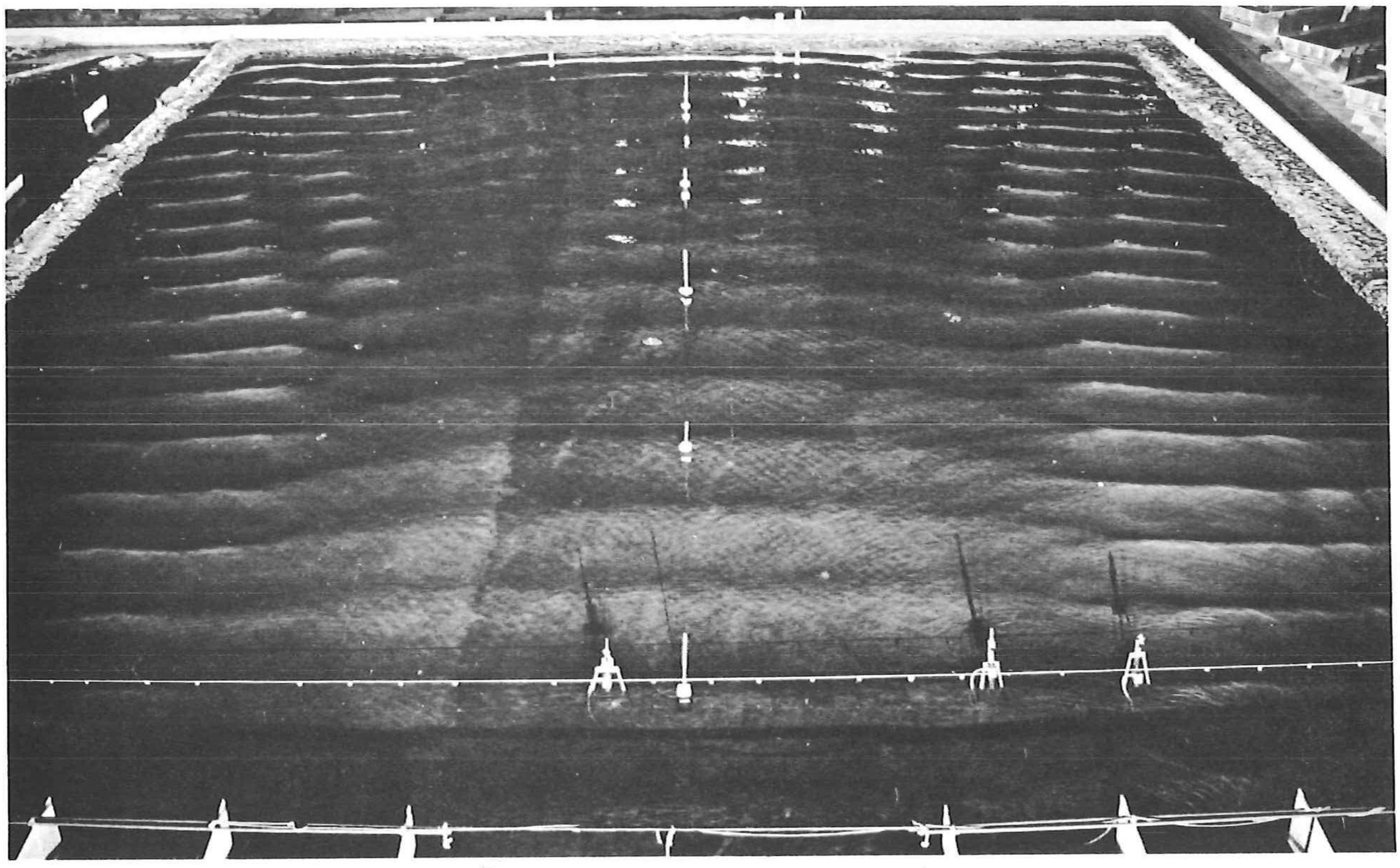
# ZIJDELINGSE ENERGIEVERLIEZEN VAN GOLVEN IN EEN GEUL




Afstudeerwerk van
I.J. Huitenga
en
G.B. van Driel

# V O O R W O O R D

Als hoofdontwerp voor ons afstuderen in de richting Kustwaterbouwkunde aan de Afdeling der Weg- en Waterbouwkunde van de Technische Hogeschool te Delft hebben wij een onderzoek verricht naar het energieverloop van golven, die zich bevinden boven een toegangsgeul voor een zeehaven.
Het onderzoek is voor een belangrijk deel uitgevoerd in het Waterloopkundig Laboratorium te Delft. In de tijd tussen twee andere onderzoeken door het Waterloopkundig Laboratorium konden we van eind januari tot begin april 1974 de beschikking hebben over de "golfbak" in de Zout-zoet-hal, om metingen te doen betreffende bovengenoemd onderwerp. De verkregen meetresultaten zouden dan later aan de theorie getoetst worden. Het onderzoek kreeg het karakter van een speurwerk (nummer S 244), hetgeen betekent, dat het Waterloopkundig Laboratorium de resultaten ervan eventueel gebruikt voor volgende proeven.

Wellicht zullen sommige lezers in dit verslag triviale en voor hen soms overbodige stof aantreffen. Het is echter onze bedoeling, niet alleen verslag uit te brengen van onze resultaten, maar vooral ook van onze gedachtengang gedurende het onderzoek. Daar het onderzoek verre van afgerond is, moeten ook diegenen, die het eventueel voortzetten, op de hoogte zijn van onze bevindingen.

Voor de hulp bij het uitvoeren van het onderzoek gaat onze dank uit naar de medewerkers van het Laboratorium, in het bijzonder naar Ir. A. Paape, die, zelfs als we hem op de meest ongelegen momenten kwamen lastigvallen om raad, altijd klaar stond om ons te helpen.
Uiteraard danken wij ook Prof. Dr. Ir. E.W. Bijker en zijn staf van Kustwaterbouwkunde voor de hulp en de adviezen, die we gekregen hebben bij het uitvoeren van onze afstudeeropdracht.
Tot slot mag niet onvermeld blijven de assistentie van de medewerkers van de Computer Workshop van de Internationale Cursussen bij het uitvoeren van de berekeningen, en het uittypen van het verslag door Mej. A.L. van Schagen.

Delft, zomer 1974. I.J. Huitenga
G.B. van Driel

I N H O U D S O P G A V E


| | blz. |
|---|---|
| Lijst van bijlagen | I |
| afbeeldingen | II |
| appendices | II |
| gebruikte symbolen | III |
| indices, tekens, etc. | IV |
| gebruikte formules | V |
| geraadpleegde literatuur | VIII |
| I. Inleiding | 1 |
| II. Probleemstelling | 6 |
| III. Het model | 7 |
| 1. Vorm van het model | 7 |
| 2. Toegepaste schaalregels | 8 |
| 3. Het golfschot en het instellen ervan | 9 |
| 4. De meetapparatuur | 11 |
| 5. Het maken van foto's | 12 |
| IV. Het meetprogramma | 13 |
| 1. Overwegingen vóór het meetprogramma | 13 |
| 2. Meetprogramma | 14 |
| 3. Samenvatting van de verschillende meetsituaties | 15 |
| V. Uitvoering van de metingen | 17 |
| 1. Meetpunten, plaatsing geleideschotten | 17 |
| 2. Berekeningen faseverschillen in het golfschot zelf | 18 |
| 3. Onderzoek naar zg. "bakslingeringen" | 20 |
| VI. Verwerking van de meetresultaten | 23 |
| 1. Weergave van de metingen | 23 |
| 2. Berekening van het zijdelingse energieverlies | 23 |
| 3. Resultaten | 26 |
| VII. Interpretatie der meetresultaten | 29 |
| VIII. Theoretische beschouwingen | 35 |
| IX. Conclusies en aanbevelingen | 41 |
| Bijlagen | Bijlage 1 t/m 19 |
| Afbeeldingen | Afbeelding 1 t/m 7 |
| Appendices | Appendix I t/m III |

LIJST VAN BIJLAGEN - 1

| Bijlage nr. | Ref. op pag. | Titel |
|---|---|---|
| 1a | 7 | Vorm model:-plattegrond |
| 1b | 7 | -doorsneden |
| 2 | 7,11,17 | Naamgeving in het model |
| 3a | 11 | Instelling golfschot:-uitwijkingen |
| 3b | 19 | -faseverschillen |
| 3c-1 | 20 | -beredenering voor schuin golffront |
| 3c-2 | 20 | -definitieve instelling voor schuin golffront |
| 3c-3 | | -instelresultaten schuin golffront |
| 4 | 12 | Voorbeeld registratiestrook |
| 5 | 12 | Gefotografeerde secties van het model |
| 6a | 14 | Meetprogramma:-diagram |
| 6b | 14 | -toelichting op het diagram |
| 6c | 15 | -tabel I |
| 6d | 15 | -tabel II |
| 7a | 15 | Overzicht meetsituaties |
| 7b | 16 | Codering van de meetsituaties |
| 8a,b,c | 21 | Registratie lange-duur-metingen ("bakslingeringen") |
| 9a | 23,25 | Schema van het rekenprogramma |
| 9b | 23 | Het rekenprogramma |
| 10 | 25 | Verklaring bij de computeroutput |
| 11 t/m 15 | I 23 | Weergave van de meetresultaten |
| 13 14 | Ia | Op grotere schaal weergegeven golfkamvormen |
| 11 t/m 15 | II (29) | Output computerberekeningen |
| 16 | (23),27 | Beredenering tabellen op bijlage 17 |
| 17a | 27,29, | Samenvatting energietransporten:-"zonder schotten" |
| 17b | 30 | -"met schotten" |

LIJST VAN BIJLAGEN - 2


| Bijlage nr. | Ref. op pag. | Titel |
|---|---|---|
| 18a | 27 | Grafische weergave uiteindelijke resultaten: -"zonder schotten" |
| 18b | 27 | -"met schotten" |
| 18c | 27 | -"scheef golffront" |
| 19 | 30 | Voorbeeld berekening $\alpha$ |


LIJST VAN AFBEELDINGEN


| Afb.nr. | Ref. op pag. | Titel |
|---|---|---|
| titelblad | | Overzicht golfbak in de richting van de geulas. Meetsituatie "met schotten"; $d_g$ = 0,275 m; T = 1,2 sec; codenr.2.3.5. |
| 1a | 10 | Aandrijvingsmechanisme golfschotten. |
| 1b | 10,17 | Golfschot, golfhoogte-opnemers, meetpuntaanduiding |
| 2a | 11 | Registratie-apparatuur |
| 2b | 11 | Plaatsen golfhoogte-opnemers |
| 3 | | Overzicht golfbak vanaf loopbrug erboven. Meetsituatie "zonder schotten"; $d_g$ = 0,30 m; T = 0,95 sec; codenr.1.2.7. |
| 4 | | "zonder schotten"; $d_g$ = 0,35 m; T = 1,2 sec; exc.= 1,9 cm; codenr.1.1.5. (bijlage 11d-I) |
| 5 | 14 | "zonder schotten"; $d_g$ = 0,275 m; T = 1,2 sec; exc.= 1,9 cm; codenr.1.3.5. (bijlage 12d-I) |
| 6 | | "met schotten"; $d_g$ = 0,275 m; T = 1,2 sec; exc.= 1,9 cm; codenr.2.3.5. (bijlage 14d-I) |
| 7 | | "scheef golffront"; $d_g$ = 0,35 m; T = 1,62 sec; codenr.3.1.3. (bijlage 15-I) |


LIJST VAN APPENDICES


| | |
|---|---|
| I. | Refractie-theorieën |
| II. | Energietransport bij een 3-dimensionale golf |
| III. | Bodemwrijving |

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN - 1

| | eenheid | betekenis |
|---|---|---|
| a | m | golfamplitude = H/2 |
| A | | een functie |
| b | m | breedte-aanduiding |
| B | m | geulbodembreedte |
| c | m/sec | voortplantingssnelheid |
| $c_{gr}$ | m/sec | groepssnelheid |
| C | -- | constante |
| d | m | waterdiepte |
| $d^*$ | m | diepte geulbodem t.o.v. uiterwaarden |
| exc | cm | excentriciteit van de excentrieken van het golfschot |
| E | $Nm/m^2$ | energie |
| $E_r$ | W | energietransport door raai |
| $E_{fb}$ | $W/m^2$ | bodemwrijvingsenergieverlies |
| f | | een functie |
| g | 1)$m/sec^2$ | zwaartekrachtsversnelling |
| | 2) | een functie |
| h | m | hoogte-aanduiding |
| H | cm,m | golfhoogte |
| k | 1/m | golfgetal = $\frac{2\pi}{L}$ |
| l | 1)m | lengte-aanduiding |
| | 2)1/m | golfgetal in x-richting |
| L | m | golflengte |
| m | 1/m | golfgetal in y-richting |
| n | 1)-- | verhoudingsgetal |
| | 2)m | afstand in de normaalrichting |
| p | -- | factor |
| r | | raai-aanduiding |
| s | 1)m | een afstand |
| | 2)m | afstand langs golfstraal |
| S | 1)-- | golfsteilheid = H/L |
| | 2)m | een afstand |
| T | sec | golfperiode = $\frac{2\pi}{\omega}$ |
| u | m/sec | horizontale snelheid waterdeeltjes |
| v | 1)m/sec | verticale snelheid waterdeeltjes |
| | 2)m/sec | snelheidsaanduiding |
| x | m | afstand vanaf raai 0 in de richting van de geulas |
| y | m | afstand loodrecht op de geulas |
| z | m | afstand vanaf de waterspiegel opwaarts |

