

Deelontwerp Vloeistofmechanika

Wrijvingskrachten op het binnentalud van een
dijk ten gevolge van golfoverslag, en het
ontwerp van een schuifspanningsmeter ter
meting van die krachten.

F. van Kruiningen

augustus 1979

INHOUDSOPGAVE

	blz
Samenvatting	3
I Inleiding	4
2 Schatting van de golfoverslag en de wrijvingskrachten	
2.1 Inleiding	4
2.2 Golfoverslag	4
2.3 Wrijvingskrachten op het binnentalud .	7
3 Meten van schuifspanningen	11
4 Ontwerp schuifspanningsmeter	11
4.1 voorwaarden waaraan de schuifspanningsmeter moet voldoen	11
4.2 Uitwerking van de mechaniese voorwaarden	
4.2.1 De respons van het veersysteem	12
4.2.2 Konstruktie van het veersysteem	14
4.2.3 Relaties tussen vervormingen-veerstijfheid en eigenfrequentie	15
4.3 Dimensionering vande schuifspanningsmeter	
4.3.1 Keuze meetoppervlak	16
4.3.2 Schatting massa van het veersysteem	17
4.3.3 Afmetingen van de veren	17
5 IJken van het meetinstrument	22
6 Testen van de schuifspanningsmeter	
6.1 Inleiding	23
6.2 De meetopstelling	24
6.3 De metingen	24
6.3.1 Resultaten van de metingen	26
6.3.2 Afwijkingen in het verhang	26
6.3.3 De ruis van de schuifspanningsmeter	34
6.3.4 De ruwheid van de leiding	35
6.4 Konklusie	37
7. Wrijvingskrachten op het binnentalud ten gevolge van golfoverslag	
7.1 Inleiding	37
7.2 Beschrijving van de metingen	39
7.3 De wrijvingskrachten	40
7.4 Verwerking van de meetgegevens	41
7.5 Waterlaagdikten bij golfoverslag en toetsing van de bij de schatting gehanteerde wrijvingsformules	48
7.8 Konklusie	50
Appendix I Wijziging wrijvingsformule	51
Appendix II Invloed van de massa van de veren op de eigenfrequentie van de schuifspanningsmeter	53
Appendix III Referentiës	55
Appendix IV Gebruikte symbolen	56

Samenvatting

In 1953 zijn tijdens de stormvloedramp de meeste dijken bezweken ten gevolge van afschuiven van het binnentalud. De aanleiding tot deze afschuivingen was in alle gevallen golfoverslag.

Hoe evenwichtsverlies ontstaat en welke krachten daarbij een belangrijke rol spelen is niet geheel duidelijk. In dit rapport is onderzocht hoe groot de wrijvingskrachten op het binnentalud zijn, ten gevolge van het over de dijk heen geslagen water.

Dit probleem is niet toegankelijk voor berekeningen, daarom zijn er een aantal proeven gedaan.

Hiertoe is een schuifspanningsmeter ontworpen. Het ontwerp is gemaakt aan de hand van schattingen van golfoverslag. De schuifspanningsmeter is getest in een uniforme stroming. Hiervoor is het instrument gemonteerd in een kokervormige houten leiding. Uit het verhang in de leiding is de schuifspanning berekend. De meting van dit verhang was vanwege allerlei redenen onnauwkeurig. De schuifspanningsmeter werd tijdens deze metingen in resonantie gebracht als gevolg van turbulentie. Aan de hydraulische ruwheid van het oppervlak moet bij gebruik van dit meetinstrument bepaalde eisen gesteld worden.

Wanneer de uit het verhang berekende en met de schuifspanningsmeter gemeten schuifspanningen gemiddeld worden, is er goede onderlinge overeenstemming.

De wrijvingskrachten ten gevolge van golfoverslag op het binnentalud zijn gemeten bij één geometrie van de dijk, één ruwheid en één positie van de schuifspanningsmeter.

De resultaten tonen een driehoeksvormig verloop van de wrijvingskrachten. De snelheden en laagdikten van het overgeslagen water zijn niet volledig gemeten. Kennis van deze grootheden is voor een beter begrip van het verloop en de grootte van de wrijvingskrachten van belang.

Er is getracht de schuifspanningen te korreleren met de golfhoogte, golfperiode en de relatieve kruinhoogte van de dijk. De schuifspanningen zijn vergeleken met waarden die ontstaan wanneer de dijk als overlaat fungeert. De schuifspanningen bij deze permanente stroming vormen een ondergrens voor de waarden ontstaan uit golfoverslag.

1. Inleiding

De wijze waarop de meeste dijken tijdens de stormvloedramp in 1953 zijn bezweken is nooit volledig begrepen.

Wel is er een duidelijke korrelatie gelegd tussen het afschuiven van het binnentalud en golfoverslag.

Hoe golfoverslag kan leiden tot evenwichtsverlies van het binnentalud is beschreven door Edelman (zie ref. 1)

In dit artikel zijn echter een aantal veronderstellingen gemaakt welke niet in overeenstemming zijn met de werkelijkheid.

Zo worden bijvoorbeeld de krachten uitgeoefend door het water op het binnentalud, veroorzaakt door een laag water welke permanent over het talud stroomt.

Doel van dit onderzoek is na te gaan hoe groot de wrijvingskrachten op het binnentalud, ten gevolge van deze golfoverslag, zullen zijn. Als resultaat van dit onderzoek zou de invloed van deze kracht op het bezwijkmechanisme van de dijk geschat kunnen worden.

Om deze wrijvingskrachten te kunnen meten is een schuifspanningsmeter ontworpen.

Het ontwerp is gemaakt aan de hand van schattingen van golfoverslag en de schuifspanningen hierdoor teweeggebracht.

De schuifspanningsmeter is getest in een uniforme pijpstroming.

Daarna zijn wrijvingskrachten aan het binnentalud ten gevolge van golfoverslag gemeten.

De metingen zijn verricht aan slechts één dijkprofiel, één positie van de schuifspanningsmeter en één ruwheid.

2. Schatting van de golfoverslag en de wrijvingskrachten

2.1. Inleiding

Om een goed meetinstrument te kunnen ontwerpen, dat wrijvingskrachten ten gevolge van golfoverslag aan het binnentalud meet, is inzicht in het verschijnsel golfoverslag van belang.

De wrijvingskrachten aan de bodem zijn een gevolg van snelheidsgradienten in het water, de viscositeit en de ruwheid.

Golfoverslag is een sterk tijdsafhankelijke stroming, daarom is het van belang inzicht te verkrijgen in snelheden en laagdikten van het overstortende water.

2.2. Golfoverslag

Naar golfoverslag zijn een groot aantal onderzoeken verricht. (zie ref. 2). Echter bij deze onderzoeken is slechts getracht de relaties te vinden tussen de hoeveelheid overslaand water enerzijds en variabelen, zoals de golfhoopte, golfperiode en kruinhoopte van de dijk anderzijds.

Over de variatie van het momentane debiet, de optredende snelheden en de laagdikten van het overstortende water is weinig bekend.

Voor een deel is dit te wijten aan het feit dat deze grootheden moeilijk te meten zijn.

Theoretische benaderingen van het probleem zijn vooralsnog niet goed gelukt.

Belangrijk is nu te weten wat voor watersnelheden en laagdiktes bij benadering te verwachten zijn.

Een ander belangrijk punt is, in wat voor een tijdsbestek de golfoverslag zich afspeelt.

Als resultaat van het voor dit onderzoek verrichte literatuuronderzoek kon voor de schattingen van watersnelheden, laagdikten enz, slechts gebruik gemaakt worden van een theoretiese benadering van het probleem.

Deze benadering is voorgesteld door Kikkawa, Shi - igai en Kono (zie ref. Hier wordt voorgesteld de golfoverslag van regelmatige golven te beschouwen als een successie van verschillende toestanden van permanentie. Door nu de overlaatformule toe te passen kan de hoeveelheid water die overslaat berekend worden.

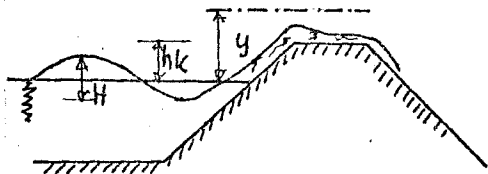
$$q = \frac{2}{3} m_0 \sqrt{2g(y-hk)} \quad (1)$$

hierin:

y = energiehoogte t.o.v. gemiddelde waterspiegel

hk = kruinhoogte t.o.v. gemiddelde waterspiegel

m_0 = afvoercoëfficiënt



figuur 1

De energiehoogte y wordt geschreven als:

$$y(t) = k H F(t) \quad (2)$$

hierin: k = coëfficiënt afhankelijk van de taludhelling en golfsteilheid

H = golfhoogte

$F(t)$ = een periodieke funktie van de tijd met periode T en een maximum van 1. .

Wanneer vergelijking (2) in vergelijking (1) gesubstitueerd wordt, en voor $F(t)$ een geschikte functie gekozen wordt, kan door integratie gedurende het punt tijdsinterval dat $y(t) \geq hk$ de hoeveelheid golfoverslag berekend worden. Voor de afvoer coëfficiënt kiezen de auteurs 0,5.

De coëfficiënt k is uit metingen bepaald.

In deze benadering wordt gebruik gemaakt van de overlaatformule. Dit wil zeggen dat, ergens op de kruin van de dijk, op ieder moment de watersnelheden en laagdikten (grensdiepte) bekend zullen zijn.

de laagdikten zullen zijn:

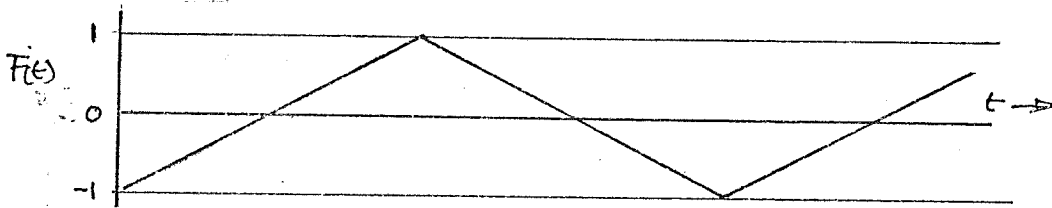
$$a(t) = 2/3 (y(t) - k_k) \quad (3)$$

en de snelheden:

$$v(t) = m_0 \quad (4)$$

Voor de berekening van deze snelheden en laagdikten wordt gebruik gemaakt van gegevens uit (ref 2).

Voor de functie $F(t)$ wordt nu een re htlijnig-geknipt verloop gekozen.



figuur 2

De coëfficiënt K blijkt uit metingen verricht door de auteurs onafhankelijk te zijn van de golfsteilheid.

K krijgt de waarde van 1,25 bij een talud van 1:3 (dit is een veel voorkomend talud).

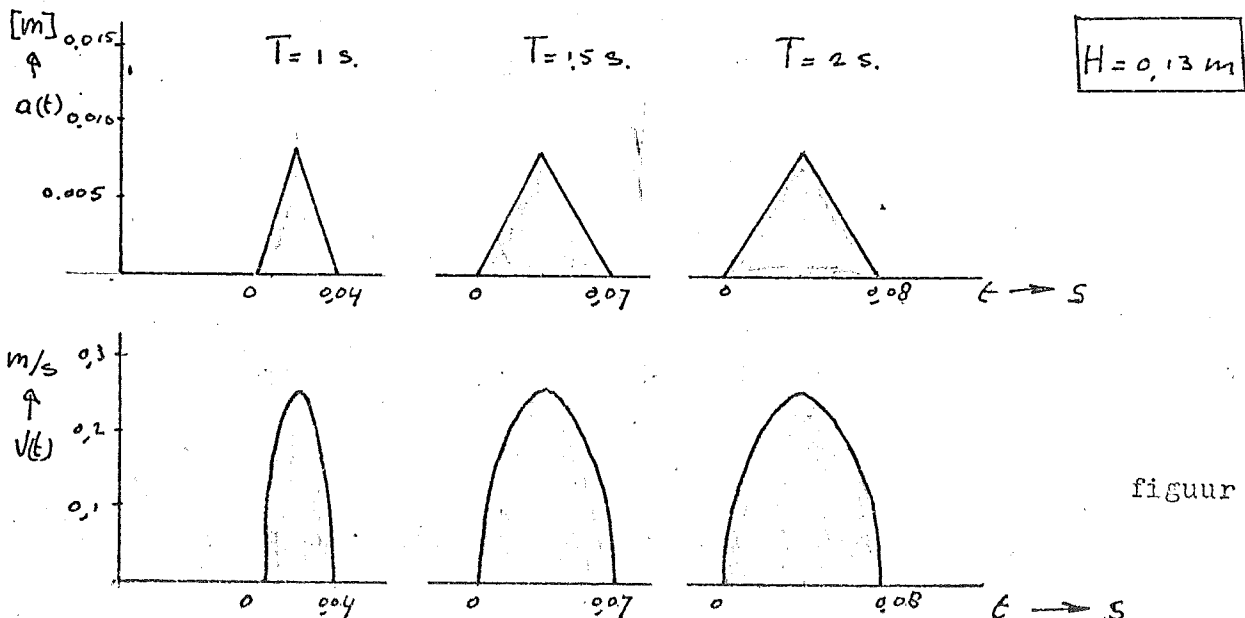
De afvoercoëfficiënt $M_0 = 0,5$.

Een aantal berekeningen zijn uitgevoerd met een kruinhoogte van 0,15 m en golfhoogten $H = 0,13$ en $H = 0,15$ m. De golfperiodes zijn $T = 1,0$, $1,5$ en $2,0$ seconden.

Een konsekwentie van de gebruikte formules is dat bij éénzelfde golfhoogte en met een variabele golfperiode T , de maximale snelheden en laagdikten hetzelfde zijn.

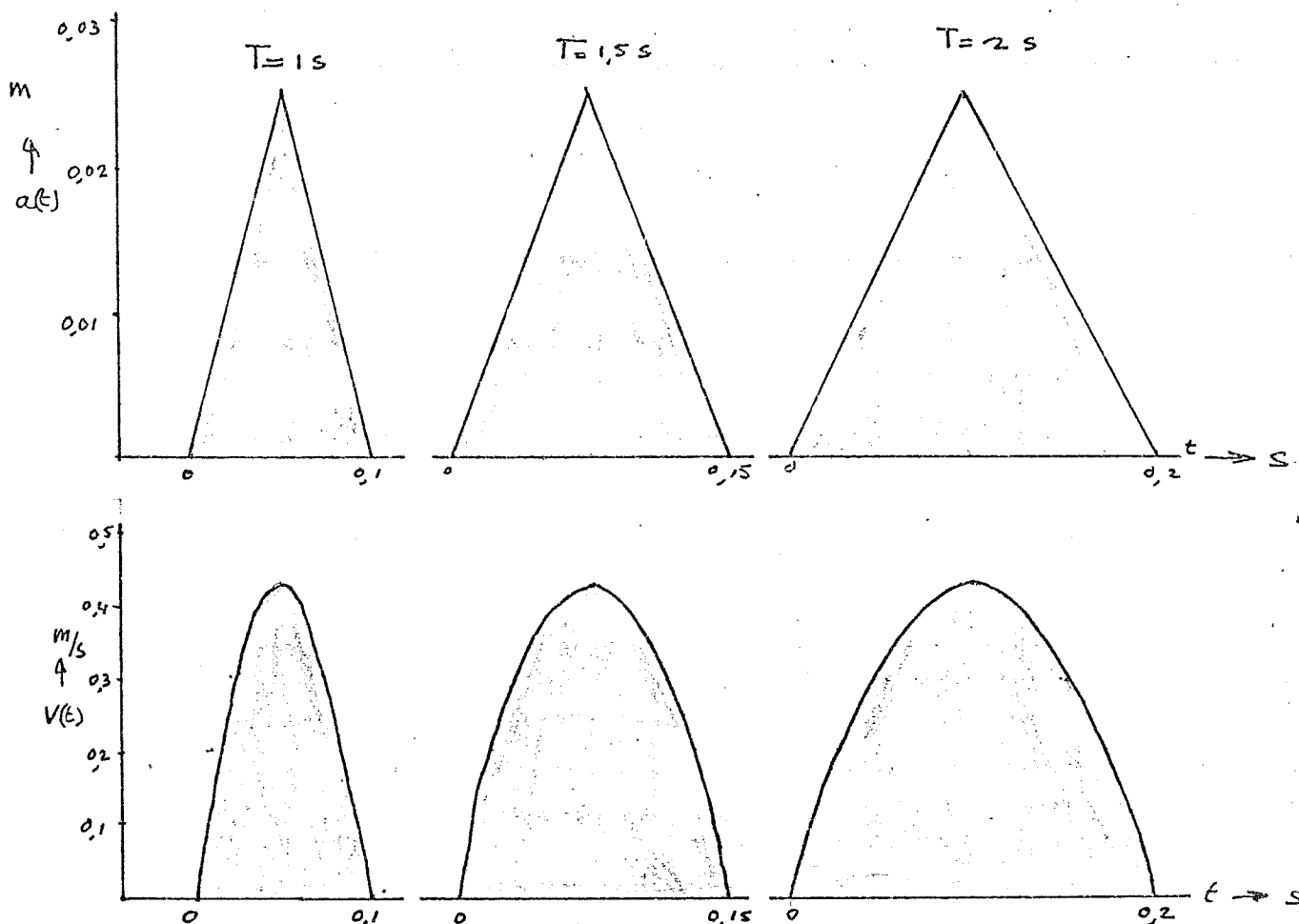
Echter de tijdsduur waarin golfoverslag optreedt is evenredig met de golfperiode.

De resultaten van een aantal berekeningen zijn ,



figuur 3^a

$$H = 0,15 \text{ m}$$



figuur 3^b

In de berekeningen is de invloed van de breedte van de kruin niet betrokken.

Deze zal van invloed zijn op de voortplantingssnelheid van de golf, de laagdikte en de snelheid van de waterdeeltjes.

Zodra het water de binnenkruinlijn bereikt, zal het door de stilte van het binnentalud versneld worden. Ter plaatse van de binnenkruinlijn zal de grensdiepte heersen.

Daarna zal op het binnentalud schietend water voorkomen.

2.3. wrijvingskrachten op het binnentalud

Nu een schatting is gemaakt van de laagdikten en snelheden, kan getracht worden de wrijvingskrachten op het binnentalud te berekenen.

Evenals bij de golfoverslag stuit men ook hier op problemen.

Theoriën betreffende schuifspanningen aan de bodem bij sterk versnelde dunne waterlagen zijn niet algemeen bekend.

Ook hier zal daarom toevlucht gezocht moeten worden tot grove benaderingen.

Bij deze benaderingen wordt gebruik gemaakt van de eerder gemaakte schattingen van de golfoverslag.

Hierbij zal niet gekeken worden wat de werkelijke stromingstoestand op het binnentalud zou kunnen zijn.

De gegevens zullen zo gebruikt worden dat een bodemschuifspanning berekend kan worden.

De gebruikte formules zijn in zoverre bijzonder dat, dit in tegenstelling tot de algemeen bekende, een schuifspanning berekend kan worden bij een niet uniforme stroming.

