

627



delft hydraulics laboratory



delft university of technology

waterbeweging op golfbrekertaluds

benadering van de waterbeweging op een
golfbrekertalud door middel van een
harmonische analyse van de 5e orde

verslag modelonderzoek

Technische Hogeschool Delft
Vakgroep Kustwaterbouwkunde
afstudeerverslag

S 467 deel V

mei 1985

waterbeweging op golfbrekertaluds

**benadering van de waterbeweging op een
golfbrekertalud door middel van een
harmonische analyse van de 5e orde**

verslag modelonderzoek

**Technische Hogeschool Delft
Vakgroep Kustwaterbouwkunde
afstudeerverslag**

R. C. den Breeker / M. Vries

S 467 deel V

mei 1985

INHOUD

blz

Lijst van tabellen	1
Lijst van figuren	1
Symbolen	3
i <u>Voorwoord</u>	5
ii <u>Samenvatting</u>	6
1 <u>Inleiding</u>	
1.1 Verantwoording en doel	7
1.2 Werkwijze	10
2 <u>Literatuur</u>	
2.1 Inleiding	12
2.2 De literatuur	12
3 <u>Modelonderzoek</u>	
3.1 Het model	17
3.2 De instrumentatie en data acquisitie	18
3.3 Opzet proevenprogramma	19
4 <u>Gegevensverwerking en Resultaten</u>	
4.1 Inleiding	20
4.2 De waterbeweging over het talud	21
4.3 Uitwerking stabiliteitsformule	24
4.4 Snelheids- en versnellingskrachten	27
5 <u>Conclusies en aanbevelingen</u>	
5.1 Inleiding	28
5.2 Conclusies	28
5.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek	29
<u>Literatuur</u>	30
<u>Tabellen</u> (1 t/m 4)	
<u>Figuren</u> (1 t/m 24)	

Lijst van tabellen

- Tabel 1 : componenten uit de vijfde orde harmonische analyse voor de op- en afloop, de snelheid en de versnelling
- Tabel 2 : de proefgegevens
- Tabel 3 : benaderde afdekelement-gewichten, volgens (11) en volgens (17)
- Tabel 4 : maximale waarden van de snelheidskracht (Fd) en de versnellingskracht (Fi) tijdens de oplopende en neerlopende waterbeweging, berekend uit het geregistreerde en het harmonische signaal.

Lijst van figuren

- Figuur 1 : golfprofielen op een talud
- Figuur 2 : snelheidsberekeningen tijdens de neerloop volgens Brandtzaeg [6] en Bruun & Johansson [7]
- Figuur 3 : invloed van de ksi-parameter op de afdekelement stabiliteit volgens Ahrens [2]
- Figuur 4 : verband tussen de ksi-parameter en de verhouding snelheids-/versnellingskracht en tussen de ksi en de maximale watersnelheden en versnellingen, volgens Sawaragi [3]
- Figuur 5 : krachten evenwicht van een afdekelement tijdens golfaanval, volgens Raichlen [8]
- Figuur 6 : dwarsdoorsnede van het gebruikte golfbrekermodel talud 1 : 4
- Figuur 7 : voorbeelden van registraties van de waterbeweging, -snelheid en -versnelling op het talud, loodrecht t.o.v. de horizontaal
- Figuur 8 : op/afloop-, snelheids- en versnellings signaal respectievelijk gemeten, berekend m.b.v. een som van vijf harmonischen en benaderd volgens Walton & Weggel [4]
proef 1

(vervolg lijst van figuren)

Figuur 9	: tekst als bij figuur 8	proef 2
Figuur 10	: tekst als bij figuur 8	proef 3
Figuur 11	: tekst als bij figuur 8	proef 4
Figuur 12	: tekst als bij figuur 8	proef 5
Figuur 13	: tekst als bij figuur 8	proef 6
Figuur 14	: verband tussen de ksi-parameter en de gemeten respectievelijk harmonisch benaderde op/neerloop snelheden	
Figuur 15	: verband tussen de ksi-parameter en de gemeten respectievelijk harmonisch benaderde op/neerloop versnellingen	
Figuur 16	: verband tussen het benodigd elementgewicht en de golfbelastingsparameters H en T, volgens de vijfde orde harmonische benadering	
Figuur 17	: verloop van het elementgewicht als functie van variaties in de constanten C1, Cd, Cm, C2 en C3	
Figuur 18	: verloop van de snelheids- en versnellingskracht berekend uit het gemeten en het harmonische signaal	proef 1
Figuur 19	: tekst als bij figuur 18	proef 2
Figuur 20	: tekst als bij figuur 18	proef 3
Figuur 21	: tekst als bij figuur 18	proef 4
Figuur 22	: tekst als bij figuur 18	proef 5
Figuur 23	: tekst als bij figuur 18	proef 6
Figuur 24	: verband tussen de maximale snelheids- en versnellingskrachten en de golfbelastingsparameters H en T, volgens de vijfde orde harmonische benadering	

lijst van symbolen

A	= het rotatiepunt van een afdekelement bij kantelen.	[-]
A _i	= i-de orde amplitude van de versnelling	[m/s ²]
A(t)	= de versnelling van het golffront in de tijd, langs het talud	[m/s ²]
C	= constante	[-]
C'	= constante	[-]
C''	= constante	[-]
C ₂	= maat voor het aangestroomde oppervlak	[-]
C ₃	= maat voor het omstroomde volume	[-]
C _d	= constante in de formule voor de snelheidskracht	[-]
C _l	= constante in de formule voor de liftkracht.	[-]
C _m	= constante in de formule voor de versnellingskracht	[-]
D	= karakteristieke diameter van een afdekelement.	[m]
F	= hydraulische kracht.	[N]
F _d	= snelheidskracht.	[N]
F _l	= liftkracht.	[N]
F _i	= versnellingskracht.	[N]
F _n	= kracht loodrecht op het talud.	[N]
F _p	= kracht evenwijdig aan het talud.	[N]
H	= golfhoogte.	[m]
H _o	= "geen schade" golfhoogte van Hudson	[m]
L	= golflengte.	[m]
L _o	= golflengte op diep water = $gT^2 / 2\pi$	[m]
T	= golfperiode.	[s]
V	= volume van een steen.	[m ³]
V _i	= i-de orde amplitude van de snelheid	[m/s]
V(t)	= de snelheid van het golffront in de tijd, langs het talud	[m/s]
W	= massa van een steen boven water.	[kg]
W'	= massa van een steen onder water.	[kg]
X _i	= i-de orde amplitude van de plaats	[m]
X(t)	= de plaats van het golffront in de tijd, langs het talud	[m]
Z	= zwaartepunt	[-]
.		
a	= waterversnelling	[m/s ²]
a(t)	= de versnelling van het golffront in de tijd, L t.o.v. SWL	[m/s ²]
a _i	= i-de orde fasehoek van versnelling	[rad]
c	= golfsnelheid = \sqrt{gh}	[m/s]
d	= waterdiepte.	[m]
h	= waterdiepte.	[m]
i	= i-de orde hoeksnelheid	[rad/s]
g	= zwaartekrachtsversnelling.	[m/s ²]
ksi	= surf similarity parameter = $\tan(\alpha)/\sqrt{H/L_0}$	[-]

lijst van symbolen (vervolg)

l	= karakteristieke lengtemaat.	[m]
t	= tijd.	[s]
u	= watersnelheid	[m/s]
$v(t)$	= de snelheid van het golffront in de tijd, \perp t.o.v. SWL	[m/s]
v_i	= i-de orde fasehoek van snelheid	[rad]
$x(t)$	= de plaats van het golffront in de tijd, \perp t.o.v. SWL	[m]
x_i	= i-de orde fasehoek van plaats	[rad]
α	= taludhoek.	[graden]
Δ	= specifieke dichtheid : $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$.	[-]
η	= hoogte waterspiegel t.o.v. het stil waternivo.	[m]
φ	= hoek van het natuurlijk talud.	[graden]
μ	= cotangens van de hoek van het natuurlijk talud.	[-]
ρ	= massa dichtheid van water.	[kg/m ³]
ρ_s	= massa dichtheid van steen.	[kg/m ³]
ω	= hoeksnelheid = $2 \pi / T$	[rad/s]
Ψ	= golffasehoek = $2 \pi \cdot t / T$	[rad]

i Voorwoord

Het speurwerk onderzoek, dat hier wordt beschreven, S467 deel V, is een onderzoek dat zich richt op fundamentele aspecten van golfaanval op golfbrekers.

In deel IV van het S467 heeft de aandacht zich hoofdzakelijk gericht op de afdekelementen. Onderzocht is op welke manier deze elementen bij hevige golfaanval uit de afdeklaag bewegen en door welke soort krachten dit wordt veroorzaakt.

In dit deel richt de aandacht zich op de waterbeweging langs het talud. Deze waterbeweging wordt beschreven als een som van een aantal sinussen. De uitdrukkingen voor de watersnelheden en versnellingen zijn gebruikt om krachten af te schatten die door de waterbeweging op afdekelementen kunnen worden uitgeoefend. Ze dienen tevens voor het ontwikkelen van een stabiliteitsformule, waarin de invloed van de golfperiode naar voren komt.

Het speurwerk onderzoek S467 is verricht bij het Waterloopkundig Laboratorium. Het is uitgevoerd door twee studenten van de T.H. Delft, R.C. den Breeker en M. Vries, in samenwerking met ir J.W. van der Meer van het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst".

ii Samenvatting

In een golfgoot is een golfbrekermodel met talud 1:4 onderworpen aan golfaanval. Van de waterbeweging die door de golfaanval op het talud ontstaat is de beweging van het golffront continu gemeten. Deze beweging wordt gebruikt als benadering voor de beweging van het water over het hele talud. De watersnelheden en versnellingen zijn door differentiatie uit het geregistreerde signaal verkregen.

Op de registratie van de plaats, snelheid en versnelling van het golffront is vervolgens een 5e orde harmonische analyse uitgevoerd. Uit het onderzoek blijkt dat het verloop van de plaats en de snelheid in de tijd goed en het verloop van de versnelling redelijk goed kan worden weergegeven als som van een vijftal sinussen.

Met de benaderde snelheden en versnellingen zijn krachten afgeschat, die door de waterbeweging op de afdekelementen worden uitgeoefend. De maxima van de snelheidskrachten blijken groter te zijn dan die van de versnellingskrachten. Daar voor de stabiliteit van afdekelementen niet de krachten afzonderlijk maar de resulterende kracht van belang is, is nagegaan hoe de krachten tot de resultante bijdragen. Op het moment dat de resulterende kracht maximaal is, blijkt de kracht door de snelheid van het water altijd de overhand te hebben. Afhankelijk van de proef varieert de verhouding snelheidskracht/versnellingskracht van 2 tot 30.

Om de invloed van de golfperiode op de stabiliteit van de afdekelementen te bepalen, zijn de harmonisch benaderde snelheden en versnellingen in een stabiliteitsformule verwerkt. De stabiliteit van de afdekelementen blijkt afhankelijk te zijn van de functie $H^{2.5} \cdot T^{0.5}$.

1. Inleiding

1.1 Verantwoording en doel

De waterbeweging, die bij golfaanval op een golfbrekertalud ontstaat, heeft grote invloed op de stabiliteit van afdekelementen. Door snelheden en versnellingen van het water over het talud ontstaan belastingen op elementen, die in het ongunstigste geval tot instabiliteit van deze elementen kunnen leiden. Waar instabiele elementen de afdeklaag verlaten treedt schade aan de golfbreker op.

Over de snelheden en versnellingen van de waterbeweging is betrekkelijk weinig bekend. Daar snelheden en versnellingen wel in vele afleidingen voorkomen, moeten zij op een of andere manier worden benaderd. Dit is onder andere het geval bij stabiliteitsformules.

Stabiliteitsformules zijn formules waarmee het gewicht kan worden berekend, dat afdekelementen moeten hebben om de schade aan de golfbreker binnen bepaalde grenzen te houden. De formules kunnen worden afgeleid door een evenwichtsbeschouwing op te zetten voor een element bij begin van beweging. Hierbij moet een uitspraak gedaan worden over de krachten die bij begin van beweging op het afdekelement werken.

De krachten die in een richting evenwijdig aan het talud werken zijn de snelheidskracht en de versnellingskracht. De snelheidskracht is de kracht die door de snelheid van het water op de elementen wordt uitgeoefend. De versnellingskracht wordt door de versnelling van het water veroorzaakt. Een algemene formulering van deze krachten is :

$$F_d = C_d \cdot \rho \cdot D^2 \cdot u^2 \quad (1)$$

$$F_i = C_m \cdot \rho \cdot D^3 \cdot \frac{du}{dt} \quad (2)$$

Hierin is	F_d = snelheidskracht	[N]
	F_i = versnellingskracht	[N]
	C_d, C_m = constanten	[-]
	ρ = soortelijke massa van water	[kg/m ³]
	D = karakteristieke diameter	[m]
	u = watersnelheid	[m/s]

Omdat, zoals eerder is vermeld, over de watersnelheden en versnellingen weinig bekend is, worden deze grootheden in stabiliteitsformules vaak onder een noemer geplaatst en benaderd met (zie M1809 [1]) :

$$u^2 = D \cdot \frac{du}{dt} = C \cdot g \cdot H \quad (3)$$

Hierin is : g = zwaartekrachtversnelling [m/s²]
 H = golfhoogte [m]
 C = constante [-]

In deze benadering wordt voor de watersnelheid de uitdrukking $u = C' \cdot \sqrt{gH}$ aangehouden. Uit deze uitdrukking volgt op de volgende wijze de benadering van de waterversnelling :

$$\frac{du}{dt} = \frac{du}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \cong C' \cdot \frac{u}{D} \cdot u \cong C'' \cdot \frac{gH}{D}$$

Door de watersnelheid en de waterversnelling onder een noemer te plaatsen, wordt het mogelijk de snelheidskracht en de versnellingskracht te combineren tot een parallel aan het talud werkende kracht (F_p) :

$$F_p = \rho \cdot g \cdot C \cdot D^2 \cdot H \quad (4)$$

Een nadeel van bovenstaande werkwijze is, dat de invloed van de golfperiode op de krachten, die op de afdekelementen werken, niet wordt meegenomen. Uit verschillende onderzoeken (Ahrens [2], Sawaragi [3]) is gebleken dat de waterbeweging over het talud niet alleen van de golfhoogte, maar ook van de golfperiode afhankelijk is. Een parameter waarin beide grootheden voorkomen is ksi :

$$ksi = \tan(\alpha) / \sqrt{(H / Lo)} \quad (5)$$

Hierin is : ksi = surf similarity parameter [-]
 α = hellingshoek golfbrekentalud [rad]
 H = golfhoogte [m]
 Lo = golflengte op diep water = $g \cdot T^2 / 2\pi$ [m]
 T = golfperiode [s]
 g = zwaartekrachtversnelling [m/s²]

De ksi-parameter wordt in vele onderzoeken gebruikt om de invloed van de periode op de stabiliteit weer te geven. Zo heeft Ahrens [2] aangetoond dat voor bepaalde waarden van ksi ($2 < \text{ksi} < 3$), de stabiliteit van het element op het talud minimaal is. Sawaragi [3] laat zien dat ook de maximale snelheden langs het talud afhankelijk zijn van ksi. Als oorzaak van de verminderde stabiliteit en de hogere snelheden wordt resonantie genoemd. In dit geval komt de periode van de op- en afloopbeweging van het water overeen met de golfperiode.

Omdat de golfperiode een belangrijke invloed heeft op de stabiliteit van afdekelementen, zou deze grootheid bij de dimensionering van de elementen moeten worden meegenomen. In meer recentelijke stabiliteitsformules, zoals die van Walton & Weggel [4], gebeurt dit ook. Voor de beschrijving van de waterversnelling wordt een uitdrukking gebruikt, waarin de invloed van de golfperiode naar voren komt. De watersnelheid en -versnelling worden niet meer, zoals bij uitdrukking (3) het geval is, onder een noemer geplaatst.

Walton & Weggel maken bij de beschrijving van de waterbeweging gebruik van de ondiep water benadering van de lineaire golftheorie. (Battjes [5]). De snelheid wordt beschreven als een enkele sinus en de versnelling als de afgeleide hiervan. Door deze waarden in de afleiding van de stabiliteitsformule te gebruiken, wordt een formule verkregen die afhankelijk is van de golfperiode.

Omdat de waterbeweging langs het talud geen zuivere sinus is, zal de invloed van de periode op de stabiliteit van afdekelementen in de formule niet geheel correct naar voren komen. Het doel van dit onderzoek is een betere beschrijving van de waterbeweging te vinden.

Naast het bovenstaande zal getracht worden een verband te vinden tussen het gewicht dat afdekelementen moeten hebben en de golfperiode. Om dit te bereiken, zal de beschrijving van de waterbeweging worden gebruikt om de krachten op een afdekelement af te schatten. Vervolgens zullen deze krachten worden gebruikt om een stabiliteitsformule op te stellen.

1.2 Werkwijze

Om het in paragraaf 1.1 gestelde doel te bereiken is in het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst" een zevental proeven uitgevoerd. In deze proeven is een stortstenen golfbrekermodel met een taludhelling van 1:4 onderworpen aan regelmatige golven.

Per proef is de plaats van het golffront op het talud continu (in de tijd) geregistreerd met behulp van een langs het talud gespannen capacatieve draad. De beweging van het golffront over het talud dient als benadering voor de beweging van het water dat langs de afdekelementen stroomt. Verwacht wordt dat met deze benadering de op- en neerlopende waterbeweging goed wordt weergegeven.

Uit onderzoek van Bruun en Johanneson [7] is gebleken dat tijdens de neerwaartse waterbeweging het profiel van de golf op het talud weinig van vorm veranderd (zie figuur 1). De snelheid en versnelling van het golffront zal hierdoor bij benadering gelijk zijn aan de snelheid en versnelling van het water dat langs het talud stroomt. Door andere onderzoekers wordt ook van deze veronderstelling uitgegaan. Brandtzaeg [6] berekent de snelheid ter plaatse van het stil water nivo door te veronderstellen dat tijdens neerloop een watermootje van constante grootte het talud afglijdt. Hoewel andere benaderingen tot iets andere snelheidsverdelingen leiden (Bruun en Johanneson [7]), lijkt de beweging van het golffront een goede benadering voor de waterbeweging tijdens neerloop.

In figuur 1 is te zien dat de golfprofielen tijdens oploop meer van vorm veranderen. Vooral aan het begin van de oploop beweging is deze verandering groot. Door de sterk veranderende golfprofielen zal de benadering niet opgaan voor ál het water, dat over het talud stroomt. De snelheden en versnellingen van het golffront zullen alleen een goede benadering vormen voor het water dat zich vlak achter het golffront bevindt. Uit filmbeelden, die voor het vierde deel van het S467 onderzoek zijn gemaakt, volgt dat tijdens oploop veel schade vlak achter het golffront optreedt. Omdat schade door de waterbeweging wordt veroorzaakt, lijkt de benadering ook voor oploop bruikbaar.

Uit de registratie van de plaats zijn de snelheden en versnellingen van het golffront verkregen door de gemeten signalen met behulp van een elektronische differentiator te differentieren. Op de registraties van de plaats, de snelheid en de versnelling van het golffront is vervolgens

op de computer een harmonische (of Fourier) analyse van de vijfde orde uitgevoerd. Op deze wijze is de plaats van het golffront op het talud, die een functie van de tijd is, benaderd als een som van vijf sinussen. De snelheid en versnelling zijn op dezelfde wijze benaderd.

Met de gegevens uit de harmonische analyse is de invloed van de golfperiode op het voor afdekelementen benodigde gewicht bepaald. Hierbij is gebruikt gemaakt van de stabiliteitsformule van Walton en Weggel [4]. De waterbeweging, die in deze formule is voorgesteld als een enkele sinus, is hierbij vervangen door een som van vijf sinussen.

De harmonisch benaderde snelheden en versnellingen zijn ook gebruikt om de krachten af te schatten, die bij golfaanval op de afdekelementen werken. De interesse gaat hierbij met name uit naar de verhouding tussen de snelheids- en de versnellingskrachten, op het moment dat de resulterende kracht maximaal is. Voor de beschrijving van de snelheids- en versnellingskrachten zijn de uitdrukkingen (1) en (2) gebruikt.

2 Literatuur

2.1 Inleiding

In de loop der jaren heeft het onderzoek met betrekking tot hydraulische aspecten van golfaanval op golfbrekers zich meer gericht op reflectie, op- en afloop, overslag, etc. dan op snelheden en versnellingen van het over het talud stromende water. De hoeveelheid literatuur over dit onderwerp is dan ook beperkt. In het eerste deel van paragraaf 2.2 komen twee van deze onderzoeken aan de orde. Het tweede deel van de paragraaf richt zich op onderzoeken naar stabiliteit van afdekelementen. Met name de invloed van de golfperiode op de stabiliteit komt hierbij aan de orde. De aandacht richt zich ten slotte op een stabiliteitsformule waarin de invloed van de golfperiode naar voren komt.

2.2 De literatuur

Door de beweging van het water langs het talud kunnen belastingen op afdekelementen worden uitgeoefend. Deze belastingen hangen in grote mate af van de snelheden en versnellingen van dit water.

Brandtzaeg [6] heeft een wiskundig model ontwikkeld om de snelheid te berekenen van het teruglopende water ter plaatse van het stil water niveau. Figuur 2a geeft zijn aannamen voor het model. Een watermootje met constant blijvende grootte glijdt onder invloed van de zwaartekracht naar beneden en ondervindt een hydraulische weerstand op het talud. De hoek van de waterlijn t.o.v. het talud wordt constant verondersteld. Figuur 2d geeft het resultaat van de berekening. De versnelling is aanvankelijk hoog en neemt in de tijd af. De snelheid wordt steeds groter tot een maximum is bereikt. Dit maximum hoeft dus niet in de laagste fase van de neerloop beweging te zijn maar kan wel hoger op het talud plaatsvinden.