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN - 2

| | eenheid | betekenis |
|---|---|---|
| $\alpha$ | -- | constante |
| $\beta$ | | factor = $(\frac{\pi\nu}{T})^{\frac{1}{2}}$ |
| $\delta$ | | factor = $\frac{\nabla^2 a}{k^2 a}$ |
| $\Delta$ | -- | (kleine) verandering |
| $\varepsilon$ | -- | factor = $\frac{u_b}{c}$ |
| $\zeta$ | -- | complexe uitwijking wateroppervlak (z-richting) |
| $\eta$ | m; cm | uitwijking wateroppervlak vanaf z = 0 |
| $\theta$ | -- | een hoek |
| $\kappa$ | | constante |
| $\mu$ | | dynamische viscositeit = $\rho.\nu$ |
| $\nu$ | $m^2/sec$ | kinematische viscositeit |
| $\xi$ | -- | complexe afstand in x-richting |
| $\rho$ | $kgf/m^3$ | soortelijke massa |
| $\tau$ | -- | dimensieloze tijd |
| $\varphi$ | -- | hoek |
| $\Phi$ | | potentiaalfunctie |
| $\psi$ | | fasefunctie |
| $\omega$ | 1/sec | hoekfrequentie = $\frac{2}{T}$ |
| $\nabla$ | | Nabla-operator: $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ |

LIJST VAN INDICES, TEKENS, etc.

| index | betreft: |
|---|---|
| b | bodem (z = -d) |
| g | geul |
| o;0 | 1) diep water |
| | 2) waterspiegel |
| r | raai |
| u | uiterwaarden |

| | |
|---|---|
| [.] | literatuurverwijzing |
| (.) | formule of vergelijking |

LIJST VAN GEBRUIKTE FORMULES - 1

(1) $L = c.T$

(2) $\omega^2 = gk \tanh kd$ (dispersie-relatie)

(3) $c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd$

(3a) $c^2 = gd$ (ondiep water)

(3b) $c^2 = \frac{g}{k}$ (diep water)

(4) $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$

(5) $E = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_{gr}$

(6) $v = \sqrt{g.l}$ (Froude)

(7) $n_v^2 = n_g.n_l = n_l$

(8) $n_b = n_l$

(9) $n_d = n_b = n_l$

(10) $l = v.t$

(11) $n_l = n_v.n_t = \sqrt{n_l}.n_t \rightarrow n_t = \sqrt{n_l}$

(12) $S_o = (S_A - S_B) \frac{d_g}{l_{AB}} + S_B$

(13) $u = \frac{agk}{\omega} . \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} . \sin(\omega t - kx)$

(14) $S = \int u\, dt = - \frac{2agk}{\omega} . \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} . \cos(\omega t - kx)$

(15) $S_{max} = \frac{agk}{\omega^2} . \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}$

(16) $S_{max_{z=0}} = \frac{agk}{\omega^2}$ $(= S_0)$

(17) $S_{max_{z=-d}} = \frac{agk}{\omega^2} . \frac{1}{\cosh kd}$ $(= S_B)$

(18) $\frac{S_{B_{max}}}{S_{0_{max}}} = \frac{1}{\cosh kd}$

(19) $S_0 = \text{orde } (H)$

(20) $H = 0{,}5 \text{ à } 0{,}6\ d$

(21) $2E_z = E_r - (E_{r+5} + E_{fb})$

(22) $H_1^2 \ast 0{,}25 + \sum_{i=2}^{9} H_i^2 \ast 0{,}50 + H_{10}^2 \ast 0{,}25 =$

$$= \left\{ \tfrac{1}{2}(H_1^2 + H_{10}^2) + \sum_{i=2}^{9} H_i^2 \right\} \ast 0{,}50$$

(23) $E_{fb} \approx \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 \frac{1}{\sinh^2 kd} \left\{1 - 0{,}197\varepsilon + \text{orde}(\varepsilon^2)\right\}$

(24) $\varepsilon = \frac{HTg}{2Lc \cosh kd}$

LIJST VAN GEBRUIKTE FORMULES - 2

(25) $$E_{fb} \approx \frac{\pi^{5/2}}{2} \cdot \frac{H^2}{T^{5/2}} \cdot \frac{1}{\sinh^2 kd}$$

(26) $$\frac{d}{dx}(E.c_{gr}) = - \alpha\, E.c_{gr}$$

(27) $$E = \kappa^{*}.\ e^{-\alpha x}$$

(28) $$E_{x+8} = E_8.\ e^{-\alpha x} \ ; \quad (x = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots\ldots)$$

(29) $$\Delta E = 1 - e^{-5\alpha}$$

(30) $$\frac{2\ E\ c_{gr}\ \sin\varphi}{4{,}50} = \alpha\ E\ c_{gr}$$

(31) $$\sin\varphi = \alpha.\frac{4{,}50}{2}$$

(31a) $$\sin\varphi^{*} = \frac{1}{p} \cdot \alpha \cdot \frac{4{,}50}{2}$$

(31b) $$\frac{H^2_{teenlijn}}{H^2_{gem.}} = \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi^{*}}$$

(32) $$\Phi = A(x,y,z)\ \cos\{\omega t - \psi(x,y,z)\}$$

(33) $$\omega\ dt - d\psi = 0$$

(34) $$\omega = \nabla\psi.c$$

(35) $$\nabla_j(cc_{gr}\ \nabla_j\zeta) + k^2 cc_{gr}\zeta = 0 \quad \text{(Schönfeld)}$$

(36) $$\frac{1}{cc_{gr}} \cdot \nabla_j(cc_{gr}\ \nabla_j a) + a(k^2 - |\nabla\psi|^2) = 0$$

(37) $$k^2 = |\nabla\psi|^2$$

(38) $$\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\zeta}{\partial y^2} + k^2\zeta = 0 \quad \text{(Helmholtz)}$$

(39) $$\eta = \mathrm{Re}\ \{\zeta\ e^{i\omega t}\}$$

(40) $$\zeta = f(y) \cdot g(x)$$

(41) $$\nabla_j\{cc_{gr}\ \nabla_j(f \cdot g)\} + k^2 cc_{gr} \cdot f \cdot g = 0$$

(42) $$cc_{gr} \cdot f \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + g \cdot \frac{\partial}{\partial y}\left(cc_{gr}\frac{\partial f}{\partial y}\right) + k^2 cc_{gr} \cdot f \cdot g = 0$$

(43) $$\frac{1}{cc_{gr}} \cdot \frac{\partial}{\partial y}\left(cc_{gr}\frac{\partial f}{\partial y}\right) + k^2 = - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial x^2}$$

(44) $$- \frac{1}{g}\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = l^2$$

(45) $$g = C_1 e^{+ilx} + C_2 e^{-ilx}$$

(46) $$\frac{\partial}{\partial y}\left(cc_{gr}\frac{\partial f}{\partial y}\right) + cc_{gr} \cdot f(k^2 - l^2) = 0$$

LIJST VAN GEBRUIKTE FORMULES - 3

(47a) $f = a.e^{-i\psi^{*}(x)}$

(47b) $g = e^{\pm ilx} = e^{-l_2 x}.e^{-il_1 x}$

(48) $A = a(y).e^{-l_2 x}$

De in de appendices voorkomende formules zijn niet in deze lijst opgenomen.

LIJST VAN GERAADPLEEGDE LITERATUUR

[1] R.W. Hart, Preliminary investigations for the transverse loss of wave energy along the side of a canal. Verslag M463, Waterloopkundig Laboratorium Delft, sept. 1959.

[2] N. Booy, Propagation of gravity waves over an uneven bottom. (Niet gepubliceerd.)

[3] Technical Report no. 4, Shore Protection Planning and Design, Beach Erosion Board, office of the Chief of engineers, Dept. of the Army.

[4] Uittreksel uit het afstudeerwerk van:
C.J. van Veelen,
J.K. Nieuwenhuis en F.C. van Roode,
N. van den Berg en Griffioen,
J.P. Driessen en W. Ruinen.
Systematisch onderzoek naar energieverliezen bij golfbeweging.
(Niet gepubliceerd.)

[5] A.G. Tjallema, Refractie en Diffractie, Deel I: Het samenstellen van golfrefractiediagrammen. Studierapport WWK 66 - 2, Afd Kustonderzoek, Rijkswaterstaat.

[6] Yuichi Iwagaki and Yoshito Tsuchiya, Laminar damping of oscillatory waves due to bottom friction.
10th Conference on Coastal Engineering, Tokyo, sept. 1966.

[7] J.A. Battjes, Refraction of water waves,
Proceedings A.S.C.E., Vol. 94, No. WW4, Nov. 1968, pp 437 - 451.

[8] A.T. Ippen c.s., Estuary and coastline hydrodynamics.

[9] E.W. Bijker, Topics on coastal engineering, Lecture Notes f11B. Technische Hogeschool Delft, Afd. Weg- en Waterbouwkunde.

[10] J.C.W. Berkhoff, Computation of combined refraction-diffraction.
13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver, July 1972.

[11] P. Groen en R. Dorrestein, Zeegolven.
Opstellen op oceanografisch en maritiem gebied 11, Uitgave KNMI;

# I. INLEIDING

Reeds eeuwen lang worden geulen gebaggerd voor havens, die op zulke grote schepen gedimensioneerd zijn, dat deze ze over de natuurlijke kustformatie niet kunnen bereiken. Uiteraard brengt de aanwezigheid van de geul met zich mee, dat zich vóór de haventoegang veranderingen voordoen in de natuurlijke toestand. Deze veranderingen betreffen hoofdzakelijk transport van bodemmateriaal, de stromingstoestand en het gedrag van de uit zee komende golven.

Voor de scheepvaart, die de haven bezoekt, is het gedrag van stroom en golven in de geul van direct belang.

De stroom heeft een min of meer "statische" invloed op het gedrag van het schip, de golven hebben een meer dynamisch effect. Dit effect kan gesplitst worden in twee delen: een gedeelte, dat van invloed is op het schip als constructie en een gedeelte, dat zijn invloed doet gelden op het schip als vaartuig.

Daar de gedragingen van een schip in een zo nauw vaarwater als een geul het verkeersbeeld ten zeerste beïnvloeden, is het voor de scheepvaart derhalve van groot belang, op de hoogte te zijn van het golfgedrag in een geul. Eventueel boven de geul staande stroom wordt in dit verslag buiten beschouwing gelaten.

Golven kunnen vanuit zeer veel richtingen en in grote verscheidenheid in een geul terechtkomen. Daar het bestuderen van golven, zoals ze in de natuur voorkomen, door hun diversiteit in eerste instantie niet doenlijk is, wordt in het algemeen uitgegaan van een gesimplificeerd geval, de zgn. enkelvoudige golf. Hieronder wordt verstaan een serie evenwijdige, gladde, even hoge golfruggen op onderling gelijke afstanden; die zonder vervorming voortlopen in een richting loodrecht op de golfkam. Hieraan kunnen n.l. enige kenmerken worden toegeschreven, die het theoretisch benaderen van de problemen vergemakkelijken. De voornaamste van deze kenmerken zijn:

de golflengte L: - de afstand tussen twee opvolgende golfkammen,

de periode T: - de tijd tussen het passeren van een kam en zijn opvolger,

de voortplantings- of fasesnelheid c,

de golfhoogte H: - hoogteverschil tussen hoogste en laagste punt van de golf,

de steilheid S = H/L.