Als eerste zal gebruik gemaakt worden van een formule ter berekening van schuifspanning aan de bodem ten gevolge van een oscillerende golf (ref 3).

formules welke hierbij gebruikt worden zijn:

$$\hat{\tau}_0 = f_w \cdot \frac{\rho \hat{u}_s^2}{2}, \quad f_w = 0,4 \left(\frac{u_s}{a_s} \right)^{0,75} \quad (6)$$

waarin

- $\hat{\tau}_0$ = maximale bodemschuifspanning
- ρ = soortelijke massa van water
- \hat{u}_s = maximale orbitale snelheid juist boven de grenslaag
- \hat{a}_s = orbitale amplitude juist boven de grenslaag
- u_s = ruwheid volgens Nikuradse

De keuze van de formules (6) wordt gedaan aan de hand van het Reynolds getal voor sinusoidale beweging, afhankelijk van het type stroming. (hier: overgang van glad- naar ruw turbulent.)

$$Re = \frac{\hat{u}_s \hat{a}_s}{\nu}$$

waarin: ν = kinematische viscositeit

Bij deze formules is van belang de eigenschappen van de oscillerende golf te kennen.

Uit de schattingen van de golfoverslag zijn echter slechts waterlaagdikten en snelheden bekend. Een oscillerende beweging is er niet.

Wil men toch deze formules gebruiken, dan zal er een benadering gemaakt moeten worden.

Het overslaande water wordt beschouwd als de top van een korte golf. Men kan zich dan enigzins een oscillerende beweging van de golf voorstellen.

De amplitude van de oscillatie wordt berekend uit de snelheid van het water.

De baan die een waterdeeltje zal beschrijven is

$$a_s = \int_0^T u dt = \frac{\hat{u}_s}{\omega} \cos \omega t$$

Als de snelheid wordt voorgesteld, door:

$$u = \hat{u}_s \sin \omega t \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

T = periode van de oscillatie, hier 2x de tijd waarin de golfoverslag optreedt.

$$\text{De amplitude } a_s = \frac{\hat{u}_s}{\omega}$$

Een berekening, met een ruwheid $k_s = 0,001$ m, is uitgevoerd voor een aantal golven uit figuur 3.

H (m)	T (s)	\hat{u}_s (m/s)	ω	\hat{a}_s (m)	Re	τ_0 (N/m ²)
0,13	1,0	0,25	78	0,0032	800	5,4
0,13	1,5	0,25	45	0,0055	1375	3,7
0,13	2,0	0,25	39	0,0064	1600	3,2
0,15	1,0	0,43	31	0,0138	5934	5,0
0,15	1,5	0,43	20	0,0215	9245	3,9
0,15	2,0	0,43	16	0,0274	11782	3,3

tabel 1

Een tweede schuifspanningsberekening kan gedaan worden aan de hand van een lange golfbenadering. (zie ref 4 en appendix 1.)
De bodemwrijving wordt hier als volgt berekend;

$$\tau_0 = \eta \cdot \rho \cdot v |v|, \quad \eta = \frac{(f_1 f_2 + 2) + 2 (f_1 f_2 + 1)^{0,5}}{4 f_2^2} \cdot \chi^2$$

$$f_1 = \frac{2}{\chi^2} \cdot \frac{g a}{V^2} \cdot (\sin \theta - \frac{\partial a}{\partial x} \cos \theta) \quad (7)$$

$$f_2 = \ln \frac{a}{k_d} + \chi \beta - 0,5$$

waarin;

v = gemiddelde snelheid

a = waterdiepte

θ = helling van de bodem

$\frac{\partial a}{\partial x}$ = helling van de waterspiegel

k_d = gemiddelde hoogte van het ruwheidseffect

χ = konstante van von Karmann = 0,4

β = turbulente konstante = 7,8

Wanneer de afstroming van het overgeslagen water op het binnentalud beschouwd kan worden als een lange golf, dan kan met behulp van de waterdiepte, snelheid en hellingwaterspiegel, de bodemschuifspanning berekend worden.

Nu zijn uit de schattingen van de golfoverslag (figuur 3) de waterlaagdikten en desnelheden bekend. Deze zullen echter op het binnentalud niet dezelfde waarde hebben, omdat het water daar versneld wordt.

Bij de binnenkruinlijn van de dijk zullen de snelheden en waterlaagdikten van de zelfde orde zijn als bij de schatting.

De bodemschuifspanning wordt berekend met deze gegevens.

De maximale waterlaagdikten en snelheden uit de schattingen worden ingevuld in formules (7). De helling van de waterspiegel is onbekend maar zal van ondergeschikt belang zijn in verhouding tot de helling van het binnentalud (θ).

De resultaten van de berekening zijn onafhankelijk van de golfperiode T . De snelheden en laagdikten zijn bij deze schatting slechts afhankelijk van de golfhoogte H . De berekening wordt uitgevoerd voor een talud met een helling van 1:3 en een ruwheid $k_d=0,001$.

De helling van de waterspiegel zal gevarieerd worden van $\frac{\partial a}{\partial x} = 0,0 - 0,05 - 0,1$. Zulke grote verhangen zullen nabij de binnenkruinlijn kunnen voorkomen.

H (m)	v (m/s)	a (m)	$\frac{\partial a}{\partial x}$	λ	τ_0 (N/m ²)
0,13	0,25	0,008	0,0	0,065	4,1
0,13	0,25	0,008	0,05	0,073	4,6
0,13	0,25	0,008	0,1	0,081	5,1
0,15	0,43	0,025	0,0	0,052	9,7
0,15	0,43	0,025	0,05	0,058	10,7
0,15	0,43	0,025	0,1	0,064	11,8

tabel 2

Als derde benadering kan nog gedacht worden aan een verhanglijn die zich instelt op het binnentalud. Door variatie in het debiet bovenstrooms, zouden dan de verschillende stadia van de golfoverslag benaderd kunnen worden.

De bodemwrijving bij een verhanglijn is $\tau_0 = \rho g a \sin \theta$ en wordt gevonden nadat eerst in de berekening een weerstandskoefficient is ingevoerd. De verhanglijnberekening zal echter niet geldig zijn in het sterk versnelde gebied in het bovenste gedeelte van het talud.

De bodemwrijving, berekend met behulp van slechts de waterlaagdikte a , $\tau_0 = \rho g a \sin \theta$, zal bij een binnentalud van 1 : 3 waarden hebben van;

a (m)	τ_0 (N/m ²)
0,005	15,8
0,010	31,6

tabel 3

3. Meten van schuifspanningen

Schuifspanningen kunnen op twee verschillende wijzen gemeten worden. 1. De indirecte wijze, hierbij wordt de snelheidsverdeling van een bepaalde stroming als bekend verondersteld.

Wanneer nu de snelheid van het water in de grenslaag gemeten wordt kan hieruit de bodemschuifspanning berekend worden.

De bepaling van deze snelheid kan gedaan worden met behulp van Laser - Doppler apparatuur of met een Preston buis (een soort Pitot buis) (zie ref 5).

2. De directe wijze, hierbij wordt de kracht uitgeoefend op de bodem rechtstreeks gemeten. Deze meting wordt uitgevoerd door een beweegbaar gedeelte in de bodem te verbinden met een veersysteem. De kracht uitgeoefend, via dit beweegbare gedeelte, op het veersysteem zal de bodemwrijving zijn. De verplaatsingen van het systeem kunnen worden gemeten. Door ijking van het instrument vindt men de schuifspanningen.

Zoals al eerder gebleken is, is het moeilijk de golfoverslag te beschrijven. Een snelheidsprofiel van deze sterk versnelde stroming zal dan ook niet bekend zijn. De eerst genoemde indirecte methode is daarom ongeschikt.

Er zal een schuifspanningsmeter ontworpen moeten worden die de wrijvingskrachten direct meet.

4. Ontwerp schuifspanningsmeter

4.1. Voorwaarden waaraan de schuifspanningsmeter moet voldoen.

De voorwaarden waaraan bij het ontwerp van de schuifspanningsmeter voldaan moet worden zijn;

mechanische voorwaarden:

Het minimum meetbereik moet in de orde liggen van de eerder gemaakte schattingen. Een schuifspanning van 5 N/m² moet meetbaar zijn. De dynamische eigenschappen van het meetinstrument moeten zodanig zijn dat de te meten wrijvingskrachten goed weergegeven worden. Dit wil zeggen dat het instrument niet te traag zal moeten reageren op de te meten krachten. Resonanties dienen vermeden te worden. Dit leidt tot eisen ten aanzien van de eigen frequentie van het instrument.

ruimtelijke voorwaarden:

De afmetingen moeten zodanig zijn dat het instrument in het talud past. De konstruktie moet niet al te subtiel zijn, zodat het instrument op redelijk eenvoudige wijze te vervaardigen is.

voorwaarden met betrekking tot registratie van het signaal:

De weergave van het signaal zal elektrisch geschieden.

Dit wil zeggen dat rekening gehouden moet worden met het meetbereik van de toe te passen rekstrookjes of verplaatsingsopnemers en versterkers.

4.2. Uitwerking van mechanische voorwaarden

4.2.1. De respons van het veersysteem

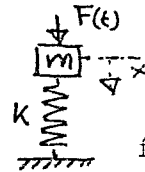
Het meetinstrument zal bestaan uit een in de bodem aangebracht meetplaatje dat verbonden is met een veersysteem.

De schuifspanningsmeter wordt ontworpen als een ongedempt één-massa veersysteem.

Demping zal uiteindelijk wel in het veersysteem gevonden worden, bijvoorbeeld door materiaaldemping. Het toestel wordt er echter niet op ontworpen.

Er geldt dan;

$$m \ddot{x} + kx = F(t) \quad (8)$$



figuur 5

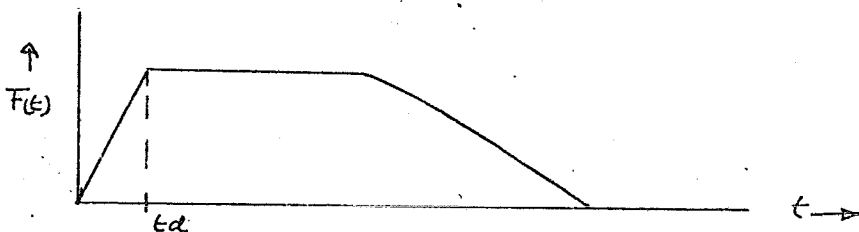
waarin: m = massa in kg

k = stijfheid van de veer N/m

$F(t)$ = kracht uitgeoefend op het veersysteem

x = verplaatsingen van het veersysteem

In geval van golfoverslag zal $F(t)$ de vorm hebben van een snel aangroeiende belasting, waarna de kracht een zekere waarde zal hebben. bijvoorbeeld:



figuur 6

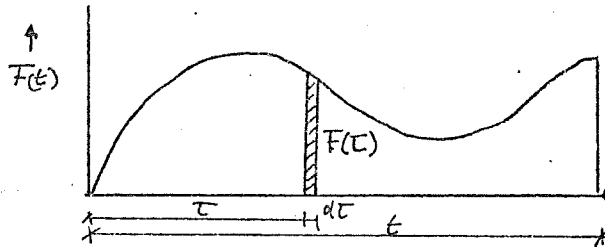
t_d = de tijd waarin $F(t)$ van nul aangroeit tot een zekere maximale waarde.

De respons $x(t)$ van een één-massa veersysteem op een belasting $F(t)$ kan beschreven worden met de integraal van Duhamel. (zie ref 6)

$$X(t) = \int_0^t \frac{F(\tau)}{m\omega} \cdot \sin \omega(t - \tau) d\tau \quad (9)$$

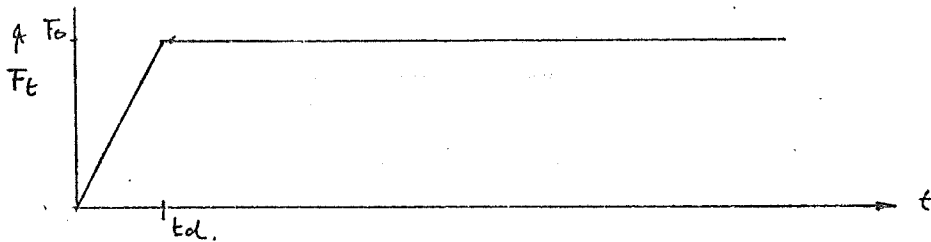
waarin: ω = eigenfrequentie = $\sqrt{\frac{k}{m}}$

Waarin $F(t)$ als volgt;



figuur 7

uitwerking van de integraal voor onderstaande belasting levert.



figuur 8

$$X(t) = \frac{F_0}{k} \left(\frac{t}{t_d} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_d} \right) \quad t \leq t_d. \quad (10)$$

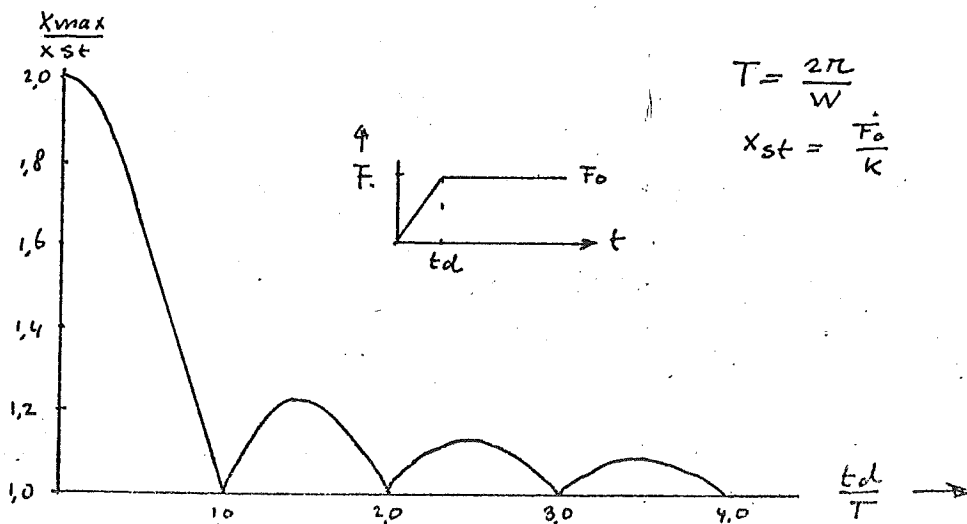
$$X(t) = \frac{F_0}{k} \left(1 + \frac{\sin \omega(t-t_d)}{\omega t_d} - \frac{\sin \omega t_d}{\omega t_d} \right) \quad t > t_d \quad (11)$$

Uit de vergelijkingen blijkt dat, wil men aan de hand van de respons van het systeem de kracht $F(t)$ herkennen, de sinus termen in de vergelijkingen (10 en 11) zo klein mogelijk dienen te zijn.

Bij golfoverslag zal t_d erg klein zijn. Men dient te bedenken dat een golf front met grote snelheid het meetplaatje zal belasten. Dat t_d erg klein zal zijn blijkt ook uit eerder gemaakte schattingen van de golfoverslag. Hieruit blijkt dat het gehele golfverschijnsel in de orde ligt van tienden van sekonden.

Het is daarom van belang om de eigenfrequentie ω van het veersysteem zo groot mogelijk te maken.

In de hieronderstaande figuur 9 is de respons van een éénmassa veersysteem als functie van de verhouding ωt_d nog eens weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat de respons aan een maximum gebonden is. Bovendien zal altijd rekening gehouden moeten worden met een oscillatie in de eigenfrequentie van het veersysteem.



figuur 9

Om een indruk te krijgen aan welke eigenfrequenties gedacht moet worden volgt hieronder een schatting.

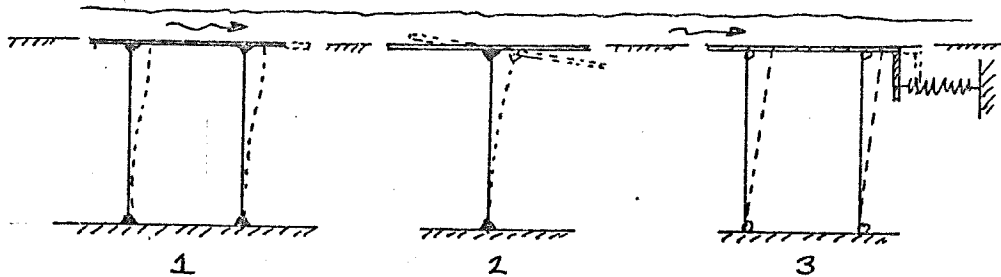
stel als eis $\frac{td}{T} = 4$ (zie figuur 9)

als dan ; $td = 0,01$
 $td = 0,05$

dan $T = 0,0025$ en $w = 2500$
dan $T = 0,0125$ en $w = 500$

4.2.2. konstruktie veersysteem

Er zijn een aantal mogelijkheden om het veersysteem te verwezenlijken, bijvoorbeeld:



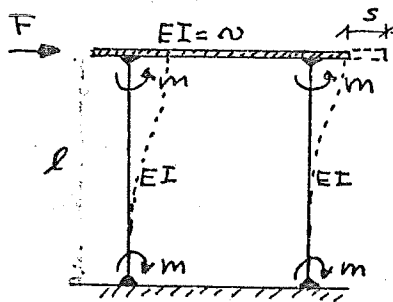
figuur 10

Een aantal mogelijkheden zijn onderzocht waarbij rekening gehouden is met de stijfheid, de ruimtelijke voorwaarden, eenvoud van konstruktie.

Gekozen is voor de konstruktie no 1 omdat

- de bovenregel ondervindt geen hoekverdraaiing
- inklemming van de bladveren is eenvoudig te verwezenlijken
- de konstruktie is stijver en robuuster dan de anderen

Dit systeem, de bladveren (stijlen) aan beide zijden ingeklemd, de bovenregel (meetplaatje) als zeer stijf beschouwd, geeft de volgende betrekkingen.



$$F = 24 \frac{EI \cdot s}{l^3} \quad m = \frac{6EI}{l^2} \cdot s \quad (12)$$

figuur 11

EI = buigstijfheid van de veren Nm^2
 E = elasticiteitsmodulus N/m^2
 I = traagheidsmoment
 b = breedte van de veren
 h = dikte van de veren
 l = lengte van de veren
 s = verplaatsing van het veersysteem

4.2.3. relaties tussen vervormingen veerstijfheid en eigenfrequentie

Nu het type van de veerconstructie gekozen is kunnen de relaties gelegd worden tussen vervormingen, veerstijfheid en eigenfrequentie. De op het veersysteem uitgeoefende kracht zal bepaald worden aan de hand van de rekken (met behulp van rekstrookjes) in de veren, ofwel met behulp van verplaatsingen van het veersysteem.

De gebruikte formules zijn:

$$\sigma = \epsilon \cdot E \quad \text{wet van Hooke} \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{M \cdot h}{I} \quad (14)$$

waarin: M=moment in de veer

σ = spanning N/m²

ϵ = specifieke rek

Uitwerking van formules 12, 13 en 14 geeft een rek ter plaatse van de inklemming van de veer Van.

$$\epsilon = \frac{3}{2} \frac{F \ell}{E b h^2} \quad (16)$$

de stijfheid k van de veer is:

$$k = 2 \frac{E b h^3}{\ell^3} \quad (17)$$

De stijfheid en rek gekombineerd levert:

$$k = \frac{3F}{\epsilon} \cdot \frac{h}{\ell^2} \quad (18)$$

en met $F = K \cdot S$

$$\epsilon = 3 S \cdot \frac{h}{\ell^2} \quad (19)$$

De eigenfrequentie van het veersysteem is

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

dit levert dan het volgende

$$m \omega^2 = \frac{3F}{\epsilon} \cdot \frac{h}{\ell^2} \quad (20)$$

Deze uitdrukking legt de relatie tussen de bij het ontwerp belangrijke grootheden zoals ω , F , ε .

Uit deze relatie blijkt dat bij bepaalde waarden van h/ρ^2 en ε slechts dan w groot is als F groot is. Probleem bij dit ontwerp is dat er enerzijds lage waarden van F gemeten moeten worden en anderzijds de eigenfrequentie w zo hoog mogelijk moet zijn.