Bruun en Johanneson [7] hebben het model van Brandtzaeg verder ontwikkeld. Zij gaan uit van een continuïteitsvergelijking, iets wat Brandtzaeg niet doet. Ze veronderstellen bovendien dat de hellingshoek steeds kleiner wordt, totdat de hoek 0° is en er een waterlaag met dikte y langs het talud naar beneden stroomt (figuur 2b). Afhankelijk van deze dikte komen zij tot een snelheidsverdeling die is gegeven in figuur 2c. Ook hier wordt op een bepaald moment een maximum gevonden voor de snelheid die niet met de plaats

van maximale neerloop overeen heeft te stemmen.

In de literatuur over golfbrekers heeft veel aandacht zich gericht op de stabiliteit van afdekelementen onder golf-aanval. Het meer recentelijke onderzoek behandelt hierbij de invloed van de golfperiode op de stabiliteit. In het M1809 rapport van het W.L. [1] wordt een overzicht gegeven van de resultaten van een veertiental onderzoeken die zich hierop heeft gericht. Uit deze onderzoeken blijkt dat het talud voor bepaalde ksi-waarden "schadegevoeliger" is dan voor andere. De waarde waarbij de verminderde stabiliteit optreedt is afhankelijk van de taludhelling maar ligt ongeveer tussen $2 < \text{ksi} < 4$. De resultaten van een van deze onderzoeken (Ahrens [2]) is weergegeven in figuur 3.

Het onderzoek naar de invloed van de golfperiode heeft zich niet beperkt tot de stabiliteit van afdekelementen. Meer recentelijk onderzoek van Sawaragi [3] richt zich op de snelheden en versnellingen van de waterbeweging over het talud en de daardoor veroorzaakte krachten.

In zijn onderzoek vindt Sawaragi een verband tussen de surf-similarity parameter (ksi) en de maximum snelheden op het talud (zie figuur 4b). De maximum snelheden blijken het grootst te zijn voor $2 < \text{ksi} < 3$. In de gevallen die door Sawaragi zijn onderzocht, blijkt dit beeld het duidelijkst naar voren te komen bij gladde, ondoorlatende taluds en een grote golfhoogte. De invloed van ksi op de maximale versnellingen is ook door Sawaragi onderzocht. Zoals in figuur 4c is te zien komt in dit geval minder duidelijk een verband naar voren.

De gemeten maximale snelheden en versnellingen zijn door Sawaragi gebruikt om snelheids en versnellingskrachten te bepalen. Voor de onderzochte taludhelling (1:2) blijken de snelheidskracht en de versnellingskracht van dezelfde orde grootte te zijn (zie figuur 4a).

De hierboven genoemde invloed van de golfperiode op de stabiliteit van afdekelementen en de watersnelheden wordt veroorzaakt door resonantie. In geval van resonantie is de op- en afloop periode van het water op het talud gelijk aan de golfperiode en wordt de waterbeweging versterkt.

In recent onderzoek van Walton en Weggel [4] wordt een stabiliteitsformule afgeleid waarin de invloed van de golfperiode naar voren komt.

Bij de afleiding van de stabiliteitsformule is uitgegaan van een evenwicht van krachten volgens Raichlen [8]. In figuur 5 is een principe schets van dit evenwichtsfiguur gegeven. De evenwichtsfiguur komt overeen met de resultaten van deel IV van het S467 onderzoek.

Voor de beschrijving van de langs het talud werkende krachten F_d en F_i , maken Walton en Weggel gebruik van :

$$F_d = \rho \cdot C_d \cdot (C_2 \cdot l^2) \cdot u^2 \quad (6)$$

$$F_i = \rho \cdot C_m \cdot (C_3 \cdot l^3) \cdot \frac{du}{dt} \quad (7)$$

Hierin is

F_d	= snelheidskracht	[N]
F_i	= versnellingskracht	[N]
C_d, C_m	= constanten	[-]
ρ	= soortelijke massa van water	[kg/m ³]
C_2	= maat voor het aangestroomde oppervlak	[-]
C_3	= maat voor het omstroomde volume	[-]
l	= karakteristieke lengtemaat	[m]
u	= watersnelheid langs het talud	[m/s]

De liftkracht F_l in deze figuur is een kracht, die door het langstromende water (loodrecht) op de elementen in de afdeklaag wordt uitgeoefend. Voor de beschrijving van de liftkracht wordt de volgende uitdrukking gebruikt :

$$F_l = \rho \cdot C_l \cdot (C_2 \cdot l^2) \cdot u^2 \quad (8)$$

Hierin is : C_l = constante [-]

Bij de benadering van de snelheid en de versnelling van het water over het talud maken Walton en Weggel gebruik van de ondiep water benadering van de lineaire korte-golf theorie. De uitdrukkingen voor de snelheid en de versnellingen zijn als volgt :

$$u = \frac{\eta \cdot c}{h} = \frac{H}{2} \cdot \sin(\Psi) \cdot \frac{c}{h} \quad (9)$$

$$a = \frac{du}{dt} = g \cdot \pi \cdot \frac{H}{L} \cdot \cos(\Psi) \quad (10)$$

Hierin is :

u = watersnelheid	[m/s]
a = waterversnelling	[m/s ²]
η = uitwijking van het wateroppervlak	[m]
c = golfsnelheid = $\sqrt{g \cdot h}$	[m/s]
g = zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
h = waterdiepte t.o.v. stilwaterlijn	[m]
H = golfhoogte	[m]
Ψ = golffasehoek = $2\pi \cdot t / T$	[rad]
T = golfperiode	[s]
t = tijdsvariabele	[s]
L = golflengte	[m]

Gebruik makend van de evenwichtsfiguur van Raichlen, van de uitdrukkingen (6), (7) en (8) voor de krachten en van de uitdrukkingen (9) en (10) voor de snelheid en versnelling, wordt door Walton en Weggel de onderstaande stabiliteitsformule gevonden. De opwaartse snelheid is hierin positief verondersteld.

$$W = \frac{C_3 \cdot CD^3}{\left(\frac{2 \cdot \kappa \cdot C_3}{C_2}\right)^3} \frac{-\rho_s \cdot g \cdot H^3 (1 + \tan \phi \cdot CL/CD)^3 \sin^6(\Psi)}{(g \cdot (s-1) \cdot (\tan \phi \cdot \cos \alpha - \sin \alpha) - CM \cdot \pi \cdot \frac{H}{L} \cdot \cos(\Psi))^3} \quad (11)$$

Hierin is :

W(t) = het benodigde element gewicht als functie van de tijd	[N]
ρ_s = soortelijke massa van het element	[kg/m ³]
$\kappa = 4 \cdot h / H$	[-]
$s = \rho_s / \rho$	[-]
ρ = soortelijke massa water	[kg/m ³]
α = hellingshoek van het golfbrekertalud	[rad]
ϕ = hellingshoek natuurlijk talud	[rad]
C ₃ , C ₂ , C _d , C ₁ , C _m = constanten	[-]

Uit formule (11) volgt, na het nul stellen van versnellingskrachten en krachten loodrecht op het talud ($C_1 = C_m = 0$) en voor maximale neerwaartse snelheid, de formule van Iribarren [9] :

$$W = \frac{N \cdot \rho \cdot g \cdot H^3}{(g(s-1) \cdot (\tan\phi \cdot \cos\alpha - \sin\alpha))^3}$$

Hierin is : $N = C_3 \cdot \left(\frac{2 \cdot C_3 \cdot \kappa}{C_2 \cdot C_d} \right)^{-3}$

3 Het modelonderzoek

3.1 Het model

In het kader van onderzoek naar de waterbeweging, die door golfaanval op het talud van een golfbreker ontstaat, is in het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst" een modelonderzoek verricht. In dit onderzoek is een golfbrekermodel in een zevental proeven loodrecht aangevallen door golven. Een doorsnede van het golfbrekermodel is in figuur 6 gegeven.

De kern van de golfbreker bestaat uit zand dat is afgestroken met 5 centimeter beton en is dus ondoorlatend. Over deze kern is een filterlaag van 2 centimeter dikte aangebracht, bestaande uit fijn grind van gemiddeld 1.5 gram. De filterlaag is afgedekt met een stortstenen afdeklaag van 8 centimeter dik. De stortstenen afdek-elementen hebben een gemiddeld gewicht van 123 gram.

De kruin van het model ligt op 1.15 m boven de gootbodem. Deze hoogte is voldoende om "overtopping" van het oplopende water tegen te gaan. Het stil water nivo ligt op 0.80 meter boven de gootbodem.

De taludhelling van de aangevallen zijde van het model is 1:4. Op de gootbodem is een korte berm aangebracht van 5 centimeter breedte. Deze berm bestaat uit filtermateriaal en is 2 centimeter hoog. De achterzijde van het model heeft een helling van 1:1.5.

3.2 Instrumentatie en data acquisitie

De voor de modelproef benodigde golven zijn continu opgewekt met behulp van een computergestuurd golfschot. Met dit golfschot kan de golfhoogte van de golven, die naar het model worden gezonden, nauwkeurig worden ingesteld. De reflectie die bij het golfschot optreedt, nadat de golven van het talud zijn gereflecteerd, wordt gecompenseerd door de sturing van het schot aan te passen. De gewenste aanpassing wordt momentaan door een computer bepaald, met behulp van een meetinstallatie op het golfschot.

Met de reflectiecompensatie is het niet nodig gaten in de goot te plaatsen om de reflectie uit te dempen, zoals het geval was bij het onderzoek S467 deel IV.

Voor de registratie van de plaats van het golffront op het talud, is gebruik gemaakt van een spanningsdraad, die in het onderzoek op een kleine hoogte boven het talud is gespannen. Over de uiteinden van deze capacitieve draad staat een spanningsverschil. De werking van een spanningsdraad berust op het principe van : $\text{spanning} = \text{stroomsterkte} * \text{weerstand}$. Daar de weerstand afhankelijk is van het deel van de draad dat zich onder water bevindt, is de stroomsterkte door de draad een maat voor de positie van het golffront op het talud. Het op- en afloop signaal is in een computer gevoerd.

Door het op- en afloop signaal een keer door een elektronische differentiator te laten differentiëren is informatie over de snelheid van de golftong verkregen. Een tweede maal differentiëren leverde de versnellingen op. Het versnellingssignaal is gefilterd met een 40 herz rockland filter. De snelheids- en versnellingssignalen zijn ook door de computer opgenomen. In figuur 7 wordt een beeld gegeven van de drie signalen, die in de computer zijn gevoerd.

Op de signalen omtrent plaats, snelheid en versnelling van het golffront zijn met behulp van een computer harmonische analyses uitgevoerd. Elk signaal is hierdoor beschreven als som van vijf sinussen. Omdat door het differentiëren en het toepassen van het rockland filter faseverschuivingen in de snelheids- en versnellingssignalen zijn opgetreden, zijn correcties uitgevoerd. Voor het differentiëren betrof het een correctie van -3.3 graden per herz en voor het rockland filter een van -9 graden per herz. De gecorrigeerde waarden van de harmonische analyse zijn in tabel 1 vermeld.

3.3 Opzet proevenprogramma

Het golfbrekermodel, dat in paragraaf 3.1 staat beschreven, is in het onderzoek aangevallen door regelmatige golven. In totaal zijn een zevental proeven uitgevoerd. De proeven verschillen van elkaar wat betreft golfhoogte, golfperiode en ksi-waarde. Tabel 2 geeft per proef de waarden van deze grootheden. Om de proefresultaten te kunnen vergelijken is per grootheid getracht eenzelfde waarde in drie proeven te laten voorkomen. Als voorbeeld kan de waarde 2.448 van de golfperiode dienen. Deze waarde komt in de proeven 2, 6 en 7 naar voren. Voor de golfhoogte en de ksi-parameter gelden achtereenvolgens de proeven 4, 5, 6 en 1, 3, 6.

In het proevenprogramma zijn de ksi-waarden zo gekozen dat ze het gebied van minimum stabiliteit goed beschrijven. De ksi-waarden liggen in het gebied van $1 < ksi < 3$.

4. Gegevensverwerking en Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt aangegeven hoe de gegevens omtrent de beweging van het golffront zijn verwerkt en tot welke resultaten dit heeft geleid. Een drietal onderwerpen komen hierbij aan de orde.

In paragraaf 4.2 wordt nagegaan in hoeverre de beweging van het golffront kan worden beschreven met een som van vijf sinussen (vijfde orde harmonische benadering). Ook wordt onderzocht of er een verband bestaat tussen de maximale snelheden en versnellingen en $k\sigma$.

Paragraaf 4.3 handelt over de invloed, die de golfperiode heeft op de stabiliteit van afdekelementen. Om deze invloed te kunnen bepalen wordt een stabiliteitsformule afgeleid, waarin de harmonische benadering van de waterbeweging is verwerkt. De afgeleide stabiliteitsformule wordt tevens gebruikt om het effect van veranderingen in aannames omtrent constanten op het benodigde element gewicht te onderzoeken.

Snelheids- en versnellingskrachten, die door de waterbeweging op een afdekelement worden uitgeoefend, komen in paragraaf 4.4 aan de orde. Er wordt onder andere onderzocht hoe de onderlinge verhouding van deze krachten is, op het moment dat de stabiliteit van een afdekelement minimaal is.

4.2 De waterbeweging over het talud

Zoals eerder is vermeld, dient de beweging van het golffront als benadering voor de beweging van het water over het talud. De beweging van het golffront is met behulp van een spanningsdraad, gedurende een dertigtal golven, continu gemeten.

Door de plaats van het golffront een- resp. tweemaal te differentieren naar de tijd, zijn registraties van de snelheid en de versnelling verkregen. In figuur 7 zijn, als voorbeeld, de registraties van proef zes gegeven gedurende een golfperiode.

Door de registraties van de dertig golfperiodes te middelen, is per proef het (gemiddelde) verloop van de plaats, de snelheid en de versnelling in de tijd bepaald.

Op deze verlopen zijn vervolgens harmonische analyses van de vijfde orde uitgevoerd. De beweging, snelheid en versnelling van het golffront zijn hierdoor benaderd als som van een vijftal sinussen :

$$x(t) = \sum \hat{X}_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + X_i) \quad (12)$$

$$v(t) = \sum \hat{V}_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + V_i) \quad (13)$$

$$a(t) = \sum \hat{A}_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + A_i) \quad (14)$$

Hierin is :

$x(t)$	= de plaats van het golffront	[m]
	in de tijd, L t.o.v. SWL	
$v(t)$	= de snelheid van het golffront	[m/s]
	in de tijd, L t.o.v. SWL	
$a(t)$	= de versnelling van het golf-	[m/s ²]
	front in de tijd, L t.o.v. SWL	
\hat{X}_i	= i-de orde amplitude van	[m]
	de plaats	
\hat{V}_i	= i-de orde amplitude van	[m/s]
	de snelheid	
\hat{A}_i	= i-de orde amplitude van	[m/s ²]
	de versnelling	
ω_i	= i-de orde hoeksnelheid	[rad/s]
t	= tijdsvariabele	[s]
X_i, V_i, A_i	= i-de orde fasehoek van resp.	[rad]
	plaats, snelheid, versnelling	

In tabel 1 zijn de harmonische componenten \hat{X}_i , \hat{V}_i , \hat{A}_i , ω_i , X_i , V_i en A_i van de zeven proeven weergegeven. Omdat bij proef 7 een aantal waarden ontbreken, is deze proef in de rest van het verslag buiten beschouwing gelaten.

In het onderzoek is nagegaan in hoeverre de som van vijf sinussen een goede benadering vormt voor de beweging, de snelheid en de versnelling van het golffront. De resultaten van de harmonische analyse en de gemeten trends zijn hiervoor (per proef) in een figuur uitgezet (figuren 8 t/m 13).

Uit de figuren blijkt dat het verloop van de plaats van het golffront in de tijd zeer goed benaderd wordt door de som van vijf sinussen. Verschillen treden nauwelijks op.

Ook de beschrijving van het snelheidssignaal is goed te noemen. De tijdstippen waarop in het benaderde signaal de snelheid (tijdens op- en neerloop) maximaal is, komen goed overeen met die in het gemeten signaal. De waarden van de maximale snelheden zijn in de benadering iets te laag. Voor oploop bedraagt dit 1 a 5 %, voor neerloop ligt dit tussen de 5 a 15 % .

Het verloop van de versnellingen in de tijd wordt door een som van vijf sinussen minder goed weergegeven. Het verloop van het harmonische signaal is in het algemeen vlakker en heeft minder fluctuaties.

De tijdstippen waarop in het benaderde versnellingsfiguur maxima en minima optreden, komen vrij goed overeen met die van het gemeten figuur.

De waarden van de benaderde maxima en minima zijn echter een factor 1.5 a 2 kleiner. Dit verschil kan worden verminderd door de amplitude (\hat{A}_i) van de vijf harmonischen met een constante factor te vergroten. Deze factor verschilt per proef.

Om na te gaan of de maximale snelheden en versnellingen bij een taludhelling van 1:4 afhankelijk zijn van de golfperiode, zijn deze grootheden dimensieloos gemaakt en uitgezet tegen k_{si} (vergelijkbaar met Sawaragi [3]).

In figuur 14 wordt het verband tussen de maximale snelheden van zowel het gemeten als het harmonisch benaderde signaal en k_{si} gegeven. De maximale snelheden zijn dimensieloos gemaakt door deze te delen door de factor $\sqrt{g.H}$. Uit het figuur blijkt dat de maximale snelheid tijdens op- en neerloop toeneemt met toenemende k_{si} . Er treedt geen maximum in het snelheidsfiguur op bij het punt van minimum stabiliteit ($k_{si} = 2$).

Dat de maximale snelheden van het gemeten en het benaderde signaal goed overeenkomen komt ook in figuur 14 tot uiting.

Het verband tussen k_{si} en de maximale versnellingen van het gemeten en benaderde signaal is in figuur 15 weergegeven. De maximale versnellingen zijn dimensieloos gemaakt door deze te delen door de factor $g \cdot \sin(\alpha)$. De figuur laat zien, dat tijdens oploop, de maximale versnellingen afnemen met toenemende k_{si} . Tijdens neerloop nemen de versnellingen af tot $k_{si} = 2$ en nemen vervolgens toe. Deze trend is bij de maximale versnellingen van het gemeten signaal het duidelijkst aanwezig.

Zoals al eerder naar voren is gekomen blijkt er een verschil te bestaan tussen de maxima van de gemeten en de harmonisch benaderde versnellingen. Figuur 15 laat nog eens zien dat de gemeten waarden gemiddeld een factor 1.5 a 2.0 groter zijn.

Resumerend kan worden gesteld, dat met een harmonische benadering van de vijfde orde, het verloop van de plaats en de snelheid goed en van de versnelling van het golffront redelijk goed kan worden weergegeven.

4.3 Uitwerking stabiliteitsformule

Zoals in paragraaf 2.2 al naar voren is gekomen, is door Walton en Weggel [4] een stabiliteitsformule ontwikkeld waarin de invloed van de golfperiode naar voren komt (11). Voor de beschrijving van de watersnelheden en -versnellingen maken de onderzoekers gebruik van de ondiep water benadering uit de lineaire golftheorie. Uitdrukkingen (9) en (10) laten zien, dat in deze benadering de snelheid wordt geschreven als een enkele sinus en de versnelling als de afgeleide daarvan.

In de stabiliteitsformule die in dit hoofdstuk wordt ontwikkeld, is voor de beschrijving van watersnelheden en versnellingen langs het talud niet gebruik gemaakt van de ondiep water benadering, maar van de in paragraaf 4.2 beschreven harmonische benadering (som van vijf sinussen). Daar de harmonische benadering uitgaat van snelheden en versnellingen loodrecht t.o.v. het stil waternivo, zijn de uitdrukkingen (13) en (14) vermenigvuldigd met $1/\sin(\alpha)$ ($=\sqrt{17}$) :

$$V(t) = v(t) * 1 / \sin(\alpha) \quad (15)$$

$$A(t) = a(t) * 1 / \sin(\alpha) \quad (16)$$

Hierin is : $V(t)$ = de snelheid van het golffront [m/s]
in de tijd, langs het talud
 $v(t)$ = de snelheid van het golffront [m/s]
in de tijd, \perp t.o.v. SWL
 $A(t)$ = de versnelling van het golf- [m/s²]
front in de tijd, langs het talud
 $a(t)$ = de versnelling van het golf- [m/s²]
front in de tijd, \perp t.o.v. SWL

Door in de afleiding van de stabiliteitsformule van Walton en Weggel (11) de uitdrukkingen (9) en (10) te vervangen door (15) en (16), wordt de volgende stabiliteitsformule verkregen :

$$W(t) = C \cdot \frac{-\rho_s \cdot g \cdot (1 + \tan \phi \cdot CL/CD)^3 \cdot \left(\sum_{i=1}^5 \hat{V}_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + v_i) \right)^6}{(g(s-1)(\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha) - CM \cdot \sum_{i=1}^5 \hat{A}_i \cdot \sin(\omega_i t + a_i))^3}$$

$$C = \frac{C3 \cdot CD^3}{(2 \cdot C3)^2} \quad (17)$$

Voor de betekenis van de in formule (17) gebruikte symbolen wordt verwezen naar de eerder genoemde uitdrukkingen.

