgende conclusies kunnen worden geformuleerd:

1. Evenals bij de proeven met het fijne zand bleek de specifieke zandproduktie de belangrijkste grootheid welke de aard van de zandtransportprocessen op het onderwaterstort en de resulterende stortontwikkeling bepaalde.
2. De storthelling vertoonde eenzelfde relatie met de specifieke zandproduktie als bij de proeven met het fijne zand. Dit ondanks de verschillende aard van de zandtransportprocessen. Deze relatie komt bovendien overeen met een beschouwing op grond van de zandtransportformule van Engelund en Hansen. Globaal kan gesteld worden $i \sim s^{-0,4}$.

3. De storthellingen waren met het grovere zand onder vergelijkbare condities wat betreft debiet, concentratie en zandproduktie aanzienlijk steiler dan met het fijne zand, en ook steiler dan verwacht kon worden op grond van de in conclusie 2 genoemde beschouwing. De waarnemingen zijn wel in overeenstemming met eerder experimenteel onderzoek, betreffende de stroming van zand-watermengsels boven water.
Op grond van de twee proevenseries kan globaal gesteld worden i ~ d.
4. De stortontwikkeling verliep veel regelmatigiger dan bij de proeven met het fijne zand, waardoor er geen grote variatie van de storthelling tussen zekere minimale en maximale waarden optrad. Het afwisselend verflauwen en versteilen van het stort deed zich niet voor.
5. Het gesedimenteerde zandpakket was onder alle proefomstandigheden zettingsvloeiingsgevoelig. Dit bleek zowel uit de grondmechanische bepalingen als proefondervindelijk, na afloop van de stortproeven. In termen van het grondmechanisch kental N gold blijkbaar, evenals bij de eerste serie proeven, $N > 1$, ofwel de porositeit was groter dan de kritieke waarde.
6. Ondanks het gestelde in conclusie 5 waren de zettingsvloeiingen geen dominant verschijnsel. Het aantal zettingsvloeiingen was kleiner en de duur korter dan bij de proeven met het fijne zand. Bij de twee proeven met de laagste zandproducties zijn in het geheel geen wateroverspanningen gemeten.
Een verklaring hiervoor is onder meer de grotere doorlatendheid. De afname van de duur van de vloeiingen bleek overeen te komen met de toename van de doorlatendheid van het zandpakket. Verder traden er minder suspensiestromingen op, welke een aanleiding voor het optreden van vloeiingen konden vormen en was de grondmechanische stabiliteit van het zandpakket hoger, in termen van kritieke dichtheid.

7. In termen van het grondmechanisch kental H kan gesteld worden, dat in tegenstelling tot de eerste proevenserie gold $H < 1$, met andere woorden, de kritieke hoogte voor het grovere zand was blijkbaar groter dan de taludhoogte van het zandlichaam in de goot. Met behulp van een eenvoudig rekenmodel, waarin de viskositeit van het zand-watermengsel een rol speelt, bleek het mogelijk aan te geven waarom de kritieke hoogte toeneemt voor grovere zandsorten.
8. De stortontwikkeling werd nauwelijks verstoord door het optreden van zettingsvloeiingen. Ook werden er geen steile bressen waargenomen. Bij de lage zandproducties was het dominante zandtransportproces de korrelstroming, bij de hoge producties de suspensiestroming. Omdat zich geen instabiliteiten voordeden, kon de storthelling zich zodanig aanpassen dat stortlengte en sedimentatielengte in overeenstemming kwamen. In termen van het hydraulisch kental L kon gesteld worden dat $L = 1$. Er was dan sprake van een soort evenwichtssituatie.
9. Op grond van het mechanisme waarmee de spanningen in een zand-watermengselstroming tussen de korrel- en de vloeistoffase overgedragen worden, zijn twee kentallen, het Reynolds- en het Bagnoldgetal afgeleid. Met deze kentallen kunnen de verschillende typen van zand-watermengselstroming gekarakteriseerd en het al of niet optreden van wateroverspanningen voorspeld worden.
10. Metingen in een turbulente suspensiestroming, welke optrad bij de twee proeven met de hoogste zandproducties, laten zien dat de zandflux in horizontale richting een orde groter was dan in verticale richting. Dit betekent dat de suspensie als een homogeen mengsel beschouwd mag worden.
11. Evenals bij de proeven met het fijne zand kon geen relatie worden vastgesteld tussen de stortparameters mengseldebiet, concentratie en zandproductie en de dichtheid van het gesedimenteerde zandpakket. Voor alle combinaties van stort-parameters werd een zeer los gepakt zandpakket gevonden.

Op grond van de resultaten en analyses kunnen de volgende aanbevelingen voor nader onderzoek worden gedaan, in aanvulling op de aanbevelingen in het rapport van de eerste serie proeven:

- a. Om de invloed van de hoogte van het stort waarbij nog belangrijke zettingsvloeiingen kunnen optreden, de kritieke hoogte c.q. het grondmechanisch kental H , te onderzoeken, verdient het aanbeveling stortproeven met dezelfde zandsort maar met grotere waterdiepte uit te voeren.
- b. Aangezien er nog veel meetmateriaal van zowel de eerste als de tweede serie proeven beschikbaar is, verdient het aanbeveling dit materiaal nog nader te analyseren. Dit geldt zowel voor de hydraulische als de grondmechanische metingen. Het meetmateriaal zou onder meer gebruikt kunnen worden ter verificatie van eventuele wiskundige modellen.

2. INLEIDING EN OPDRACHT

Het voorliggende verslag is een vervolg op het verslag van de eerste serie proeven betreffende het gedrag van zand-watermengselstromingen onder water [18]. Het onderzoek heeft met name betrekking op de opbouw van zandlichamen onder water door middel van het storten, klappen of opspuiten van zand. Daarnaast komen een aantal meer fundamentele hydraulische en grondmechanische aspecten van het stromingsgedrag van hooggeconcentreerde zand-watermengsels aan de orde.

Het onderzoek is uitgevoerd in februari 1988 door het Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft, in het Cuttergootbassin te Delft. De opdracht voor het onderzoek is verleend door Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, in het kader van het meerjaren onderzoeksproject MODVLO.

De begeleiding heeft plaatsgevonden door de projectgroep Storten van Zand, waarin behalve vertegenwoordigers van RWS, WL en GD ook vertegenwoordigers van de bij de Combinatie Speurwerk Baggertechniek aangesloten bedrijven H A M, Boskalis, Amsterdamse Ballast, Volker Stevin, Zanen Verstoep en Van Oord Utrecht deelnamen. Deze projectgroep had ook de in gezamenlijke opdracht van RWS en CSB uitgevoerde eerste proevenserie begeleid.

De eerste serie proeven is uitgevoerd met het fijne Haringvlietzand, met $d_{5,0} = 135 \mu\text{m}$. De vervolgserie, waarvan het voorliggende verslag het eindresultaat is, is uitgevoerd met het speciaal voor dit doel bestelde middelgrove Wadzand, met $d_{5,0} = 225 \mu\text{m}$.

Het doel van de proeven was in eerste instantie het onderzoeken van de invloed van de korreldiameter op de zandstortprocessen. Met de opzet en uitvoering van de proeven is daarom, evenals bij de analyse, zoveel mogelijk getracht aan te sluiten bij de eerste proevenserie en het bijbehorende rapport, waarnaar veelvuldig verwezen zal worden.

De eerste proevenserie heeft al veel inzicht opgeleverd in de aard van de processen welke zich op het onderwaterstort kunnen voordoen en in hoeverre deze processen beïnvloed kunnen worden doormiddel van de stortparameters mengseldebiet, concentratie en zandproduktie. Het optreden van een aantal bijzondere zandtransportverschijnselen, zoals zettingsvloeiingen,

suspensiestromingen en mengselsprongen konden voor het eerst onder laboratoriumomstandigheden geanalyseerd worden. Prototypemetingen, uitgevoerd tijdens de zandsluitingen in de Oosterschelde, hadden al eerder aanwijzingen opgeleverd omtrent het optreden van dergelijke verschijnselen. Onbekend bleef nog, onder meer, wat de rol was van de korreldiameter, eveneens een belangrijke stortparameter. Hieruit vloeit direkt het doel van de tweede, in dit rapport beschreven proevenserie voort.

Na de samenvatting en conclusies van hoofdstuk 1 en de inleiding van dit hoofdstuk volgt in hoofdstuk 3 een beschrijving van het gebruikte zand, de instrumentatie en de proefopstelling. In hoofdstuk 4 volgt een beschrijving van de waarnemingen gedurende de proeven. In de hoofdstukken 6 en 7, tenslotte, worden de waarnemingen en metingen geanalyseerd, gezien vanuit een hydraulisch, respektievelijk een grondmechanisch gezichtspunt.

3. EXPERIMENTELE FACILITEIT

3.1 Zand

Voor de hier beschreven experimenten is zand aangevoerd uit de Waddenzee. Uit voorgaande proeven met Haringvlietzand [18] was bekend, dat ontmenging van het zand gedurende de proeven te verwachten was. Daarom is bij deze proeven, voordat het zand in de Cuttergoot was gebracht, de korrelverdeling bepaald en na afloop van de proeven op twee verschillende plaatsen in de stortgoot. De resultaten zijn gegeven in figuur 3.1 t/m 3.3. In dit geval blijken de verschillen klein waarschijnlijk mede doordat dit zand een hele steile zeefkromme heeft, nog net iets steiler dan de zelfkromme van het Haringvlietzand waardoor ontmenging in frakties met een verschillende korreldiameter niet kan optreden. Evenals in [18] zijn ook nu verschillende grondmechanische parameters bepaald. De resultaten staan in tabel 3.1.

De resultaten van de kritieke dichtheidsbepaling zijn ook grafisch weergegeven in figuur 3.4 voor de natte en 3.5 voor de droge kritieke dichtheid. Voor de verklaring van de natte kritieke dichtheidsbepaling wordt verwezen naar [18]. In een droge kritieke dichtheidsmeting wordt de volume verandering gemeten bij een constante isotrope spanning en een toenemende deviator spanning. De droge kritieke dichtheid is die dichtheid waarbij geen noemenswaardige volume verkleining (contractie) meer optreedt voor het begin van dilatantie.

Uit figuur 3.5, het resultaat van de droge kritieke dichtheidproef, blijkt duidelijk dat ook bij een zeer losse pakking dilatantie optreedt bij hoge deviator spanningen. Bezwijken van het monster in een natte kritieke dichtheidproef wil dus niet zeggen dat in dat monster geen dilatantie kan plaatsvinden, maar wel dat er bij kleine schuifspanningen zoveel contractie is, dat in een ongedraineerde situatie zoals gedurende de natte kritieke dichtheidproef dilatantie niet optreedt, omdat het monster al eerder is bezweken.

Figuur 3.5 toont een toename van de toelaatbare deviatorspanning voor bezwijken bij een afname van de porositeit. Aangezien in alle proeven de

isotrope spanning gelijk was, betekent dit dat ook de wrijvingshoek ϕ toeneemt bij afnemende porositeit.

ϕ als functie van de porositeit is weergegeven in figuur 3.6. Dit is ook uitgevoerd voor Haringvlietzand. Het resultaat is eveneens weergegeven in figuur 3.6. Voor Haringvlietzand is hetzelfde effect waarneembaar. De wrijvingshoek voor het nu gebruikte wadzand ligt gemiddeld wat lager dan voor het Haringvlietzand.

De wrijvingshoek bepaald uit de natte kritieke dichtheid-proef is vergelijkbaar met de waarde voor de hoogste porositeit. Dit is begrijpelijk omdat de wrijvingshoek alleen dan is te bepalen uit de natte kritieke dichtheid-proef wanneer er al grote vervormingen optreden in het monster. De porositeit tussen de korrels in de afschuiving is dan vergelijkbaar met de minimale porositeit.

Evenals in [18] kan ook nu de valsnelheid, gereduceerde valsnelheid en doorlatendheid worden berekend en vergeleken met metingen. Voor de formules wordt verwezen naar paragraaf 3.1.3. De resultaten zijn gegeven in tabel 3.1 en figuur 3.7.

Evenals in [18] blijken de resultaten van de doorlatendheidsmetingen goed overeen te komen met de formule gegeven door den Adel [12].

In de in paragraaf 3.1.4 te behandelen valsnelheidsformule blijkt voor de exponent α een waarde 5 het best overeen te komen met de metingen.

3.1.2 Randeffecten

De wrijvingshoeken van het zand met de materialen van de wand (glas-hout, trovidure) is niet opnieuw onderzocht. Aangenomen is dat deze wrijvingshoeken vergelijkbaar zijn met die bepaald voor Haringvlietzand. De conclusies m.b.t. de randeffecten zijn dan ook geheel vergelijkbaar met die uit [18]. De maximaal voorkomende taludhellingen kunnen tijdens de proeven groter zijn dan in de werkelijkheid. Deze afwijking is gering wanneer de taludhelling wordt bepaald door hydraulische processen. Wanneer de taludhelling wordt bepaald door zettingsvloeiingen is de invloed iets minder duidelijk. Voor kleine vloeiingen is de invloed nog steeds klein. In hoeverre grote vloeiingen worden gehinderd door de wandwrijving is onbekend

en niet eenvoudig te onderzoeken. Bij dergelijke grote vloeifngen zal echter ook de gootbodem de resultaten beïnvloeden.

3.1.3 Valsnelheidsanalyse

Gezien het belang van de valsnelheid voor het verloop van het sedimentatieproces tijdens de proeven zijn voor het Wadzand aanvullende valsnelheidsanalyses uitgevoerd. De resultaten zijn vergelijkbaar met de zeefanalyses ter bepaling van de korreldiameterverdeling. Behalve de mediane korreldiameter zijn er nog meer factoren welke van invloed kunnen zijn op de valsnelheidsverdeling, zoals de vorm van de korrels, de temperatuur, de steilheid van de verdeling en het gehalte aan opgeloste stoffen en slib. Daarom kan de valsnelheid niet altijd direct berekend worden, indien alleen de d_{50} bekend is.

De valsnelheidsanalyse is uitsluitend bedoeld om de valsnelheid van de individuele korrel te bepalen, in feite een materiaaleigenschap van het zand. De invloed van de zand-volumeconcentratie op de valsnelheid in een zand-watermengsel (hindered settling) wordt in 3.1.4 besproken.

De valsnelheidsproeven zijn uitgevoerd op het Fysisch-Chemisch Laboratorium van WL met behulp van een valkolom (VAT, Visual Accumulation Tube), zie fig. 3.8.

De resulterende cumulatieve valsnelheidsverdeling, gebaseerd op drie bepalingen, is gegeven in fig. 3.9. De meetpunten zijn weergegeven met stipjes. De kruisjes met de bijbehorende getrokken lijn geven de gemiddelde waarden aan. De resultaten van de drie verschillende bepalingen liggen dicht bij elkaar. Voor de w_{50} wordt een waarde van 27,8 mm/s gevonden bij een temperatuur van 20,2°C. Deze waarde kan worden vergeleken met het resultaat van een valsnelheidsformule.

Een ook in [18] genoemde, vrij nauwkeurige formule is:

$$w_o = \frac{10 \nu}{d} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{\Delta g d^3}{100 \nu^2}\right)} - 1 \right] \quad (\text{m/s}) \quad (3.1)$$

waarin w_o = valsnelheid individuele korrel (m/s)
 d = korreldiameter, $100 \leq d \leq 1000 \mu\text{m}$ (m)
 ν = kinematische viscositeit water (m²/s)
 Δ = relative dichtheid korrel (-)
 g = versnelling zwaartekracht (m/s²)

De viscositeit van schoon water kan als functie van de temperatuur beschreven worden met:

$$\nu = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{20 + T} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (3.2)$$

Met een mediane korreldiameter van 225 μm (zie par. 3.1.1 en fig. 3.1 t/m 3.3) en een temperatuur van 20,2°C volgt uit (3.1) en (3.2) $w_o = 30,6 \text{ mm/s}$.

Hoewel slechts twee parameters, de $d_{s,0}$ en de temperatuur worden gebruikt, is de overeenstemming met de metingen goed. Dit komt waarschijnlijk doordat het gebruikte zand vrij schoon en uniform van vorm en verdeling is. In de praktijk kan dit anders zijn, zodat naast een zeefanalyse een valsnelheidsanalyse van een in situ genomen monster aan te bevelen is. Ter vergelijking is het tijdens de eerste serie proeven gebruikte Haringvliet zand geanalyseerd met dezelfde proefopstelling, zie fig. 3.10. De gevonden $w_{s,0}$ van 8,6 mm/s wijkt nogal af van de waarde welke tijdens deze proevenserie is aangehouden, n.l. 12 à 15 mm/s. De resultaten van de twee bepalingen, in fig. 3.10 met stippen aangegeven, wijken onderling ook nogal af, met name voor de fijne fractie. Een nadere korrelverdelingsanalyse van hetzelfde monster, wees uit dat de $d_{s,0}$ slechts 100 μm was. Dit monster was na afloop van de proeven van het zandoppervlak uit de stortgoot genomen, waar dit zand tijdelijk was gedeponed. De gevonden $d_{s,0}$ is aanzienlijk fijner dan de $d_{s,0}$ van het zand tijdens de eerste serie proeven (zie fig. 3.11). Dat in de stortgoot zo'n lage waarde werd gevonden komt waarschijnlijk door het z.g. segregatie-effect, dat

tijdens het storten en sedimenteren van een zand-watermengsel kan optreden en waardoor de grovere fractie onder de fijnere komt te liggen.

De berekende valsnelheid voor deze korreldiameter bedraagt 9,0 mm/s, wat goed overeenkomt met de gemeten waarde.

3.1.4 Valsnelheidsreductie bij hoge concentraties

Ter beschrijving van het hindered settling effect, dat er de oorzaak van is dat de valsnelheid bij hogere zand-volumeconcentraties aanzienlijk afneemt, is in [18] de vereenvoudigde formule van Richardson en Zaki genoemd:

$$w_s = w_o (1 - c)^4 \quad (\text{m/s}) \quad (3.3)$$

waarin w_s = valsnelheid in suspensie (m/s)

w_o = valsnelheid individuele korrel (m/s)

c = zand-volumeconcentratie (-)

De coëfficiënt α , hier op 4 gesteld, is in werkelijkheid een functie van het Reynoldsgetal (Re), gedefinieerd volgens:

$$Re = \frac{w_o d}{\nu} \quad (-) \quad (3.4)$$

waarin ν de kinematische viscositeit van het water is. (m^2/s)

Richardson en Zaki geven de volgende waarden, zie bijv. [3.13]:

$Re < 0,2$	$\alpha = 4,65$
$0,2 < Re < 1$	$\alpha = 4,35 \cdot Re^{-0,03}$
$1 < Re < 200$	$\alpha = 4,45 \cdot Re^{-0,1}$
$Re > 500$	$\alpha = 2,39$

Door Maude en Whitmore [3] zijn deze resultaten, alsmede andere metingen nader geanalyseerd. Het blijkt dat voor fijn zand in het algemeen de waarde van α groter dan 4 gekozen moet worden, een waarde 5 lijkt beter te voldoen.

De invloed van de coëfficiënt α op de valsnelheid en daarmee op de sedimentatie van het zand is vooral bij hogere concentraties groot. Dit bleek al uit een beschouwing aangaande de doorlatendheid van zand zie (paragraaf 3.1.1 en fig. 3.7). In Appendix E van [18] is de sedimentatie berekend voor de verschillende waarden van α , waaruit de sterke invloed afgelezen kan worden.

3.2 Stroomgoot

Voor de vervolgserie proeven, met het grovere Wadzand, is in principe dezelfde opstelling van de glaspanelen in de Cuttergoot gebruikt als voor de eerste serie proeven (figuur 3.12).

De gootbreedte was 0,50 m, de diepte 2,50 m en de lengte 32 m.

Het derde glaspaneel was echter omgekeerd gemonteerd, zodat ook de processen nabij de bodem waargenomen konden worden (figuur 3.12).

Omdat ook bij de horizontale uitbouw van het zandlichaam een aanzienlijk steiler bovenwaterstort verwacht mocht worden [15,19], is enerzijds een lagere waterstand van 1,75 tot 1,95 m i.p.v. 2.05 m gehandhaafd en is anderzijds de bovenrand van de goot langs het gehele eerste paneel verhoogd met houten schotten. Dit om het overstromen van de goot bij een ver uitgebouwd bovenwaterstort zoveel mogelijk te voorkomen.

Op de goot is een x- en een z-coördinatenverdeling aangebracht, met als oorsprong de instroomroosters, respectievelijk de gootbodem.

Om de foto- en videoapparatuur op te kunnen stellen aan de raamkant van de cuttergoot, alsmede om een gelegenheid te creëren de proeven van de kant te volgen, zijn enige voorzieningen getroffen om de stortgoot te overspannen.

3.3 Zandproductie- en leidingssysteem

Ten behoeve van de vervolgsérie proeven is de zandvoorraadgoot (zie fig. 3.13 en 3.14) geheel leeggemaakt. Het fijne Haringvlietzand, in totaal ca 100 m³, is daarbij opgeslagen in de stortgoot. Het Wadzand, 150 m³, is met vrachtwagens afgeleverd op het terrein achter de cuttergoot en vervolgens met een laadschop in de zandvoorraadgoot gebracht.

Het gehele zandproductie- en leidingssysteem, dat na aanpassingen tijdens de eerste proevenserie met fijn zand goed gefunctioneerd heeft, is verder niet gewijzigd. Het mengseldebiet in de goot kon opgevoerd worden tot 50 l/s, wat een maximaal specifiek debiet van 0,1 m²/s opleverde. Om ook bij hoge zandproducties, waarbij de zuigbuis van de sleepwagen vrij snel in het gefluidiseerde zandpakket omlaaggesteld moest worden, het proces toch goed onder controle te kunnen houden, is gezorgd voor een zandpakket van voldoende dikte.

Aangezien met het grovere zand meer moeilijkheden werden voorzien dan met het fijne zand is een zandpakket met een dikte van 1,75 m aangebracht, wat ruim een halve meter meer was dan bij de eerste proevenserie. Hoewel de doorlatendheid van het nieuwe zand aanzienlijk groter is dan die van het oorspronkelijke Haringvlietzand (zie 3.1.1) was de pompcapaciteit van het fluïdisatiesysteem (zie fig. 3.14) voldoende om het zandpakket geheel te fluïdiseren.

Ondanks deze maatregelen bleek dat tijdens de proef met de hoogste zandproductie, proef Q02, waarbij het de bedoeling was de concentratie op te voeren tot 30% (mengseldichtheid 1500 kg/m³), de hoogst haalbare concentratie ca. 21% was (mengseldichtheid 1350 kg/m³). De zandproductie was zodoende 56 kg/sm, lager dan de maximale productie van 80 kg/sm bij de eerste serie proeven. Waarschijnlijk was de drukval over de mond van de zuigbuis en daarmee samenhangend de stroomsnelheid onvoldoende om het gefluidiseerde grovere Wadzand weg te zuigen met zulke hoge concentraties.

Het zandproductieproces kon gecontroleerd en gestuurd worden met de debiet- en dichtheidsmeter in het pompcircuit van de sleepwagen, een debietmeter in de leiding naar de mengtank (alleen voor kleinere debieten, waarbij de \emptyset 100 leiding werd gebruikt (zie fig. 3.13)) en de debietmeter van de mengtank (figuur 3.13, zie verder par. 3.4.2).

3.4 Instrumentatie en fotografie WL

3.4.1 Data-acquisitiesysteem

De instrumentatie en met name de wijze van data-inwinning en verwerking is tijdens de tweede serie proeven op een aantal punten verbeterd.

Om gedurende de gehele proef continu te kunnen meten, wat vanwege het geconstateerde sterk instationaire karakter van de processen van belang is, zijn de meetinstrumenten aangesloten op een data-acquisitiesysteem, bestaande uit een Olivetti M28 personal computer voorzien van data-kaart en een data-inwinnings en verwerkings-softwarepakket, ASYSTANT +. Met deze configuratie konden alle van belang zijnde hydraulische grootheden als functie van de tijd vastgelegd worden en later gemakkelijk verwerkt en grafisch weergegeven worden (fig. 3.15 en 3.16).

De bemonsteringsfrequentie van alle signalen was voor alle proeven 10 Hz. Er stonden 7 meetinstrumenten en een pulsapparaat aangesloten, in totaal werden zodoende 8 kanalen tegelijkertijd bemonsterd (figuur 3.15).

De metingen zijn bij alle proeven synchroon gestart met de metingen van Grondmechanica Delft (zie paragraaf 3.5), steeds enige minuten vóór het openen van de klep van de mengtank.

De volgende grootheden zijn gemeten:

- a. mengseldebiet sleepwagen (Q_{sleep} in l/s)
- b. mengseldebiet mengtank (Q_{tank} in l/s)
- c. mengsel dichtheid sleepwagen (ρ_m in kg/m³)
- d. temperatuur in mengtank (T in °C)
- e. mengselstroomsnelheid in goot (u in m/s)
- f. zand-volumeconcentratie in goot (c in %).

De eerste drie grootheden hebben te maken met de controle en sturing van het zandproductieproces, de overige drie met de eigenlijke sedimentatieprocessen in de goot.

3.4.2 Regel- en controle instrumenten

De regel- en controle instrumenten in het leidingsysteem zijn niet veranderd in vergelijking met de eerste serie proeven. Alleen de concentratiemeter in de tank is komen te vervallen, deze kon beter in de goot toegepast worden (zie 3.4.3).

Debiet en dichtheid van het mengsel werden gemeten met bestaande instrumentatie in het pompcircuit van de sleepwagen. Van het totale debiet werd bij de proeven met lagere debieten een gedeelte weer teruggestort via de shuntleiding (zie fig. 3.13). Het debiet van de mengtank, dat via een debietgestuurde zelfregulerende pneumatische klep in de goot stroomde, werd gemeten met een $\phi 150$ mm EMF (Electro Magnetic Flowmeter). De temperatuur in de tank werd geregistreerd met een thermistor. Het specifieke mengseldebiet q volgt uit de tankdebietmeting, volgens:

$$q = \frac{Q_{\text{tank}}}{b} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.3)$$

waarin Q_{tank} = tankdebiet (m^3/s)
b = gootbreedte (m)

De zand-volumeconcentratie c volgt uit de mengseldichtheidsmeting, volgens:

$$c = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (-) \quad (3.4)$$

waarin ρ_m = mengseldichtheid (kg/m³)
 ρ_w = dichtheid water (kg/m³)
 ρ_s = dichtheid zand (kg/m³)

De resulterende specifieke zandproduktie s in de goot bedraagt dan:

$$s = \rho_s q c \quad (\text{kg/sm}) \quad (3.5)$$

Ter illustratie geven de figuren 3.17 t/m 3.19 respectievelijk het tankdebiet (in l/s), de mengseldichtheid (in kg/m³) en de zandproduktie (in kg/sm) voor de startfase van proef Q01, de periode 650 - 700 sec. Fig. 3.17 laat zien dat de klep van de tank in twee stappen wordt geopend, waardoor het debiet snel toeneemt, even resoneert en dan een vrijwel constante waarde van 50 l/s aanneemt, de waarde welke met het klepbesturingssysteem was ingesteld. Fig. 3.18 laat zien dat de mengseldichtheid al eerder is opgevoerd maar de gewenste waarde van 1200 kg/m³ en daar vervolgens omheen schommelt tengevolge van het stapsgewijs omlaagstellen van de zuigbuis. Zodra het mengsel op dichtheid was, werd begonnen met het vullen van de tank en kon de klep geopend worden. De zandproduktie, bepaald volgens (3.5), is voor deze zelfde tijdsperiode weergegeven in figuur 3.19. Na enige resonantie, na het openen van de klep, blijft de zandproduktie vervolgens licht schommelen rond de gewenste waarde van 32 kg/sm.

3.4.3 Instrumentatie meetwagen

Aan de langs de goot verrijdbare meetwagen (fig. 3.20) zijn aan een in de hoogte verstelbaar meetprofiel meetinstrumenten gemonteerd ten behoeve van hydraulische metingen in een zand-watermengselstroming.

Op gelijke hoogte waren ter weerszijden van het symmetrievlak een EMS (Electro Magnetische Snelheidsmeter) en een GCM (Geleidendheids Concentratie Meter) gemonteerd, zoals tijdens de eerste serie proeven. Daarnaast is voor de vervolgsérie proeven een tweede GCM gemonteerd, 30 mm boven de eerste. Met deze twee concentratiemeters, de GCM I en II, kon een indruk verkregen worden van de concentratiegradiënten in de mengselstroming.

Het signaal van de EMS werd gefilterd met 1 Hz om de achtergrondruis van het instrument weg te nemen. Hoogfrequente snelheidsvariaties konden dus niet worden gemeten. Het signaal van de concentratiemeters werd versterkt met een factor 5. De ijking van de instrumenten is beschreven in appendix A.

Om de verschillende posities van de meetwagen en van de meetinstrumenten tijdens de proeven goed vast te leggen, met name het tijdstip waarop de instrumenten in hoogte of lengterichting versteld werden, is tevens een pulsapparaat op het data-acquisitiesysteem aangesloten. Op het moment van verplaatsen werd een puls gegeven en op de parallel lopende papierrecorder de nieuwe x,z positie genoteerd. Bij de interpretatie van de snelheids- en concentratiemetingen was dus precies bekend op welke positie en tot welk tijdstip op de desbetreffende positie werd gemeten. De resultaten van deze metingen komen in hoofdstuk 5 aan de orde.

3.4.4 Fotografische registraties

Er zijn video-opnamen en foto's op diapositief materiaal gemaakt gedurende alle proeven. Met twee Nikoncamera's met 28 mm groothoekobjectief en 250 opnamen-achterwandcassette zijn overzichtsfoto's gemaakt, welke vervolgens grafisch zijn uitgewerkt. Daarnaast zijn er detailfoto's gemaakt, steeds ter plaatse van de meetinstrumenten van de meetwagen.

De video-opnamen zijn gemaakt vanuit een vaste positie tegenover het meetpaneel van Grondmechanica, bij $x = 8$ m. Figuur 3.16 geeft een indruk

van de opstelling. Op de video was een timer geïnstalleerd welke synchroon gestart werd met de WL en GD data-acquisitiesystemen. Ook de klok op de goot werd synchroon gestart vanaf 0.00 uur.

Op de resultaten wordt in hoofdstuk 5 nader ingegaan.

3.5 Instrumentatie GD

Voor de gebruikte instrumenten en de plaatsing in de wand wordt verwezen naar [18]. Het eveneens in [18] beschreven data-aquisitie systeem is ook bij deze proeven gebruikt. De gemiddelde bemonsteringsfrequentie was 10 Hz. In de praktijk bleek ten gevolge van onvolkomenheden in het programma door communicatie tussen de computer en de harde schijf de bemonsteringsfrequentie te variëren tussen de 2 en 25 Hz. Het aantal waterspanningsmeters is voor deze proeven iets uitgebreid (zie figuur 3.21). Bij de proeven uitgevoerd op Haringvlietzand was het onzeker over welke afstand een zettingsvloeiing zich uitbreidde. De waterspanningsmeters op 0,05 m van de bodem gaven wel enig inzicht, maar het was onzeker in hoeverre een waterspannings-verhoging werd veroorzaakt door een zettingsvloeiing recht boven de meter, of via grondwaterstroming werd overgebracht van een zettingsvloeiing elders in de goot.

3.6 Proevenprogramma

Bij het opstellen van het proevenprogramma is getracht zoveel mogelijk aan te sluiten bij de eerste serie proeven, d.w.z. met zoveel mogelijk dezelfde combinaties van de stortparameters mengseldebiet (q), zandconcentratie (c) en zandproduktie (s).

De uitgevoerde proeven, als combinaties van debiet en concentratie, zijn uitgezet in een proevenmatrix, zie fig. 3.22. In deze matrix zijn ter vergelijking ook de proeven van de eerste serie opgenomen.

Gezien het beperkte aantal proeven dat uitgevoerd kon worden is met name gestreefd naar variatie van de zandproduktie. Dit bleek bij de eerste serie proeven de belangrijkste stortparameter.

Successievelijk zijn de volgende vier proeven uitgevoerd:

Proef Q01

$$q = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}, c = 12\%$$

$$s = 32 \text{ kg/sm}$$

Deze proef is te vergelijken met proef P09 van de eerste serie.

Proef Q02

$$q = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}, c = 21\%$$

$$s = 56 \text{ kg/sm},$$

te vergelijken met proef P08, zij het dat de concentratie en de zandproduktie wat lager waren (zie 3.3).

Proef Q03

$$q = 0,025 \text{ m}^2/\text{s}, c = 12\%$$

$$s = 8 \text{ kg/sm},$$

te vergelijken met proef P05 en P10.

Proef Q04

$$q = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}, c = 12\%$$

$$s = 3,2 \text{ kg/sm},$$

te vergelijken met proef P06.

De waterstand in de goot was bij de eerste drie proeven 1,75 m en bij de laatste 1,95 m. Behalve deze vier sedimentatieproeven is na afloop van proef Q02 een erosieproef uitgevoerd. Na beëindiging van de zandproductie werd de overstort benedenstrooms weggehaald, zodat de waterstand tot 0 m gereduceerd werd. Vervolgens werd gestroomd met helder water, met een specifiek debiet q van $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Op de resultaten van de verschillende proeven wordt nader ingegaan in de komende hoofdstukken. In tabel 3.2 is een overzicht gegeven.

4. BESCHRIJVING VAN DE WAARGENOMEN PROCESSEN

4.1 Typen zand-watermengselstroming

In het rapport van de eerste proevenserie met het fijne Haringvlietzand is een beschrijving gegeven van de verschillende waargenomen zandtransportprocessen en de resulterende stortontwikkeling. Het karakter van het zandtransportproces bleek voornamelijk te worden bepaald door de specifieke zandproductie. Waargenomen werden turbulente suspensiestromingen, korrelstromingen en zettingsvloeiingen. Daarnaast werden nog een aantal aanverwante verschijnselen waargenomen, zoals mengselsprongen, bressen en zandwolken. In paragraaf 5.4 zal nader worden ingegaan op een kwantitatieve karakterisering van de verschillende typen zand-watermengselstroming.

Bij suspensiestromingen, welke vooral optraden bij hoge specifieke zandproducties, bleek de sedimentatielengte een belangrijke parameter. Geconstateerd werd dat in de suspensiestroming wateroverspanningen optreden.

De stroming kon zich zowel in sub- als superkritische vorm manifesteren. Bij de overgang van super- naar subkritische stroming konden markante mengselsprongen geconstateerd worden, gepaard gaande met een sterke vertraging van de stroming en dientengevolge sedimentatie.

Korrelstromingen deden zich voornamelijk voor bij lage zandproducties. Deze dunne schietende zandlaagjes van enkele mm's dikte strekten zich uit tot hooguit enkele meters. De korrelstroompjes hadden vaak het karakter van zandtongen, met een duidelijk front.

Zettingsvloeiingen waren het meest opvallend zichtbaar bij de proeven met kleine zandproducties. Wateroverspanningen konden zich uitstrekken over grote lengte, tot meer dan 10 m, en konden zich handhaven over een periode van meer dan 100 sec. De vervormingen van het stort tengevolge van zettingsvloeiingen bepaalde bij de lage zandproducties in hoge mate de stortontwikkeling.

Regelmatig werd lokale erosie van het onderwaterstort waargenomen, wat gepaard ging met versteiling en lokale toename van debiet en zandtransport. Bij deze bresvorming zijn wateronderspanningen geregistreerd.

In de volgende paragrafen zal worden beschreven in hoeverre deze processen ook bij de tweede serie proeven met het grovere Wadzand zijn waargenomen. In de hoofdstukken 5 en 6 zal aan de hand van de metingen en de analyse nader worden ingegaan op het karakter van de verschillende typen stromingen.

4.2 Stortontwikkeling

Het bleek dat de stortontwikkeling, d.w.z. de wijze waarop het onderwaterstort tengevolge van sedimentatie van een zand-watermengselstroming opgebouwd wordt, ook bij de tweede serie proeven voornamelijk bepaald werd door de specifieke zandproduktie.

In het algemeen verliep de stortontwikkeling veel regelmatigere dan bij de eerste serie proeven, was de variatie in de verschillende typen stroming veel geringer en waren de resulterende hellingen aanzienlijk steiler. Aan de hand van het fotomateriaal is de stortontwikkeling per proef grafisch uitgewerkt, zoals dat ook bij de eerste serie proeven is gebeurd. Omdat nu ter plaatse van het derde paneel de bodem zichtbaar was, kon ook de ontwikkeling van de teen van het onderwaterstort worden waargenomen. Bij de interpretatie van de figuren (zie par. 4.2.1 t/m 4.2.4) moet er echter rekening mee worden gehouden dat bij aanvang van de proef steeds al een ca 0,10 m dikke, horizontale laag zand aanwezig was.

De storthelling is gedefinieerd op dezelfde wijze als tijdens de eerste proevenserie, d.w.z. gemeten vanaf 0,65 m boven de bodem tot de rand van het bovenwaterstort. Omdat de stortontwikkeling zo regelmatig verliep was de helling veel eenvoudiger en eenduidiger te bepalen.

Ook nu konden er twee fasen in de stortontwikkeling worden onderscheiden. In het beginstadium van de proef de verticale opbouw (fig. 4.1) en nadat zich een bovenwaterstort had gevormd de horizontale uitbouw (fig. 4.2).

4.2.1 Proef Q01

Bij proef Q01 met een vrij hoge specifieke zandproductie ($s = 32 \text{ kg/sm}$) was een turbulente suspensiestroming te zien, welke zich uitstreckte tot voorbij de teen van het onderwaterstort. Om de 2 tot 5 meter ontwikkelde zich een gestadig stroomopwaarts bewegende mengselsprong. Vóór de sprong trad erosie, na de sprong sedimentatie op.

Het eroderende gedeelte was aanzienlijk minder steil dan wat bij de vergelijkbare proef P09 met het fijne zand was waargenomen. Er was geen sprake van een duidelijke bresvorming, zoals bij P09. Het bovenwaterstort vertoonde een trapvormige structuur, eveneens met mengselsprongen. Tengevolge van de stroomopwaarts bewegende sprongen schreed de rand van het bovenwaterstort regelmatig over enige lengte terug, waarna weer een verdere uitbouw plaatsvond. In het beginstadium van de proef, nog voor de vorming van het bovenwaterstort, werd dichtbij de instroming een kleine zettingsvloeiing waargenomen, welke echter niet tot grote vervormingen van het stort leidde en een zeer lokaal karakter behield. Uit de waterspanningsregistratie bleek dat 2 kleine vloeiingen zijn opgetreden, 500 en 700 seconden na het begin van het stortproces. Deze vloeiingen waren alleen duidelijk zichtbaar op de registratie van waterspanningsmeter (WSM) 1. De variatie in de waterspanning gedurende de proef was dan ook gering, totdat zich een bovenwaterstort vormde. Daarna liep de waterspanning op, omdat ook het bovenwaterstort verzadigd raakte met water. Dit oplopen gebeurde niet continu. Op het bovenwaterstort ontstond een soort trapjestalud, waarin gebieden met erosie en sedimentatie voorkwamen. In de erosiegebieden werd een wateronderspanning gemeten. Door de wisselende erosie en aanzanding trad verdichting op van de bovenste laag van het zandpakket. De waargenomen stortontwikkeling in de tijd is weergegeven in fig. 4.3. De waterspanning als functie van de tijd en het verloop van de dichtheid gemeten met de dichtsbijzijnde wanddichtheid-meter is gegeven in figuur 4.8.

4.2.2 Proef Q02

Proef Q02, de proef met de hoogste zandproduktie ($s = 56 \text{ kg/sm}$) gaf globaal hetzelfde beeld te zien als proef Q01 (zie fig. 4.4).

De sterk turbulente suspensiestroming strekte zich uit over grote lengte, echter niet tot het einde van de goot, zoals bij de vergelijkbare proef P08.

De proef duurde slechts 17 minuten, de teen van het stort was in die tijd uitgebouwd tot $x = \text{ca } 18 \text{ m}$.

Tijdens het storten werden, evenals bij de proef Q01, in de opbouw-fase enige kleine vloeifngen waargenomen bij WSM 1 en in mindere mate bij WSM 2. Daarna traden enkele grotere zettingsvloeifngen op, daar waar het onderwaterstort overging in een bovenwaterstort, dus in het begin van de uitbouw-fase. Een voorbeeld van het waterspanningsverloop bij de laatst genoemde vloeifngen is gegeven in figuur 4.9. De combinatie van waterspanning en dichtheid is gegeven in figuur 4.10. De maximale porositeitverandering is 3%. Voor het meetpaneel met de elektrische dichtheidsmeters is de maximale dikte van de verweekte laag ongeveer 0,75 m. Voor de smalle kunststof plaat op $x = 10,30 \text{ m}$ is de maximale dikte 0,85 m. De waterspanningsverdeling in de goot op verschillende tijdstippen is gegeven in figuur 4.11 en 4.12.

De waterspanningsmeters op de bodem van de goot geven ongeveer het verloop van de waterlijn op het bovenwaterstort. De waterspanningen in de verticale raaien gemeten bij $x = 8,1$ en $x = 10,3 \text{ m}$, geven een wat merkwaardig verloop. Voor $x = 8,1$ en $z = 1,4 \text{ m}$ en voor $x = 10,3$ en $z = 0,8$ en $1,7 \text{ m}$ is de waterspanning lager dan voor de andere waterspanningsmeters.

Waarschijnlijk worden deze lagere waarden veroorzaakt door lekkage tussen de meetpanelen en de multiplex platen. Deze lekkage is na afloop van de proeven waargenomen, doordat het zand uit de goot in de ruimte tussen de panelen en de betonnen gootwand stroomde. Tijdens de proeven verstoort deze lekkage lokaal de waterspanning. Deze verstoring is hinderlijk, omdat het nu niet mogelijk is de dikte van de verweekte laag uit de waterspanningsregistraties te bepalen zoals aangegeven in figuur 4.13. Om dit te kunnen doen waren juist twee verticale raaien met waterspanningsmeters aangebracht. De eerder genoemde dikte is nu geschat uit de stijging van de waterspanning tijdens de vloeifng. Zoals echter

reeds eerder opgemerkt, is het bij deze methode niet zeker wat de invloed is van grondwaterstroming.

Na afloop van proef Q02 is een extra erosieproef uitgevoerd (fig. 4.5). Nadat de overstort was verwijderd werd, gestroomd met eenzelfde debiet ($q = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$), maar zonder zand. Op deze wijze werd ook bij de andere proeven de goot na afloop schoongespoeld.

Er ontwikkelden zich op regelmatige afstand een drie- tot vijftal steile bressen met een hoogte van meer dan ca. 0,5 m. Aanvankelijk verliep de erosie zeer snel, maar op den duur werd de hoogte van de bressen geringer, evenals de onderlinge afstanden en namen de erosiesnelheden af.

Tegelijkertijd nam de gemiddelde helling van het stort af, gemeten van bovenkant stort tot beneden waterstand (op $z = 0 \text{ m}$).

Het erosieproces is te vergelijken met het vormen van geulen op een bovenwaterstort bij het dalen van de benedenwaterstand tengevolge van het getij [10]. Experimenteel onderzoek hiernaar is uitgevoerd in de kantelgoot, zie [15]. Een vergelijkbaar erosieproces treedt ook op bij een dijkdoorbraak, een proces waarnaar studie is verricht op de TU Delft, zie [14]. De bressen zijn te vergelijken met de bresprocessen welke optreden tijdens het zuigen van zand, waarnaar experimenteel onderzoek is uitgevoerd in de cuttergoot van WL.

Tijdens het schoonspoelen van de goot ontstond een steil talud met wateronderspanningen. De taludvorm is gegeven in figuur 4.5, een voorbeeld van het verloop van de waterspanning in figuur 4.5. De verdeling van de wateronderspanningen in de goot op twee verschillende tijdstippen is gegeven in figuur 4.14.

4.2.3 Proef Q03

Proef Q03, met een zandproduktie van $8,0 \text{ kg/sm}$, is vergelijkbaar met de proeven P05 en P10 met het fijne zand. De stortontwikkeling was in tegenstelling tot de genoemde proeven echter zeer regelmatig (fig. 4.6). Het zandtransport vond voornamelijk plaats door korrelstroompjes. Af en toe werden wat zandwolkjes opgewerveld. Het talud was zo steil, dat de korrelstroompjes zich tot aan de teen van het stort konden uitstrekken. Er traden geen duidelijke zettingsvloeiingen of andere instabiliteiten, zoals bressen

of mengselsprongen op. De laagsgewijze afzetting van het zand bleef gedurende de gehele proef goed zichtbaar, tengevolge van de aanwezigheid van donker gekleurde en glinsterende zanddeeltjes.

Na afloop van de proef werd kunstmatig een vloeifinkje geïnduceerd, door de meetinstrumenten van de meetwagen in het zandpakket te steken. Lokaal trad inderdaad een kleine zettingsvloeiing op, die zich echter niet over grote afstand uitbreidde. Hiermee werd geïllustreerd, dat het zandpakket wel zettingsvloeiingsgevoelig was.

De waterspanningsregistraties tonen een kleine vloeifing aan het begin van de goot, wanneer het stort overgaat van onderwater naar bovenwaterstort.

4.2.4 Proef Q04

Proef Q04 was de proef met de laagste zandproduktie ($s = 3,2$ kg/sm), vergelijkbaar met proef P06 van de eerste serie. Nog in sterkere mate dan bij proef Q03 het geval was, had de stortontwikkeling een zeer regelmatig karakter (fig. 4.7).

Het talud was zeer steil, bijna 1:2. Korrelstroompjes, met nauwelijks enige opwerveling, zorgden voor een nette, laagsgewijze stortopbouw. De korrelstroompjes manifesteerden zich als dunne, snelstromende zandtongetjes. Aan het wateroppervlak, in de buurt van de rand van het bovenwaterstort, kon een geringe retourstroming worden waargenomen.

De waterstand bij proef Q04 was zo hoog mogelijk ingesteld, namelijk op 1,95 m, teneinde de kans op zettingsvloeiingen te vergroten. Er is éénmaal een kleine vloeifing, bij $x = 5,5$ m, geconstateerd, van ca. 0,30 m diep. Uit de waterspanningsregistratie bleek dat er ook een tweede vloeifing is geweest, die echter niet door de glaswand is waargenomen. De verstoring van het stort werd weer snel hersteld door nieuwe laagsgewijze afzettingen. De verbroken laagjesstructuur bleef echter duidelijk herkenbaar.

Tijdens proef Q04 is ruim 2,5 uur gestroomd. De teen van het stort werd in die tijd uitgebouwd tot $x = 15$ m. Op dat moment begon het bovenwaterstort over de rand van de goot te stromen, ter plaatse van het tweede paneel waar het houten schot ophield, en werd de proef beëindigd.

N.B.: De figuren die het waterspanningsverloop aangeven op de verschillende tijdstippen hebben voor de verschillende proeven en tijdsintervallen verschillende schaalverdelingen, langs de druk-as. Hierop moet men bedacht zijn bij het vergelijken van de verschillende figuren.

5 HYDRAULISCHE ASPEKTEN

5.1 Hydraulische metingen

5.1.1 Meetprocedure.

Met behulp van de meetinstrumenten van de meetwagen en het WL-data-acquisitiesysteem (fig. 3.15), beschreven in de paragrafen 3.4.1 t/m 3.4.3, zijn alle van belang zijnde hydraulische grootheden voor alle proeven continu in de tijd vastgelegd. De procedure voor de metingen met de instrumenten van de meetwagen verliep als volgt:

- de meetwagen werd naar de gewenste x-positie gereden,
- het meetprofiel met de instrumenten werd naar de gewenste z-positie geschoven, wat gecontroleerd kon worden met de positiewijzer (zie fig. 3.20),
- de x- en de z-positie werden genoteerd op de papierrecorderuitvoer,
- er werd gedurende een zekere periode gemeten, meestal totdat de instrumenten door het naderende stort ingezand raakten,
- bij iedere verandering van de positie van de instrumenten of bij een andere gebeurtenis werd eerst een puls met het pulsapparaat gegeven.

Op deze wijze zijn er steeds een aantal perioden doorgemeten, waarin de instrumenten zich eerst in vrij schoon water, vervolgens in de mengselstroom en uiteindelijk in het zandpakket bevonden. Er kon dus steeds een beeld van een doorsnede van de mengselstroom verkregen worden.

Gezien de veelheid aan meetgegevens is voor een nadere analyse een keuze gemaakt voor een bepaalde meetperiode, welke een representatief beeld geeft van het verloop van de hydraulische processen tijdens de stortproeven.