Weliswaar is de massa van invloed, maar deze is zoals hieronder aangetoond zal worden min of meer afhankelijk van de kracht F .

De kracht F immers is een wrijvingskracht.

De grootte van deze kracht afhankelijk gekozen van het meetoppervlak

$$F = \tau_0 A$$

waarin : A = oppervlakte van het meetplaatje

De keuze van het meetoppervlak bepaalt de massa van het veersysteem. Dit afgezien van de massa van de veren en bevestigingsmiddelen, zoals schroefjes, klosjes enz.

Zie hiervoor ook appendix 11.

stel nu:

$$m = t_s \rho A$$

waarin ρ = soortelijke massa van het meetplaatje
 t_s = dikte van het meetplaatje

dan geldt;

$$m w^2 = \frac{3F}{\varepsilon} \cdot \frac{h}{e^2}$$

$$t_s \rho A w^2 = \frac{3 \tau_0 A}{\varepsilon} \cdot \frac{h}{e^2}$$

$$w^2 = \frac{3 \tau_0}{t_s \rho \varepsilon} \cdot \frac{h}{e^2}$$

(21)

De grootte van het meetoppervlak is niet van invloed bij het ontwerp. Een eventuele vergroting van het meetoppervlak om zoddende de beschikbare kracht F te vergroten zal daarom geen zin hebben.

4.3. Dimensionering van de schuifspanningsmeter

4.3.1. Keuze meetoppervlak

Het gekozen veersysteem biedt de mogelijkheid om de wrijvingskracht slechts in één richting te meten.

Het instrument zal gebruikt worden om wrijvingskrachten te meten ten gevolge van golfaanval loodrecht op de dijk.

De schuifspanningen zullen dientengevolge, in principe, dan ook één richting hebben, loodrecht op de as van de dijk.

Door allerlei randeffekten zal dit echter niet volkomen het geval zijn.

Het meetplaatje krijgt dan ook een zekere breedte, zodat daar een middelende werking van uit zal gaan. (breedte meetplaatjes = //golffront)

De lengte dient zo kort mogelijk te zijn opdat een juiste weergave van de schuifkracht ten gevolge van de passerende golf verkregen wordt. (lengte meetplaatje = 1 golffront).

Deze overwegingen tezamen met eerder geformuleerde eisen dat een handzaam ontwerp gemaakt dient te worden, heeft tot de volgende toch vrij willekeurige keuze van het oppervlak geleid.
lengte x breedte = 0,03 x 0,1 (m)

4.3.2. Schatting massa van het veersysteem

De schatting van de massa van het veersysteem is van belang ter bepaling van eigenfrequentie w . (zie ook appendix 11)

Stel het meetplaatje wordt gemaakt van kunststof met een soortelijke massa $\rho = 1200 \text{ kg / m}^3$ met een dikte van 0,002 m.

het meetplaatje weegt dan:

$$m_1 = 0,03 \times 0,002 \times 0,1 \times 1200 = 0,007 \text{ kg.}$$

aangenomen wordt dat de bevestigingsmiddelen even zwaar zijn als het meetplaatje.

$$m_2 = 0,007 \text{ kg.}$$

Tijdens de proeven is er de mogelijkheid dat het meetplaatje een zekere hydrauliese ruwheid moet bezitten. Hierote zal het meetplaatje beplakt worden met zand. Stel dat er een laag zand ter dikte van 0,0015 m op het meetplaatje geplakt wordt dan;

$$m_3 = 0,0015 \times 0,1 \times 0,03 \times 2650 = 0,012 \text{ kg.}$$

De massa van het veersysteem zal dan bij benadering zijn;

$$m = m_1 + m_2 + m_3 = 0,03 \text{ kg.}$$

4.3.3. afmetingen van de veren

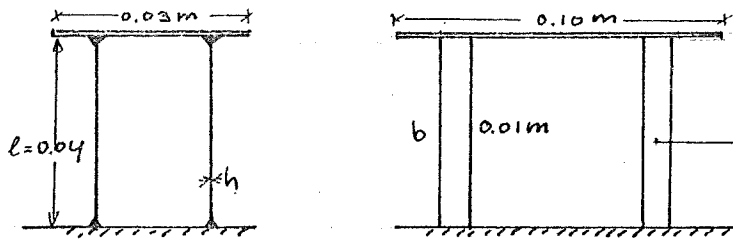
Wanneer men de formule (17) voor de stijfheid k beschouwt blijkt dat vooral de lengte l van de veer en de dikte h van belang zijn. Anderszijds blijkt uit formule (18) hoe groter de stijfheid k is hoe geringer de vervormingen ϵ , s , zullen zijn bij een zekere kracht F .

$$F = k \cdot s, \quad k = \frac{2 E b h^3}{l^3} \quad (17), \quad \epsilon = \frac{3 F}{k} \cdot \frac{h}{e^2} \quad (18)$$

Uit formule (18) blijkt dat ten aanzien van de afmetingen van de veer nog enige vrijheid is in de keuze van de lengte en dikte.

Wanneer nu gekozen wordt voor met rekstrookjes beplakte veren met een minimum meetbereik van $\epsilon \approx 10^{-5}$ leidt een schatting tot veren met een lengte l van ongeveer 0,04 m. De dikte h wordt vooralsnog niet gekozen om de stijfheid k en zodoende de eigenfrequentie te kunnen variëren.

Omdat de rekstrookjes niet ter plaatse van de inklemming geplakt kunnen worden, zullen ze ongeveer een kwart van de lengte van de veer bevestigd worden. Bovendien hebben rekstrookjes zekere afmetingen, daarom wordt de volgende keuze gedaan.



figuur 12

Toegepast worden dus 4 veren met een lengte van 0,04 m en een breedte van (vooralsnog) 0,01 m.

De dikte h zal gevarieerd worden.

De minimale rek ϵ van een rekstrookje is circa 10^{-5} , dit wil zeggen dat ter plaatse van de inklemming de rek 2×10^{-5} zal moeten zijn. (het moment verloopt lineair).

Bij de hierboven gegeven rek zullen nu bij een aantal veren, met variabele dikte h , de eigenfrequentie en de bij deze rek optredende krachten F berekend worden.

De resultaten zijn in tabelvorm weergegeven.
De bij de berekening gebruikte formules zijn:

$$F = \frac{4}{3} \cdot \frac{E b h^2}{l} \cdot \epsilon$$

$$k = 4 \frac{E b h^3}{l^3}$$

$$w^2 = \frac{k}{m}$$

h (m)	k (N/m)	w	s (m)	F (N)	τ_0 (N/m ²)
0,0010	$1,31 \cdot 10^5$	1950	$1,1 \cdot 10^{-5}$	1,4	466
0,0005	$1,64 \cdot 10^4$	718	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,35	116
0,0001	$1,31 \cdot 10^2$	66	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,014	4,6

tabel 4

Uit hiervoor staande tabel 4 blijkt dat ten aanzien van de minimaal te meten schuifspanning (5 N/m^2) alleen een veer met een dikte $h = 0,0001 \text{ m}$ in aanmerking komt. De eigenfrequentie is echter aan de vrij lage kant.

Door manipulatie met de afmetingen van de veren (b, h en l) kan wellicht een betere verhouding tussen F en w gevonden worden. Er zijn echter beperkingen met betrekking tot de keuze van de afmetingen. De rekstrookjes hebben bepaalde afmetingen, de lengte van de veren kan daarom om praktische redenen niet veel verkleind worden. Bovenstaande tezamen met de onzekerheid in de schattingen ter bepaling van de minimale schuifspanning, heeft geleid tot de keuze van een gevoeliger meetsysteem. Het meten van verplaatsingen van het veersysteem kan namelijk een orde nauwkeuriger verricht worden. Een met het meetplaatje verbonden metalen stripje bevindt zich tussen zogenaamde tastloze verplaatsingsopnemers.

Die verplaatsingsopnemers meten, wanneer het stripje heen en weer beweegt, een verandering van de magnetiese inductie. Verplaatsingen met een grootte van 10^{-6} m zijn meetbaar.

Wanneer dit meetsysteem wordt toegepast levert dit bij variatie in dikte van de veer het volgende.

$$k = 4 \cdot \frac{E b h^3}{e^3}, \quad F = k \cdot s, \quad w = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad s = 10^{-6} \text{ m}$$

h (m)	k (N/m)	w	F (N)	τ_0 (N/m^2)
0,0005	16400	740	$1,64 \cdot 10^{-2}$	5,5
0,0003	3540	340	$3,5 \cdot 10^{-3}$	1,2
0,0002	1050	187	$1,05 \cdot 10^{-3}$	0,35

tabel 5

De resultaten van deze berekening leveren een gunstiger beeld. Besloten is daarom gebruik te maken van de tastloze verplaatsingsopnemers.

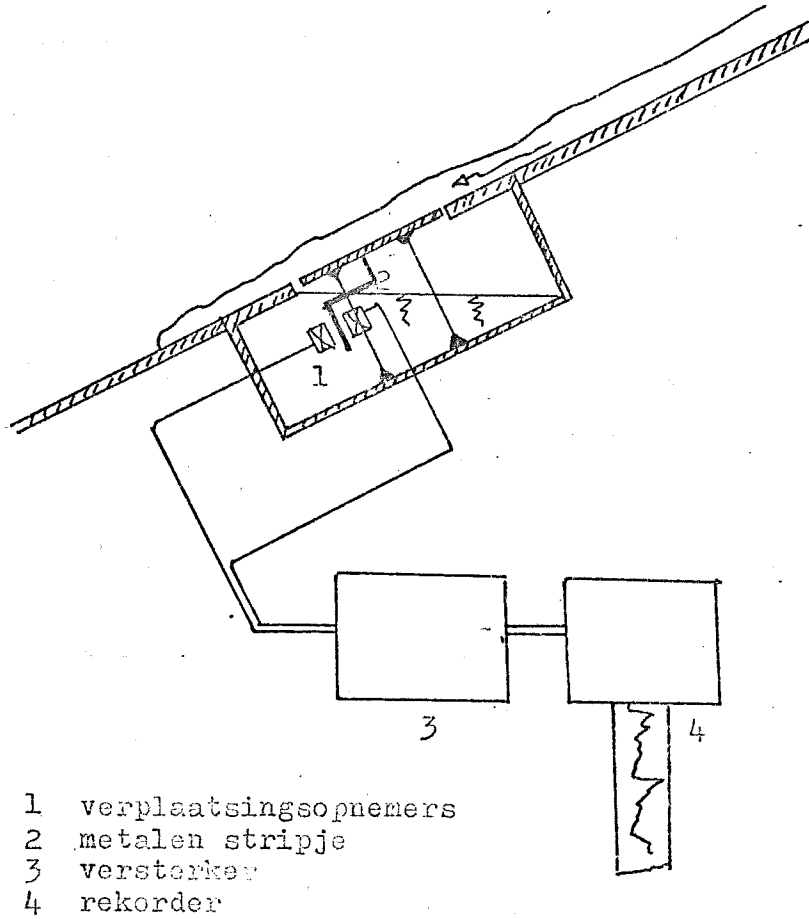
Omdat in de schattingen een aantal onzekerheden zitten, wordt de mogelijkheid opengehouden om veren met diverse dikten te monteren.

De tastloze verplaatsingsopnemers kunnen zowel boven als onder water gebruikt worden.

Omdat het meetinstrument in een scheefstand (in het binnentalud) gebruikt wordt, is het onzeker of het metalen stripje zich wel altijd of boven of onder water bevindt.

Er zal immers altijd wel water tussen de naden, rondom het meetplaatje het meetinstrument binnendringen.

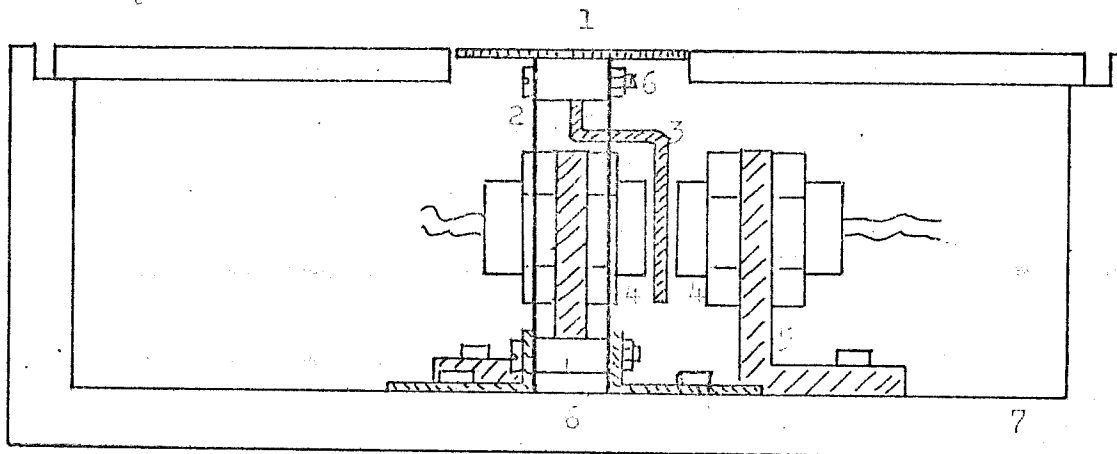
Het metalen stripje heeft daarom een geknikte vorm gekregen zodat het zich voortdurend, ter plaatse van de verplaatsingsopnemers, onder water bevindt. zie figuur 13.



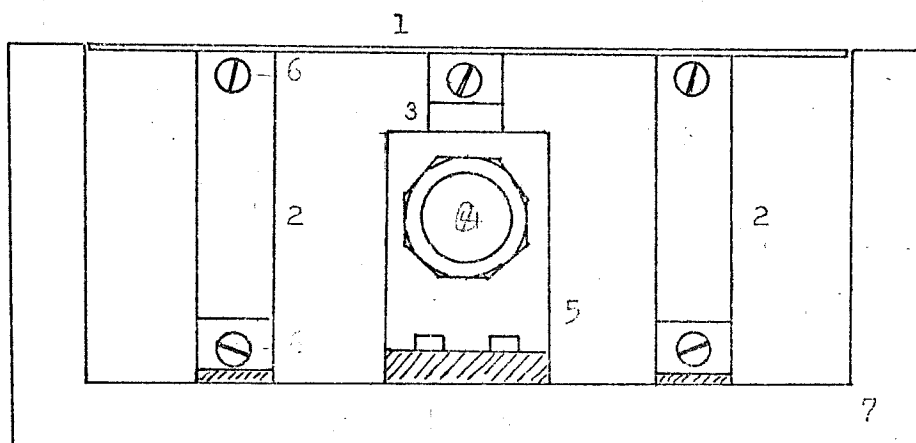
figuur 13

tekening van de schuifspanningsmeter op ware grootte

zijaanzicht



vooraanzicht



- 1 meetplaatje
- 2 bladveren
- 3 metalen stripje tbv verplaatsingsopnemers
- 4 verplaatsingsopnemers
- 5 steun verplaatsingsopnemer
- 6 konstruktie tbv inklemming bladveren
- 7 kunststof huis

figuur 14

5. IJken meetinstrument

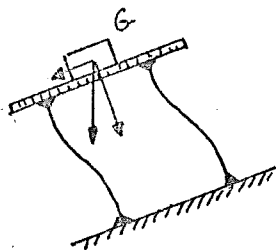
De schuifspanningsmeter wordt staties geijkt door het toestel in een scheefstand (bijvoorbeeld helling van 1 : 3) te plaatsen.

Wanneer gewichtjes op het meetplaatje gelegd worden zal het veersysteem een verplaatsing ondergaan.

Verondersteld wordt dat de ontbondene van het gewicht langs de helling deze verplaatsing veroorzaakt.

De ontbondene loodrecht op het meetoppervlak zal slechts verplaatsingen teweegbrengen welke van de tweede orde zijn.

Deze veronderstelling kan gecontroleerd worden door de meting onder verschillende hoeken uit te voeren.



figuur 15

Het minimummeetbereik ligt bij een schuifspanning van ca. $\tau = 1 \text{ N/m}^2$. Bij deze waarde worden trillingen in het gebouw, goot, enz. geregistreerd.

Het eigen gewicht van het meetplaatje plus de andere bewegende delen is $m = 0,029 \text{ kg}$. Dit is bepaald door de verplaatsingen, ten gevolge van het eigen gewicht, onder verschillende hoeken te meten.

De eigenfrequentie varieert van:

$$f=49 \text{ hz} \quad , \quad \omega=308$$

tot

$$f=40 \text{ hz} \quad , \quad \omega=250$$

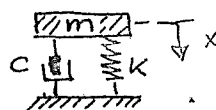
afhankelijk van hoeveelheid zand geplakt op het plaatje.

Hoewel bij het ontwerp geen rekening gehouden is met damping, is die er wel.

Deze damping zal voornamelijk veroorzaakt worden door het metalen stripje dat tussen de verplaatsingsopnemers in het water steekt.

De vrije trilling van een gedempt veersysteem kan als volgt beschreven worden (ref 6).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$



figuur 16

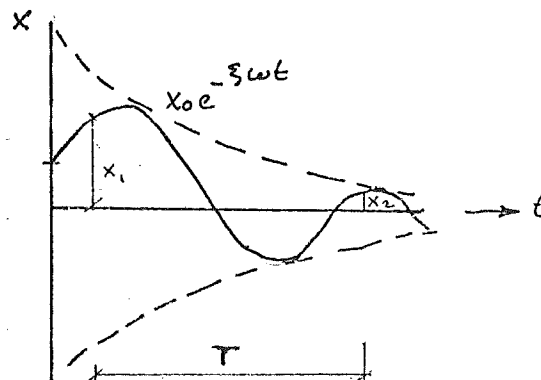
de respons van deze trilling is

$$x = x_0 e^{-\xi \omega t} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega t - \phi)$$

waarin:

$$\xi = \frac{c}{c_r}$$

$$c_r = 2m\omega$$



De demping ξ is te bepalen aan de hand van het logarithmies decrement. Dit is de logarithme van het quotient van twee opvolgende waarden van de respons x die over een periode T ten opzichte van elkaar verschoven liggen. Dit decrement is konstant.

$$\Delta = \frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-\xi \omega t}}{e^{-\xi \omega (t+T)}}$$

dan is, $\log \Delta = \xi \omega T$

Bij de schuifspanningsmeter is Δ over 10 trillingen,

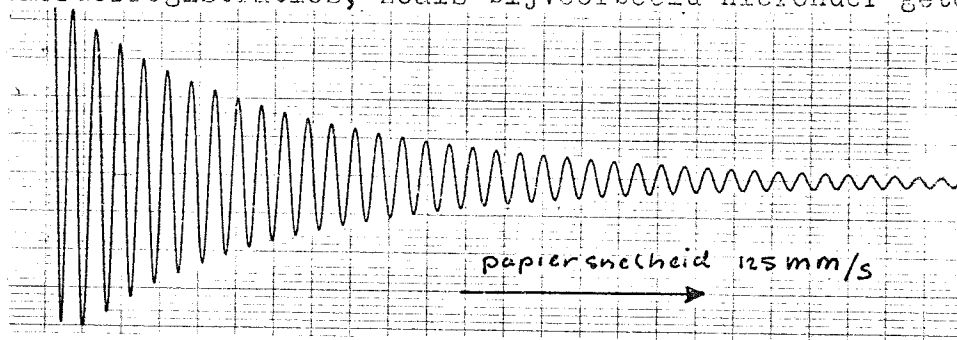
$$\Delta = 4,5$$

dan $\xi \omega 10T$

$$\Delta = e$$

$$\xi = 0,024$$

De eigenfrequentie en demping zijn bepaald aan de hand van rekorderregistraties, zoals bijvoorbeeld hieronder getoond.



figuur 17

6. Testen schuifspanningsmeter

6.1. Inleiding

De schuifspanningsmeter is ontworpen om schuifspanningen ten gevolge van golfoverslag aan het binnentalud te meten. Omdat die schuifspanningen niet goed te voorspellen zijn, zal er altijd twijfel zijn omtrent de juiste werking van de schuifspanningsmeter. Wanneer nu het instrument getest wordt in een bekende situatie, uniforme stroming, kan de juiste werking ervan nagegaan worden. De resultaten echter van deze test zullen niet volledig uitsluitel geven ten aanzien van de juiste werking van het meetinstrument bij golfoverslag.