Omdat op het gemeten snelheidssignaal en op het gemeten versnellingssignaal afzonderlijk een harmonische analyse is uitgevoerd, komt de golfperiode in de formule niet expliciet naar voren. De invloed van de golfperiode zit verborgen in de versnellingsamplitudes (Ai) van de vijf harmonischen.

Door de harmonische componenten uit tabel 1 in formule (17) in te vullen en alle constanten (Cd, Cm, Cl, C2 en C3) 1.0 te stellen, is per proef het benodigde elementgewicht (W) bepaald. Met behulp van regressieanalyse is het benodigde elementgewicht vervolgens beschreven als functie van de golfperiode (T) en de golfhoogte (H). De uitdrukking $W = -0.03 + 10.70 * (H^{2,5} * T^{3,5})$ blijkt een correlatiecoëfficiënt te hebben van 0.96. In figuur 16 is het gevonden verband weergegeven.

De invloed van de golfhoogte op de stabiliteit van een afdekelement blijkt iets kleiner te zijn dan door andere onderzoekers wordt verondersteld. In de stabiliteitsformules van Hudson [10] bijvoorbeeld, is het benodigde elementgewicht afhankelijk van H^3 . Zoals uit het M1809 [1] onderzoek naar voren komt is dit een veel voorkomend verband.

Naast de golfhoogte blijkt ook de golfperiode invloed te hebben op de stabiliteit van elementen uit een afdeklaag. Bij langere golfperiodes blijken afdekelementen instabieler te zijn dan bij kortere.

Van der Meer en Pilarczyk [11] vinden in hun onderzoek naar stabiliteit van golfbrekers onder onregelmatige golfaanval voor brekende golven ($ksi < 2.5 - 3.5$) een verband tussen de dimensieloze golfhoogte, ksi, het schade nivo en het aantal golven. Na het constant veronderstellen van de laatste twee variabelen, ziet dit verband er als volgt uit :

$$\frac{H}{\Delta D} = C * ksi^{-0,54} \quad (18)$$

Hierin is :	H = significante golfhoogte	[m]
	Δ = specifieke dichtheid	[3]
	ρ = soortelijke massa element	[kg/m ³]
	ρ = soortelijke massa water	[kg/m ³]
	ksi = surf similarity parameter	[-]
	C = constante	[-]

Uit de bovenstaande uitdrukking is, na enig omschrijfwerk een verband te halen tussen het elementgewicht en de golfhoogte en golfperiode : $W = C * H^{2.19} * T^{1.6}$. Het toepassen van lineaire regressie op de gegevens uit het onderzoek leert dat een functie tussen het gewicht en de functie $H^{2.19} * T^{1.6}$ het best beschreven kan worden met $W = -0.02 + 1.22 (H^{2.19} * T^{1.6})$. Deze functie heeft een correlatie coefficient van 0.83. Het door van der Meer en Pilarczyk [11] gevonden verband blijkt dus voor de gegevens uit het onderzoek redelijk te gelden.

In tabel 3 wordt een overzicht gegeven van benodigde elementgewichten berekend volgens Walton en Weggel (11) en volgens de nieuwe stabiliteitsformule (17). De stabiliteitsformule van Walton en Weggel blijkt tot grotere gewichten te leiden. De oorzaak hiervan is de benadering van de snelheden en versnellingen. Zoals uit figuren 8 t/m 13 is op te maken, leidt de ondiep waterbenadering van de lineaire korte-golf theorie tot hogere snelheden en versnellingen dan de harmonische benadering.

Uit formule (17) volgt dat het benodigde element gewicht ook afhankelijk is van de waarde die voor de constanten (Cd, Cm, Cl, C2 en C3) wordt aangenomen. Deze constanten komen uit de uitdrukkingen voor de krachten. Er is onderzocht hoe de verandering van een waarde van een van de constanten doorwerkt op het benodigde element gewicht. De resultaten van dit gevoeligheidsonderzoek zijn in figuur 17 gegeven. Uit de figuur blijkt dat een kleine verandering in de constanten Cl, Cd, C2, en C3 een grote verandering in het benodigde elementgewicht veroorzaken. De invloed van Cm op het benodigde gewicht is klein.

4.4 Snelheids- en versnellingskrachten

De snelheids- en versnellingskrachten, die door een waterbeweging op een element worden uitgeoefend, zijn berekend door de harmonisch benaderde snelheden en versnellingen in te vullen in de uitdrukkingen (6) en (7). De constanten (C_2 , C_3 , C_d en C_m) hebben bij de berekening de waarde 1.0 gekregen. De karakteristieke lengtemaat is bepaald uit gegevens over elementgewicht en soortelijke massa.

Het verloop van de snelheidskracht (F_d), de versnellingskracht (F_i) en de totale parallelkracht ($F_d + F_i$) is per proef tegen de tijd uitgezet. De figuren 18 t/m 23 geven de resultaten van deze werkwijze.

Uit de figuren volgt dat het aandeel van de versnellingskracht in de totale kracht langs het talud in het algemeen kleiner is dan de bijdrage van de snelheidskracht. In tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de maximale snelheids- en versnellingskrachten tijdens op- en neerloop. Tijdens oploop blijkt de maximale waarde van de snelheidskrachten een factor 2 a 3 groter te zijn dan die van de versnellingskrachten. Tijdens neerloop heeft deze factor een bereik van 1 a 3.

Omdat op het moment van instabiliteit de totale kracht op het afdekelement van belang is, is nagegaan in welke mate de snelheids- en versnellingskracht tot deze kracht bijdragen. De verhoudingen van de snelheids- en versnellingskrachten op het moment dat de totale kracht langs het talud maximaal is, is in de onderste regels van tabel 3 weergegeven. Ook hier blijkt de snelheidskracht groter te zijn dan de versnellingskracht.

Ter vergelijking zijn in de figuren 18 t/m 23 en tabel 3 ook de uit de meting berekende krachten aangegeven. De hiervoor gesignaleerde tendenzen blijken ook voor de gemeten krachten te gelden.

Het zal duidelijk zijn dat de gegeven verhouding verandert als bij de berekening van de krachten, voor de constanten (C_2 , C_3 , C_d en C_m) niet meer de waarde 1 wordt aangehouden. De uitdrukkingen (6) en (7) laten zien dat de gevoeligheid voor verandering in de constanten vrij groot is.

In figuur 24 is te zien dat er een verband bestaat tussen de maximale snelheidskracht en de in paragraaf 4.3 gevonden functie $H \cdot T^{0.5}$. Tussen de maximale versnellingskracht en deze functie is dit verband niet aanwezig.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de resultaten uit hoofdstuk 4 omtrent de waterbeweging, de stabiliteit van afdekelementen en de snelheids en versnellingskrachten samengevat. Aan het eind van dit hoofdstuk zullen enkele aanbevelingen voor verder onderzoek worden gedaan.

5.2 Conclusies

1. De waterbeweging over het talud.

Bij de bepaling van de waterbeweging over het talud, is gebruik gemaakt van twee benaderingen. In de eerste plaats geldt de beweging van het golffront over het talud als benadering voor de waterbeweging langs het talud. Aangenomen wordt dat dit een goede benadering is. In de tweede plaats is de beweging van het golffront benaderd met een harmonische analyse van de vijfde orde. Het verloop van de plaats en de snelheid blijkt goed en van de versnelling van het front redelijk te kunnen worden benaderd door een som van vijf sinussen.

Concluderend kan worden gesteld dat bij een taludhelling van 1:4 de waterbeweging beschreven kan worden als een som van vijf sinussen.

De maximale snelheden en versnellingen van de waterbeweging blijken, bij een taludhelling van 1:4, af te hangen van $\kappa \sin$. In tegenstelling tot hetgeen Sawaragi [3] bij een taludhelling van 1:2 heeft gevonden, treedt bij een taludhelling van 1:4 geen maximum op in het punt van minimum stabiliteit ($\kappa \sin = 2$).

2. Stabiliteit van afdekelementen

Ook in dit onderzoek blijkt dat stabiliteit van de elementen uit de afdeklaag afhankelijk is van de golfperiode. Een lineair verband blijkt te bestaan tussen het benodigde element gewicht en de functie $H^{2.5} T^{1.5}$.

De afgeleide stabiliteitsformule blijkt ook erg gevoelig voor variaties in constanten, die in de uitdrukkingen voor krachten naar voren komen. Alleen de traagheidscoëfficiënt C_m blijkt een kleine invloed op het benodigde gewicht te hebben.

3. Snelheids en versnellingskrachten.

De snelheids- en versnellingskrachten zijn bepaald met behulp van de harmonisch benaderde snelheden en versnelingen. De snelheidskrachten blijken in het algemeen groter te zijn dan de versnellingskrachten. Op het moment dat de langs het talud werkende kracht op het element maximaal is, is de snelheidskracht gemiddeld een factor 10 groter. Tussen de snelheidskracht en de functie $H^{2.5}$. $T^{0.5}$ blijkt ook een lineair verband te bestaan. Bij toenemende functiewaarde neemt ook de snelheidskracht toe. Tussen deze functie en de versnellingskracht bestaat geen verband.

5.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De benadering van de waterbeweging over het talud met een som van vijf sinussen lijkt te voldoen voor stortstenen golfbrekers met een taludhelling 1:4. Om na te kunnen gaan of dit ook voor andere taludhellingen en soorten afdekelementen het geval is, moeten ook andere golfbrekermodellen worden onderzocht.

Dit onderzoek zou gecombineerd kunnen worden met een onderzoek naar stabiliteit van afdekelementen zoals dit in deel IV van het S467 onderzoek is behandeld. De registraties van snelheden en versnelingen zouden dan gebruikt kunnen worden om de aannames uit het golfaanval-golfkrachten model te verifiëren.

Literatuur

- [1] Waterloopkundig Laboratorium,
Taluds van losgestorte materialen.
Hydraulische aspecten van stortsteen,
grind en zandtaluds onder golfaanval.
Literatuurstudie M1809.
juli 1984

- [2] Ahrens, J.P. ,
Large wave tank tests of riprap stability
CERC. Technical memorandum nr 51
May 1975

- [3] Sawaragi, T ; Ryu, C ,
Considerations of the destruction mechanism of
rubblemound breakwaters due to the resonance phenomenon.
8th international harbour congress
Antwerp 1983

- [4] Walton, I.L. ; Weggel, J.R. ,
Stability of rubblemound breakwaters.
Proceedings ASCE WW3
1981

- [5] Battjes, J.A. ,
college dictaat korte golven (b76)
Technische Hogeschool Delft.

- [6] Brandtzaeg, A. ; Torum, A. ,
A simple mathematical model of wave motion on a rubble
mound breakwaterfront.
Proceedings Coastal engineering conference, chapter 57
1966

- [7] Bruun, P. ; Johanneson, P. ,
a critical review of hydraulics of rubblemound structures
University of Trondheim, report R3.
1974

- [8] Raichlen, F. ,
The effect of waves on rubble-mound structures.
Annual review of fluid mechanics, Vol. 7, 1975, p 327-356

Literatuur (vervolg)

- [9] Iribarren, R.C. ,
Generalisation of the formula for calculating of rock fill
dikes and verification of its coefficient.
1950
- [10] Hudson, R. Y.,
Design of quarry stone cover layers for rubble mound
breakwaters.
WES. , R.
R. no. 2-2
July 1958
- [11] Meer, J. W. van der ; Pilarczyk, K. W.
Stability of rubble mound slopes under random wave attack
Waterloopkundig Laboratorium, publicatie 332
December 1984

proefnr.	sche harmoni-	OP/AFLOOP [M]			SNELHEID [M/S]			VERSNELLING [M/S ²]		
		ampl.	hoek- snelh.	fase	ampl.	hoek- snelh.	fase	ampl.	hoek- snelh.	fase
1	1	0.0773	3.035	1.639	.9510	3.035	.0530	.1146	3.035	4.758
	2	0.0145	6.071	1.496	.0365	6.071	6.176	.0870	6.071	4.593
	3	0.0093	9.106	0.891	.0346	9.106	5.584	.1223	9.106	4.038
	4	0.0035	12.141	5.346	.0155	12.141	3.799	.0729	12.141	2.241
	5	0.0013	15.177	5.005	.0069	15.177	3.610	.0387	15.177	2.158
2	1	0.1021	2.567	0.969	.1036	2.567	5.684	.1063	2.567	4.108
	2	0.0150	5.133	5.710	.0299	5.133	4.155	.0613	5.133	2.583
	3	0.0081	7.700	4.962	.0232	7.700	3.391	.0697	7.700	1.832
	4	0.0016	10.267	2.794	.0072	10.267	0.919	.0286	10.267	5.594
	5	0.0016	12.833	4.026	.0070	12.833	2.256	.0353	12.833	0.776
3	1	0.1515	2.400	4.849	.1453	2.400	3.273	.1411	2.400	1.736
	2	0.0183	4.800	1.753	.0319	4.800	0.168	.0625	4.800	4.854
	3	0.0152	7.200	4.597	.0451	7.200	3.031	.1293	7.200	1.508
	4	0.0050	9.600	1.336	.0169	9.600	5.986	.0685	9.600	4.423
	5	0.0028	12.000	3.533	.0133	12.000	2.090	.0619	12.000	0.604
4	1	0.0459	5.236	1.542	.0953	5.236	6.311	.1973	5.236	4.624
	2	0.0038	10.472	5.129	.0125	10.472	3.672	.0604	10.472	2.286
	3	0.0056	15.708	5.007	.0313	15.708	3.414	.1911	15.708	1.931
	4	0.0013	20.944	5.707	.0078	20.944	3.194	.0560	20.944	2.073
	5	0.0009	26.180	3.936	.0064	26.180	0.363	.0577	26.180	0.588
5	1	0.2374	1.641	1.433	.1555	1.641	6.146	.1024	1.641	4.586
	2	0.0409	3.281	2.085	.0540	3.281	0.499	.0716	3.281	5.209
	3	0.0228	4.922	0.831	.0454	4.922	5.563	.0900	4.922	4.005
	4	0.0061	6.562	1.647	.0174	6.562	0.082	.0448	6.562	4.855
	5	0.0057	8.203	5.054	.0171	8.203	3.430	.0560	8.203	1.873
6	1	0.1185	2.567	5.401	.1196	2.567	3.824	.1220	2.567	2.271
	2	0.0266	5.133	1.999	.0530	5.133	0.419	.1080	5.133	5.145
	3	0.0054	7.700	0.022	.0162	7.700	4.643	.0490	7.700	3.088
	4	0.0058	10.267	1.828	.0222	10.267	0.252	.0902	10.267	4.949
	5	0.0017	12.833	3.928	.0084	12.833	2.773	.0407	12.833	0.360
7	1	0.1284	2.567	1.020	.1301	2.567	5.736	.1357	2.567	4.137
	2	0.0319	5.133	5.743	.0636	5.133	4.180	.1331	5.133	2.643

TABEL 1 VIJFDE-ORDE HARMONISCHE CONSTANTEN VOOR OP-EN AFLOOP, SNELHEID EN VERSNELLING.

PROEFNR.	1	2	3	4	5	6	7
GOLFHOOGTE [M]	0,107	0,111	0,167	0,130	0,154	0,149	0,169
GOLFPERIODE [S]	2,070	2,448	2,618	1,200	3,830	2,448	2,448
SURF-SIMILARITY PARAMETER [-]	1,98	2,30	2,00	1,04	3,05	1,98	1,86

TABEL 2 PROEFGEGEVENS

PROEF	H (M)	T (S)	W.ES. (N)	W.HA. (N)
P01	0.107	2.07	0.036	0.054
P02	0.111	2.45	0.046	0.041
P03	0.167	2.62	0.556	0.168
P04	0.130	1.20	0.116	0.019
P05	0.154	3.83	0.416	0.168
P06	0.149	2.45	0.274	0.130

W.ES. = AFDEK-ELEMENTGEWICHT VOLGENS DE ENKELE-SINUSBENADERING
VAN WALTON EN WEGGEL (4)

W.HA. = AFDEK-ELEMENTGEWICHT VOLGENS DE HARMONISCHE-ANALYSE VAN
DE VIJFDE ORDE

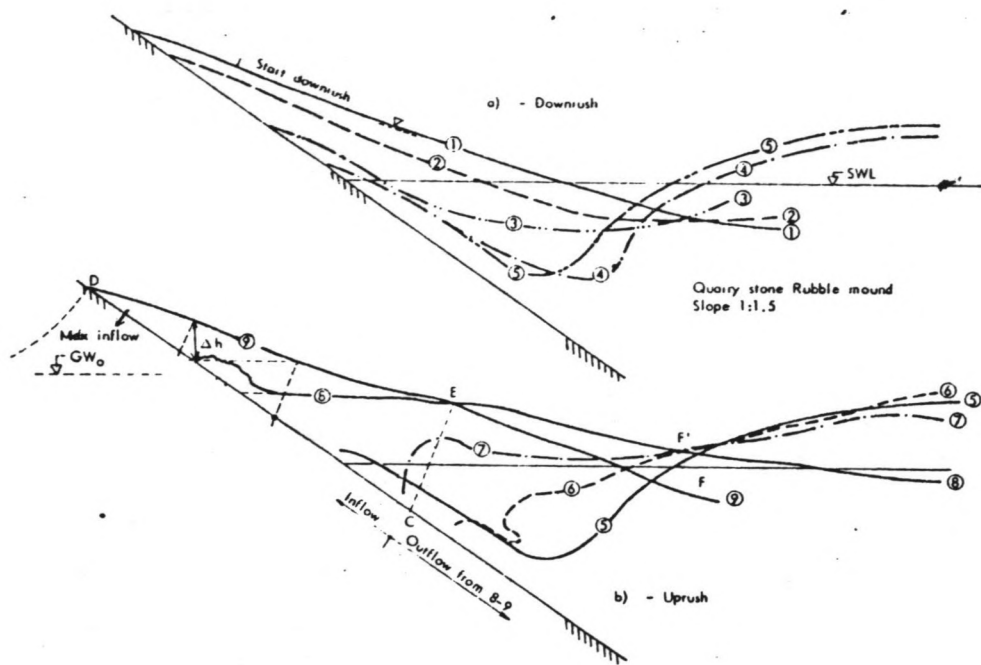
TABEL 3 BENADERDE AFDEK-ELEMENTGEWICHTEN

PROEFNR.	1		2		3		4		5		6		7	
GEMETEN/BENADERD	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B	G	B
FD _{MAX.} opwaarts [N][10 ²] neerwaarts	59	51	48	48	125	118	29	29	124	122	90	81		
	20	18	30	24	78	47	16	16	125	81	38	38		
FI _{MAX.} opwaarts [N][10 ²] neerwaarts	25	22	30	16	51	31	40	28	26	18	31	22		
	25	8	36	11	42	19	35	26	39	12	22	12		
(FD+FI) _{MAX.} opwaarts [N][10 ²] neerwaarts	70	61	60	52	138	114	54	29	134	124	102	81		
	25	24	45	21	82	43	36	22	142	88	42	42		
FD _{MAX} /FI _{MAX} [-] opwaarts neerwaarts	2,4	2,4	1,6	3,0	2,5	3,8	0,7	1,0	4,8	6,8	2,9	3,7		
	0,8	2,2	0,8	2,3	1,9	2,5	0,5	0,6	3,3	6,8	1,7	3,2		
(FD/FI) (FD+FI)=MAX [-] opwaarts neerwaarts	6,0	4,6	1,9	8,0	12,0	30,0	1,5	2,0	24,0	22,0	4,0	17,5		
	4,5	4,9	0,2	1,8	35,0	3,3	0,4	20,0	13,0	80,0	8,0	5,0		

VERVALLEN

TABEL 4

MAXIMALE WAARDEN VAN DE SNELHEIDSKRACHT (Fd) EN DE VERSNELLINGSKRACHT (Fi) TIJDENS DE OPLOPENDE EN DE NEERLOPENDE WATERBEWEGING BEREKEND UIT HET GEREGISTREERDE EN HET HARMONISCHE SIGNAAL.