Hieruit valt meteen de eerste vergelijking af te leiden:

$$L = c.T \qquad (1)$$

In de Korte-Golven-theorie is een formule afgeleid, de zgn. "dispersie-relatie":

$$\omega^2 = gk \tanh kd \qquad (2)$$

Hieruit kan met behulp van (1) een betrekking tussen de voortplantingssnelheid en de diepte worden afgeleid:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \qquad (3)$$

Het verloop van "tanh" brengt met zich mee, dat bij benadering de volgende formules gebruikt kunnen worden:

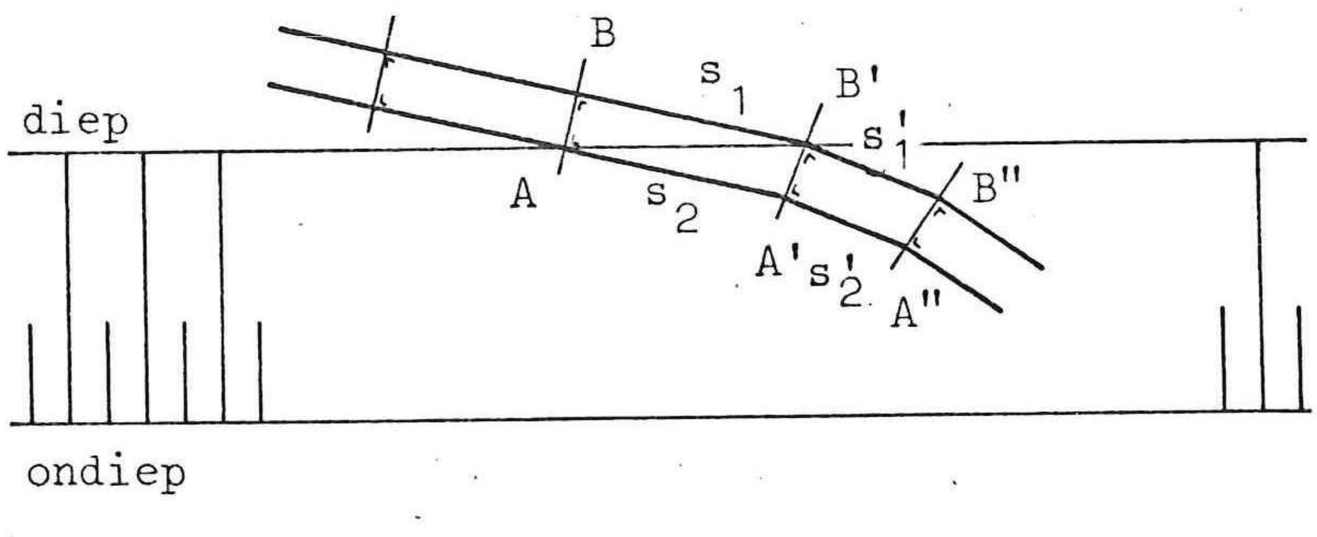
voor "ondiep water" ($d \ll\ll L$): $c^2 = gd$ (3a)

(voor $d < L/25$ geldt nl. $\tanh kd \approx kd$)

voor "diep water" ($d > L/2$): $c^2 = g/k$ (3b)

(voor $d > L/2$ geldt nl. $\tanh kd \approx 1$)

Voor tussenliggende waarden van d moet formule (3) worden gebruikt. Uit deze formule blijkt, dat de voortplantingssnelheid van de golf afneemt naarmate de waterdiepte geringer wordt. Dit geeft aanleiding tot verandering van voortplantingsrichting, wanneer een golf in een gebied met varierende waterdiepte komt. Dit verschijnsel heet refractie.



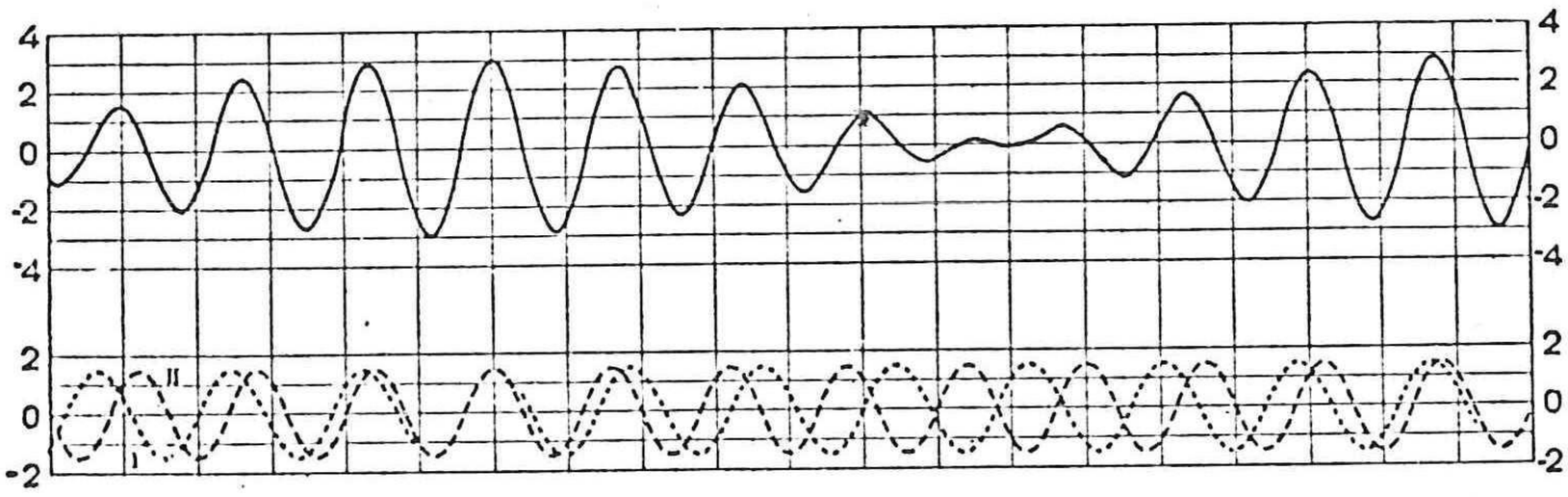

Bereikt de golf het talud (zie figuur), dan zal de kam zich ter plaatse van A' minder verplaatst hebben dan ter plaatse van B'. Dus $s_2 < s_1$. Dit heeft tot gevolg, dat de golfstraal buigt. De golf loopt als het ware de geul uit.
Theorie hierover vindt men in App. I.

Bestudeerd is het geval, dat de golven juist in de lengterichting van de geul lopen. Deze voortplantingsrichting mag in de natuur toevallig lijken, zij kán voorkomen. Men stelle zich de geul van Europoort voor, waarover een wind uit westelijke tot noordwestelijke richting waait. De golven zullen dan de geul wel ongeveer in de lengterichting doorlopen.
Wanneer een golffront in de lengterichting een geul doorloopt, zullen de kamlijnen gebogen worden, doordat de golfsnelheid in de geul hoger is dan ernaast.

De energie van golven (aan en onder de oppervlakte aanwezig) is arbeidsvermogen per eenheid van oppervlak en bestaat uit potentiele en kinetisch energie. Beiden leveren een gelijke bijdrage tot de totale energie.
De totale energie is groot:

$$E = {}^{1}/_{8}\ \rho g H^2 \quad (Nm/m^2) \tag{4}$$

Om enig idee te krijgen van het begrip energietransport diene het volgende.
Men kan zich golven denken als samengesteld door superpositie van enkelvoudige golven. Men krijgt dan bijv. een golf als in onderstaande figuur.




Dit golfprofiel bestaat uit zg. golfgroepen, die een eigen snelheid hebben, welke een andere is dan de snelheid van elke golf apart. Men spreekt dan van de groepssnelheid $c_{gr}$. Men stelle zich een rij mensen voor, waarvan de achterste persoon met snelheid c naar voren gaat en voor de voorste gaat staan. Het lijkt dan, beschouwd van grote afstand, alsof de groep zich als geheel verplaatst, en wel met snelheid $c_{gr}$. Kennelijk geldt: $c_{gr} < c$.

Bovenbesproken energie transporteert zich met deze groepssnelheid, zodat het energietransport is:

$$E_r = {}^1/_8 \rho g H^2 \cdot c_{gr} \text{ (Watt/m')} \qquad (5)$$

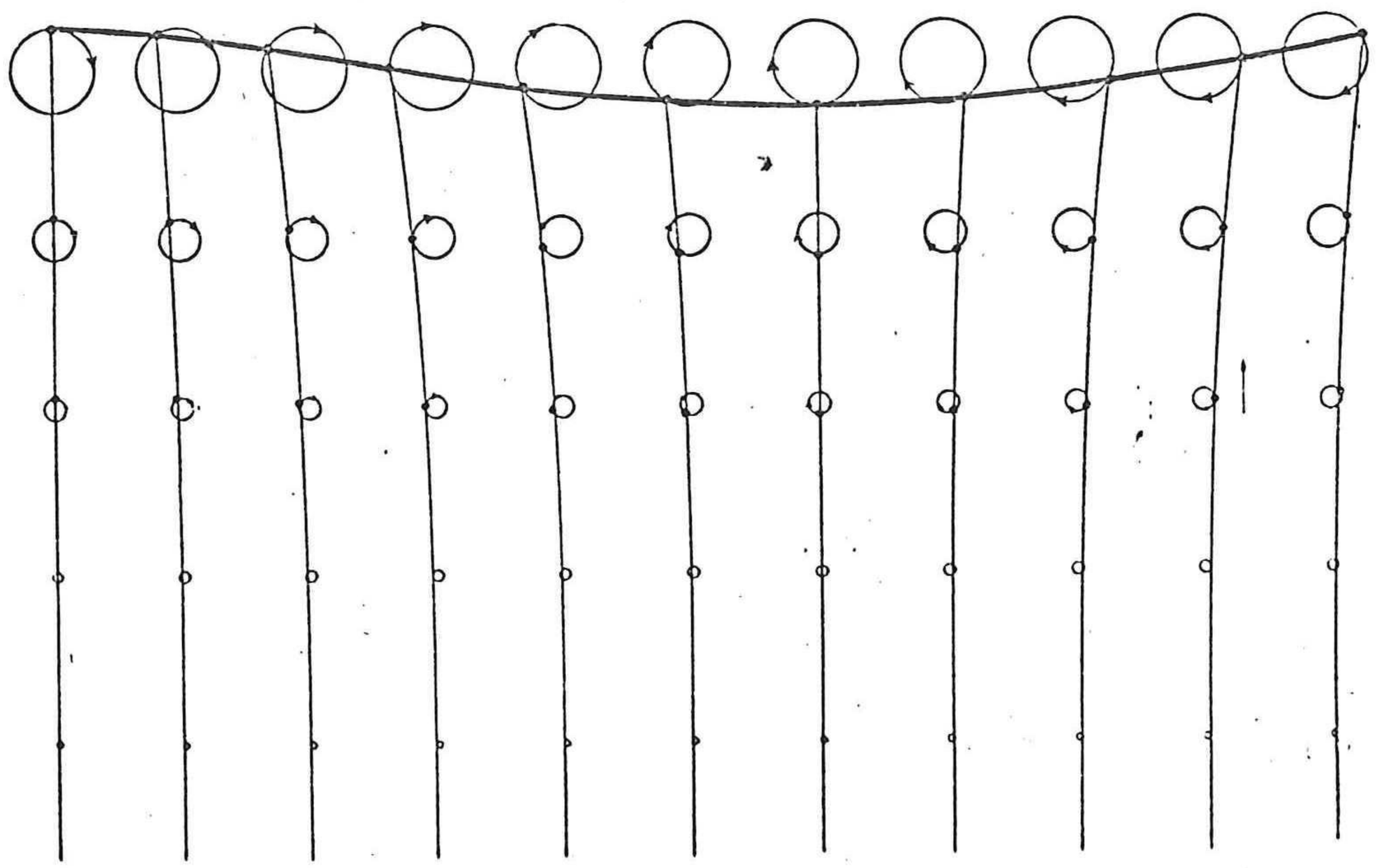
(per m "breedte" langs golfkam)

in de richting van de golfstraal.

Aangenomen wordt, dat in de richting van de golfkam geen energie-transport plaats vindt.