Er zijn twee perioden van 500 sec van proef Q01 voor nadere analyse geselecteerd, namelijk periode a van 1300 tot 1800 sec en periode b van 650 tot 1150 sec. De tijd correspondeert met de tijd van de grondmechanische instrumentatie en de tijd van de videobeelden.

Een verdergaande analyse van al het meetmateriaal kan als aanbeveling voor nader onderzoek geformuleerd worden.

5.1.2 Analyse periode a

5.1.2.1 Stortparameters

Na selectie van een interessante periode voor nadere analyse is eerst het verloop van de drie stortparameters, het specifiek debiet (q), de concentratie (c) en de specifieke zandproductie (s) voor de desbetreffende periode geanalyseerd (zie fig. 5.1 t/m 5.3). Hiervoor zijn de meetresultaten gebruikt van de dichtheidsmeter van de sleepwagen en de debietmeter van de mengtank.

De gerealiseerde waarden van de stortparameters voldeden gemiddeld goed aan de gewenste waarden, namelijk $q = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$, $c = 12 \%$ en $s = 32 \text{ kg/sm}$.

De concentratie (fig. 5.2) en daarmee ook de zandproductie (fig. 5.3) vertoonde een lichte schommeling met een periode van ca. 50 sec en een variatie van max. 4%, dus van 8 tot 16%. Dit kwam door het stapsgewijs omlaagstellen van de zuigbuis van de sleepwagen (zie ook paragraaf 3.3 en 3.4.2). De variatie van de concentratie in de mengtank zal echter veel geringer geweest zijn.

5.1.2.2 Positie meetwagen

Om de meetresultaten goed te kunnen interpreteren, is het van belang te weten op welke posities de meetwagen in periode a heeft gestaan en op welke tijdstippen er wijzigingen zijn opgetreden. Daartoe geeft fig. 5.4 de signalen van het pulsapparaat met de bijbehorende posities van de onderste meetinstrumenten (EMS en GCM I). Tezamen met de papierrecorder uitvoer (zie par. 3.4.3) is dan bekend dat in de periode tussen de pulsen van 1625 en 1675 sec het meetprofiel omhooggesteld werd. Er kunnen dus 2 subperiodes onderscheiden worden, subperiode a.1 van 1300 tot 1625 sec en subperiode a.2 van 1675 tot 1800 sec.

5.1.2.3 Mengselstroomsnelheid

De snelheidsregistraties met de snelheidsmeter (EMS) voor periode a is gegeven in fig. 5.5. Het blijkt dat de mengselstroomsnelheid tot het tijdstip 1400 sec sterk toeneemt en zelfs waarden tot boven het meetbereik van 1 m/s aanneemt. Dan valt de snelheid snel terug naar 0.

Blijkbaar registreert de snelheidsmeter de bij proef Q01 visueel duidelijk waargenomen turbulente suspensiestroming. Naarmate de snelheidsmeter dieper in de mengselstroming steekt neemt de stroomsnelheid toe, totdat het ingezand raakt. De snelheidsregistratie geeft dus een beeld van het snelheidsprofiel van de mengselstroming.

Na enige verstoringen tijdens het omhoogstellen van het meetprofiel herhaalt dit proces zich in de tweede subperiode, waarbij de snelheid iets minder hoge waarden bereikt (tot 1 m/s).

Verder is zichtbaar dat de EMS in de periode dat het instrument ingezand was niet exact nul aangaf, maar ongeveer -0,02 m/s, hoewel de nulstand in stilstaand water gecalibreerd was. Dit verschijnsel was al tijdens de eerste proevenserie geconstateerd en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de afwijkende magnetische permeabiliteit van het zand t.o.v. water.

Theoretisch zou er dus een concentratieafhankelijke correctie toegepast moeten worden. Voor toepassing tijdens de stortproeven is de afwijking echter verwaarloosbaar.

5.1.2.4 Zandconcentraties

De registraties van de twee concentratiemeters (GCM I en, 30 mm hoger, GCM II) voor periode a is gegeven in de figuren 5.6 en 5.7.

De twee subperioden welke bij de snelheidsregistratie konden worden onderscheiden zijn ook hier duidelijk te herkennen. In subperiode a.1 neemt de concentratie bij beide instrumenten toe van vrijwel nul in het schone water tot ongeveer 50 % in het vaste zandpakket.

Hoewel de beide instrumenten GCM I en II identiek waren en dus dezelfde ijkcurve hadden (zie appendix A) kon de nulwaarde, het voltage dat het instrument aangeeft in schoon water, verschillen, bijvoorbeeld doordat zich wat slib op de opnemers had afgezet. Uit de gemeten voltages echter kon de juiste nulwaarde voor de desbetreffende periode afgelezen worden. Voor

GCM I bleek de nulwaarde een waarde van $-0,11$ Volt en voor GCM II van $-0,054$ Volt aangenomen te hebben, waarbij rekening is gehouden met de versterking van de signalen met een factor 5.

Met deze nulwaarden en de experimenteel bepaalde ijkcurve konden de concentraties gegeven in de figuren 5.6 en 5.7, uit de meetsignalen berekend worden.

Opvallend is dat de concentratie in zeer korte tijd toenam van nul tot de maximale waarde. Alleen in de tijdsperiode van 1375 tot 1425 en 1675 tot 1725 sec bevonden de instrumenten zich in de mengselstroming. Toch is de toename in concentratie niet zo abrupt dat er geen sprake meer was van een geleidelijke toename maar van een concentratiesprong, zoals het geval zou zijn indien de instrumenten ingezand raakten door korrelstromingen of een zettingsvloeiing, zie [18]. Er kon dus een beeld verkregen worden van het concentratieprofiel in de mengselstroming, welke zich manifesteerde als een turbulente suspensiestroming.

Door vergelijking van de registraties van de twee instrumenten kan een indruk verkegen worden van de concentratiegradiënt in de suspensiestroming. In fig. 5.8 is daartoe het verschil in concentratie (GCM I - GCM II) gegeven, de verticale gradiënt volgt uit deze figuur door deling van de waarden door de verticale afstand (0,03 m). De gradiënt bleek in helder water en in het zandpakket vrijwel nul, zoals te verwachten, en in de turbulente suspensiestroming een maximale waarde van ca 13 m^{-1} aan te nemen (40 % per 0,03 m). Dit is aanzienlijk meer dan de maximale waarde van 4 m^{-1} (12 % per 0,03 m) die verwacht kon worden indien de zand-watermengselstroming als een homogene, uniforme dichtheidsstroom met een concentratie gelijk aan de beginconcentratie (dus 12 % voor proef Q01) opgevat mocht worden. Bij de eerste proevenserie werd, met name bij de hoge zandproducties (proeven P08 en P09) de indruk verkregen dat dit wel het geval was. Dit verschil komt waarschijnlijk door de ruim 2x zo hoge valsnelheid van het grovere Wadzand, waardoor de concentratiegradiënten in de suspensiestroming aanzienlijk moeten toenemen.

5.1.2.5 Zandflux

De horizontale zandflux (ψ) werd in [18] gedefinieerd als de hoeveelheid zand welke door een eenheid van oppervlakte in horizontale richting getransporteerd wordt. In formule:

$$\psi = \rho_s u c \quad (\text{kg/sm}^2) \quad (5.1)$$

waarin ρ_s = dichtheid zand (kg/m^3)
 u = mengselstroomsnelheid (m/s)
 c = zand-volumeconcentratie $(-)$

Indien de stroming die het zand transporteert een hoek maakt met de horizontaal blijft (5.1) toch geldig, u is dan de horizontale component van de stroomsnelheid.

Uit de signalen van de snelheids- (EMS) en concentratiemeter (GCM I) kan de zandflux in periode a berekend worden (zie fig. 5.9). De twee subperiodes a.1 en a.2, waarin de zandflux snel toe- en ook snel weer afneemt, zijn duidelijk herkenbaar. Uit de figuur is af te lezen, dat met name in subperiode a.1 zeer hoge waarden van de zandflux optraden, tot ca. 800 kg/sm^2 toe. In de tweede subperiode werden waarden tot 200 kg/sm^2 bereikt. Gegeven de zandproduktie s bij proef Q01 van 32 kg/sm kan, ter vergelijking, de minimale laagdikte berekend worden welke zou optreden indien deze zandproduktie met dezelfde intensiteit zou optreden, namelijk $h = s/\psi = 0,05$ tot $0,15$ m. In een mengselsprong zal de zandflux erg gering zijn. Op een eroderend, steil traject waar de mengselstroom superkritisch stroomt, zal de zandflux erg hoog zijn. Dit laatste is waarschijnlijk het geval geweest in subperiode a.1.

De genoemde waarden van de zandflux kunnen ook vergeleken worden met de verticale zandflux, de sedimentatie. Voor het Wadzand is de sedimentatie bij een concentratie van ca. 12% van de orde 5 kg/sm^2 . In de suspensiestroming is de verticale zandflux dus zeer klein t.o.v. de horizontale. Dat betekent dat het transport van zand en water in de mengselstroming beiden vrijwel in dezelfde richting plaatsvinden en dat een 1-dimensionale, homogene, één-fase beschrijving van een dergelijke stroming verantwoord is.

5.1.3 Analyse periode b van proef Q01

Ter vergelijking met de in paragraaf 5.1.2 beschreven meetperiode is een tweede periode van 500 sec geanalyseerd, namelijk van tijdstip 650 tot tijdstip 1150 sec. Deze periode ligt helemaal in het beginstadium van de proef. In paragraaf 3.4.2 zijn al de figuren 3.9 t/m 3.11 genoemd, welke het verloop van de stortparameters debiet, dichtheid en specifieke zandproductie voor deze beginperiode geven.

Figuur 5.10 geeft de signalen van het pulsapparaat en de bijbehorende posities van de meetwagen. De eerste puls geeft het tijdstip van de daadwerkelijke start van de proef, het tijdstip van het openen van de klep ($t = 675$ sec, vergelijk fig. 3.9 of 3.11). Bij de tweede puls ($t = 800$ sec) werden de instrumenten op de positie $x = 11,0$ m en $z = 0,20$ m gepositioneerd, bij de derde puls ($t = 1000$ sec) werd het meetprofiel omhooggeschoven naar $z = 0,70$ m.

Figuur 5.11 geeft het bijbehorende snelheidsverloop. In de subperiode van 800 tot 1000 sec werden vlak boven de gootbodem behoorlijke stroomsnelheden gemeten, tot 0,6 m/s toe.

Het concentratieverloop (GCM I), gegeven in figuur 5.12 waarvan de schaal overigens veel groter is dan van de vergelijkbare figuren 5.6 en 5.7, geeft echter nauwelijks significante waarden aan.

Blijkbaar traden er al behoorlijke stroomsnelheden op, terwijl er nog nauwelijks een mengselstroom aanwezig was. Waarschijnlijk had dit te maken met het optreden van traagheidseffecten ten gevolge van de stroomsnelheden bij de instroming. In de beginfase van de proef, waarbij er nog nauwelijks een stort was gevormd en er nog geen sprake was van horizontale uitbouw met een bovenwaterstort, konden deze traagheidseffecten van belang zijn. Zou de gootbodem uit loskorrelig zand bestaan, dan zou zich ter plaatse van de instroming een spuitkuil ontwikkelen.

Daarnaast zal zich in de gehele goot een twee-dimensionaal stroombeeld instellen met een neer boven het stort en een netto doorstroomdebiet van water van de instroming naar de overstort. De stroomsnelheden die hiermee gepaard gaan zijn in het algemeen zeer gering.

Figuur 5.13 tenslotte geeft de resulterende zandflux. Vanwege de vrijwel verwaarloosbare concentraties is ook de zandflux voor de gehele periode vrijwel nul.

5.2 Storhelling

Op soortgelijke wijze als bij de proeven met het fijne zand is het verband onderzocht tussen de storhelling en de overige stortparameters, zoals concentratie, debiet en zandproductie. Vergelijking van de resultaten met die van de eerste serie proeven levert tevens informatie op over de invloed van de korreldiameter, eveneens een belangrijke stortparameter.

De storhelling was in vergelijking met de eerste serie proeven zeer constant in de tijd. Bij de proeven Q01 en Q02 was er nog een geringe lokale variatie tengevolge van erosie en mengselsprongen. Bij de proeven Q03 en Q04 was de storhelling vrijwel geheel constant gedurende de gehele proef. De hellingen waren daarom vrij eenvoudig en eenduidig te bepalen. Bij de analyse van de storhellingen van de eerste serie proeven werd geconstateerd dat de gemiddelde storhellingen steiler waren dan die van vergelijkbare prototypesituaties, maar dat de minimale hellingen wel redelijk overeenstemden. Geopperd werd dat in het prototype ten gevolge van zettingsvloeiingen na afloop van het stortproces nog een verdere verflauwing optrad, zodat de helling uiteindelijk overeenkwam met de minimale helling, bepaald door de vloeiingen, zie [18]. Analyse van de prototype metingen, uitgevoerd ten tijde van de zandsluiting Krammer, geven aanwijzingen dat er inderdaad een verdere verflauwing in de tijd optrad, zie [10]. Wanneer de omstandigheden het optreden van belangrijke zettingsvloeiingen echter niet toestond, zoals bij de huidige proeven het geval was, zijn er ook geen belangrijk flauwere minimale hellingen en zal er geen verflauwing na afloop van het storten optreden.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de gemeten hellingen per proef (zie ook fig. 4.3 t/m 4.7).

Het bleek dat de concentratie en het debiet, evenals bij de eerste serie proeven geen merkbare invloed hadden op de resulterende storhelling. Immers, Q01 en Q02 zijn uitgevoerd met hetzelfde debiet en Q01, Q03 en Q04 met dezelfde concentratie, terwijl de storhellingen duidelijk verschilden. Wel van belang bleken de specifieke zandproductie en de korreldiameter.

5.2.1 Verband met de specifieke zandproductie

Evenals bij de proeven met het fijne zand bleek de specifieke zandproductie de belangrijkste grootte wat betreft de resulterende storthelling. In fig. 5.14 is op dubbellogaritmische schaal de gemeten helling (i) als functie van de specifieke zandproductie (s) gegeven, hetgeen een nette rechte lijn oplevert.

In de figuur zijn ook de gemiddelde hellingen van de eerste proevenserie opgenomen. Behalve dat de hellingen voor het grovere zand aanzienlijk steiler waren, is opvallend dat de lijnen voor beide zandsoorten vrijwel parallel lopen en dus dat de hellingen hetzelfde verband met de zandproductie vertonen.

Een lineaire regressieanalyse levert het volgende empirische verband:

$$i_{225} = 0,75 s^{-0,42} \quad (-) \quad (5.2)$$

Voor het fijne zand werd gevonden, zie [18]:

$$i_{135} = 0,43 s^{-0,38} \quad (-) \quad (5.3)$$

waarin i_x = gemiddelde storthelling voor $x \mu\text{m}$ (-)
 s = specifieke zandproductie (kg/sm)

In beide relaties komt de macht 0,4 naar voren, welke ook werd gevonden na afleiding met de zandtransportformule van Engelund en Hansen, [18, 19]. De nieuwe proefresultaten geven dus een extra bevestiging van dit verband.

5.2.2 Verband met de korreldiameter

Nu er twee series onderling goed vergelijkbare proeven met verschillende korreldiameters zijn uitgevoerd, kan het verband tussen de storthelling en de korreldiameter nader geanalyseerd worden. In [9] en [19] is een inventarisatie van prototypemetingen opgenomen, welke een duidelijk verband laten zien, zij het met een vrij grote spreiding. In fig. 5.15 zijn deze prototypemetingen opgenomen, alsmede de laboratoriummetingen met het fijne

en het grovere zand en eerder uitgevoerd laboratoriumonderzoek. Deze metingen zijn in [18] uitgebreid beschreven.

Uit de figuur kan een duidelijk toenemende tendens afgeleid worden.

Kwantitatief is er nog niet veel uit te halen. Worden de proeven met het fijne en het grovere zand onderling vergeleken, bij eenzelfde zandproduktie, bijvoorbeeld met behulp van de empirische relaties (5.2) en (5.3), dan volgt dat de hellingen globaal een factor $0,75 / 0,43$ dus 1,7 groter zijn. Dit komt overeen met de verhouding van de korreldiameters, namelijk $225 / 135$. Globaal kan op grond van deze proeven dus gesteld worden:

$$i \sim d_{50} \quad (5.4)$$

d.w.z. de storthelling is globaal lineair evenredig met de korreldiameter. Voor andere korreldiameters kan die relatie anders zijn, zie paragraaf 5.3.2. Dit betekent dat het verband sterker is dan op grond van de eerder genoemde afleiding met de zandtransportformule van Engelund en Hansen kon worden verwacht. Daaruit volgde een verband met de korreldiameter verheven tot de macht 0,6.

Hetzelfde verschijnsel, een vrijwel lineair verband tussen storthelling en korreldiameter, werd gevonden tijdens de proeven in de kantelgoot, met betrekking tot de stroming van zand-watremengsels op een bovenwaterstort [15][19].

Hier is alleen gekeken naar de invloed van de d_{50} , ongetwijfeld zullen in de praktijk ook nog andere factoren, zoals zeefkromme en slibgehalte, invloed hebben.

5.3 Classificatie stortproeven

De classificatie op grond van enkele kentallen betreffende de stortparameters en de geometrie van de stortlocatie, zoals voorgesteld in het rapport van de eerste serie proeven [18, 21], zal hier met de nieuwe proefgegevens verder worden uitgewerkt

5.3.1 Grondmechanische kentallen

Ook bij de proeven met het grovere zand is gebleken dat de dichtheid van het gesedimenteerde zandpakket steeds zo laag was dat zettingsvloeiingen mogelijk waren. Het porositeitskental N , gedefinieerd volgens:

$$N = \frac{n}{n_{\text{krit}}} \quad (-) \quad (5.5)$$

waarin n de aktuele en n_{krit} de kritieke porositeit zijn, was dus steeds groter dan 1 (zie ook hoofdstuk 6).

Het tweede kental heeft betrekking op de taludhoogte waarbij nog zettingsvloeiingen kunnen optreden, gedefinieerd volgens:

$$H = \frac{h}{h_{\text{krit}}} \quad (-) \quad (5.6)$$

waarin h de aktuele en h_{krit} de kritieke taludhoogte is. Aangezien er bij de tweede serie proeven geen belangrijke zettingsvloeiingen zijn opgetreden, kan geconcludeerd worden dat H kleiner dan 1 was.

Blijkbaar is h_{krit} dus afhankelijk van de zandsoort, immers de taludhoogte was bij beide proevenseries vrijwel gelijk. Vergelijk bijvoorbeeld proef Q04 met $h = 1,95$ m, waar vrijwel geen vloeiingen optraden en proef P06 met $h = 2,05$ m, waar wel vloeiingen optraden. In hoofdstuk 6 wordt hieraan nader aandacht besteed.

5.3.2 Hydraulisch kental

Het hydraulisch kental kan worden gedefinieerd als in [18] volgens:

$$L = \frac{L_{\text{sed}}}{h} \tan \phi \quad (-) \quad (5.7)$$

waarin h de taludhoogte, ϕ de hoek van het natuurlijke talud van het zand en L_{sed} de sedimentatielengte zijn. De sedimentatielengte is de lengte welke de mengselstroom heeft afgelegd nadat de grootste fractie (ca. 90%) van het zand is uitgezakt. Voor een turbulente suspensiestroming kan L_{sed} worden benaderd met:

$$L_{\text{sed}} = \frac{q}{w_s} = \frac{q}{w_o (1-c)^4} \quad (-) \quad (5.8)$$

waarin q = specifiek mengseldebiet (m^2/s)
 w_o = valsnelheid zandkorrel (m/s)
 w_s = valsnelheid in suspensie (m/s)
 c = zand-volumeconcentratie $(-)$

Om de sedimentatielengtes te kunnen vergelijken met die van de eerste serie proeven, is in (5.8) niet een macht 5 in plaats van 4 ingevoerd, welke theoretisch beter zou kunnen voldoen (zie par. 3.1.4). De relatie is voor het Wadzand geschetst in fig. 5.16, waarin ook de vier stortproeven zijn ingetekend. Zie ook tabel 5.1.

De sedimentatielengtes waren bij de tweede serie proeven aanzienlijk kleiner dan bij de eerste serie. Toch kan ook bij de tweede proevenserie op grond van het hydraulisch kental L een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen enerzijds de proeven Q01 en Q02 met vrij grote waarden en anderzijds de proeven Q03 en Q04 met vrij kleine waarden van L_{sed} resp. L . In het eerste geval verflauwde het talud totdat min of meer een evenwichtssituatie ontstond en het talud gelijkmatig uitgebouwd werd. In het tweede geval versteilde het talud, doordat de sedimentatie voornamelijk op de bovenrand plaatsvond. Het bleef echter wel stabiel. De mengselstroom kon zich daardoor over steeds grotere lengte uitstrekken totdat de teen van het talud werd bereikt. Vanaf dat moment trad er geen versteiling meer op en

ontstond er wederom een evenwichtssituatie, waarin het talud gelijkmatig uitgebouwd werd.

Wordt in (5.7) in plaats van het natuurlijk talud ($\tan \phi$) de werkelijke storthelling ($\tan \alpha$) ingevoerd, dan kan gesteld worden dat in het geval van een evenwichtssituatie geldt $L = 1$. Omdat de storthelling niet constant, maar een functie van de zandproductie en de korreldiameter is, maakt de invoering ervan het kental L echter minder praktisch bruikbaar.

Wel biedt het zo verkregen kental een mogelijkheid een theoretische relatie tussen de korreldiameter en de storthelling af te leiden.

Er geldt dus (formule (5.7), maar nu met de storthelling $\tan \alpha$):

$$1 = \frac{L_{\text{sed}}}{h} \tan \alpha \quad (5.9)$$

Uit (5.8) volgt:

$$L_{\text{sed}} = \frac{1}{w_0} \quad (5.10)$$

Invullen in (5.9) geeft

$$\tan \alpha = w_0 \quad (5.11)$$

Voor de beproefde zandsoorten bleek de valsnelheid ongeveer even-redig met de korreldiameter (zie paragraaf 3.1.3).

Uit formule (3.1) volgt dat voor grote korreldiameters $w_0 \sim \sqrt{d}$ en voor kleine $w_0 \sim d^2$. Het is dus te verwachten dat respectievelijk de storthelling eenzelfde evenredigheid met de korrel diameter heeft, dus $\tan \alpha \sim \sqrt{d}$ voor grotere diameters dan beproefd en $\tan \alpha \sim d^2$ voor kleinere

5.3.3 Classificatiematrix

De classificatie op grond van de kentallen N, H en L zoals gegeven in [18], kan nu aangevuld worden met de gegevens van de tweede serie proeven. Het belangrijkste onderscheid tussen de twee proevenseries wordt gekenmerkt door het kental H. Bij de proeven met fijn zand was $H > 1$, bij de proeven met het grovere zand was kennelijk $H < 1$. Fig. 5.17 geeft de aangevulde matrix weer. Uit deze beschouwingen volgt de aanbeveling om proeven uit te voeren met dezelfde zandsoort, maar met een grotere waterdiepte, zodat wederom $H > 1$ kan worden.

5.4 Theoretische classificatie typen zand-watermengselstroming

Gedurende zowel de eerste als de tweede serie zandstortproeven is een verscheidenheid aan typen zand-watermengselstromingen waargenomen, zoals suspensiestromingen, korrelstromingen en zettingsvloeiingen, zie ook paragraaf 4.1 en [16]. Daarnaast worden er in de literatuur nog meer verschillende typen stromingen beschreven, zie bijv. [4], zoals turbidity currents, mudflows, sneeuw- en rotslawines en, als vormen van zandtransport in rivieren, suspensie- en bodemtransport. Op grond van al deze gegevens, alsmede enkele theoretische beschouwingen kan een classificatie van alle typen zand-watermengselstroming ingevoerd worden, op grond van een tweetal stromingskentallen, zie ook [21].

5.4.1 Reynoldsgetal

In eerste instantie wordt het gedrag van de mengselstroming, evenals van alle andere typen stromingen bepaald door de stabiliteit van de stroming. Deze stabiliteit kan worden gekenmerkt door het Reynoldsgetal (Re), gedefinieerd volgens:

$$Re = \frac{q}{v_m} \quad (-) \quad (5.12)$$

waarin q = specifiek mengseldebiet (m^2/s)

v_m = viscositeit van het mengsel (m^2/s)

In de literatuur worden diverse uitdrukkingen gegeven voor de viscositeit v_m als functie van de concentratie, zie bijv. [1], [13], [17].

In laminaire omstandigheden, bij lage waarden van Re , vindt er geen inwendige verticale uitwisseling plaats in het afstromende zand-watermengsel en wordt de overdracht van normaal- en schuifspanningen bepaald door materiaaleigenschappen van de korrels en de vloeistof (zoals bijvoorbeeld de viscositeit).

In turbulente omstandigheden, bij hoge waarden van Re , vindt er een intensieve verticale uitwisseling (diffusie) plaats, waardoor de overdracht van normaal- en schuifspanningen volledig wordt gedomineerd door de stromingseigenschappen van het mengsel (zoals bijvoorbeeld de mengweglengte of de diffusie-coëfficiënt).

5.4.2 Bagnoldgetal

Een zand-watermengselstroming bestaat in principe uit twee fasen, het zand en het water, of meer algemeen de korrels en de vloeistof. Beide fasen kunnen van belang zijn voor het (macro-) stromingsgedrag van het mengsel. Elementair onderzoek naar dergelijke korrel-vloeistof stromingen is gefinitieerd door R.A. Bagnold, zie [1, 2].

De normaal- en schuifspanningen in een mengselstroming kunnen in principe worden overgedragen door zowel de korrel- als de vloeistoffase. Of één van beide fasen hierin de hoofdrol speelt of dat beide fasen van belang zijn,

kan worden gekenmerkt met het Bagnoldgetal (Ba), gedefinieerd volgens, zie [21]:

$$Ba = \Delta \lambda_c \left(\frac{d}{h}\right)^2 \cdot Re \quad (-) \quad (5.13)$$

waarin d = korreldiameter (m)
 h = mengselstroombdikte (m)
 Δ = relatieve korreldichtheid (-)
 λ_c = monotoon toenemende functie van de concentratie (-)

In de literatuur worden diverse, experimenteel bepaalde uitdrukkingen gegeven voor de functie λ_c , zie bijv. [1, 13, 17].

Hoge Bagnoldgetallen kunnen dus optreden bij hoge concentraties, relatief grote deeltjes ten opzichte van de laagdikte van de mengselstroom, relatief zware deeltjes ten opzichte van de omringende vloeistof, een lage viscositeit van de vloeistof en hoge mengseldebieten.

Bij zeer lage waarden van Ba , het zogenaamde viscous regime, zijn de korreleigenschappen niet of nauwelijks van belang en is er sprake van een gewone vloeistofstroming.

Bij zeer hoge waarden van Ba daarentegen, het inertial regime, zijn de vloeistofeigenschappen niet of nauwelijks van belang en is er sprake van een korrelstroming.

De zand-watermengsels waarvan bij de zandstortproeven sprake was, zullen in het algemeen gematigde waarden van het Bagnoldgetal vertonen, aangezien zowel de eigenschappen van het zand als die van het water van belang waren.

5.4.3 Classificatie zand-watermengselstromingen

Met behulp van de twee kentallen Ba en Re kunnen de verschillende waargenomen typen stroming worden gekarakteriseerd (zie de classificatiematrix, fig. 5.18).

De korrelstromingen, welke optraden in dunne geconcentreerde laagjes bij lage zandproducties (proeven Q03 en Q04) kunnen worden gekenmerkt door vrij hoge waarden van het Bagnoldgetal en lage waarden van het Reynoldsgetal. De korrels verdrongen elkaar als het ware in de stroming, waardoor er dispersieve krachten optraden tussen de korrels onderling (korrel-korrel interacties). De korrels bewogen zich echter hoofdzakelijk in één vlak, de stroming bleef dus laminair van karakter. Vergelijkbare typen stroming zijn bijvoorbeeld sheetflow en bepaalde vormen van bodemtransport. De invloed van het water tussen de korrels was waarschijnlijk niet verwaarloosbaar, wat bijvoorbeeld wel het geval is bij het afstromen van droog zand, waarin de dispersieve kracht direct van korrel op korrel wordt overgedragen en de lucht, de vloeistoffase, nauwelijks een rol speelt (inertial regime). Bij de korrel-korrel interacties in de korrelstromingen, zoals die tijdens de proeven zijn waargenomen speelt de viscositeit van het water waarschijnlijk wel een rol (macro-viscous regime).

De suspensiestromingen, welke optraden bij hoge zandproducties (proeven Q01 en Q02) worden gekenmerkt door hoge waarden van het Reynoldsgetal en wat lagere waarden van het Bagnoldgetal. In de suspensiestroming werden de korrels en de vloeistof door de turbulentie voortdurend gemengd, waardoor zich wateroverspanningen ontwikkelden en de korrels in suspensie gehouden konden worden (korrel-vloeistof interacties). Tijdens de eerste proevenserie zijn deze wateroverspanningen daadwerkelijk gemeten, [18]. Vergelijkbare typen stromingen zijn turbidity currents en de zand-watermengselstroming op een bovenwaterstort. Ook het suspensietransport in rivieren is vergelijkbaar, hoewel de invloed van het zand op de stroming daar meestal verwaarloosbaar is, zodat het Bagnoldgetal dan veel lagere waarden zal vertonen.

Zettingsvloeiingen, welke voornamelijk tijdens de eerste proevenserie werden waargenomen, zijn eigenlijk instationaire stromingen, omdat ze slechts gedurende korte tijd kunnen bestaan, namelijk zolang de wateroverspanningen nog niet weggelekt zijn. Ze kunnen worden gekenmerkt door vrij hoge Bagnoldgetallen en lage Reynoldsgetallen, vergelijkbaar met de eerder genoemde korrelstromingen. Hoewel de laagdikte aanzienlijk kan zijn, veel groter dan bij de korrelstromingen, is de stroomsnelheid veel geringer, zodat het Bagnoldgetal vergelijkbare waarden kan behouden. In een zettingsvloeiing zijn echter de korrel-vloeistof interacties van belang. De korrelspanningen verdwijnen tijdelijk door de vloeistofoverdruk, waardoor er ook duidelijke overeenkomsten bestaan met de eerder genoemde suspensiestromingen.

Tenslotte kan nog een bijzonder type stroming worden onderscheiden, welke tijdens de zandstortproeven weliswaar niet is opgetreden, maar waar in de literatuur veel aandacht is besteed, namelijk de steen- of rotslawine, zie bijv. [5]. Dit type turbulente korrelstroming kan worden gekenmerkt door hoge waarden van zowel het Bagnold- als het Reynoldsgetal. De inwendige spanningen in een dergelijke stroming worden overgedragen door interacties tussen hele wolken of "clusters" van deeltjes. Vergelijking van een dergelijke stroming met bijvoorbeeld een stroming van droog zand laat zien dat hogere Reynoldsgetallen bij gelijkblijvende Bagnoldgetallen alleen verkregen kunnen worden bij toename van de laagdikte. Dit kan verklaren waarom tot nog toe het zeer beweeglijke, vloeistofachtige gedrag van een rotslawine niet met kleinschalige laboratoriumproeven (zie bijv. [7, 8]) gesimuleerd kon worden.

Het is mogelijk dat bij het storten onder water met zeer grofkorrelig materiaal, bijvoorbeeld met grind of blokken, vergelijkbare stromingstypen zullen optreden.

6. GRONDMECHANISCHE ASPECTEN

6.1 Dichtheid

De resultaten van de dichtheidsmetingen na afloop van de proeven zijn weergegeven in figuur 6.1. Bij proef Q01 en in mindere mate 2 en 3 neemt de porositeit af bij toenemende hoogte van het zandpakket tot ongeveer de stilwaterlijn ($z = 1,75$ m). Voor proef Q02 is deze afname verklaarbaar: In de bovenste zandlaag zijn verschillende zettingsvloeiingen opgetreden waardoor de porositeit van de lagen afneemt.

De lage porositeit bij de waterlijn bij proef Q01 en proef Q03 wordt veroorzaakt door verdichten van het zandpakket wanneer het onderwaterstort overging in een boven-waterstort en een trapjestalud ontstond met afwisselende erosie en sedimentatie (zie paragraaf 4.2.1 en figuur 4.8 waaruit duidelijk de verdichting blijkt). De lage porositeit gemeten op 1,4 m bij proef Q01 is wat minder begrijpelijk. Uit de registratie van die dichtheidsmeter blijkt, dat bij inzanding van de dichtheids-meter direct die lage waarde wordt gemeten.

In figuur 6.1 blijkt dat tussen $z = 0$ en 1 m de dichtheidsverschillen klein zijn. Ook hier blijkt net als bij de proeven op Haringvlietzand [18], de dichtheid weer niet beïnvloed wordt door de stortparameters.

De hoge porositeit bij Q01 en Q02 bij $z = 2$ m wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat deze meters bij het einde van de proef nog maar net zijn ingezand. Het zand daar is nog niet verdicht door vloeiingen of wisselende erosie en aanzanding.

6.2 Sonderingen en elasticiteitsmodulus

Na afloop van de laatste proef (Q04) zijn op verschillende plaatsen in het zandtalud sonderingen uitgevoerd. Deze sonderingen zijn uitgevoerd met de sondeerinstallatie die aanwezig is op de conditioneringswagen van de cuttergoot. Deze wagen kon pas na de laatste proef over de stortgoot worden gereden. Ook maakt deze wagen slechts sonderingen mogelijk tot 0,45 m onder het zandniveau. Een schets van het zandtalud na afloop van de proeven is gegeven in figuur 6.2, met de lokaties van de sonderingen. De resultaten van de sonderingen zijn gegeven in figuur 6.3 A en B. Uit figuur 6.3 blijkt dat in het zand boven water nog een zekere conusweerstand wordt gemeten, maar dat deze in het zand onder water veel kleiner is.

De grotere conusweerstand boven water wordt veroorzaakt door de capillaire krachten in het onverzadigde zand.

De toename van de conusweerstand met de diepte kan worden gebruikt om een ruwe schatting te maken van de elasticiteitsmodulus van het zand. Uit figuur 6.3 is een gemiddelde gradiënt onder en boven water te bepalen. Het resultaat staat in tabel 6.1. De gradiënt van de conusweerstand is laag, zo laag dat het zeer de vraag is of de empirische formules, die het verband aangeven tussen conusweerstand en elasticiteitsmodulus ook opgaan voor deze lage waarden. Toch gebruikmakend van deze empirische formules wordt een elasticiteitsmodulus tussen $0,6 \cdot 10^3$ en $12 \cdot 10^3$ kPa gevonden.

De elasticiteitsmodulus kan ook worden bepaald uit de drukverdeling in een zettingsvloeiing, zoals beschreven in [18]. Geen van de opgetreden zettingsvloeiingen is zo bruikbaar als de in [18] beschreven vloeiing in proef P08. De nauwkeurigheid van de schatting van de elasticiteitsmodulus is daardoor ook minder. De resultaten van Q02 (zie figuur 6.4) zijn gebruikt. Hier neemt de waterspanning ongeveer 7 kPa toe tengevolge van een zettingsvloeiing. De aanname van een stapvormige belasting is wat twijfelachtig.

De maximale stijging in de waterspanning op de bodem van de goot gedeeld door de totale waterspanningstoename is ongeveer 2,5 (1/s). Volgens [18] geldt voor deze toename.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi_0}{2t\sqrt{c\pi t}} \left[(D-z) e^{-\frac{(D-z)^2}{4ct}} + (D+z) e^{-\frac{(D+z)^2}{4ct}} \right] \quad (6.1)$$

met:	C	de consolidatiecoëfficiënt	(m ² /s)
	t	aantal seconden na het begin van de stapbelasting	(s)
	ϕ_0	grootte van de stapbelasting in waterkolom	(m)
	$\frac{d\phi}{dt}$	de tijdsafgeleide van de potentiaal	(m/s)
	z	hoogte boven de gootbodem	(m)
	D	diepte van de gootbodem onder stapbelasting	(m)

C is te schrijven als:

$$C = \frac{k}{\rho g} \frac{1}{n\beta + \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}} \quad (6.2)$$

Met:	k	de doorlatendheid	(m/s)
	n	de porositeit	(-)
	β	de compressibiliteit	(1/kPa)
	E	de elasticiteitsmodulus van de grond	(kPa)
	ν	de Poisson ratio van de grond	(-)

Een maximale waarde voor $\frac{d\phi}{dt} / \phi_0$ van 2,5 1/s wordt gevonden bij $C \approx 2$. Omdat voor het losgepakte zand $E \ll \beta$ zal de term met E dominant zijn.

Met $k = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s

$\nu = 0,3$

$\rho g = 9,8$ kPa/m

volgt hieruit $E = 1.2 \cdot 10^4$ kPa, geheel vergelijkbaar met het voor Haringvliet zand gevonden resultaat ($1.0 \cdot 10^4$ kPa).

De pakking blijkt dus ook nu erg los. Voor losgepakt zand is een waarde $E \approx 10^5$ kPa gebruikelijk. De eerder genoemde met de sonderingen gevonden waarden liggen wat lager, dan de uit de consolidatie gevonden waarden. Aan beide bepalingen kleven onnauwkeurigheden. De bepaling met sonderingen is gebaseerd op een empirische relatie, die vrij zeker niet geldig is voor dit zeer losgepakte zand. Bij de bepaling uit de consolidatie tijd was geen echt stapvormige belasting aanwezig. Gezien deze onnauwkeurigheden is de overeenkomst tussen beide methoden redelijk.

6.3 Zettingsvloeiingen

6.3.1 Aantal vloeiingen

Het meest opmerkelijke resultaat van deze proeven op grof zand is het beperkte aantal zettingsvloeiingen. Vaak is alleen tijdens het begin van de proef bij WSM 01 wateroverspanning ten gevolge van een vloeiing gemeten. Tijdens de proef Q02 ontstonden ook vloeiingen tijdens de overgang onderwaterstort-bovenwaterstort.

Tijdens deze proeven bleek dat een steil talud van het stort op zichzelf geen aanleiding is voor een zettingsvloeiing. Proef Q02, met hoge productie, gaf zettingsvloeiingen bij een relatief flauw talud (1:7,4). De proeven Q03 en Q04 gaven geen zettingsvloeiingen, maar wel een heel steil talud (1:3 en 1:2,2).

De in het verleden gehanteerde theorie dat bij een kleine productie alle zand direct onder de waterlijn sedimenteert, waardoor het talud versteilt totdat een vloeiing ontstaat, blijkt voor dit zand niet op te gaan. Weliswaar is bij de kleine productie van proef Q03 en Q04 de sedimentatie lengte, zoals gedefinieerd in paragraaf 5.3.2, kort, maar door de steilheid van het talud rollen korrels toch door naar de teen van het talud. Hierdoor ontstaat een evenwichtssituatie en het steile talud wordt horizontaal uitgebouwd.

Dat in dit zand veel minder zettingsvloeiingen voorkomen dan in het Haringvlietzand kan worden verklaard met het volgende:

- Het wadzand heeft een grotere doorlatendheid waardoor wateroverspanningen sneller draineren
- De sedimentatielengte is kleiner naarmate de korreldiameter groter is, daarbij gaat voor kleinere debieten de suspensiestroom over in een korrelstroom met korrel-korrel interactie (zie paragraaf 5.4.2). Hierdoor worden de wateroverspanningen in het totale zandpakket kleiner. Er is dus minder uittredend verhang waardoor de kans op instabiliteit en vloeiingen kleiner wordt.
- Uit vergelijking van het punt met de maximale deviatorspanning in de natte kritieke dichtheid proef blijkt dat deze wordt bereikt bij een axiale rek van 0,6% voor het gebruikte wadzand en 0,2% voor het Haringvlietzand.
Deze waarden gelden voor de porositeit waarbij juist bezwijken optreedt, zie figuur 6.5 en 6.6. In het zandpakket met Haringvlietzand zal dus een kleinere storing tot bezwijken leiden dan in het wadzand, ook al is er geen drainage.

In de volgende paragraaf wordt met behulp van het model van appendix B ook een kwantitatieve conclusie mogelijk.

6.3.2 Invloed gebruikt zand volgens rekenmodel

In appendix B is een model afgeleid, dat de waterspanningsgeneratie tijdens het begin van een vloeifing beschrijft. In dit model wordt uitgegaan van een zeer eenvoudig spannings-rek gedrag voor het verwekende zand: een lineaire viscositeitsrelatie. Dit eenvoudige spannings-rek gedrag is waarschijnlijk ook de grootste tekortkoming van het model. Het model berekent de waarden van de viscositeit waarboven geen zettingsvloeiing meer kan voorkomen, afhankelijk van taludhelling en dikte van de verweekte laag. De gevonden waarden zijn zeer hoog, maar blijken ook bij volledige verweking wel voor te komen. In hoeverre het spanningsrek gedrag dan nog met een lineaire relatie te beschrijven is, is echter de vraag.

Het model kan worden gebruikt om bepaalde invloeden te onderzoeken. Zo wordt de berekende wateroverspanning onder een afschuivende laag voor volledige verweking gegeven door:

$$p = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right) \frac{\rho_w^2 g^2}{k} \frac{\beta n \Delta \sin \alpha}{\mu_s}} D^3 \quad (6.1)$$

met:	p	de wateroverspanning	(kPa)
	ρ_w	soortelijke massa van water	(kg/m ³)
	k	de doorlatendheid	(m/s)
	β	de relatie tussen schuifrek en volumerek (zie (B.2))	(-)
	n	de porositeit	(-)
	$\Delta =$	$\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$	(-)
	ρ_s	de soortelijke massa van het zand	(kg/m ³)
	μ_s	de dynamische viscositeit van het verweekte zand	(kg/sm)
	D	de dikte van de verweekte laag	(m)

De wateroverspanning nodig voor de verweking is evenredig met de dikte D. Toepassing van een ander zand met een andere doorlatendheid k, maar verder identieke eigenschappen geeft relatief t.o.v. de dikte van de zandlaag dezelfde overspanning wanneer $\frac{D^2}{k}$ constant blijft.

Uit vergelijking van de doorlatendheid van het wadzand met die van het Haringvlietzand blijkt dat die van het Wadzand 2,5 maal zo groot is. De diepte van de laag waarop vloeiingen kunnen optreden is dus $\sqrt{2,5} \approx 1,6$ maal zo groot. Nu blijken niet alle andere eigenschappen onveranderd. β heeft een andere waarde. De dikte D met gelijke relatieve wateroverspanning wordt daarom niet $\sqrt{2,5}$, maar $\sqrt{2} \approx 1,4$ maal zo hoog.

Zeer waarschijnlijk is deze dikte gerelateerd met de kritieke hoogte. De proeven met Haringvlietzand gaven een kritieke hoogte van 1,5 à 2 m. Voor wadzand zou die hoogte dan $1,4 * 1,5 \text{ m} = 2,1 \text{ à } 2,8 \text{ m}$ zijn. Bij een waterstand van 1,8 à 2,0 m, zoals tijdens de proeven, zijn dan dus geen vloeifngen te verwachten en wanneer ze toch optreden, moet dat gebeuren vlak bij de stilwaterlijn. Deze conclusie is in overeenstemming met de meetresultaten. Dit is nog geen bewijs dat h_{krit} evenredig is met $\frac{D}{\sqrt{k}}$, daarvoor zijn proeven met een grotere waterdiepte noodzakelijk.

6.3.3 Omvang en duur van de zettingsvloeifngen

Door het beperkt aantal zettingsvloeifngen en de verstoring in de gemeten waterspanning, waarschijnlijk door lekkage tussen de panelen, hebben de waterspanningsmetingen niet die gegevens opgeleverd die vooraf werden verwacht. Wel blijkt uit de waterspanningsregistratie, dat de omvang niet wezenlijk anders was dan bij de eerste metingen. De duur van de vloeifng nam af als op grond van de toegenomen valsnelheid kon worden verwacht, zoals verder in deze paragraaf zal worden aangetoond. De maximale dikte van het verweekte pakket is ongeveer 0,85 m. Bij de eerder uitgevoerde proeven was die dikte ongeveer 1,0 m. De tijdsduur dat wateroverspanning aanwezig is, is moeilijk vast te stellen, omdat de zettingsvloeifngen bij proef Q02 pas optraden wanneer zich een bovenwaterstort had gevormd. Op een onderwaterstort is de hydrostatische waterspanning de referentiewaarde. Op een bovenwaterstort is het freatische niveau onbekend en wisselend en is het hydrostatische niveau niet te gebruiken als referentie. Als schatting kan worden aangenomen dat wanneer de waterspanning na de vloeifng nog slechts weinig verandert dat dan de vloeifng is gestopt. Met die aanname blijkt de duur van de eerder genoemde vloeifng met een maximale dikte van 0,85 m ongeveer 100 seconden. Dit is korter dan een vergelijkbare vloeifng die is opgetreden in het Haringvlietzand, daarin was de duur van de vloeifng 150 seconden.

Op grond van het 1-dimensionaal numeriek model voor een zettingsvloeiing [18] is te verwachten dat de duur van de vloeiing, bij gelijke omvang aan het begin, omgekeerd evenredig is met w_0 , de individuele valsnelheid van de korrel. Voor de beproefde korrelgroottes blijkt de duur van de vloeiing dan omgekeerd evenredig met d , de diameter van de korrel. Dit komt dus overeen met de metingen, maar de vergelijking kon slechts voor één vloeiing gemaakt worden.

Deze vloeiing is ook doorgerekend met genoemd 1-dimensionaal numeriek model voor een zettingsvloeiing. In dit model is voor de gereduceerde valsnelheid de relatie:

$$w_s = w_0 (1 - c)^5 \quad (6.2)$$

gebruikt,

met	w_s	de gereduceerde valsnelheid	(m/s)
	w_0	de snelheid van een enkel deeltje	(m/s)
	c	de concentratie van het mengsel	(-)

In paragraaf 3.1.1 is gebleken, dat deze formule voor los gepakt zand beter overeenkomt met de doorlatendheidsmetingen, dan de in [18] gebruikte formule waarin $(1 - c)^4$ voorkomt. In het 1-dim numeriek model zijn de parameters gebruikt zoals gegeven in tabel 6.2. De berekening van het waterspanningsverloop is uitgevoerd met zowel de 4-de als de 5-de macht in (6.2). De gemeten en berekende waterspanning is weergegeven in figuur 6.7. Duidelijk blijkt, dat de laatste een veel betere overeenkomst met de meetresultaten vertoont. Het verloop van de concentratie op verschillende plaatsen in de verweekte laag blijkt uit figuur 6.8. Door de lagere concentratie onderin de verweekte laag neemt aan de bovenkant van de laag de concentratie eerst af, om daarna toe te nemen tot de resedimentatie concentratie. Dit is in overeenstemming met het gemeten concentratie verloop bij MPC6.

In [18] is genoemd dat volgens het numeriek model de concentratie bovenin de verweekte laag pas aanzienlijk toeneemt, wanneer de waterspanning op die plaats gaat afnemen. Deze uitspraak kon niet worden geverifieerd aan de hand van metingen, omdat tijdens de metingen met Haringvlietzand de dichtheidsmeters zich onder in de goot bevonden. Nu blijkt uit vergelijking van het resultaat van de dichtheidsmeter MPC 6 en waterspanningsmeter WSM 6 (zie figuur 3.21), zoals aangegeven in figuur 4.10, dat het numeriek model het juiste verloop van de dichtheid voorspelt.

Concluderend kan verder worden opgemerkt dat de omvang van de zettingsvloeiingen geheel vergelijkbaar is met de waarnemingen gedaan tijdens de proeven met het Haringvlietzand. Quantitatieve verschillen in duur zijn te verklaren uit het verschil in valsnelheid cq. doorlatendheid tussen de beide zandsorten. Door de grotere valsnelheid van het nu onderzochte zand is de duur van de vloeifing korter en de invloed op de taludhelling kleiner.

6.4 Verloop dichtheid stort

Uit de proeven blijkt dat de dichtheid van het stort gedurende de proef groter wordt. Bij een zettingsvloeifing is deze toename groot en in korte tijd (de porositeit kan in enkele 10-tallen seconden 1 tot 3% afnemen). Bij een zettingsvloeifing wordt tijdens de dichtheidstoename altijd een wateroverspanning gemeten.

Tijdens proef Q01 bleek op het bovenwater talud een trapjestalud te ontstaan met afwisselend aanzanding en erosie, waaronder verdichting optrad, zie figuur 4.8. Opmerkelijk is dat de toch vrij aanzienlijke verdichting kon optreden zonder noemenswaardige waterspanningsverhoging. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de verdichting heel lokaal direct onder de waterlijn plaats vindt. Een dichtheidsmeter 0,3 m lager geeft geen enkele verdichting.