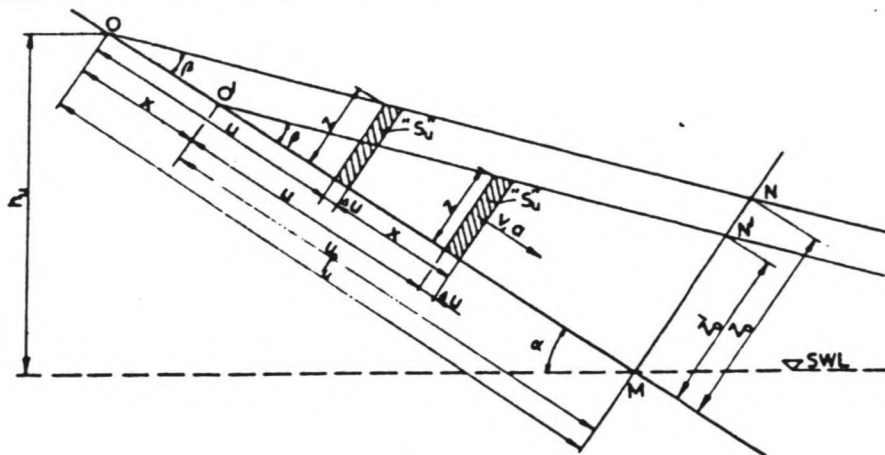
Golfprofielen tijdens up- en downrush
Bruun en Johannesson [7]

GOLFPROFIELEN OP EEN TALUD

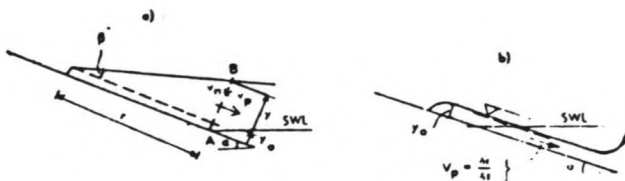
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

S 467

FIG. 1



a) Brandtzaeg [6]; β is constant



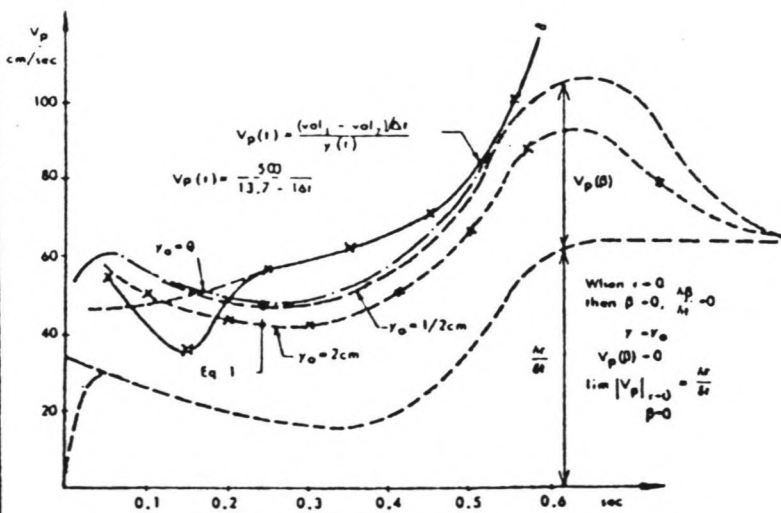
$$V_p = \frac{2r}{2t} + \frac{r^2}{r_0 + r \tan \beta} \frac{1}{2 \cos^2 \beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial t} = V_p(t) + V_p(\beta)$$

When $\beta = 0$ then $r = r_0$, $\frac{\partial \beta}{\partial t} = 0$, $\rightarrow V_p(\beta) = 0$

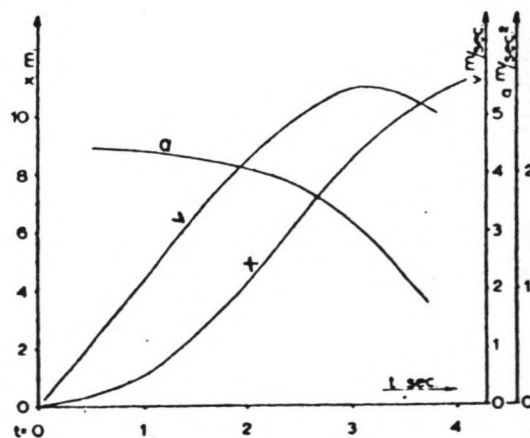
$$\lim_{\beta \rightarrow 0} |V_p| = \frac{2r}{2t}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = 0$$

b) Bruun en Johannesson [7]; β nadert tot α

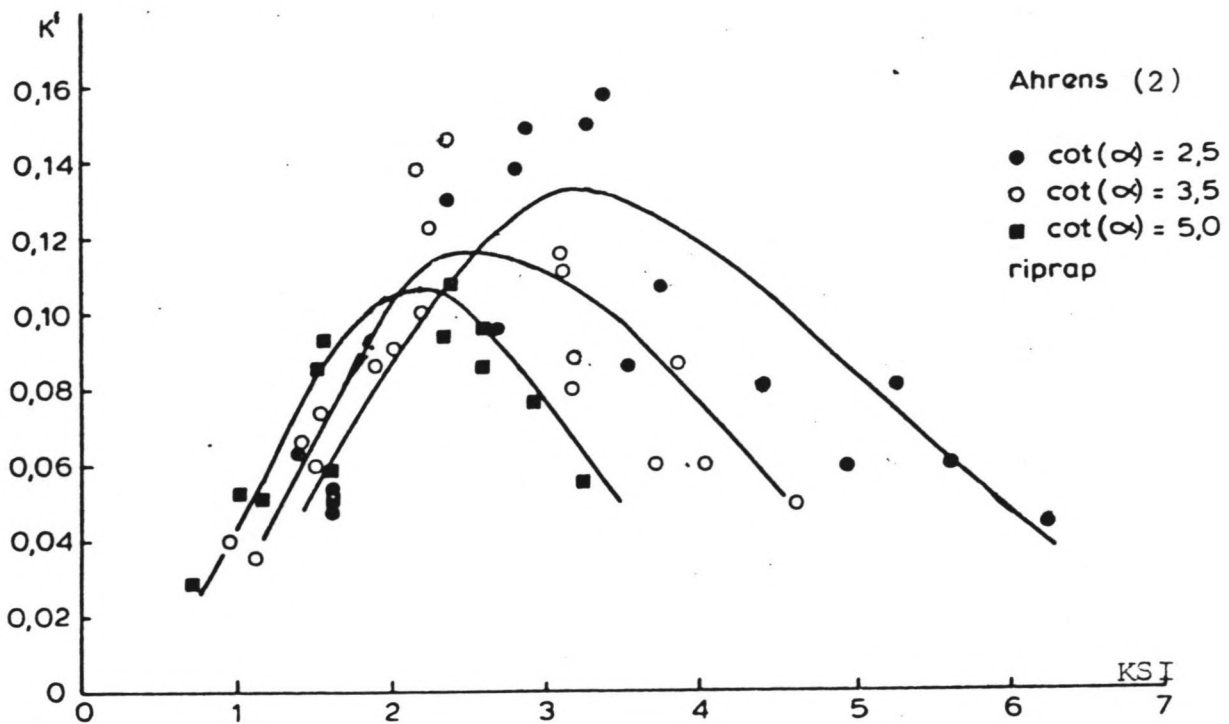


c) Bruun en Johannesson [7]
Snelheid evenwijdig aan talud $V_p(t)$



d) Brandtzaeg [6]
a = versnelling
v = snelheid
x = verplaatsing

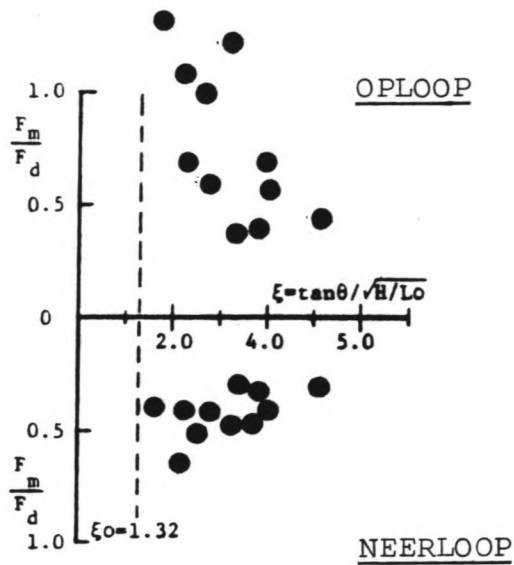
SNELHEIDSBEREKENINGEN TIJDENS DE NEERGAANDE WATERBEWEGING



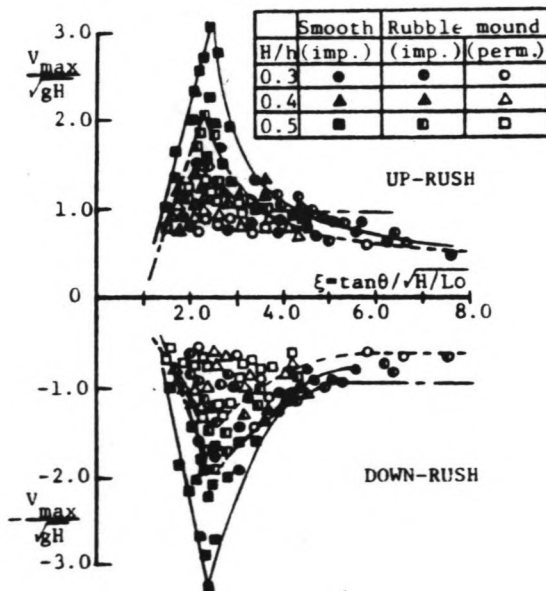
INVLOED VAN DE KSI-PARAMETER OP DE ELEMENT STABILITEIT

$$W = \frac{\rho_s \cdot H^3}{\Delta^3} \cdot K'$$

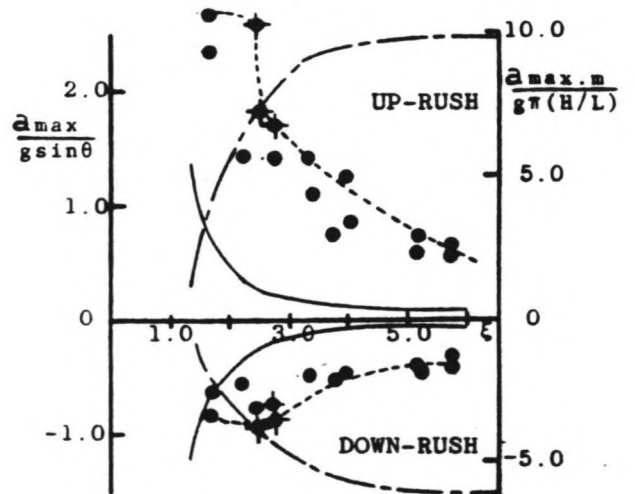
INVLOED VAN DE KSI-PARAMETER OP DE AFDEKELEMENT
STABILITEIT, VOLGENS AHRENS (2)



AFDEK-ELEMENTGEWICHT : 20 TON
 MODEL-SCHAAL : 1:126
 TALUDHELLING : 1:2,0
 DOORLATENDE KERN



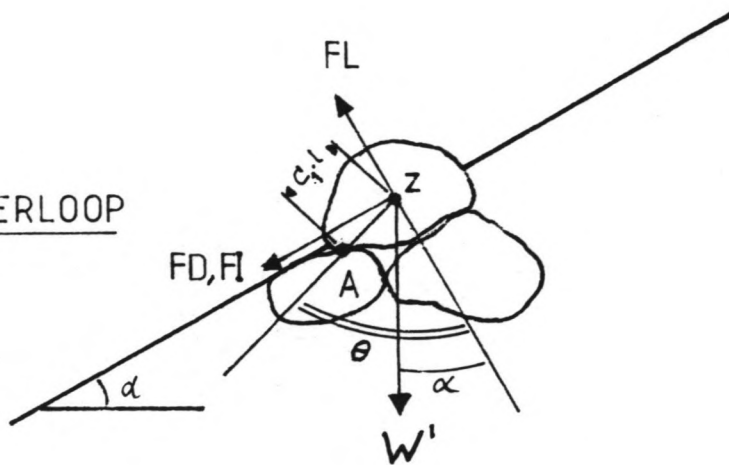
b) VERBAND MAX. SNELHEDEN-KSI



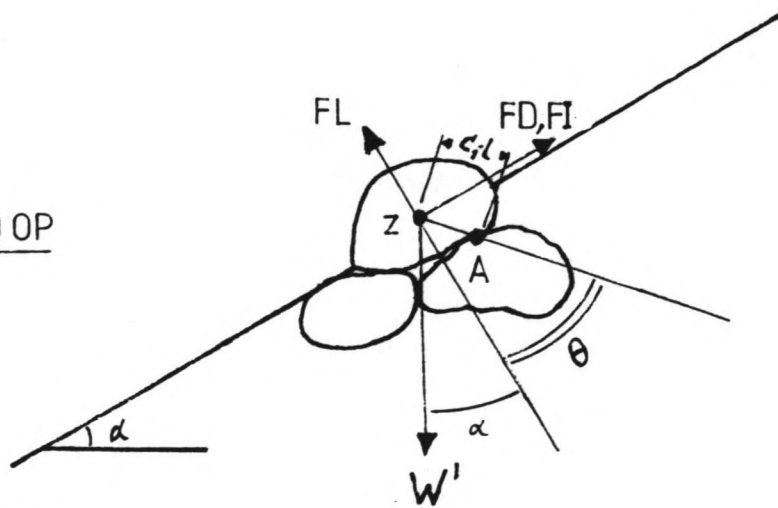
c) VERBAND MAX. VERSNELLINGEN-KSI

VERBAND TUSSEN KSI EN DE VERHOUDING SNEL-
 HEIDS/VERSNELLINGSKRACHT ENERZIJD EN TUSSEN
 KSI EN DE MAXIMALE SNELHEDEN EN VERSNELLINGS-
 KRACHT ANDERZIJD, VOLGENS SAWARAGI (3).

TIJDENS NEERLOOP

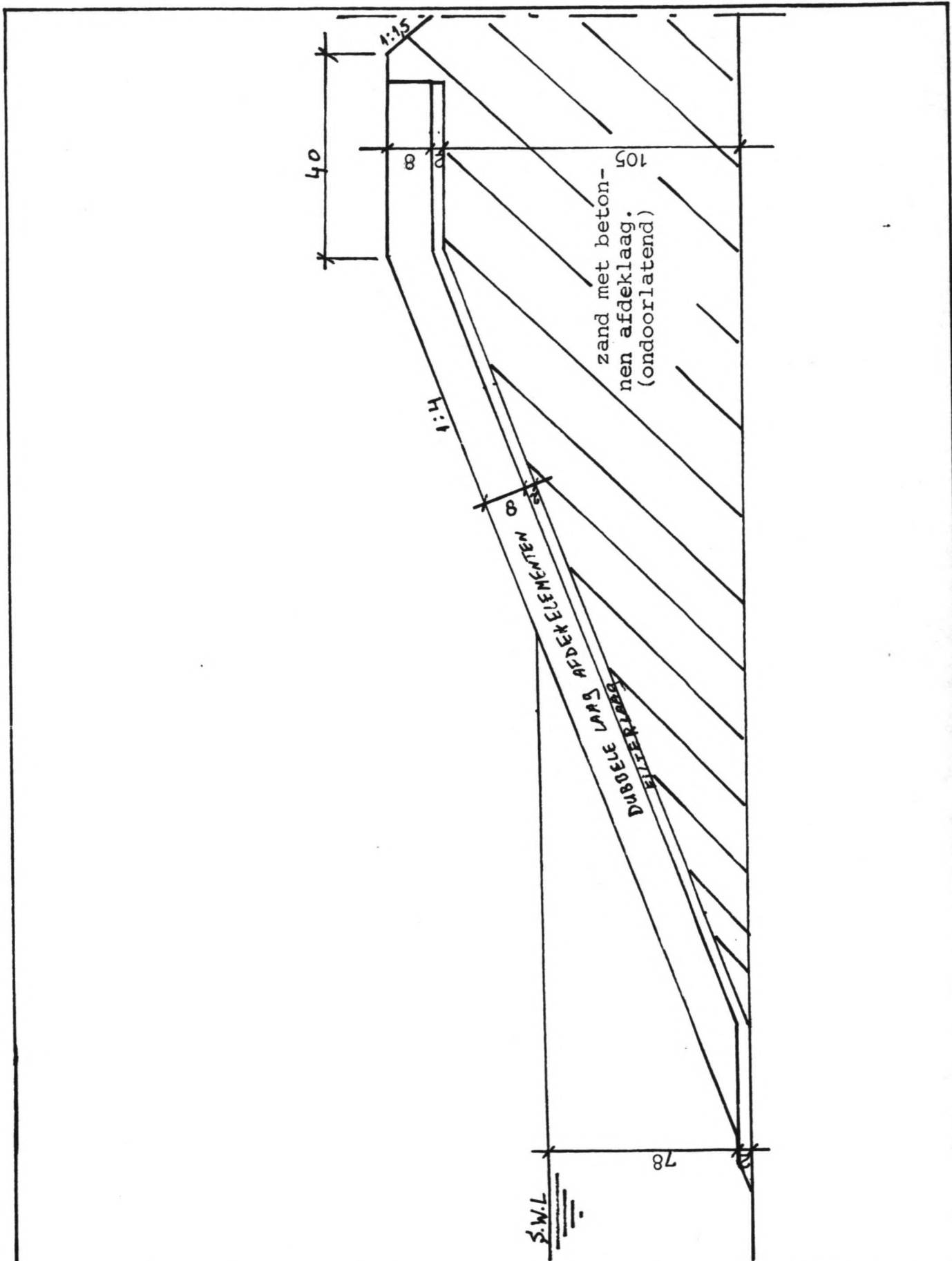


TIJDENS OPLOOP

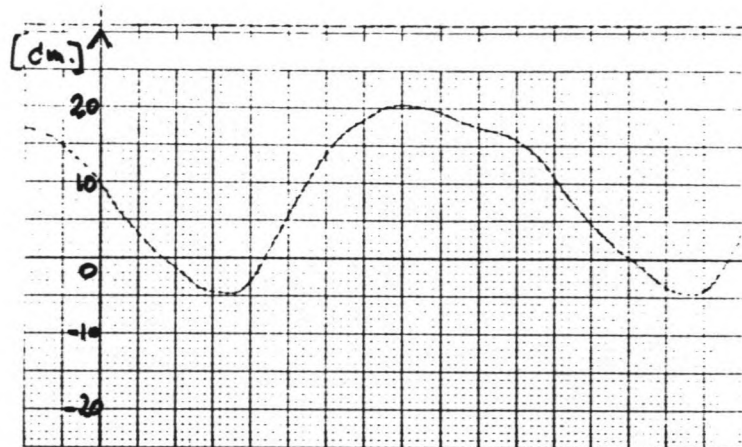


- FL=LIFTKRACHT
- FD=SLEEPKRACHT
- FI=TRAAGHEIDSKRACHT
- W'=ONDERWATERGEWICHT AFDEKELEMENT
- α =TALUDHELLING
- θ =HOEK VAN NATUURLIJK TALUD
- Z=ZWAARTEPUNT
- c:l=HEFBOOMARM
- l=KAR. LENGTE MAAT AFDEKELEMENT

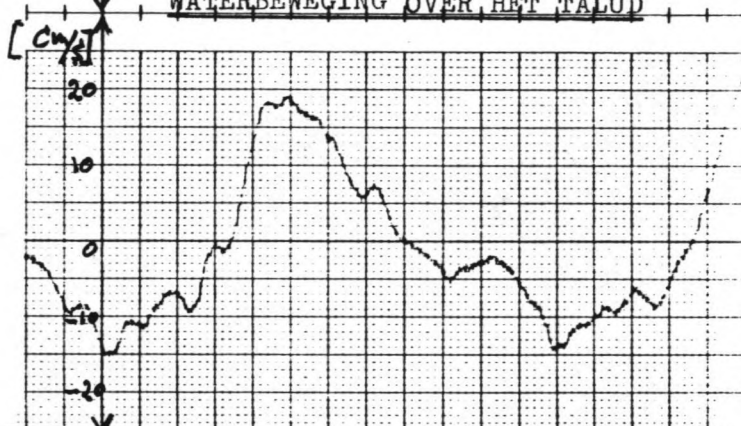
KRACHTENEVENWICHT VAN EEN AFDEKELEMENT
TIJDENS GOLFAANVAL, VOLGENS RAICHLIN (8)



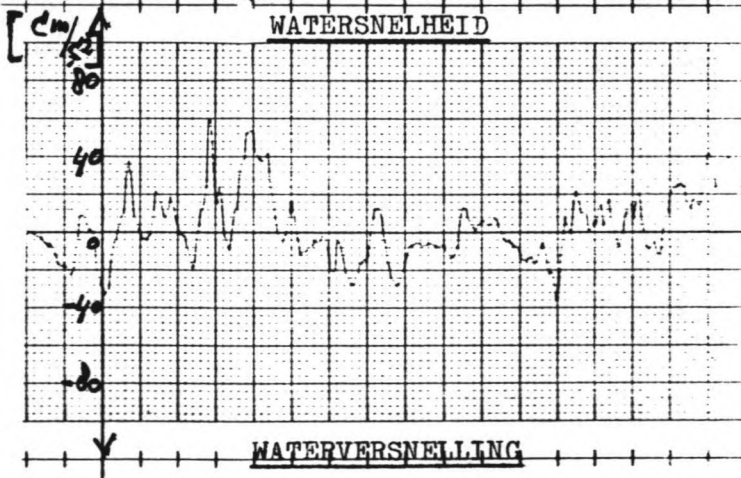
DOORSNEDE VAN HET GOLFBREKERMODEL maten in cm.
 schaal 1:10



WATERBEWEGING OVER HET TALUD



WATERSNELHEID



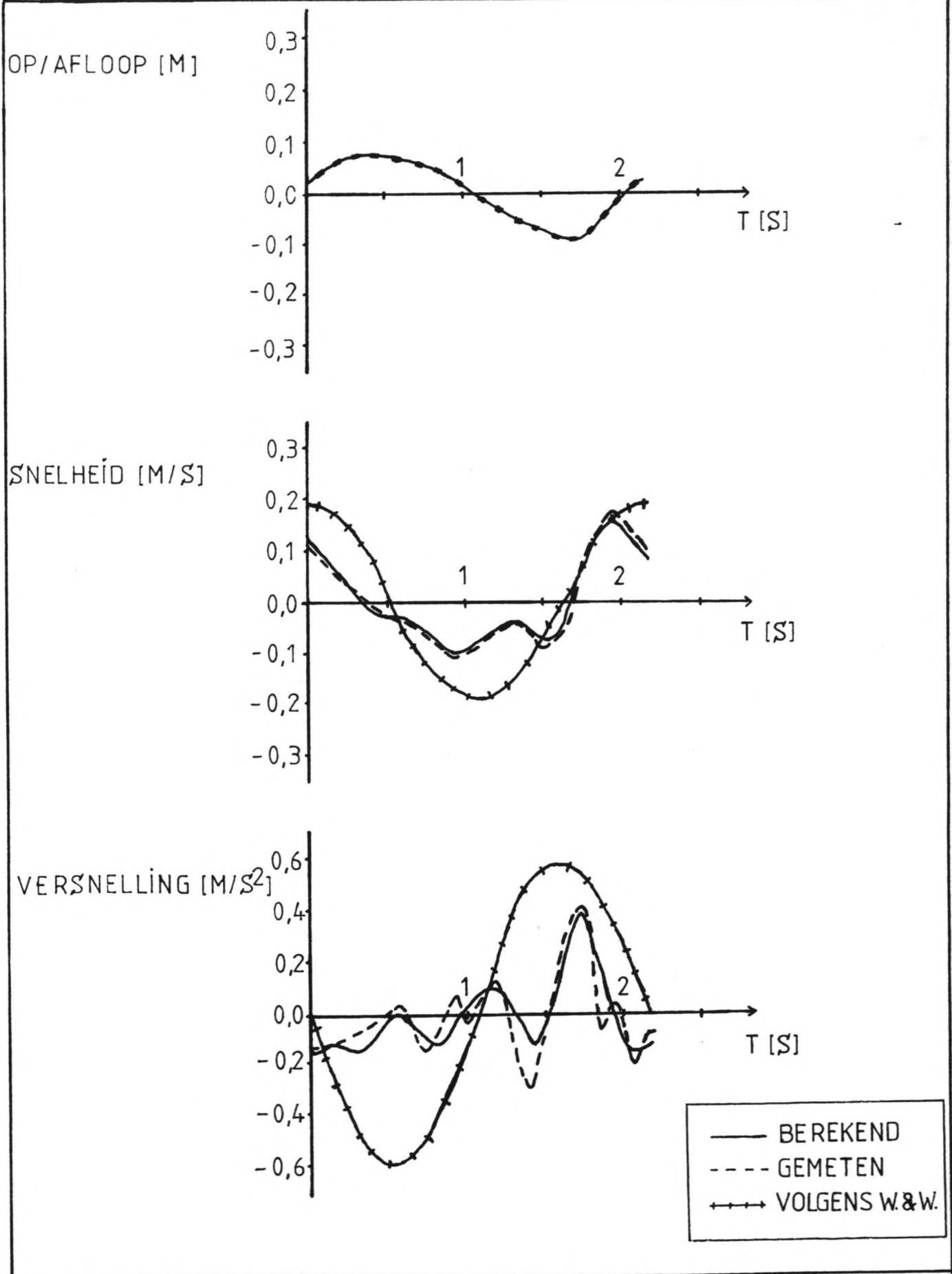
WATERVERSNELLING

Systems Division

Cleveland, Ohio

Printed in U.S.A.