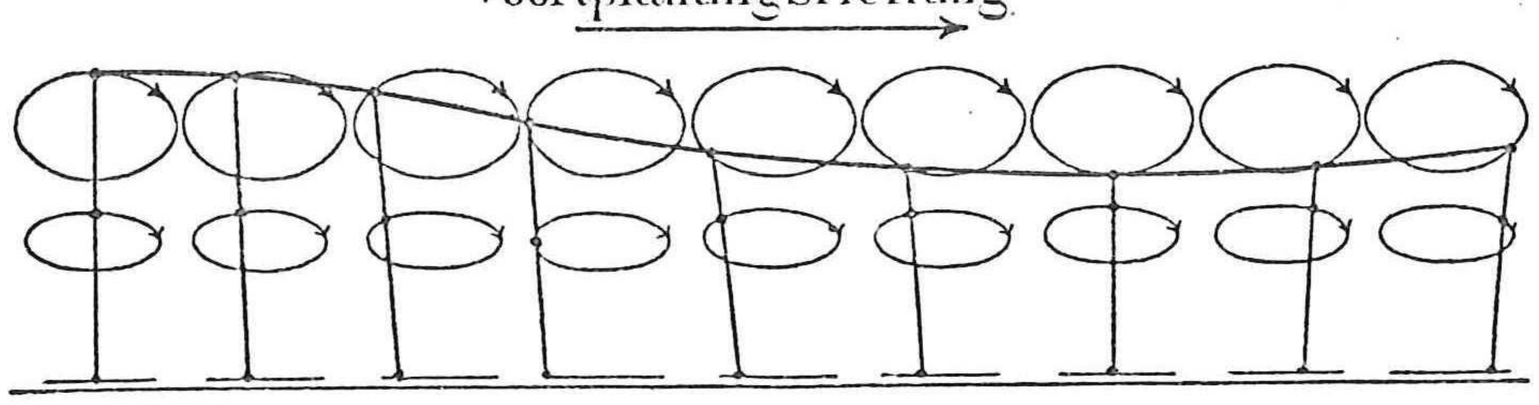
Doordat de golven tengevolge van refractie de geul uittreden, vindt energietransport plaats naar buiten de geul. Dit wordt zijdelings energieverlies genoemd.

Er treedt echter ook een andere vorm van energieverlies op, nl. door bodemwrijving. Voor het begrip hiervan is het nodig in te gaan op een ander facet van de golfbeweging, de orbitaalbeweging. Hieronder wordt verstaan het verschijnsel, dat waterdeeltjes in een golf bepaalde banen beschrijven. In diep water zijn deze cirkelvormig. Van deze cirkels neemt de diameter af, naarmate het beschouwde deeltje dieper onder de opervlakte zit. Beneden een diepte $d \simeq L/2$ is de diameter nagenoeg nul geworden. (Zie onderstaande figuur).



In ondiep water en water met tussenliggende diepte is de vorm van de banen meer ellipsvormig, waarbij de verhouding van de lengten van de assen van de ellips met de diepte onder de oppervlakte verloopt.

Op de bodem is de lengte van de verticale as zelfs nul geworden. Daar is verticale beweging van een waterdeeltje immers niet mogelijk, althans in geval van een ondoorlatende bodem, zoals hier is aangenomen.




De deeltjes kunnen zich nog wel langs de bodem bewegen, hetgeen met wrijving gepaard gaat. Aan de bodem gaat kennelijk ook energie verloren: bodemwrijvingsenergieverlies. (Zie App. III.)

Naarmate de golf door de geul voortschrijdt gaat dus energie verloren (zijdelings en bij de bodem), hetgeen resulteert in verkleining van de golfhoogte verderop in de geul.

## II. PROBLEEMSTELLING

De vraag wordt nu gesteld, hoe groot het zijdelingse energieverlies is, als een golf zich in de lengterichting van de geul voortplant. Uiteraard hangt dit van allerlei factoren af, waarvan slechts genoemd worden:

| | |
|---|---|
| - karakter van de golf: | periode (evt. spectrum) |
| | voortplantingssnelheid |
| | golfhoogte |
| | golflengte |
| - waterdiepte | voortplantingssnelheid |
| - geulvorm | diepte t.o.v. omliggend gebied |
| | breedte |
| | hellingen zijtaluds |

Om de resultaten van het onderzoek eventueel toepasbaar te kunnen maken op meerdere gevallen, werd besloten een systematisch onderzoek te verrichten en wel in een fysisch model.
In dit model zijn te dien einde golfhoogtemetingen verricht.

Bij het zoeken naar een theoretische oplossing van bovengenoemde vraag kwamen nog enige problemen naar voren, die betrekking hadden op de vorm van de golfkamlijn boven een vlakke bodem. De benadering hiervan met refractie-theorieën alleen bleek niet een met de modelproeven overeenstemmend resultaat te geven.

# III HET MODEL

## III-1. Vorm van het model

Om een indruk te krijgen van de energietransporten door verschillende raaien langs de geul en die onderling te kunnen vergelijken, is het noodzakelijk om de geulvorm over de lengte constant te houden, in tegenstelling tot de in de natuur voorkomende toestand, waar de geul in een oplopende kust steeds een andere dwarsdoorsnede heeft. Daar het niet mogelijk was de onderkant van het golfschot het profiel van de geul te geven, moest uitgegaan worden van een bij het golfschot vlakke doorsnede, die op enige afstand ervan zou overgaan in het dwarsprofiel van een geul, dat verderop constant van vorm zou blijven. Eén en ander leidde tot de vorm van het model, zoals die op bijlage 1 is weergegeven.

Om enig houvast te hebben bij het bepalen van de afmetingen, werd uitgegaan van een in werkelijkheid mogelijke toestand, verkleind op schaal 100. Derhalve kreeg de geul in beginsel een bodembreedte van 4,50 m, een waterdiepte van 0,30 m, een diepte t.o.v. de omgeving van 0,15 m en zijtaluds met hellingen 1:20.

Waar verder in dit verslag sprake is van "geul", "de geul zelf", etc. wordt bedoeld de geulbodem. De zijtaluds, elders vaak tot de geul gerekend, zullen hier "taluds" genoemd worden.

De "uiterwaarden" (tengevolge van vormgelijkenis zo genoemd, bijlage 2) kregen elk een breedte van 5,00 m en werden aan hun buitenzijden begrensd door een boven water komend grindtalud van 1:3. De breedte van de uiterwaarden en de helling van de grindtaluds zijn zo gekozen, dat uit de geul tredende golven geen of een verwaarloosbaar reflecterend effect op het gedrag van de golven in de geul zouden hebben, en er aldus van uitgegaan kon worden, dat ze a.h.w. naar oneindig zouden weglopen. Voor deze afmetingen zijn rapporten geraadpleegd, die vergelijkbare situaties beschrijven, onder andere [1].

Daar het onmiddellijk na de golfschotten op volle hoogte laten beginnen van de uiterwaarden tengevolge zou hebben, dat de geproduceerde golf direct al zijn regelmatige karakter zou verliezen, moesten de uiterwaarden geleidelijk op hoogte komen. Besloten werd, dit te realiseren door een helling van 1:50, zulks als compromis tussen een steilere helling, die zeker reflecties veroorzaakt zou

hebben, en een flauwere, die een kleinere effectieve lengte van de geul tengevolge zou hebben, doordat de totaal beschikbare lengte beperkt was door de lengte van de golfbak.
In eerste instantie werd de geul beëindigd door een grindtalud van 1:10, maar toen later bleek, dat dit nog enigszins kon reflecteren, is de helling op 1:20 gebracht.

## III-2. Toegepaste schaalregels

De op het model van toepassing geachte schaalregel is die van Froude. Deze is steeds van toepassing op modellen, waar de zwaartekracht van overheersend belang is, namelijk die, waar een vrije waterspiegel voorkomt. Ook de schaalregel van Weber kan toegepast worden bij golven, omdat er ook oppervlaktespanningsverschijnselen optreden. In dit geval leek dat niet aanvaardbaar, omdat deze effecten verwaarloosd kunnen worden, wanneer de steilheid van de golf H/L erg klein is. Deze lag hier in de ordegrootte van

$$\frac{H}{L} = \frac{0,05}{2,00 \text{ à } 4,00} = 0,025 \text{ à } 0,0125 \approx 2\%$$

Slechts bij golven, die op punt van breken staan, kan de oppervlaktespanning een rol gaan spelen, maar het optreden van deze verschijnselen werd in deze proef vermeden.
De schaalregel van Froude is gebaseerd op de formule

$$v = \sqrt{gl} \qquad (6)$$

waarin: v = elke vorm van snelheid
g = versnelling van de zwaartekracht
l = elke vorm van lengte

Na kwadrateren volgt hieruit voor de schaalverhoudingen:

$$n_v^2 = n_g . n_l = n_l \qquad (7)$$

$n_v$ = snelheidsschaal
$n_g$ = zwaartekrachtsschaal = 1 (moeilijk te veranderen)
$n_l$ = lengteschaal

Daar het refractieverschijnsel zowel in de lengte- als in de breedterichting optreedt, is voor een juist reproduceren van de refractie nodig:

$$n_b = n_l . \qquad (8)$$

Taluds mogen ook niet vertrokken worden, dus ook de diepteschaal moet zijn:

$$n_d = n_b = n_l . \tag{9}$$

Doordat het model niet vertrokken wordt, worden ook de altijd met refractie gepaard gaande diffractie-effecten juist weergegeven. Verder blijkt ook uit [7], p. 447 (zie ook app. I), dat hogere-orde-effecten in een niet vertrokken model in goede verhouding voorkomen.
Uit

$$l = v.t \tag{10}$$

volgt

$$n_l = n_v.n_t = \sqrt{n_l}.n_t \longrightarrow n_t = \sqrt{n_l} \tag{11}$$

Voor dit model geldt dus:

$n_l = 100$

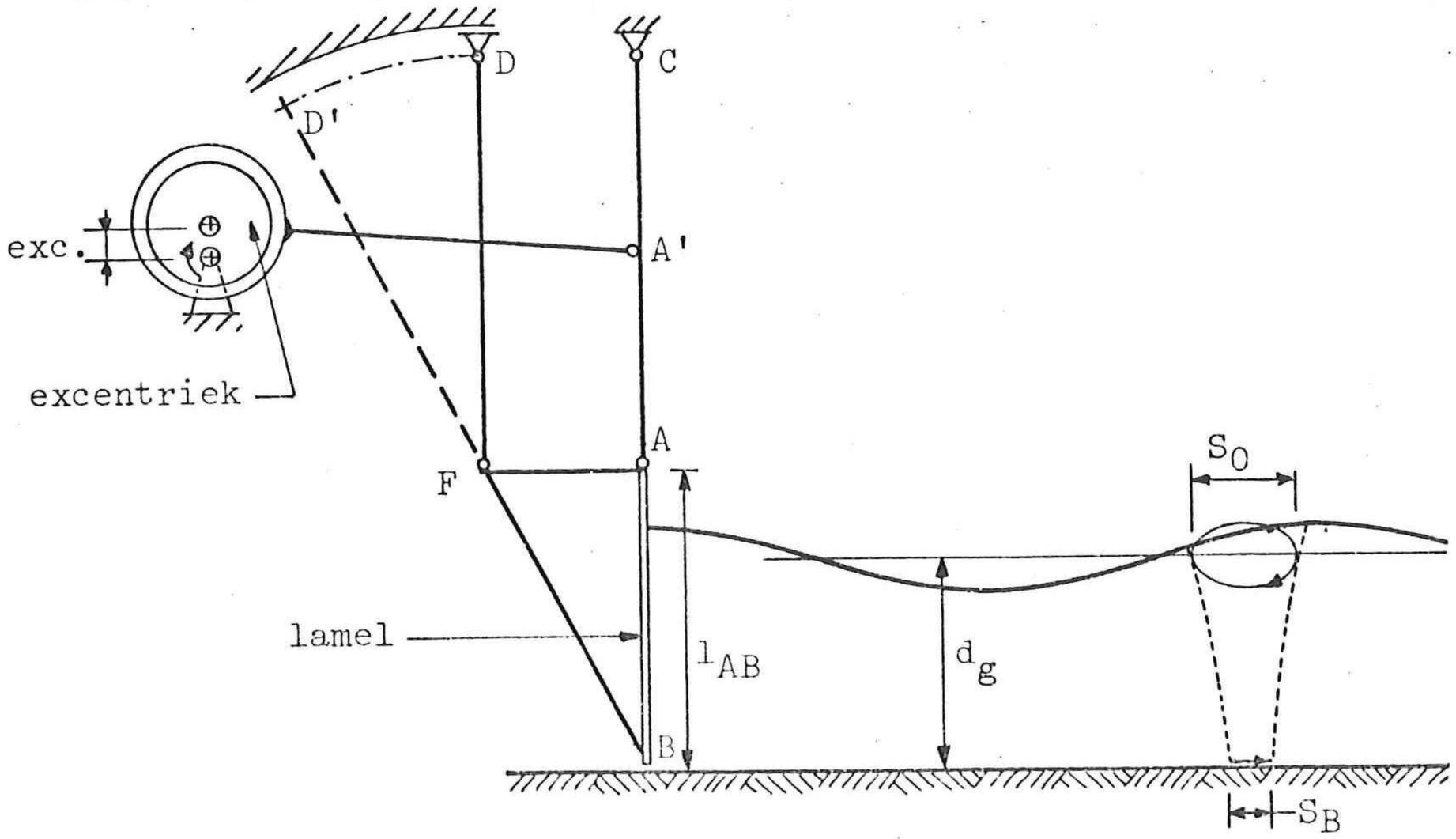
$n_v = 10$

$n_t = 10$

Deze schaalkeuze maakte het gebruik voor het model van tabellen en berekeningen (zoals in gebruik bij de Rijkswaterstaat), die ontworpen zijn voor de werkelijkheid, zeer eenvoudig.
Toepassing ervan op berekeningen, nodig om het model in te stellen, bleek goed mogelijk.