Maar ook zonder een zettingsvloeifing of een trapjestalud blijkt er een langzame afname in de porositeit. Een voorbeeld is weergegeven in figuur 6.9. Nadat MPC 7 is ingezand neemt in de daarop volgende 1000 seconden de porositeit ongeveer 0,5% af. Deze afname in porositeit lijkt onafhankelijk van de beginporositeit van het zand bij inzanding van de wanddichtheid

meter, zie ook figuur 6.10 en 6.11. De porositeit bij inzanden is heel verschillend. De afname is echter ongeveer gelijk. Waarschijnlijk is deze afname een gevolg van kruip in het zandpakket. Ook bij triaxiaalproeven [11] is gevonden dat de kruip onafhankelijk was van de porositeit. De vervormingen bij deze kruip zijn zo klein dat nauwelijks een verhoging van de waterspanning is waar te nemen, zie figuur 6.12. Met behulp van deze kruip kan mogelijk een schatting worden gemaakt van de visceuze krachten in een zandpakket, waardoor de in paragraaf 6.3.2 en Appendix B uitgevoerde berekening kan worden onderbouwd. Een dergelijke analyse valt buiten het kader van dit onderzoek, maar is een mogelijk onderwerp voor vervolgonderzoek.

7. REFERENTIES.

1. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear.
R.A. Bagnold.
Proc. Royal Soc. of London,
A, 225, pp. 49 - 63, 1954.
2. The flow of cohesionless grains in fluids.
R.A. Bagnold.
Philos. Trans. Roy. Soc. of London,
A, 249, pp. 235 - 297, 1956.
3. A generalized theory of sedimentation.
A.D. Maude, R.L. Whitmore.
Brit. Jo. of Applied Physics, 9,
pp. 477 - 482, 1958.
4. Sediment gravity flows.
Mechanics of flow and deposition.
G.V. Middleton, M.A. Hampton.
Soc. Econ. Paleon. Mineral., Pac. Section,
Short Course Lectures, Anaheim, pp. 1 - 38, 1973.
5. Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls.
K.J. Hsu.
Geol. Soc. of Am. Bull., 86, pp. 129 - 140, 1975.
6. Elasto-plastic double hardening model MONOT.
F. Molenkamp, Grondmechanica Delft,
CO-28595, 1983.

7. Experiments on the flow behaviour of granular materials at high velocity in an open channel.
O. Hungr, N.R. Morgenstern.
Geotechnique, 34, no. 3, pp. 405 - 413, 1984.
8. High velocity ring shear tests on sand.
O. Hungr, N.R. Morgenstern.
Geotechnique, 34, no. 3, pp. 415 - 421, 1984.
9. Evaluatie uitgevoerde zandsluitingen.
H.A.M. Nelissen, A. Jonker, H. van Rossum.
Grondmechanica Delft,
CO-416619/8, 1985.
10. Evaluatie metingen op het stort Speelmansplaten I.
M.J. Koster.
Rijkswaterstaatnota DDWT-85.002, 1985.
11. Parameter determination ALTERNAT using drained cyclic triaxial tests at low stress level.
A. Bezuijen, A.G.I. Hjortnaes-Pedersen, Grondmechanica Delft,
CO-265831/3, 1985.
12. Heranalyse doorlatendheidsmetingen door middel van de Forchheimer-relatie
H. den Adel, Grondmechanica Delft,
CO-272550, 1986.
13. Zand-watermengselstromingen.
Verslag literatuurstudie.
J.C. Winterwerp, P.W. Besselink, Waterloopkundig Laboratorium,
Z65-10, 1986.

14. Ontwikkeling stroomgat en debiet bij dijkdoorbraak.
Deelstudie voor een Pomp Accumulatie Bekken.
P.J. Visser, J.S. Ribberink, J.P.Th. Kalkwijk.
TU Delft, Fac. Civiele Techniek, Rapport 8-86, 1986.
15. Zand-watermengselstromingen.
Het gedrag van zand-watermengselstromingen boven water,
Verslag experimentele vervolgstudie.
D.R. Mastbergen, J.C. Winterwerp, Waterloopkundig Laboratorium,
Z46-02, 1987.
16. Liquefied sand flowing over a gentle slope.
M.B. de Groot, F. Silvis, H. van Rossum, M.J. Koster.
Ninth Eur. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.
Dublin, 1987.
17. Hyperconcentrated sand-water mixture flow over a flat bed.
J.C. Winterwerp, M.B. de Groot, D.R. Mastbergen, H. Verwoert.
(in preparation), 1988.
18. Zand-watermengselstromingen.
Het storten van zand onder water, 4.
Verslag experimentele studie. D.R. Mastbergen, A. Bezuijen,
Waterloopkundig Laboratorium/Grondmechanica Delft,
Z 216/J 376, CO-284462/45, BAGT 417, 1988.
19. Slopes and densities of hydraulically placed sands.
M.B. de Groot, F.T. Heezen, D.R. Mastbergen, H. Stefess.
ASCE Geot. Div. Spec. Conf.,
Fort Collins, USA, 1988.

20. Taluds van zandlichamen onder water.
Afstudeerverslag.
J.F.M. Stinenbosch, T.P. Stoutjesdijk.
TU Delft, Fac. Civiele Techniek, 1988.

21. On the construction of sand fill dams.
Part I, Hydraulic aspects.
D.R. Mastbergen, A. Bezuijen, J.C. Winterwerp.
Int. Symp. on Modelling Soil-Water-Structure Interactions,
Delft, 1988.

22. On the construction of sand fill dams.
Part II, Soil mechanical aspects.
A. Bezuijen, D.R. Mastbergen.
Int. Symp. on Modelling Soil-Water-Structure Interactions,
Delft, 1988.

Tabel 3.1

Resultaten diverse bepalingen

Bepaling	Resultaat
d_{50}	225 μm
Minimum porositeit	33,70
"Maximum" porositeit (strooiproeven)	46,90
Natte kritieke porositeit	43,65%
Droge kritieke porositeit	42,7 %
Valsnelheid ($t = 20,2 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,0278 m/s
Doorlatendheid	
$n = 35,0\%$	$2,04 * 10^{-4} \text{ m/s}$
39,0%	$2,94 * 10^{-4} \text{ m/s}$
43,6%	$5,11 * 10^{-4} \text{ m/s}$

Tabel 3.2

Overzicht stortparameters uitgevoerde proeven met Wadzand ($d = 225 \mu\text{m}$).

Proef no.	q (m^2/s)	c (%)	ρ_m (kg/m^3)	s (kg/sm)	p (m^2/uur)	T ($^{\circ}\text{C}$)	h (m)
Q01	0,1	12	1200	32	72	13,8	1,75
Q02 sedimentatie	0,1	21	1350	56	126	14,1	1,75
Q02 erosie	0,1	0	1000	0	0	14,1	0
Q03	0,025	12	1200	8	18	15,5	1,75
Q04	0,01	12	1200	3,2	7,2	12,5	1,95

Tabel 5.1

Zandproduktie, helling en sedimentatielengte
stortproeven Wadzand.

Proef no.	s (kg/sm)	i (-)	L _{sed} (m)
Q01	32	0,19	6
Q02	56	0,135	9
Q03	8,0	0,33	1,5
Q04	3,2	0,45	0,6

T = 15 °C, d = 225 µm.

Tabel 6.1

zie figuur 6.3 A/B

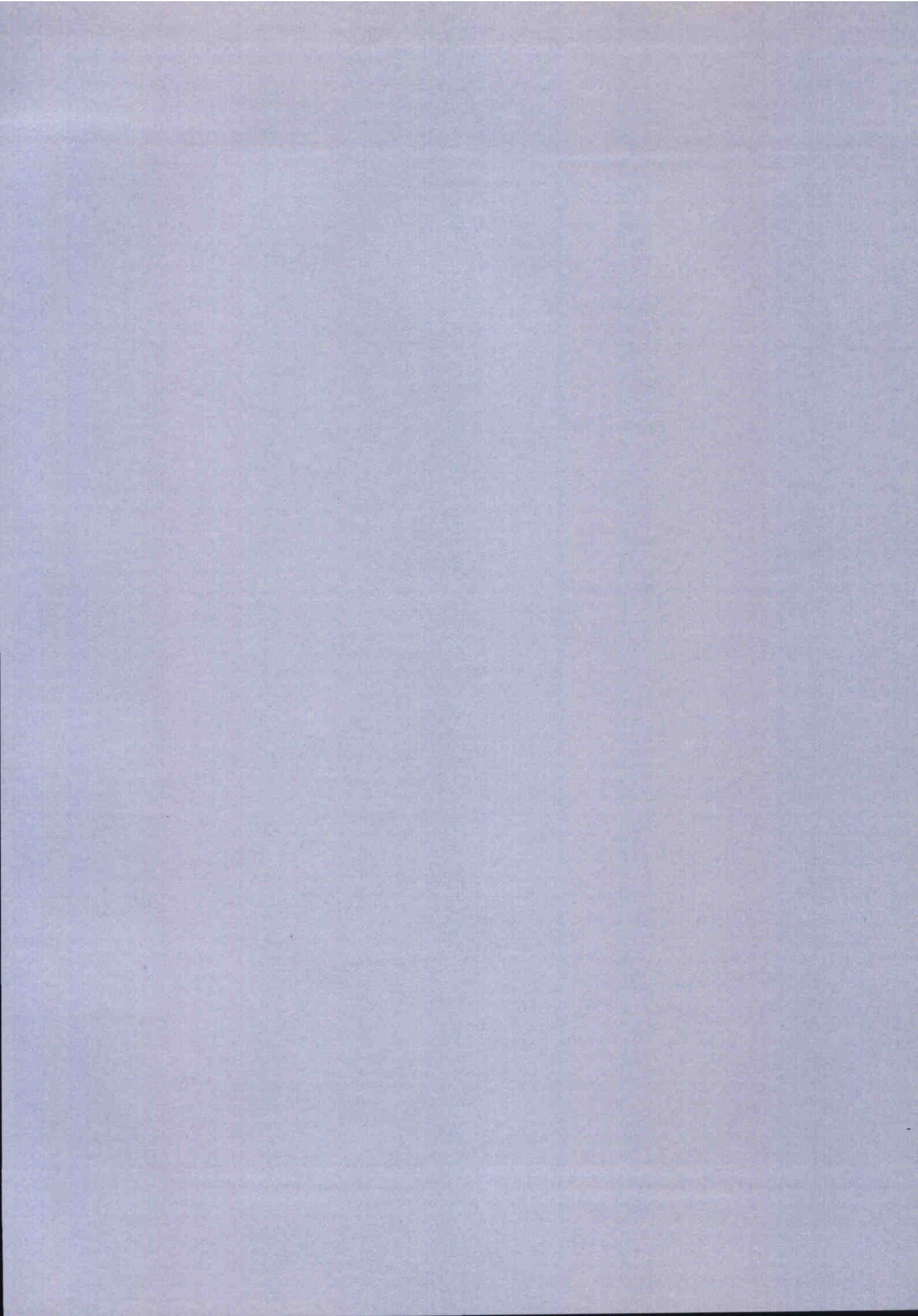
Toename conusweerstand met de diepte.
(Helling over eerste 0,4 m.)

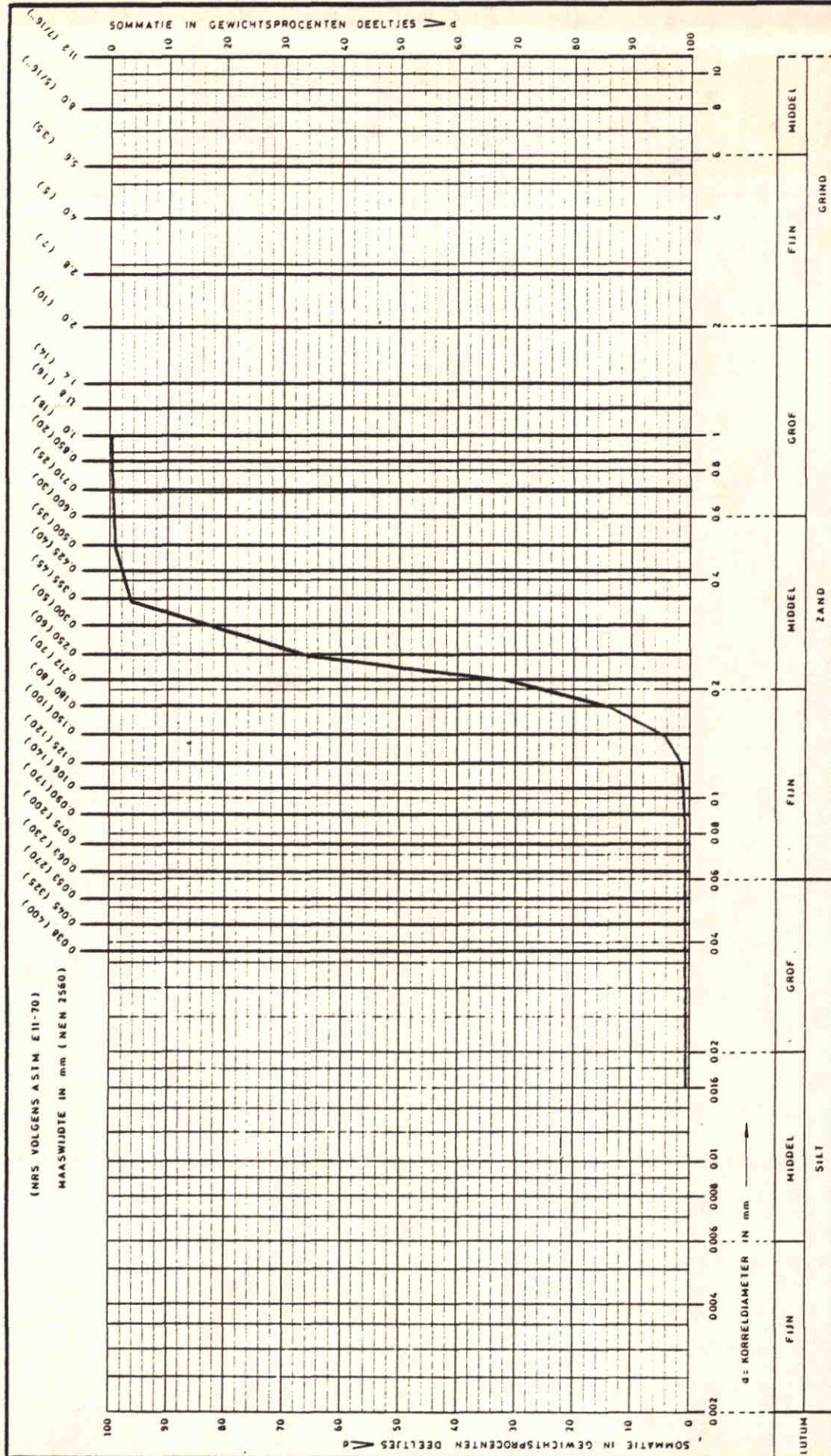
Meting	toename (MN/m ³)	gem.bovenwater (MN/m ³)
1	6.1	
2	5,4	4,9
3	4,9	
4	3,2	
5	niet te bepalen	gem.onderwater
6		(MN/m ³)
7	0,28	
8	0,31	0,48
9	1,09	
10	0,22	

Tabel 6.2

Parameters gebruikt in 1-dim numeriek model voor simulatie
zettingsvloeiing in proef Q 02

ongereduceerde valsnelheid (w_0)		0,0305 m/s
dikte verweekt gebied		0,77 m
concentratie voor vloeiing		
MPC	4	52,9%
	5	51,4
	6	52,0
concentratie na vloeiing		
MPC	4	53,1
	5	53,0
	6	55,0
Gekozen gemiddelde waarden		
Concentratie voor vloeiing		
	onderkant verweekte laag	51,4
	bovenkant verweekte laag	52,0
Concentratie na vloeiing		
	onderkant verweekte laag	53,0
	bovenkant verweekte laag	55,0





BORING	MONSTER	BIJZONDERHEDEN
	8	MONSTER UIT DE ZANDVOOR - RAAD GOOT VOOR HET BEGIN VAN DE PROEVEN

GRONDMECHANICA DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 56 92 23

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

uitgevoerd d.d.
88-02-10

get.

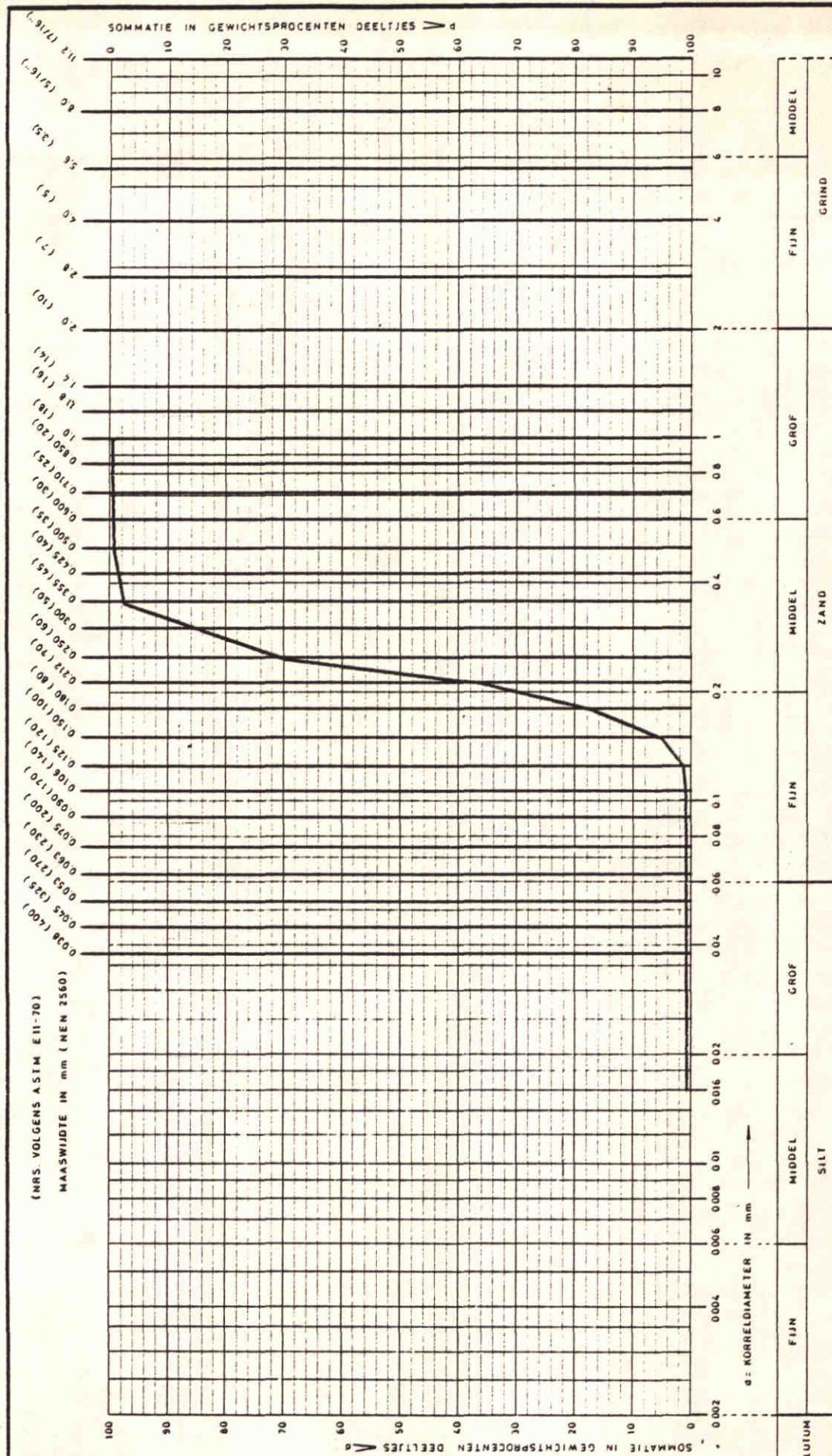
C O - 294750

gez.

KORRELVERDELINGSDIAGRAM

FIG. 3.1

form.
A4



BORING		MONSTER		BIJZONDERHEDEN	
		9		MONSTER UIT DE STORT GOOT NA PROEF Q04 X ≈ 5m	



Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 56 92 23

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

uitgevoerd d.d.
88-03-08

get.

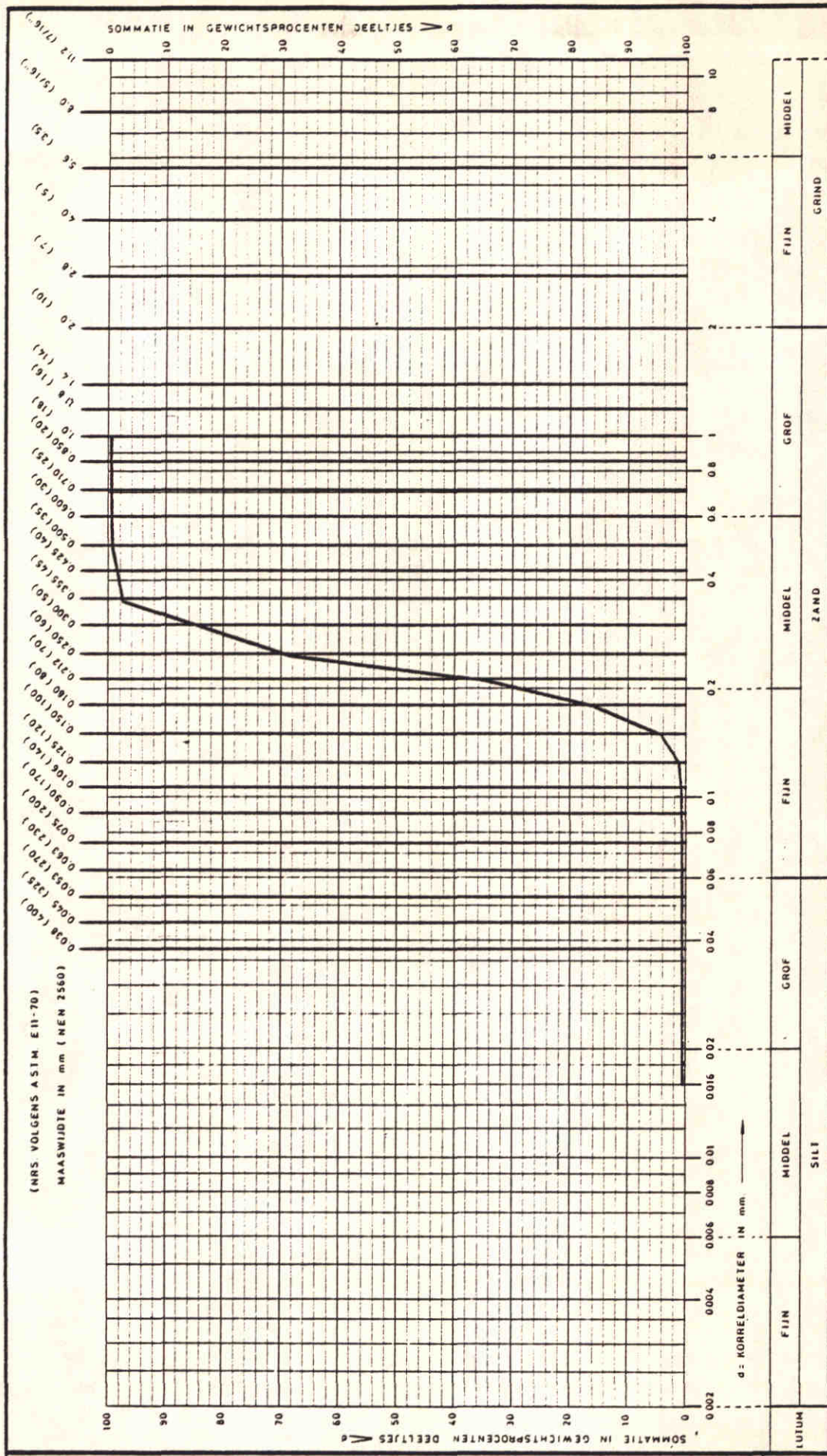
KORRELVERDELINGSDIAGRAM

CO - 294750

gez.

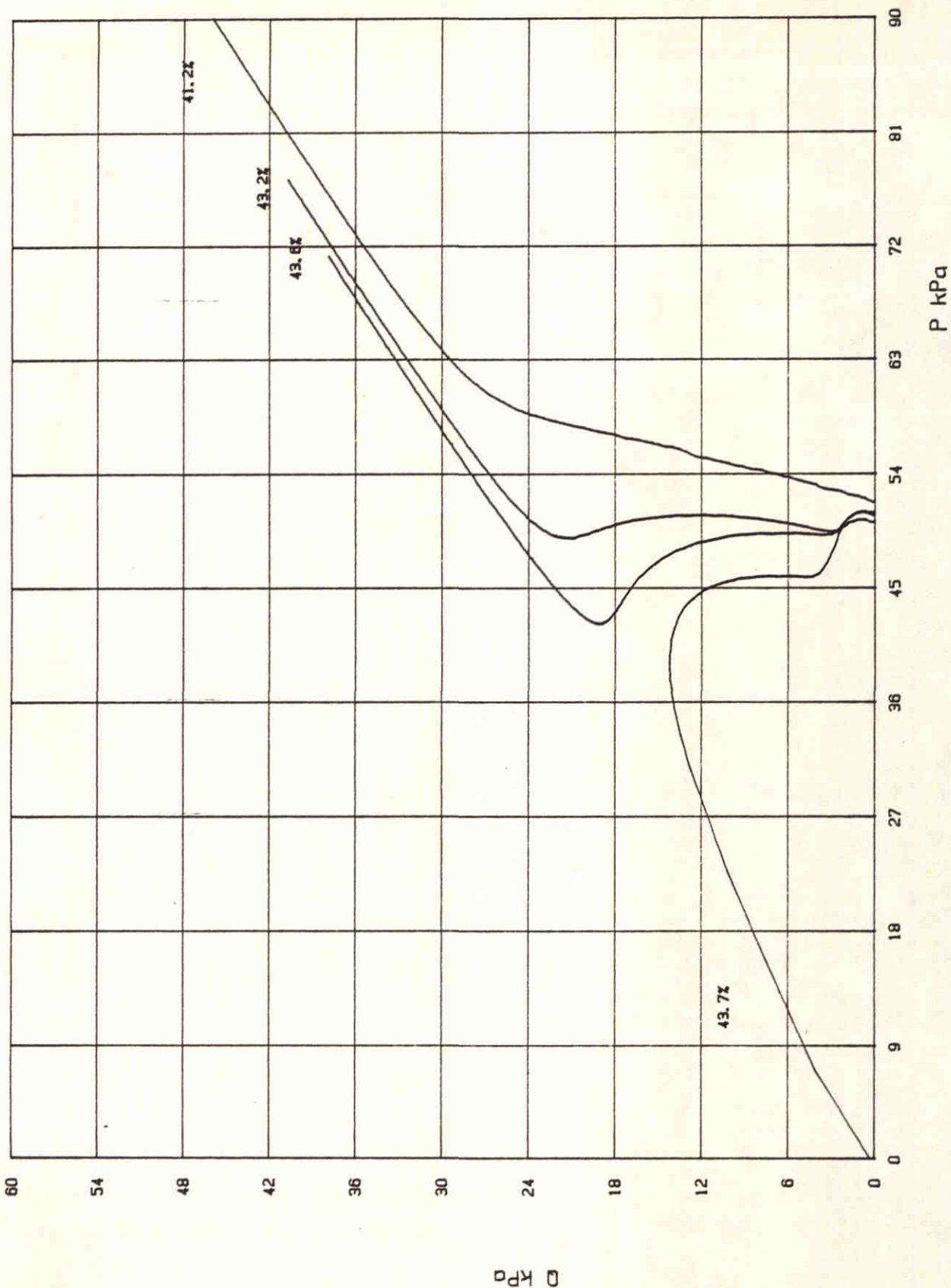
FIG 3.2

form
A₄



BIJZONDERHEDEN	
BORING	MONSTER 10
MONSTER UIT DE STORTGOOT NA PROEF Q04 X ≈ 8,5m	

	Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 56 92 23	Telefax (015) 61 08 21 Telex 38234 soil nl	uitgevoerd d.d. 88-03-08	get.
	KORRELVERDELINGSDIAGRAM			C O - 294750
			FIG. 3.3	form. A4



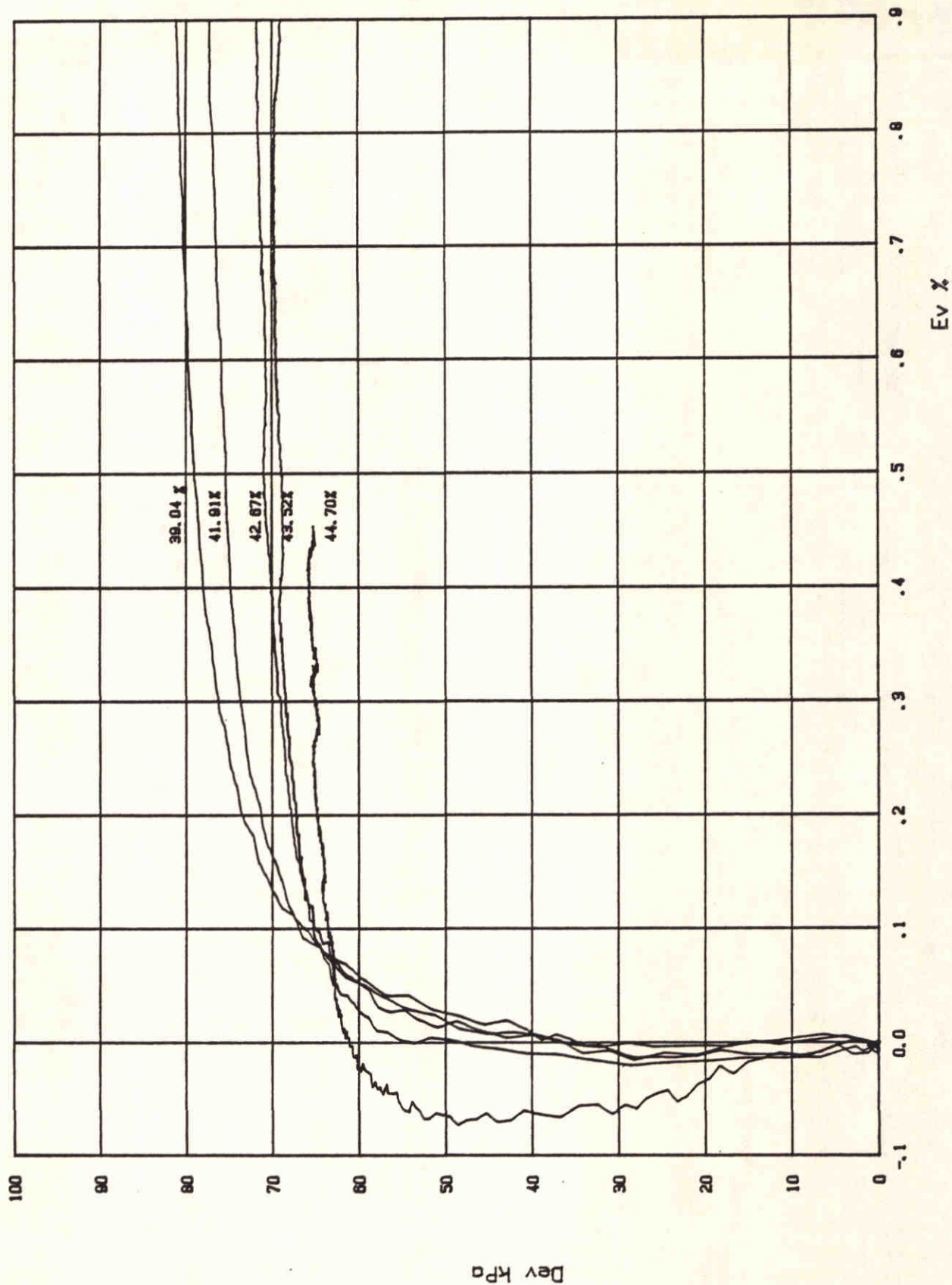
GRONDMECHANICA
DELFT

Dat: 88-03-16

Storten van zand onder water
 Natte Kritieke Dichtheidsproef -monster no. 8
 Pakking = 41.2%-43.6%-43.7%-43.2% Bf=> 0.98

CO-294750

FIG 3.4



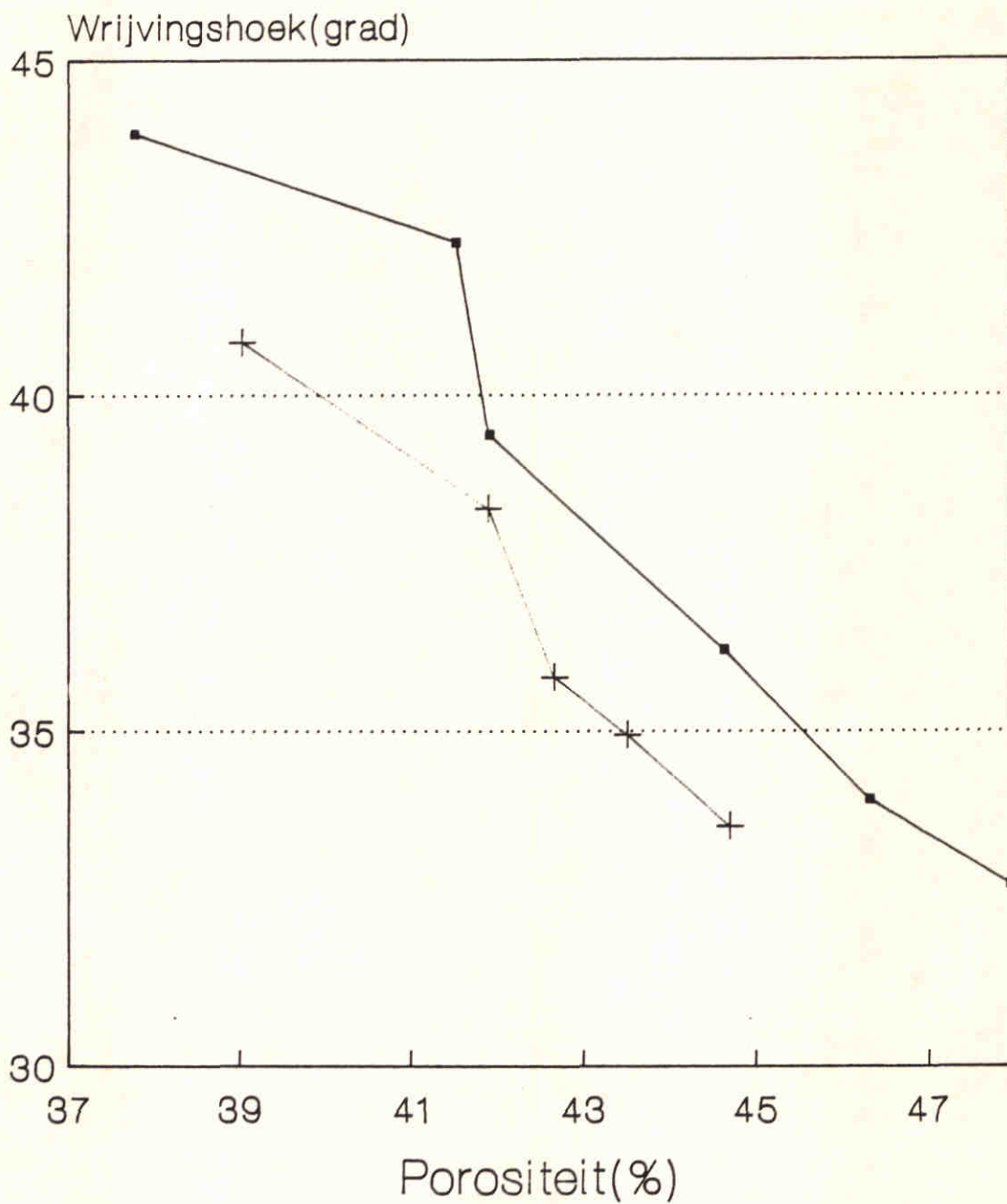
 GRONDMECHANICA
DELFT

Storten van zand onder water
Droge kritieke dichtheidsproef
Monster No 8

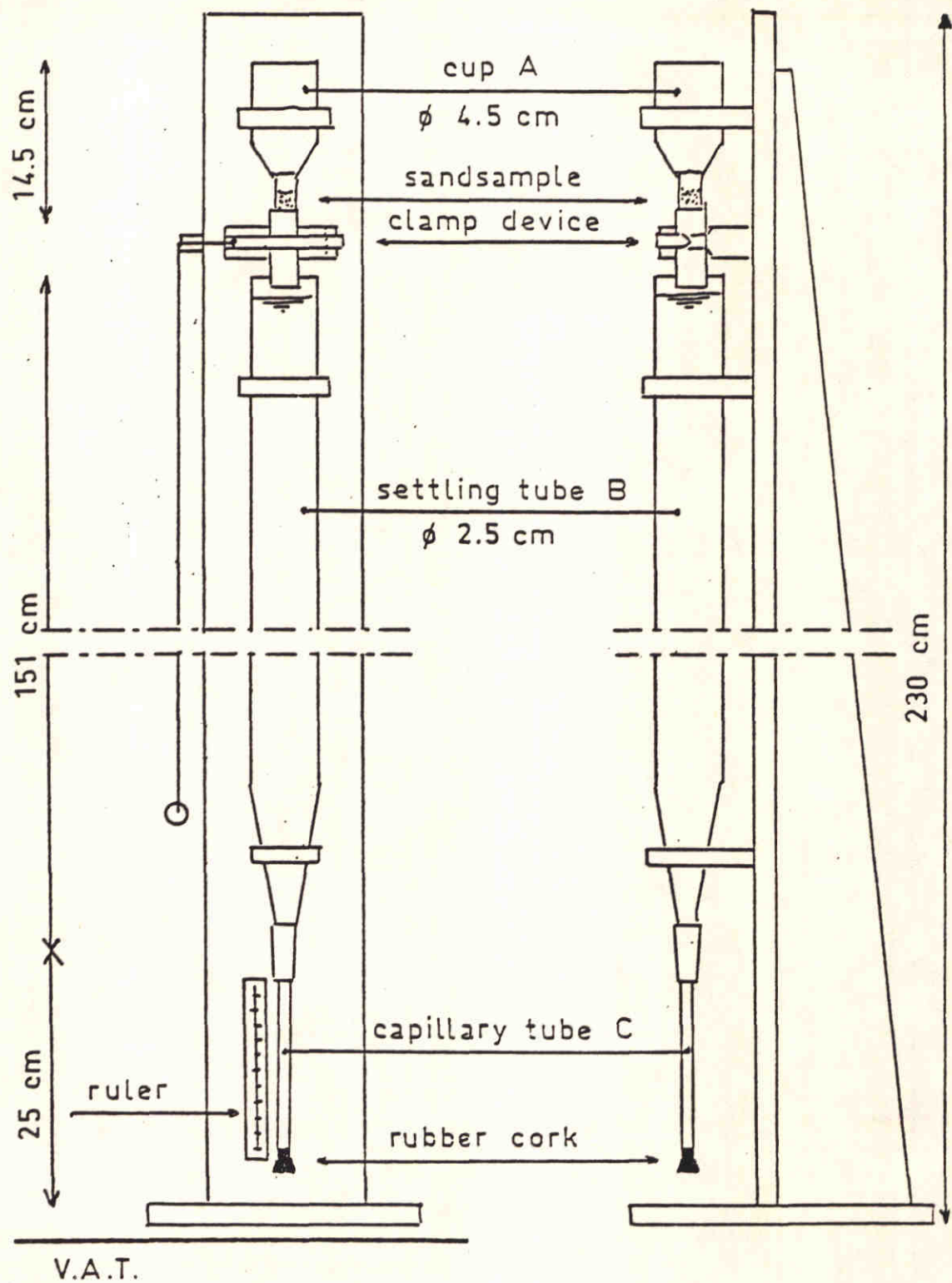
Dat: 880229

CO-294750

FIG. 3.5



—■— Monster 1 + Monster 8
 haringvlietzand wadzand



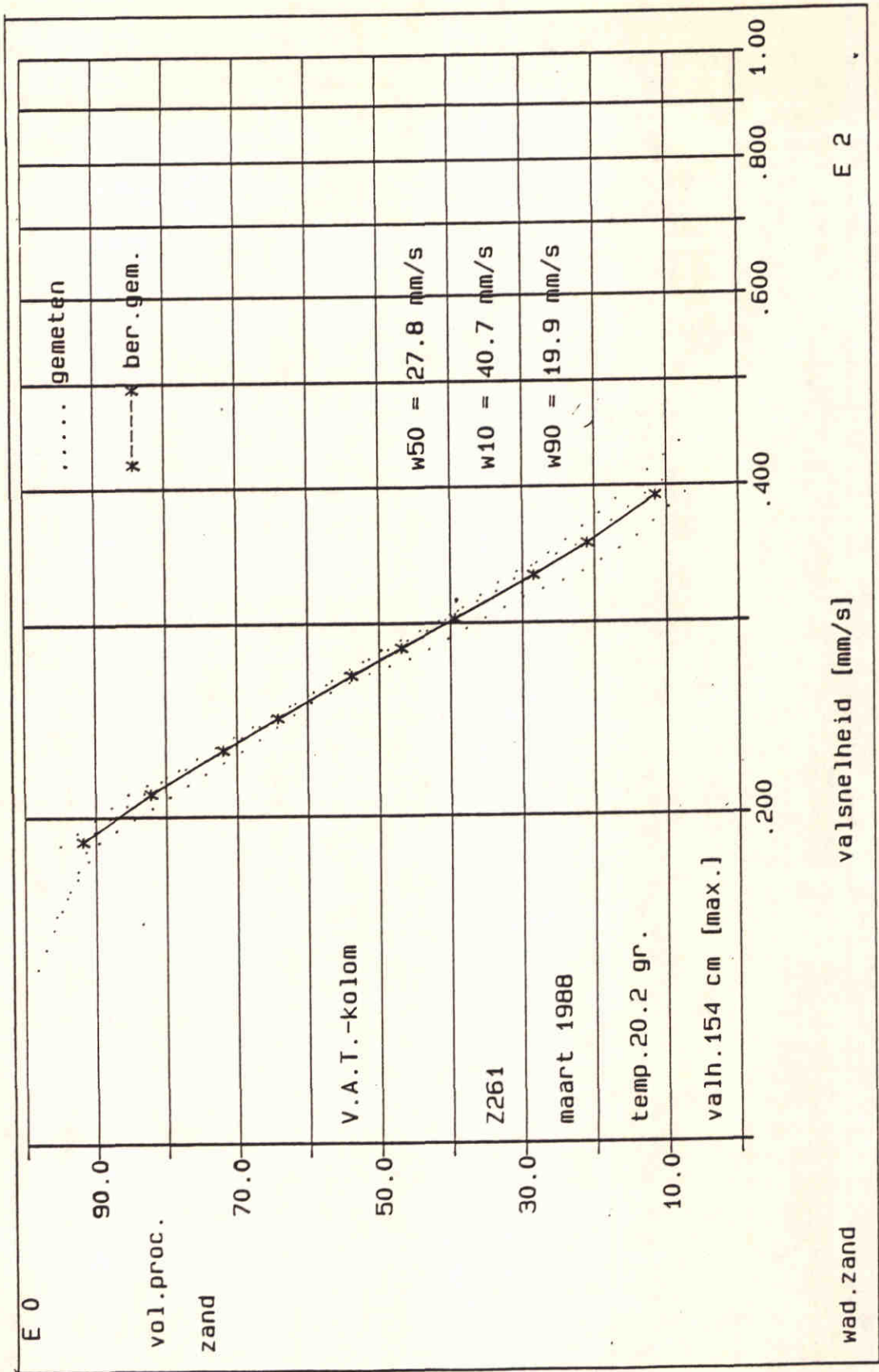
VISUAL ACCUMULATION TUBE (VAT)

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.8



E 2

valsnelheid [mm/s]