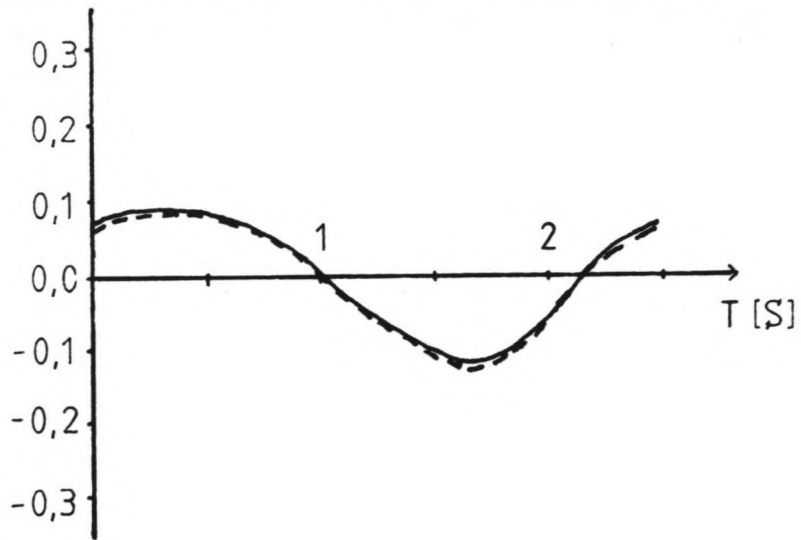
VOORBEELDEN VAN REGISTRATIES VAN DE WATERBEWEGING,
 -SNELHEID EN -VERSNELLING OP HET TALUD,
 LOODRECHT TEN OPZICHTE VAN DE HORIZONTAAL.



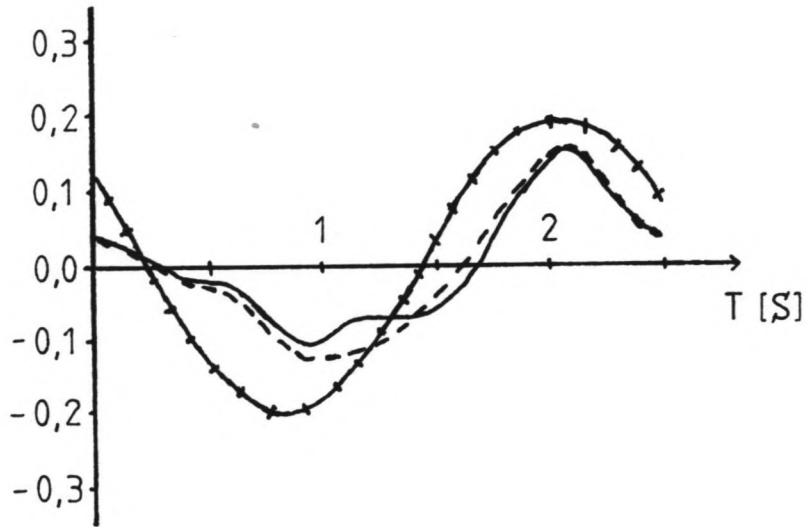
— BEREKEND
 - - - GEMETEN
 + + + VOLGENS W.&W.

OP/AFLOOP-, SNELHEIDS- EN VERSNELLINGSSIGNAAL, RESP. GEMETEN, BEREKEND ALS SOM VAN VIJF HARMONISCHEN EN VOLGENS WALTON EN WEGGEL [4]	P 01	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	S 467	FIG. 8

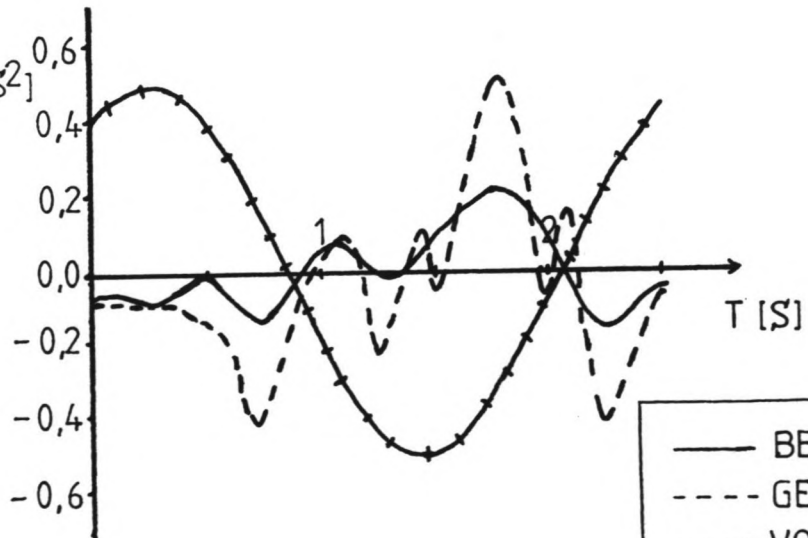
OP/AFLOOP [M]



SNELHEID [M/S]



VERSNELLING [M/S²]



— BEREKEND
 - - - GEMETEN
 + + + VOLGENS W.&W.

OP/AFLOOP-, SNELHEIDS- EN VERSNELLINGSSIGNALAAL,
 RESP. GEMETEN, BEREKEND ALS SOM VAN VIJF HARMO-
 NISCHEN EN VOLGENS WALTON EN WEGGEL [4]

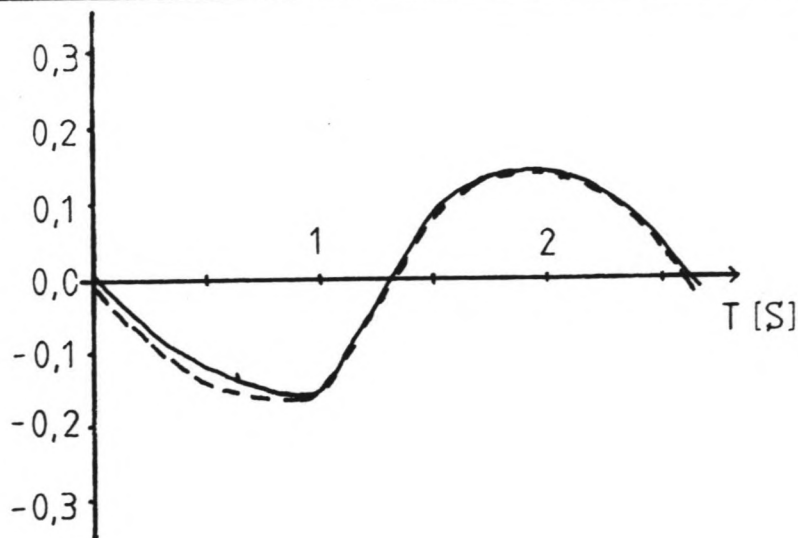
P 02

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

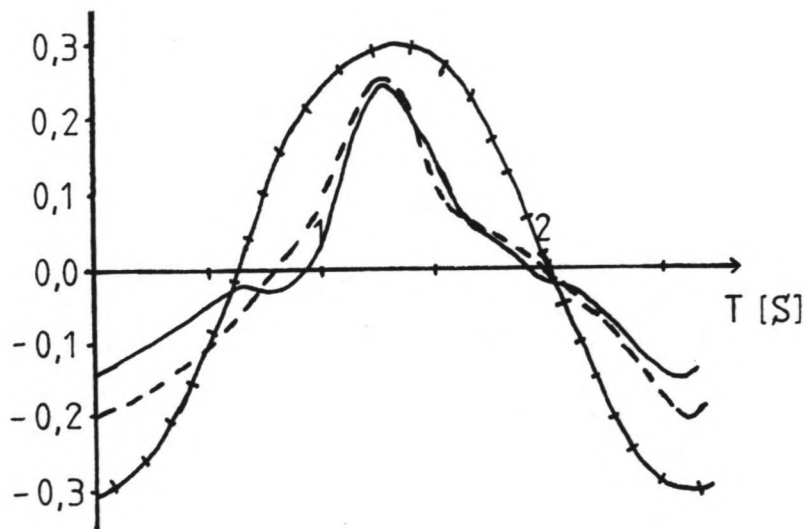
S 467

FIG. 9

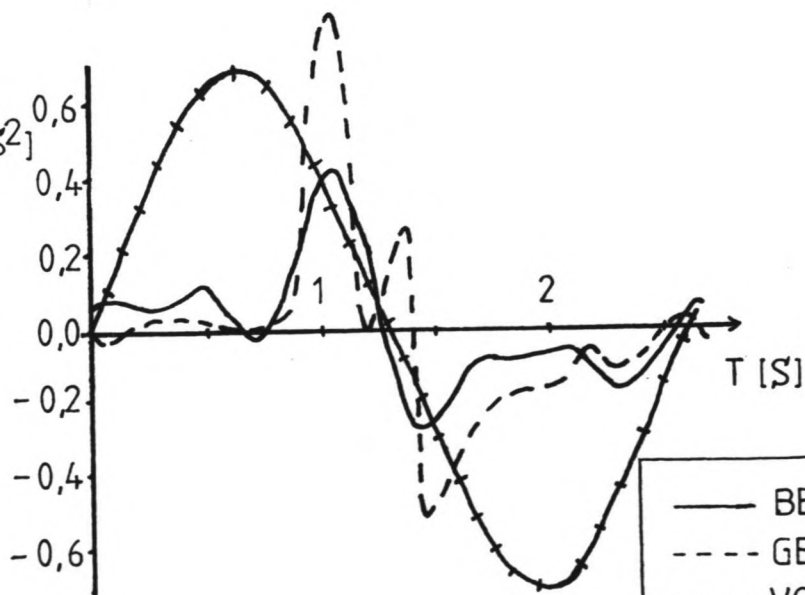
OP/AFLOOP [M]



SNELHEID [M/S]



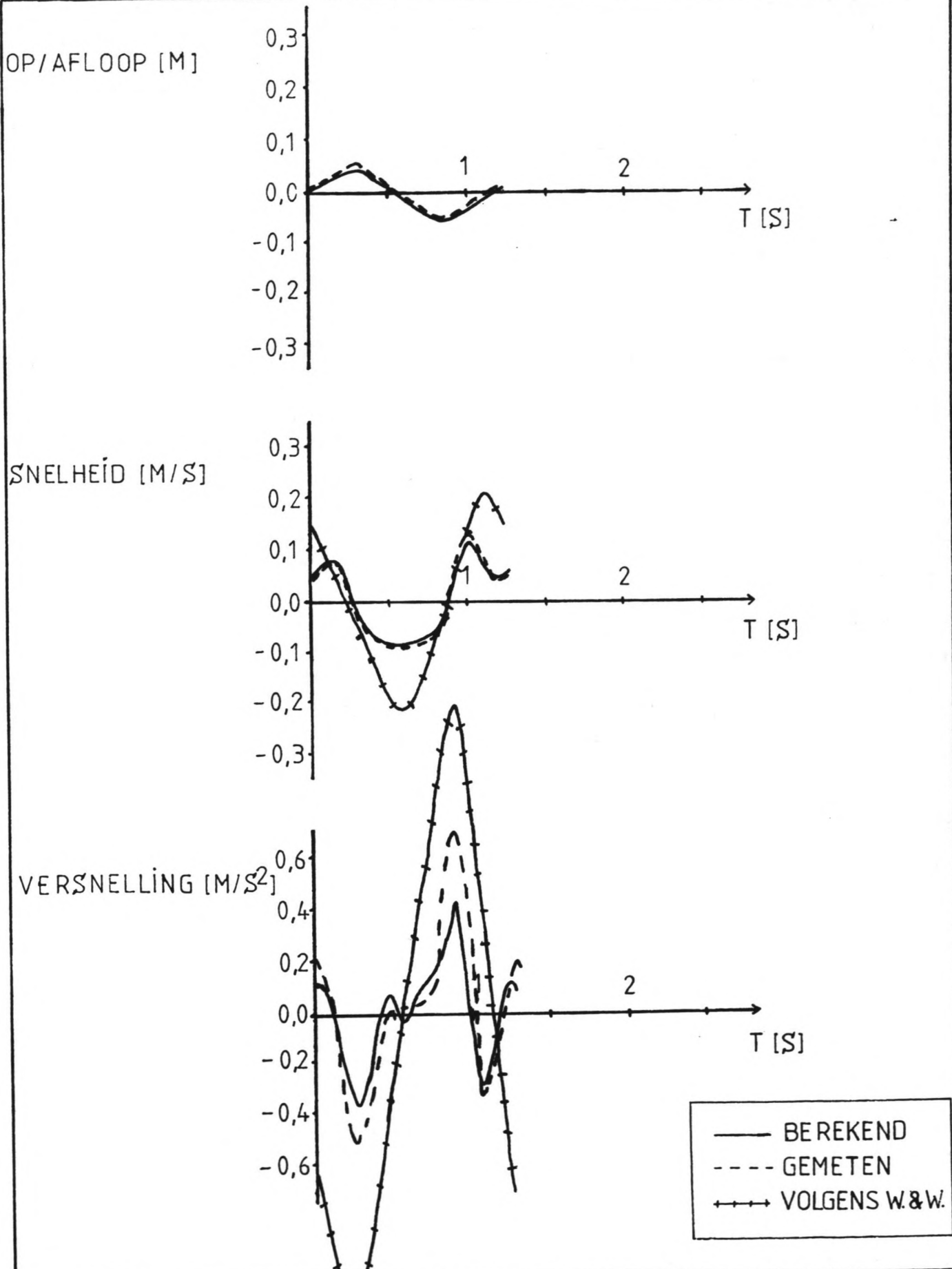
VERSNELLING [M/S²]



— BEREKEND
 - - - GEMETEN
 + + + VOLGENS W.&W.

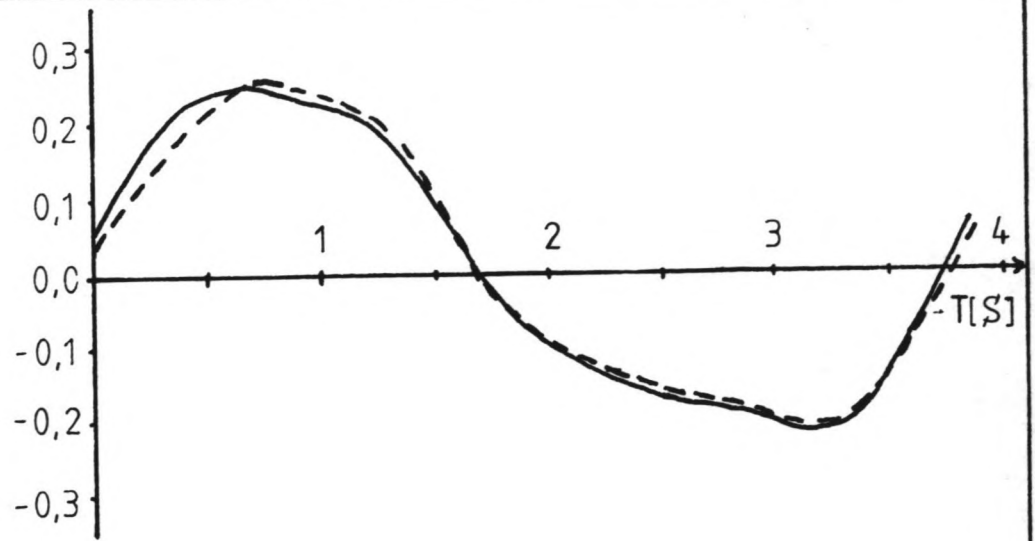
OP/AFLOOP-, SNELHEIDS- EN VERSNELLINGSSIGNAL, RESP. GEMETEN, BEREKEND ALS SOM VAN VIJF HARMONISCHEN EN VOLGENS WALTON EN WEGGEL [4]

P 03	
§ 467	FIG. 10

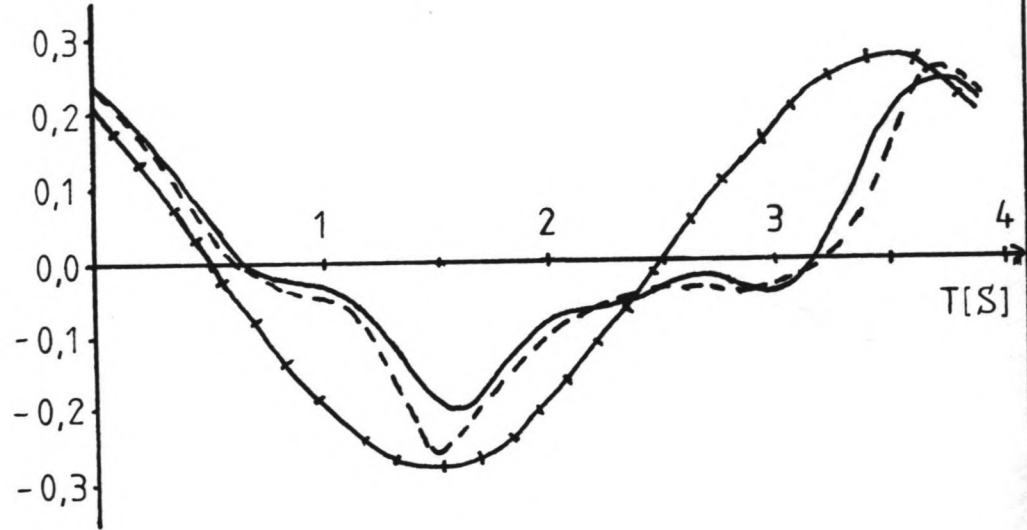


OP/AFLOOP-, SNELHEIDS- EN VERSNELLINGSSIGNAAL, RESP. GEMETEN, BEREKEND ALS SOM VAN VIJF HARMONISCHEN EN VOLGENS WALTON EN WEGGEL [4]	P 04	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	S 467	FIG. 11

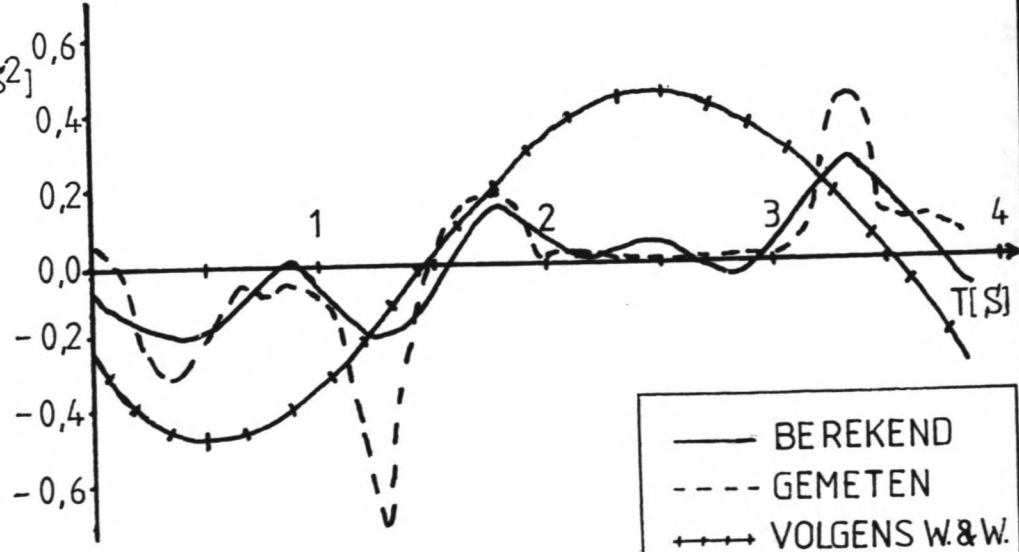
OP/AFLOOP [M]



SNELHEID [M/S]



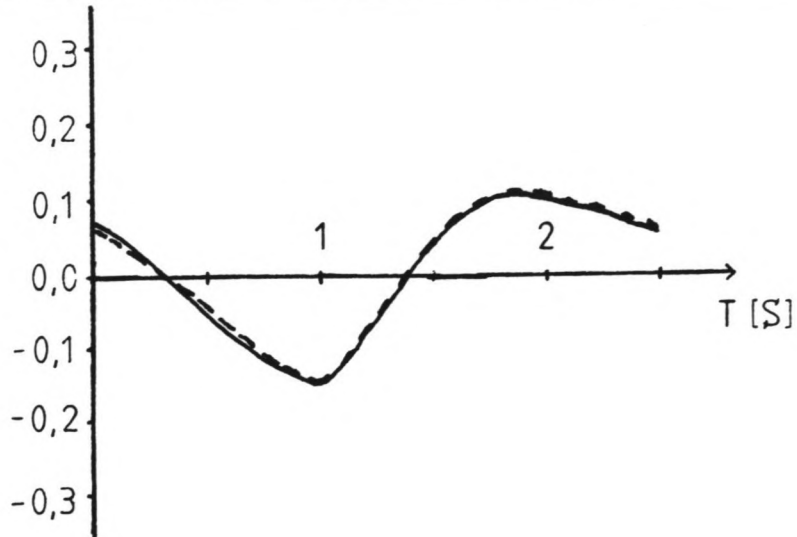
VERSNELLING [M/S²]



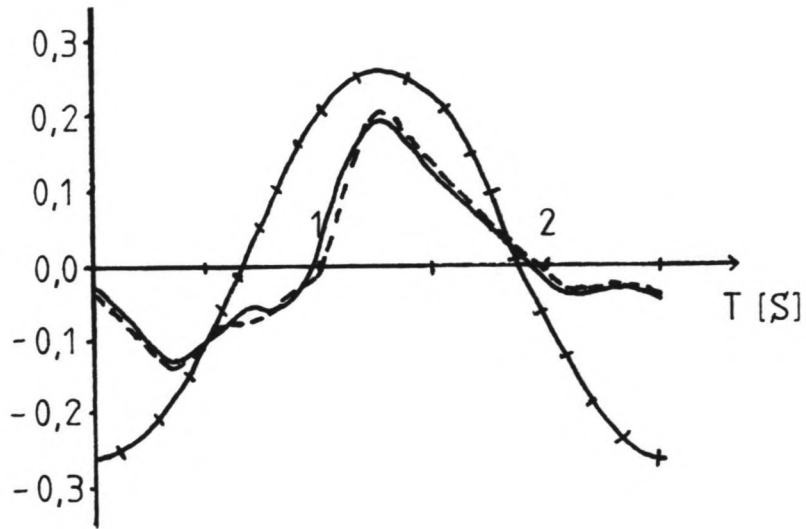
— BEREKEND
 - - - GEMETEN
 + + + VOLGENS W.&W.