De wijze van belasting is bij golfoverslag anders dan bij uniforme stroming.

Bij de uniforme stroming geldt dat,

$$\tau_0 = \rho g R i$$

Door meting van het verhang i kan de bodemschuifspanning berekend worden.

6.2. meetopstelling

De schuifspanningsmeter is getest in een houten pijpleiding met een vierkante doorsnede van 0,12 x 0,12 m (zie figuur 18). De lengte van de leiding is 10 m, om zodoende een volledig ontwikkeld snelheidsprofiel aan het eind van de leiding te verkrijgen. Daar is de schuifspanningsmeter in één van de wanden gemonteerd. Hier zijn ook de aansluitingen voor de manometers aangebracht. Met behulp van deze manometers is het verval in piëzometries niveau gemeten.

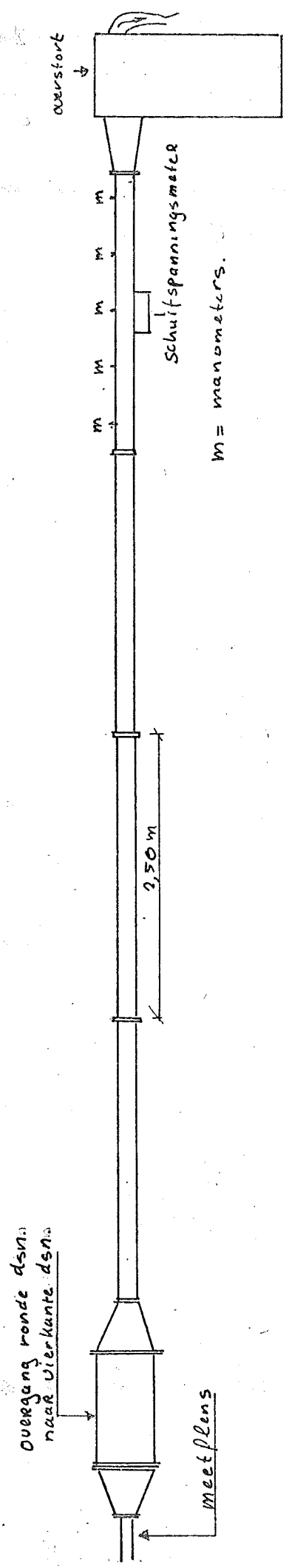
De leiding bestaat uit vier delen van 2,5 m lengte, welke door middel van flenzen verbonden zijn. De leiding is aangesloten op het watercirkulatiesysteem van het laboratorium. Om een overgang mogelijk te maken van de ronde doorsnede van de aansluiting op het watercirkulatiesysteem naar de vierkante doorsnede van de houtenkoker, is de volgende constructie toegepast. De ronde afvoerpijp gaat, via een konies tussenstuk, over in een pijp met grotere diameter. De doorsnede wordt nu weer verkleind met eenzelfde konies tussenstuk. Op de top van deze afgeknotte kegel is een plaat gemonteerd met daarin een vierkante opening ter grootte van de doorsnede van de houten leiding. Inwendig in de kegel zijn stalen platen geplaatst welke pyramidaal naar de vierkante opening toe lopen. Deze constructie is gemaakt om een geleidelijke overgang in de stroming te verkrijgen, teneinde hinderlijke wervels te voorkomen. Aan het begin van het circuit is een meetflens gemonteerd om de debieten te meten.

6.3. de metingen

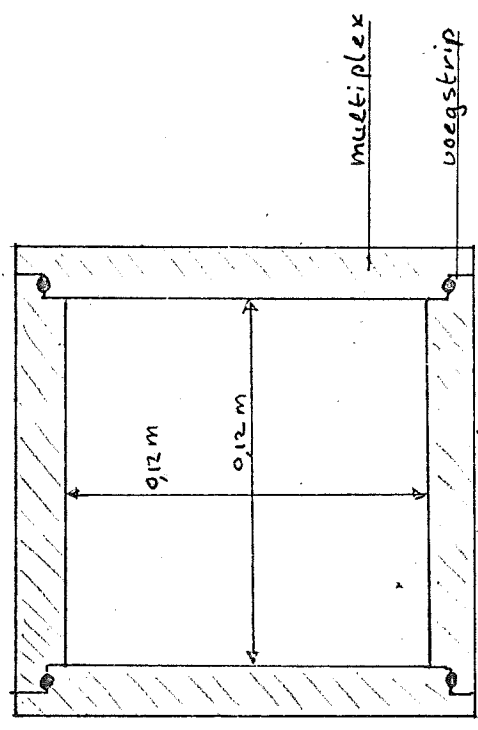
Er zijn twee metingen verricht. Eén meting waarbij zowel leiding als het meetinstrument niet ruw gemaakt zijn ("gladde meting"). En één meting waarbij zowel de leiding als het meetinstrument met zand beplakt zijn. ("ruwe meting")

De schuifspanningsmeter is in beide situaties voor twee aanstroomrichtingen (=omkeren instrument) getest. Zo zouden opvallende verschillen in gedrag van het instrument ten gevolge van oneffenheden op het meetplaatje of ongelijke ligging daarvan ten opzichte van de bodem, opgemerkt kunnen worden. Door het debiet te variëren zijn verschillende verhangen gekreëerd. Deze verhangen zijn gemeten met behulp van 5 manometers, die onderling op 0,5 m afstand gemonteerd zijn.

Tijdens de metingen vielen de volgende verschijnselen op; drukschommelingen in de leiding (vooral bij de "gladde meting") en een grote ruis op het signaal van de schuifspanningsmeter. De drukschommelingen, afkomstig uit het watercirkulatiesysteem, in de orde van één centimeter waterkolom en met een periode van ca. één seconde, bemoeilijkten het aflezen van de manometers. Deze schommelingen waren voor een deel te onderdrukken door ze te dempen met behulp van slangenklemmen op de aansluitingen van de manometers.



Schuifspanningsmeter
 m = manometers.



doorsnede leiding

figure 18

6.3.1 resultaten van de metingen

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in een aantal figuren (19 t/m 24). De figuren 19, 20 en 21 tonen de resultaten van de "gladde" meting, de figuren 22, 23 en 24 van de "ruwe" meting.

In de figuren 19 en 22 zijn de verhanglijnen bij de verschillende debieten als functie van de gemiddelde snelheid weergegeven. De verhangen bij één en hetzelfde debiet vertonen, waar men rechte lijnen verwacht, een geknikt verloop. Een gevolg hiervan is dat verschillende schuifspanningen berekend kunnen worden.

Het signaal van de schuifspanningsmeter vertoont een grote resonantie. In figuren 20 en 23 is weergegeven wat de gevolgen zijn van de onnauwkeurigheden in het verhang en de resonantie in het meetinstrument. Hier zijn de schuifspanningen, als functie van de gemiddelde snelheid, berekend uit het maximum en minimum verhang tussen twee opeenvolgende manometers. In dezelfde figuur zijn de maximum en minimum waarden van de resonantie bij die snelheid aangegeven.

In de figuren 21 en 24 zijn de schuifspanningen, berekend uit gemiddelde verhanglijnen, weergegeven als functie van de gemiddelde snelheid. Ook de gemiddelde waarden van de schuifspanningsmeter zijn in deze figuren als functie van de gemiddelde snelheid uitgezet.

6.3.2 afwijkingen in het verhang

Uit de figuren 20 en 23 blijkt dat de metingen van het verhang bij éénzelfde debiet afwijkingen vertoont. Oorzaken van deze afwijkingen kunnen zijn geweest;

- moeilijkheden met het aflezen van de manometers als gevolg van de drukschommelingen.

- oneffenheden bij de voor de manometers geboorde gaatjes in de houten leiding.

Bij de aanvang van de proeven bleek bijvoorbeeld dat een splinter ter plaatse van een zo'n manometeraansluiting afwijkingen van enige centimeters in de aflezing kan geven.

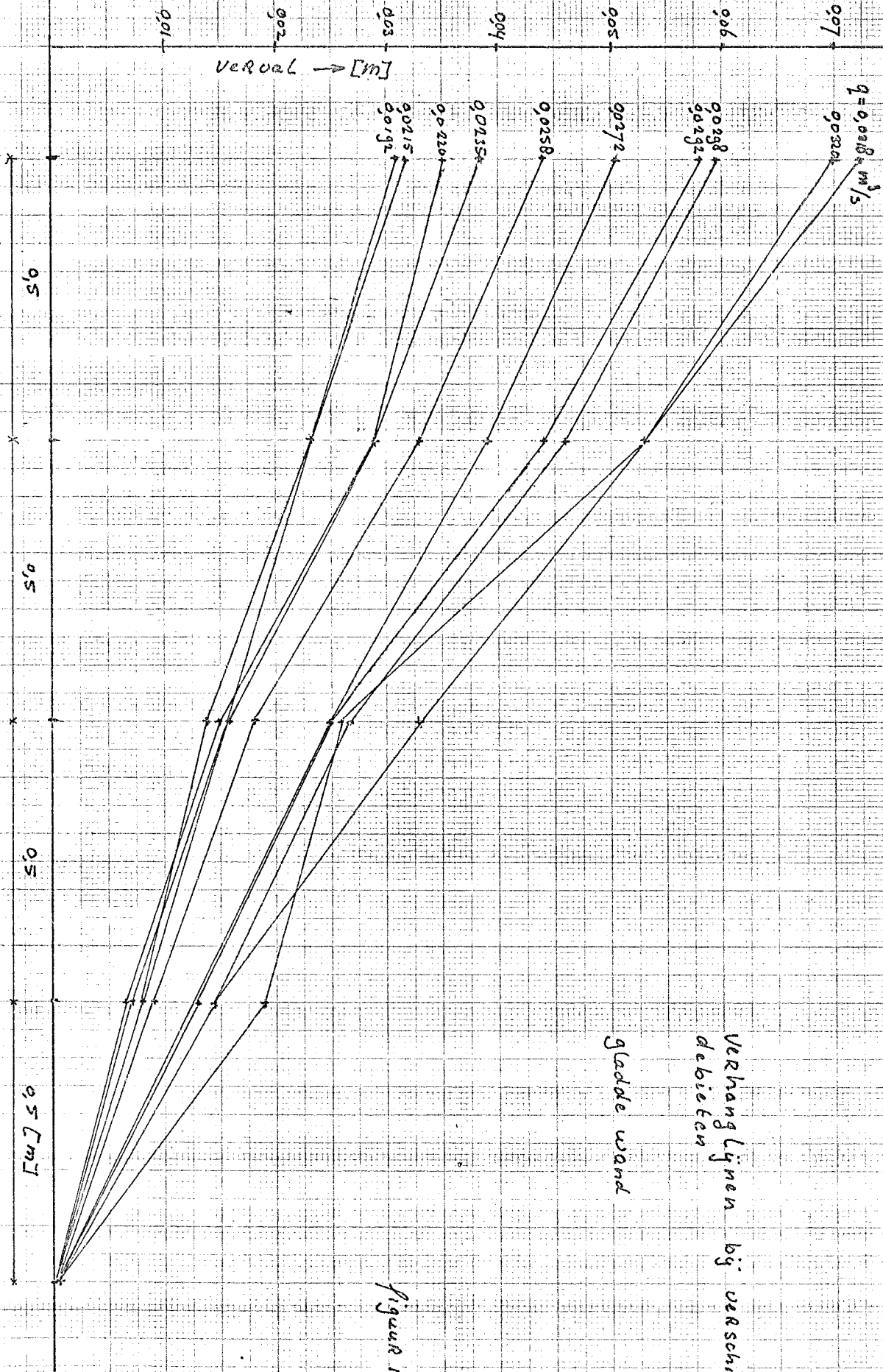
Dit euvel is later verholpen, toch bleven er afwijkingen.

Wellicht zijn minime oneffenheden er al de oorzaak van dat er lokaal stuwings onstaan met als gevolg afwijkingen in de manometeraflecting.

- bij de metingen met de ruwe wand is opvallend de knik in de verhanglijnen ter plaatse van de derde manometer. (zie figuur 18 en 22) Verklaringen zoals hierboven gegeven zijn hiervoor niet van toepassing. Een andere verklaring is; een lekkage bij de schuifspanningsmeter. Deze lekkage door de naden rondom de in de wand gemonteerde schuifspanningsmeter lag in de orde van 1 liter per minuut. Het debiet door de leiding was altijd groter dan 10 liter per seconde. Deze lekkage kan dan ook niet de oorzaak zijn geweest voor de knik in de verhanglijnen.

- profielvernauwing ter plaatse van de schuifspanningsmeter ten gevolge van onjuiste montage van het instrument. Een profielvernauwing zal ter plaatse een drukverlaging geven.

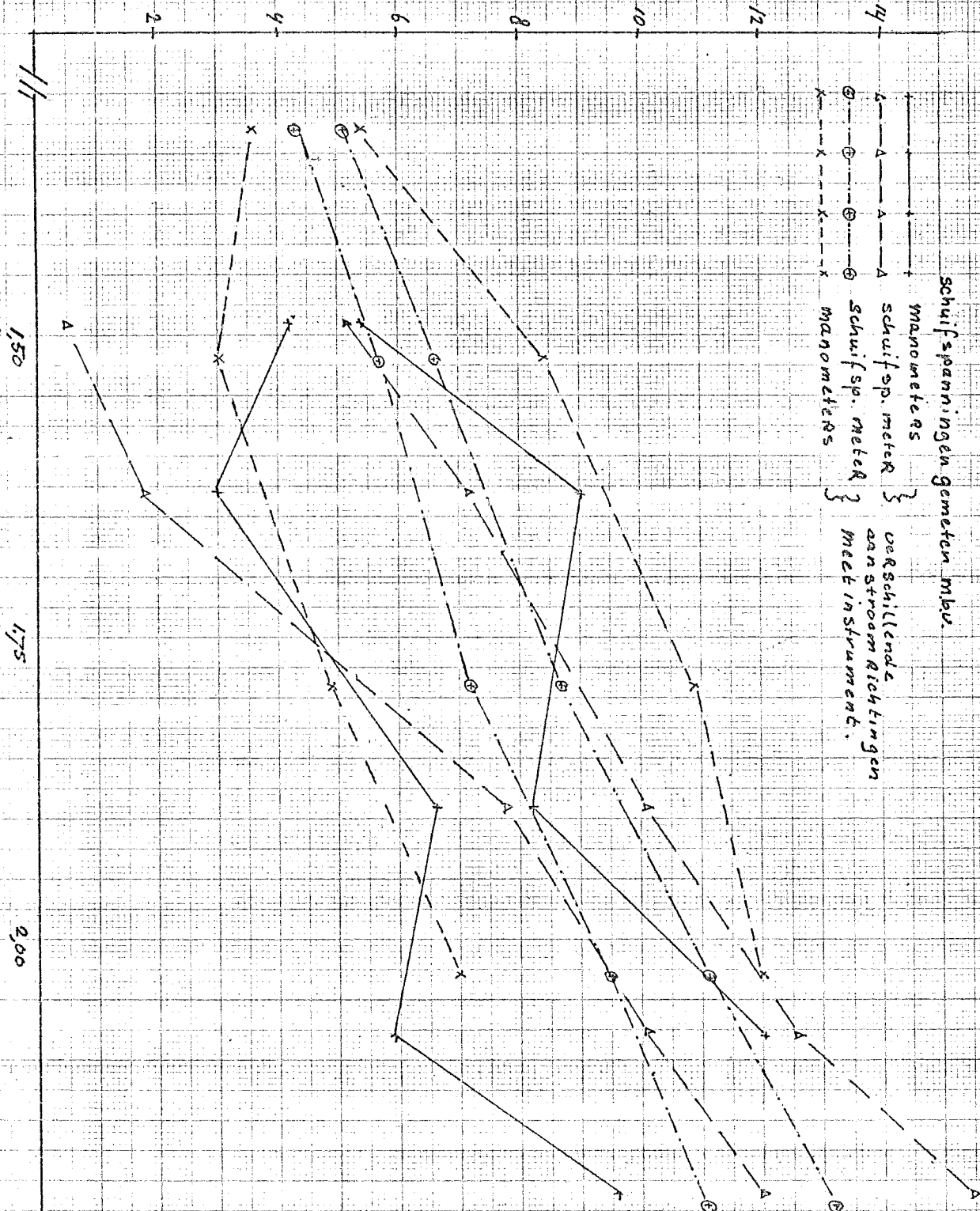
Het water wordt daarna achter de profielvernauwing vertraagd.