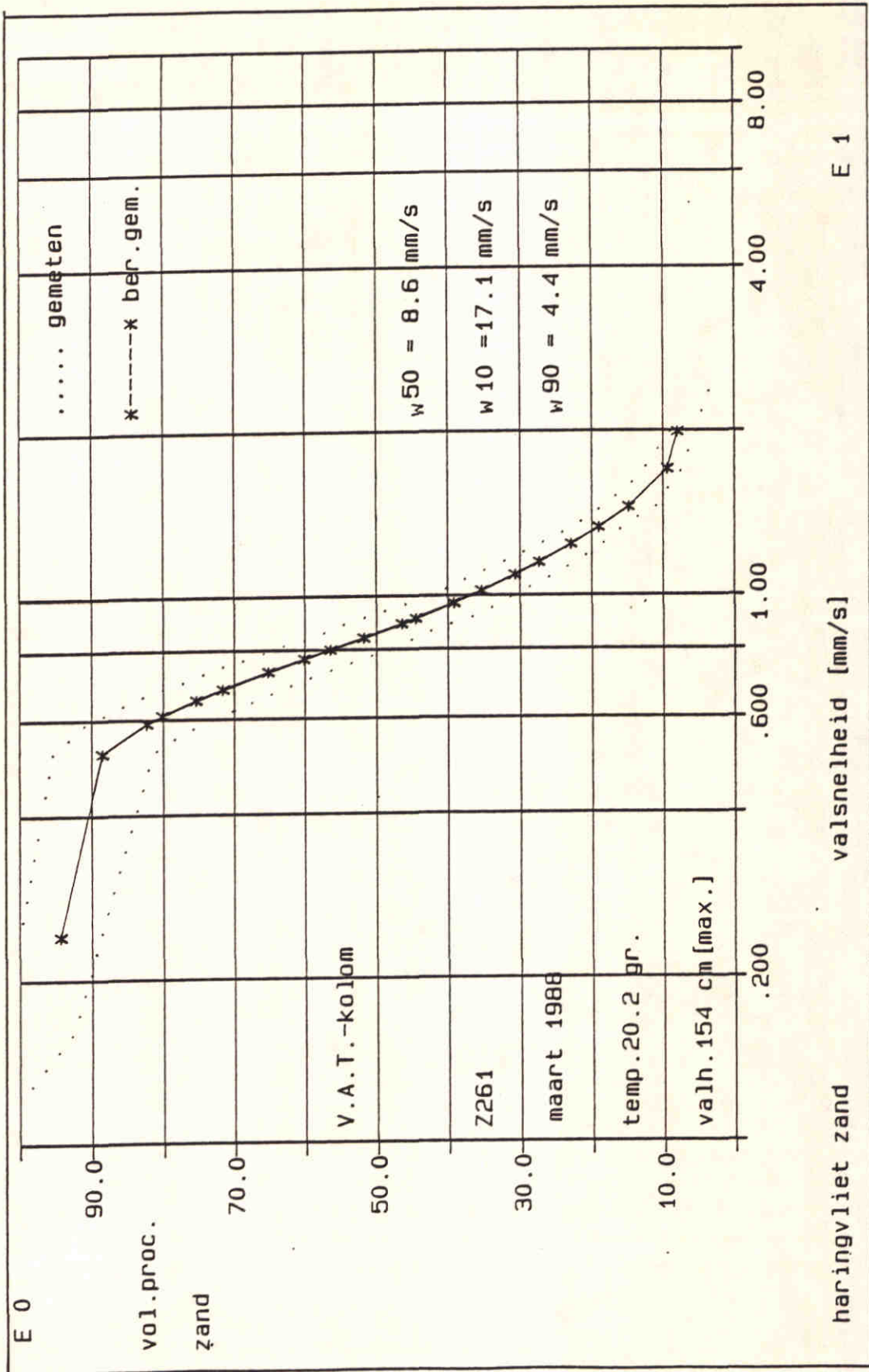
wad.zand

Valsnelheidsverdelingsdiagram

Wadzand

Z-261

A4



Valsnelheids verdelings diagram

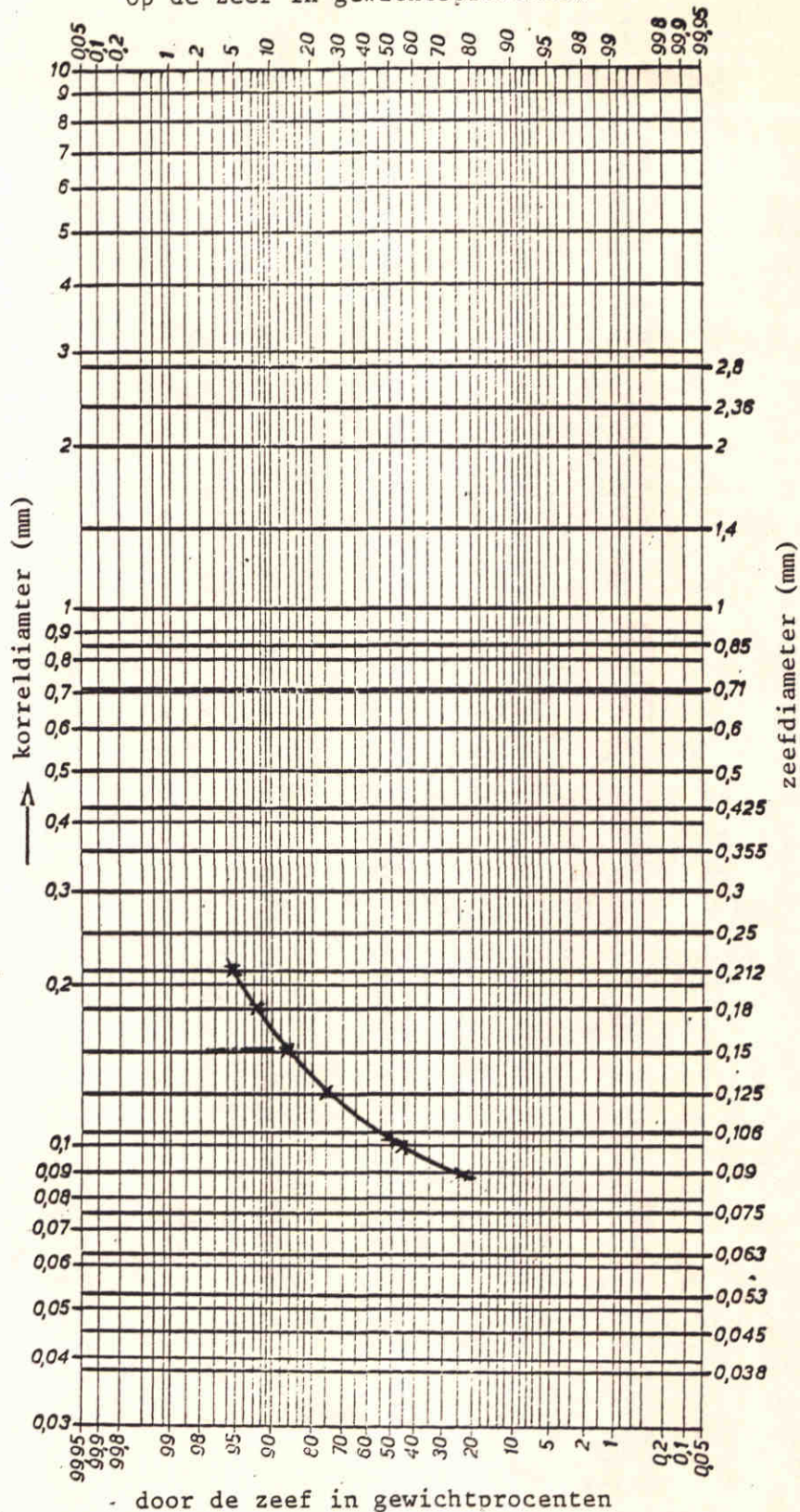
Haringvliet zand

Z-261

A4

op de zeef in gewichtsprocenten

$d_{50} \approx 100 \mu\text{m}$



Nat gezeefd. (10 min)

korrelverdelings diagram

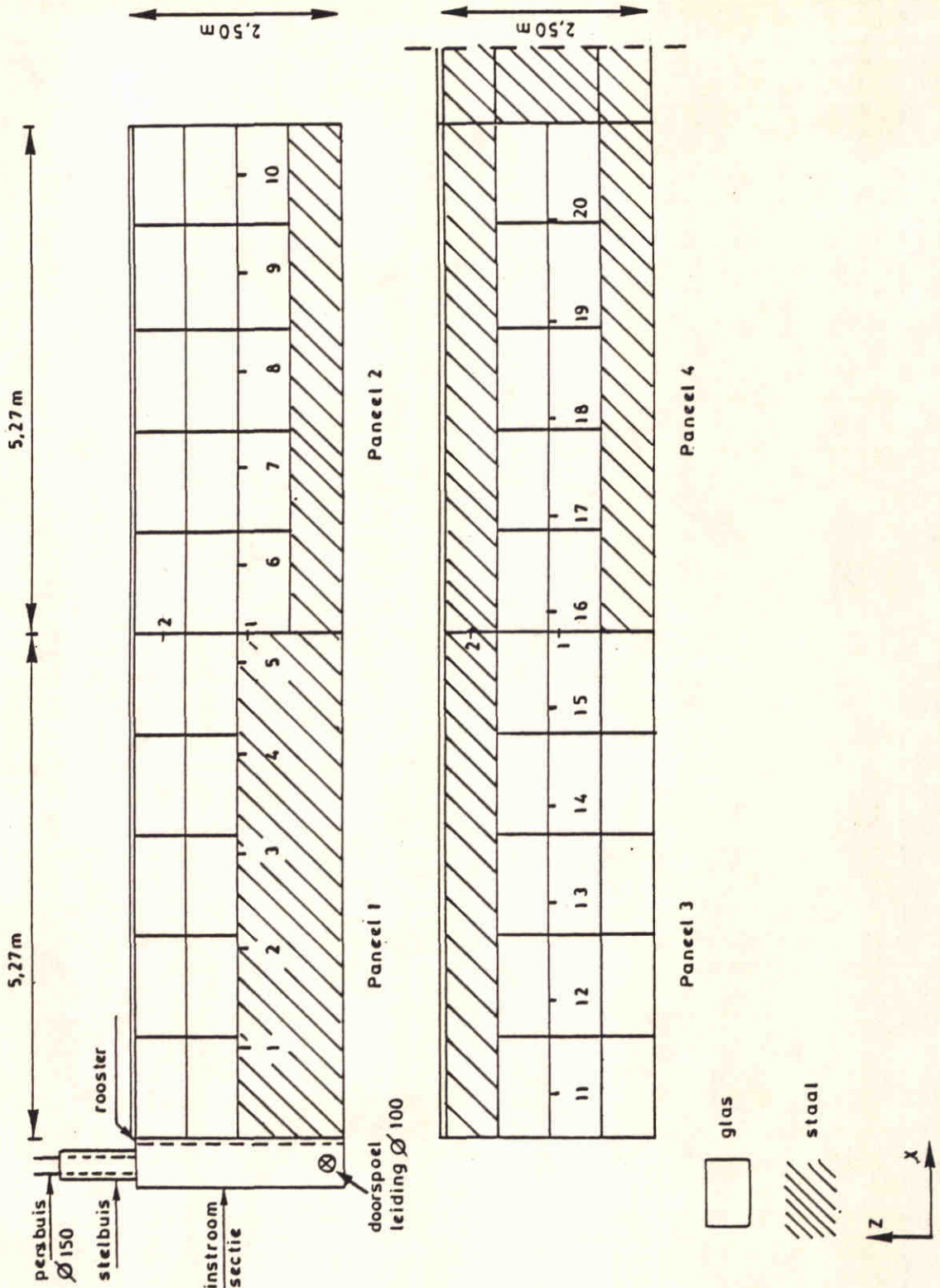
Haringvliet zand

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG: 3.11



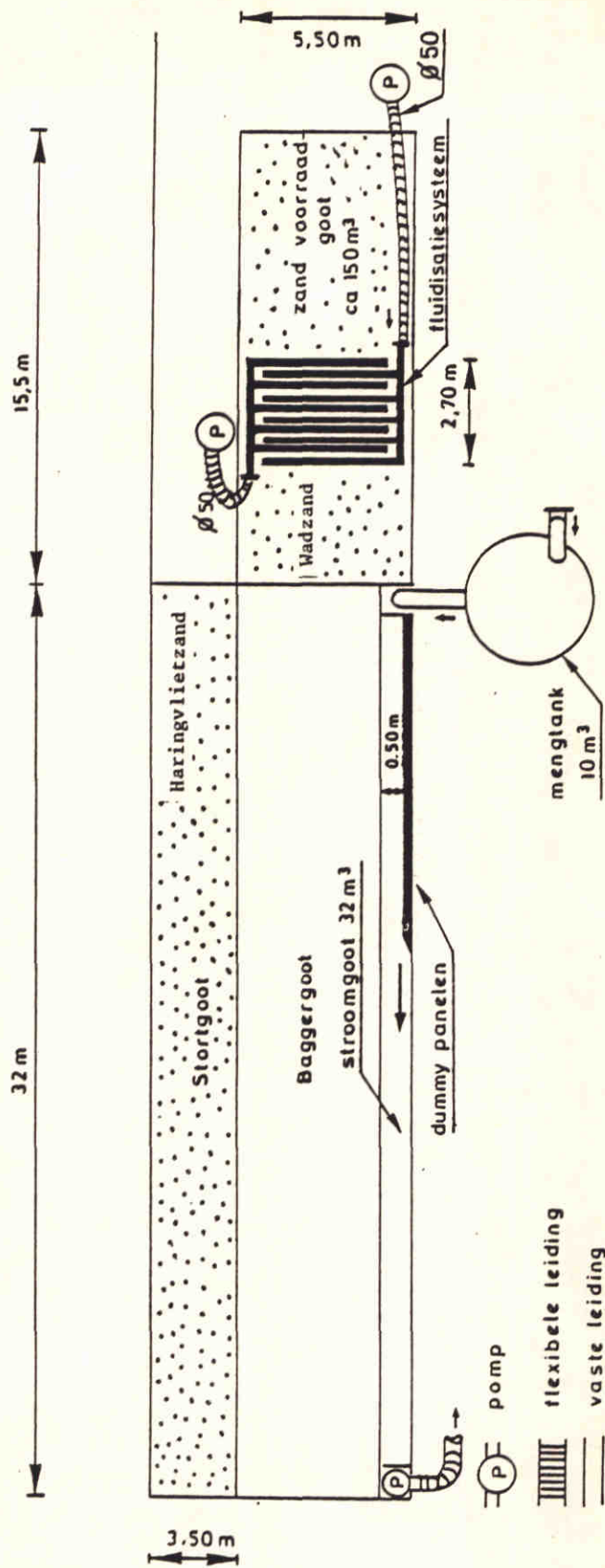
Aanzicht glaspanelen

Z - 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.12



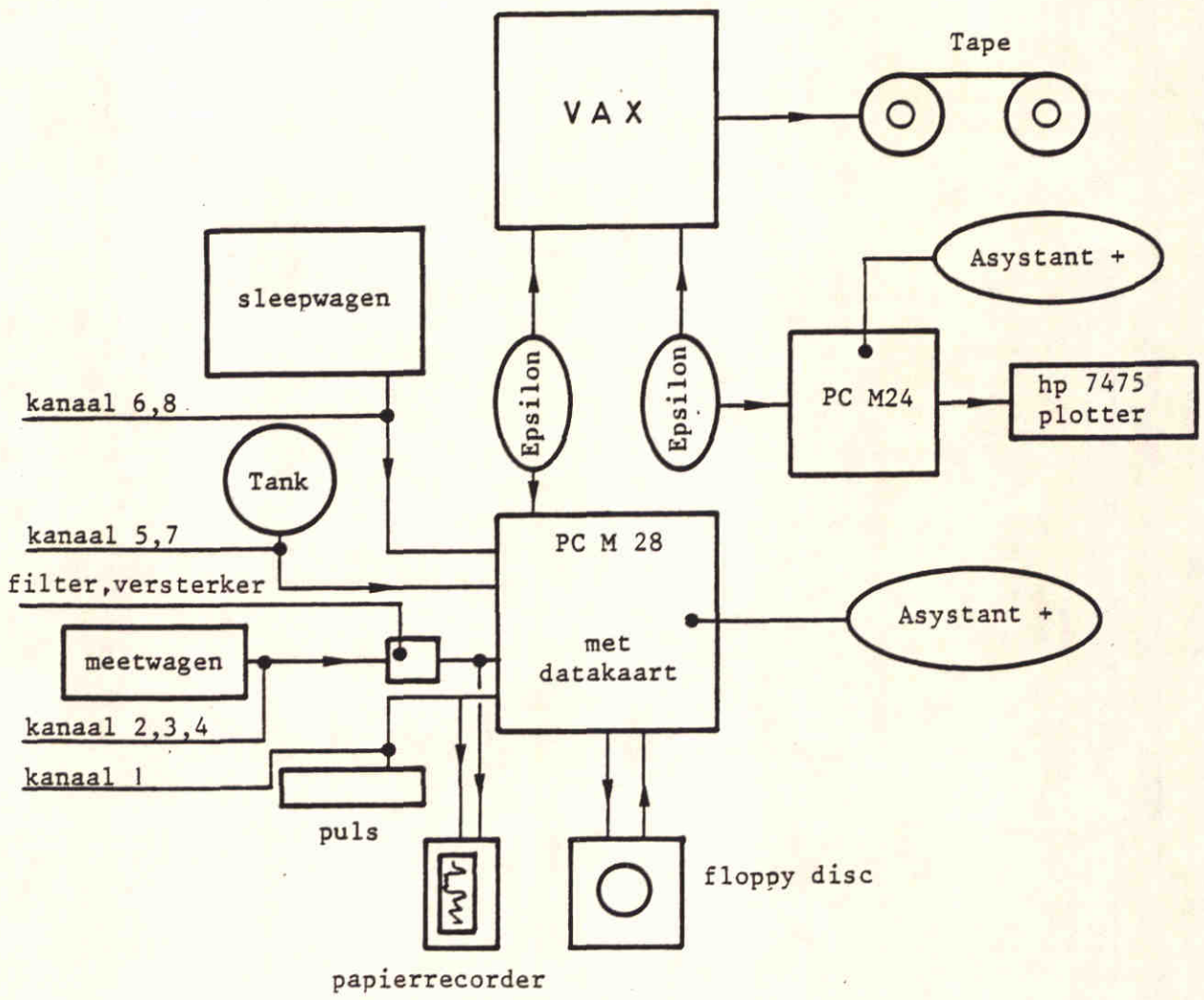
Fluïdisatiesysteem

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.14



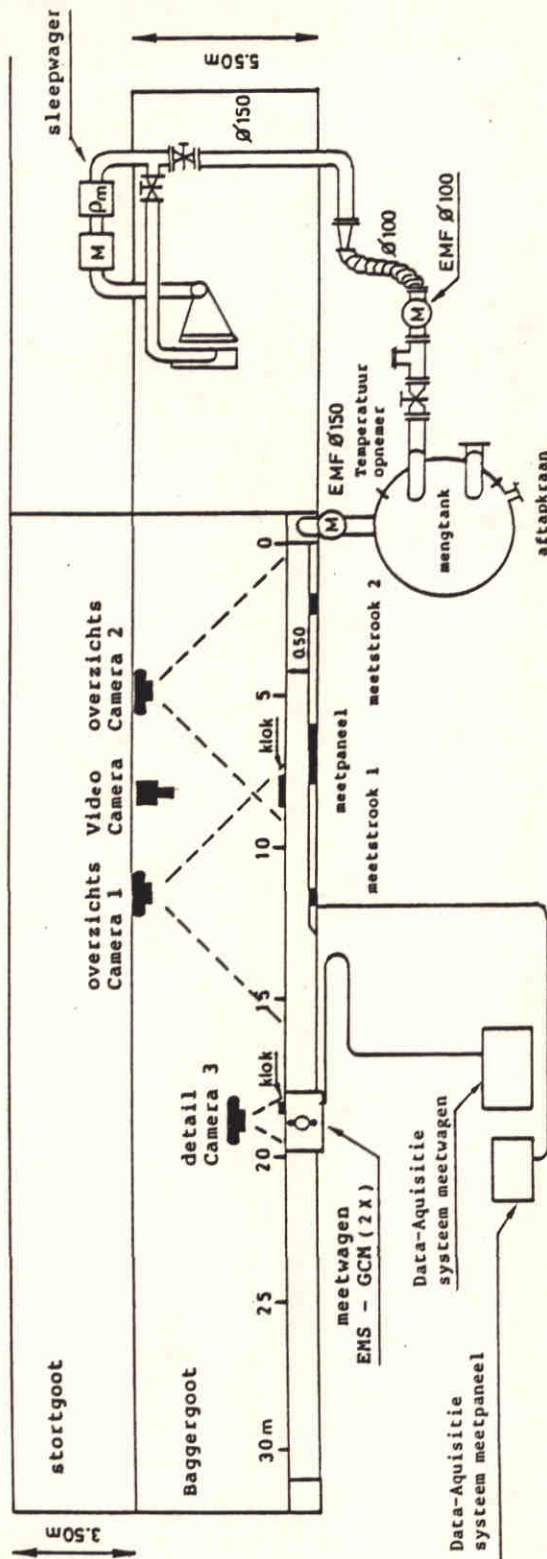
DATA-AQUISITIESYSTEEM W L

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.15



EMF Electro Magnetic Flowmeter

Debietmeter M p/m Dichtheidsmeter

GCM Geleidendheids Concentratiemeter
 EMS Electro Magnetische Snelheidsmeter

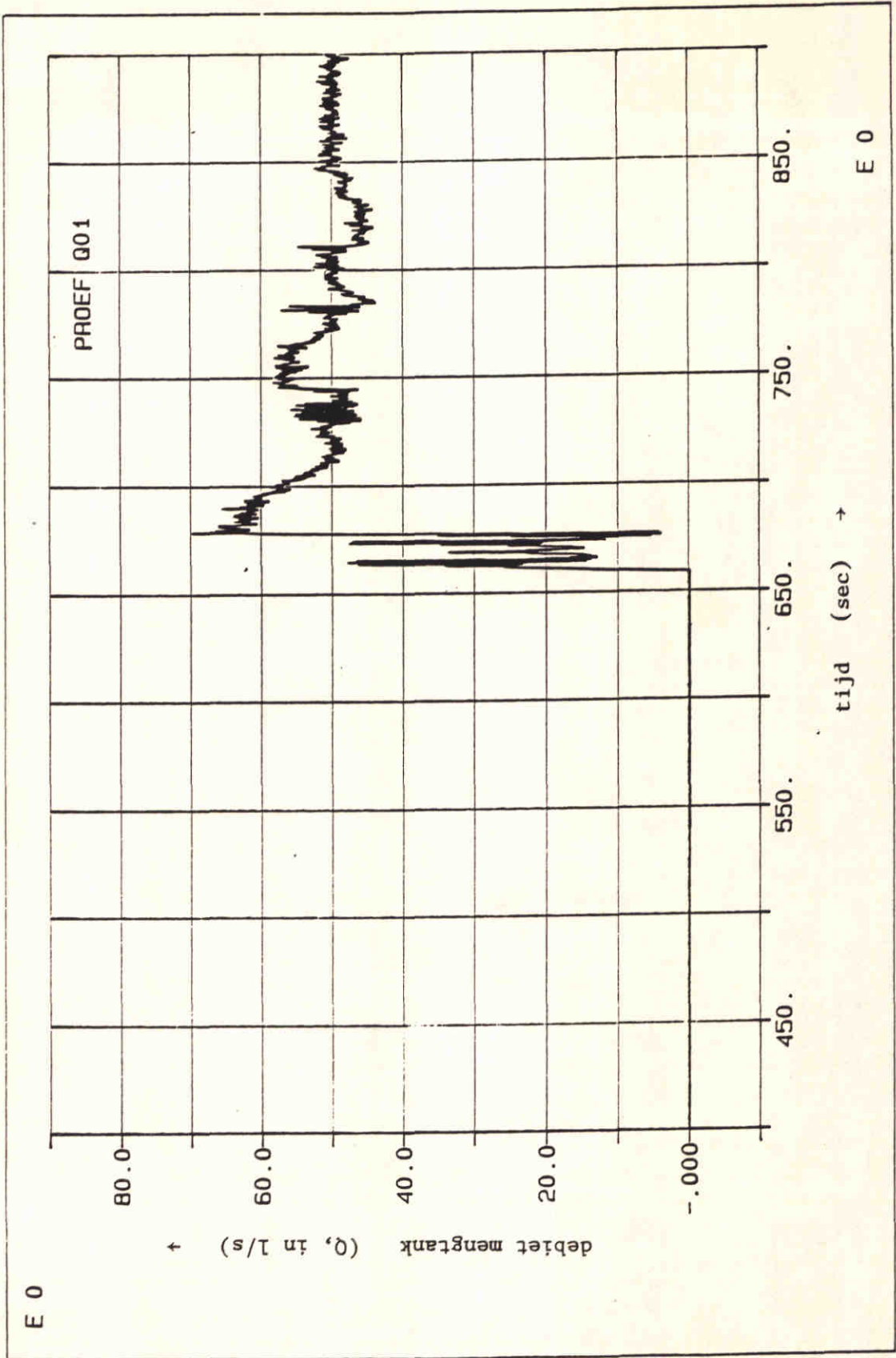
Opstelling instrumentatie cuttergoot

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.16



Mengseldebit

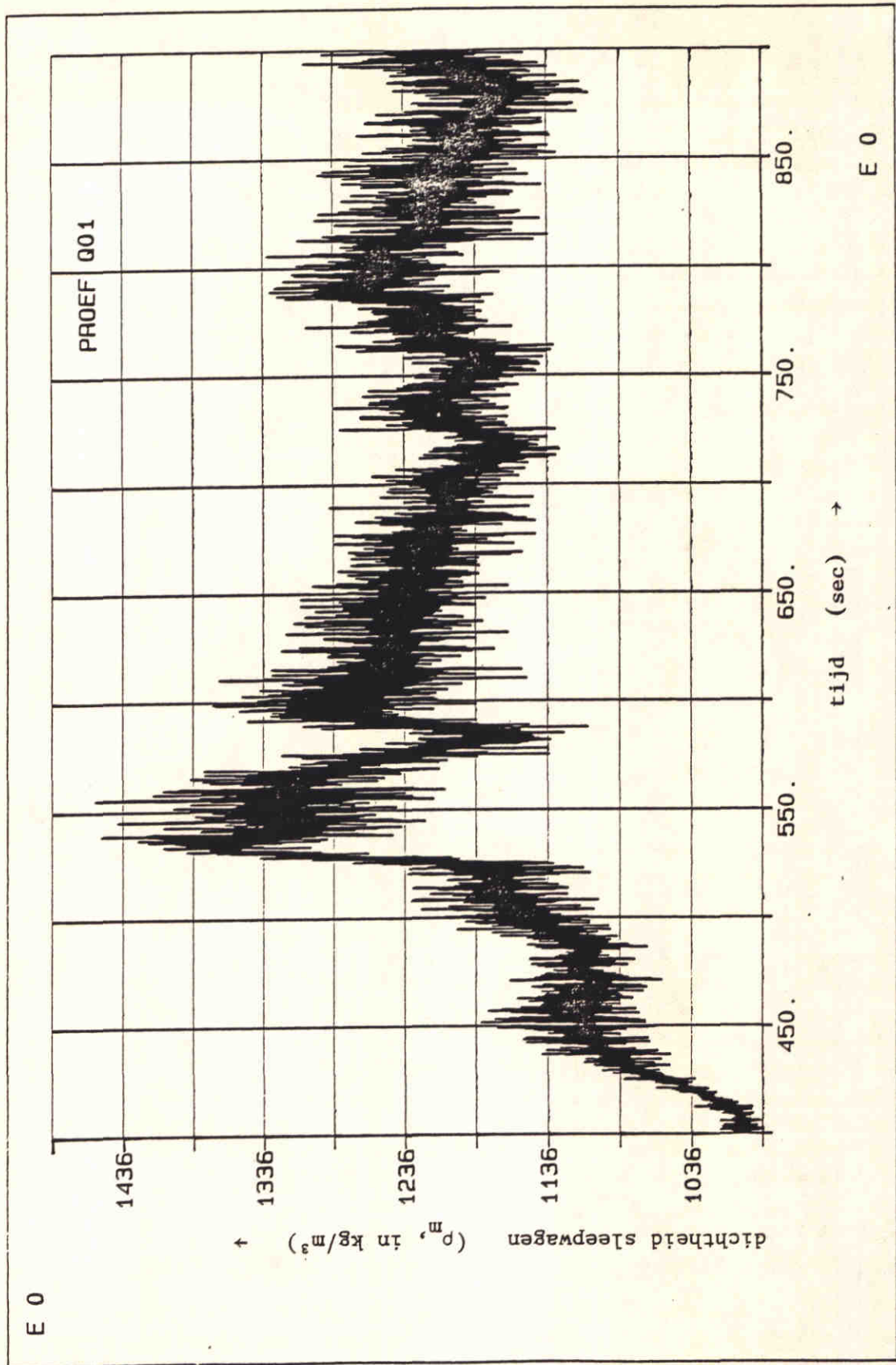
Proef Q 01

Z - 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.17



Mengeldichtheid sleepwagen

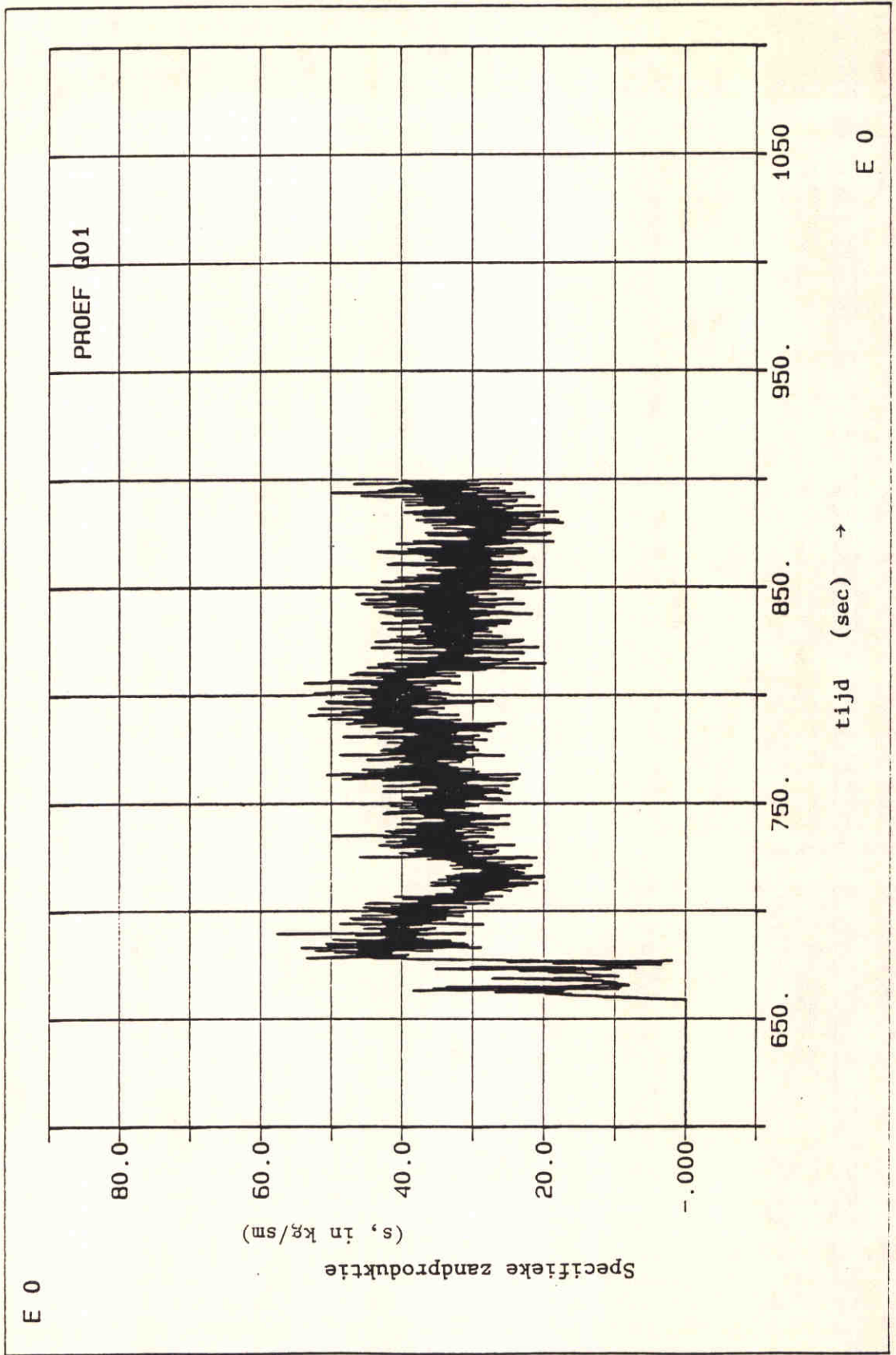
Proef: Q 01

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.18



Specifieke zandproductie

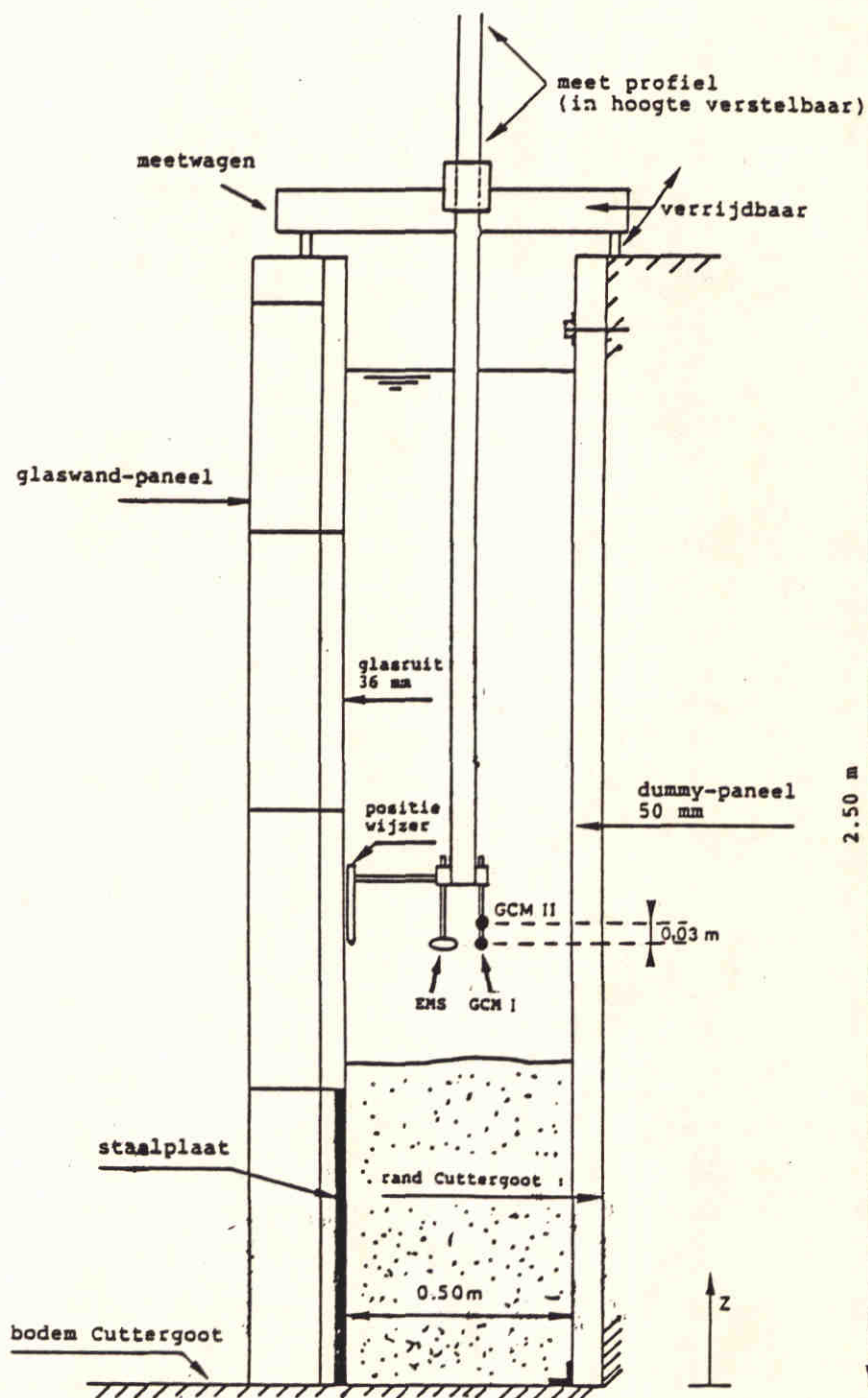
Proef: Q 01

Z-261

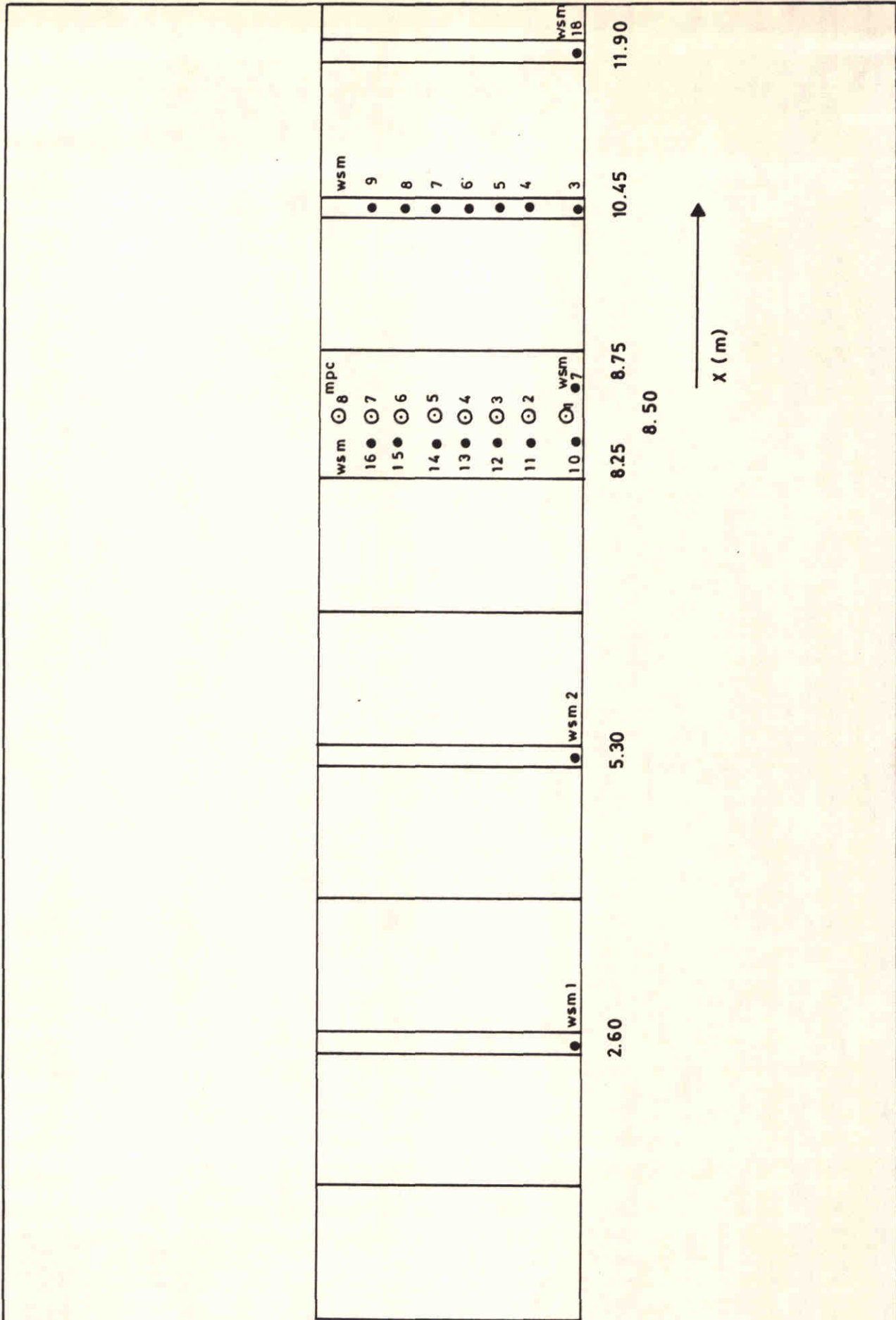
A4

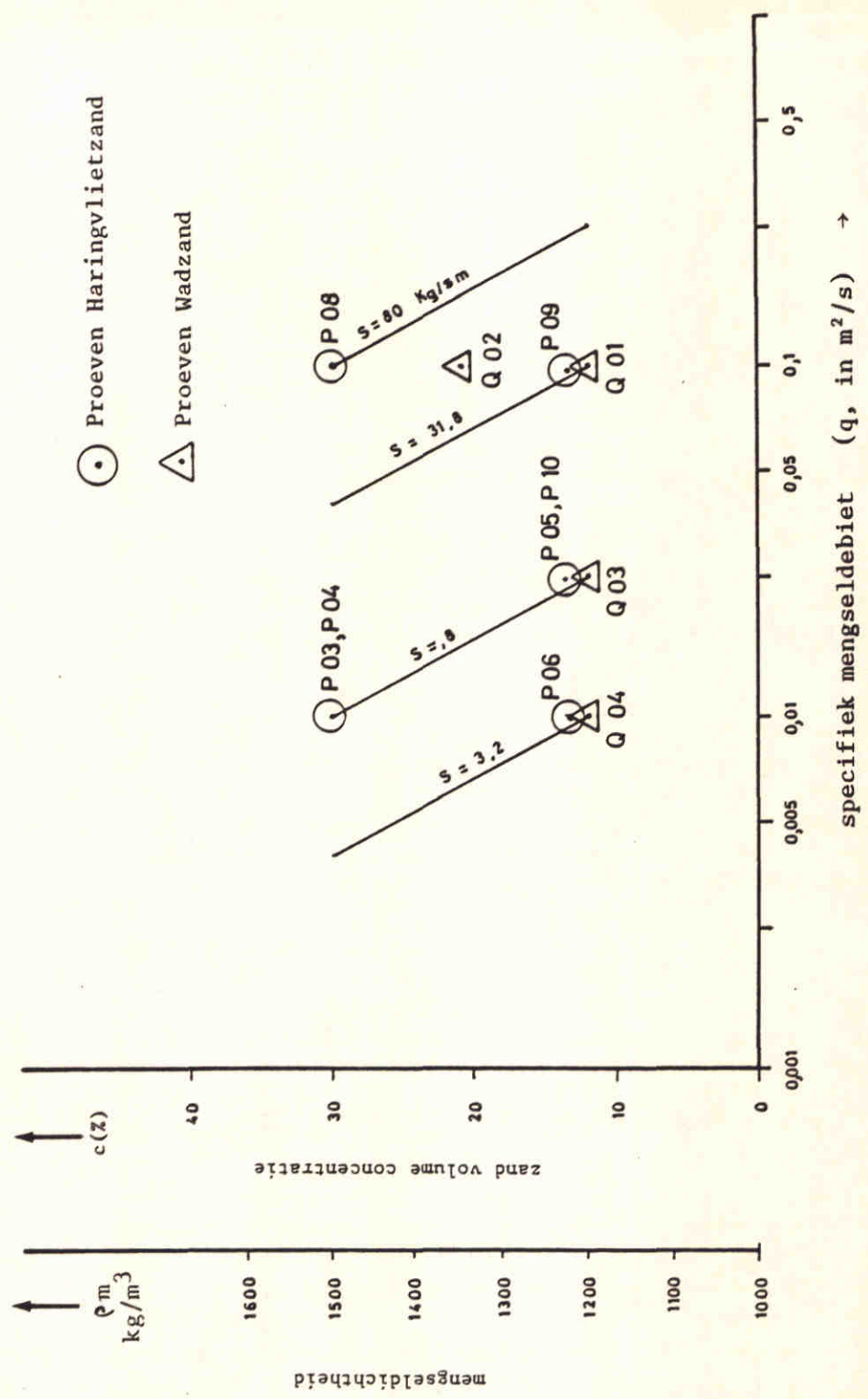
DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.19



Instrumentatie meetwagen		
	Z - 261	A4
DELFT HYDRAULICS	FIG. 3.20	





Proeven matrix

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 3.22

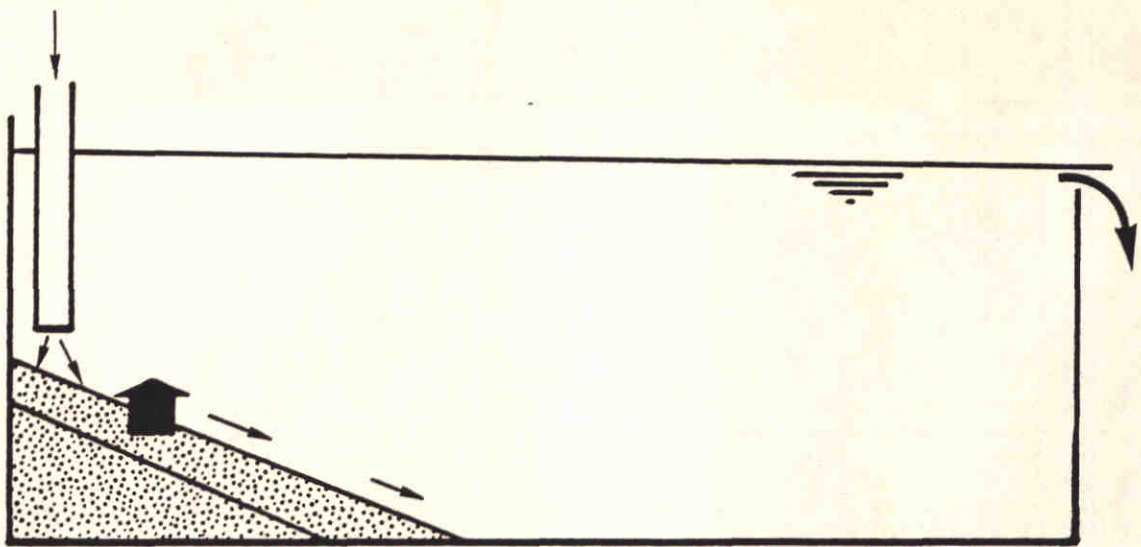


Fig: 4.1 Vertikale opbouw

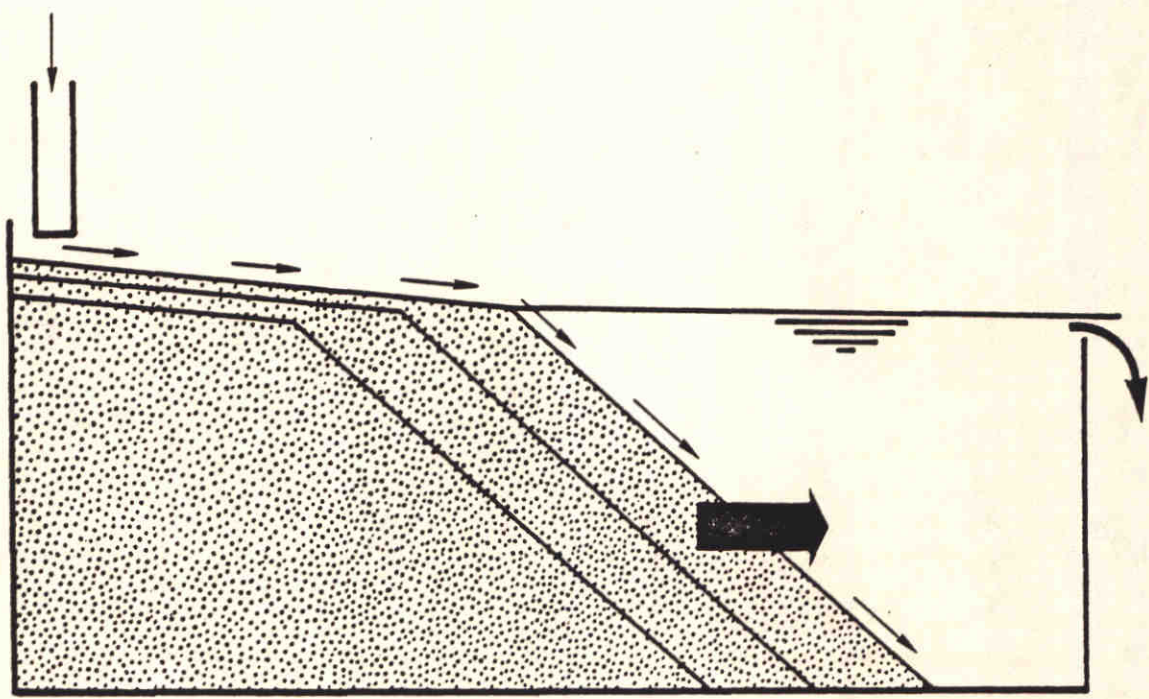
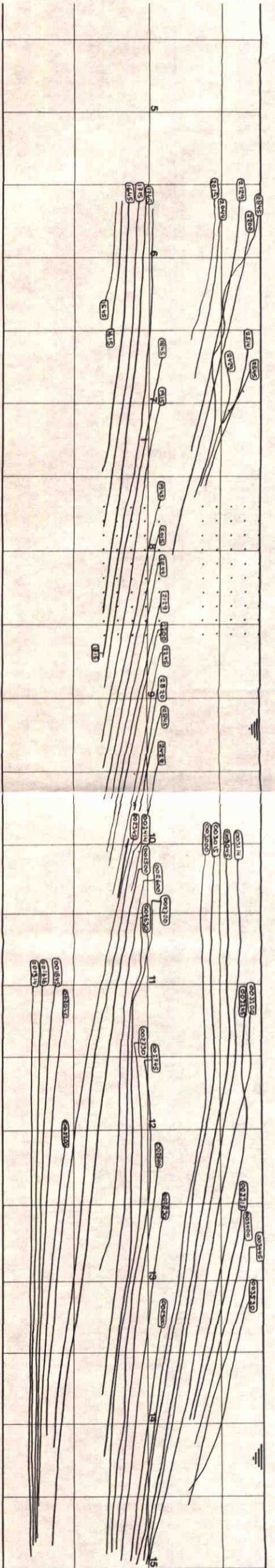
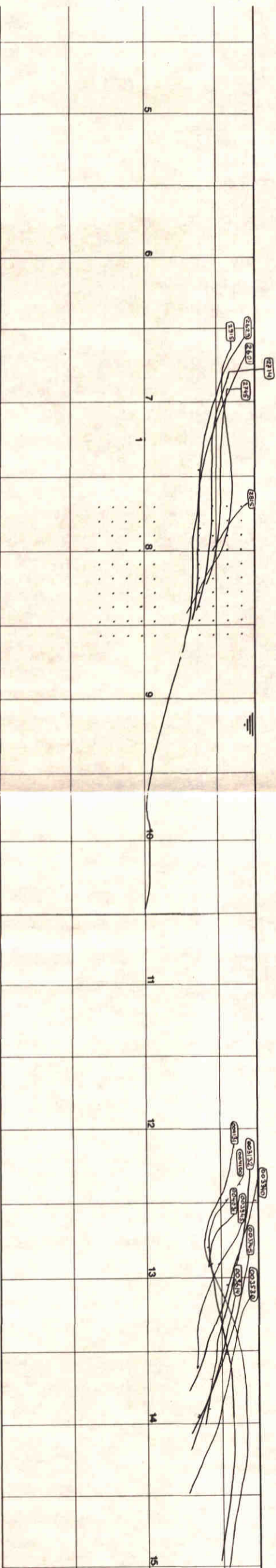


Fig: 4.2 Horizontale uitbouw

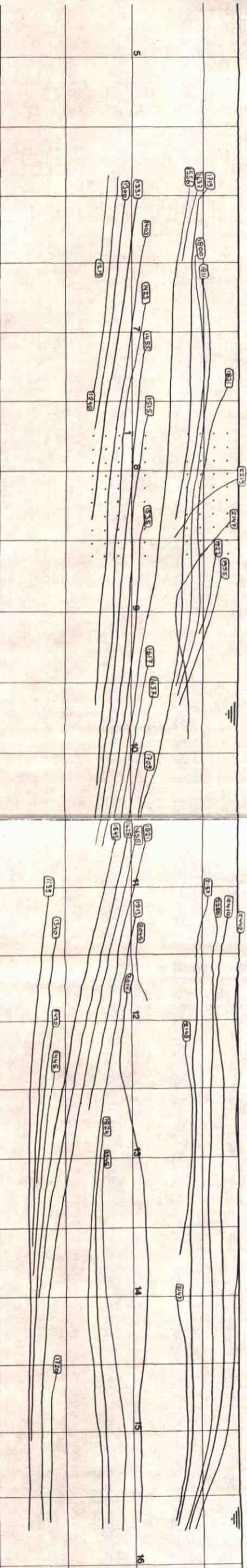
Stortontwikkeling		
	Z - 261	A4
DELFT HYDRAULICS LABORATORY	FIG. 4.1 / 4.2	