OP/AFLOOP-, SNELHEIDS- EN VERSNELLINGSSIGNAL, RESP. GEMETEN, BEREKEND ALS SOM VAN VIJF HARMONISCHEN EN VOLGENS WALTON EN WEGGEL [4]

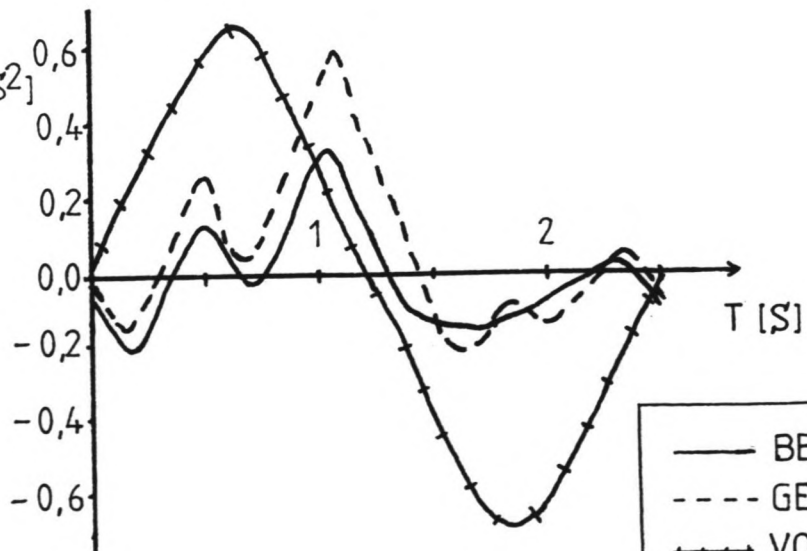
OP/AFLOOP [M]



SNELHEID [M/S]



VERSNELLING [M/S²]



— BEREKEND
- - - GEMETEN
+ + + VOLGENS W.&W.

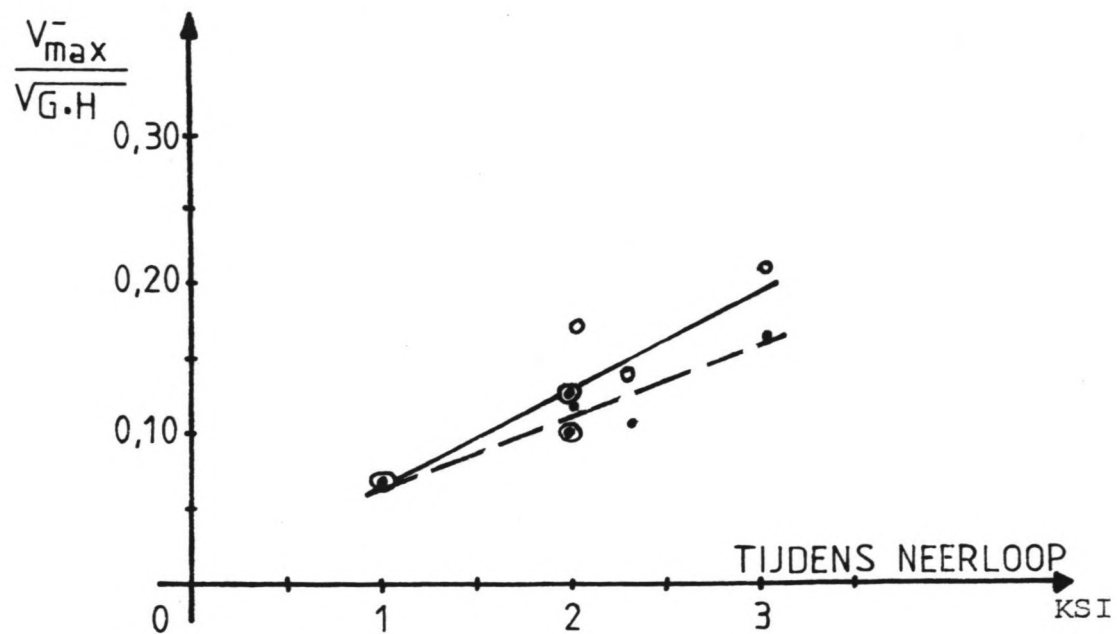
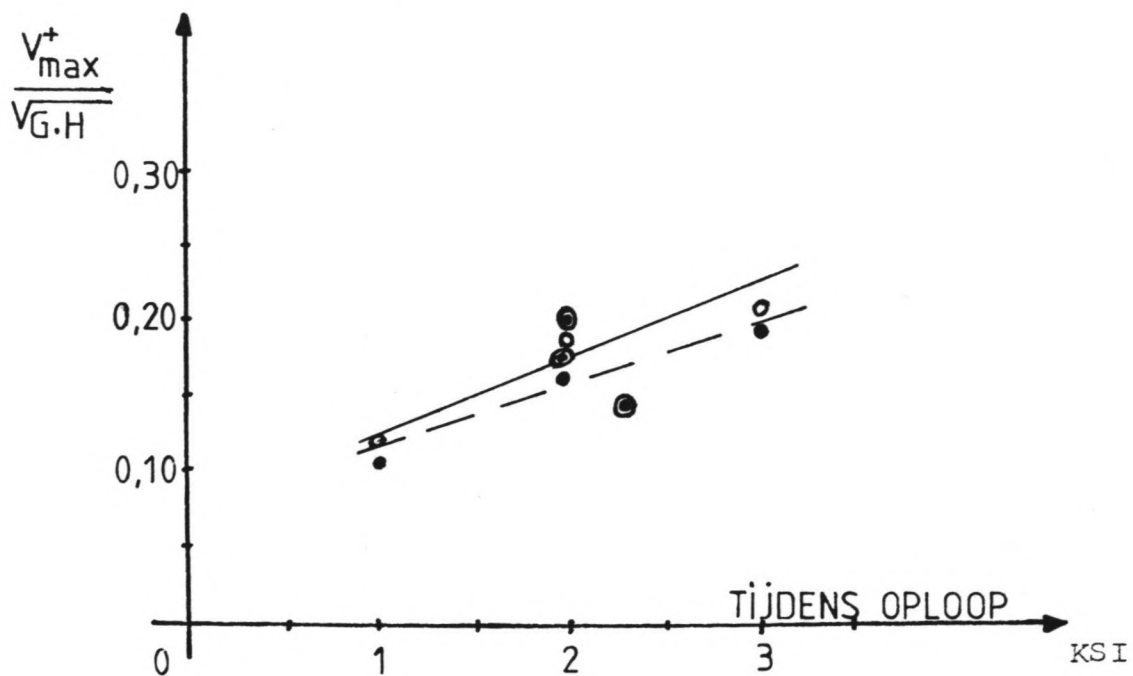
OP/AFLOOP-, SNELHEIDS- EN VERSNELLINGSSIGNAAL,
RESP. GEMETEN, BEREKEND ALS SOM VAN VIJF HARMO-
NISCHEN EN VOLGENS WALTON EN WEGGEL [4]

P 06

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

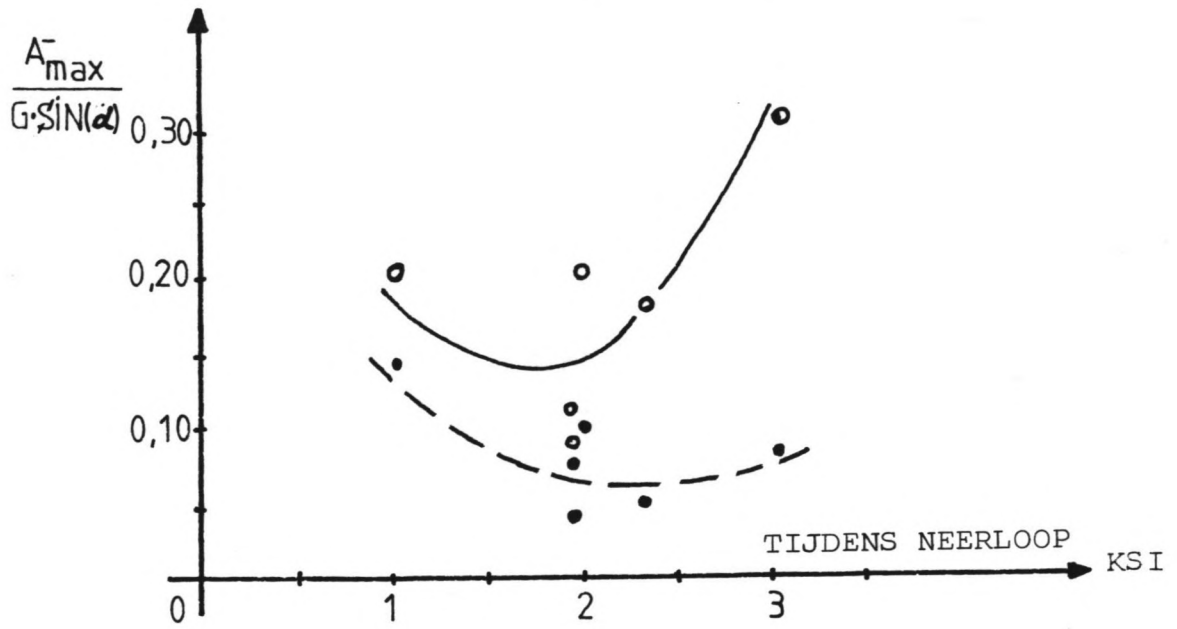
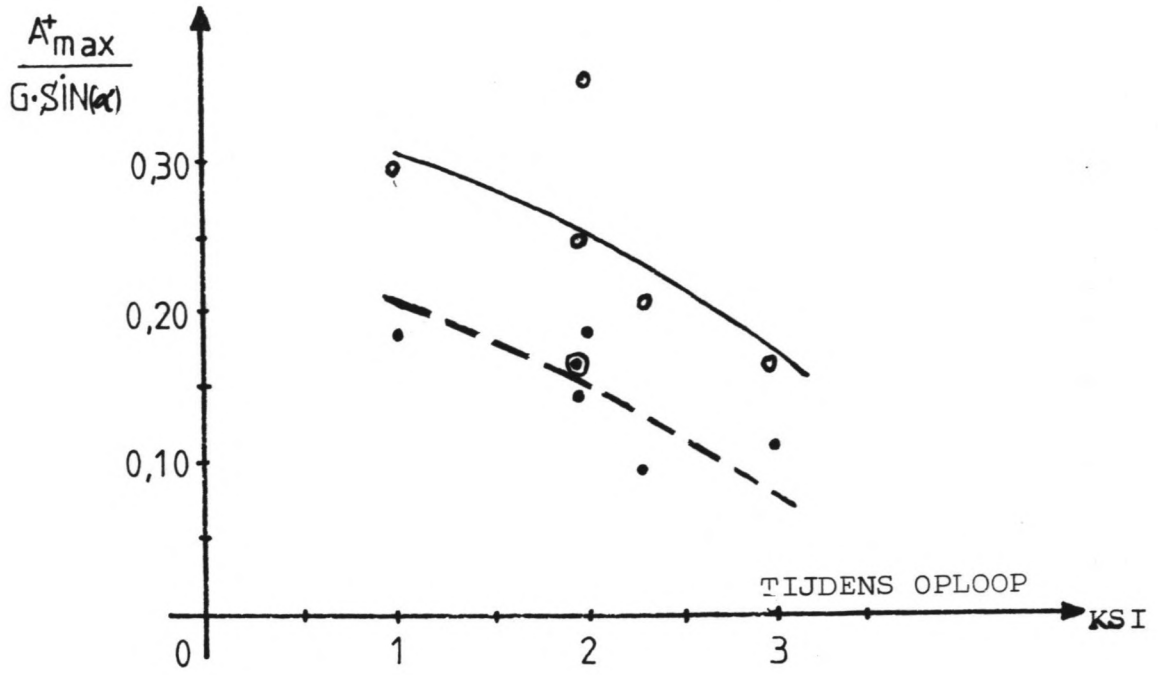
S 467

FIG. 13



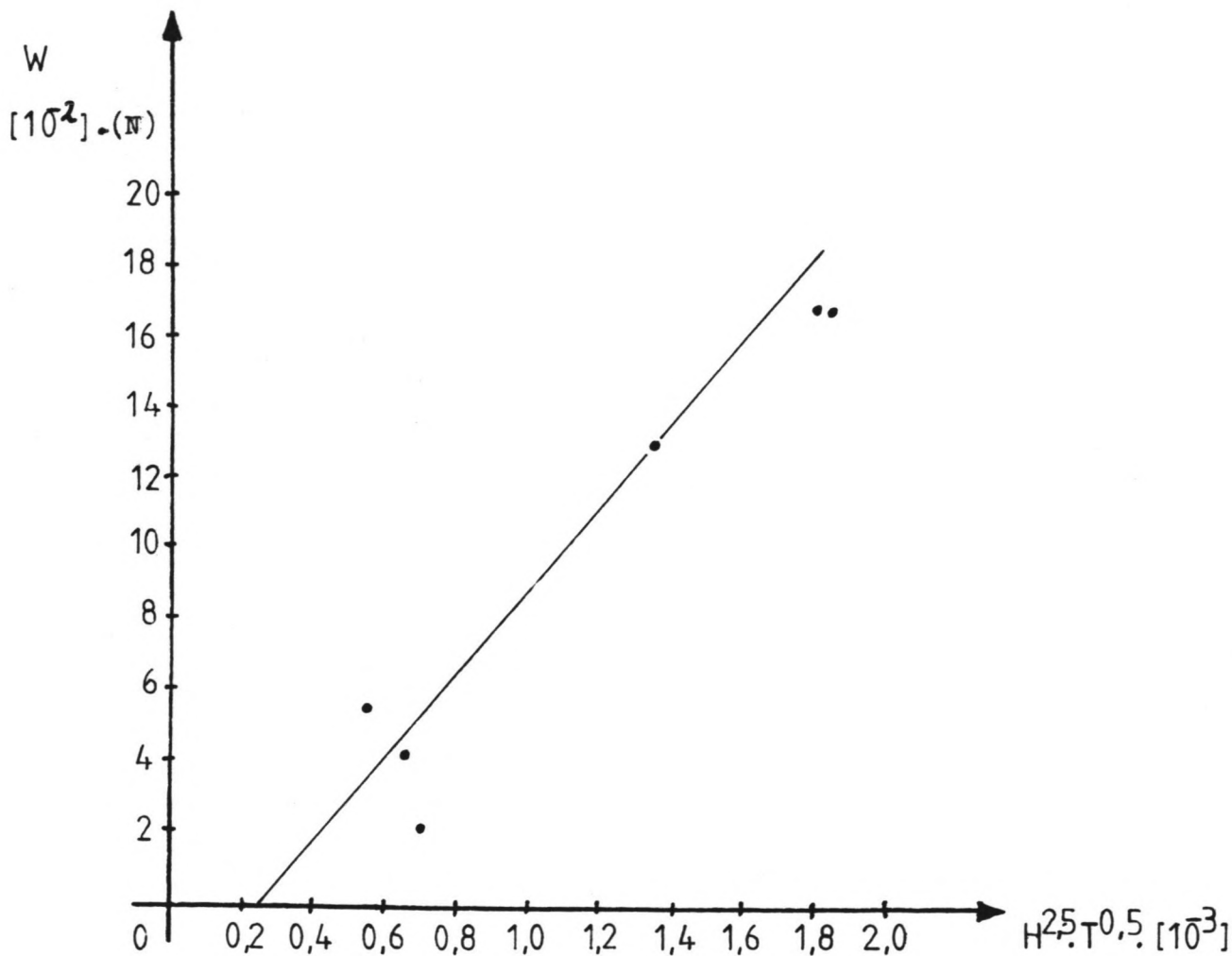
- = gemeten waarde —————
- = harmonisch benaderde waarde - - - - -

VERBAND KSI - GEMETEN RESP. HARMONISCH BENADERDE MAXIMALE OP/NEERLOOP SNELHEDEN



○ = gemeten waarde ———
 ● = harmonisch benaderde waarde - - -

VERBAND KSI - GEMETEN RESP. HARMONISCH BENADERDE MAXIMALE OP/NEERLOOP VERSNELLINGEN



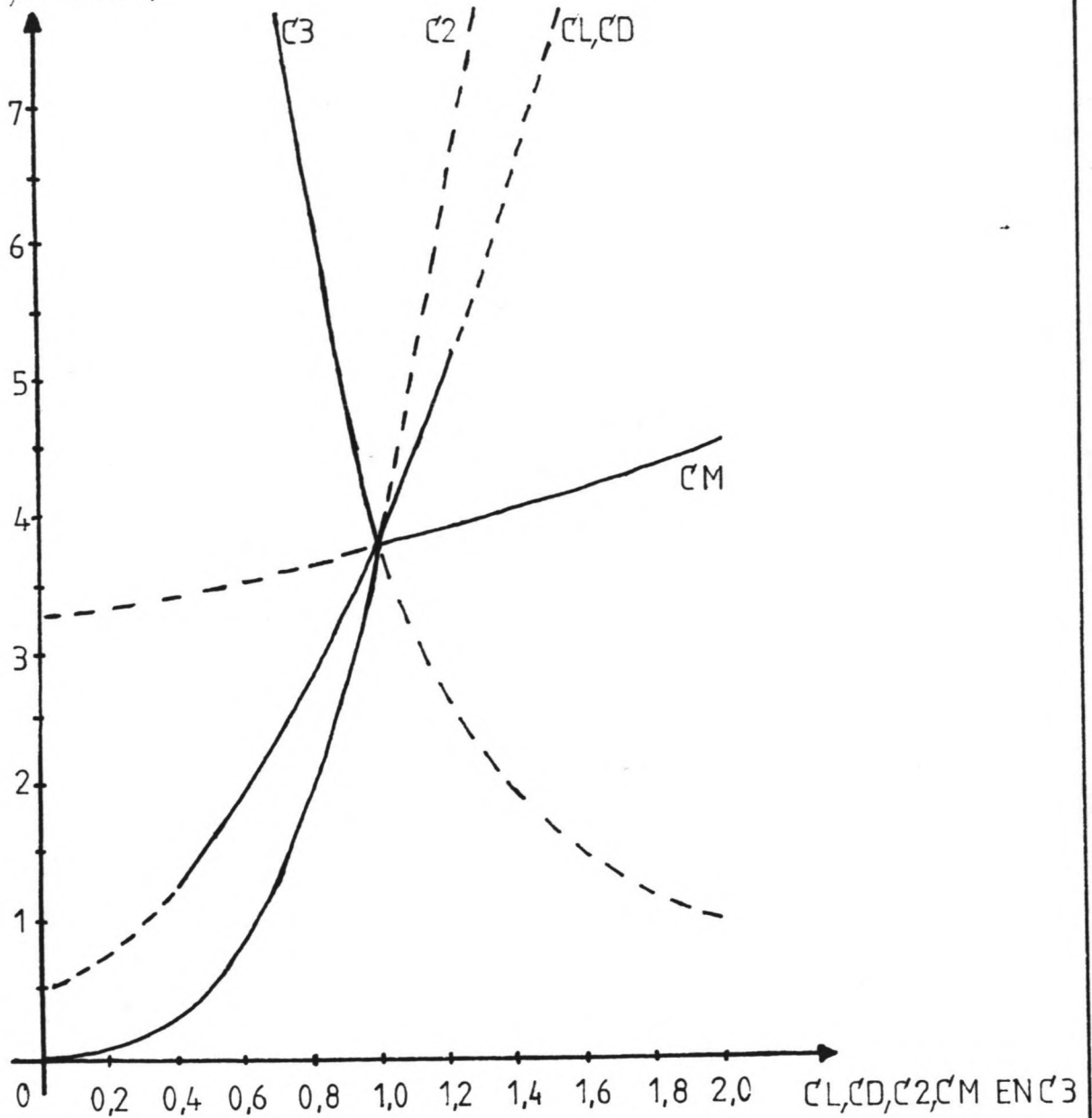
$W =$ HET TIJDENS EEN GOLFPERODE MAXIMAAL BENODIGDE AFDEKELEMENT GEWICHT

DE INGETEKENE LIJN VOLDOET AAN DE FUNCTIE:
 $W = -0,03 + 10,70 \times (H^{2,5} \cdot T^{0,5})$
 CORRELATIE-COEFFICIENT: 0,96