## III-3. Het golfschot en het instellen ervan

Het golfschot bestaat uit een rij naast elkaar geplaatste lamellen, elk 0,305 m breed, die ieder worden aangedreven volgens het in de schets weergegeven principe.



Een excentriek drijft door middel van een drijfstang een pendel CA aan via een scharnier A', midden tussen A en C gelegen. Een pendel DF is bij D verstelbaar, en wel zó, dat het scharnier D naar believen verschoven en vastgezet kan worden ergens op de cirkelboog DD'. Aan de scharnieren F en A is een driehoekige constructie opgehangen, waarvan aan de verticale rechthoekszijde één zijde van de rubber lamel is bevestigd. Bovengeschetste constructie komt over de gehele breedte van de golfbak om de 0,305 m voor. (Afb. 1)
De excentriciteit exc. kan naar wens ingesteld worden tussen 0 en ca. 70 mm. De slag van A' is dan twee keer zo veel, die van A vier keer. Als het bovenscharnier van DF op D gelegen is, hangen de pendels DF en CA evenwijdig en beweegt de $\triangle$ AFB zonder totatie. B beweegt dus evenveel heen en weer als A. Als het boveneinde van DF met D' samenvlat, liggen D',F en B op één lijn, zodat voor kleine uitslagen geldt, dat B niet beweegt en $\triangle$ AFB slechts roteert, en wel om B.
Door het boveneinde van DF ergens tussen D en D' te plaatsen, kan dus de verhouding van de uitslagen van A en B geregeld worden.
Wordt de uitslag van A met $S_A$ en die van B met $S_B$ aangegeven, dan kan voor de uitslag ter plaatse van de waterspiegel geschreven worden:

$$S_0 = (S_A - S_B) \frac{d}{l_{AB}} + S_B \qquad (12)$$

Voor de horizontale snelheid van een waterdeeltje in een golf met een bepaalde periode in een bepaalde waterdiepte geldt:

$$u = \frac{agk}{\omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(\omega t - kx) \qquad (13)$$

Integreren naar de tijd geeft de afgelegde weg:

$$S = \int u\, dt = -\frac{2agk}{\omega^2} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cos(\omega t - kx) \qquad (14)$$

Hieruit volgt:

$$S_{max} = \frac{agk}{\omega^2} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \qquad (15)$$

Voor z = 0 geldt:

$$S_{0_{max}} = \frac{agk}{\omega^2} \qquad (16)$$

Voor z = -d geldt:

$$S_{B_{max}} = \frac{agk}{\omega^2} \cdot \frac{1}{\cosh kd} \qquad (17)$$

zodat:

$$\frac{S_{B_{max}}}{S_{0_{max}}} = \frac{1}{\cosh kd} \qquad (18)$$

Deze verhouding kon in de tabellen in [3] opgezocht worden voor verschillende perioden en waterdiepten. (zie bijlage 3a)
Daar geen eenvoudige relatie bestaat tussen de plaats van scharnier D op de cirkelboog DD' en de verhouding $S_A/S_B$ of $S_A/S_B$, gebeurde het instellen van deze verhouding voor elke meetsituatie proberenderwijs.

Om een indruk te krijgen van de grootte van de uitslag $S_0$, werd in eerste instantie uitgegaan van de gedachte, dat althans in diep water de orbitaalbeweging cirkelvormig is, en in minder diep water ellipsvormig, in die zin, dat de horizontale beweging groter is dan de verticale. Derhalve kon gesteld worden:

$$S_0 = \text{orde (H)} \qquad (19)$$

Zie ook bijlage 3a.

Uitgaande van het brekingscriterium op de uiterwaarden

$$H = 0{,}5 \text{ à } 0{,}6\ d \qquad (20)$$

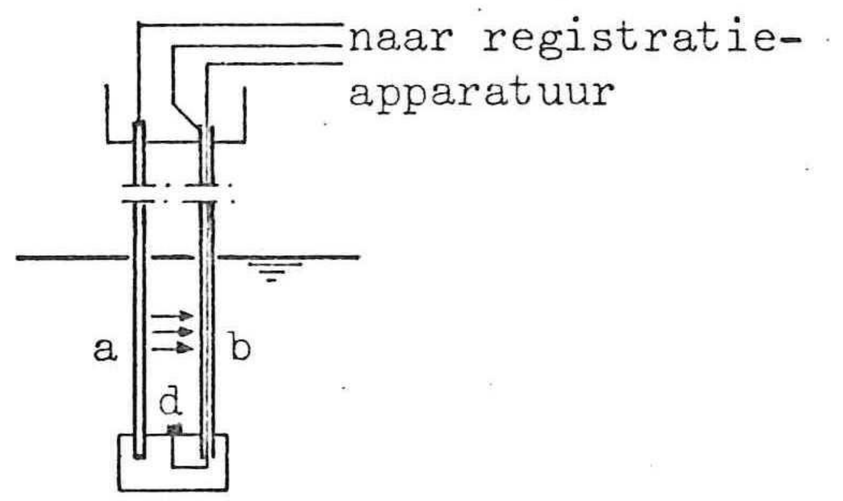
kon de grootste toelaatbare golfhoogte, en dus $S_0$, geschat worden. Dit ging niet helemaal op, daar vooral in de omgeving van het drielandenpunt (zie bijlage 2) een sterke convergentie van golfstralen optrad, zodat de golven daar hoger werden en er dus eerder breking optrad. De excentriciteit werd daarom proberenderwijs bepaald. Deze is bij elke meet situatie op de bijlagen vermeld.

Doordat van elke excentriek afzonderlijk de fase ten opzichte van de as, waarop ze gemonteerd zijn, kan worden ingesteld, was het mogelijk bepaalde lamellen of secties van het golfschot in fase vóór of achter ten opzichte van elkaar te laten lopen.

## III-4. De meetapparatuur

Ter beschikking stonden vier golfhoogte-opnemers (Afb.1b en 2b), via electrische kabels verbonden met de registratie-apparatuur (Afb.2a). De werking van deze opnemers is gebaseerd op de weerstand, die het

water vormt voor een electrische stroom van een electrode a naar een andere, b. Als de waterstand om de electroden laag is, wordt de stroomloop bemoeilijkt ten opzichte van de toestand, waarin de waterstand hoog is, omdat het "doorstroombare" oppervlak tussen water en electrode in het eerste geval kleiner is.




Om effecten van watertemperatuur en zich in het water bevindende verontreinigingen te compenseren, is een kleine electrode d aangebracht, die altijd onder de wateroppervlakte moet zijn. Onafhankelijk van waterstandsvariaties registreert deze electrode de zojuist genoemde effecten, die als referentie naar de registratie-apparatuur gaan.
De apparatuur produceert op één strook papier (zie bijlage 4) de vier golfhoogteregistraties, uitgezet tegen de tijd. De weergaveschaal van de golfhoogte en de tijdschaal konden gevarieerd worden, zodat een eventuele betere bestudering van de golfvorm in de tijd mogelijk was.

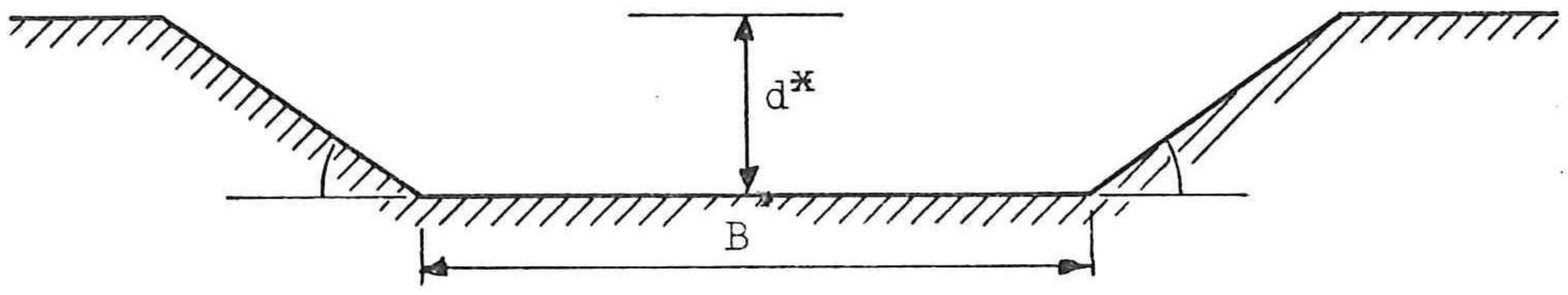
## III-5. Het maken van foto's

Van verschillende situaties zijn foto's genomen, door de camera vanaf de loopbruggen boven de bak verticaal naar beneden te richten. Daar de bak niet in z'n geheel kon worden gefotografeerd, moest dat per gedeelte gebeuren. Naderhand zijn de foto's tot één geheel gemonteerd.
Een probleem hierbij was, dat de golfkammen op de overlappende foto's moesten corresponderen. Er is getracht dit op te lossen door één man een vaste plaats te geven t.o.v. het golfschot en deze een sein te laten geven, waarop de andere de camera afdrukte.
De resultaten van de fotomontages zijn van dien aard, dat, ook wanneer beider reactietijden bleken te varieren, een redelijke indruk van de golfkamvorm verkregen kan worden.
De gedeelten van de bak, die per foto genomen zijn, staan op bijlage 5.

# IV HET MEETPROGRAMMA

## IV-1. Overwegingen vóór het meetprogramma

Bij het opzetten van een aantal metingen ten behoeve van een bepaald onderzoek dient men zich in de eerste plaats af te vragen, welke factoren van invloed kunnen zijn op hetgeen onderzocht wordt. Daar aangenomen wordt, dat het transport van golfenergie plaats vindt in een richting loodrecht op de golfkam, zijn vooral, bij het onderhavige onderzoek, die factoren van belang, die een golffront van richting doen veranderen. De oorzaak hiervan is de variatie van de fasesnelheid c.
Zoals bekend is c een functie van de periode T en, in waterdiepten kleiner dan een halve golflengte, ook nog afhankelijk van de waterdiepte.
Dus om de golflengte te kunnen variëren moet òf de waterdiepte òf de periode òf beide veranderd worden.
Andere factoren, die een rol spelen, zijn vooral die, die de geometrie van de geul en diens omgeving bepalen.
Deze zijn: de geuldiepte $d^*$(geul), de geulbreedte B en de steilheid van het talud.




Door de beperkte hoeveelheid tijd, die beschikbaar was voor het doen van dit onderzoek, werd besloten de helling van het talud niet te varieren.
Uit de literatuur bleek dat bij hellingen kleiner dan 1:10 niet of nauwelijks reflekties te verwachten waren. Om aan de veilige kant te zitten werd, zoals eerder gemeld, een helling van 1:20 gekozen.
De geuldiepte d werd ook vast aangenomen.
De geulbreedte B bleef nu als enige op de geometrie betrekking hebbende factor, die gevarieerd kon worden.
De geul kreeg eerste de grootste van de overwogen breedten en zou na de eerste meetserie versmald worden.
Door het waterpeil, de periode en de geulbreedte te veranderen kun-

nen er andere verhoudingen ontstaan in de kentallen:

$$\frac{d_u}{d_g} \; ; \; \frac{d_g}{B} \; ; \; \frac{L}{B}$$

Om te kunnen zien in hoeverre deze drie kentallen van invloed zijn, verdient het de voorkeur slechts één hiervan te laten variëren, terwijl de anderen constant blijven.

Begonnen werd bij een waterstand van 0,30 m. in de geul, met een golf van 0,95 sec. en een hoogte van 0,05 m.

Deze golven hadden de neiging te gaan breken op de uiterwaarden, waardoor er stoorgolven ontstonden, die zich uitbreidden naar de geul, waar ze met die van de andere kant een soort van kruisnet vormden. De metingen werden hierdoor beïnvloed. (Zie bijv. Afb.5)

Het zelfde gebeurde bij een grotere T, hoewel de golf, die dan van het golfschot kwam, lager was.

Om dit soort verstoringen te voorkomen en om niet steeds bij de zelfde waterstand en elke andere T ook het golfschot een andere uitwijking te moeten geven, werd als uitgangswaterdiepte 0,35 m. gekozen.

Een andere beperking was het vaste aantal golfperioden op de golfmachine. Tevens zouden de perioden groter dan ca. 0,9 sec. moeten zijn tengevolge van mechanische eigenschappen van het golfschot.