Verhanglijnen bij verschillende
 debieten
 glatte wand

figuur 19

schuifspanning $\tau_0 \rightarrow N/m^2$

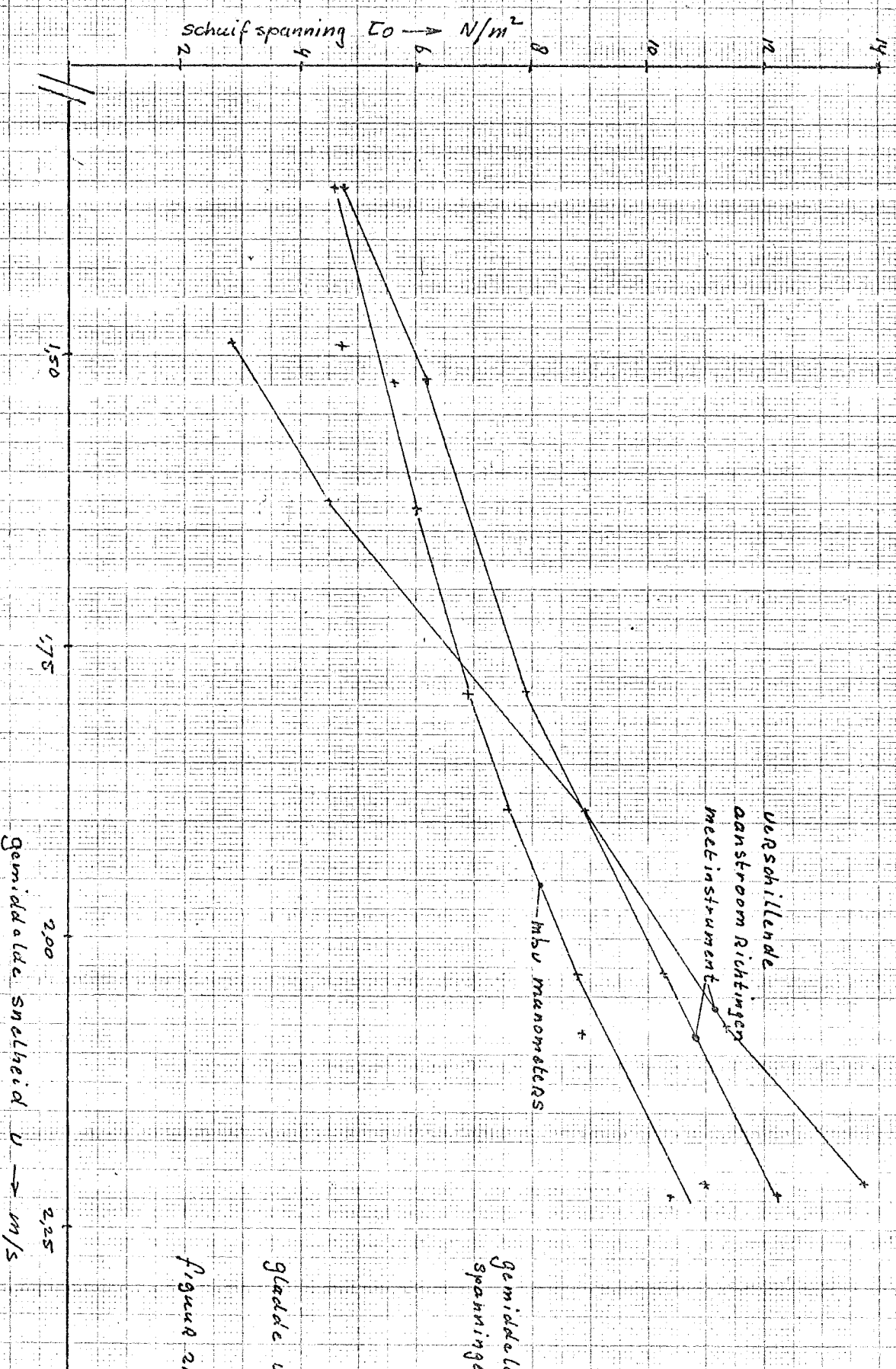


schuifspanningen gemeten mbw.
 manometers
 schuifsp. meter
 schuifsp. meter
 manometers } verschillende aanstroomrichtingen met instrument.

maxima en minima in de schuifspanning t.g.v. variatie in verhang en ruis in de schuifsp. meter.
 glatte wand.

figuur 20

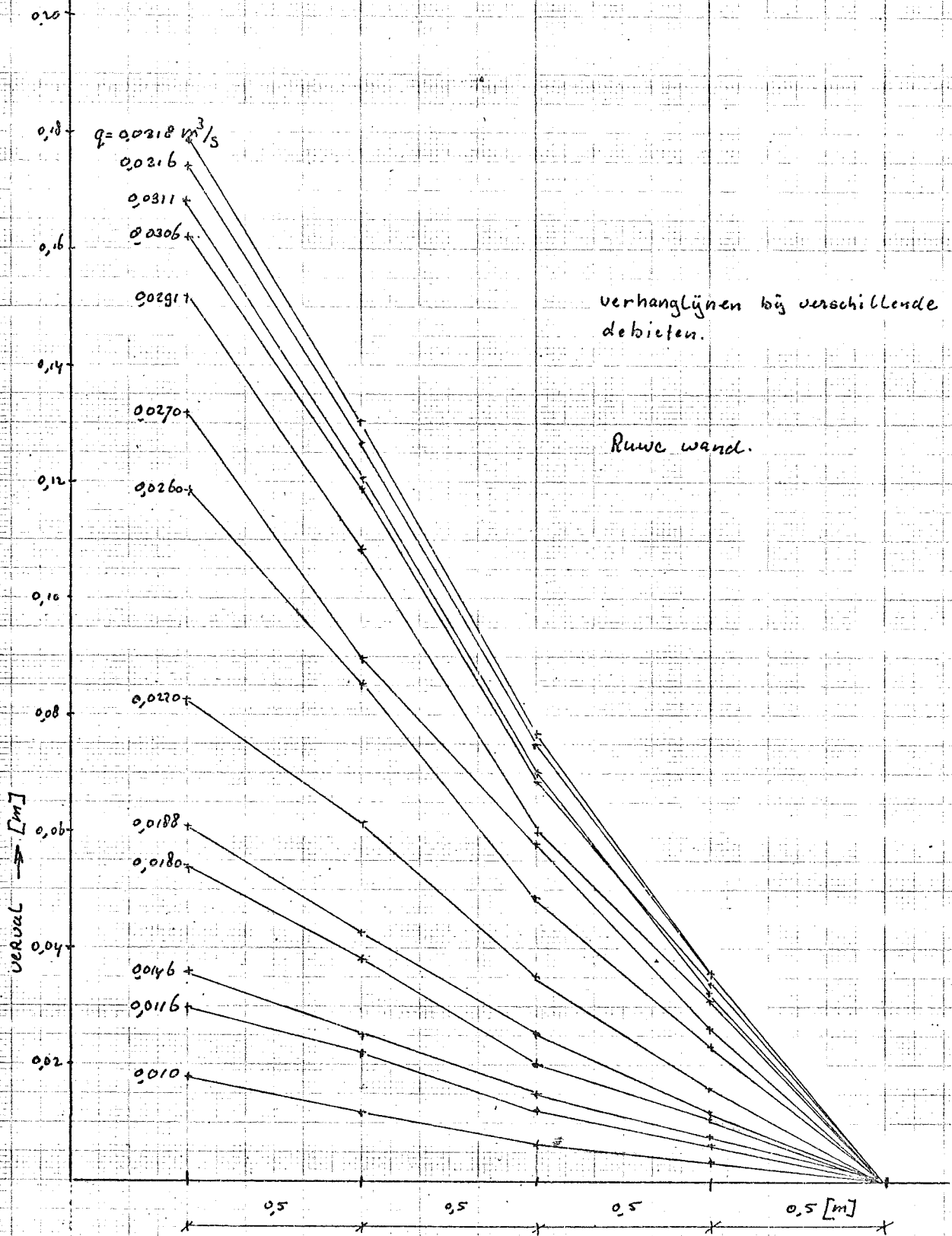
gemiddelde snelheid $V \rightarrow$ m/s



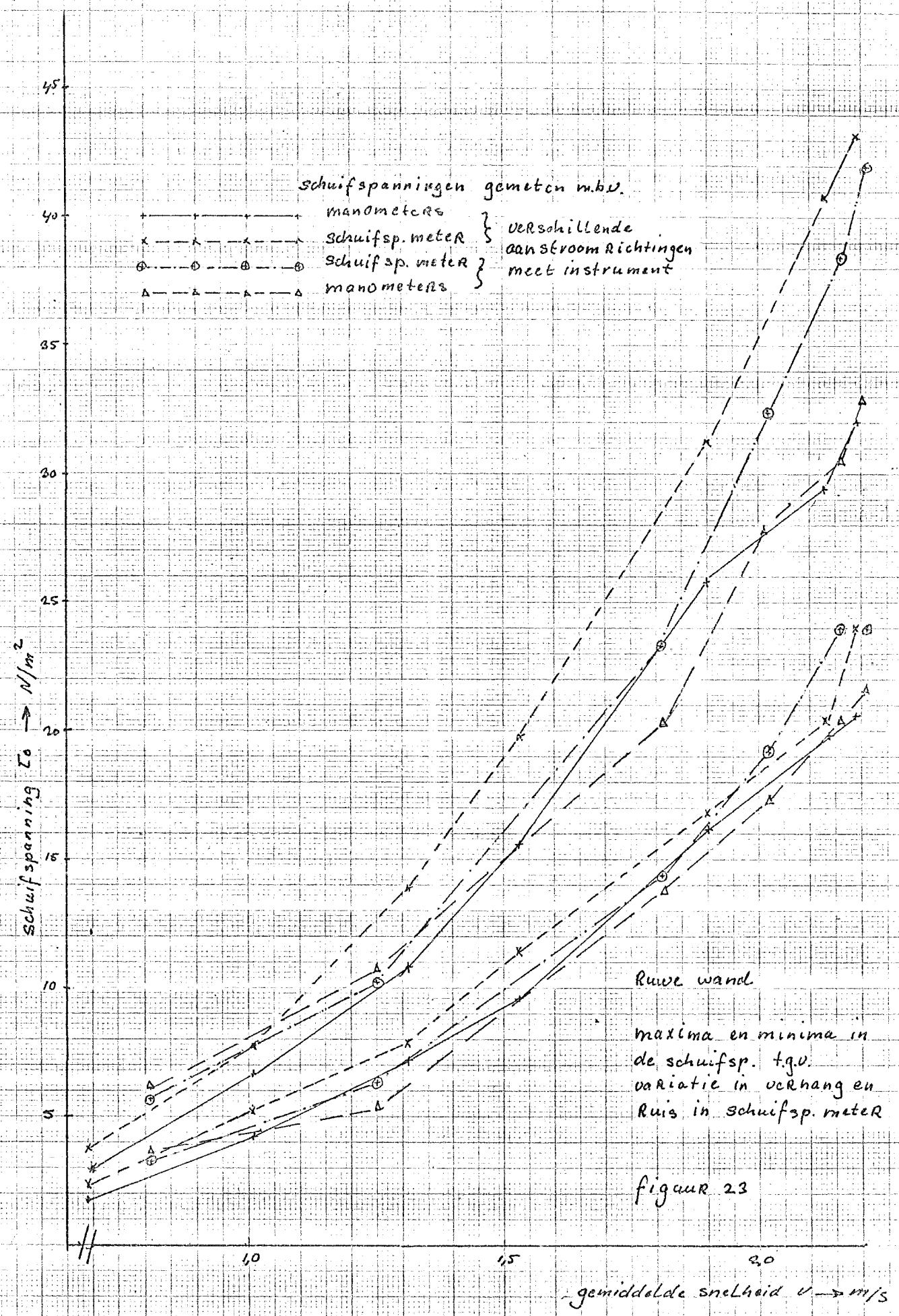
Gemiddelde schuifspanningen.

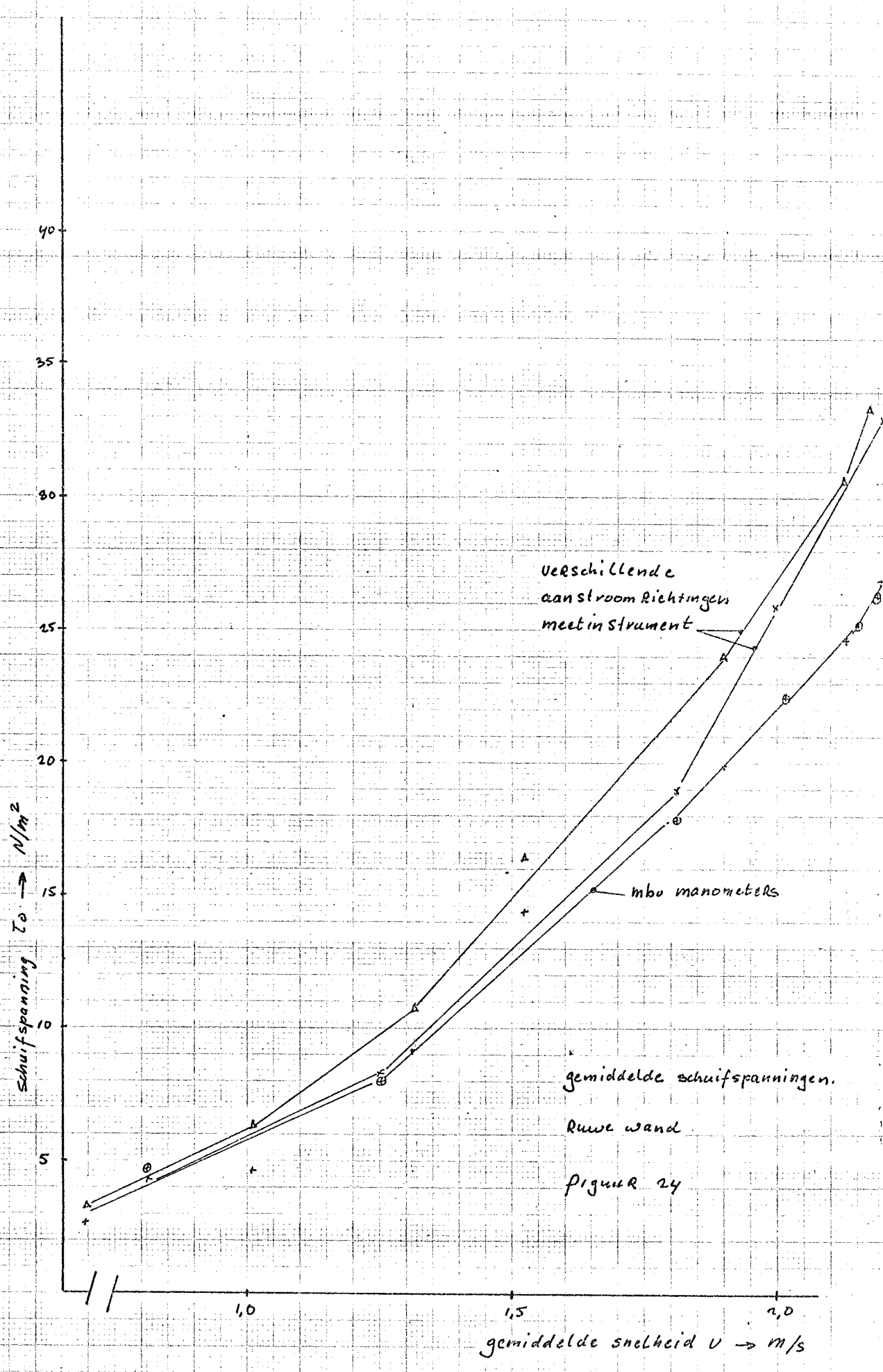
gladde wind

figuur 21



figuur 22



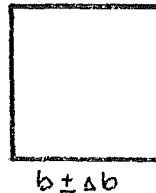


Een vertraging zal met energieverlies gepaard gaan. Aangezien het verhang in de leiding ontstaat door de wrijving langs de wanden, zal in principe een lokaal energieverlies slechts een evenwijdige verschuiving van een gedeelte van de verhanglijn teweeg brengen.

- de knik in de verhanglijn kan ook verklaard worden doordat de diameter van de leiding niet konstant is.

De invloed van de variatie in de doorsnede op het verhang, kan als volgt bepaald worden.

stel de vierkante doorsnede



$$A = b^2$$

$$O = 4b$$

de Chezy ; $v = C \sqrt{Ri}$
 en $q = vA$

$$\text{dan ; } i = \frac{q^2 O}{A^3 C^2} = \frac{4q^2}{b^5 C^2}$$

nu geldt in eerste benadering voor de afwijking F als F = functie (a, b, c,),

$$\Delta F = \left| \frac{\partial F}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial F}{\partial b} \right| \Delta b + \dots$$

$$\text{dan : } \Delta i = \frac{4q^2}{b^5 C^2} \Delta b + 8 \frac{q^2}{b^5 C^3} \Delta C$$

$$\text{voor C geldt bijvoorbeeld } C = 18 \log \frac{12R}{k_s} = 7,8 \ln \frac{3b}{k_s}$$

$$\Delta C = 7,8 \frac{\Delta b}{b}$$

$$\Delta i = \frac{4q^2}{b^5 C^2} \left(5 \frac{\Delta b}{b} + 2 \cdot \frac{7,8}{C} \cdot \frac{\Delta b}{b} \right)$$

$$\Delta i = i \left(5 \frac{\Delta b}{b} + \frac{2}{\ln \frac{3b}{k_s}} \frac{\Delta b}{b} \right)$$

voor $b = 0,12 \text{ m}$ en $k_s = 0,001 \text{ m}$ (nieuwe meting)

$$\frac{\Delta i}{i} = 5,4 \frac{\Delta b}{b}$$

of een relatieve fout in b werkt $\approx 5,5$ x zo sterk door in het verhang.

De maatafwijking in het zaagwerk zal niet veel meer bedragen dan 0,001 m, Een variatie in het verhang van ongeveer 5 % is hiervan te verwachten. Uitzetten van de leiding door de inwendige waterdruk kan ook variatie in de diameter van de leiding tot gevolg hebben. Een andere mogelijkheid is dat het zand (met korreldiameter van 0,001 m), dat geplakt is tegen de wanden, varieert in dikte van de aangebrachte laag.

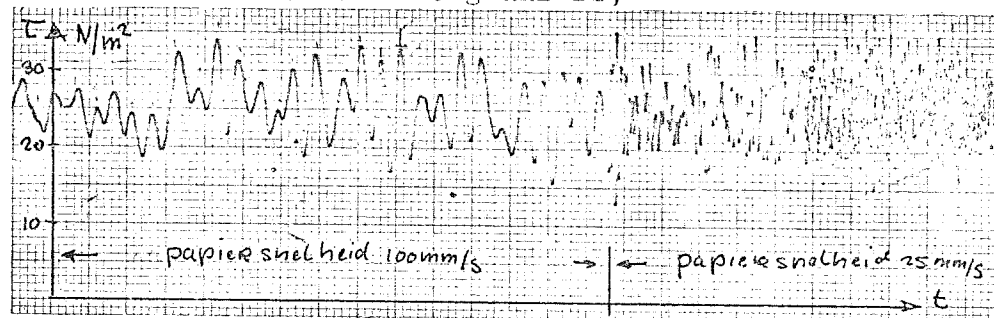
De grote afwijkingen in de verhanglijnen + 20 % zijn te verklaren doordat de hierboven genoemde factoren ieder, in combinatie met elkaar, een rol speelden. De geknikte verhanglijnen bij de ruwe meting zullen voornamelijk veroorzaakt door een variërende diameter.

middelen om de meting te verbeteren zijn:

- verbeteren van de manometeraansluitingen, door bijvoorbeeld het toepassen van metalen buisjes in plaats van geboorde gaatjes.
- aanbrengen van een bufferschacht om de drukschommelingen op te heffen.
- een mogelijkheid om de positie van de schuifspanningsmeter te inspecteren op foutieve plaatsing.
- extra zorg besteden aan de maatvoering en de sterkte-eisen van de verbindingen in de pijpleiding.

6.3.3. De ruis van de schuifspanningsmeter

Het signaal van de schuifspanningsmeter vertoont zowel bij de "gladde" als bij de "ruwe" meting een grote ruis. Een oscillatie met een amplitude van 20 % van de gemiddelde waarde is niet ongewoon. Een voorbeeld van zo'n signaal is;



Een verklaring van dit verschijnsel is dat het meetinstrument in resonantie gebracht wordt.

Wanneer de frequentie van de belangrijkste trilling, aan de hand van de rekorderregistratie, bepaald wordt lijkt dit inderdaad de oorzaak.

bij de "gladde meting" ;

$$\begin{array}{ll} \text{oscillatie } \Omega \approx 53 & \text{hz} \\ \text{eigenfrequentie meetinstrument} & \omega = 49 \quad \text{hz} \\ \text{demping meetinstrument} & \xi = 0,024 \end{array}$$

de opslingeringsfactor is: (zie ref 6)

$$H(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2})^2 + (2\xi \frac{\Omega}{\omega})^2}}$$

dan is $H(\Omega) = 5,6$

Bij de "ruwe" meting is de ruis bij hogere debieten groter dan bij de lagere.

de eigenfrequentie meetinstrument $\omega = 43$ hz
demping meetinstrument $\xi = 0,024$

Bij kleinere debieten is de oscillatie $\Omega = 49$ hz.

dan $H(\Omega) = 3,3$

Bij grotere debieten $\Omega = 40$ hz.

dan $H(\Omega) = 7,0$.

Een onderlinge vergelijking van deze resultaten met de gemeten amplitudes lijkt in overeenstemming met de hierboven gevonden waarden.

Een verklaring voor de trilling kan zijn;

- In de naden rondom het meetplaatje ontstaat een zichzelf exciterende kracht; met als oorzaak drukverschillen in de naad.
- turbulentie van de grenslaag.