VERBAND BENODIGDE ELEMENTGEWICHT-GOLFBELASTINGS-PARAMETERS H EN T, VOLGENS DE VIJFDE-ORDE HARMONISCHE BENADERING

$W(C_L, C_D, C_2, C_M \text{ EN } C_3)$

[N]

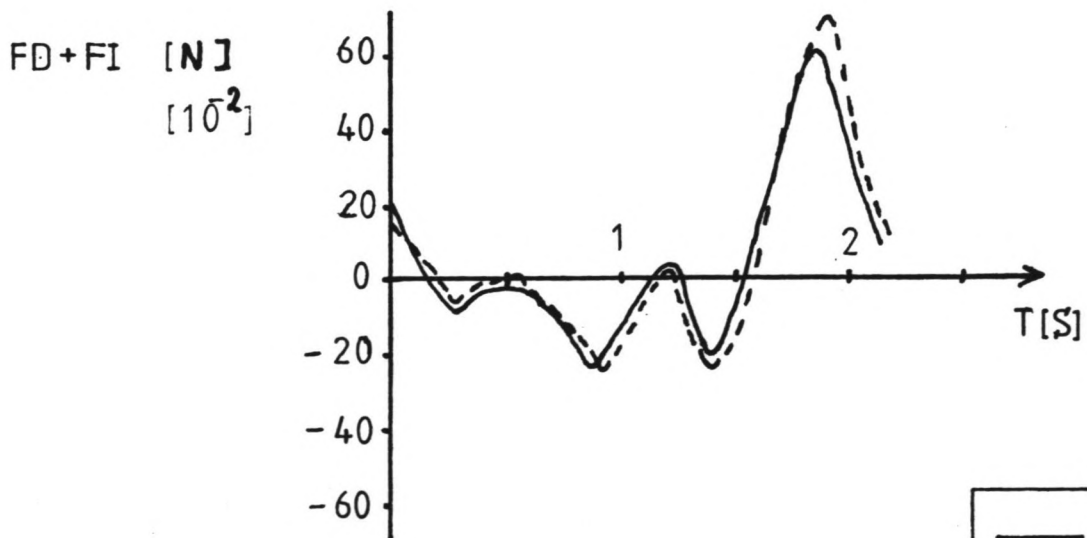
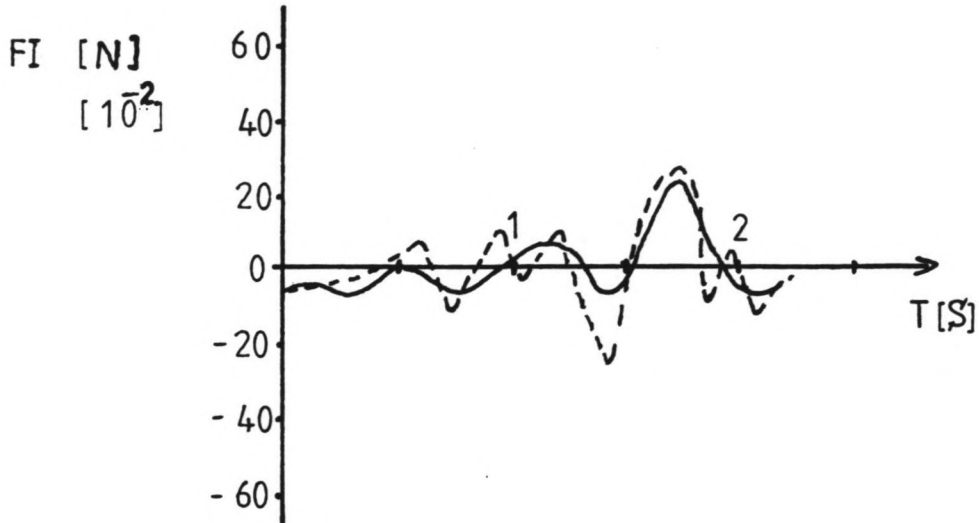
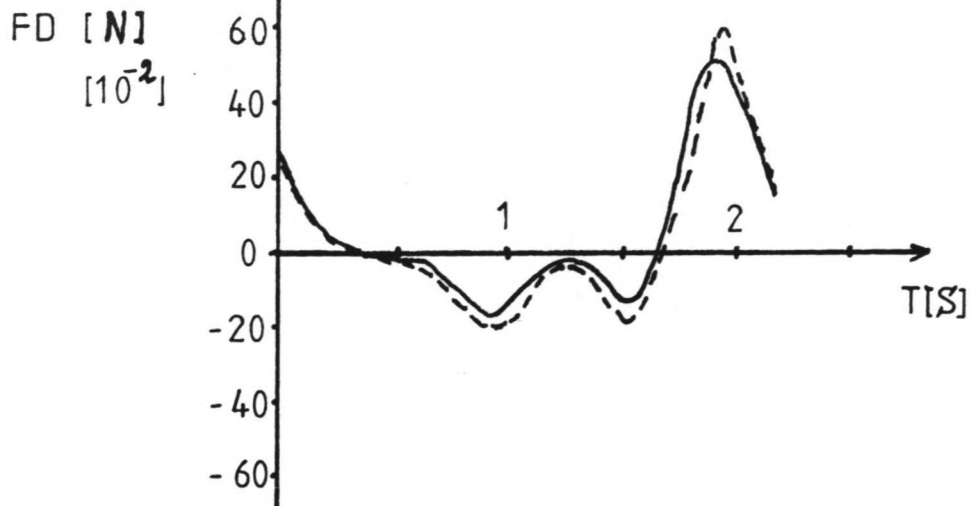


— = AANGENOMEN BEREIK VAN DE CONSTATES
 - - - = OVERIG BEREIK VAN DE CONSTATES

$$W(C_L, C_D, C_2, C_M, \text{ EN } C_3) = \frac{C_3 \cdot 26500 \cdot (1 + C_L/C_D)^3 \cdot C_D^3}{(2 \cdot C_3/C_2)^3 \cdot (20 - C_M)^3}$$

PER AANGEGEVEN LIJN VARIEERT ALLEEN DE ERBIJ AANGEGEVEN FACTOR.
 ALLE OVERIGE FACTOREN ZIJN DAN GELIJK AAN 1,0 GESTELD.

VERLOOP VAN HET ELEMENTGEWICHT ALS FUNCTIE VAN
 VARIATIES IN DE CONSTATES C_L , C_D , C_2 , C_M EN C_3 .



— BEREKEND
 - - - GEMETEN

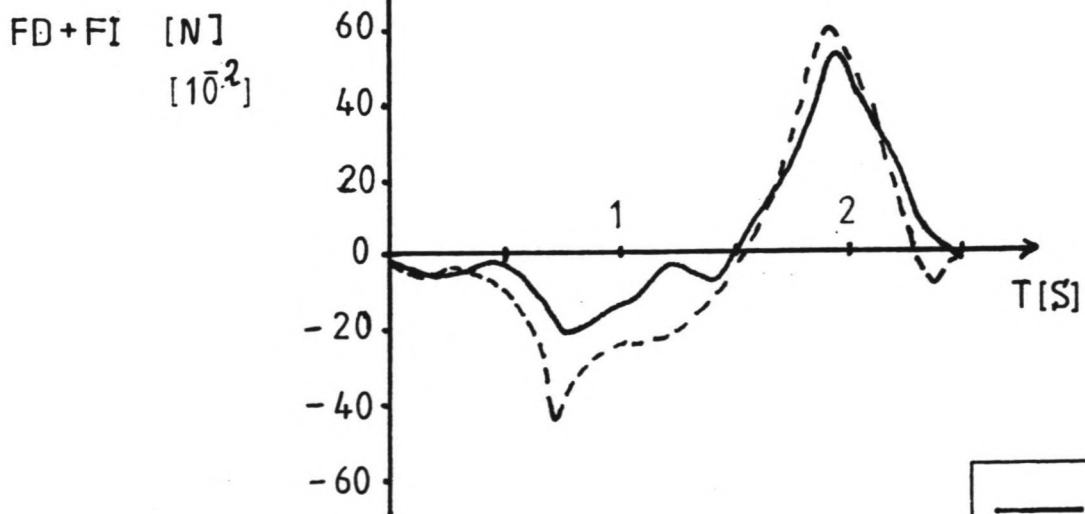
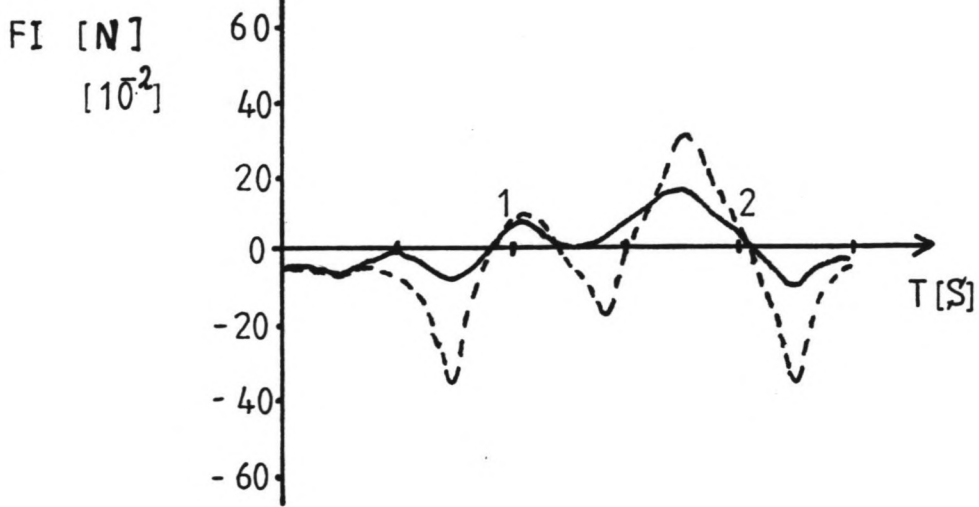
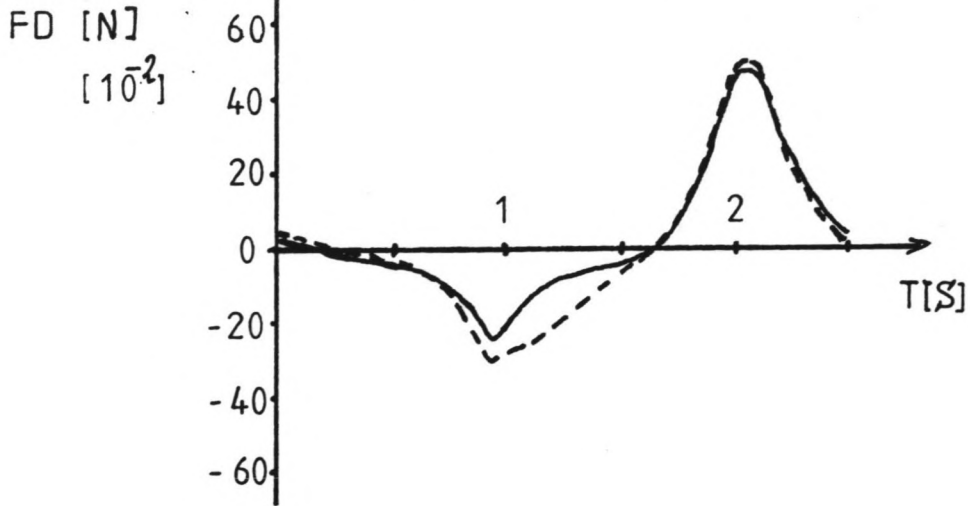
SLEEP- EN TRAAGHEIDSKRACHT, UIT METINGEN
 BEPAALD EN BEREKEND ALS SOM VAN VIJF
 HARMONISCHEN

P 01

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

S 467

FIG. 18



— BEREKEND
 - - - GEMETEN

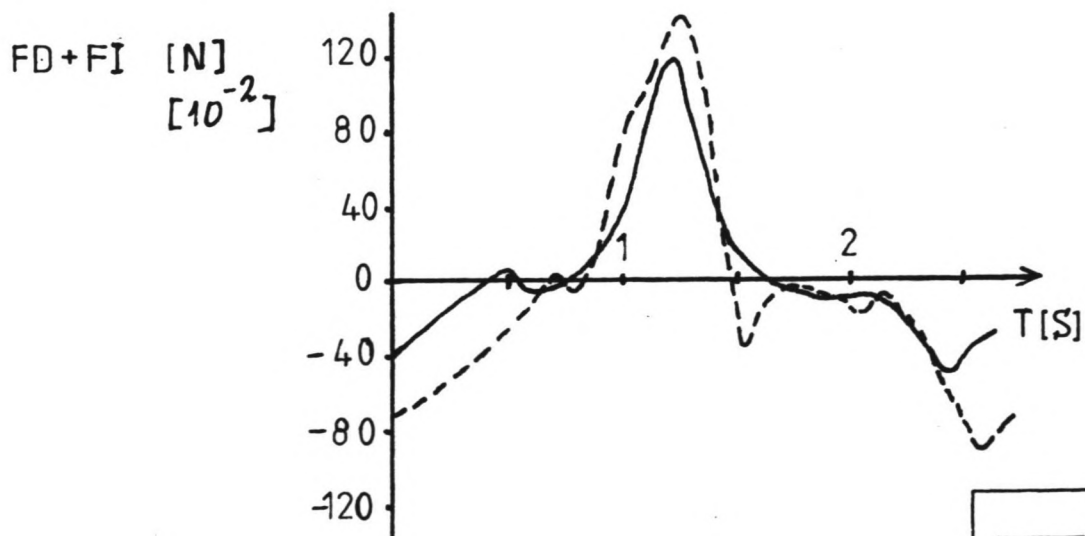
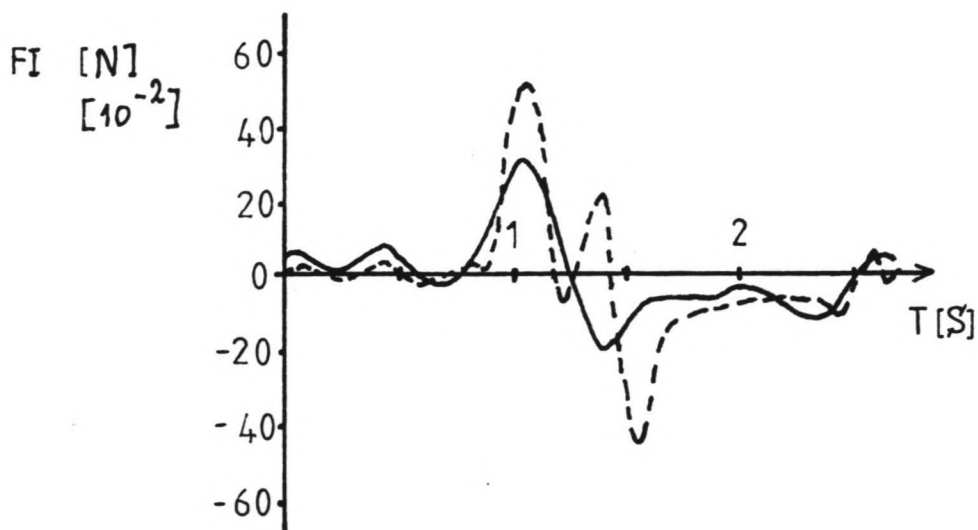
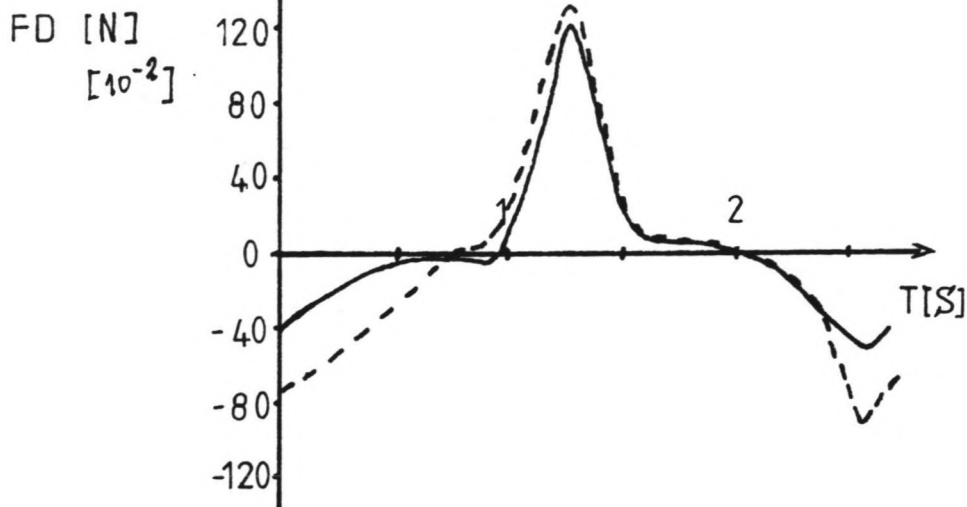
SLEEP- EN TRAGHEIDSKRACHT, UIT METINGEN
 BEPAALD EN BEREKEND ALS SOM VAN VIJF
 HARMONISCHEN

P 02

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

§ 467

FIG. 19



— BEREKEND
 - - - GEMETEN

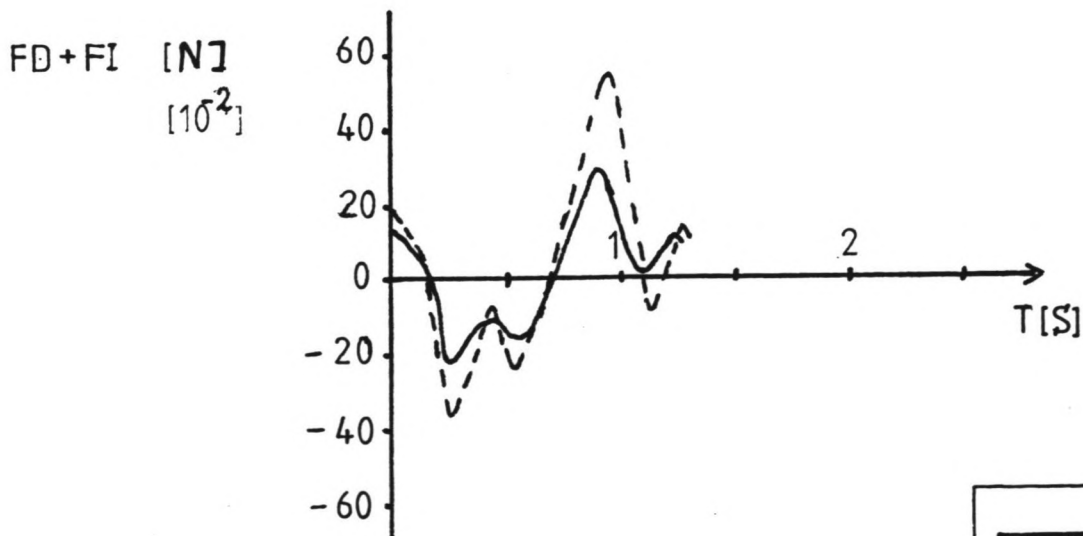
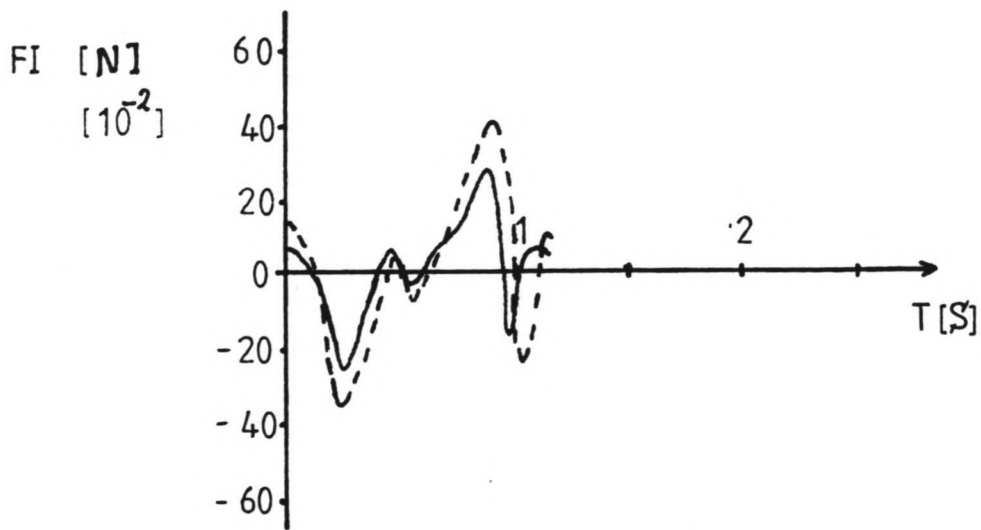
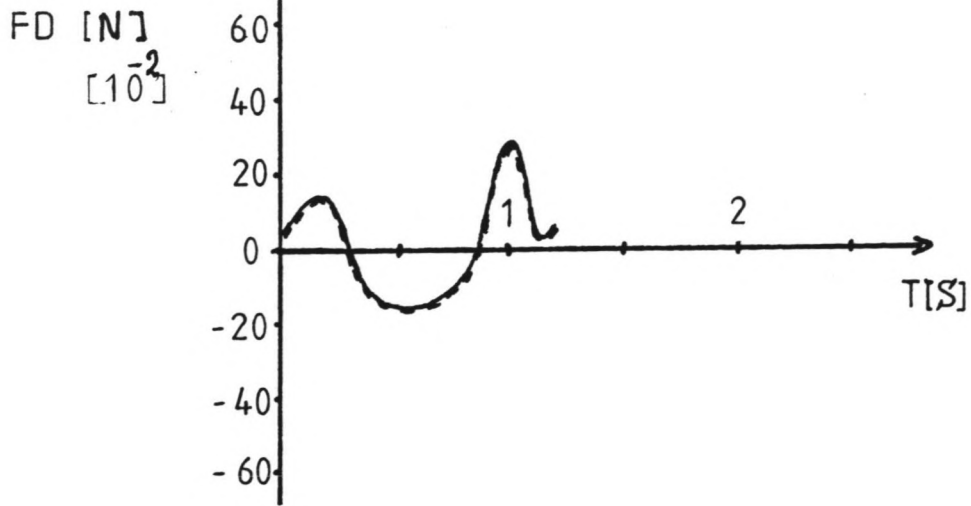
SLEEP- EN TRAAGHEIDSKRACHT, UIT METINGEN
 BEPAALD EN BEREKEND ALS SOM VAN VIJF
 HARMONISCHEN