## IV-2. Meetprogramma

Bij een vaste waterdiepte zou alleen het kengetal L/B kunnen veranderen. Bij een andere waterstand kan d/B slechts gelijk blijven als ook B verandert. Om L/B constant te kunnen houden heeft men ook nog de mogelijkheid een andere periode te kiezen, zodat L verandert.
(Bij kleinere diepten moet dan een grotere T gekozen worden en omgekeerd).

Aan de verhouding $d_u/d_g$ is verder niet veel te doen, tenzij men de geuldiepte verandert.

Omdat de keuze van T beperkt was door de mogelijkheden, die de versnellingsbak van de golfmachine bood, werd, uitgaande van een bepaalde T, gekeken welke breedte de geul zou moeten krijgen om de gewenste kentallen constant te houden.

Om niet te verzanden in het berekenen van de vele mogelijkheden, werd besloten dit grafisch op te lossen. (Bijlage 6a en 6b).

Met de grafieken werd, uitgaande van een L/B en d/B, een B met bijbehorende d bepaald waarvoor de beide kentallen constant bleven.
Een aantal resultaten hiervan zijn verenigd in tabel I. (Bijlage 6c)
De waterdiepte moest liggen tussen 0,15 m. en 0,60 m. respectievelijk in verband met de $d^{*}$(geul) en de hoogte van de lamellen van het golfschot.
Voor de breedte van de geul bleek hieruit, dat deze niet smaller zou mogen worden dan 2,50 m. door een te kleine T.
De uiteindelijke keuze staat vermeld in tabel II. (Bijlage 6d)

IV-3. Samenvatting van de verschillende meetsituaties (Bijlage 7a).

A. Wel of niet plaatsen van de geleideschotten (zie hfdst. V-1)

1. Zonder schotten: Golfmachine over de gehele breedte van de bak dezelfde fase. Uittredend golffront recht, maar t.p.v. raai 8 gebogen.

2. Met schotten: Golfschotten sectiegewijs in fase verschillend, zodat t.p.v. raai 8 een rechte golfkam optreedt.

B. Waterdiepte in geul: Deze kon gevarieerd worden binnen bepaalde grenzen.

1. $d_g \leqslant 0,40$ m. Bij hogere waterstanden produceert het golfschot geen goede golf meer.

2. $d_g \geqslant 0,25$ m, omdat anders de golven op de uiterwaarden te snel zouden gaan breken. Als immers $d_g = 0,25$ m dan $d_u = 0,10$ m; dit is erg weinig.

C. Periode: Voor kleinere perioden dan $T \simeq 0,9$ sec. produceert het golfschot stoorgolven. De grootst instelbare periode was $T = 2,2$ sec. bij de aanwezige overbrengingsverhoudingen.

D. Bodembreedte: Wegens tijdgebrek niet de aanvankelijk nog overwogen B = 3,50 m aangebracht, maar alleen B = 4,50 m gebruikt.

E. Scheef golffront: Uitgangspunt: instellen van golf onder hoek van ca. $10^{o}$.

De verschillende meetsituaties hebben codenummers gekregen, die op de betreffende bijlagen zijn vermeld en waarvan de betekenis is gegeven op bijlage 7b.

## V UITVOERING DER METINGEN

### V-1. Meetpunten, plaatsing geleideschotten

De uitvoering van de metingen was als volgt: (zie ook bijlage 2)
Over de bak werd een aantal raaien gelegd, waarlangs om de 0,50 m een meetpunt gelegen was. Deze raaien zijn genummerd met de afstand van de betreffende raai tot één bepaalde raai, die ca. 1,50 m van het golfschot lag, en "raai 0" genoemd is. Zo betekent "raai 8" de raai, die 8,00 m vanaf raai 0 lag. Raai 8 werd als "beginvoorwaarde" voor de resultaten gebruikt, omdat vanaf raai 8 de geul zijn constante vorm had. Vanaf raai 8 werden de raaien elke 5,00 m gelegd. De keuze van de ligging van de oorsprong van het over de bak gelegde assenstelsel ter plaatse van het snijpunt van raai 0 en de hartlijn van de geul lag wel voor de hand, maar omdat dan minder hanteerbare getallen zouden ontstaan voor de ordinaat van belangrijke lijnen als de teen- en kruinlijnen (nl. $\pm$ 2,25 en $\pm$ 5,25), is één van de kruinlijnen als abscis aangehouden, waardoor de ordinaten van de teen- en kruinlijnen werden:

0,00 + 3,00 + 7,50 en + 10,50

In beginsel was het de bedoeling om op raai 8 een rechte, overal even hoge golfkam te creëren. Door o.a. de eigenschappen van het golfschot was het niet mogelijk om de golfkam overal precies even hoog te krijgen. Het verkrijgen van een rechte golfkam op raai 8 leek na bestudering van het gedrag van de bak niet gemakkelijk, zodat eerst enige meetsituaties doorgenomen zijn, waarbij de rechte golfkam bij het golfschot lag.
Toen na het plaatsen van geleideschotten (zie o.a. bijlage 2), het in vooraf geschat faseverschil brengen van de betreffende secties van het golfschot en proefdraaien bleek, dat een rechte golfkam op raai 8 heel goed realiseerbaar was, zijn dezelfde meetsituaties nog eens "met schotten" doorgenomen. Deze twee verschillende toestanden worden voortaan kortheidshalve aangeduid met uitdrukkingen als "geen schotten" en "met schotten", of dergelijke.
Na het doornemen van bovenbedoelde series bleek nog enige tijd over om metingen te doen, waarbij een scheef invallende golf over de geul liep, zulks zuiver uit belangstelling en om eventueel daarbij optredende specifieke verschijnselen te bestuderen en te vergelijken met

de andere metingen.
Een aspect van de scheef invallende golf, dat speciale belangstelling genoot, is de veronderstelling, dat golven, die van de uiterwaarden de geul intreden, na refractie op het talud weer op de uiterwaarden terecht komen. Hier bevinden zich de golven, die nog geulwaarts gericht zijn en deze worden nu geconfronteerd met de golven, die van het talud teruggekomen zijn. Dit kan plaatselijk een tot branding aanleiding gevende verhoging van de golven in de omgeving van de kruinlijn bewerkstelligen.

Bij de meetsituatie "scheef golffront" is aan de nummering van de raaien een accent toegevoegd. De raaien zijn hier namelijk schuin over het model gelegd onder dezelfde hoek als het uittredende golffront. (Bijlage 15-IA.). Raai 8' is dan de schuin liggende raai, die de geulas snijdt op 8,00 m vanaf raai 0.

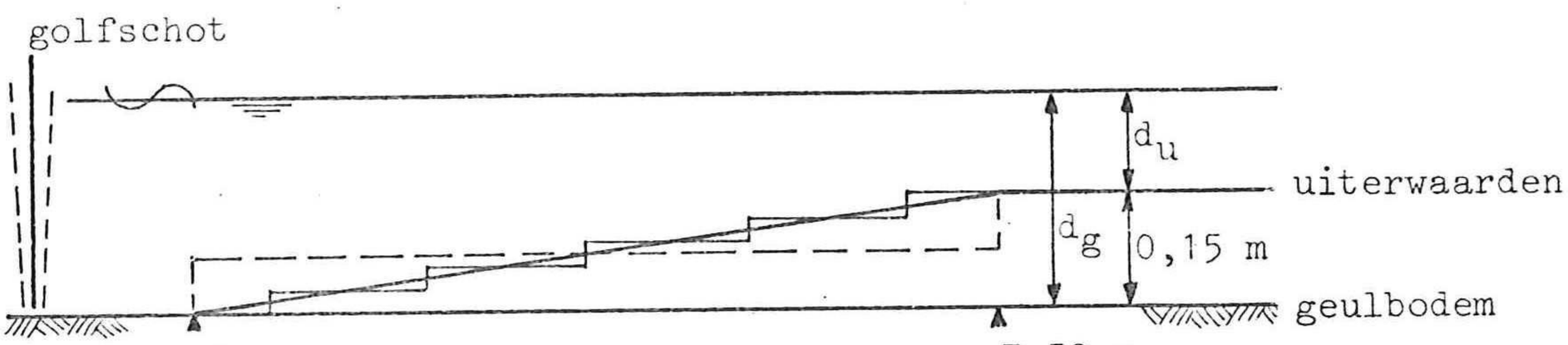
## V-2. Berekening van de faseverschillen in het golfschot zelf

### a. Voor de meetsituatie "met schotten":

Voor de verschillende secties van het golfschot ("geulsectie", de vier "taludsecties" en de beide "uiterwaarden-secties") werd per meetsituatie berekend hoeveel ze in fase met elkaar moesten verschillen om het golffront in raai 8 recht te krijgen.
Met de formule

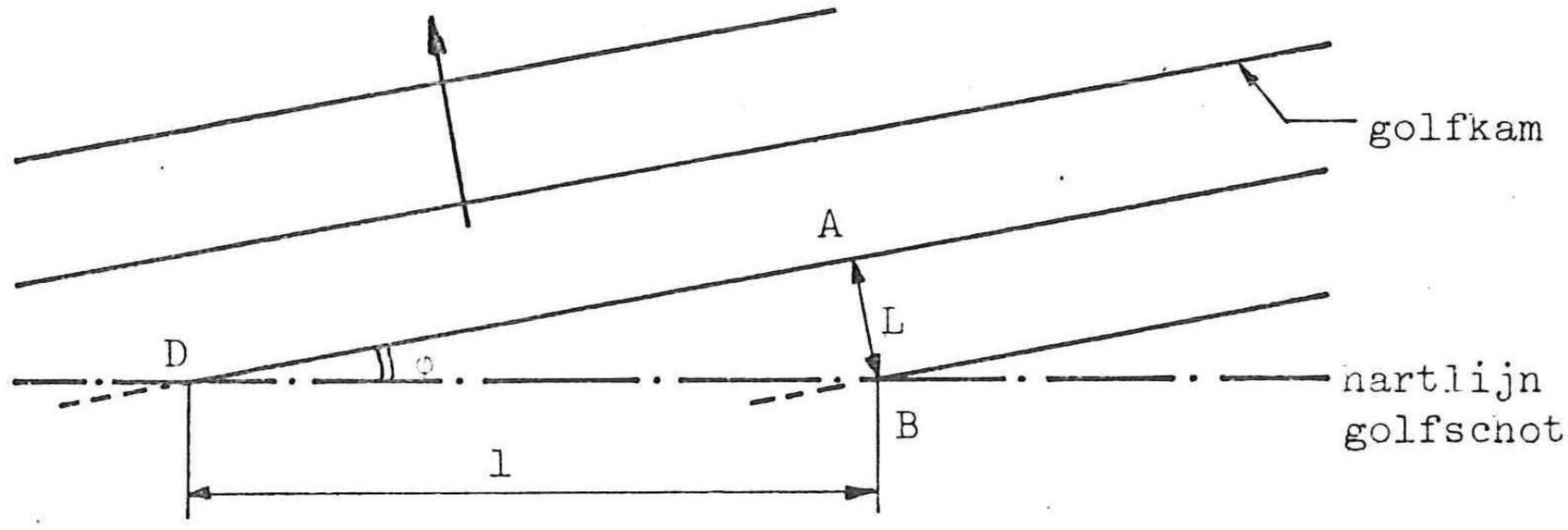
$$c^2 = \frac{g}{k} \text{ tangh } kd \qquad (3)$$

werd voor elke sectie de snelheid bepaald van de golven over de afstand golfschot-raai 8.
Voor de geulsectie kon c steeds direct berekend worden, voor de uiterwaardensecties, waar de bodem opliep tot geuldiepte + 0,15 m., moest een benaderende rekenwijze gebruikt worden.
Het talud 1:50 werd daartoe in stappen verdeeld, voor welke steeds c uitgerekend werd. Het bleek, dat c, berekend voor een gemiddelde diepte over de afstand raai 0 tot raai 7,50, een goede benadering was.




De looptijden werden berekend, uit: $T = \frac{7,50}{c}$, en uitgedrukt in perioden, waaruit volgde, wat het fase verschil per sectie moest zijn. (Bijlage 3b).

b) Voor de meetsituatie "scheef invallende golf"




Als men elke excentriek steeds een zelfde faseverschil geeft ten opzichte van elke vorige, zal de golf scheef uit het golfschot treden. Stel, dat over de lengte 1 van het golfschot, waarop zich n lamellen bevinden, het totale faseverschil zoveel bedraagt, dat de excentriek bij B $360^o$ vóór loopt op die bij D. Dan "heeft B de golf geproduceerd, waar D juist aan begint".