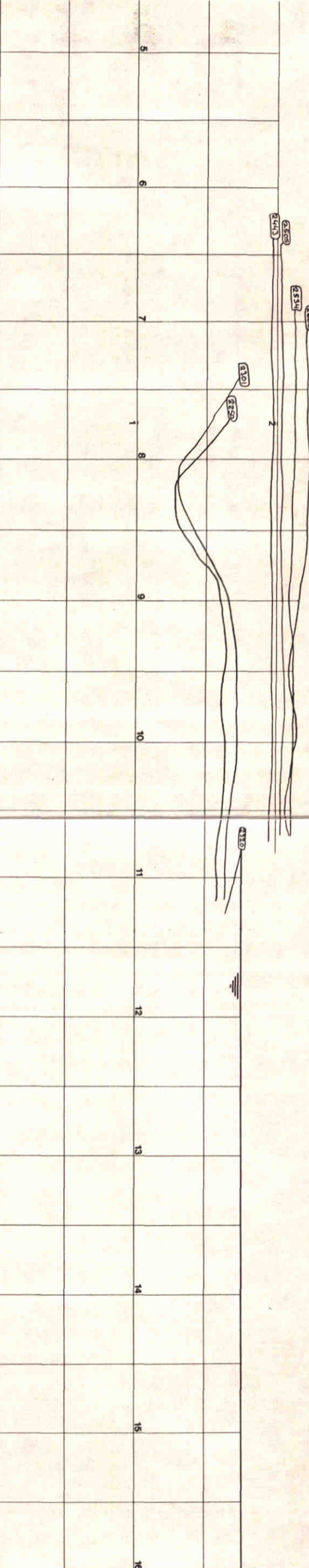
PROEF : Q01	TIJDINTERVAL : 00:13:14 - 00:35:30
q = 0.1 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 107-109
c = 12 %	TEKENING NR. : 108-109
s = 32 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE STORTONTWIKKELING	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	
	FIG. 4.3a



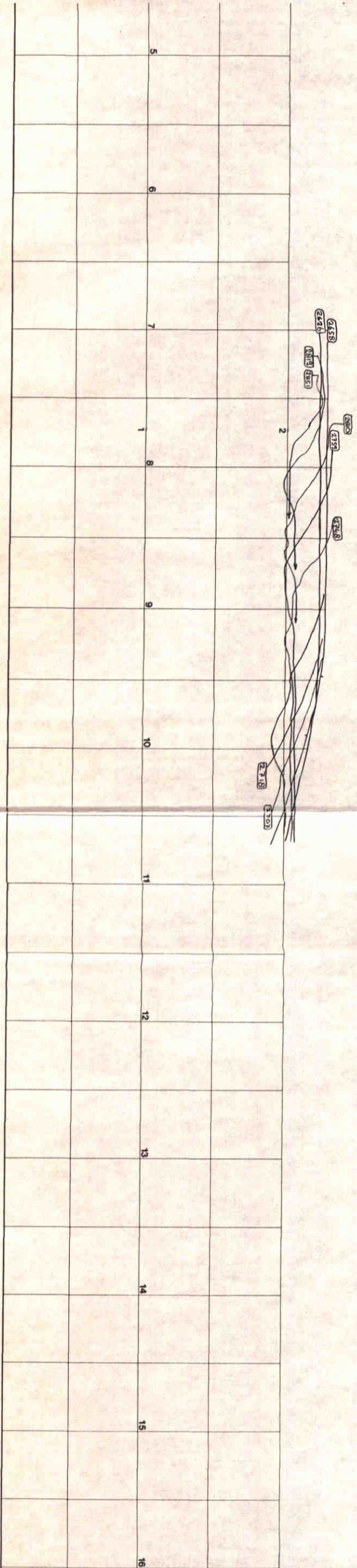
PROEF : Q01	TIJDINTERVAL : 00:26:01 - 00:41:31
q = 0.1 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 107-109
c = 12 %	TEKENING NR. : 106-107
s = 32 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE STORTONTWIKKELING	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	
	FIG. 4.3b



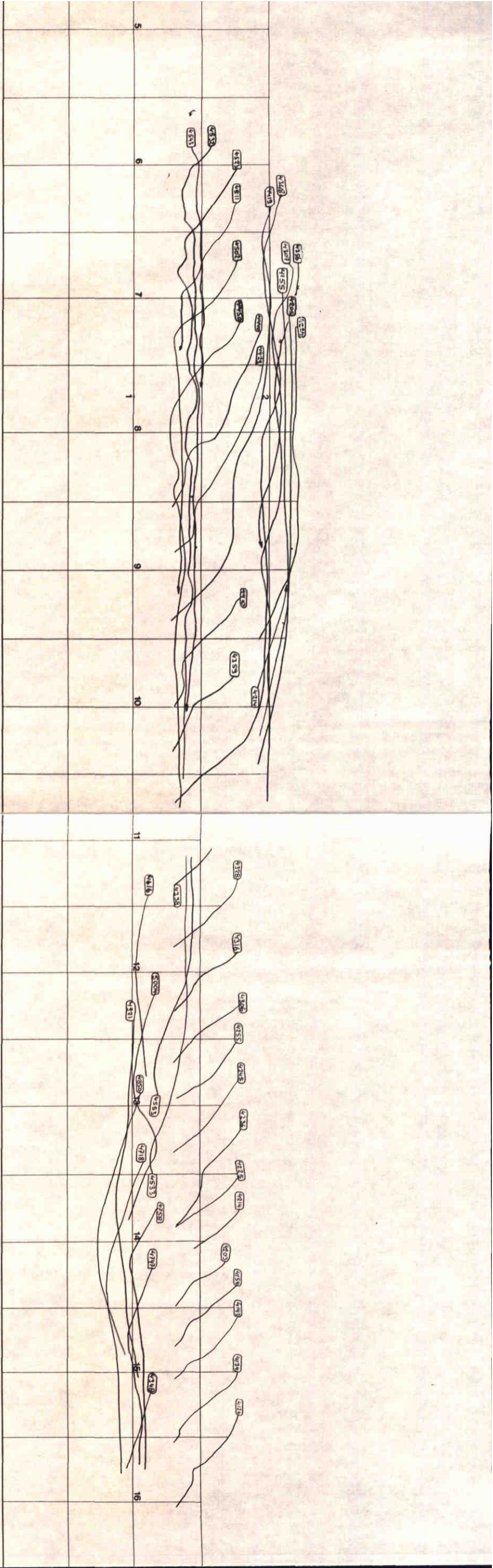
PROEF : Q02 SED.	TIJDINTERVAL : 00:11:39 - 00:24:42
q = 0.1 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 110-111
c = 21 %	TEKENING NR. : 114-115
s = 56 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE	
STORTONTWIKKELING	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	
GRONDMECHANICA DELFT	
	FIG. 4.4a



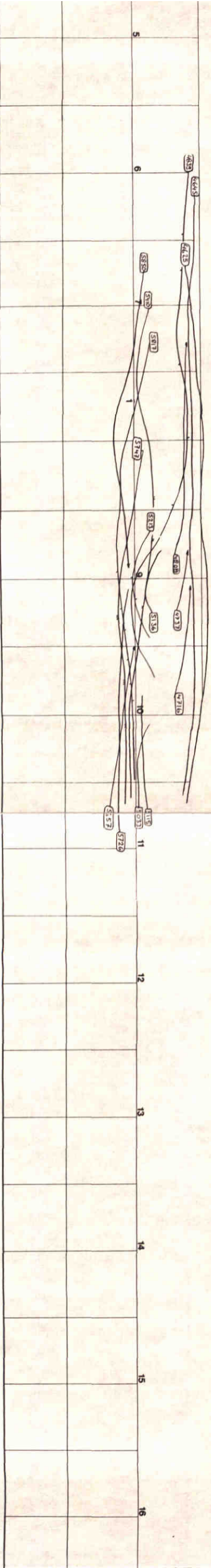
PROEF : Q02 SED.	TIJDINTERVAL : 00:22:50 - 00:26:06
q = 0.1 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 110-111
c = 21 %	TEKENING NR. : 116
s = 56 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE	
STORTONTWIKKELING	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	
GRONDMECHANICA DELFT	
	FIG. 4.4b



PROEF : 002 SED.	TIJDSINTERVAL : 00:26:26 - 00:28:51
q = 0.1 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 110-111
c = 21 %	TEKENING NR. : 110
s = 56 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE	
STORTONTWIKKELING	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	
GRONDMECHANICA DELFT	
	FIG. 4.4c

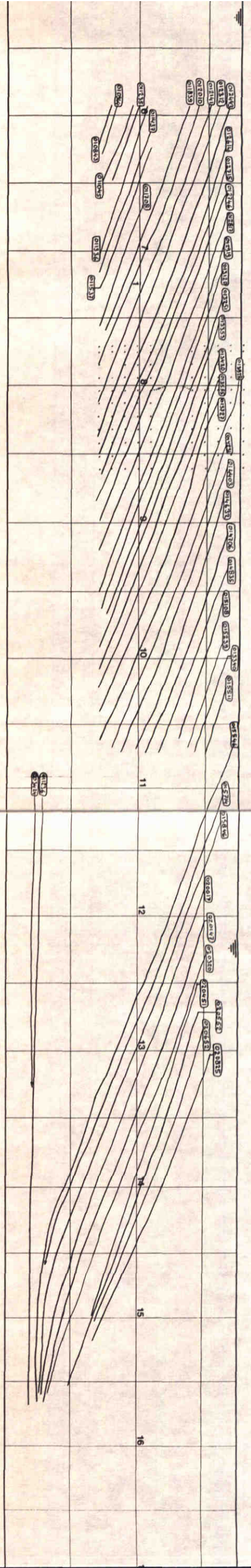


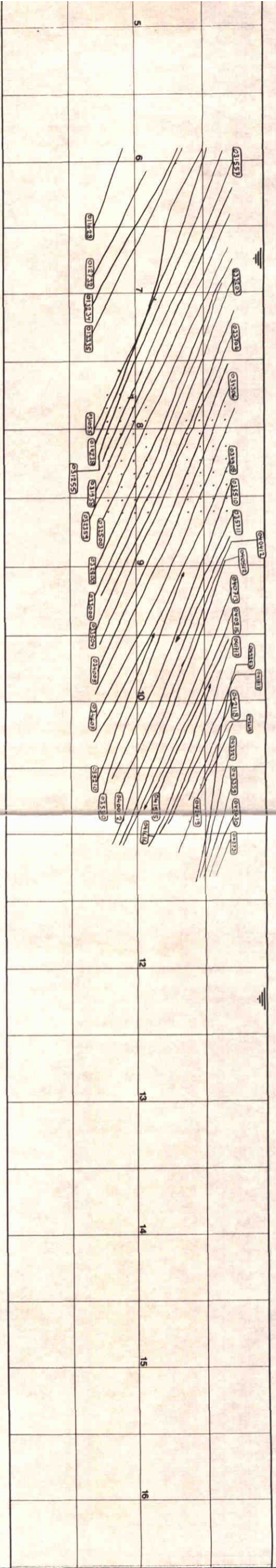
PROEF : 002 EROSIE	TIJDINTERVAL : 00:41:24 - 00:50:04
q = 0.1 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 110-111
c = 0 %	TEKENING NR. : 101-102
s = 0 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE STORTONTWIKKELING WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	
	FIG. 4.5a



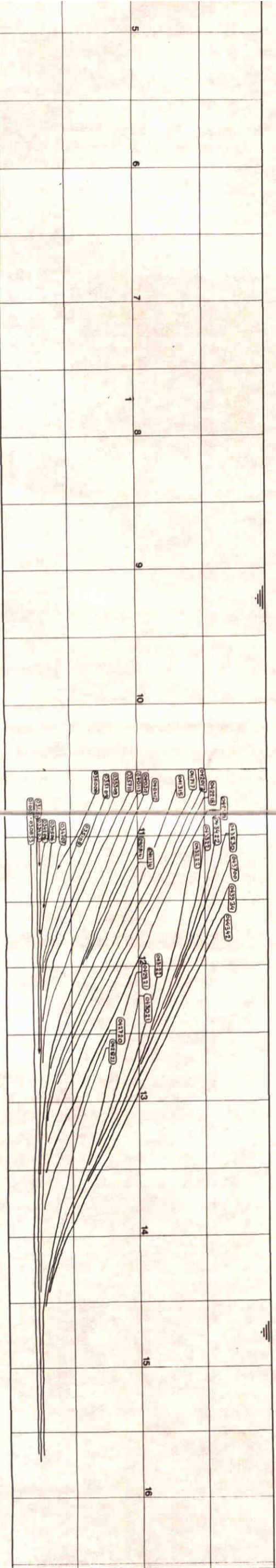
PROEF : 002 EROSIE	TIJDINTERVAL : 00:46:25 - 00:58:50
q = 0.1 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 110-111
c = 0 %	TEKENING NR. : 111
s = 0 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE STORTONTWIKKELING WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	
	FIG. 4.5b

PROEF : Q03	TIJDINTERVAL : 00:34:24 - 02:08:25
q = 0.025 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 105-106
c = 12 %	TEKENING NR. : 112-113
s = 8 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE STORONTWIKKELING	2 261
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	FIG. 4.6

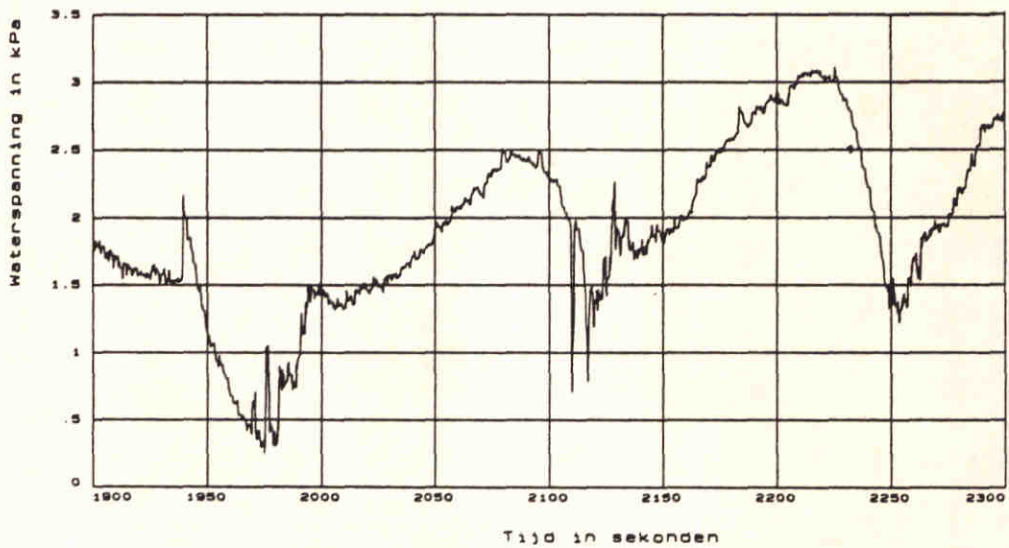
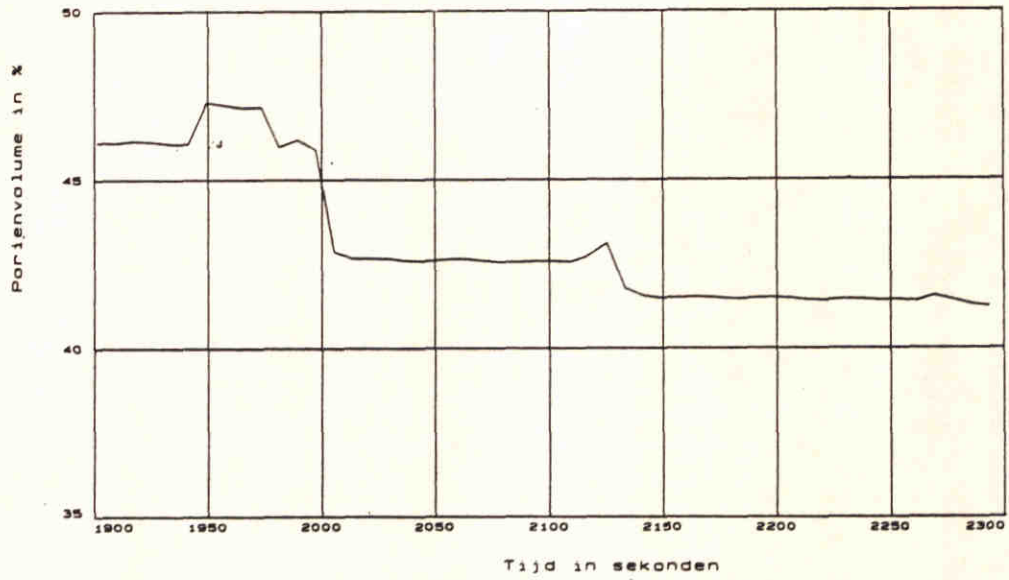


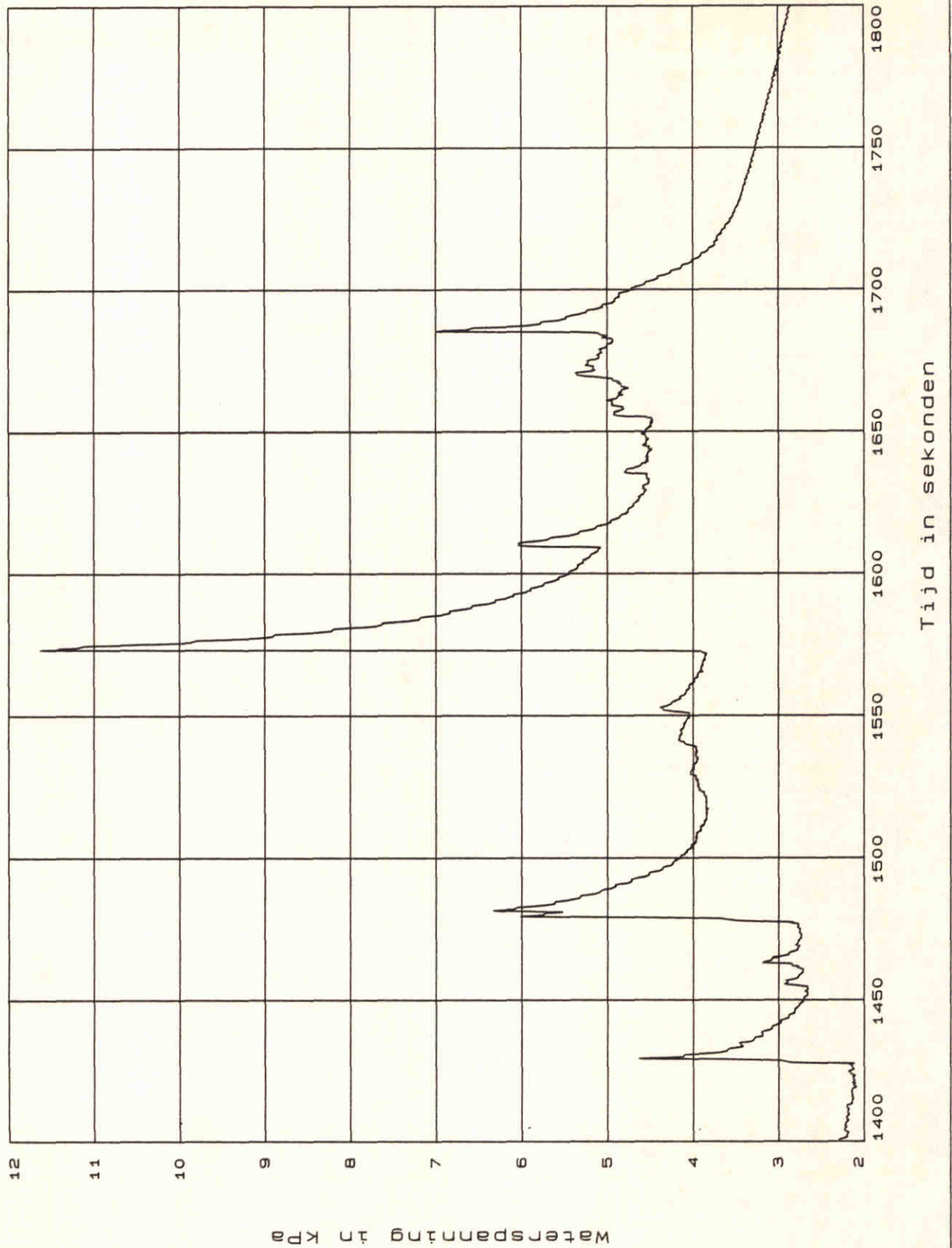


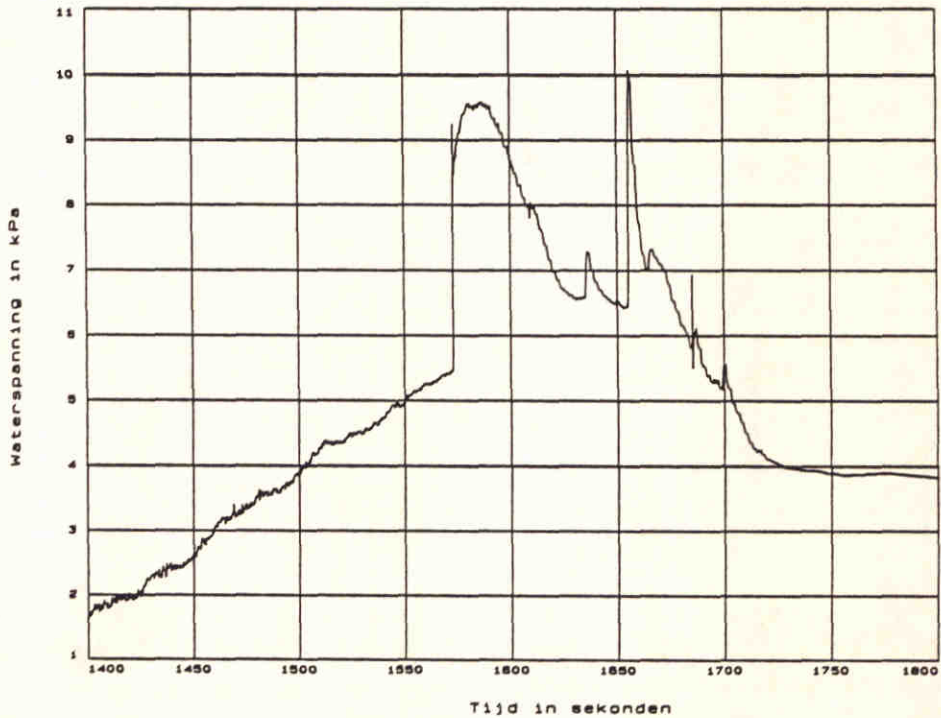
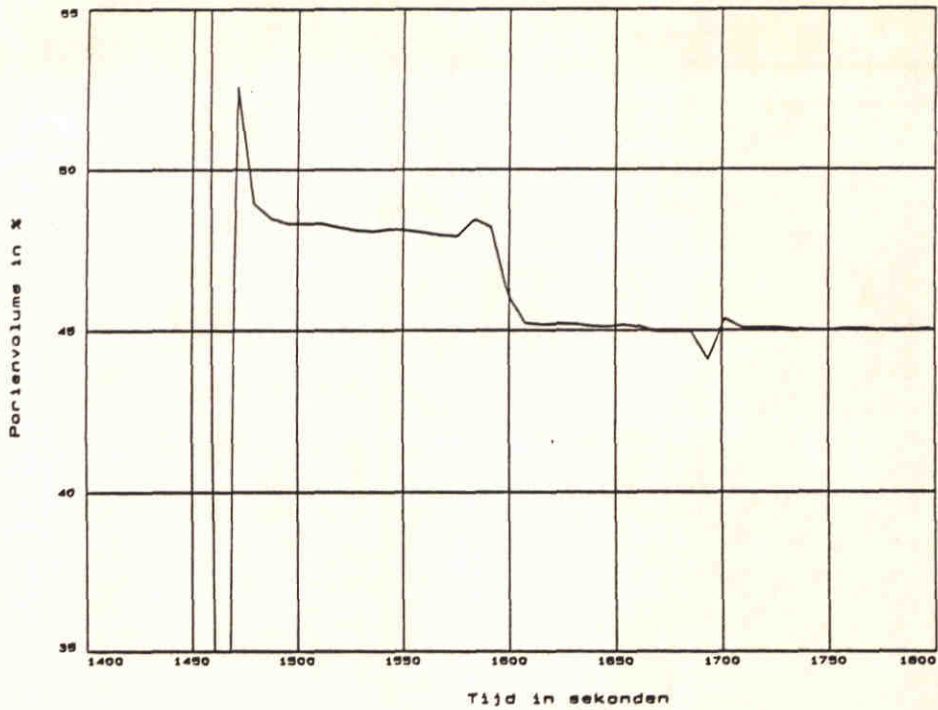
PROEF : 004	TIJDINTERVAL : 01:16:28 - 04:37:31
q = 0.01 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 101-108
c = 12 %	TEKENING NR. : 104-105
s = 3.2 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE STORTONTWIKKELING	2 261
MATERIËLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	FIG. 4.7a



PROEF : 004	TIJDINTERVAL : 01:00:31 - 04:43:42
q = 0.01 m ² /s	FILM NUMMER(S) : 101-108
c = 12 %	TEKENING NR. : 103
s = 3.2 kg/sm	
FOTOGRAFISCHE REGISTRATIE STORTONTWIKKELING	2 261
MATERIËLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	FIG. 4.7b







GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

dd

88-05-31

get.
A.

PROEF Q02 WATERSPANNING EN DICHTHEID

OP Z=1.7m

X=8.1m

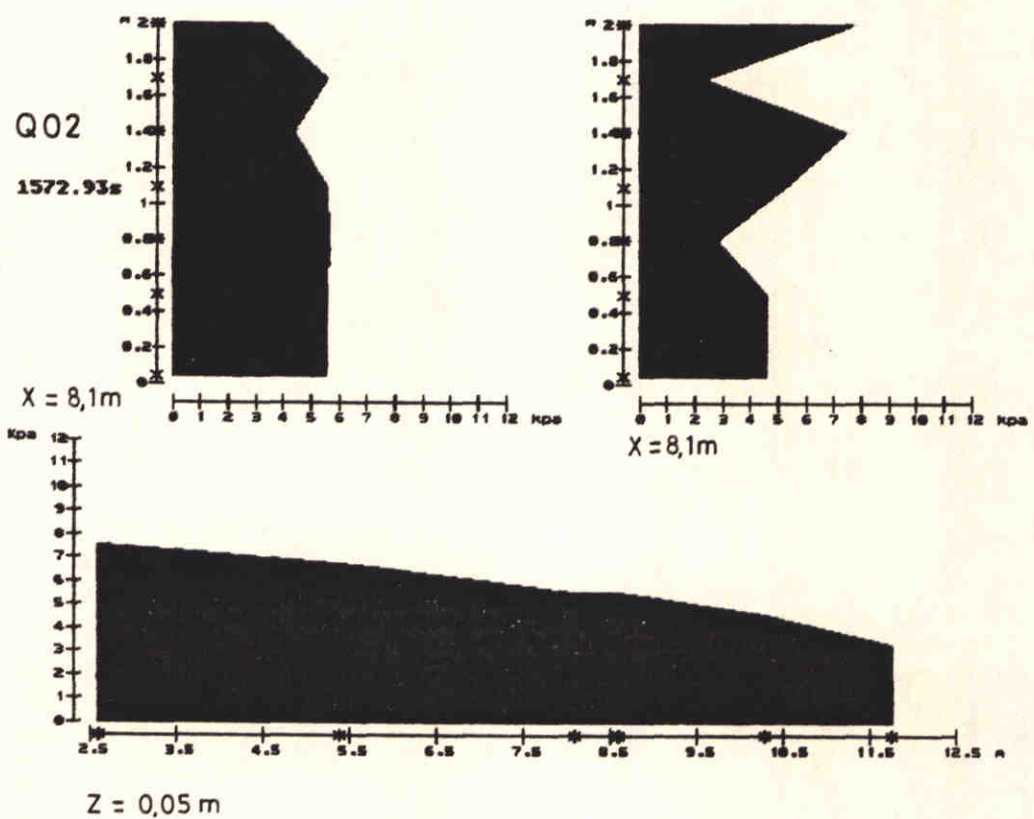
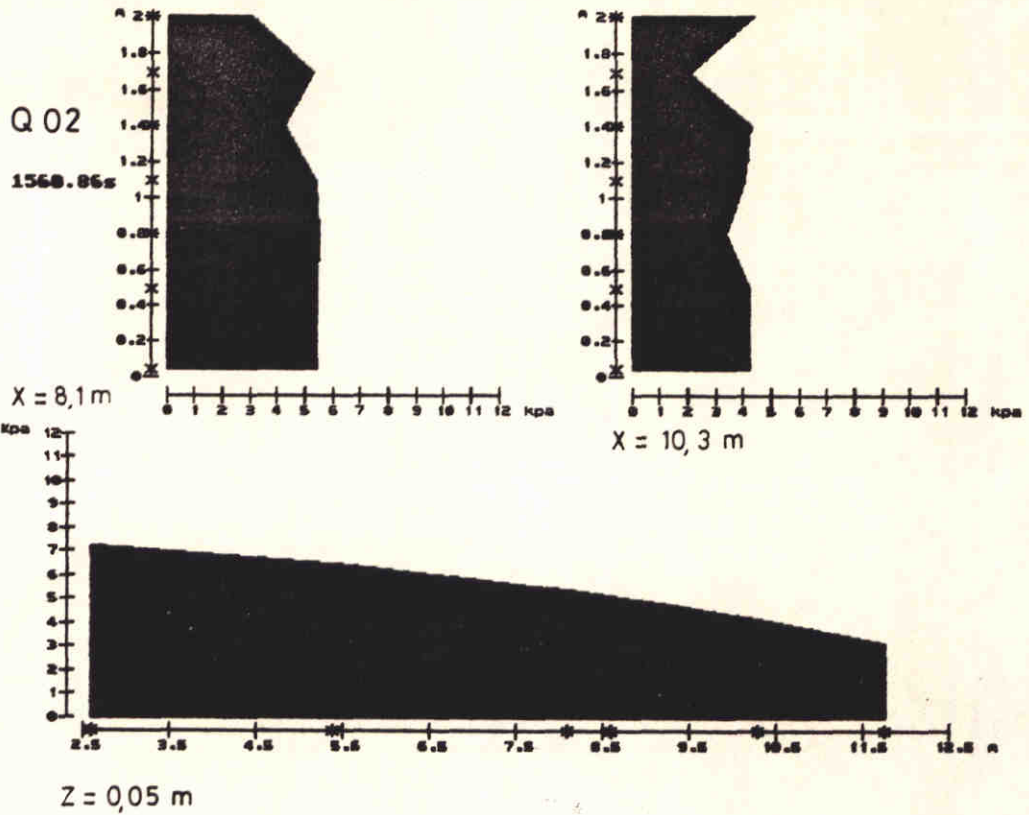
CO-294750

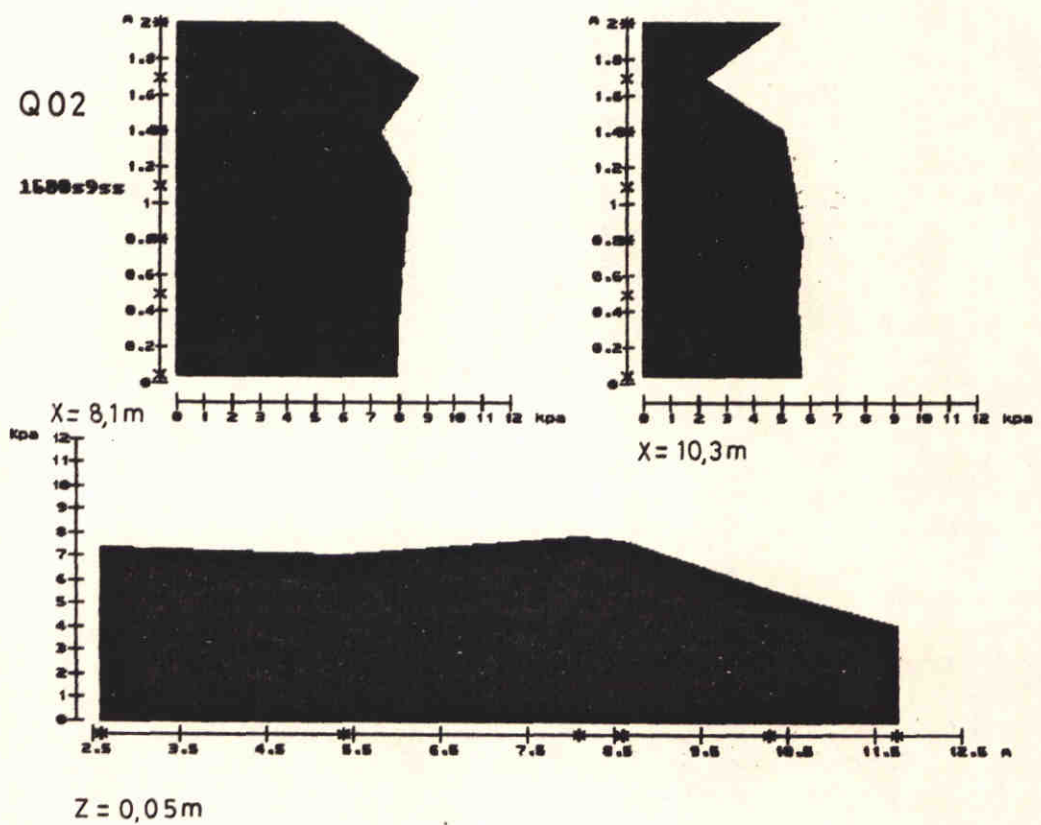
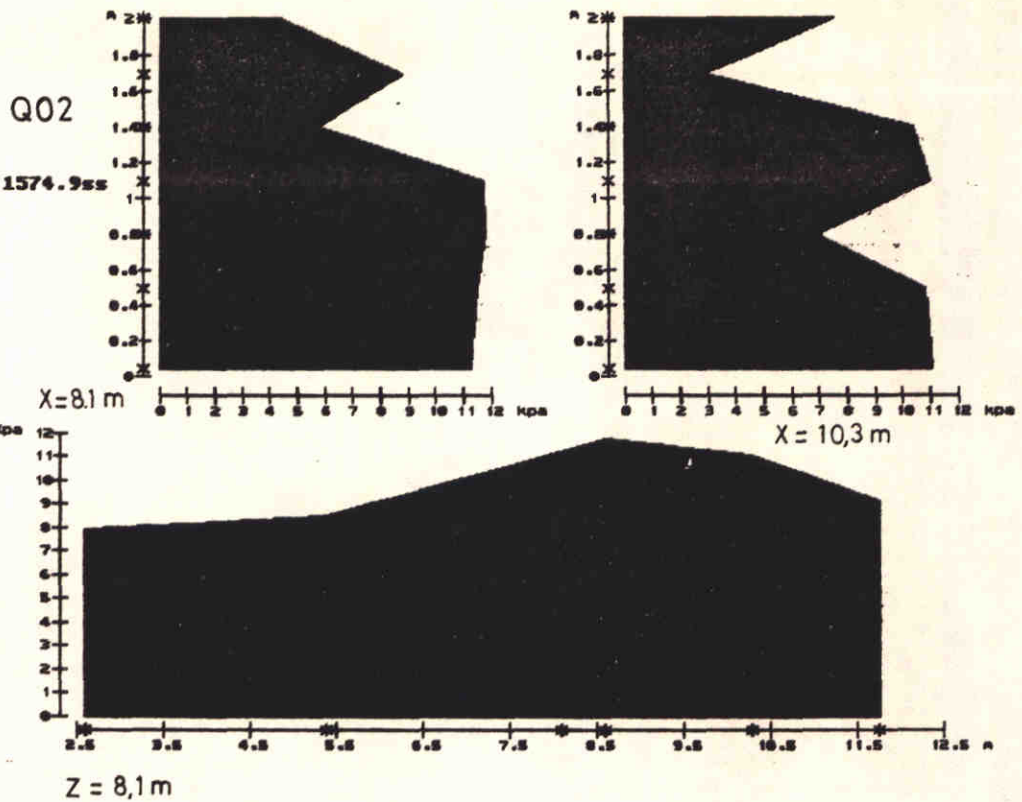
gez.

FIG. 4.10

form

A4





**GRONDMECHANICA
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

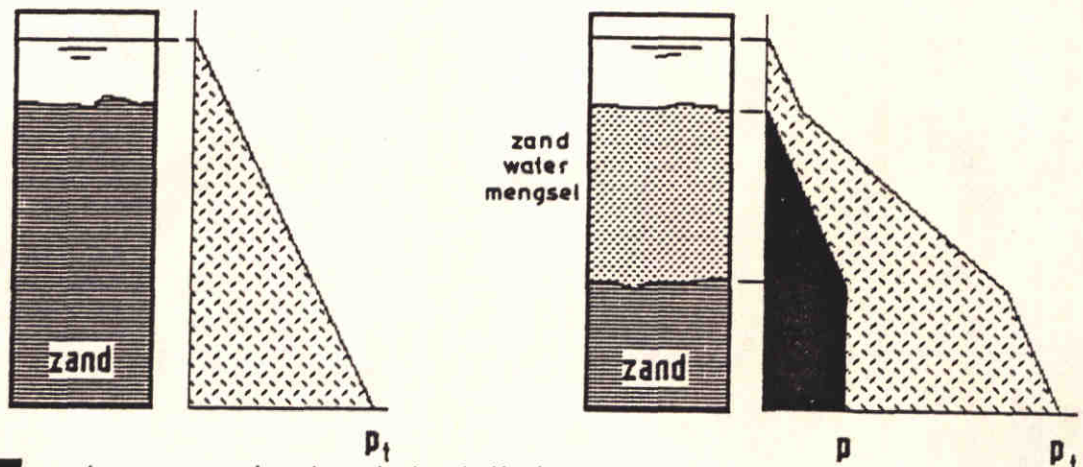
d.d.
88-05-31

get
Q

VERLOOP WATERSPANNING BIJ MAXIMALE
UITGEBREIDHEID ZETTINGSVLOEIING IN Q02
EN AAN HET EIND VAN DE VLOEIING

gez.
CO- 294750

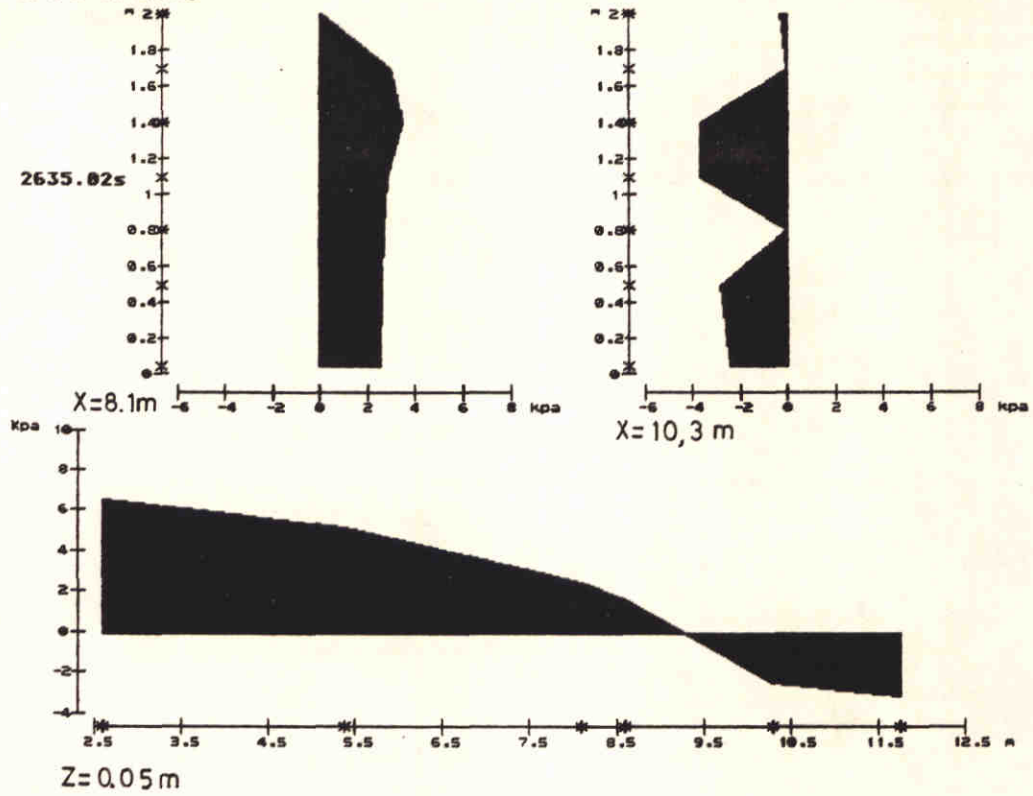
form.
A4
FIG. 4,12



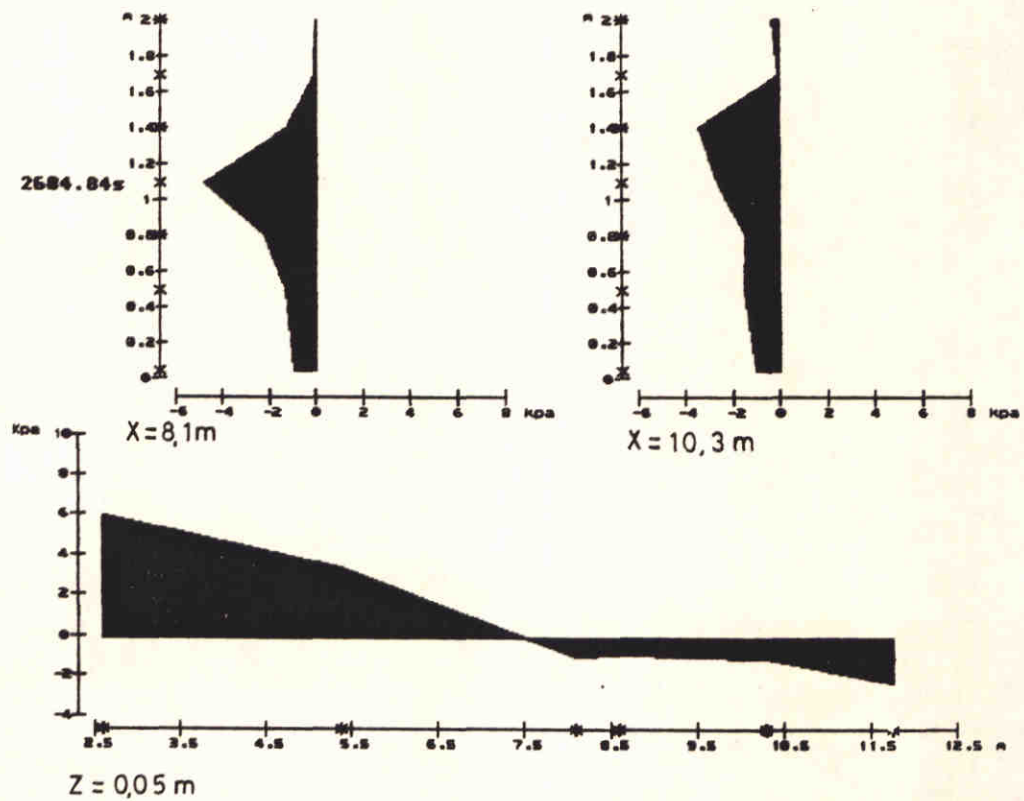
= water overspanning t.o.v. hydrostatische druk
 = totale waterspanning

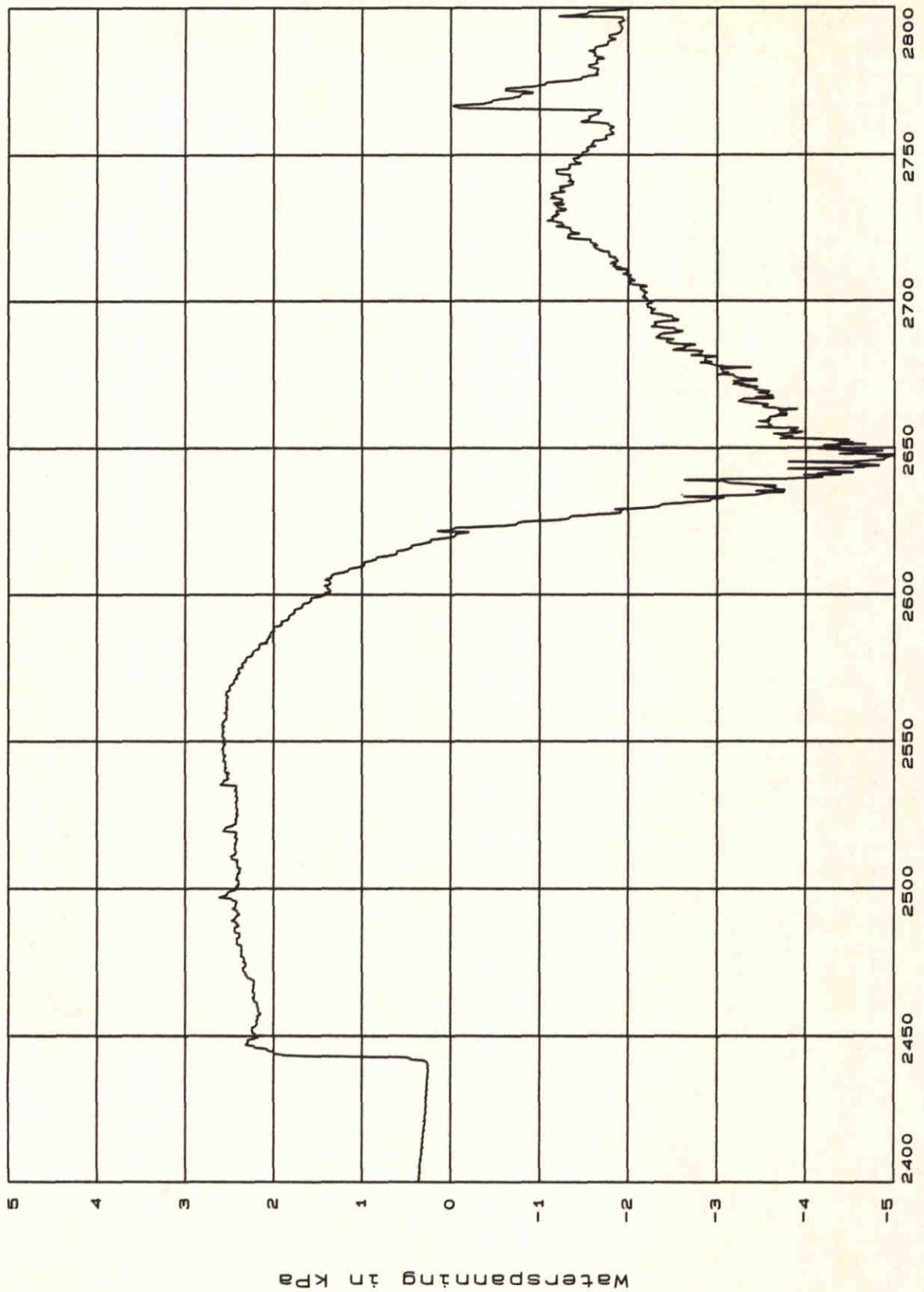
SCHETS WATERSPANNINGSVERLOOP IN ZAND EN IN GEDEELTELIJK VERWEEKT ZAND	87-11-18	⑥
	CO-284461	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM GRONDMECHANICA DELFT	FIG. 4.13	