P 03

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

§ 467

FIG. 20



— BEREKEND
 - - - GEMETEN

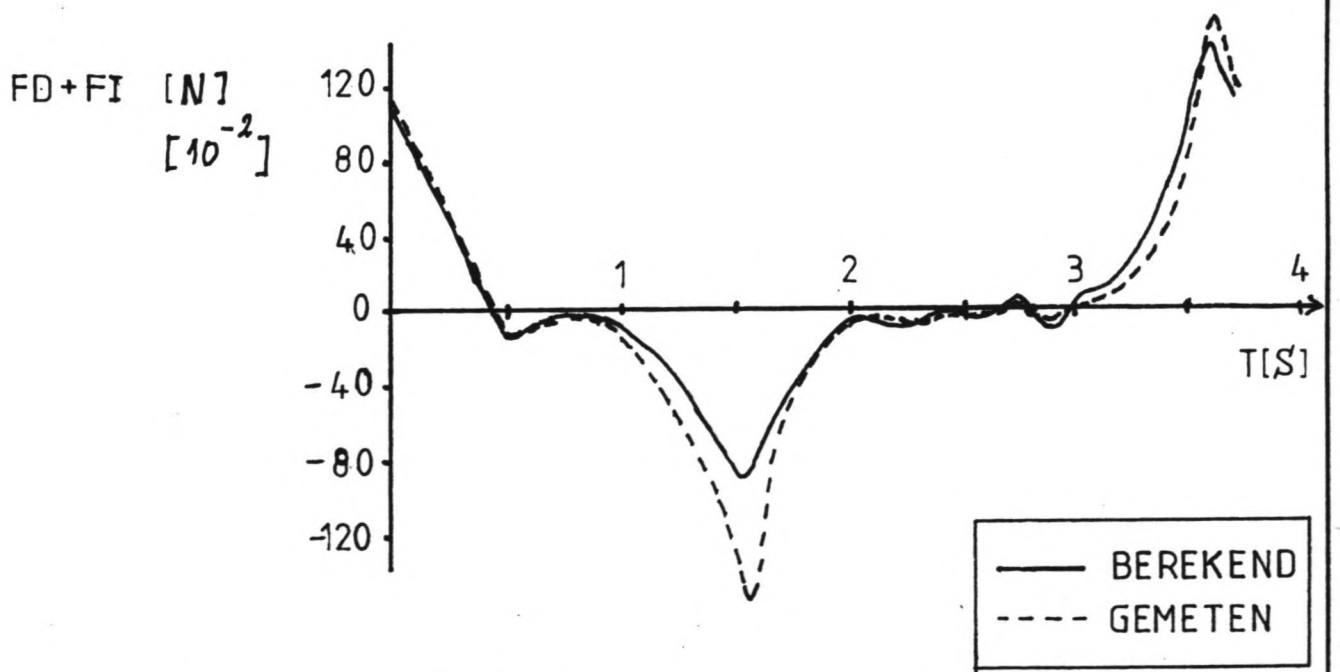
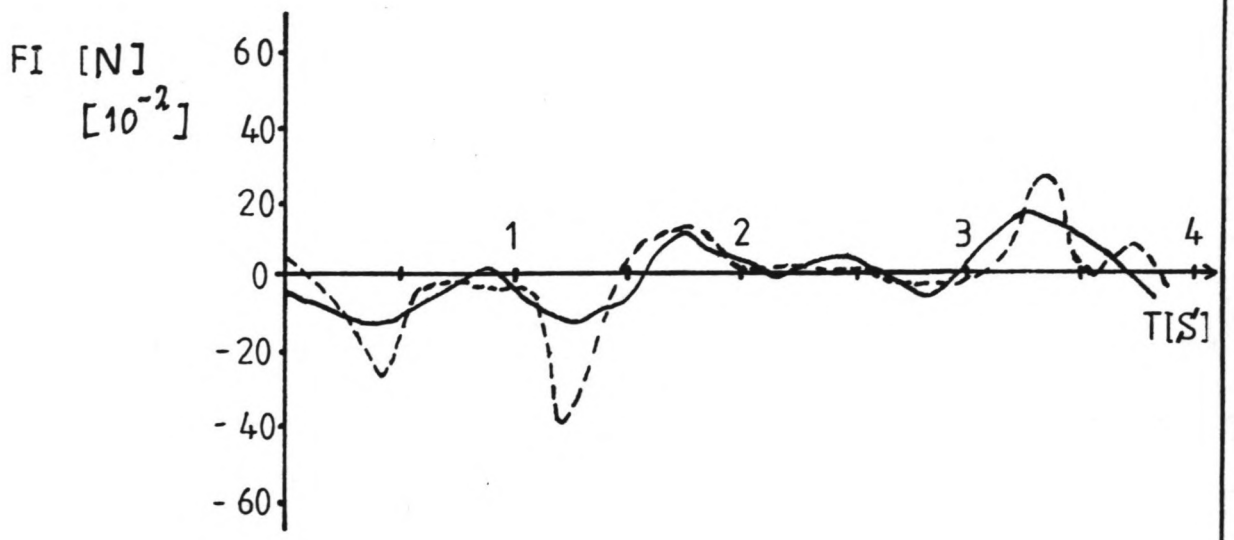
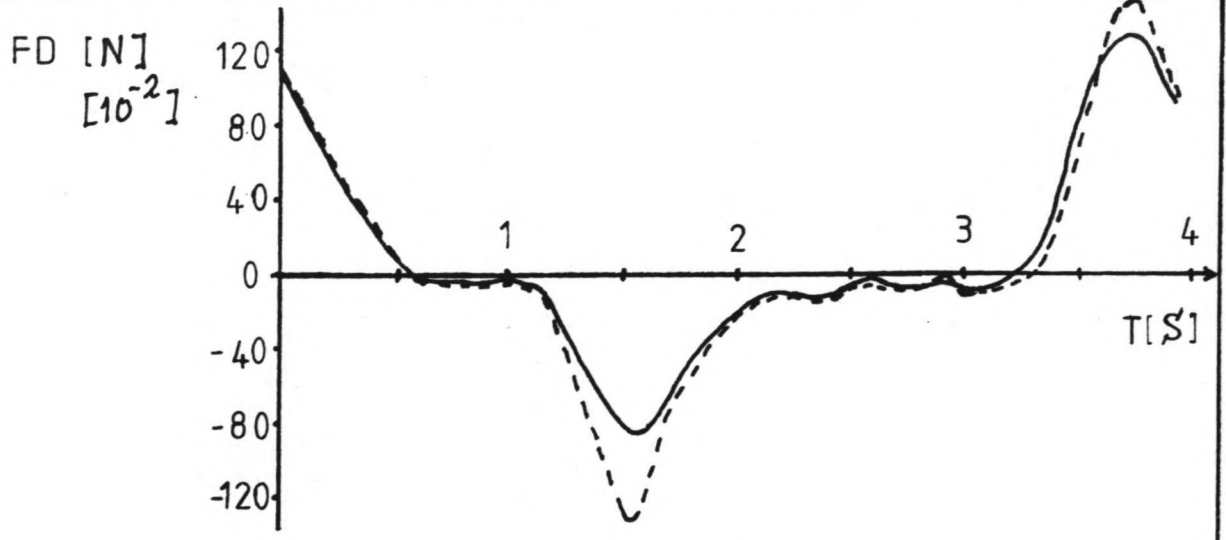
SLEEP- EN TRAAGHEIDSKRACHT, UIT METINGEN
 BEPAALD EN BEREKEND ALS SOM VAN VIJF
 HARMONISCHEN

P 04

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

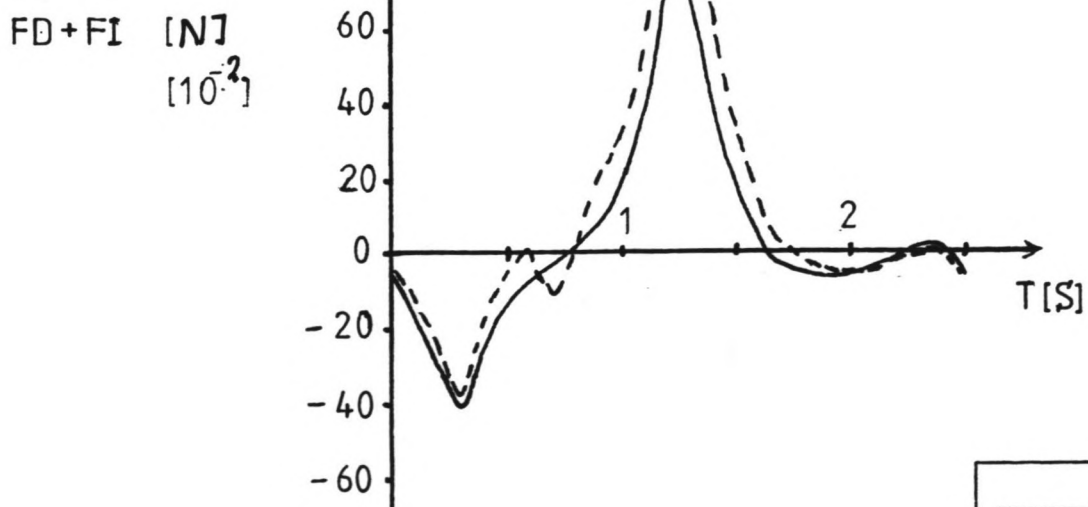
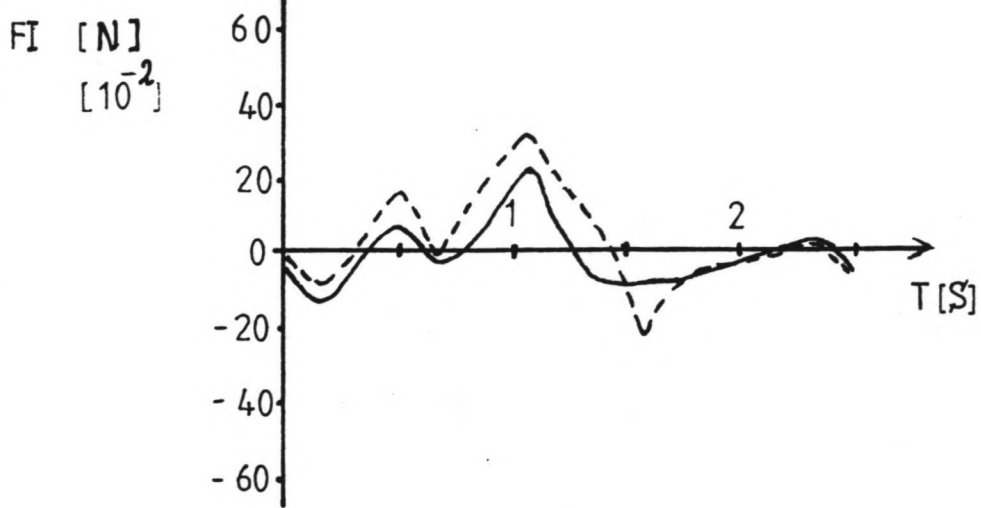
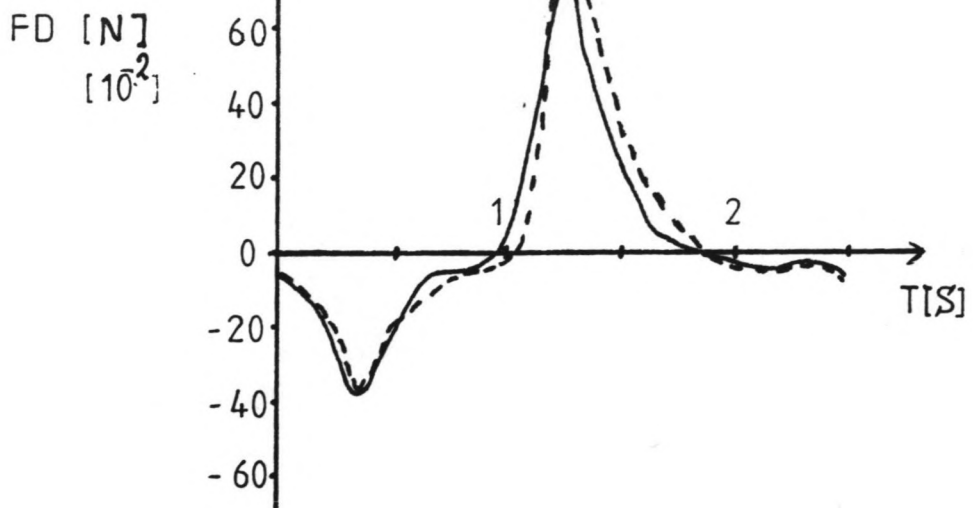
S 467

FIG. 21



— BEREKEND
 - - - GEMETEN

SLEEP- EN TRAAGHEIDSKRACHT, UIT METINGEN BEPAALD EN BEREKEND ALS SOM VAN VIJF HARMONISCHEN	P 05	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	S 467	FIG. 22



— BEREKEND
 - - - GEMETEN

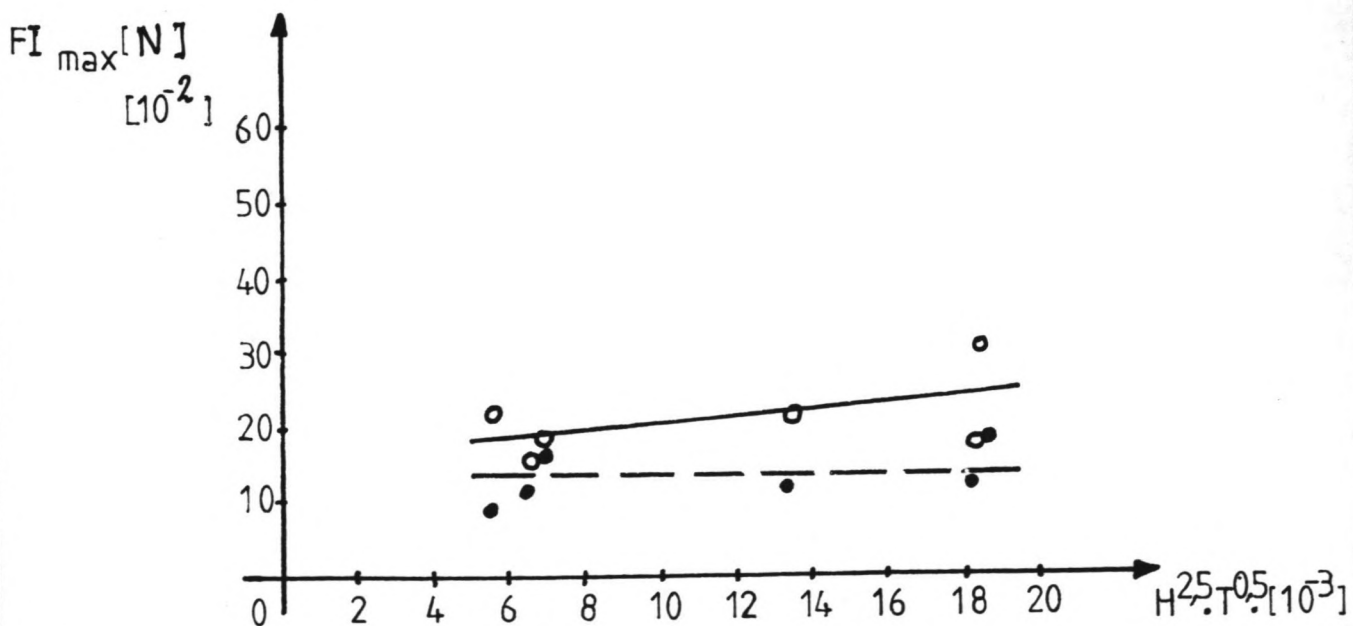
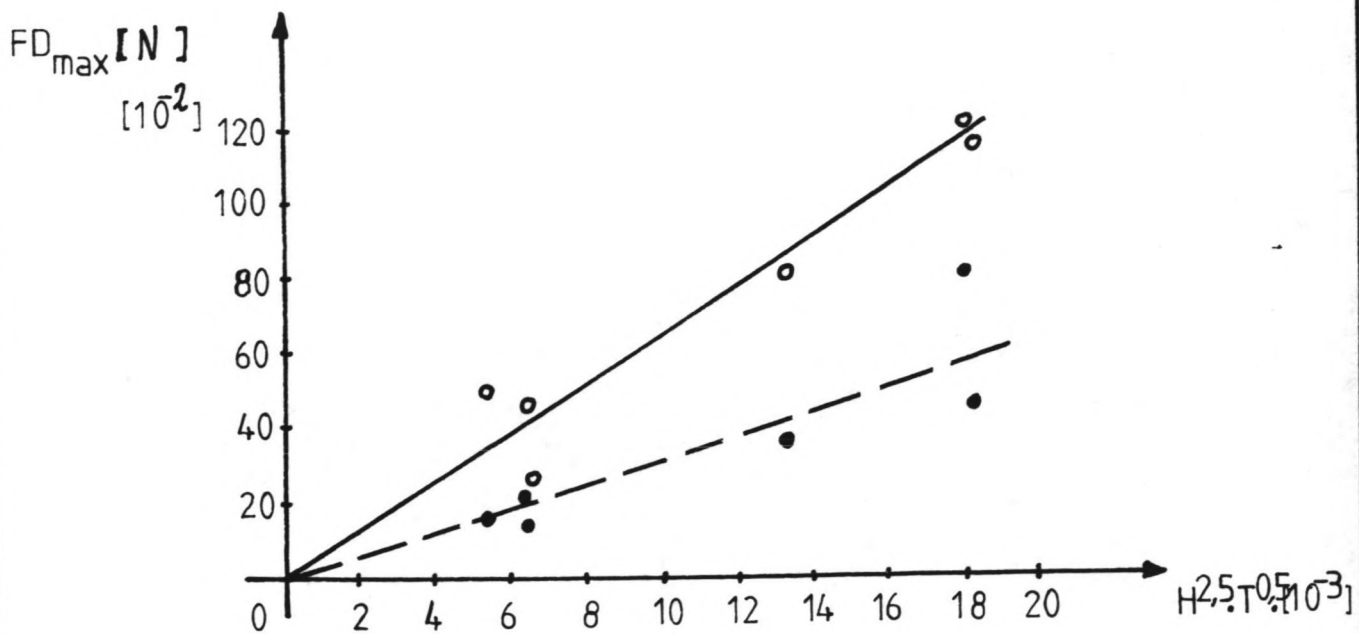
SLEEP- EN TRAAGHEIDSKRACHT, UIT METINGEN
 BEPAALD EN BEREKEND ALS SOM VAN VIJF
 HARMONISCHEN

P 06

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

§ 467

FIG. 23



○ = TIJDENS DE OPWAARTSE WATERBEWEGING ———

● = TIJDENS DE NEERWAARTSE WATERBEWEGING - - -

VERBAND TUSSEN DE MAXIMALE SLEEP/TRAAGHEIDSKRACHT
EN DE GOLFBELASTINGSPARAMETERS H EN T VOLGENS DE
VIJFDE ORDE HARMONISCHE BENADERING

delft hydraulics laboratory p.o. box 177 delft

delft university of technology
department of civil engineering
laboratory of fluid mechanics