Uit $L = 1 \sin\varphi$ en $1 = 0,305\ n$ vinden we het faseverschil per lamel:

$$\frac{360^o}{n} = \frac{0,305\ .\ 360\ .\ \sin\varphi}{L}$$

Voor een bepaalde waarde van L kan het faseverschil per lamel uitgezet worden tegen de uittredehoek $\varphi$. (Zie bijlage 3c-1)

Om na het eenmaal instellen van het golfschot met een andere L te kunnen werken en de uittredehoek zo dicht mogelijk bij $10^o$ (of eventueel iets meer) te kunnen houden, leek een faseverschil per lamel van $8^o$ het meest bruikbaar.

De bij $d_g$ = 0,35 m en T = 1,62 sec optredende L = 2,73 m ligt het dichtst bij het gemiddelde van de grootste en kleinste mogelijke golflengte.
Deze meetsituatie is als "meest gemiddelde" gekozen. De hiervoor berekende uittredehoek van ca. 11,5° bleek in werkelijkheid 10° te zijn, zodat goed aan de verlangde instelling voldaan werd.
De instelling van het golfschot voor het schuin invallend golffront behoeft nog enige toelichting. Zoals uit bijlage 15-I blijkt, is de kamlijn op raai 8' tussen de meetpunten -1,00 en -5,00 gekromd.
De oorzaak hiervan is het feit, dat voor deze uiterwaard-sectie met een breedte van ca. 5,00 m slechts ca. drie meter golfschot ter beschikking staat voor golfopwekking. Het gebied buiten de stippellijn ligt a.h.w. in een schaduwgebied. Door de instelling van het golfschot op verschillende manieren te veranderen, is getracht, enige verbetering in de vorm van de kamlijn te brengen. Eerst is geprobeerd, door de gehele sectie in fase vóór te laten draaien, het golffront ter plaatse a.h.w. "vooruit te duwen". Doordat de kamlijn toen nog onregelmatiger van vorm werd, is de fase-instelling weer teruggebracht en is de excentriciteit veranderd, en wel lineair oplopend naar het einde van het golfschot. Een en ander is in de vorm van een diagram weergegeven op bijlage 3c-2. Dit had wel gunstiger resultaat, maar toch niet zoveel, dat de golfkam er recht door werd.
Deze kromme golfkamvorm is er vermoedelijk de oorzaak van, dat van de verwachte vergrotingen van de golfhoogte op de kruinlijn aan "loefzijde" geen significante resultaten geregistreerd konden worden.

## V 3. Onderzoek naar zg. Bakslingeringen

Met bakslingeringen wordt bedoeld het verschijnsel, dat een translatiegolf in de golfbak optreedt, die het karakter draagt van een staande lange golf.
Deze golf kan niet alleen geïntroduceerd worden door de proefgolven zelf, maar vooral ook bij het aanzetten van de golfmachine.
Stel dat er op zeker moment een staande golf in de bak zou zijn als hieronder geschetst :

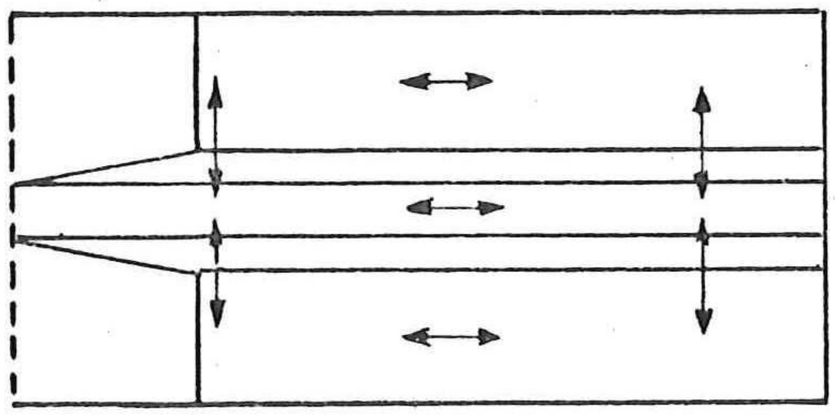
Kennelijk is $L_{golf} = 2 \times 1_{bak} \approx 72$ meter.
Verder geldt (ondiep water voor deze golf, L>>25d):

$$c = \sqrt{g.d} \qquad (3a)$$

op de uiterwaarden: $c_u = \sqrt{10 \times 0,15} = 1,22$ m/sec. voor $d_u = 0,15$ m.
in de geul: $c_g = \sqrt{10 \times 0,30} = 1,73$ m/sec. voor $d_g = 0,30$ m.
Uit:

$$T = \frac{L_{golf}}{c}$$

volgt: $T_g \approx 41$ sec. en $T_u \approx 59$ sec.
De proefmetingen werden in het midden van de bak gedaan, ter plaatse van de knoop van de golf. Daar is namelijk voor bovengeschetst geval het debiet, en dus de stroomsnelheid het grootst.
Uitgaande van de redenering dat tegenstroomse golven hoger zijn dan golven die met de stroom mee lopen, kan men in een lange-duur-meting een periodeieke verandering van de golfhoogte verwachten.
Ingeval van hogere harmonischen van deze translatie-golf moeten ook nog metingen gedaan worden op andere plaatsen waar knopen op kunnen treden.
In geen van deze gevallen werd echter een significante periodiciteit geconstateerd. (Bijlage 8).
Dit kan verklaard worden uit het feit, dat de golf in lengte van de geul een andere looptijd heeft dan die boven de uiterwaarden.
Het gevolg is, dat ze niet altijd in fase kunnen zijn, en dat de waterstanden in de geul ooit anders moet zijn dan die boven de uiterwaarden.



Hierdoor vindt aanvulling plaats in dwarsrichting en wordt het effect in langsrichting verminderd en misschien wel uitgedempt.
Proeven gedurende de uitvoering van het meetprogramma met drijvertjes gaven ook geen significante stroomrichtingen te zien; deze werd vaak overheerst door de stralingsdruk van de golven.

## VI VERWERKING VAN DE MEETRESULTATEN

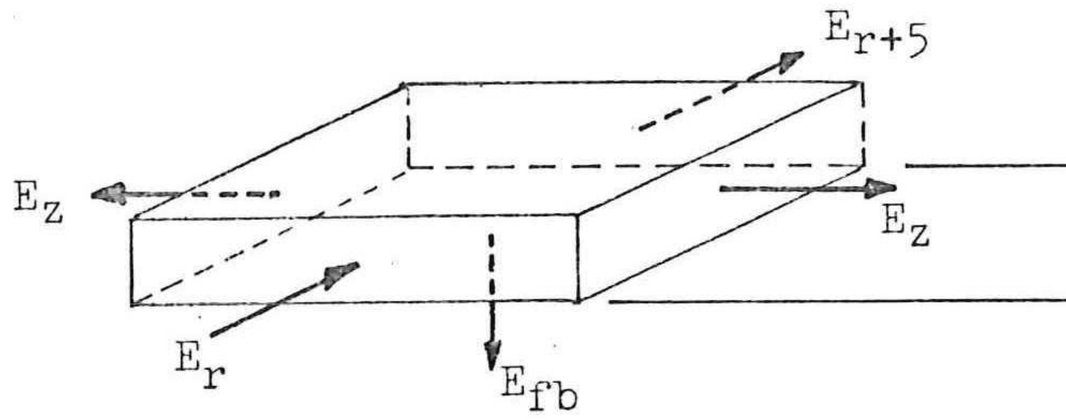
### VI-1. De weergave van de metingen. (bijlagen 11 t/m 15)

De geregistreerde golfhoogten zijn weergegeven op de bijlagen: uitgezet vanaf de raai, waarin ze zijn gemeten.
De betreffende waarde is bijgeschreven in cm en de stippellijn, die de punten verbindt, geeft het verloop aan van de golfhoogte langs de raai.
Op de bijlagen 13 en 14 (situaties met schotten) is ook nog de vorm van de golfkamlijn weergegeven (dikke getrokken lijn).
Deze is door fasemeting in de raai als volgt bepaald:
Gedurende de tijd, waarin één raai gemeten werd, bleef één van de vier opnemers op dezelfde plaats staan. Op de registratiestrook werd het faseverschil van de andere drie gemeten golven t.o.v. deze ene vastgelegd.
Liep een punt van de golfkam b.v. t sec. vóór op het referentiepunt, dan liep dat punt er dus $\frac{t}{T}$ x L m. op vóór.
Door deze behandeling op elk meetpunt toe te passen, kon de vorm van de golfkamlijn t.o.v. de raai bepaald worden, wanneer de golfkam in het referentiepunt juist in de raai was.
De aandacht dient er op gevestigd te worden, dat de bij elke raai getekende gofkam zich niet op een afstand van een geheel aantal malen de golflengte bevindt, maar dat de getekende lijn de plaats van de golfkam weergeeft, als die op een bepaald punt (het referentiepunt) juist in de raai is.

### VI-2. Berekening van zijdelingse energieverlies.

Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van een rekenmachine, waarvoor een programma geschreven is. (Zie bijlage 9).
In principe wordt het zijdelingse energieverlies bepaald door te berekenen:

- het energietransport $E_r$ door een raai over de gehele breedte van de geulbodem.
- het bodemwrijvingsenergieverlies $E_{fb}$ tussen twee raaien.



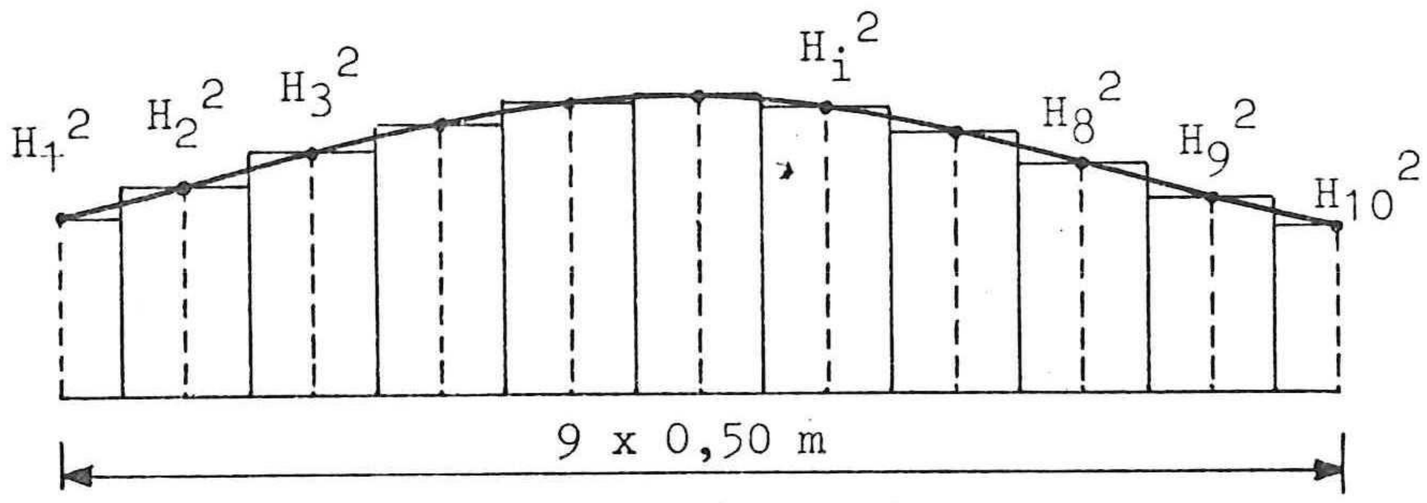

Uit de figuur blijkt: $E_z = E_r - E_{r+5} - E_{fb} = E_r - (E_{r+5} + E_{fb})$ (21).

a. Het energietransport door een raai.

In elke raai waren over de bodembreedte tien meetpunten. De per meetpunt geregistreerde golfhoogte werd gekwadrateerd.
De formule

$$E = {}^{1}/_{8}\ \rho\ g\ H^2 \quad (Nm/m^2) \qquad (4)$$

geeft de energie per $m^2$ horizontaal oppervlak. Om de energie per m' geullengte te krijgen, werd elke gekwadrateerde golfhoogte vermenigvuldigd met het bijbehorende stuk raai, en het resultaat werd gesommeerd over de bodembreedte.




Zie de figuur:

$$H_1^2 * 0{,}25 + \sum_{i=2}^{9} H_i^2 * 0{,}50 + H_{10}^2 * 0{,}25 =$$

$$= \left\{ \tfrac{1}{2}(H_1^2 + H_{10}^2) + \sum_{i=2}^{9} H_i^2 \right\} * 0{,}50 \qquad (22)$$

In het rekenprogramma werd dit resultaat "SOM H&2" genoemd. (Zie bijlage 9a)
SOM H&2 werd vermenigvuldigd met de voor elke meetsituatie uit de tabellen [3] berekende $c_{gr}$ (vermeld op bijlage 10), zodat de grootte van het energietransport verkregen werd.

b. Het energieverlies door bodemwrijving.