Q 02 erosie



Q 02 erosie





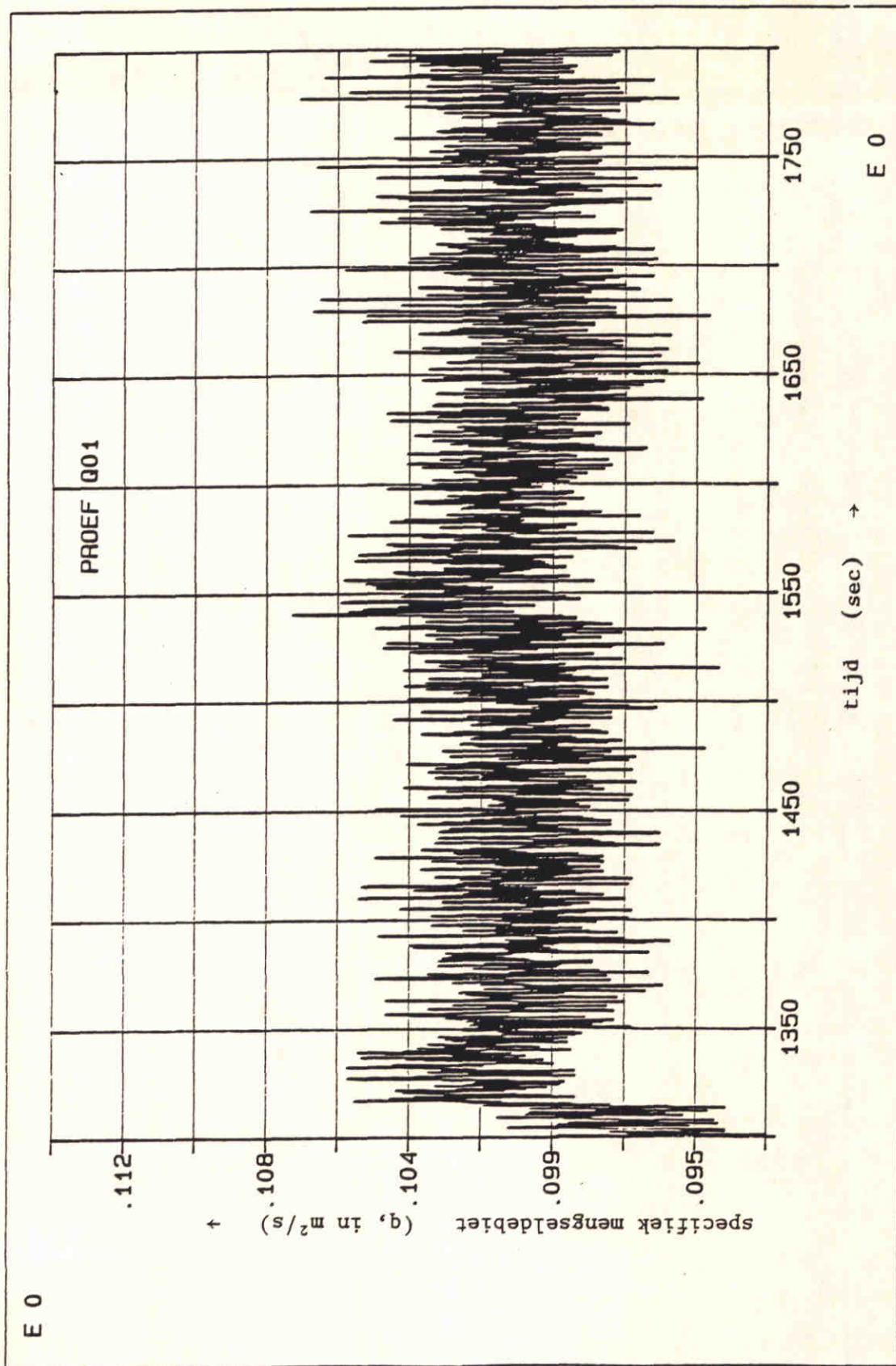
GRONDMECHANICA
DELFT

88-02-08

STORTEN VAN ZAND
PROEF No: ST02
WSM 6

CO-294750

FIG. 4.15



Specifiek menseldebiet periode a

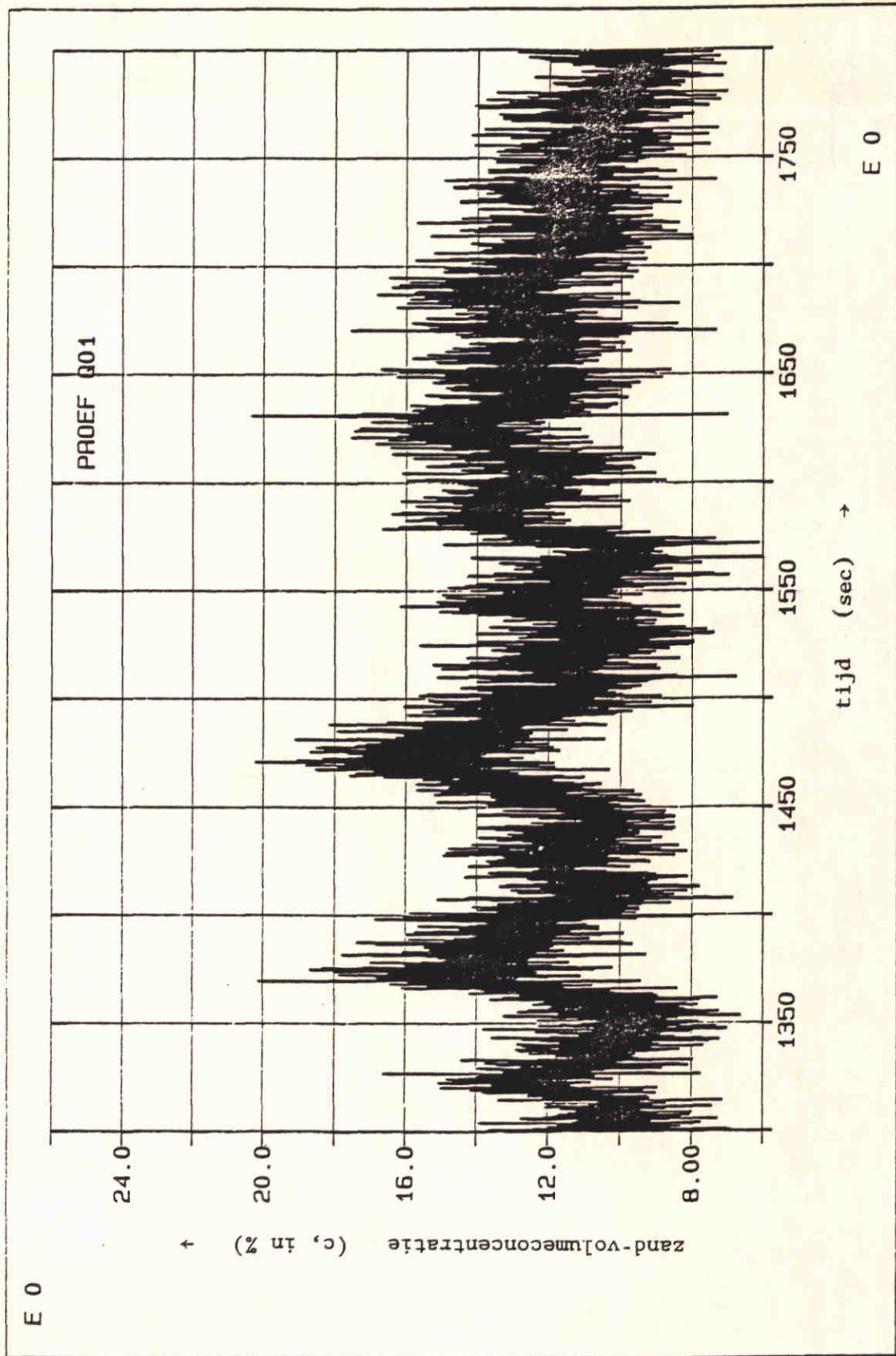
Proef Q 01

Z -261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.1



Zand - volumeconcentratie sleepwagen
periode a

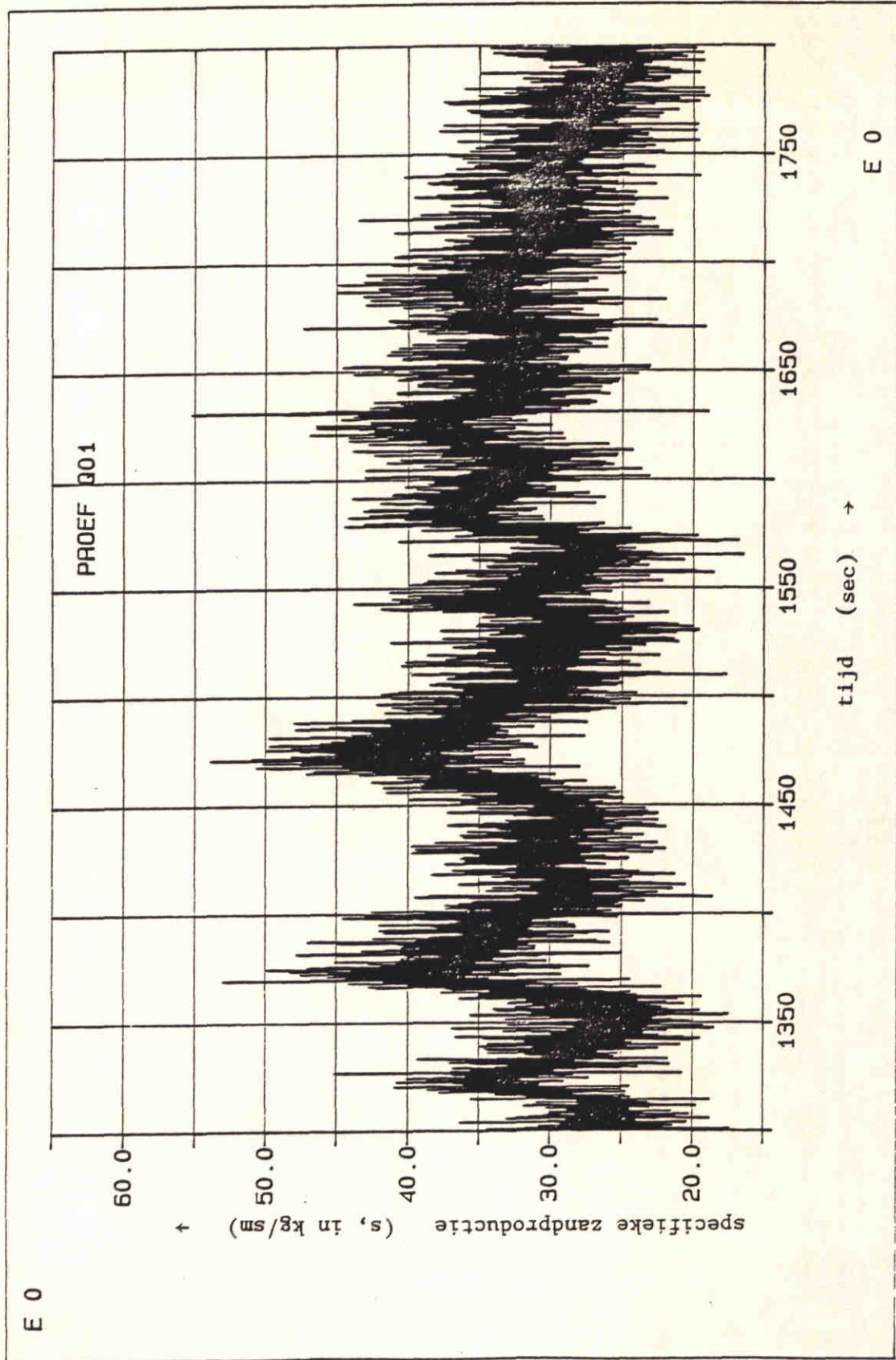
Proef: Q 01

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.2



Specifieke zandproductie
periode a

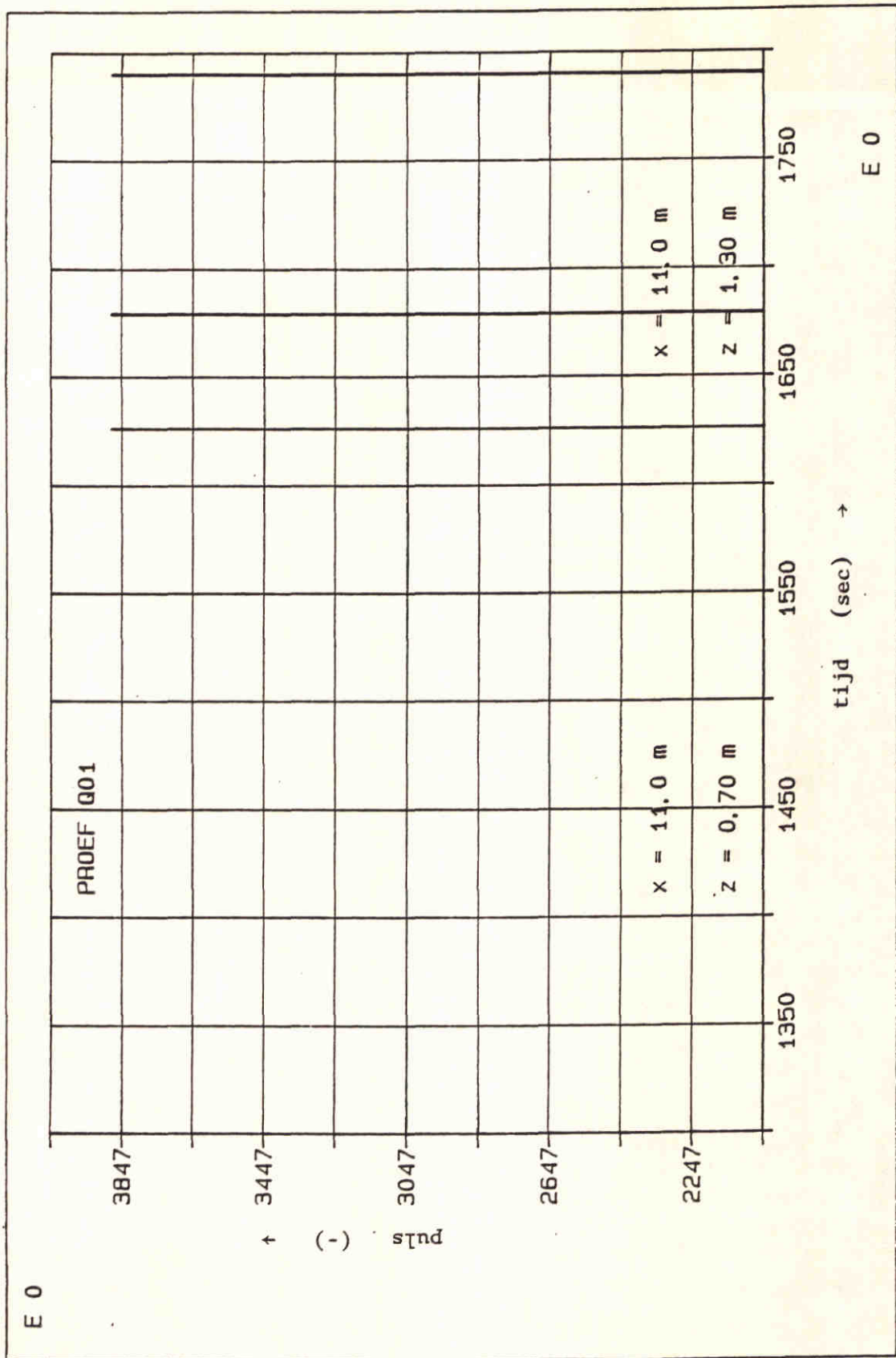
Proef: Q 01

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.3



Positie meetwagen
periode a

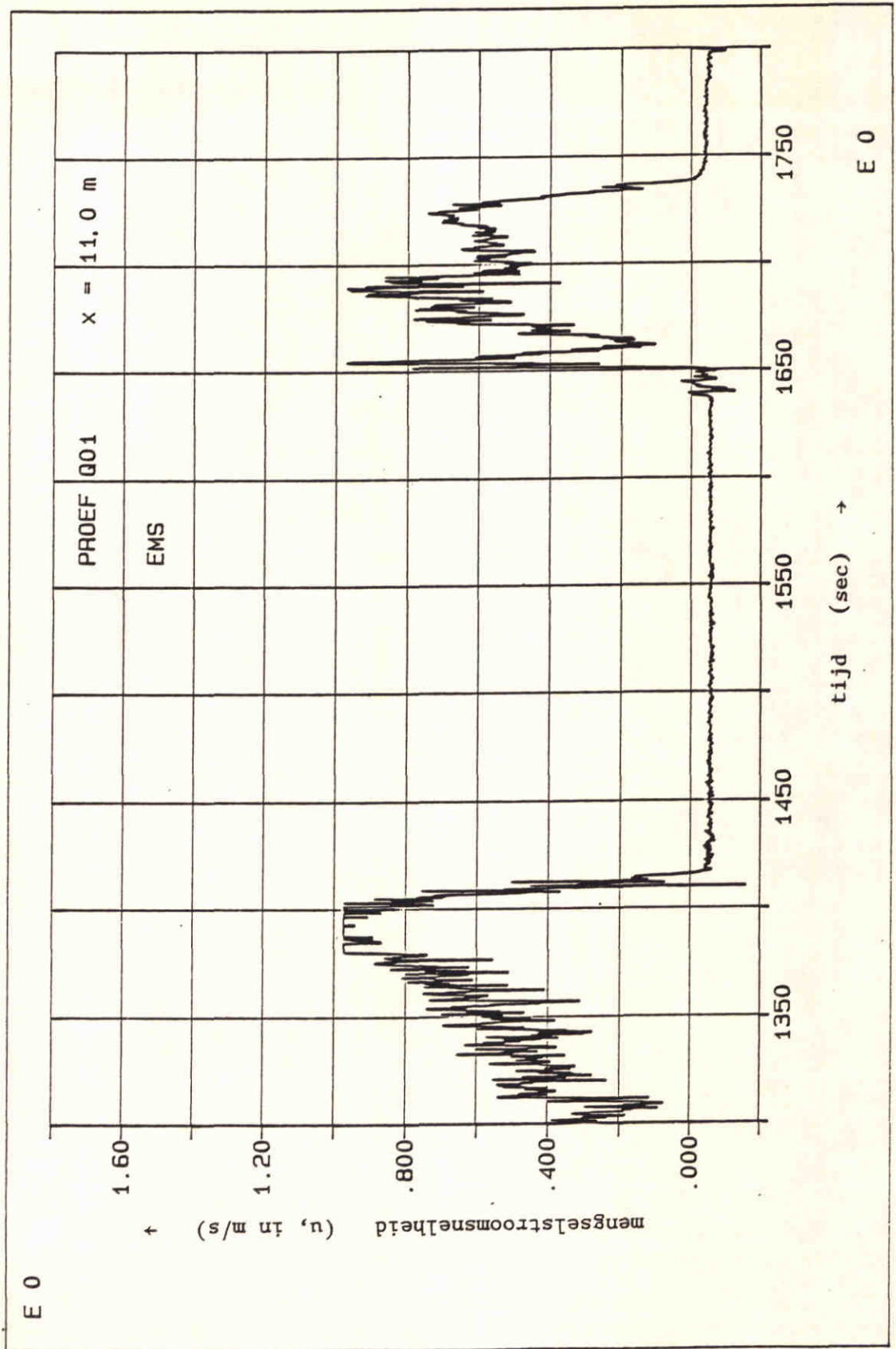
Proef: Q 01

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.4



Mengselstroomsnelheid
periode a

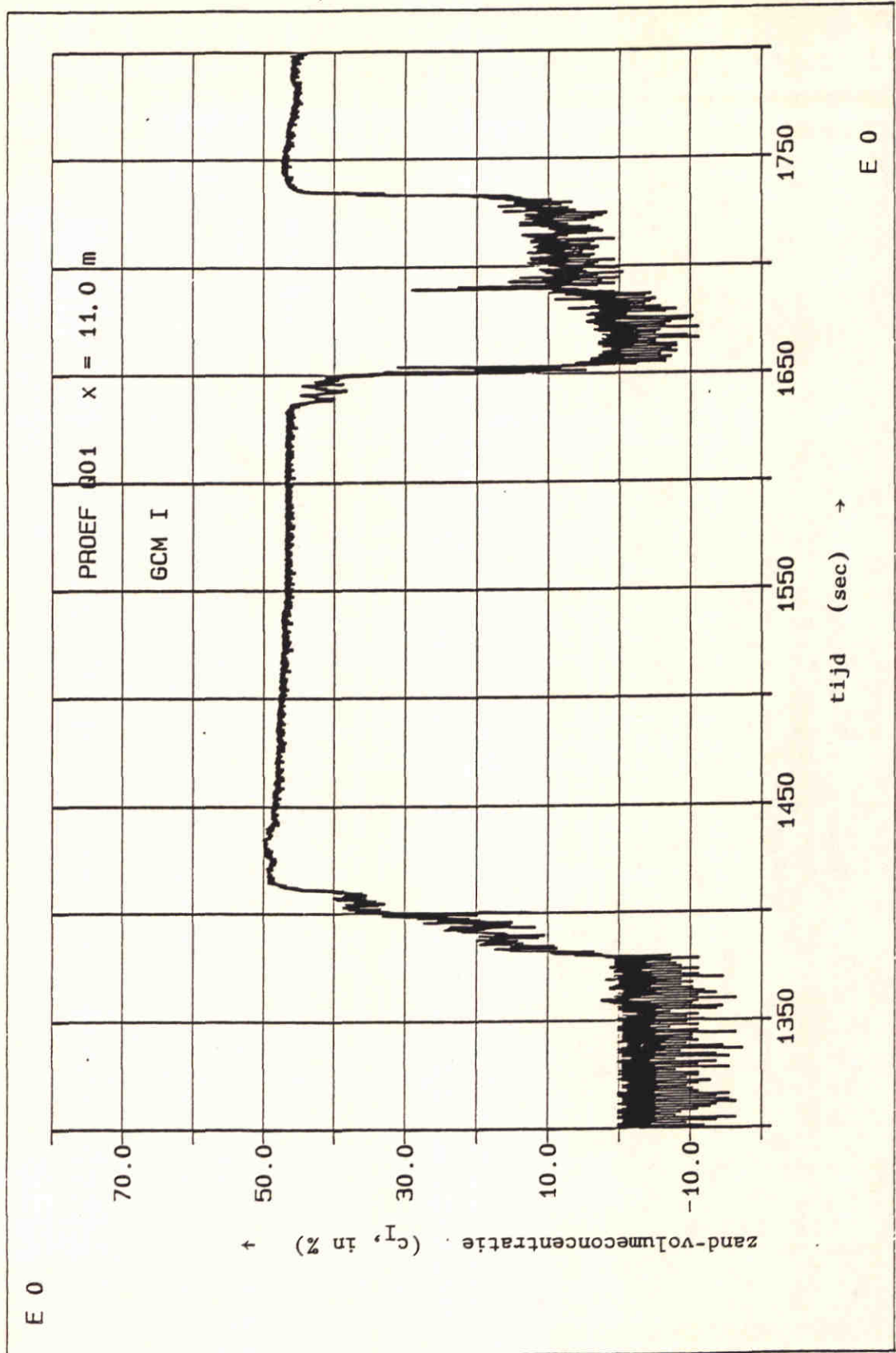
Proef: Q .01

Z - 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.5



Zand-volumeconcentratie I

Periode a

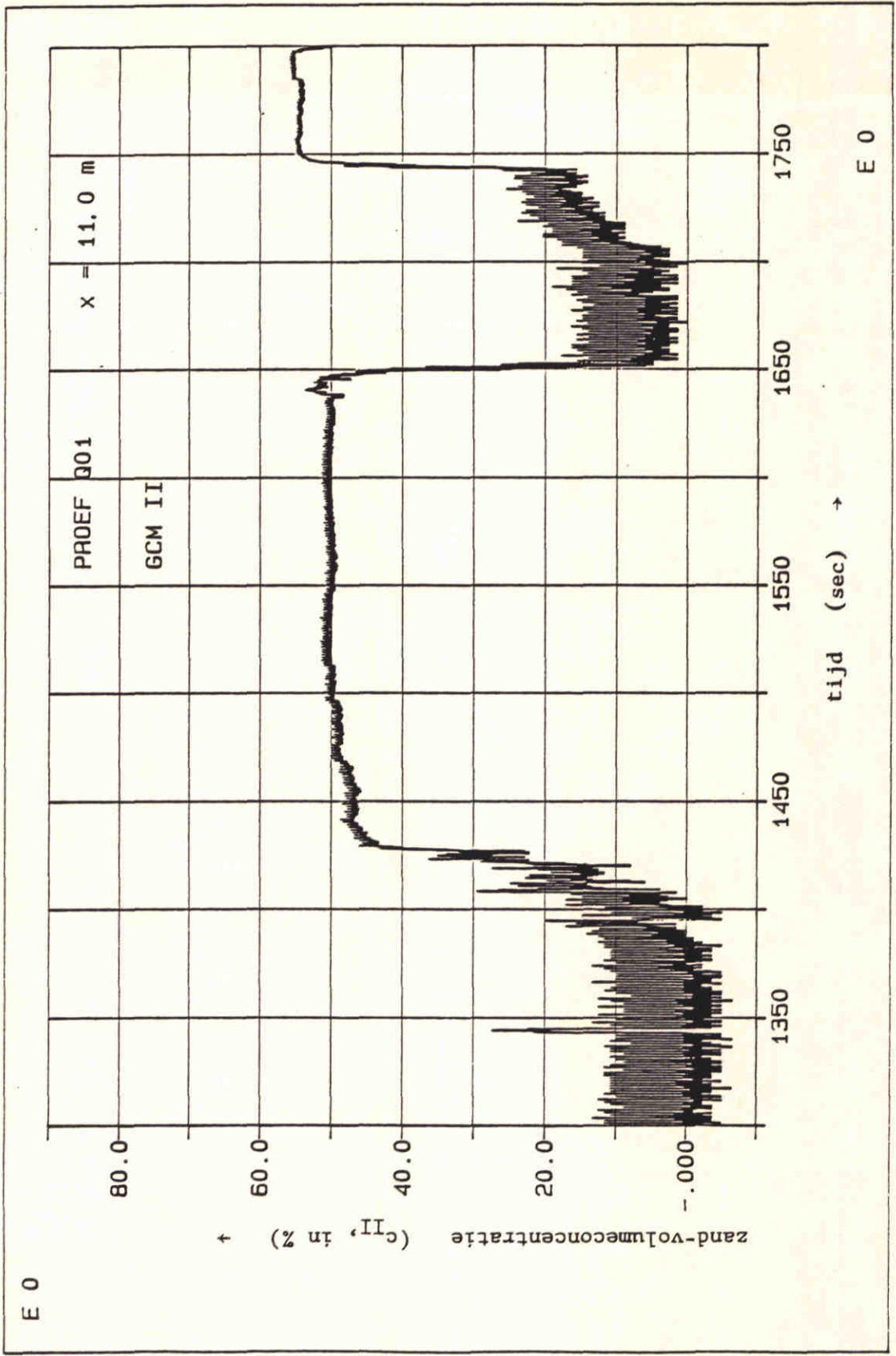
Proef : Q 01

Z- 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.6



Zand-volumeconcentratie II
Periode a

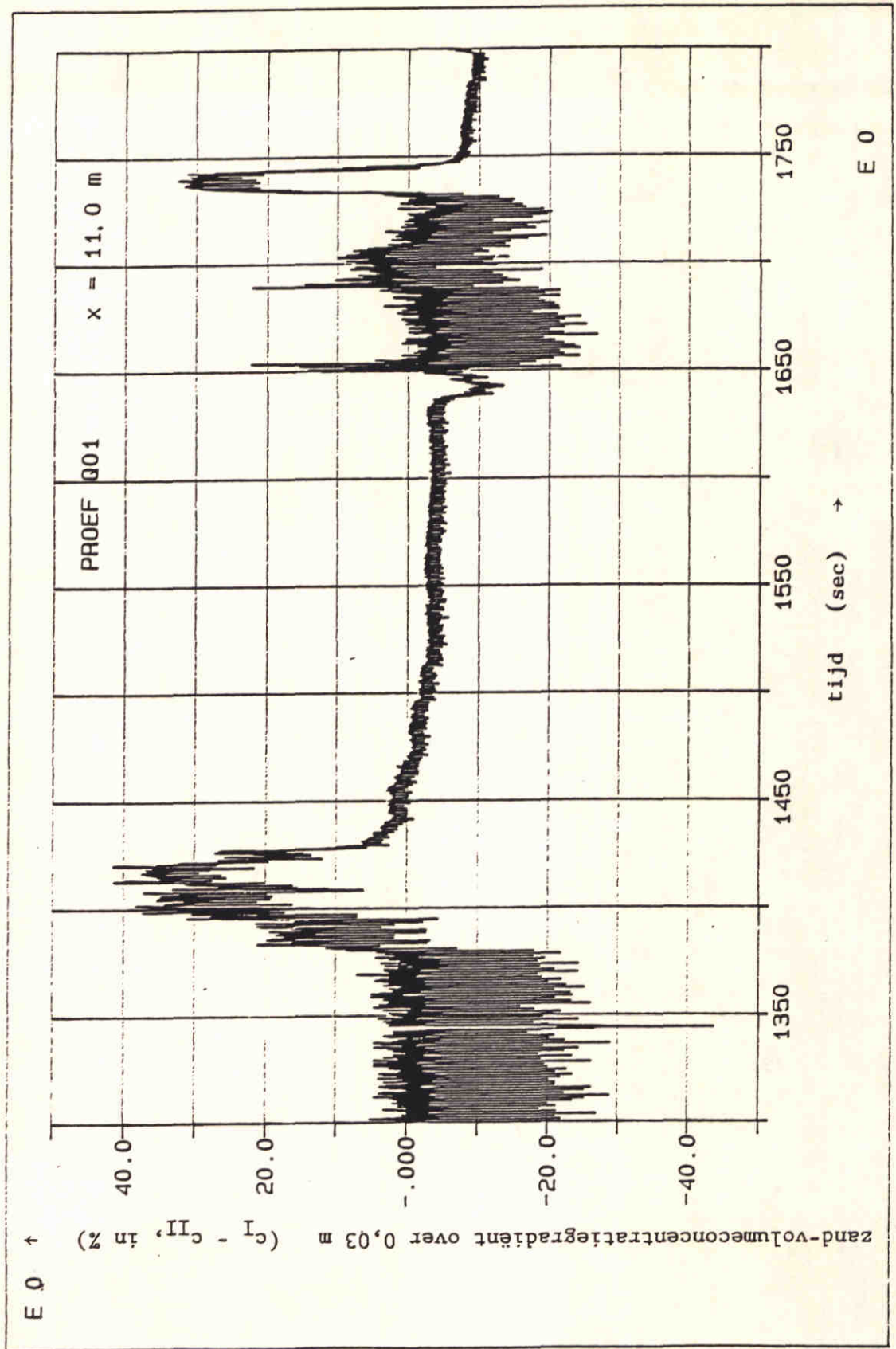
Proef: Q 01

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.7



Zand - volumeconcentratiegradient over 0,03 m
 Periode a

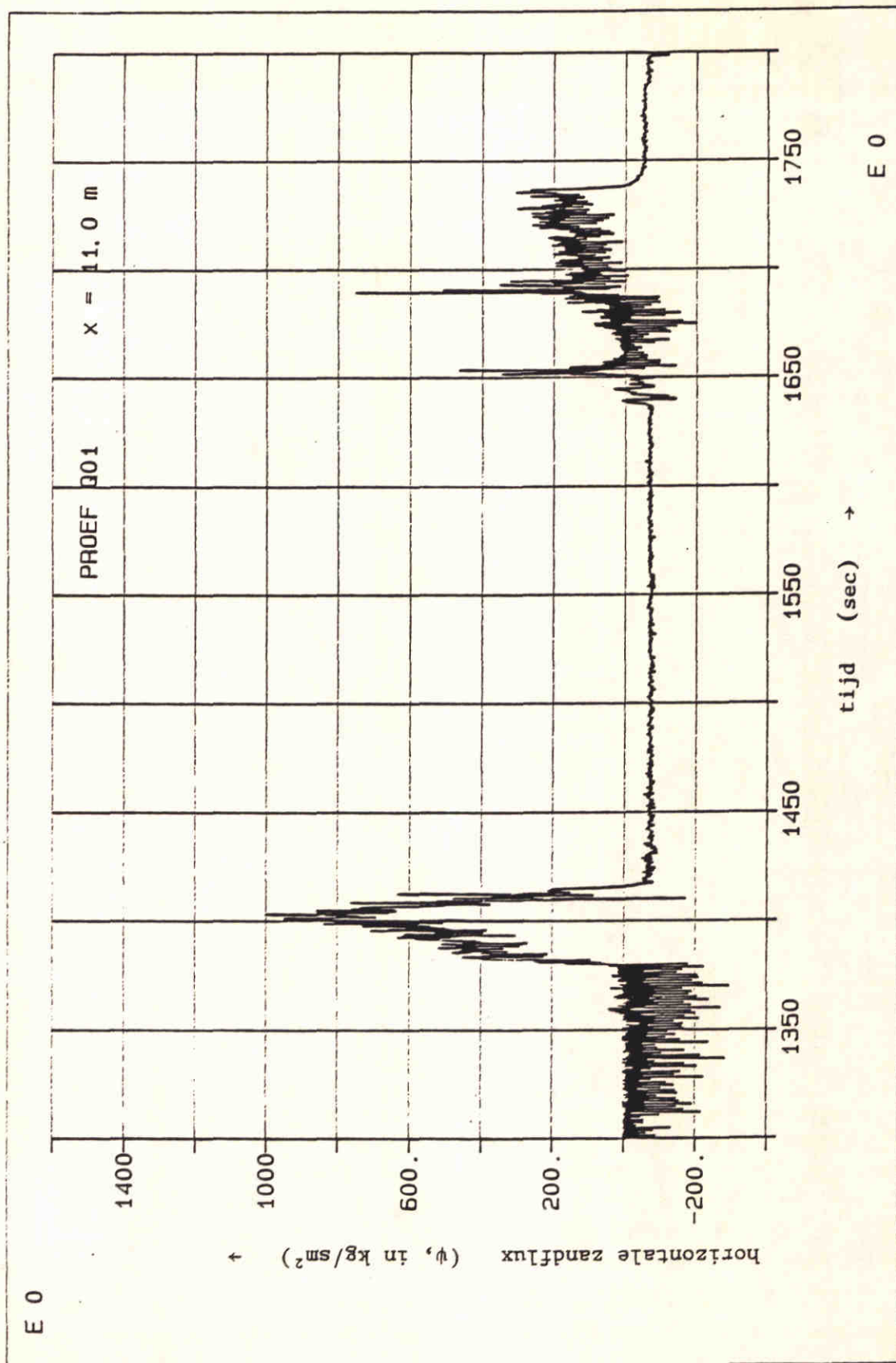
Proef: Q 01

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.8



Horizontale zandflux
 Periode a

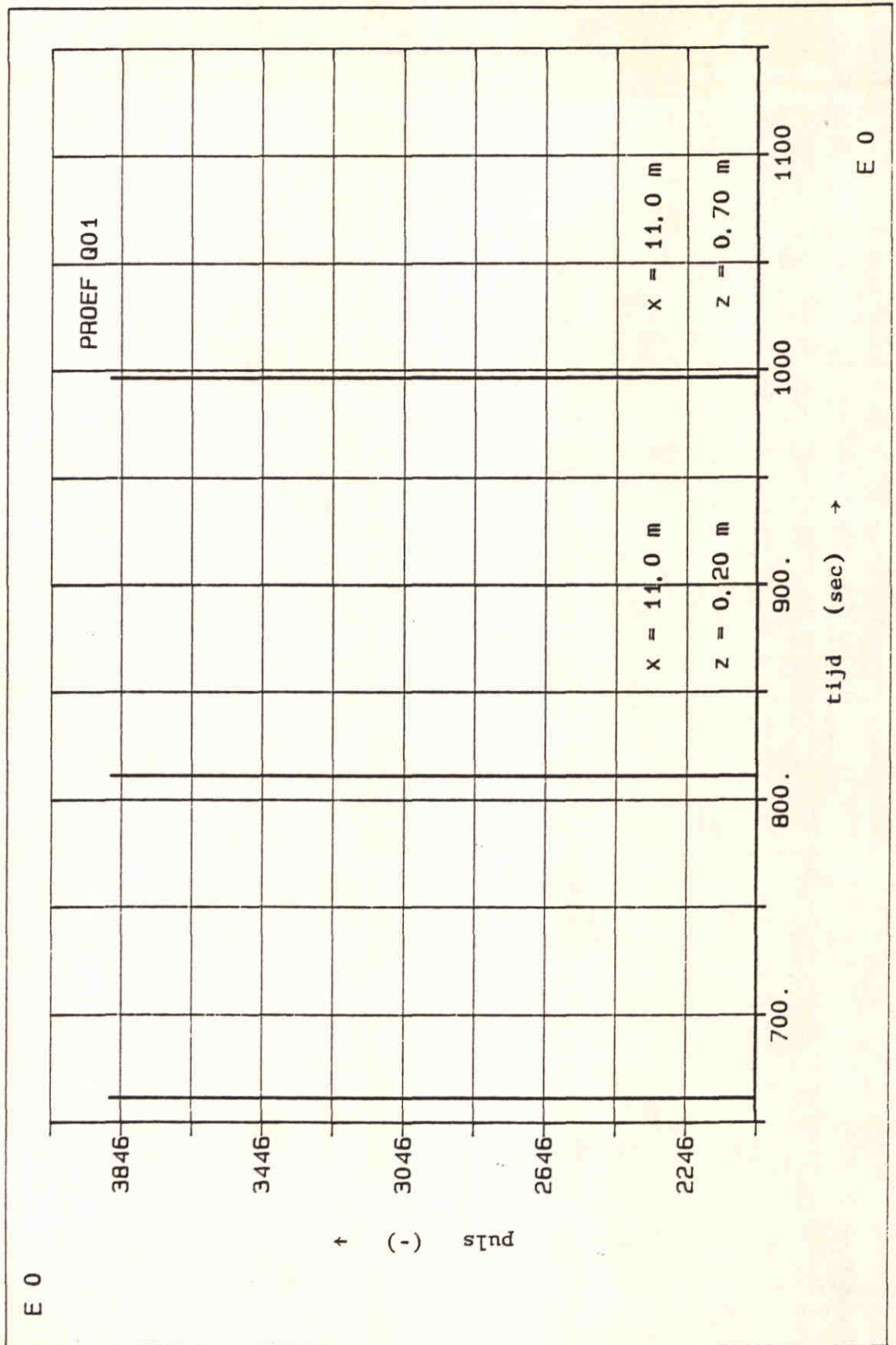
Proef: Q 01

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.9



Positie meetwagen

Periode b

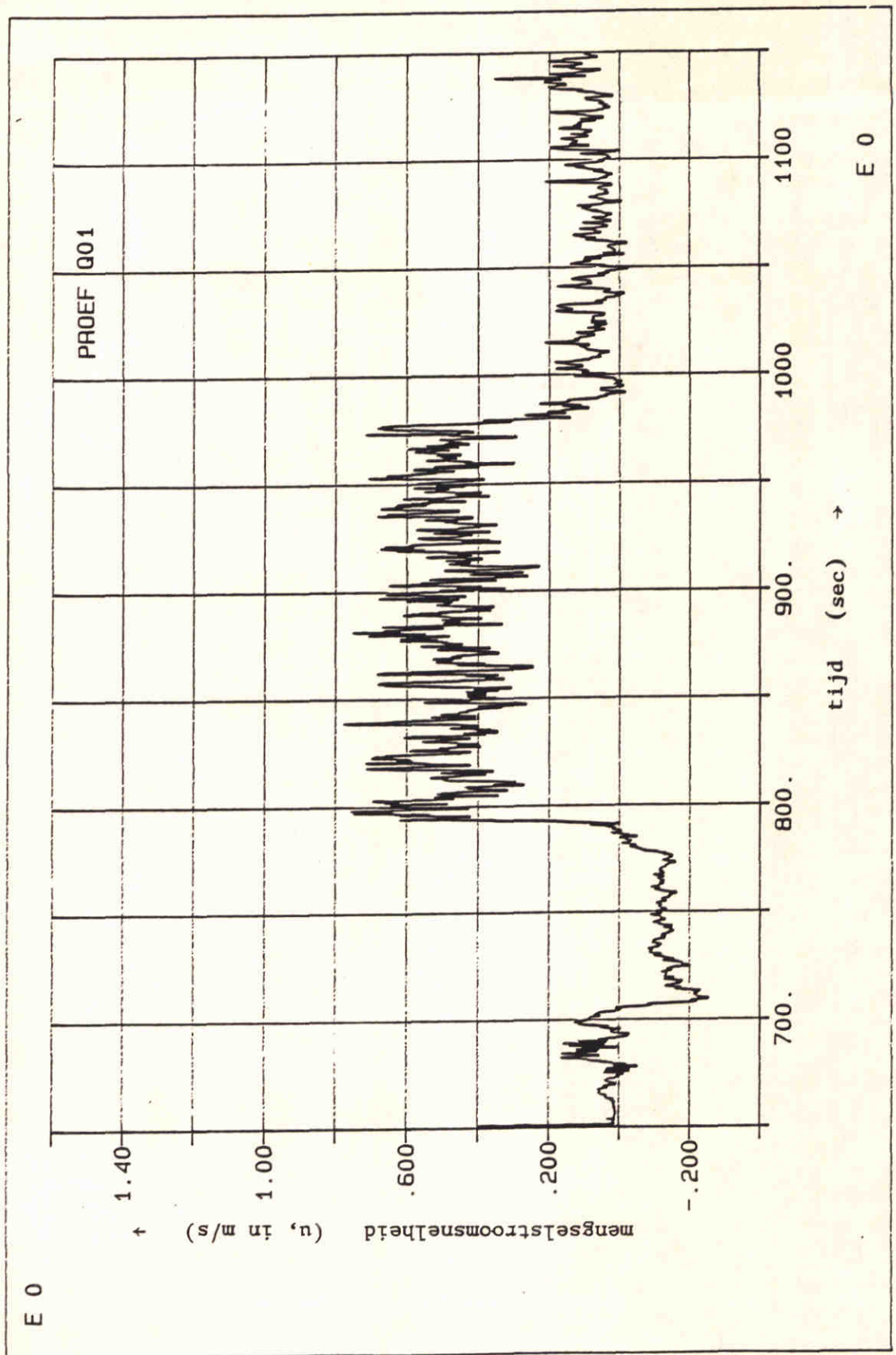
Proef : Q 01

Z- 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.10



Mengselstroomsnelheid

Periode b

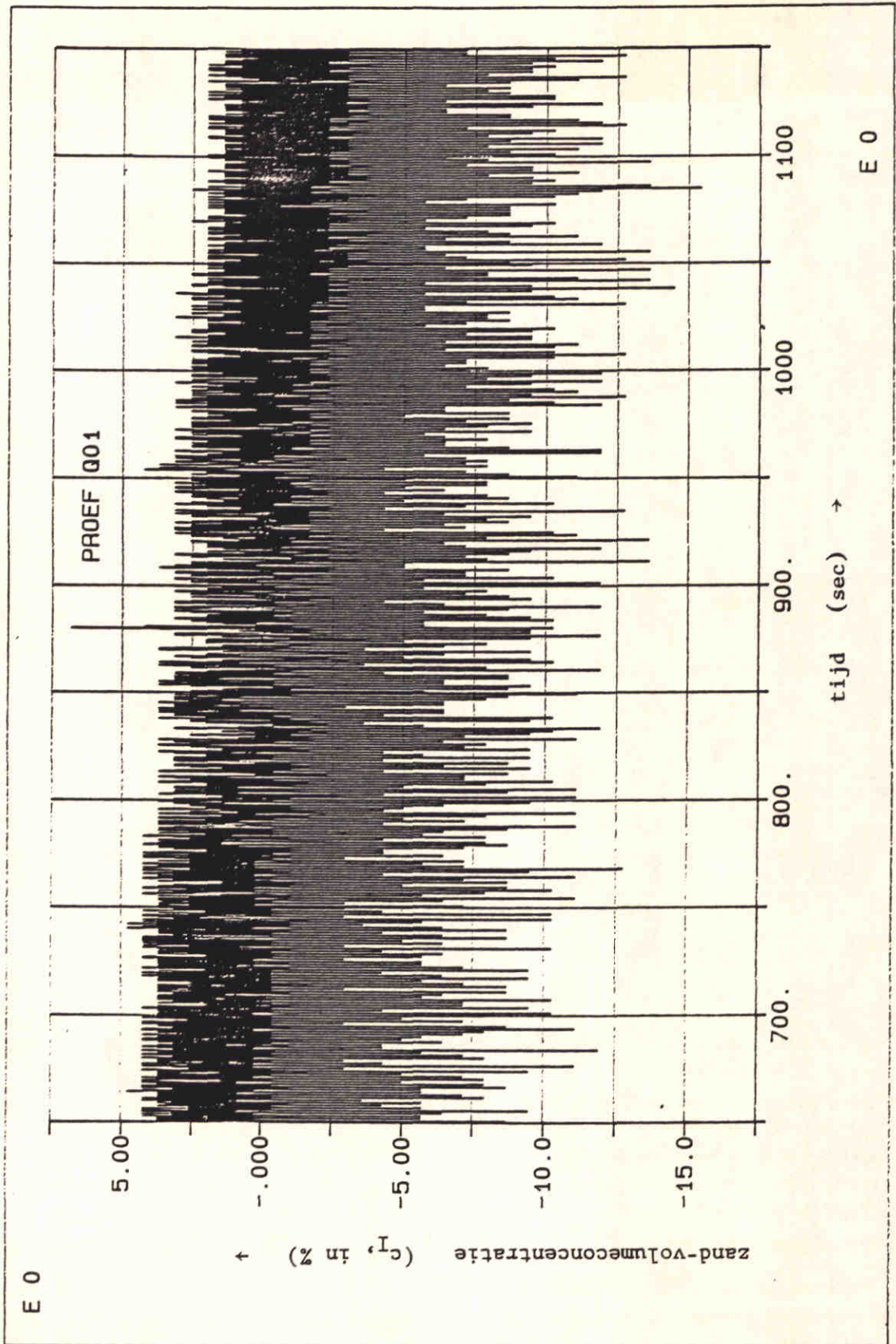
Proef : Q 01

Z - 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.11



Zand-volumecentratie I
 Periode b

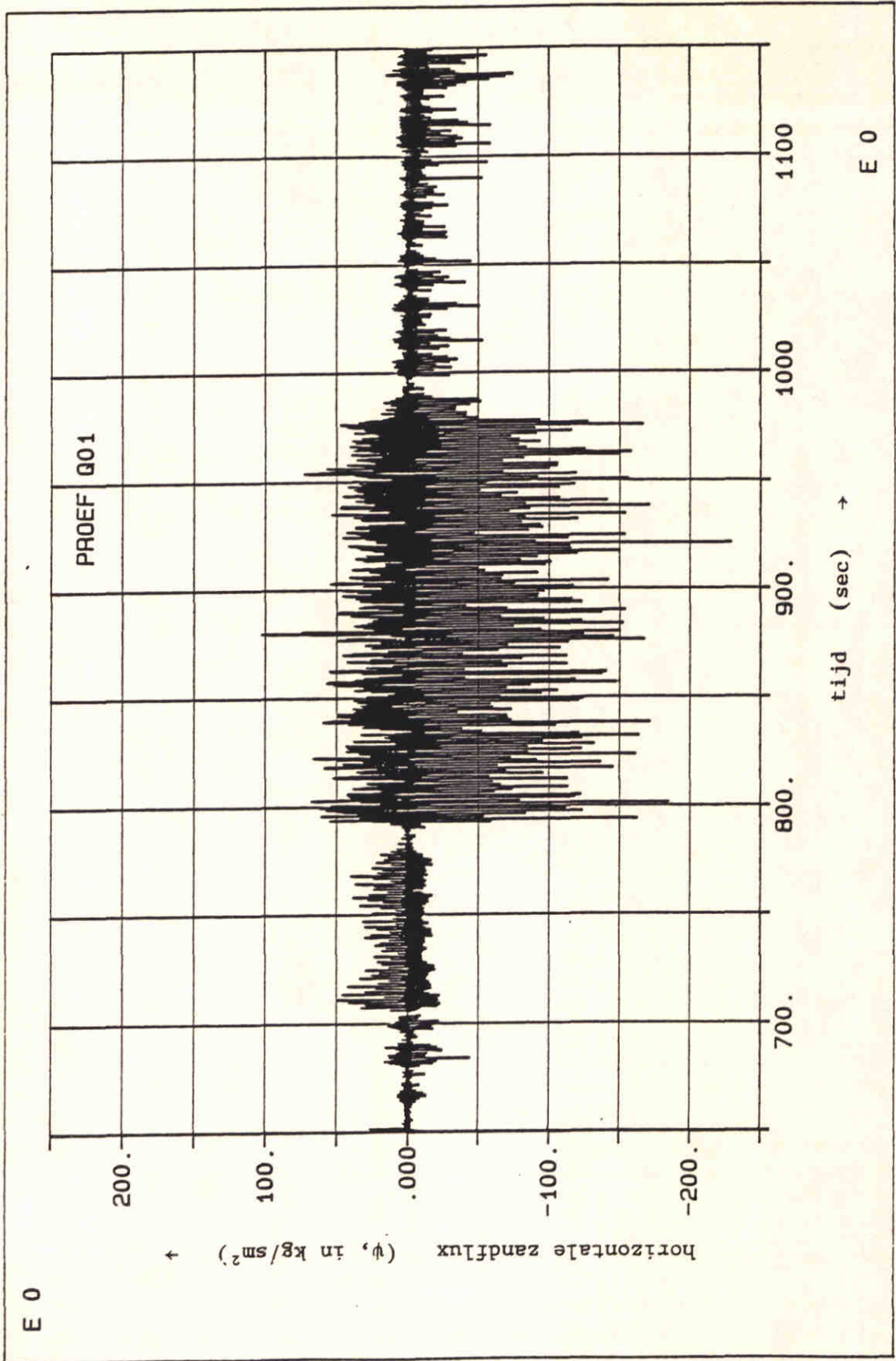
Proef : Q 01

Z - 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.12



Horizontale zandflux

Periode b

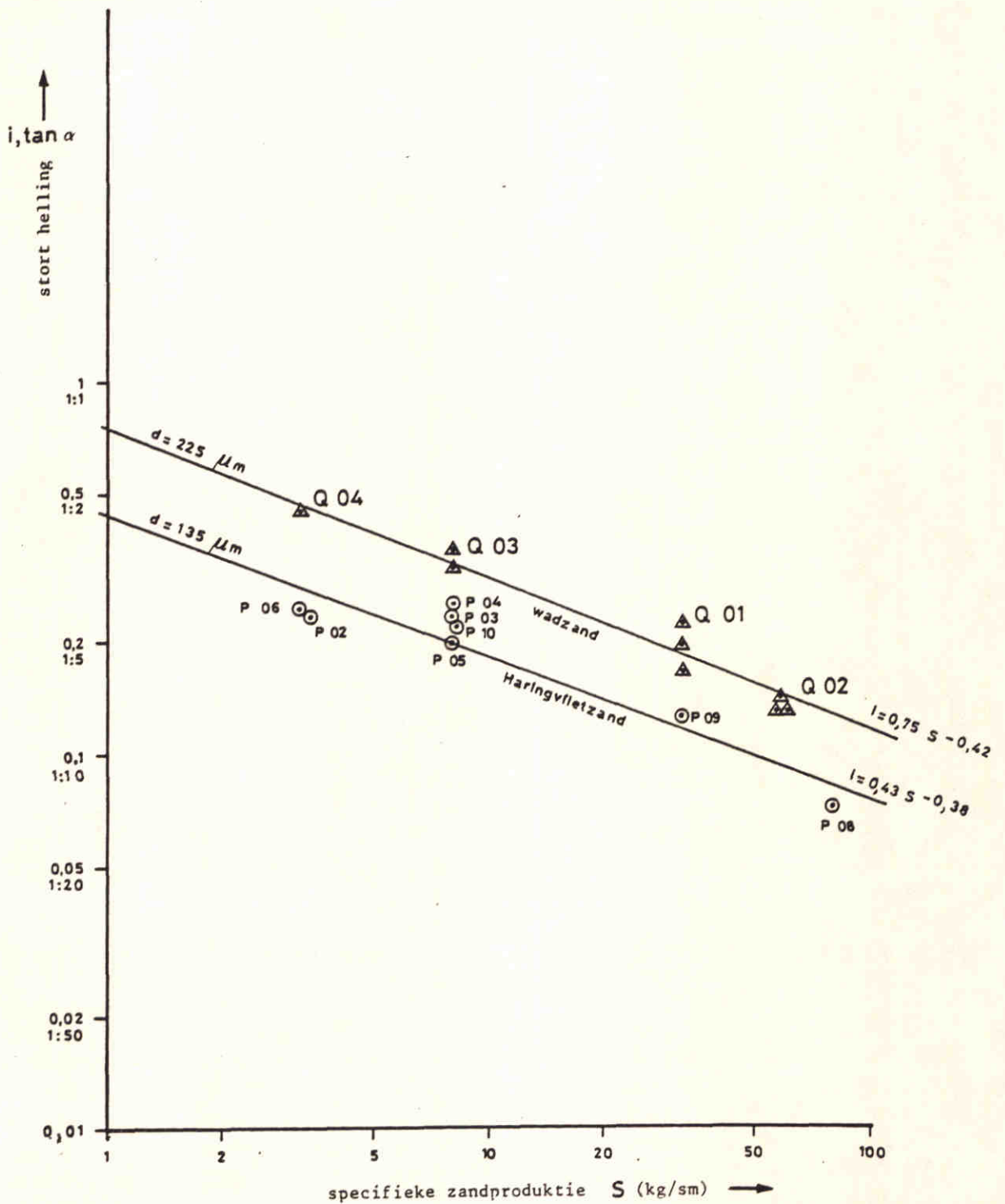
Proef: Q 01

Z- 261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.13



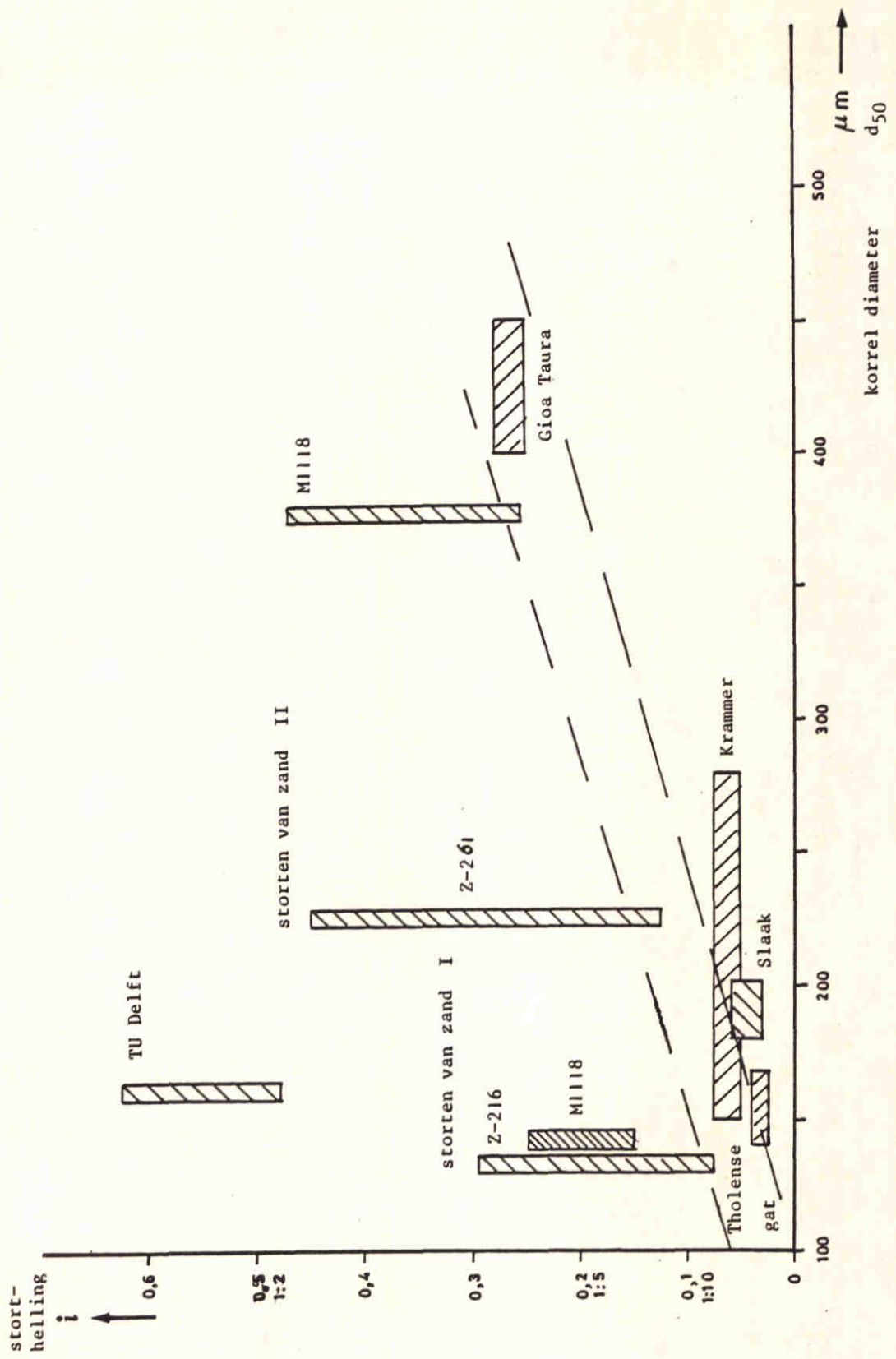
Stortheelling als functie van de
specifieke zandproductie

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.14



Storthelling als functie van de korreldiameter

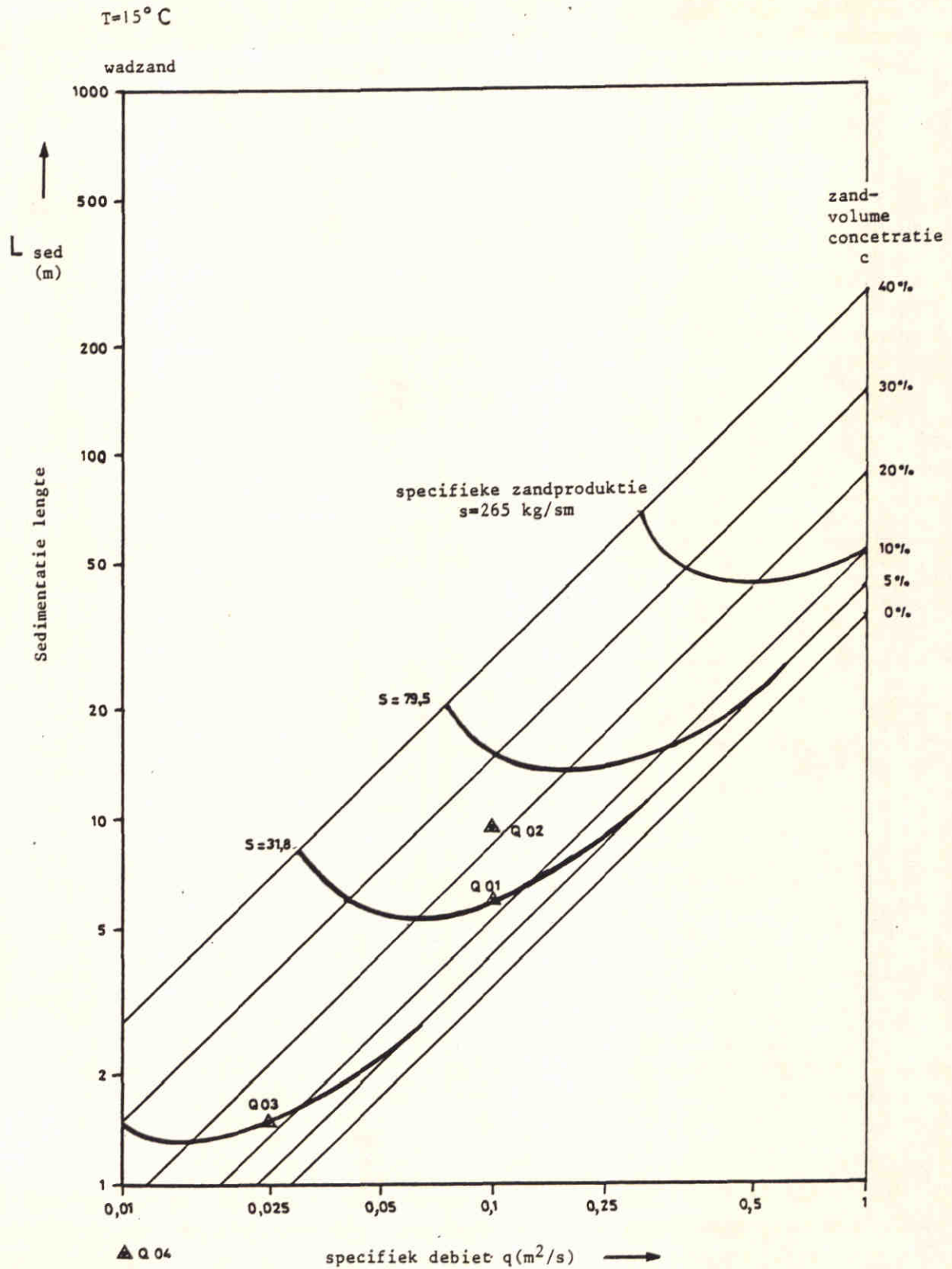
zie ook [19]

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.15



Sedimentatie lengte
voor wadzand

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. 5.16

Hydraulisch kental L