De konklusie ten aanzien van het verschijnsel ruis is dat wil men in deze situatie de schuifspanning meten, dat dan de eigenfrequentie ω van het instrument drasties verlaagd moet worden. Deze kan verlaagd worden door dunnere bladveren te monteren.

6.3.4. De ruwheid van de leiding

Met behulp van het debiet en de formule van de Chezy kan de ruwheid k_s volgens Nikuradse berekend worden.

De formules zijn:

$$v = c \sqrt{Ri} \quad ; \quad c = 18 \log \frac{12 R}{k_s + 13,2}$$

waarin de grenslaag $\delta = \frac{11,6 \nu}{u_*}$

met $u_* = \sqrt{gRi}$

De 'dikte van de grenslaag δ kan met behulp van u_* direkt uit het verhang berekend worden. Wanneer gemiddelde waarden van het verhang bij ieder debiet bij de berekening gebruikt worden, vindt men de volgende waarden voor de dikte van de grenslaag en ruwheid k_s . zie tabel 6

v (m/s)	i gem.	δ (m)	k_s (m)
1,33	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$0,81 \cdot 10^{-4}$
1,49	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$0,03 \cdot 10^{-4}$
1,52	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$0,53 \cdot 10^{-4}$

tabel 6

tabel 6 vervolg

v (m/s)	i gem.	δ (m)	k_s (m)
1,65	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$0,27 \cdot 10^{-4}$
1,79	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$0,17 \cdot 10^{-4}$
1,39	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^{-4}$
2,08	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^{-4}$
2,21	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$0,21 \cdot 10^{-4}$

tabel 6

De afwijkingen in de ruwheid k_s zijn aanzienlijk.
Ook kan men konkluderen dat de dikte van de grenslaag groter is dan de ruwheid k .

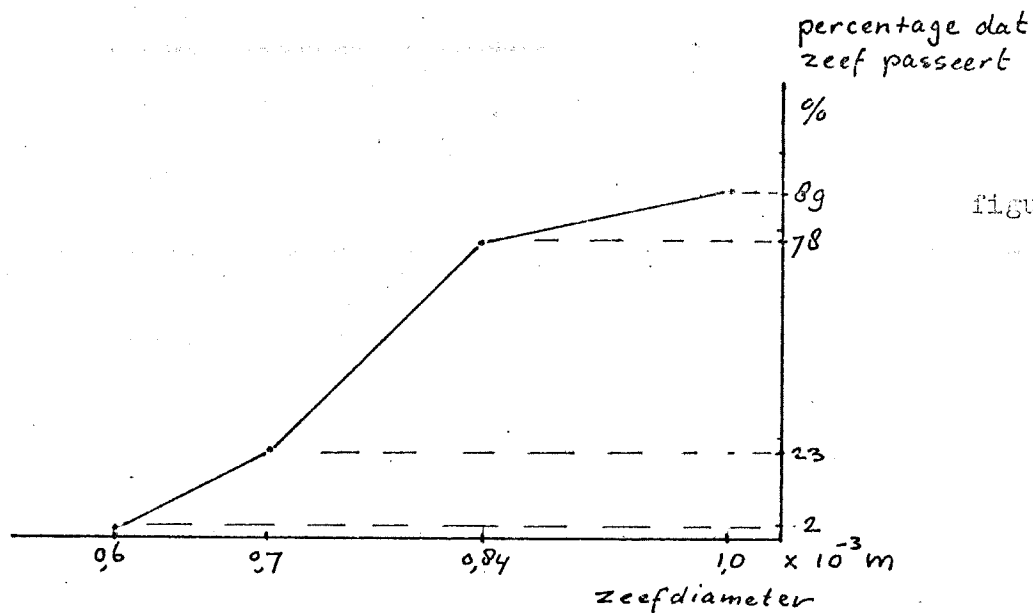
Uit bovenstaande blijkt dat bij de "gladde" meting de wrijving voor een groot deel bepaald wordt door de grenslaag. Het is de vraag of gebruik van het meetinstrument in deze situatie zin heeft. Immers de naden rondom het meetplaatje hebben een breedte van $\approx 2 \times 10^{-4}$ m. Het meetplaatje en de omliggende bodem zullen nooit in één vlak liggen. Oneffenheden in de orde van 10^{-4} m zijn niet ondenkbaar. In hoeverre zullen deze verschijnselen de grenslaag verstoren?

Bij de "ruwe meting" worden de volgende waarden voor k_s berekend

v (m/s)	i gem.	δ (m)	k_s (m)
0,69	$0,84 \cdot 10^{-2}$	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$13,1 \cdot 10^{-4}$
1,01	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$12,9 \cdot 10^{-4}$
1,31	$3,06 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$13,9 \cdot 10^{-4}$
1,53	$4,82 \cdot 10^{-2}$	$0,93 \cdot 10^{-4}$	$20,9 \cdot 10^{-4}$
1,90	$6,52 \cdot 10^{-2}$	$0,80 \cdot 10^{-4}$	$14,5 \cdot 10^{-4}$
2,13	$8,24 \cdot 10^{-2}$	$0,71 \cdot 10^{-4}$	$14,8 \cdot 10^{-4}$
2,19	$8,84 \cdot 10^{-2}$	$0,69 \cdot 10^{-4}$	$15,4 \cdot 10^{-4}$

tabel 7

Een zeefanalyse van het in de leiding geplakte zand leert;



Uit figuur 26 blijkt dat de ruwheid hoofdzakelijk bepaald wordt door de grootste frakties in het zand.

6.4. konklusie

De konklusies ten aanzien van het testen van de schuifspanningsmeter in de pijpleiding zijn;

- De metingen van de schuifspanningen, zowel berekend uit het verhang als bepaald met de schuifspanningsmeter, zijn onnauwkeurig.
- Het verloop en de absolute grootte van de gemiddelde schuifspanningen onderling, als functie van de gemiddelde snelheid vertonen, althans gezien de nauwkeurigheid, een redelijk goede overeenstemming (zie figuur 21 en 24).
- Een verbetering van de proefopstelling zal de nauwkeurigheid van de proefneming vergroten.
- De schuifspanningsmeter toepassen voor metingen van schuifspanning aan wanden met een ruwheid vergelijkbaar met die van de "gladde" meting is minder aanvaardbaar.

7. Wrijvingskrachten op het binnentalud ten gevolge van golfoverslag.

7.1. Inleiding.

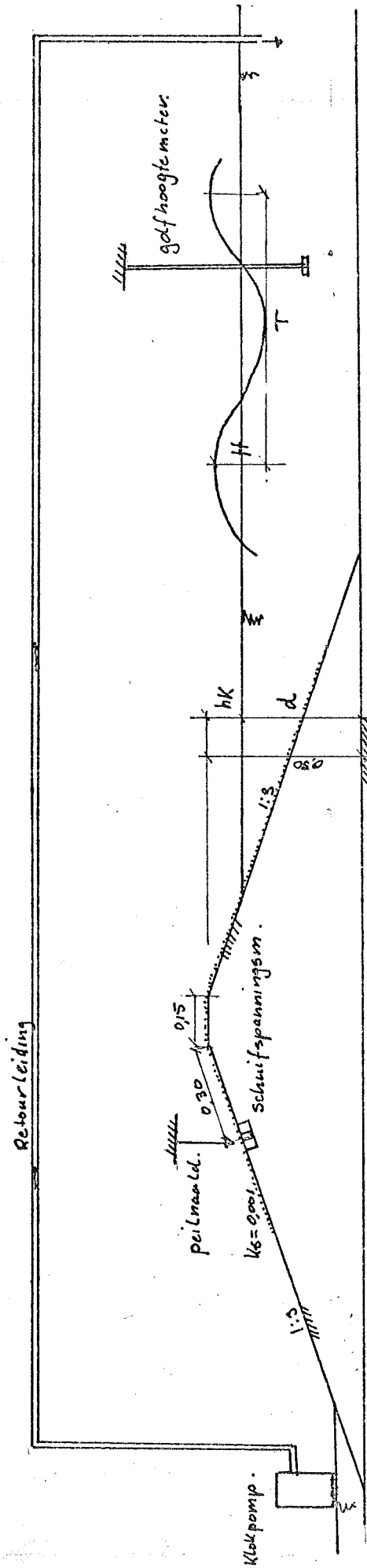
De proeven waarin de wrijvingskrachten op het binnentalud ten gevolge van golfoverslag zijn gemeten, zijn uitgevoerd in de korte speurwerk-goot van het laboratorium voor Vloeistofmechanika.

Deze goot is 10 m lang 0,8 m hoog en 0,5 m breed.

De golven (regelmatige) worden opgewekt met behulp van een golfschot aan het uiteinde van de goot. De proefopstelling met daarin het dijkprofiel, de positie van de schuifspanningsmeter, enz. zijn aangegeven in figuur 27.

De vormgeving van het dijkprofiel en de positie van de schuifspanningsmeter zijn in het experiment niet gevarieerd.

meetopstelling wrijvingskrachten t.g.v. golfoverslag.



figuur 27

De periode van de golf T , de golfhoogte H en de afstand van de kruin ten opzichte van de gemiddelde waterstand h_k ofwel de waterdiepte d zijn in de proefnemingen gevarieerd.

Bij iedere h_k (0,01 - 0,04 - 0,08 - 0,12 - 0,17 m) zijn bij verschillende golfperiodes (2,25 - 1,60 - 1,36 - 1,08 - 0,94 sekonde), de golfhoogten (0,03 - 0,20 m gevarieerd).

Gemeten zijn; de schuifspanning, de golfhoogte, de golfperiode, en de waterlaagdikte op het binnentalud.

Van deze waterlaagdikte op het binnentalud is slechts de top van de golf gemeten (m.b.v. een peilnaald). Meten van waterlaagdikten met een golfhoogtemeter is onmogelijk gezien de dunne waterlagen en hoge snelheden van dit water.

7.2. Beschrijving van de metingen

Tijdens de proeven zijn de golfperiodes en golfhoogten zo gekozen dat een zo weinig mogelijk gestoorde golf ontstond.

Vooral bij periodes groter dan 1,6 seconden geeft dit problemen, vanwege reflectie tegen het dijkprofiel.

Het lijkt erop alsof grotere golf lengten niet in de goot (10 m) passen. Om dezelfde reden zijn er bij bepaalde waterdiepten en golfperiodes beperkingen met betrekking tot variatie in golfhoogte.

Om het gemiddelde waterniveau te handhaven is gebruik gemaakt van een klokpomp (capaciteit ca. 2 liter/sekonde) welke het overgeslagen water terug pompte.

De capaciteit van deze pomp was in vele gevallen niet voldoende om het waterniveau te handhaven.

Daardoor kon in de situaties tijdens de metingen slechts gebruik gemaakt worden van de eerste paar golven, waarna de golfopwekker gestopt moest worden.

Door de variatie in H , T en h_k is er een verscheidenheid van situaties waaruit golfoverslag zal ontstaan.

- $h_k = 0,01$ m : In deze situatie is nooit sprake van gdfoploop. De overslag bij golven met periode $T = 2,25$ sekonde ontstaat uit een tijdelijke verhoging van de waterstand waardoor het water wegstroomt, de golf breekt niet.

De golven met kleinere periodes breken met een klap (luchtinsluiting) in het golfdal. Het breken van deze golf lijkt op het type "Plunging breaker". Na het breken schiet het water met grote snelheid omhoog. Er is bij deze h_k echter geen ruimte voor golfoploop.

Bij de groter golfhoogten wordt een gedeelte van het water in de lucht geslingerd, waarna het later op het binnentalud terugvalt.

Bij de andere waarden voor h_k doet zich het volgende voor; Golven met periode $T = 2,25$ sekonde breken zonder al te veel geweld en zonder luchtinsluiting. Het water stroomt rustig omhoog. Golven met periode van $T = 1,6$ of kleiner breken zoals eerder beschreven volgens het type "Plunging Breaker". Bij de grotere golfhoogten wordt weer een gedeelte van het water in de lucht geslingerd.

Bij waarden van $h_k \geq 0,08$ m geven geleidelijk aan steeds minder golven aanleiding tot overslag.

Na het breken van de golf, verdraagt het water op het buitentalud. Na het bereiken van de kruin plant de golf zich met een zekere snelheid voort.

Nabij de binnenkruinlijn ondervindt het water een plotseling grote versnelling.

Op het binnentalud plant de golf zich verder versneld voort.

Er is altijd een steil golffront, in vele gevallen is dit echter niet de top van de golf.

De maximale dikte van de waterlaag wordt even daarna bereikt.

Daarna neemt de dikte van de waterlaag af. Vrijwel nooit valt het binnentalud droog. Na het passeren van een golf is er een waterfilm aanwezig met aanzienlijk lagere watersnelheden, waarna de volgende golf zich aandient.

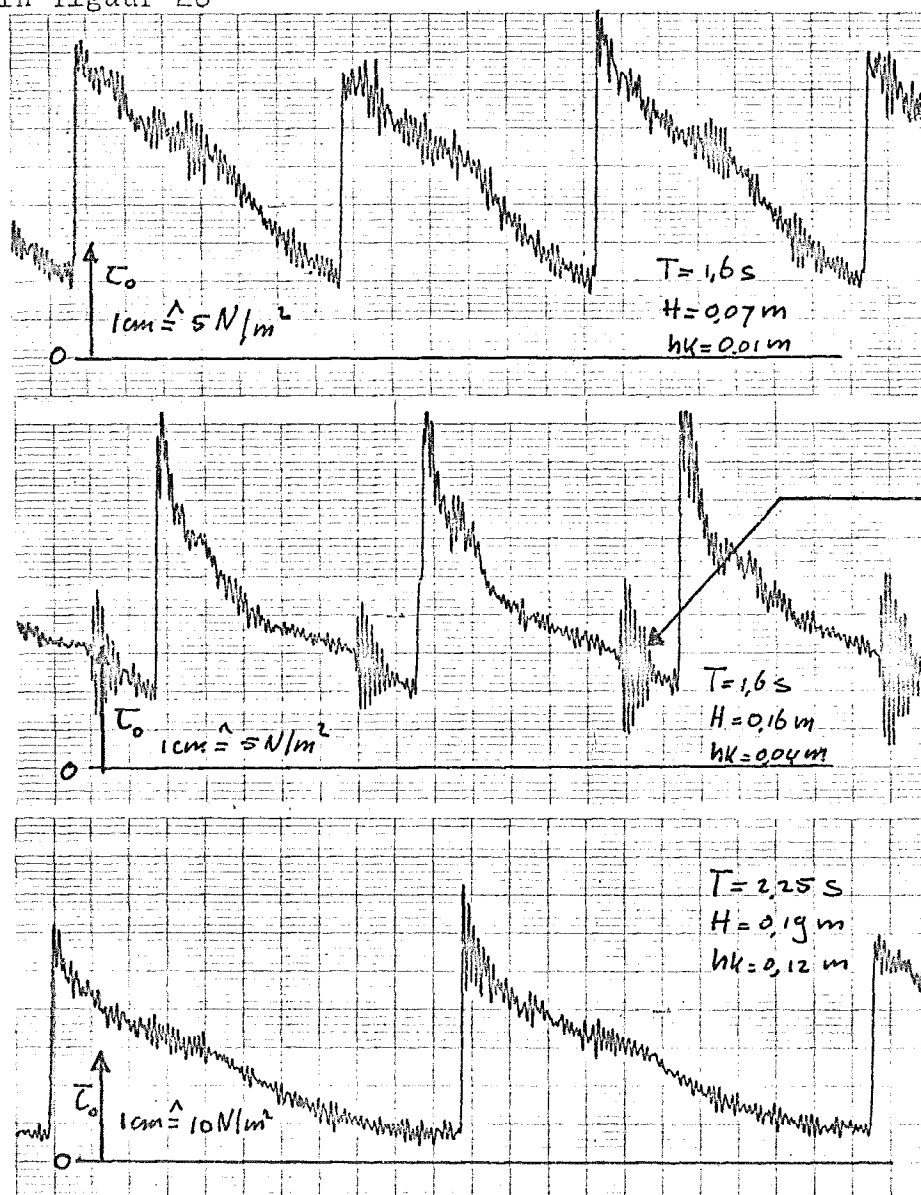
In het water bevinden zich luchtbelllen, vooral bij golven die met veel geweld gebroken zijn. Op het golffront bevinden zich dikwijls luchtblaasjes.

7.3. De wrijvingskrachten

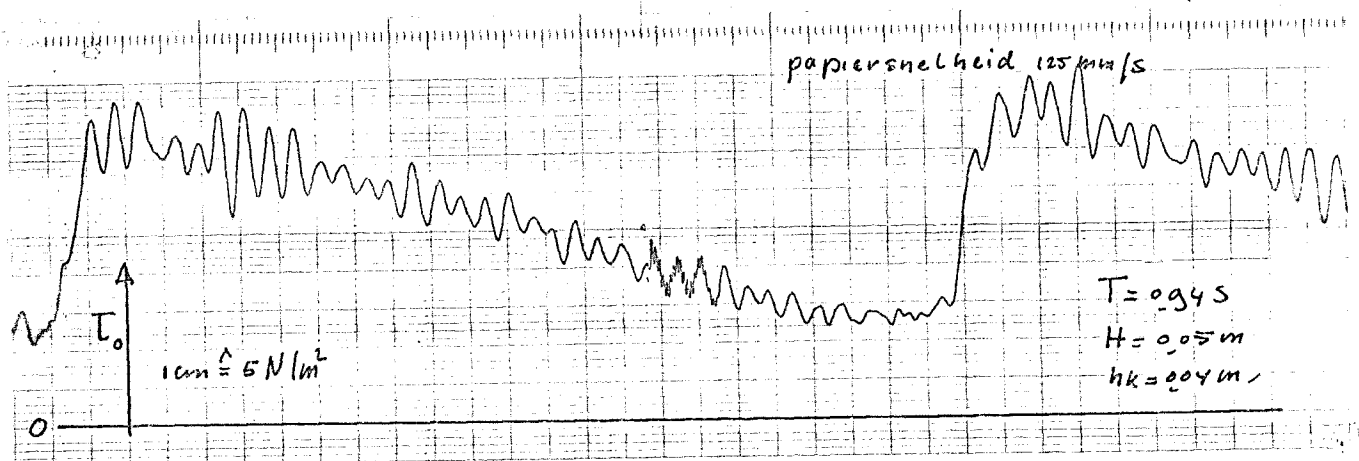
De wrijvingskrachten gemeten als functie van de tijd vertonen steeds een driehoeksvormig verloop.

Enkele karakteristieke voorbeelden zijn hieronder gegeven.

In figuur 28



Golf breekt met een klap op het buitentalud. De trilling in het houten dijkprofiel wordt door de schuifspanningsmeter geregistreerd.



figuur 28

Opvallend is de zeer snelle toename van de schuifspanning. De tijd nodig om aan een zekere waarde de topwaarde te bereiken is wellicht de tijd dat het golffront zich van het begin van het meetplaatje naar het eind daarvan (0,03 m) verplaatst.

Aan de hand hiervan kan de snelheid van de voortplanting van het golffront geschat worden. Deze ligt in de orde van 0,5 - 1,0 m/sekonde

De grootste schuifspanningen treden dus op in het steile golffront, hoewel dit niet altijd de golftop is.

Door de grote snelheidsgradienten, die in het golffront voorkomen, is dit kwalitatief te verklaren.

De directe afname van de schuifspanning zal echter slechts dan te verklaren zijn wanneer de snelheid van de waterdeeltjes bekend is.

Een belangrijk ontwerpkriterium voor het meetinstrument was de eigenfrequentie. Uit de proefresultaten blijkt dat de eigen-trillingstijd en de belastingstijd van het meetplaatje in dezelfde orde liggen, namelijk 0,02 sekonde.