		L < 1	L > 1
Geometrisch kental H	H > 1	P01 t/m P06 storten van zand I M 1118 140 μm Marollegat onderwaterstort Slaak	P08,P09 storten van zand I M 1155 storten Baggerspecie (slib) Krammer (platen)
	H < 1	TU Delft M 1118 380 μm Proeven Q03, Q04	Z 46-02 kantelgoot Marollegat - geulen bovenwaterstort Proeven Q01,Q02

Classificatie matrix stortproeven

zie ook [18]

Z-261

A4

$Re \rightarrow$

		Laminair	turbulent
$B_a \downarrow$	viscous	laminaire (Poiseuille) stroming modderstromen (mud flows)	turbulente stroming suspensietransport van zand
	inertial	korrelstroming van water sheet flow (zettingsvloeiing) droog-zand stroming bodemtransport van zand	suspensiestroming turbidity currents steen-en rotslawines

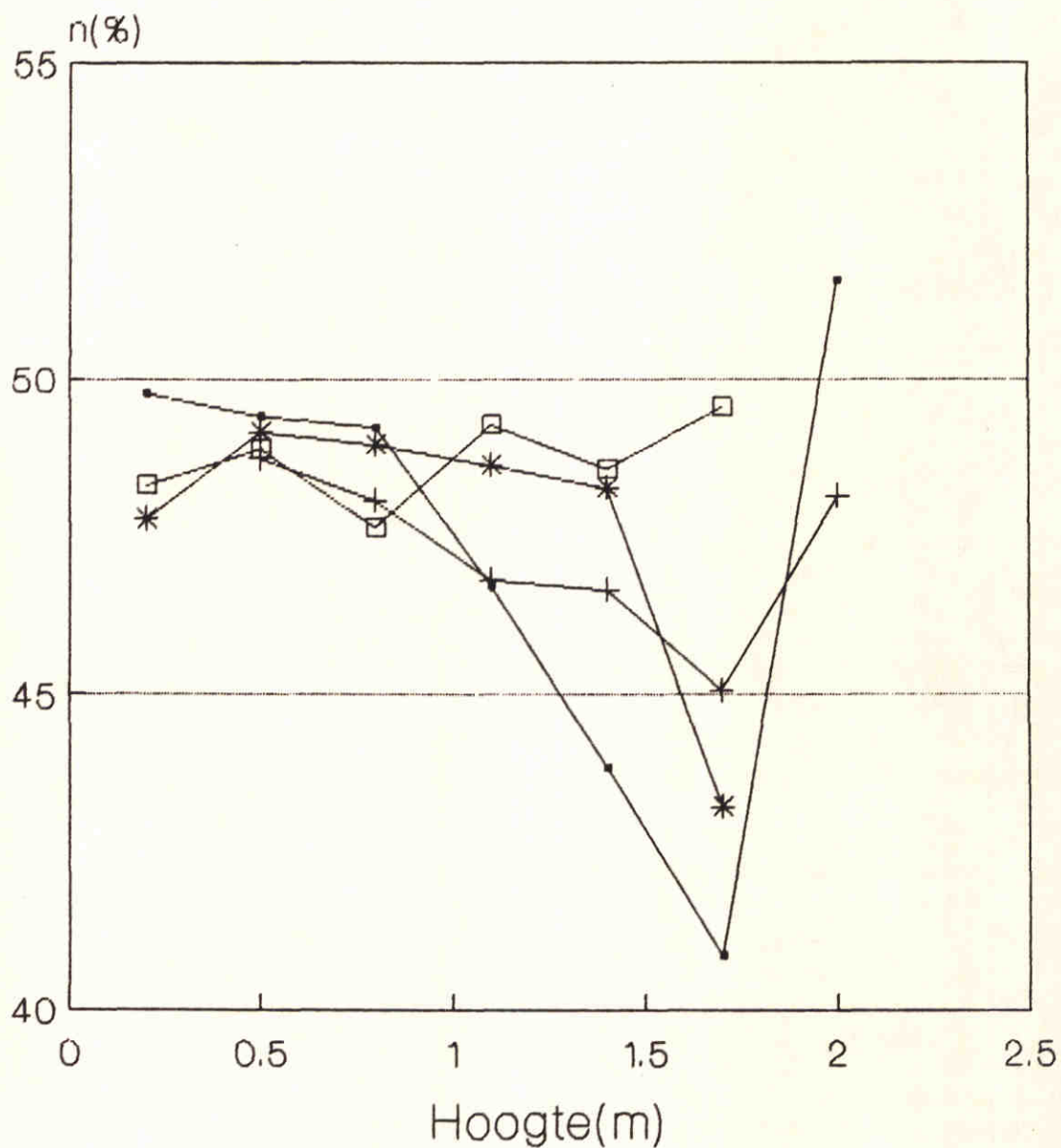
Typen zand-watermengselstromingen

Z - 261

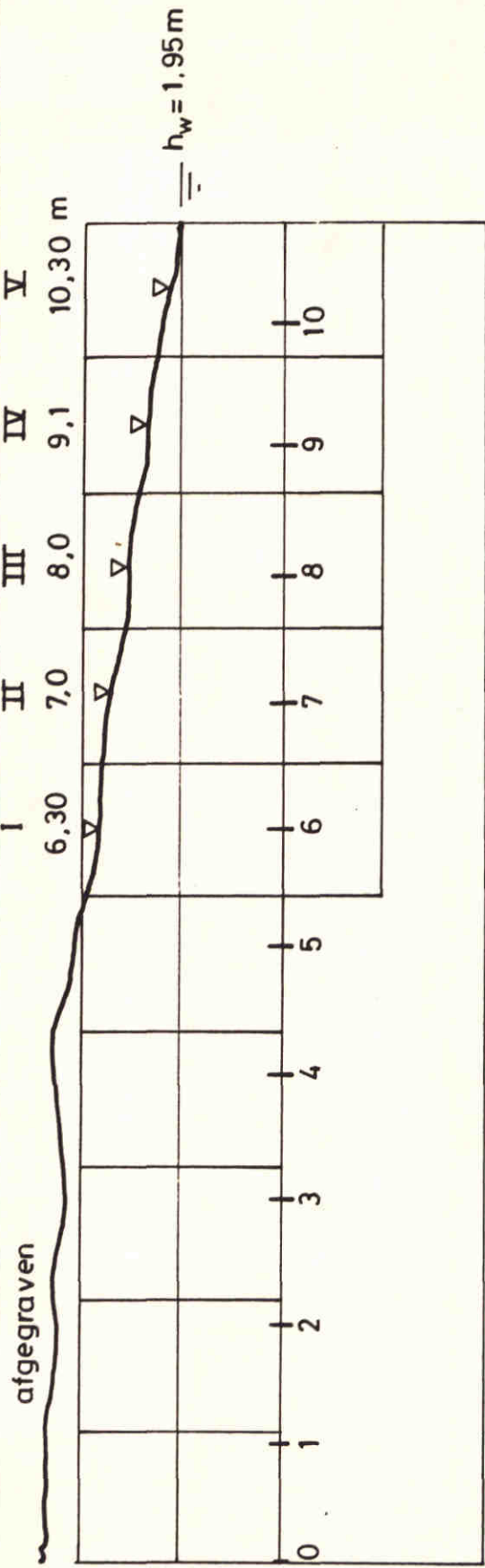
A4

DELFT HYDRAULICS

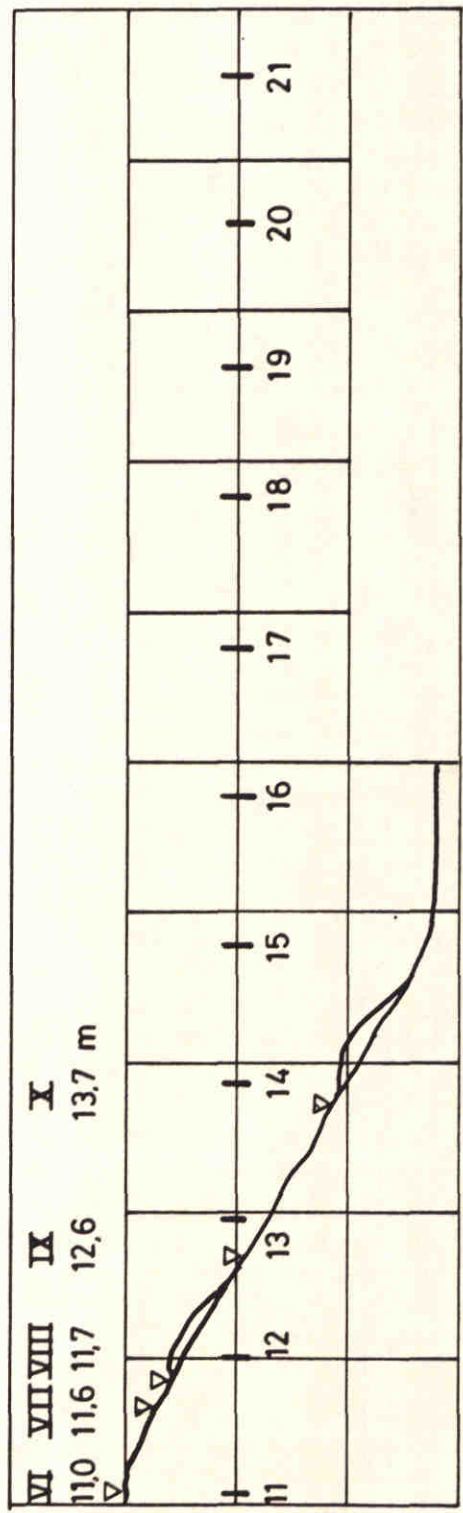
FIG. 5.18

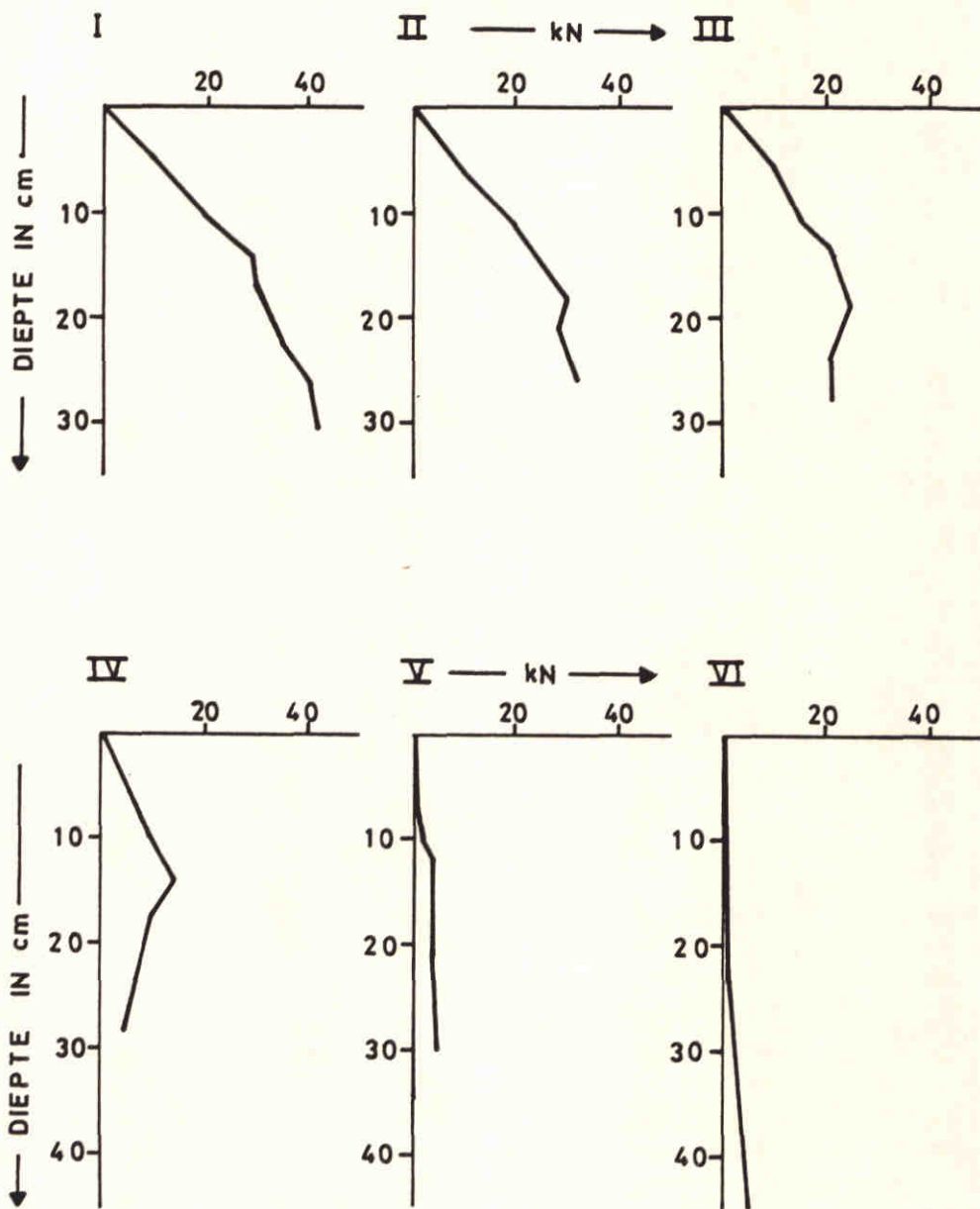


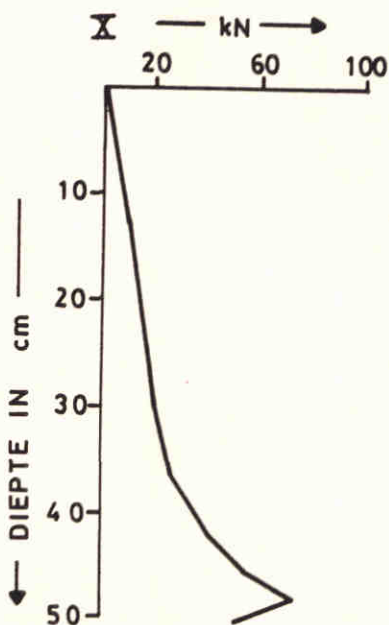
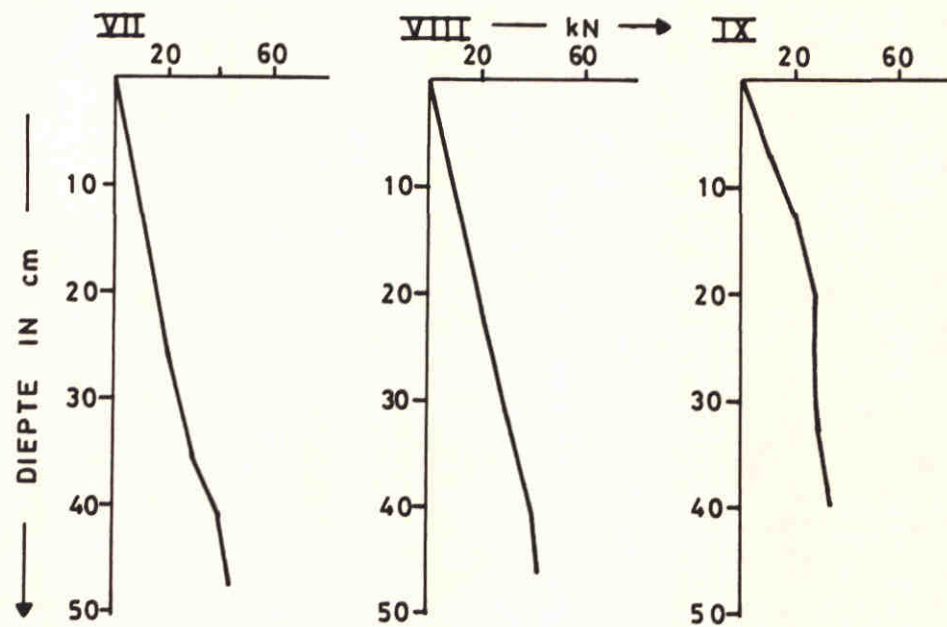
—●— Q 01 —+— Q 02 —*— Q 03 —□— Q 04



▽ = sondering







GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 69 35 00

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

d.d.

88-09-06

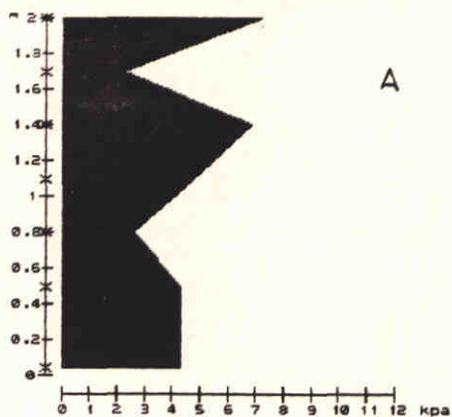
get
Q.

RESULTATEN SONDERINGEN NA PROEF Q04
VOOR LOKATIES ZIE FIGUUR 6.2

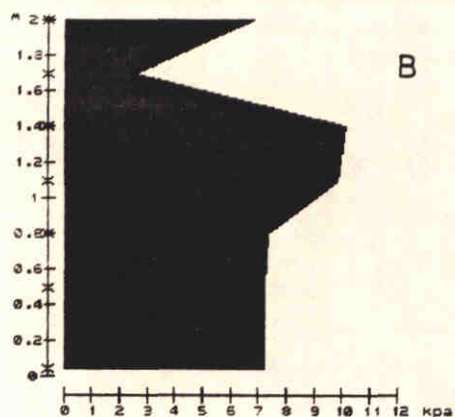
gez.
CO-294750

form.
FIG. 6.3 B

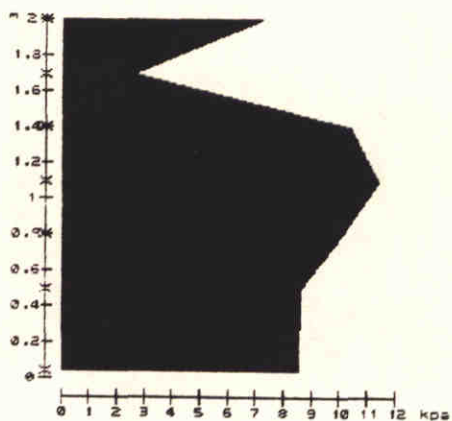
form.
A4



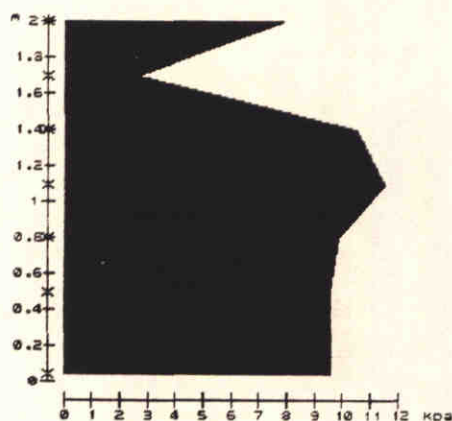
$t = 1572,87$



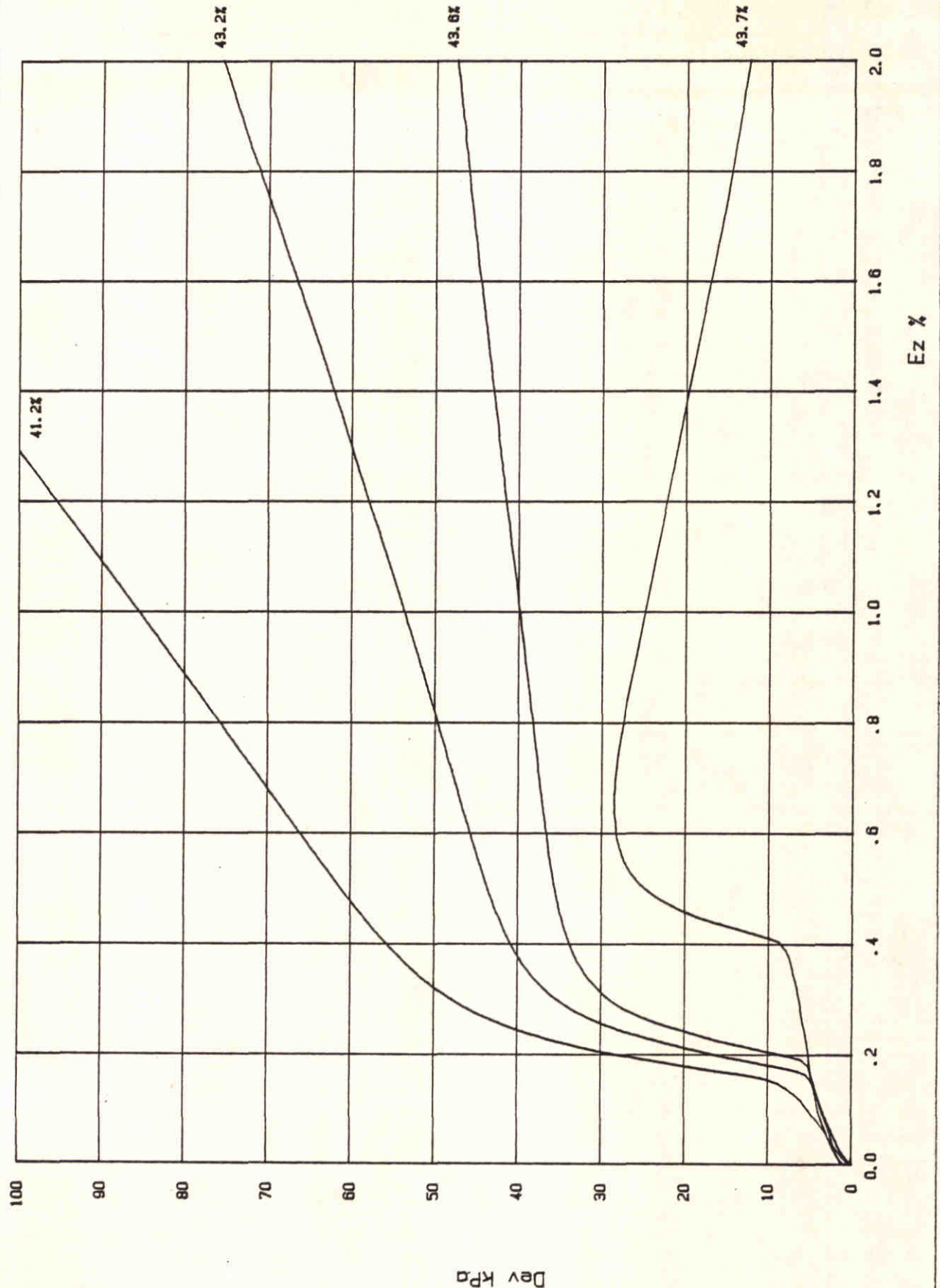
$t = 1573,24$




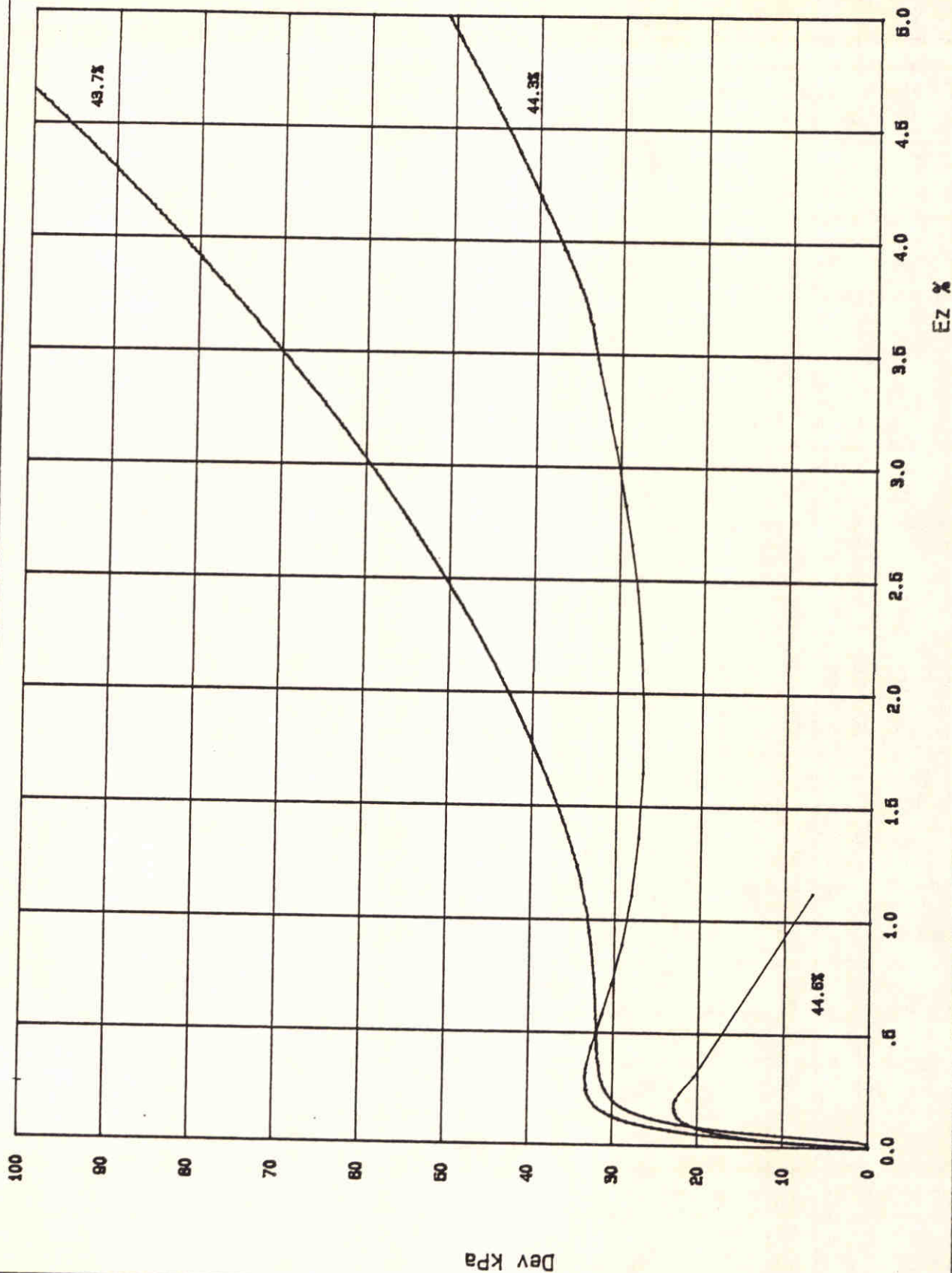
$t = 1573,32$



$t = 1573,44$



 GRONDMECHANICA DELFT	Dat: 88-03-16
	CO-294750
Starten van zand onder water \ wadzand Natte Kritieke Dichtheidsproef -monster no. 8 Pakking = 41.2%-43.6%-43.7%-43.2% Bf=> 0.98	FIG. 6.5



GRONDMECHANICA
DELFT

Dat: 87-07-10

E_z = axiale rek

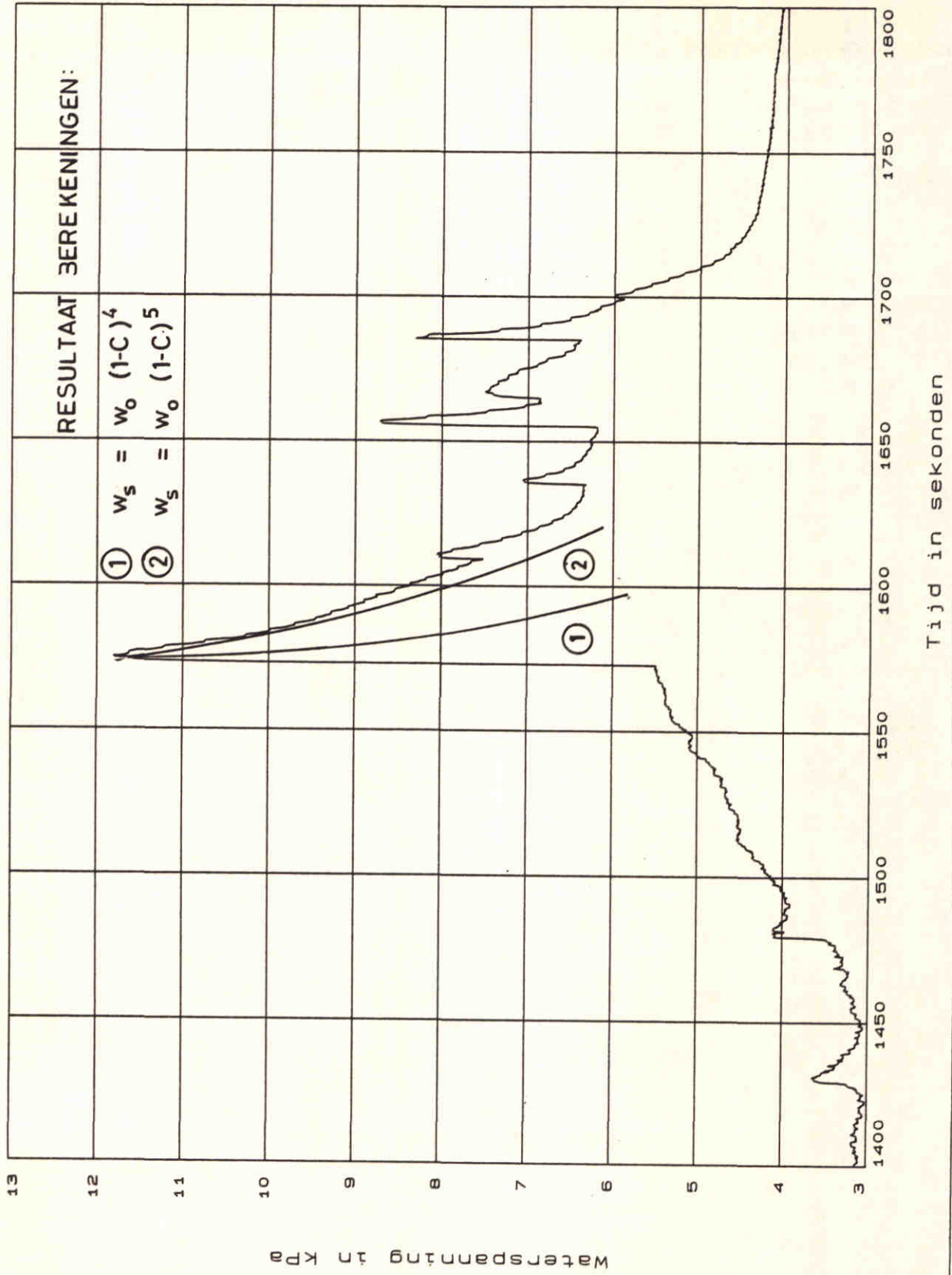
haringvlietzand

Natte kritieke dichtheid

CO-284461

Monster No 1 ; Dichtheid 43.7%-44.3%-44.6%

FIG. 6.6



G GRONDMECHANICA
DELFT

88-02-06

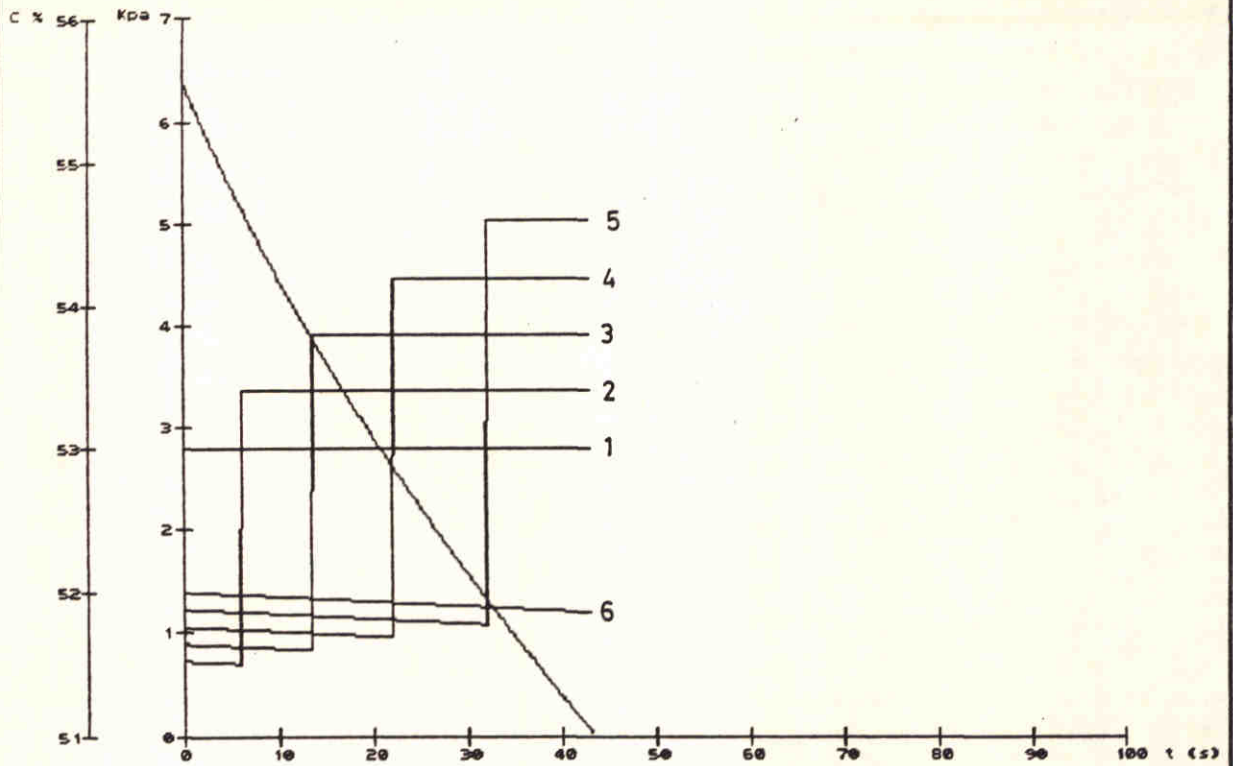
WATERSPANNINGSVERLOOP TIJDENS ZETTINGS -
VLOEIING VOLGENS METINGEN VERGELEKEN MET
MET -REKENMODEL PROEF Q02

CO-294750

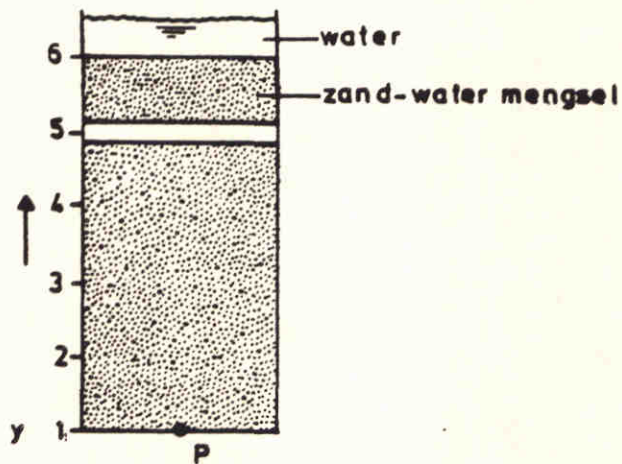
FIG. 6.7

SIMULATIE ZETTINGSVLOEIING PROEF Q02

lengte mengsel = 0.77 valsnelheid = 0.0205 $C_{(top)} = 0.52$ $C_{sed(top)} = 0.55$
 $C_{(bodem)} = 0.514$ $C_{sed(bodem)} = 0.53$



concentratie wordt gegeven op 5 verschillende plaatsen in het mengsel. zie onderstaande figuur