Het toestel wordt dan ook zoals verwacht aangeslagen in de eigenfrequentie. De amplitude van deze eigenfrequentie is echter in vrijwel alle gevallen klein t.o.v. het totale signaal.

De trilling zet zich voort gedurende de tijd van één golfoverslag. De ruis van het signaal is, in vergelijking met de proeven in de pijpleiding veel geringer. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de grenslaag en de turbulentie daarvan in het versnelde en daarna weer vertraagde water minder tot ontwikkeling kan komen.

De schuifspanning bereikt nooit de waarde van nul tijdens de overslag. Dit is te wijten aan de waterfilm van ca. 0,002 m dikte die na het passeren van de overgeslagen golf nog aanwezig is.

7.4. Verwerking van de schuifspanningsgegevens

Een dimensieanalyse van het verschijnsel overslag leert dat de schuifspanning aan het binnentalud een functie van de volgende parameters zal zijn.

$$\tau_0 = f(h_k, H, d, T, L, g, \rho, \nu, k_s, F)$$

waarin L = golflengte
 ν = kinematische viscositeit
 k_s = ruwheid
 F = geometrie van het dijlichaam, positie meetinstrument.

De oppervlaktespanning en kompressibiliteit, en de luchtinsluiting zijn hier buiten beschouwing gelaten.

Een aantal dimensieloze getallen zijn met behulp van de dimensieanalyse te vormen.

Met deze getallen is getracht een experimentele relatie te vinden tussen de afhankelijke grootheid en de onafhankelijke grootheden h_k , H, d en T.

De waterlaagdikte a is niet betrokken in deze analyse omdat de meting hiervan onvolledig en onnauwkeurig was.

Als resultaat van de onderzoeken waren er twee dimensieloze getallen met een zeker onderling verband. De toevoeging van de schuifspanning τ_0 is dimensieloos gemaakt door deze te delen door $\rho g h_k$. Het andere getal is de verhouding tussen de golfhoogte H en de relatieve kruinhoogte h_k .

De resultaten hiervan zijn weergegeven in de figuren 29 t/m 33, waarbij voor iedere golfperiode T een afzonderlijke figuur gemaakt is. Verder zijn in ieder figuur de afzonderlijke punten aangegeven bij welke verhouding van de waterdiepte d en relatieve kruinhoogte h_k deze schuifspanningen behoren.

Een andere duidelijke korrelatie tussen de schuifspanningen op het binnentalud en de variabelen zoals de golfhoogte, golflengte, enz. werd niet gevonden.

Dit is niet zo verwonderlijk want een belangrijke schakel in het onderzoek, meting van de watersnelheden, de versnellingen daarvan en de waterlaagdikten, ontbrak.

Deze grootheden en de ruwheid van de dijk zullen de schuifspanning bepalen.

De figuren 29 t/m 33 suggereren een mogelijkheid tot het trekken van een gemiddeld lijn, die de afzonderlijke stippellijnen voor één en dezelfde h_k/d verbindt.

Verschillende gemeten punten zullen echter ververwijd rd van deze lijn liggen. Een berekening van de schuifspanning aan de hand van de golfhoogte en de gemiddelde lijn zal gezien het gemeten bereik (van 6 - 40 N/m²) tot grote afwijkingen kunnen leiden. Dit in vergelijking met de in de proeven bij die golfhoogte gemeten schuifspanningen.

Een vergelijking tussen de figuren 29 t/m 33 onderling toont dat bij kleinere golfperiodes en bij een zelfde golfhoogte de schuifspanningen zullen afnemen.

Ook hier is deze trend niet altijd even duidelijk, zie bijvoorbeeld figuren 30 en 31 voor T is resp. 1,08 seconde en 1,36 seconde.

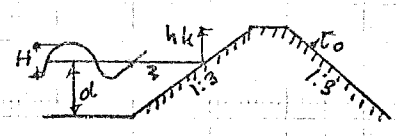
Afwijkend zijn de resultaten van figuur 33 voor T = 2,25 seconde.

Men zou hier in vergelijking met de andere figuren hogere waarden verwachten voor $\tau_0 / \rho g h_k$ bij een zelfde H/ h_k .

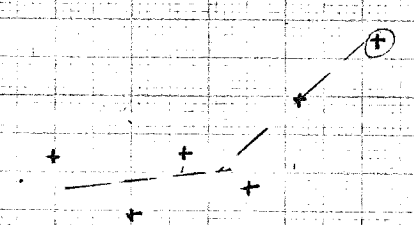
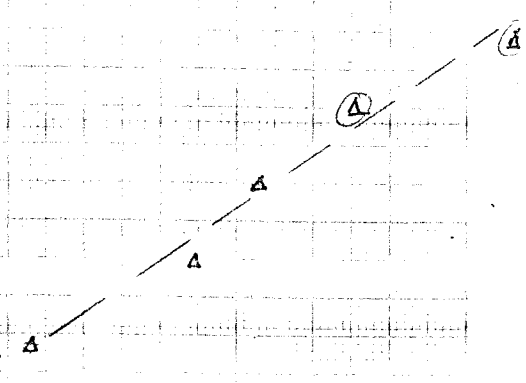
De verklaring hiervoor is dat bij deze periode de golven op een andere wijze breken.

0,40
0,30
0,20
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,008
0,006
0,004

Ruwheid $k_s = 0,001 \text{ m}$



$\frac{v_0}{\rho g h k}$



$T = 0,94 \text{ sek}$

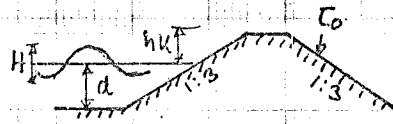
- Δ - - Δ - - Δ - $\frac{hk}{d} = 0,020$
- + - - + - - + - $\frac{hk}{d} = 0,017$
- o - - o - - o - $\frac{hk}{d} = 0,010$

0,6 0,8 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

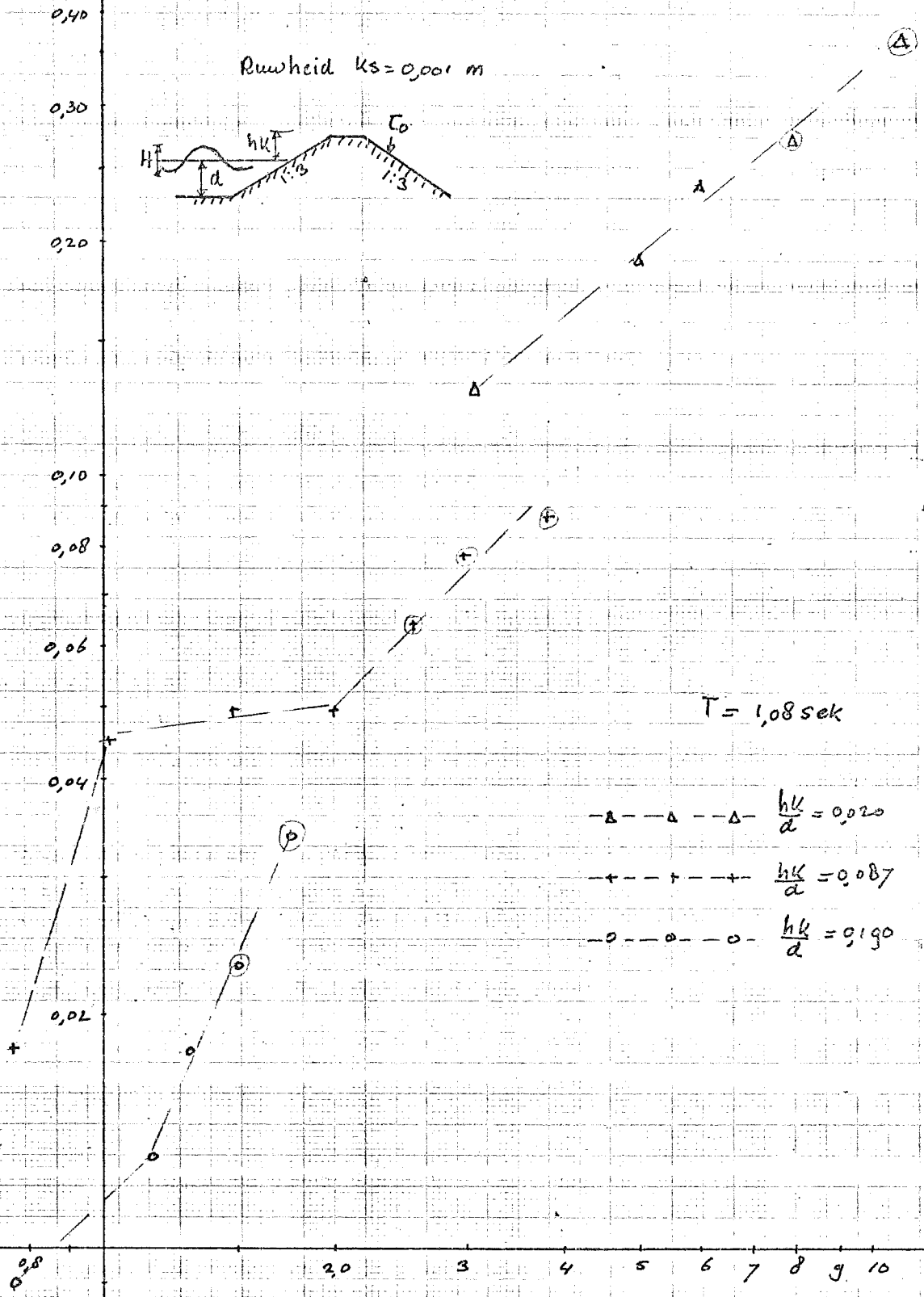
$\frac{H}{hk}$ →

figure 29

Ruwheid $k_s = 0,001 \text{ m}$



↑
 $\frac{Co}{\rho g h k}$



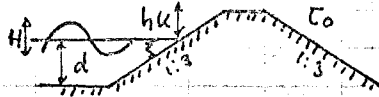
$T = 1,08 \text{ sek}$

- △-△-△- $\frac{hk}{d} = 0,020$
- +--+--+ $\frac{hk}{d} = 0,087$
- o--o--o- $\frac{hk}{d} = 0,190$

FIGUR 30

$\frac{H}{hk}$ →

Ruwheid $ks = 0,001 \text{ m}$



$\frac{z_0}{\rho g h k}$

0,40
0,30
0,20
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,008
0,006
0,004

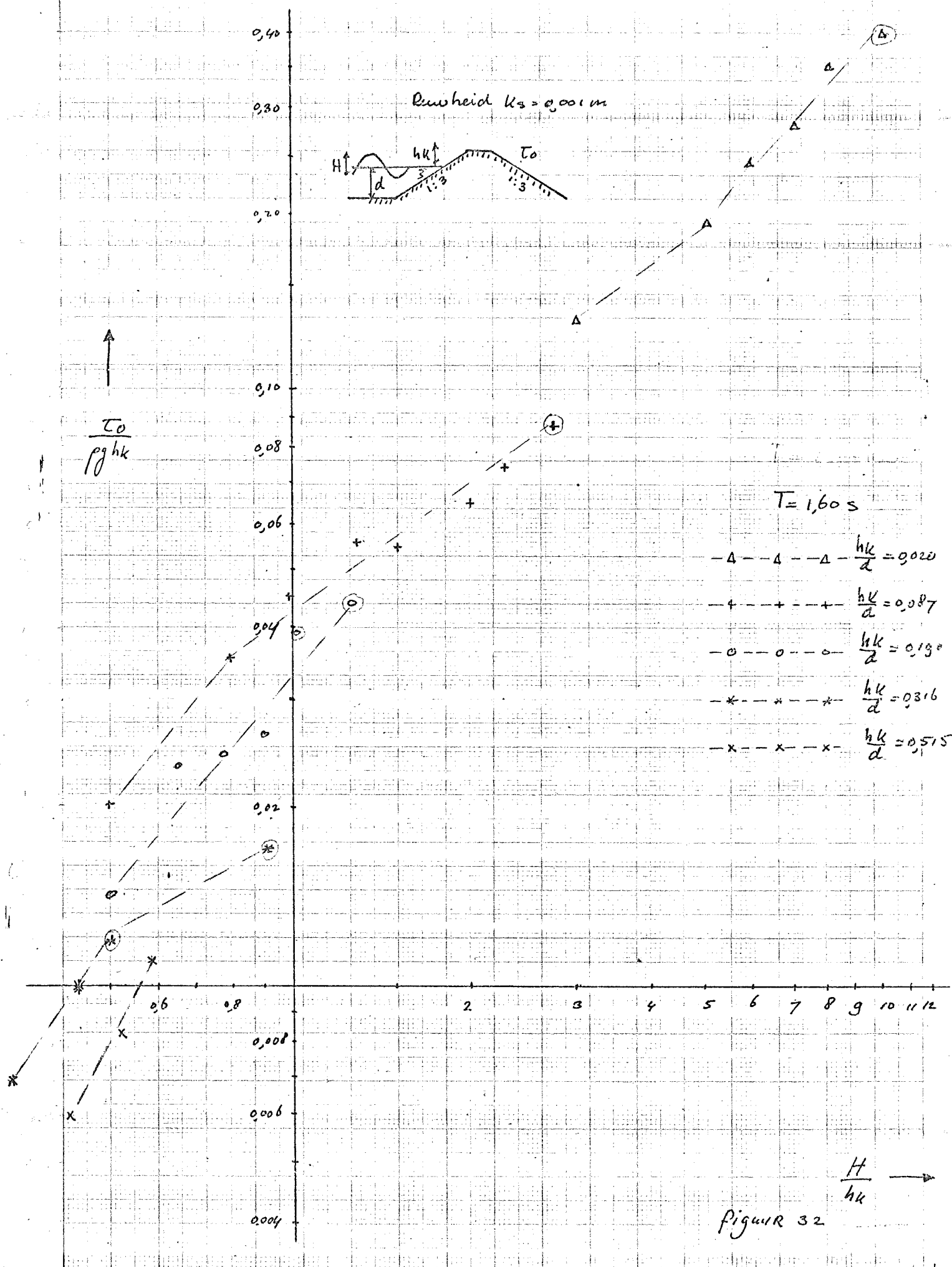
0,6 0,8 1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12

$T = 1,36 \text{ s}$

- Δ-Δ-Δ- $\frac{hk}{d} = 0,020$
- +--+ $\frac{hk}{d} = 0,087$
- o-o-o- $\frac{hk}{d} = 0,190$
- *-*- $\frac{hk}{d} = 0,316$

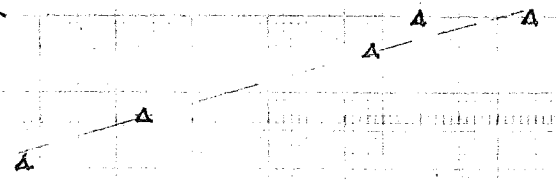
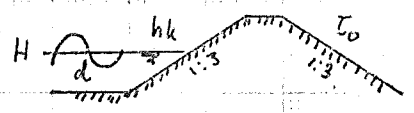
$\frac{H}{hk}$ →

figur R 31



FIGUR 32

Ruwheid $k_s = 0,001 \text{ m}$



$\frac{L_0}{\rho g h k}$

$T = 2,25 \text{ s}$

- Δ - Δ - Δ - $\frac{hk}{d} = 0,020$
- $+$ - $+$ - $+$ - $\frac{hk}{d} = 0,087$
- \circ - \circ - \circ - $\frac{hk}{d} = 0,190$
- $*$ - $*$ - $*$ - $\frac{hk}{d} = 0,316$
- x - x - x - $\frac{hk}{d} = 0,515$

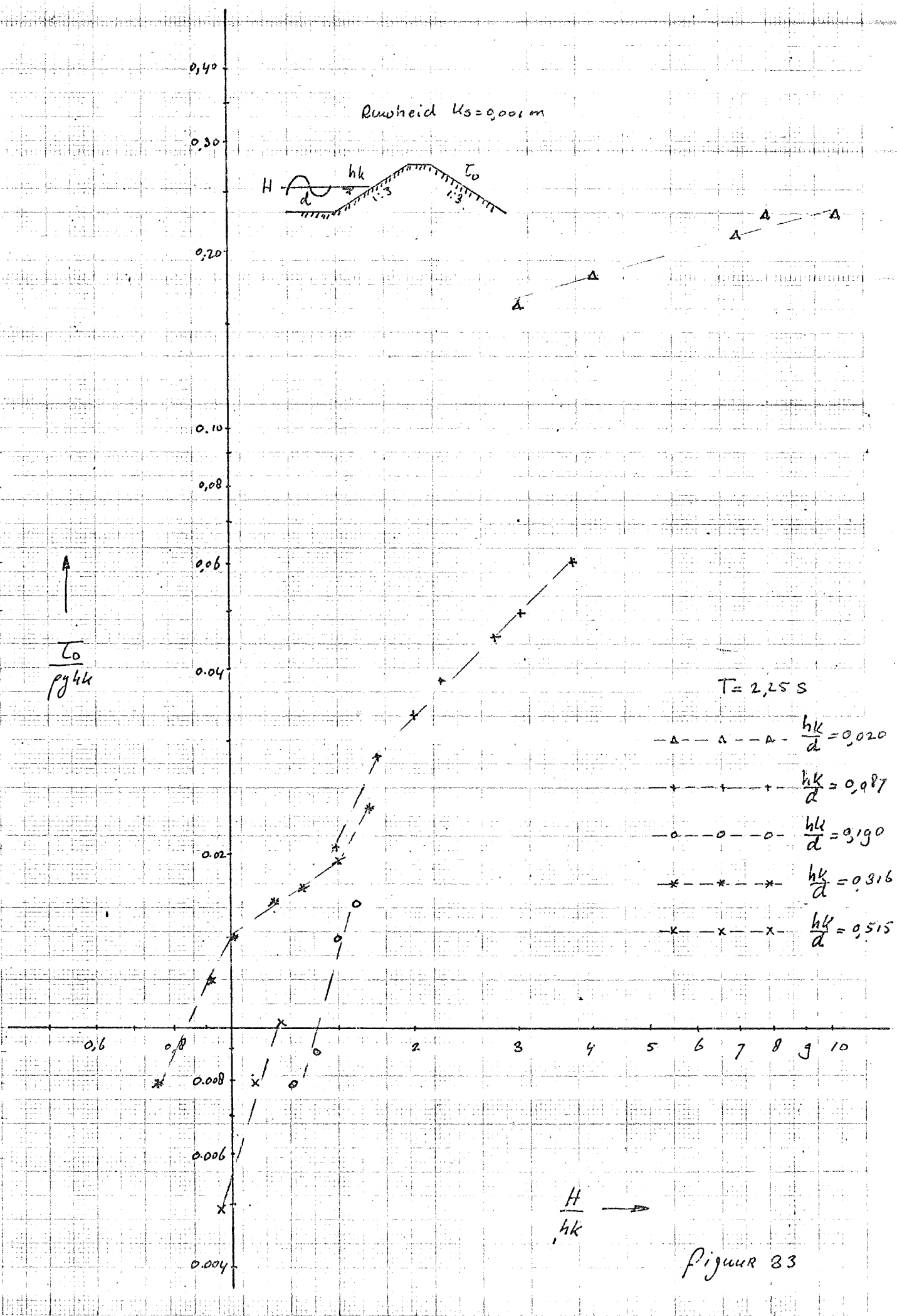


Figure 33

Een ander onderscheid gemaakt naar de wijze van breken van de golf levert niets op.

De omcirkelde punten op de figuren zijn de situaties waarbij de golf met veel geweld breekt. Een gedeelte van het water wordt in de lucht geslingerd en valt daarna terug op het binnentalud.

7.5. Waterlaagdikten bij golfoverslag en toetsing wrijvingsformules

Een verwerking van de meetgegevens met daarin de met de peilnaald gemeten waterlaagdikten is niet gedaan, dit omdat deze meting erg onnauwkeurig is, bovendien is slechts een golftep gemeten.

Wel zijn de waterlaagdikten met de daarbij optredende schuifspanningen in een figuur verzameld. (zie figuur 34)

Interessant is om deze waarden te vergelijken met schuifspanningen welke optreden wanneer de dijk als overlaat fungeert.

De schuifspanningen als gevolg van deze permanente stroming kunnen worden berekend met behulp van de eerder gebruikte formules 7.

De snelheid van het water ter plaatse van de schuifspanningsmeter is berekend uit het debiet en de waterlaagdikte a daar ter plaatse. De helling van de waterspiegel $\frac{\partial a}{\partial x}$ is moeilijk te meten. Bovendien bij de grote bodemhelling zijn kleine waarden van $\frac{\partial a}{\partial x}$ ongeschikt.

Bij grotere afvoeren echter kunnen de verhangen in de waterspiegel aanzienlijk zijn.

Er zijn twee berekeningen uitgevoerd, $\frac{\partial a}{\partial x} = 0$ en $\frac{\partial a}{\partial x} = 0.05$ wat een realistische waarde is, en $k_d = 0,001$ m.

Bij de berekening is de snelheid bepaald uit het debiet en waterlaagdikte. Nu is de meting van de waterlaagdikte onnauwkeurig (nauwkeurigheid van $\pm 0,00025$ m).

Een afschatting van de fout in v en ρ_1 ten gevolge van onnauwkeurige waterlaagdikte a geeft,

$$v = \frac{q}{a}, \quad \frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta a}{a}$$

$$\rho_1 = \frac{2}{\lambda^2} \cdot \frac{a^3}{q^2} \left(\sin \theta - \frac{\partial a}{\partial x} \cos \theta \right) \quad \frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} = 3 \frac{\Delta a}{a}$$

dan is

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \gg 3 \frac{\Delta a}{a}$$

$$\tau_0 = \rho \lambda v^2, \quad \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} \gg \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + 2 \frac{\Delta v}{v} \rightarrow \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} \gg 5 \frac{\Delta a}{a}$$

bij een waterlaag van 0,01 m is $\frac{\Delta a}{a} = 2,5\%$

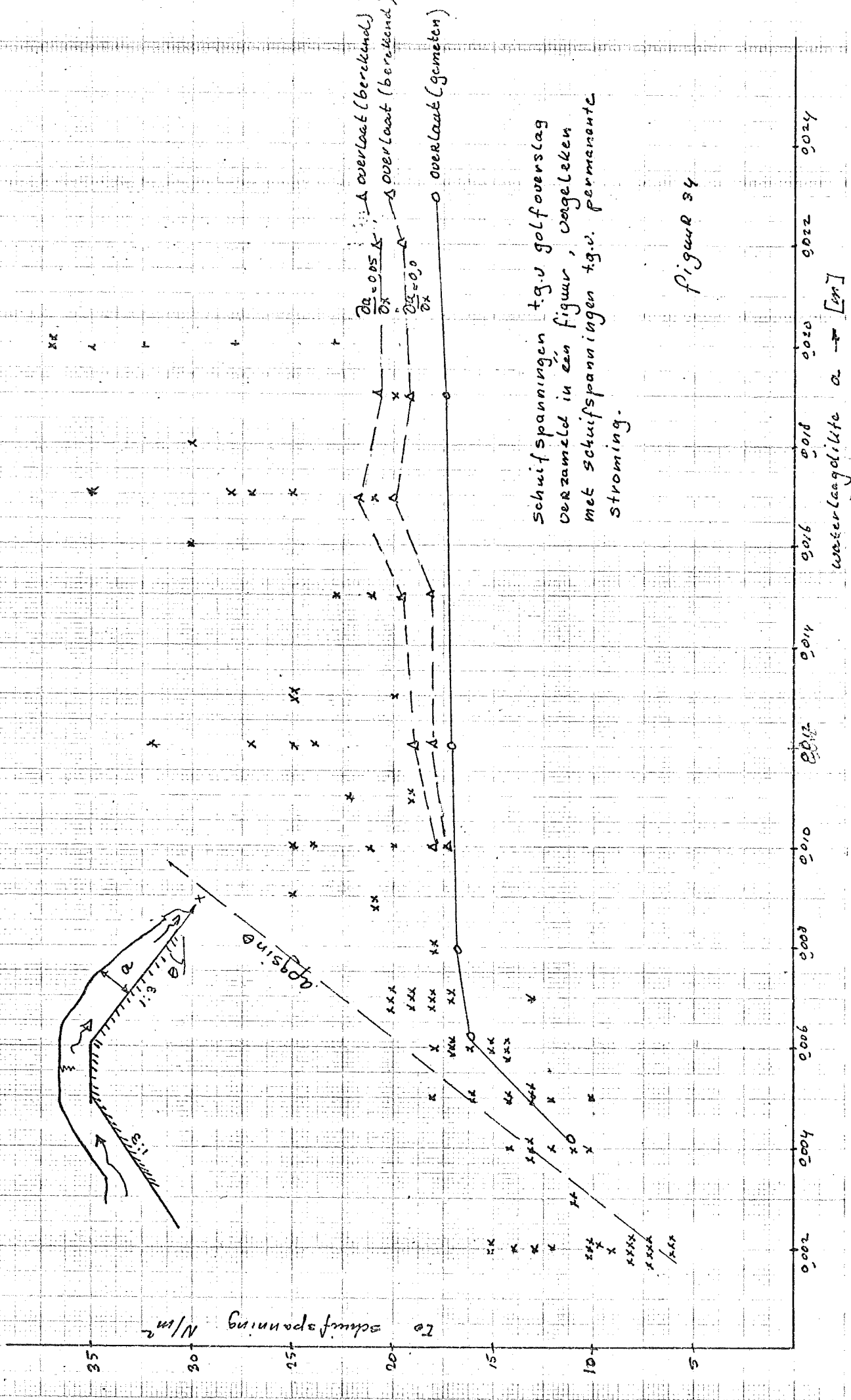
dan is $\frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} = 12,5\%$

Dit is de rede voor de wat grillige ligging van de berekende punten.

De formules zijn slechts geldig als $\frac{a}{k_d} \gg 1$ vandaar dat bij kleinere waterdiepte geen berekening is uitgevoerd.

In figuur 34 is bovendien de lijn $\rho g a \sin \theta$ getekend.

Dit zou de waarde van de bodemschuifspanning zijn wanneer a de evenwichtsdiepte (uniforme stroming) is.



figuur 34

Ten konklusie naar aanleiding van deze figuur is, dat de permanente stroming een ondergrens vormt voor de optredende schuifspanning. De berekening volgens formule 7 lijkt een redelijke schatting voor deze permanente stroming. Afgezien van de dünnere waterlagen, wordt de lijn *pgasino* bij golfoverslag nooit overschreden.

In de ontwerpfase is voor de schatting van de schuifspanning gebruik gemaakt van een korte golf ben dering (zie par. 2.3.) Hiervoor waren nodig: de maximale snelheid van het water bij de oscillerende beweging, de amplitude van die oscillatie. Deze amplitude werd berekend aan de hand van de snelheid en de periode van de golf.

De snelheid van de waterdeeltjes in het golffront wordt geschat op 0,5 - 1,0 m/schonde, gebaseerd op de voortplantingssnelheid. De denkbeeldige duur van de golfperiode wordt gekozen op $T = 0,1$ sekonde. Een berekening van de schuifspanning geeft dan,

$$\tau = 11 - 25 \text{ N} / \text{m}^2.$$

Deze waarden liggen in dezelfde orde als de gemeten waarden. De tijd waarin de schuifspanning de topwaarde bereikt zal in de orde van $T/4 = 0,025$ sekonde liggen. Voor zover blijkt de schatting redelijk, hoewel er geen relatie gelegd wordt met de waterlaagdikten en de fysiese overeenkomst met oscillerende golven niet duidelijk is.

7.8. Konklusie

De konklusie naar aanleiding van het funktioneren van het meetinstrument is, dat aan de bij het ontwerp gestelde eisen is voldaan.

Het dynamies gedrag en de gevoeligheid zijn voldoende om de schuifspanningen te meten.

Een vergroting van de stijfheid, ter verhoging van de eigenfrequentie zal de ruis in het signaal verkleinen. Dit zal ten koste gaan van de meetgevoeligheid.

Een bevredigende verklaring waarom de schuifspanning zo verloopt als gemeten is zal slechts dan te geven zijn wanneer de watersnelheden en waterlaagdikten bekend zijn.

Van belang zijn zowel de plaatsafhankelijke als de tijdsafhankelijke versnellingen van het water.

Er lijkt onderscheid gemaakt te moeten worden naar de wijze van breken van de golf en de bij de golfoverslag daaruit voortvloeiende wrijvingskracht op het talud. Deze konklusie kan slechts voorlopig gemaakt worden aangezien dit verschijnsel niet uitputtend onderzocht is.

Proefnemingen in een langere goot zullen wellicht voordeel bieden. Dit gezien de reflectie die optrad bij grotere golflengte in de gebruikte (korte) goot.

Verder is een trend waarneembaar dat, bij dezelfde golfhoogte en relatieve kruinhoogte, een kortere golfperiode een kleinere schuifspanning oplevert. Overtuigend is deze trend echter niet.

Verschillende meetresultaten vertonen een grillig karakter.

Ook hier zullen proefnemingen op grotere schaal uitkomst bieden.

Er is dan een ruimere variatie mogelijk in golfperioden, relatieve kruinhoogten en golfhoogten.

De schaaieffekten welke kunnen ontstaan ten gevolge van luchtballen in het water, kunnen ook worden onderzocht door proeven op grotere schaal uit te voeren.

Golfoverslag ten gevolge van onregelmatige golven zal andere wrijvingskrachten geven. De "smerende" werking van de nu voortdurend aanwezige waterfilm zal geheel of gedeeltelijk afwezig zijn.

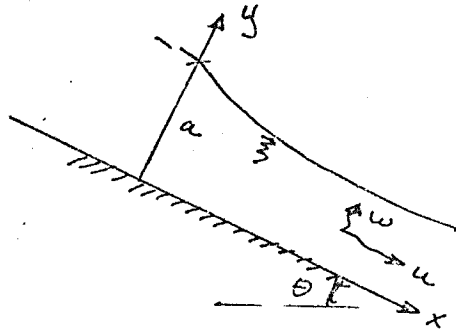
Appendix 1, Wijziging wrijvingsformule

In het artikel "Friction forces of unsteady flows in open channels en pipes" van C.F. Vasiliev en V.I. Kvon, (Proc. XIV' congress IAHR vol 2, 1971 blz. 823 e.v.) wordt de bodemschuifspanning met de volgende formule berekend.

$$\tau_0/\rho = \lambda v|v|$$

$$\lambda = \frac{1 + (f_1 f_2 + 1)^{0.5}}{2 x^{-1} f_2}$$

$$v = \int_0^a u d\eta$$



$$f_1 = \frac{2}{x^2} \frac{g a}{v|v|} (\sin \theta - \frac{\partial a}{\partial x} \cos \theta) \quad f_2 = \ln \frac{a}{ka} + x\beta - 0.5$$

als, $\eta = y/a$

u = lokale watersnelheid langs x - as

w = lokale watersnelheid langs y - as

Nu is mijns inziens de coëfficiënt λ onjuist.
Deze moet zijn:

$$\lambda = \frac{(f_1 f_2 + 2) + 2 (f_1 f_2 + 1)^{0.5}}{4 f_2^2} x^2$$

Wanneer namelijk deze formule voor een uniforme stroming gebruikt wordt ($\partial a/\partial x = 0$) blijkt de berekende schuifspanning te groot te zijn. Bijvoorbeeld, wanneer $q = 4 \text{ m}^2/\text{seconde}$, $i = 10^{-3}$, $k_s = 0,01$ en $R = a$ (de waterdiepte) dan vindt men een evenwichtsdiepte van $a_e \approx 1,65 \text{ m}$.

De bodemschuifspanning is dan $\tau_0 = \rho g a i = 16,5 \text{ N/m}^2$. De gemiddelde snelheid v en de waterdiepte a en $\partial a/\partial x = 0$ worden ingevuld in de formules volgens Vasiliev en Kvon. Het resultaat is een faktor 20 maal grotere schuifspanning.

In het artikel wordt vergelijking (5) tweemaal geïntegreerd, de vergelijking is

$$\rho E \frac{\partial u}{\partial n} = \tau_0 a (1 + A \eta - (1 + A) \eta^2)$$

waarin

$$A = \rho g \frac{a}{\tau_0} \left(\frac{\partial a}{\partial x} \cos \theta - \sin \theta \right)$$

en

$$E = x u_* y (1 - \eta) \quad , \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Als de integratie onder de zelfde voorwaarden wordt uitgevoerd, leidt dit tot de nieuwe uitdrukking voor λ .

De controle op de juistheid van deze koëfficiënt kan weer uitgevoerd worden met de uniforme stroming.

Zo zal bij het hiervoor gegeven voorbeeld een schuifspanning van $17,5 \text{ N/m}^2$ gevonden worden

Appendix 11. Invloed van de massa van de veren op de eigenfrequentie van de schuifspanningsmeter

In het ontwerp van de schuifspanningsmeter is verondersteld dat de massa van de veren van ondergeschikt belang is voor de grootte van de eigenfrequentie van het instrument.

De vraag is of deze veronderstelling bij de keuze van een relatief klein meetoppervlak juist is.

De invloed, van de massa van de veren kan worden afgeschat met de methode van Rayleigh. (zie ref 6)

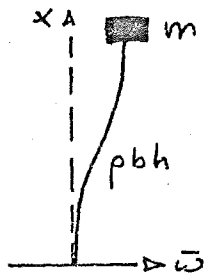
Volgens Rayleigh kan de eigenfrequentie van een veersysteem berekend worden door de maximale kinetische energie in het veersysteem gelijk te stellen aan de maximale potentiële energie ofwel de elastische vormveranderingsarbeid.

Deze stelling leidt tot de volgende formule.

$$\omega^2 = \frac{\int_0^l EI \left(\frac{d^2 \bar{w}(x)}{dx^2} \right)^2 dx}{\int_0^l \rho b h (\bar{w}(x))^2 dx}$$

Hierin is $\bar{w}(x)$ een gekozen trillingsvorm van de konstruktie. Deze is in het algemeen onbekend maar kan in vele gevallen goed benaderd worden.

De benaderde trillingsvorm van de veren in geval van het meetinstrument is;



$$\bar{w}(x) = \frac{\bar{w}}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{l} \right) \sin \omega t$$

Door een puntmassa m toe te voegen aan het uiteinde van de veer kan dan het gehele systeem beschreven worden. De puntmassa vertegenwoordigt de massa van het meetplaatje en bevestigingsmiddelen.

Deze puntmassa m bezit geen vormveranderingsarbeid maar voegt wel kinetische energie toe aan het systeem. $\frac{1}{2} m \omega^2 \bar{w}^2$.

Dan geldt voor de eigenfrequentie,

$$\omega^2 = \frac{\int_0^l EI \left(\frac{d^2 \bar{w}(x)}{dx^2} \right)^2 dx}{\int_0^l \rho b h (\bar{w}(x))^2 dx + m \bar{w}^2}$$

uitwerking voor de schuifspanningsmeter geeft,

$$\omega^2 = \frac{E b h^3 \pi^4}{(36 \rho b h l + 24 m) l^3}$$

De massa van het meetplaatje en bevestigingsmiddelen is geschat op $m = 0,03$ kg.

De invloed van de massa van de veren $\rho b h l$ op de eigenfrequentie is bij toegepaste afmetingen van ondergeschikt belang.

($\rho = 7800$ kg/m³, $b = 0,01$ m, $h \leq 0,0005$ m, $l = 0,04$ m)

Appendix III References

1. Edelman, T.
"Stabiliteit van belopen onder invloed van daaroverstromend water"
De Ingenieur, 1960, no 11
2. Golfoploop en golfoverslag
Technische adviescommissie voor de waterkeringen
3. Kamphuis, William J.
"Friction factor under oscillatory waves"
Journal of the Waterways and Coastal Engineering
Division, Proc. A S C E May 1975, pp 135-144
4. Vasiliev O.F. , Kvon V.I.
"Friction forces of unsteady flows in open channels and pipes"
Proc. congress I A H R vol 2, 1971 pp. B23 - 1 - 4
5. Hollick, M.
Boundary shear stress measurement by preston tube
Proc. A S C E . I. hydraulic Div. 102 (1976) pp 1053 - 1057
6. Douma, A L.
Kollegediktat Dynamica van konstrukties b 15 A deel 1 en 2
7. Blau, E.
"Die Messung der Wandschubspannung bei schliessender Strömung
sowie bei beweglicher Sohle"
Wasservirtschaft - Wassertechnik 23, 1973 no 3 March pp 94 - 96
8. , Strauss, V.
"The magnitude of shear stresses acting on the bottom of open
channels by propagating surge waves."
Proc. congress of the I A H R aug. sept. 1971 vol.2 pp
B 20 - 1/B 20 - 9.

Appendix IV Lijst van de gebruikte symbolen

	dimensie
A=oppervlakte	m^2
a=waterlaagdikte	m
\hat{a}_0 =amplitude van de oscillerende beweging boven de grenslaag	m
b=breedte van de bladveer van de schuifspanningsmeter	m
c=dempingscoëfficiënt van het veersysteem	kg/s
C=coëfficiënt van Chezy	$m^{1/2}/s$
d=waterdiepte	m
E=elasticiteitsmodulus	N/m^2
f=frequentie	hz
F=kracht	N
g=versnelling zwaartekrachtveld	m/s^2
H=golfhoogte	m
$H(\Omega)$ =vergrotingsfaktor	
hk=kruinhoogte ten opzichte van gemiddeld waterniveau	m
h=dikte van de bladveer	m
i=verhang	
I=traagheidsmoment	m^4
k=veerstijfheid	N/m
kd=gemiddelde hoogte van het ruwheidseffekt	m
ks=ruwheid volgens Nikuradse	m
L=golflengte	m
l=lengte van de bladveer	m
M=moment	Nm
m=massa	kg
mO=afvoercoëfficiënt	
O=omtrek	m
q=debiet	m^2/s
R=hydrauliese straal	m
s=verplaatsing van het veersysteem	m
T=periode	s
t=tijd	s
td=tijd waarin kracht F aangroeit van nul tot een zekere waarde	s

dimensie

t_s =dikte meetplaatje schuifspanningsmeter	m
U_s =maximale orbitale snelheid juist boven de grenslaag	m/s
U_x =schuifspanningssnelheid	m/s
v =gemiddelde watersnelheid	m/s
w =eigenfrequentie schuifspanningsmeter	s^{-1}
\bar{w} =uitbuigingsvorm trilling veer	m
y =energiehoogte boven gemiddeld waterniveau	m
β =turbulentie konstante, 7,8	
δ =dikte grenslaag	m
ϵ =specifieke rek	
ξ =dempingsverhouding van het veersysteem	
θ =helling van de bodem	
χ =konstante van von Kármán, 0,4	
λ =wrijvingscoëfficiënt volgens ref. 4	
ν =kinematische viscositeit	m^2/s
ρ =soortelijke massa	kg/m^3
σ =spanning	N/m^2
τ_0 =schuifspanning aan de bodem	N/m^2
ω =hoekfrequentie periodieke funktie	
Ω =hoekfrequentie exciterende kracht	