RESULTAAT 1 DIM NUMERIEK MODEL

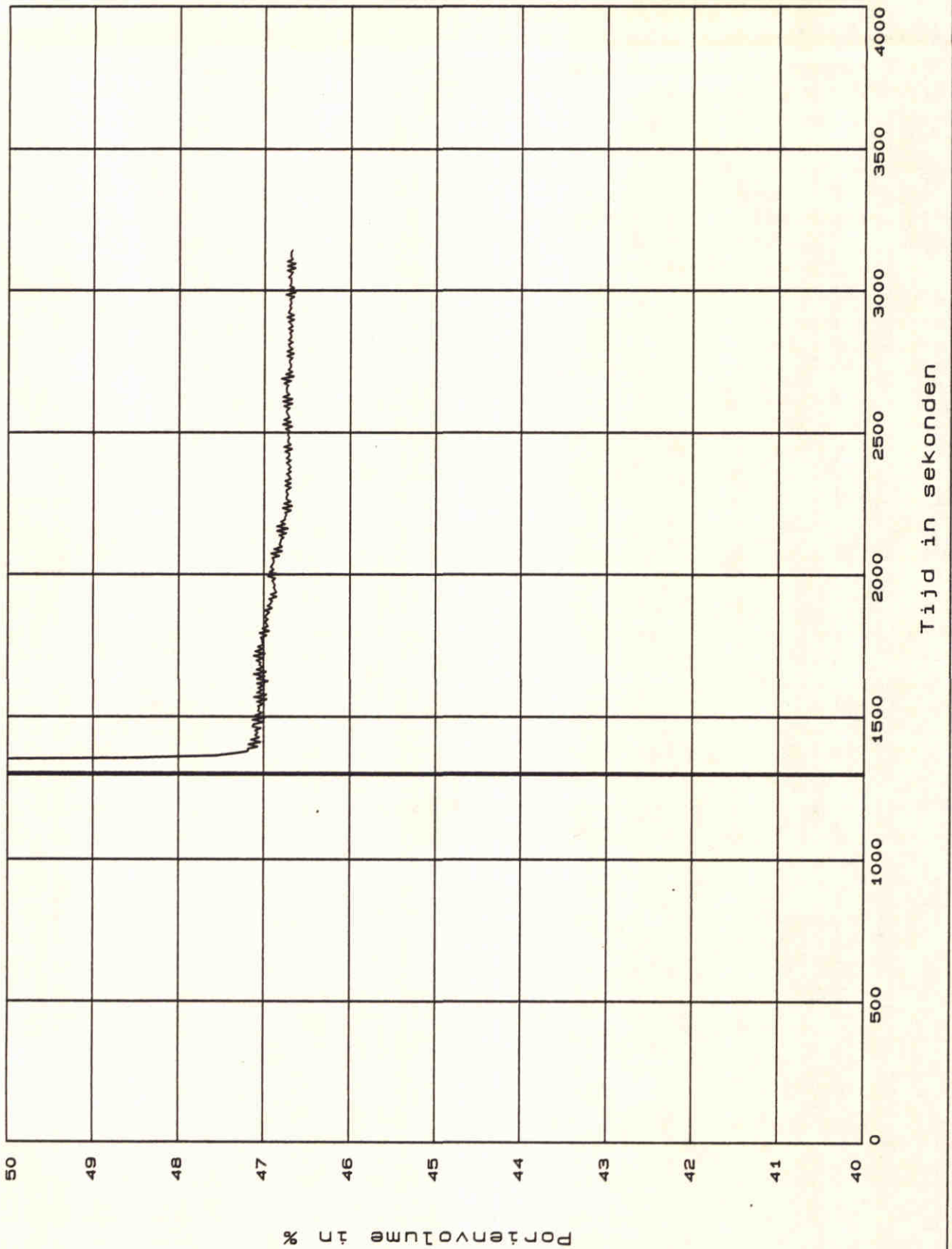
87-11-18

6

CO-294750

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
GRONDMECHANICA DELFT

FIG. 6,8



GRONDMECHANICA
DELFT

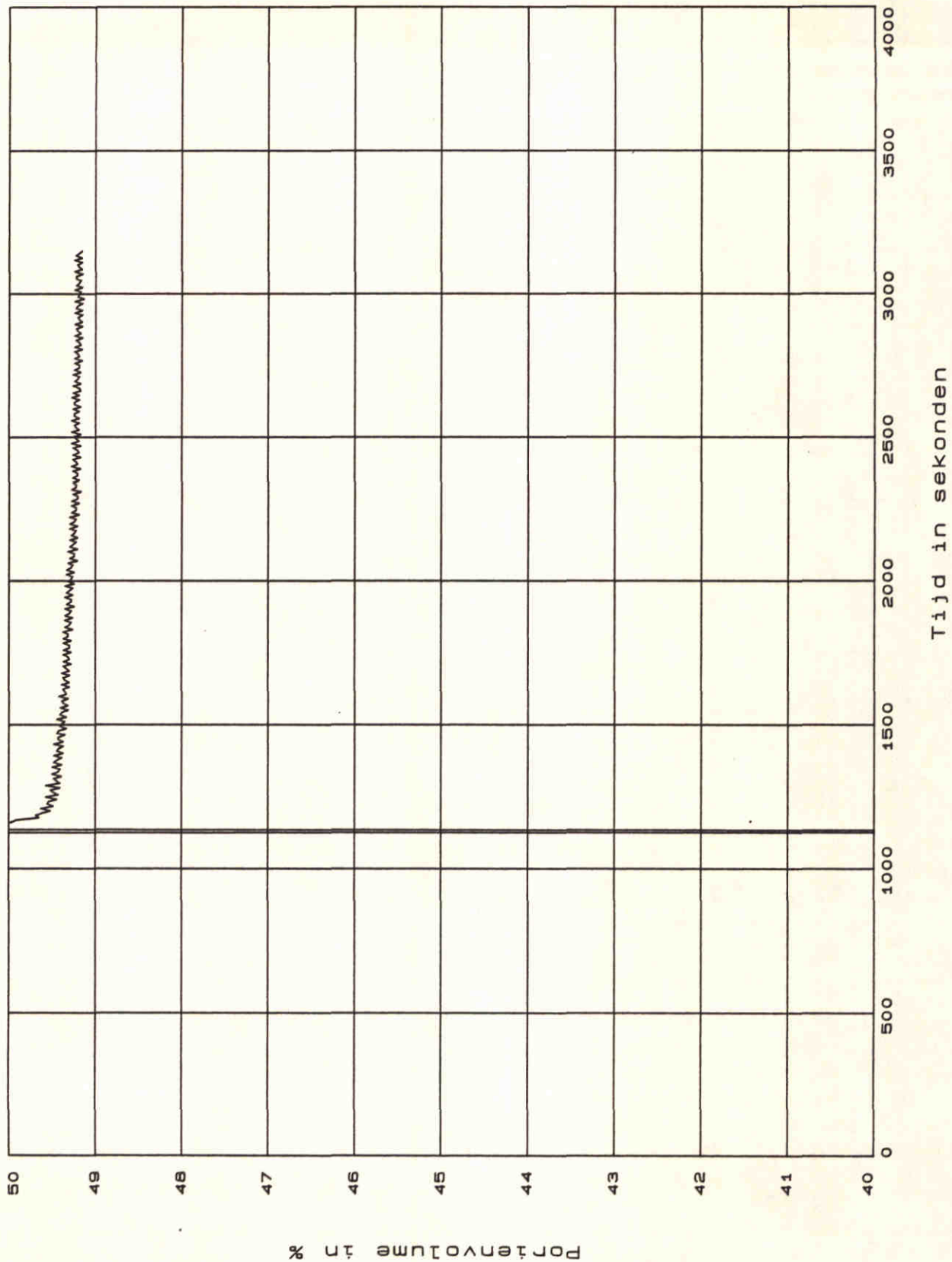
88-02-04


STORTEN VAN ZAND Fase 2
Proef No: Q 01
MPC 6

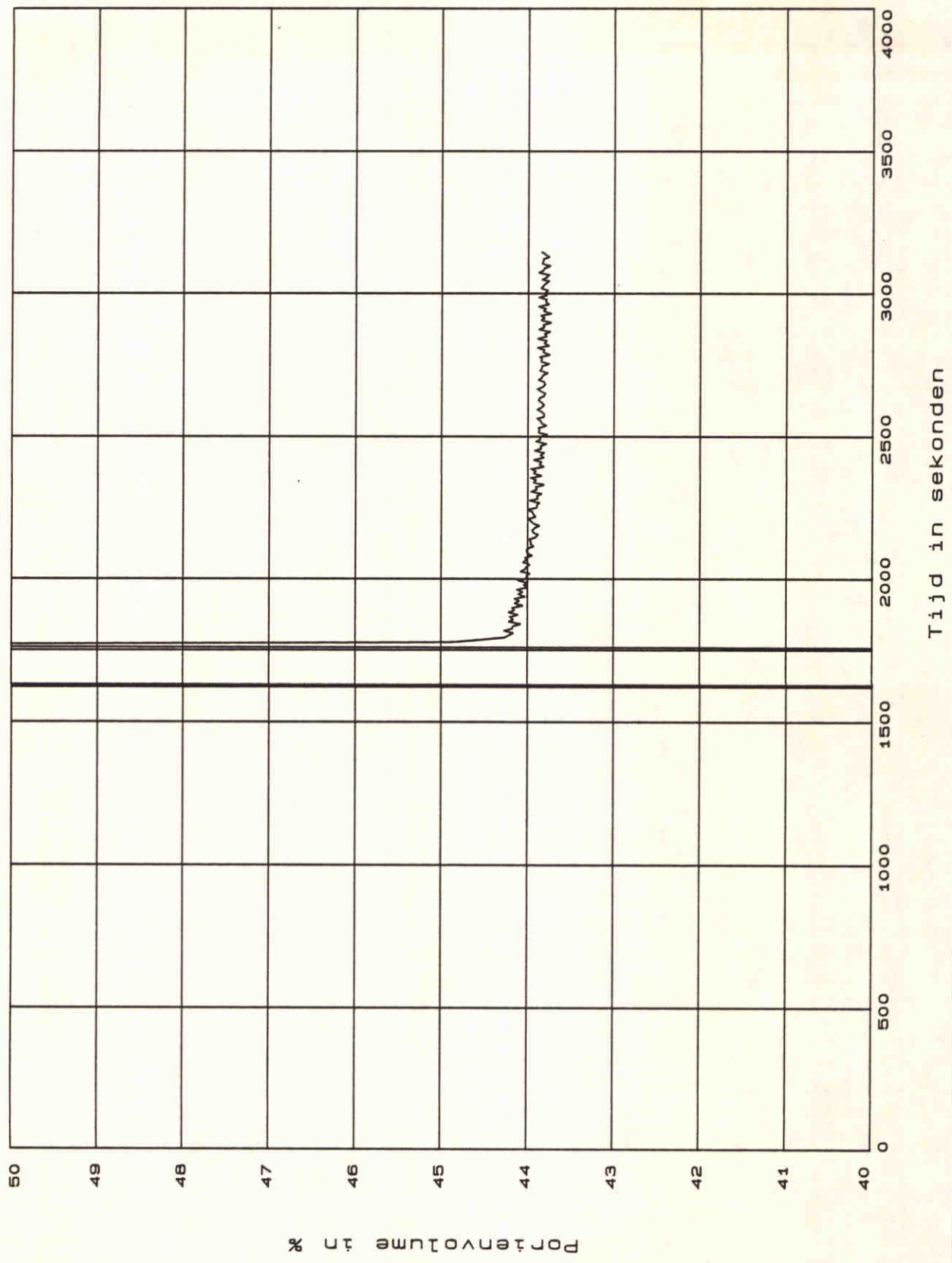
$\% n = 10.042 + 118.552 \times R_w / R_g$
Waterweerstand : 69.9 ohm


CO-294750

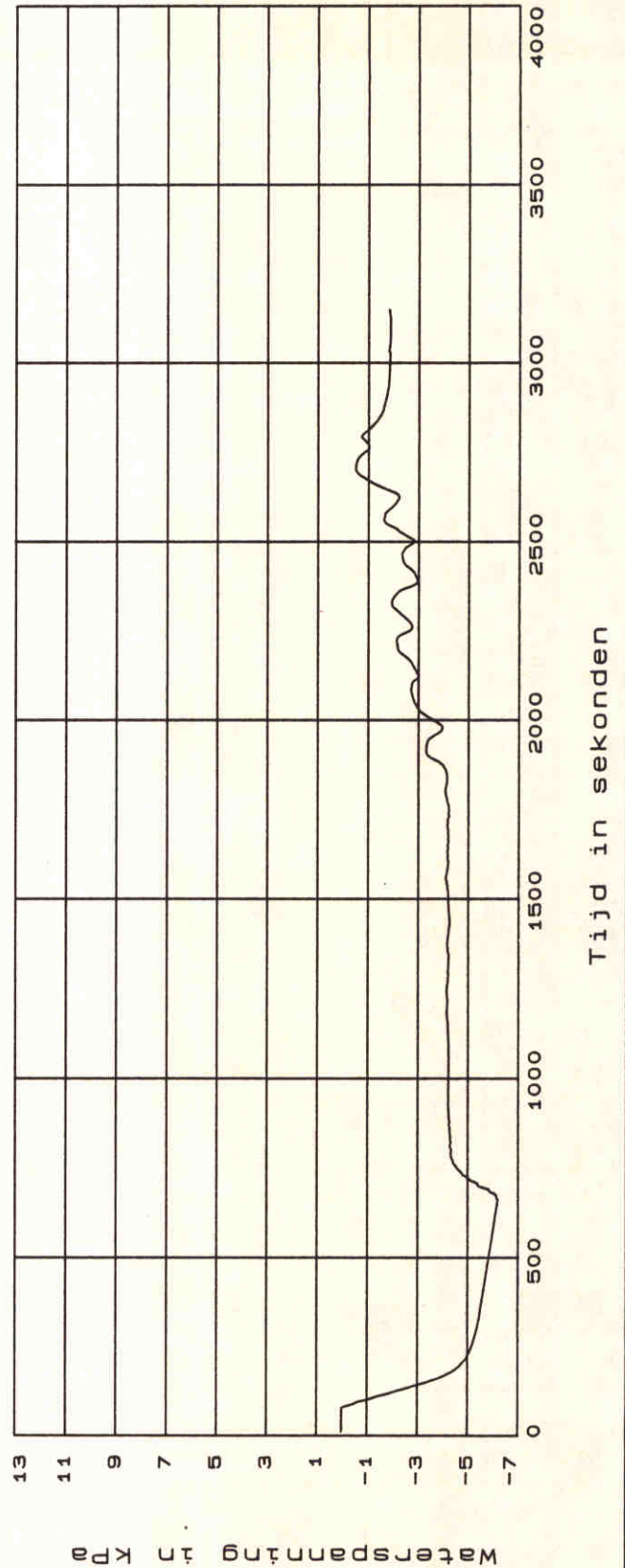
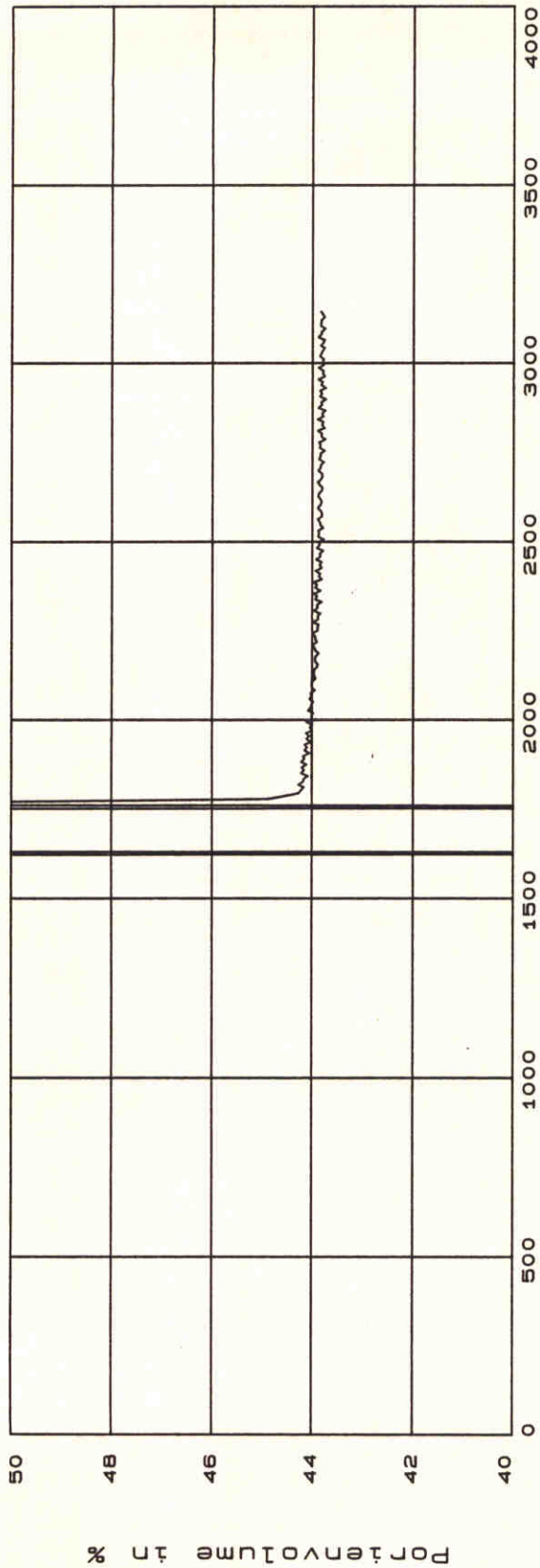
FIG. 6.9



 GRONDMECHANICA DELFT	88-02-04	
STORTEN VAN ZAND Fase 2 Proef No: Q01 MPC 5	CO-294750 FIG. 6.10	
$\% n = 10.042 + 118.552 \cdot R_w / R_g$ Waterweerstand : 70.6 ohm		



 GRONDMECHANICA DELFT	88-02-04	
STORTEN VAN ZAND Fase 2 Proef No: Q01	C0-294750	
MPC 7	$\% n = 10.042 + 118.552 \cdot R_w / R_g$ Waterweerstand : 72.3 ohm	FIG. 6.11



GRONDMECHANICA
DELFT

88-02-04

STORTEN VAN ZAND Fase 2

Proef No: ST01

WSM 14 en MPC 5

$\% n = 10.042 + 118.552 \cdot R_w / R_g$

Waterweerstand : 72.3 ohm

CO-294750

FIG. 6.12

APPENDIX A IJKING INSTRUMENTATIE

A-1. Electro Magnetische Snelheidsmeter (EMS)

De EMS is een stroomsnelheidsmeter welke in principe in vier richtingen kan meten, namelijk de positieve en de negatieve x-richting en de positieve en negatieve y-richting. Het instrument wordt dan ook in al deze vier richtingen geijkt.

Tijdens de zandstortproeven werden de stroomsnelheden feitelijk alleen in de positieve x-richting gemeten. Daarom wordt hier alleen de ijking in die richting gegeven. De verschillen waren overigens gering.

De ijking is uitgevoerd in de ijkgoet van de afdeling Instrumentatie van WL. Het instrument werd met een nauwkeurig instelbare snelheid met behulp van een wagen door de goet met stilstaand water bewogen. Het afgegeven voltage werd als functie van de ingestelde snelheid afgelezen. Vervolgens kon met een lineaire regressiemethode een ijkfunctie afgeleid worden. De ijking is uitgevoerd met stroomsnelheden tot 1 m/s, waarbij het voltage opliep tot ca. 10 Volt. De functie luidt (zie ook fig. A.1):

$$u = (0,124 + R) / 10,4 \quad (\text{m/s}) \quad (\text{A.1})$$

waarin u = mengselstroomsnelheid (m/s)
 R = gemeten voltage (V)

Deze functie is gebruikt voor de verdere analyse van de meetresultaten met ASYSTANT +. Globaal geldt dat 1 Volt overeenkomt met 0,1 m/s. Verder is te zien dat pas bij een voltage van -0,124 de snelheid precies nul wordt. Het bereik van de EMS was ingesteld van 0 tot 1 m/s, van het data-acquisitiesysteem van 0 tot 10 Volt. Het signaal van de EMS werd gefilterd met 1 Hz om de achtergrondruis weg te nemen.

A-2. Geleidendheids Concentratiemeter (GCM)

De concentratiemetingen in de Cuttergoot tijdens het proevenprogramma Storten van Zand zijn uitgevoerd met de Geleidendheids Concentratie Meter (GCM). Dit instrument is in 1985 en 1986 ontwikkeld op het Waterloopkundig Laboratorium, voor toepassing bij experimenten met zand-watermengselstroming in een kantelgoot. Het principe van de GCM is hetzelfde als dat van de in de grondmechanica gebruikte elektrische dichtheidsmeters. Het meetprincipe is gebaseerd op de reductie van de geleidendheid van het meetvolume door de aanwezigheid van zand- of gronddeeltjes in het water.

Aangezien het instrument gevoelig is voor de mineralogische samenstelling van het toegepaste zand moet het voor gebruik eerst geijkt worden. Bij het gebruik moet bij iedere meting of serie van metingen de nulspanning R_0 bepaald worden. R_0 is een maat voor de geleidendheid van het water waarin al het zand bezonken is, dus bij een concentratie 0. Deze waarde is onder meer afhankelijk van de temperatuur en het gehalte aan opgeloste mineralen en zouten.

De ijking is uitgevoerd door vergelijking van de met de GCM gemeten voltages met de concentraties, bepaald door monsternamen. In een speciaal perspex ijkvat, waarin met een elektrisch roerwerk het zand in suspensie gehouden werd, stonden, met de meetpunten op gelijke hoogte, de GCM en een afzuigbuisje aangesloten op een verdringerpompje opgesteld.

Door het afzuigbuisje werd een monster afgetapt dat in een maatglas werd opgevangen. In het maatglas werd vervolgens, na volledige bezinking en enige verdichting door een tikje tegen het glas, het volume zand (h_z) en het totale volume (h_t) afgelezen. De concentratie in volumedelen bedraagt dan:

$$c = \frac{h_z}{h_t} (1 - n) \quad (\%) \quad (A.2)$$

waarin n het poriëngehalte van het gesedimenteerde zand is. Hiervoor is een waarde van 40 % aangehouden, geldig voor enigszins verdicht zand. Ook in de volledig bezonken zandlaag kan de geleidendheid gemeten worden. De ijkprocedure was als volgt:

Begonnen werd met schoon water, waaraan een hoeveelheid zand werd toegevoegd. Nadat het zand door de mixer volledig in suspensie was gebracht, werd gedurende 10 tot 30 sec een monster afgetapt en tegelijkertijd met de GCM de spanning R_{gem} gemeten. Dan werd de mixer uitgeschakeld, zodat het zand bezonk. Nadat het zand volledig bezonken was werd de nulspanning R_0 gemeten, waarbij eventueel op het instrument bezonken zand met een paar tikjes werd verwijderd.

Daarna werd de mixer weer gestart en de procedure herhaald, net zolang totdat de maximale concentratie werd bereikt, de concentratie, waarbij het zand niet meer in suspensie te krijgen was. Deze concentratie bedroeg voor het Wadzand circa 40 %. Uit de gemeten spanningen werd de relatieve geleidendheid G_r berekend, volgens:

$$G_r = \frac{R_{gem} - R_0}{R_{gem}} \quad (A.3)$$

Deze grootheid is een vrijwel lineaire functie van de concentratie. Uit de metingen kan vervolgens dit lineaire verband gekwantificeerd worden. Figuur A.2 geeft de resultaten van de ijking van de GCM met het Haringvlietzand, uitgevoerd op het Fysisch-Chemisch Laboratorium van WL. Het is van belang de functie te ijken in het gebied waar ook daadwerkelijk gemeten gaat worden, aangezien lokaal afwijkingen van het lineaire verband kunnen optreden, bijvoorbeeld bij zeer lage ($c < 5 \%$) of zeer hoge concentraties ($c > 50 \%$).

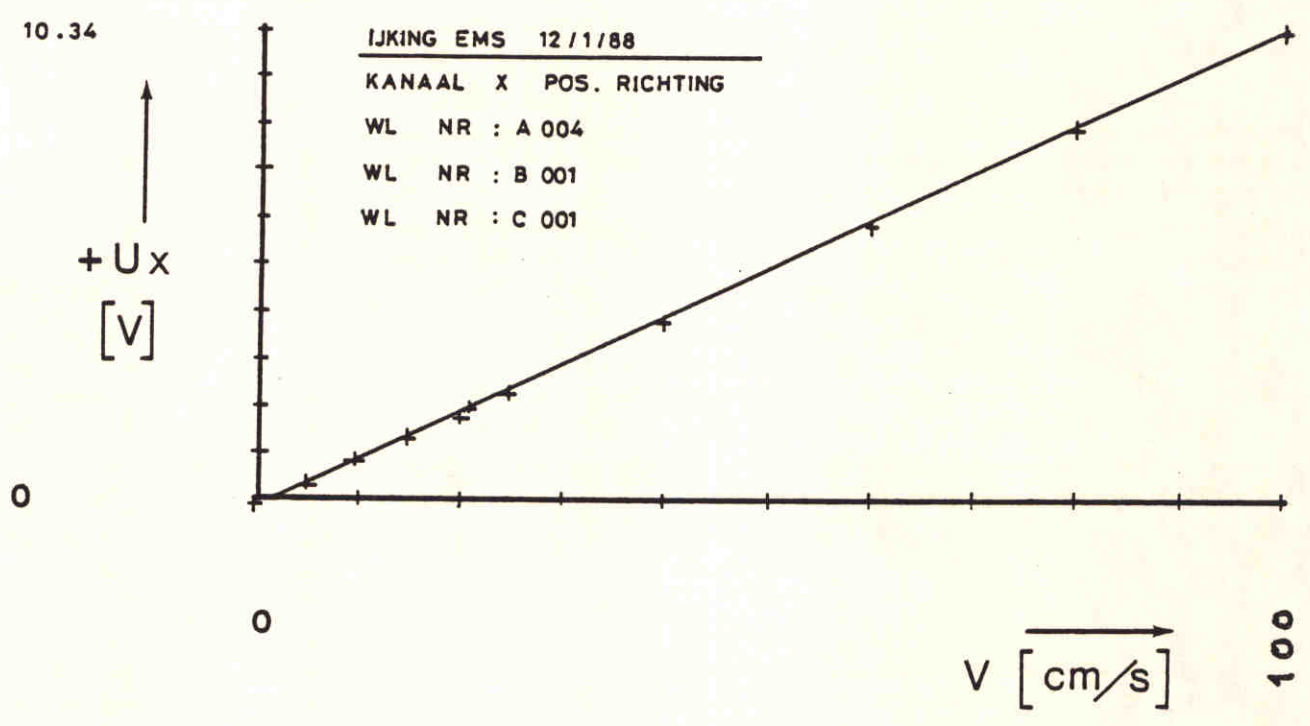
Met behulp van lineaire regressie werd het volgende verband gevonden voor de GCM's, voor het proevenprogramma met Wadzand:

$$c = 0,785 G_r - 0,59 \quad \text{voor } 5 < G_r < 40 \quad (\%) \quad (A.4)$$

De correlatiecoëfficiënt bedroeg $r = 98,8 \%$.

Er kon ook gemeten worden in het gesedimenteerde zandpakket. Het instrument fungeerde dan in feite als een dichtheidsmeter en gaf dan enigszins te hoge getalwaarden (tot 50 %), in vergelijking met de dichtheidsmetingen van Grondmechanica Delft. Het instrument werd dan wel ver buiten het ijkgebied gebruikt. De overeenstemming tussen beide instrumenten is met de ijking voor het Wadzand overigens veel beter dan met die voor het Harinvlietzand van de eerste proevenserie.

Om de afgegeven spanning van de GCM's in overeenstemming met die van de overige instrumenten aangesloten op het data-acquisitiesysteem te brengen, is een versterking met een factor 5 toegepast.



IJking electromagnetische snelheidmeter

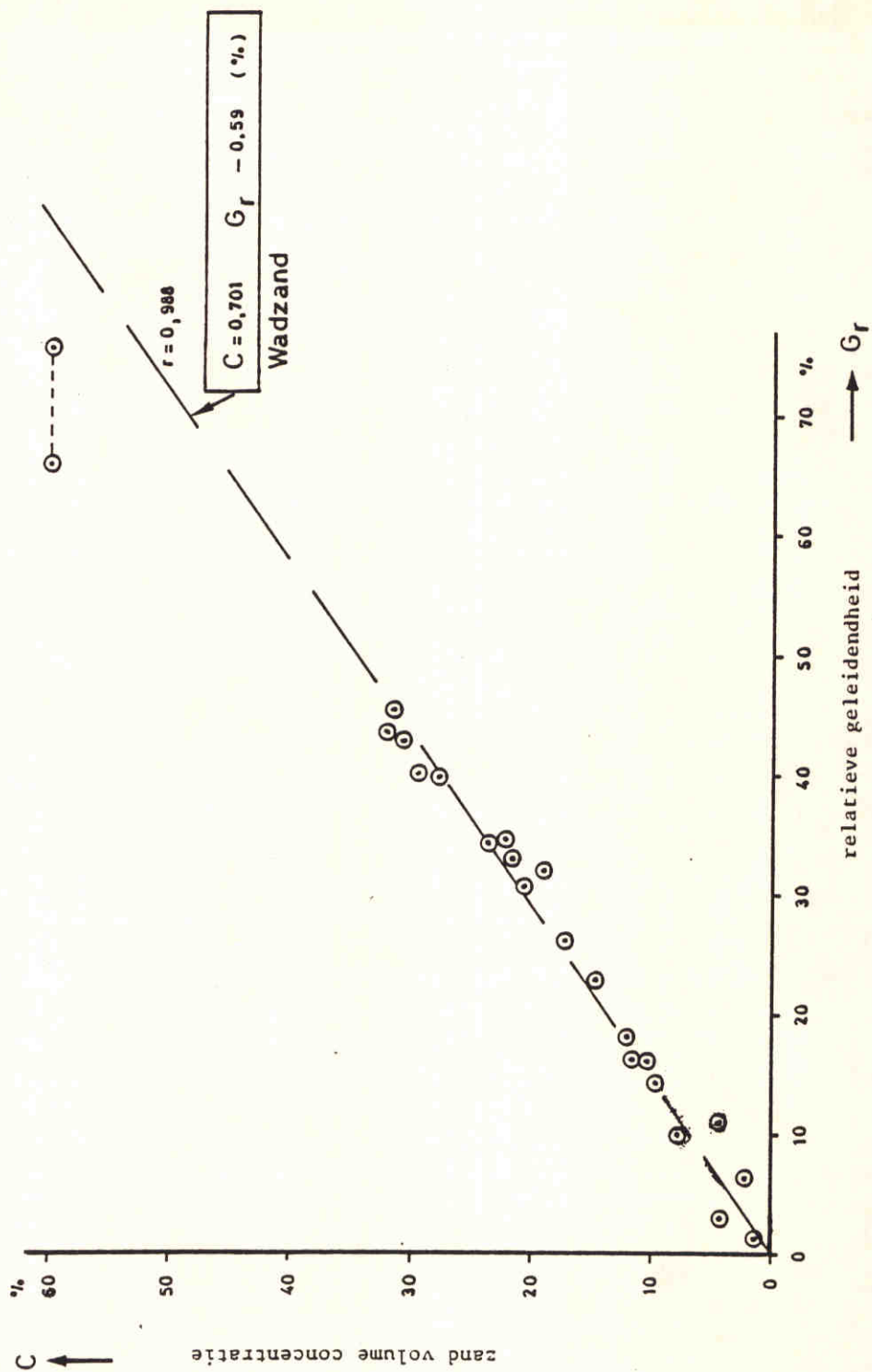
Appendix A

Z-261

A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. A-1



IJking geleidendheids concentratiemeter

Appendix A

Z-261

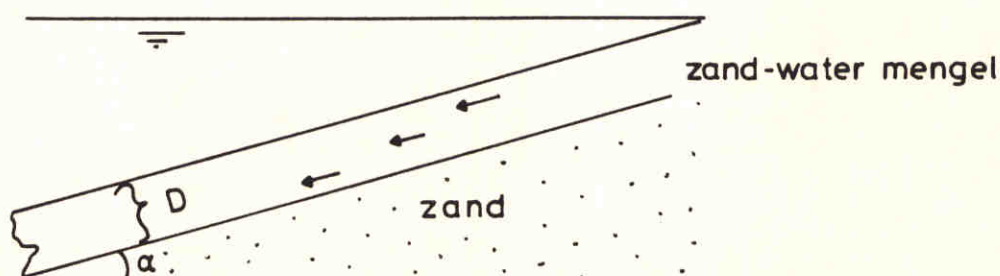
A4

DELFT HYDRAULICS

FIG. A-2

Appendix B Eenvoudig model voor het begin van een zettingsvloeiing

Beschouw een oneindig lang talud met daarop een laag losgepakt zand met een dikte D (zie figuur B.1).



Figuur B.1: schets afschuiven zand

Door een verstoring (versteiling van het talud, uittredend water of iets dergelijks) gaat de bovenste laag bewegen. Het zandpakket vervormt enigszins. De vraag is nu geeft deze vervorming aanleiding tot een zettingsvloeiing of niet. De ervaring is dat dat mede afhankelijk is van de dikte van het zandpakket. Tijdens de vervorming is het spannings- ϵ gedrag visco-elasto-plastisch. Voor de beschrijving van een dergelijke spannings- ϵ relatie zijn constitutieve modellen ontwikkeld voor zand. Deze constitutieve modellen zijn zeer gecompliceerd. Uit metingen is gebleken dat na verweking het zandwatermengsel beschreven kan worden als een visceuze vloeistof. In het hier beschreven model wordt de aanname gedaan, dat ook voor verweking de reksnelheid wordt bepaald door visceuze krachten. Wanneer een korrelpakket verweekt moet er ergens een moment zijn waarop visceuze krachten dominant worden op de plastische en elastische krachten. Waar dit omslagpunt ligt is onbekend. Hier wordt dus aangenomen dat dit omslag punt reeds bij het begin van het verwekingsproces ligt.

Met dit uitgangspunt kan de vervorming in het zand beschreven worden met een visceuze relatie. Uitgaande van een newtonse vloeistof geldt:

$$\frac{dV_x}{dx} = - \left(\frac{c \Delta \rho_w g \sin \alpha}{\mu_s} \right) z \quad (B.1)$$

$\frac{dV_x}{dx}$	= de schuifrek snelheid in het zandpakket	(1/s)
n	= de concentratie	(-)
Δ	= $\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$	(-)
ρ_w	= soortelijke massa water	(kg/m ³)
ρ_s	= soortelijke massa zand	(kg/m ³)
μ_s	= de dynamische viscositeit van het zand	(m ² /s)

De volumeverandering kan worden beschreven met de spannings dilatantie theorie van Rowe. Volgens [24] geldt:

$$\frac{dV}{d\gamma} = \frac{2 \sqrt{2} \sin \phi_0 - (3 - \sin \phi_0) \frac{t}{s}}{(3 + \sin \phi_0) - 2 \sqrt{2} \sin \phi_0 \frac{t}{s}} \quad (B.2)$$

met	V de isotrope rek	(-)
	γ de deviator rek	
	t de deviator spanning	(kN/m ²)
	s de isotrope spanning	(kN/m ²)
	ϕ_0 de inwendige wrijvingshoek	(-)

De isotrope spanning resp. rek is gedefinieerd als:

$$s = \frac{\sigma_{ij} \delta_{ij}}{\sqrt{3}} \quad (B.3)$$

$$V = \frac{\epsilon_{ij} \delta_{ij}}{\sqrt{3}} \quad (B.4)$$

Met δ_{ij} , de kronecker delta (=0 als $i \neq j$ en 1 als $i = j$)
 Voor de deviator spanning resp. rek geldt:

$$t = \sqrt{\left\{ \frac{1}{3} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 2 [\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2] \right\}} \quad (\text{B.5})$$

$$\gamma = \sqrt{\left\{ \frac{1}{3} [(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2] + 2 [\epsilon_{12}^2 + \epsilon_{23}^2 + \epsilon_{31}^2] \right\}} \quad (\text{B.6})$$

Met de indices 1, 2 en 3 als resp. x, y en z as.
 Voor de afschuiving als getekend in figuur A.1 geldt:

$$\gamma = \epsilon_{xz} \sqrt{2} \quad (\text{B.7})$$

De formules (B.2) t/m (B.6) zijn noodzakelijk om getallenvoorbeelden te kunnen doorrekenen. Voor de eenvoud van de afleiding kan worden gesteld:

$$dV = \beta d\gamma \quad (\text{B.8})$$

waarin β wordt gedefiniëerd door (B.2).

Combinatie van (B.1), (B.7) en (B.8) geeft, omdat $\frac{dV}{dx} = \dot{\epsilon}_z$

(\dot{a} is de tijdsafgeleide van a , da/dt):

$$\dot{V} = \sqrt{2} \frac{\beta \rho_w g c \Delta \sin \alpha}{\mu_s} z \quad (\text{B.9})$$

Uit (A.4) blijkt dat de volumeverandering (v) $\sqrt{3}$ maal de isotrope rek is.
 Dus:

$$\dot{v} = \sqrt{6} \frac{\beta \rho_w g c \Delta \sin \alpha}{\mu_s} z \quad (\text{B.10})$$

De volumeverandering heeft waterstroming en waterspanningsverhoging tot gevolg. In een dun laagje van het schuivende zand geldt (zie ook figuur B.1):

$$dq = \dot{v} dz \quad (\text{B.11})$$

met q het specifiek debiet (m/s).

Door combinatie van (B.10) en (B.11) en integratie is het debiet ter plaatse z in een vervormend laagje met een dikte D te berekenen (voor $z > D$ vervormt het zand niet):

$$q(z) = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)} \frac{\beta \rho_w g c \Delta \sin \alpha}{\mu_s} (D^2 - z^2) \quad (\text{B.12})$$

Nu het debiet bekend is kunnen de waterspanningen, worden berekend met Darcy:

$$q = \frac{k}{\rho_w g} \frac{dp}{dz} \quad (\text{B.13})$$

met k de doorlatendheid van het materiaal.

Invullen van (A.12) in (A.13) en integratie van 0 tot z geeft de wateroverspanning op diepte z in het vervormende zandpakket:

$$p = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)} \frac{\rho_w^2 g^2}{k} \frac{\beta c \Delta \sin \alpha}{\mu_s} z (D^2 - 1/3 z^2) \quad (\text{B.14})$$

En dus is de wateroverspanning onder het vervormende laagje met dikte ($z=D$)

$$p = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} \frac{\rho_w^2 g^2}{k} \frac{\beta c \Delta \sin \alpha}{\mu_s} D^3 \quad (\text{B.15})$$

De vraag is nu, wanneer leidt deze wateroverspanning tot verweking. Dan moet de wateroverspanning ter plaatse $z = D$ groter zijn dan de korrelspanning, dus

$$p > c + \rho_w g \cos \alpha \quad (\text{B.16})$$

Met deze voorwaarde is een voorwaarde voor een vloeifing op te stellen. Een vloeifing treedt op wanneer

$$\mu_s < \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} \frac{\rho_w g}{k} \beta \tan \alpha D^2 \quad (\text{B.17})$$

Deze voorwaarde is uitgewerkt in tabel B.1. In deze tabel is de hoek ϕ_0 , de inwendige wrijvingshoek, bepaald uit de droge kritieke dichtheid proef.

Voor de steile hellingen ontstaat er een merkwaardig resultaat: De berekende viscositeit is negatief. Dit komt omdat bij steile hellingen t/s een grote waarde heeft en (B.2) dan contractie in plaats van dilatantie voorspelt, ongeacht de pakkingsdichtheid. Dit resultaat is ook gevonden in de droge kritieke dichtheid proeven. Voor hoge schuifspanningsverhoudingen (t/s) vindt ook bij de meest losse pakkingen volume vergroting plaats.

Uit deze negatieve waarden moet niet worden afgeleid dat een steil talud geen vloeifing kan geven, de praktijk bewijst het tegendeel! De hier berekende schuifspanningsverhouding geldt aan het oppervlak. Dieper in het talud is deze verhouding lager en zijn dus wel vloeifingen mogelijk. Voor flauwe hellingen is ook aan het oppervlak contractie mogelijk. De berekende bovengrens voor de viscositeit lijkt erg hoog, maar moet niet vergeleken worden met de viscositeit van water, maar met de viscositeit in een zand-watermengsel.

In [1] is vastgesteld dat tijdens een zettingsvloeifing de bovenste laag van het verweekte gebied vervormd. Voor die laag is de viscositeit bepaald op 100 - 200 kg/ms. Uit de registratie van de waterspanningen bleek, dat onder deze laag nog een belangrijk deel van het zandpakket verweekt was, zonder dat vervormingen zichtbaar waren. In dit verweekte zandpakket moeten ook de visceuze krachten dominant zijn. De vervorming moet heel klein zijn, om niet zichtbaar te zijn stel 1 mm/s. Uitgaande van een laagdikte van 1 m

Tabel B.1

Maximale viscositeit waarbij nog verweking mogelijk is.

 (bij een hogere viscositeit is er onvoldoende waterspanningsgeneratie)

Wadzand

sin(Fhi0) 0.44 k= 0.0005 m/s

talud 1:	t/s	dv/dg	Viscositeit (Kg/ms) bij dikte van (m):				
			0.05	0.1	0.2	0.5	1
1	1.414213	-1.41421	-565803.	-2263213	-9052852	-5.7E+07	-2.3E+08
2	0.707106	-0.22097	-44203.3	-176813.	-707254.	-4420337	-1.8E+07
3	0.471404	0.013216	1762.626	7050.507	28202.03	176262.6	705050.7
4	0.353553	0.113137	11316.06	45264.26	181057.0	1131606.	4526426.
5	0.282842	0.168533	13485.46	53941.86	215767.4	1348546.	5394186.
10	0.141421	0.270364	10816.82	43267.30	173069.2	1081682.	4326730.
20	0.070710	0.317269	6346.719	25386.87	101547.5	634671.9	2538687.

Haringvlietzand

sin(Fhi0) 0.378 k= 0.0002 m/s

talud 1:	t/s	dv/dg	Viscositeit (Kg/ms) bij dikte van (m):				
			0.05	0.1	0.2	0.5	1
1	1.414213	-1.41421	-1414508	-5658032	-2.3E+07	-1.4E+08	-5.7E+08
2	0.707106	-0.29934	-149704.	-598819.	-2395276	-1.5E+07	-6.0E+07
3	0.471404	-0.05806	-19358.8	-77435.3	-309741.	-1935884	-7743538
4	0.353553	0.047376	11846.50	47386.02	189544.0	1184650.	4738602.
5	0.282842	0.106493	21303.16	85212.66	340850.6	2130316.	8521266.
10	0.141421	0.216418	21646.34	86585.36	346341.4	2164634.	8658536.
20	0.070710	0.267606	13383.08	53532.34	214129.3	1338308.	5353234.

APPENDIX C

Overzicht fotomateriaal en tekeningen

Tabel C.1 geeft een overzicht van welke foto's zijn gemaakt bij welke proeven. Tabel C.2 geeft het overzicht van al het fotomateriaal. De tabellen C.3 t/m C.6 geven de overzichten per proef van de tekeningen, uitgewerkt van de films. Al het materiaal is gearhiveerd op WL, Afdeling FOTO.

Verklaring afkortingen bij de tabellen:

FILM	-Nummer of lettercode van een film, b.v.:
	101 = dit nr. (in rood: staat op labeltje op film. Zwart nummer is proefnr.)
	110-111 = combinatie van 2 films.
KEUZE	-Er zijn drie mogelijkheden, nl.:
	detail = detailtekening van ca 1 m goot ter plaatse van de meetwagen (MWL)
	overz = overzichtstekening Om te voorkomen dat er teveel lijnen op één tekening staan, zijn er meerdere tijdsintervallen.
	TOTAAL = 'TOTAAL' is een lange tekening waar de goot vrijwel geheel opstaat.
PLAATS IN m	= x-coördinaat in meters, mogelijk op een punt of range, of z-coördinaat in meters.
TIJDSINTERVAL	= gegeven in uren, minuten en seconden. 4351 is 00:43:51

TABEL C.1 PROEVENMATRIX MET OVERZICHT FOTOGRAFISCHE REGISTRATIES EN METINGEN		
d = 225 μ m Wadzand		
specifiek debiet (q)	concentratie (c) -->	
	12 %	21 %
0,01 m ² /s	Proef Q04 MWL + Nikon 50 mm 2 x Nikon 28 mm MGD + Video U-matic	
0,025 m ² /s	Proef Q03 MWL + Leica 90 mm 2 x Nikon 28 mm MGD + Video U-matic	
0,1 m ² /s	Proef Q01 MWL + Nikon 50 mm MGD + Video U-matic 2 x Nikon 28 mm	Proef Q02 MWL + Nikon 50 mm MGD + Video U-matic 2 x Nikon 28 mm

TABEL C.2 LIJST VAN ALLE AANWEZIGE FILMS						
FILM NUMMER	PROEF NUMMER	FILM SOORT	AANTAL OPNAMES	X = NIET GETEKEND	CAMERA	F mm
101	Q04	KL/POS	250		Nikon	28
102	Q04	KL/POS	36		Nikon	50
103	Q03/4	KL/POS	36		Nikon	50
104	Q03	KL/POS	36		Nikon	50
105	Q03	KL/POS	250		Nikon	28
106	Q03	KL/POS	250		Nikon	28
107	Q01	KL/POS	250		Nikon	28
108	Q04	KL/POS	250		Nikon	28
109	Q01	KL/POS	250		Nikon	28
110	Q02	KL/POS	250		Nikon	28
111	Q02	KL/POS	250		Nikon	28

TABEL C.3 FOTOGRAFISCHE REGISTRATIES PROEF Q01					
PROEF NUMMER	FILM	KEUZE	PLAATS IN m	TIJDSINTERVAL	TEKENING NUMMER
1	109	overz	6-10	002601-002815	106
1	107	overz	11-15	003132-004131	107
1	107	overz	10-15	001314-003530	108
1	109	overz	6-10	001545-002845	109
1	107-109	TOTAAL	5-17	002601-004131	106-107
1	107-109	TOTAAL	5-17	001314-003530	108-109

TABEL C.4 FOTOGRAFISCHE REGISTRATIES PROEF Q02					
PROEF NUMMER	FILM	KEUZE	PLAATS IN m	TIJDSINTERVAL	TEKENING NUMMER
2	111	overz	12-16	004124-005004	101
2	110	overz	6-10	004155-004543	102
2	110	overz	7-10	002626-004013	110
2	110	overz	6-10	004625-005850	111
2	110	overz	6-10	001219-002219	114
2	111	overz	12-15	001139-002442	115
2	110	overz	7-10	002250-002606	116
2	110-111	TOTAAL	5-17	004625-005850	111
2	110-111	TOTAAL	5-17	004124-005004	101-102
2	110-111	TOTAAL	5-17	002626-002851	110
2	110-111	TOTAAL	5-17	001139-002442	114-115
2	110-111	TOTAAL	5-17	002250-002606	116

TABEL C.5 FOTOGRAFISCHE REGISTRATIES PROEF Q03

PROEF NUMMER	FILM	KEUZE	PLAATS IN m	TIJDSINTERVAL	TEKENING NUMMER
3	106	overz	11-15	003424-020825	112
3	105	overz	6-10	010843-015511	113
3	104	detail	-	014027-014720	117
3	104	detail	-	014001-	118
3	104	detail	10	013847-013935	126
3	104	detail	9	012800-013152	127
3	104	detail	8	011905-012505	128
3	105-106	TOTAAL	5-17	0034324-020825	112-113

TABEL C.6 FOTOGRAFISCHE REGISTRATIES PROEF Q04

PROEF NUMMER	FILM	KEUZE	PLAATS IN m	TIJDSINTERVAL	TEKENING NUMMER
4	101	overz	11-15	010031-014342	103
4	108	overz	6-11	011628-043630	104
4	108	overz	7-11	042519-043731	105
4	102	detail	8	014219-033154	119
4	102	detail	9	035118-035950	120
4	102	detail	8	033236-035028	121
4	102	detail	-	040213-040302	122
4	103	detail	12-13	043530-044149	123
4	103	detail	12-13	041859-043132	124
4	103	detail	-	040550-041208	125
4	103	detail	10	013847-013935	126
4	101-108	TOTAAL	5-17	010031-044342	103
4	101-108	TOTAAL	5-17	011628-043731	104-105

Waterloopkundig Laboratorium / WL
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon (015) 569353
telex 38176 hydel-nl
telefax (015) 619674

Grondmechanica Delft
postbus 69
2600 AB Delft
telefoon (015) 693500
telex 38234 soil-nl
telefax (015) 610821