Voor het bepalen van de bodemwrijvingsenergieverliezen is gebruik gemaakt van de formule (zie [6] en app. III):

$$E_{fb} \approx \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 \frac{1}{\sinh^2 kd} \left\{1 - 0{,}197\varepsilon + \text{orde}(\varepsilon^2)\right\} \quad (\text{Watt/m}^2) \qquad (23)$$

waarin: $\mu$ = dynamische viscositeit = $\rho\nu = 10^3 . 10^{-6}$

$$\beta = \left(\frac{\pi}{\nu T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\varepsilon = \frac{u_{b\ max}}{c}$$

$$\nu = 1.10^{-6}$$

Voor u geldt:

$$u = \frac{agk}{\omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(\omega t - kx) \qquad (13)$$

waarin: $a = \frac{H}{2}$

Op z = -d wordt dit:

$$u_{b\ max} = \frac{agk}{\omega \cosh kd} = \frac{HTg}{2L \cosh kd} \qquad (17)$$

Zodat voor $\varepsilon$ geldt:

$$\varepsilon = \frac{H\ T\ g}{2Lc \cosh kd} \qquad (24)$$

Voor enige gevallen, waarvan vermoed werd, dat $\varepsilon$ zo groot mogelijk zou zijn t.o.v. 1, werd $\varepsilon$ berekend. Hieruit bleek, dat de factor $0{,}197\ \varepsilon$ een waarde kreeg van ongeveer 0,01 à 0,02, dus verwaarloosbaar werd. Derhalve kon vergelijking (22), nadat voor bekende grootheden de waarden waren ingevuld, overgaan in

$$E_{fb} = \frac{\pi^{5/2}}{2} \cdot \frac{H^2}{T^{5/2}} \cdot \frac{1}{\sinh^2 kd} \quad (\text{Watt/m}^2) \qquad (25)$$

Voor elke meetsituatie werd sinh kd opgezocht in de tabellen in [3]; de waarden ervan zijn weergegeven op bijlage 10.

$H^2$ werd als volgt benaderd:
Wanneer voor $H^2$ een ter plaatse geldende waarde zou worden ingevuld, zou $E_{fb}$ per $m^2$ bodem verkregen worden. Voor het energieverlies per m' geul over de gehele breedte van de bodem kon gebruik gemaakt worden van de onder a. gevolgde procedure; voor $H^2$ werd derhalve de waarde van SOM H&2 ingevuld. Om het energieverlies door bodemwrijving tussen twee raaien te bepalen, is de fictieve waarde van

$$\text{SOM H\&2} = \frac{(\text{SOM H\&2})_r + (\text{SOM H\&2})_{r+5}}{2}$$

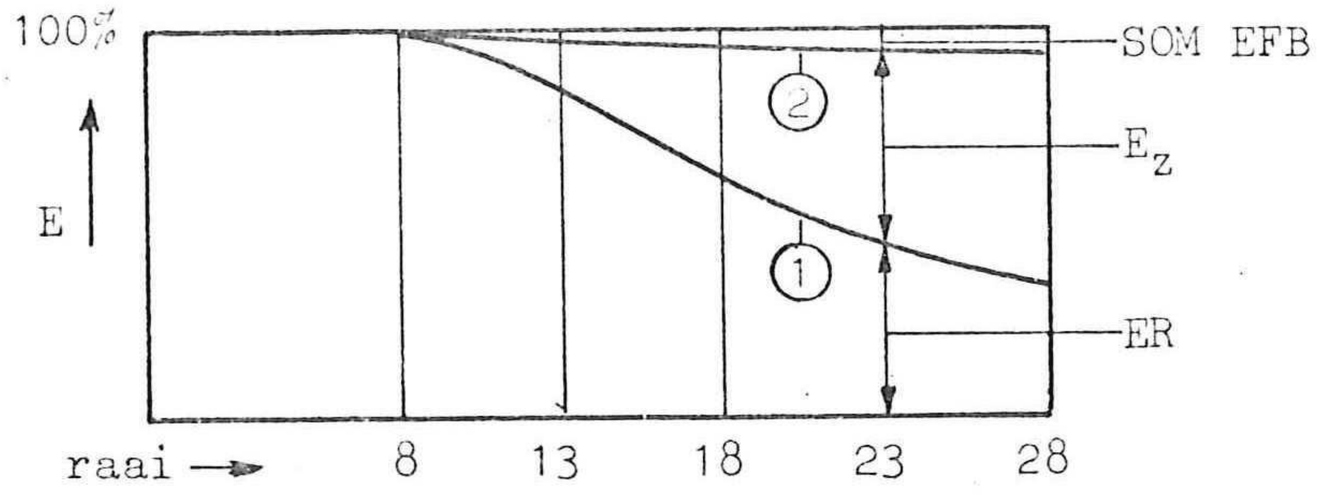
genomen en vermenigvuldigd met 5,00 m (de raai-afstand). Dit is in de formule voor $E_{fb}$ ingevoerd voor $H^2$. Het in het rekenprogramma gebruikte bodemwrijvingsenergieverlies tussen twee raaien over de breedte van de geul bedraagt:

$$EFB = E_{fb} * B * 5{,}00 \quad (W)$$

In alle meetsituaties werd het energietransport door raai 8 gelijk aan 100% gesteld en de andere energietransporten uitgedrukt in percentages van het energietransport door raai 8.
Op deze manier werden de meetresultaten dimensieloos gemaakt, zodat bewerkstelligd werd, dat ze van elke meetsituatie onderling vergeleken konden worden.

## VI-3. Resultaten.

Voor het bepalen en weergeven van het "zuivere" zijdelingse energieverlies werd als volgt te werk gegaan:
Uit de berekeningen volgt hoe groot het energietransport door elke raai is, dus het nog in de geul optredende energietransport. Tussen elke twee raaien is inmiddels energie verloren gegaan zowel door bodemwrijving als door zijdelings uittreden.




① gemeten energietransport door raaien

② energietransport door raaien als geen zijdelings energieverlies zou optreden

Kennelijk kan het zuivere zijdelingse energieverlies bepaald worden uit de verticale afstand tussen de lijnen ① en ②

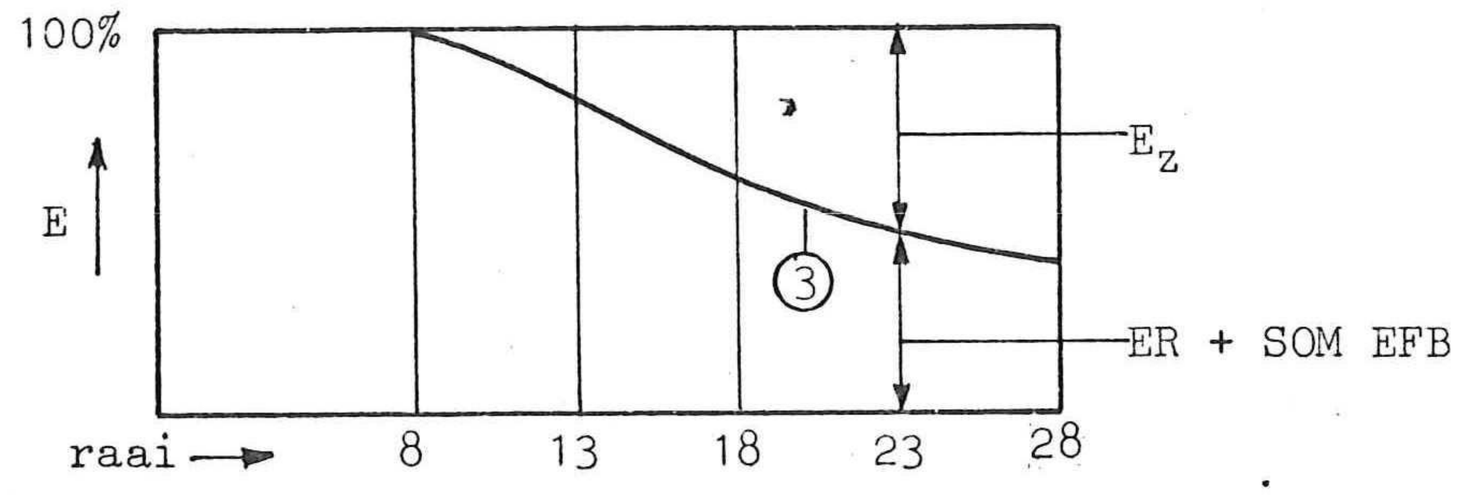
$$ER + E_z + EFB = 100\%$$

$$E_z = 100\% - (ER + EFB) \qquad (26)$$

Let op de analogie met vgl. (21).

De verschillende berekeningsresultaten zijn op bijlage 17 in tabelvorm weergegeven. Zie voor toelichting hiervan bijlage 16.

Vergelijking (26) kunnen we alsvolgt in een grafiekje weergeven:




De verticale afstand boven lijn ③ geeft het "zuivere" zijdelingse energieverlies $E_z$ weer, Toen de waarden hiervan op halflogarithmisch papier werden uitgezet (Bijlage 18), en wel zo, dat $E_z$ vanaf de 100% lijn naar beneden werd uitgezet, bleken krommen te ontstaan, die (soms met enige goede wil) rechte lijnen waren.

Op de achtergronden hiervan wordt in het volgende hoofdstuk dieper ingegaan.

In de tabellen op bijlage 17 zijn in kolom 4 de percentages van

kolom 3 onderling vergeleken. Hierop zijn de beschouwingen in het volgende hoofdstuk gebouwd. Door de waarden in kolom 3 hiervoor te nemen, werd niet het zuivere energietransport door een raai beschouwd, maar in feite werd voor het energietransport door een raai genomen: het zuivere energietransport vermeerderd met het energietransport "door de bodem".
Hierbij is van de gedachte uitgegaan, dat het zijdelingse energieverlies primair van belang was.
Dit werd dan vergeleken met het resterende energietransport. Hierdoor eventueel geïntroduceerde fouten liggen in de ordegrootte van het bodemwrijvingsenergieverliespercentage, dus 2 à 3%.

## VII INTERPRETATIE DER MEETRESULTATEN

Op bijlage 17 zijn voor alle meetsituaties de energietransport-percentages verzameld.
Per meetsituatie is nu het energietransport door een raai met dat door de voorgaande raai vergeleken. Wanneer bijv. door de raaien 13 t/m 28 respectievelijk 70%, 50%, 35% en 24% van $E_8$ gaat, dan is het energietransport door een bepaalde raai kennelijk steeds ca 70% van dat door de raai ervoor. Immers

$$0{,}7 \times 100 = 70$$
$$0{,}7 \times 70 = 49$$
$$0{,}7 \times 49 = 34$$
$$0{,}7 \times 34 = 24$$

Voor sommige meetsituaties was nogal wat fantasie nodig om een regelmaat van dergelijke aard te ontdekken. Voor de meetsituaties, waarbij $d_g = 0{,}35$ m, viel zij in de meeste gevallen duidelijk op.
Deze regelmaat nu geeft aanleiding tot het suggereren van de volgende veronderstelling:
Het zijdelingse energieverlies tussen twee raaien is steeds hetzelfde gedeelte van het energietransport door de voorliggende raai,
ofwel:
- Het zijdelingse energieverlies per m' geul is steeds hetzelfde gedeelte van het energietransport ter plaatse.

Dit kan als volgt in een formule uitgedrukt worden:

$$\frac{d}{dx}(E.c_{gr}) = -\alpha E.c_{gr} \qquad (26)$$

$c_{gr}$ wordt in de geul constant verondersteld.
Oplossing van de D.V. in formule (26):

$$\ln E = -\alpha x + \kappa$$
$$E = \kappa^* \cdot e^{-\alpha x} \qquad (27)$$

NB: $\kappa^*$ wordt ingevoerd, omdat $\alpha E.c_{gr}$ het energieverlies naar twee zijden is.

Beginvoorwaarde $x = 0 \rightarrow E = E_8 \rightarrow \kappa^* = E_8$

Vergelijking (27) wordt nu:

$$E_{x+8} = E_8.e^{-\alpha x}, \text{ waarin } x = 0,1,2,3,\ldots. \qquad (28)$$

Als een dergelijk verloop van $E_x$ logarithmisch wordt uitgezet,

ontstaat een rechte lijn. Uit de helling hiervan kan $\alpha$ grafisch bepaald worden.

Bepaling van $\alpha$ kan ook door berekening .

Voor raai r en raai r+5 geldt:

$$\frac{E_r - E_{r+5}}{E_r} = \frac{E_8 . e^{-\ r} - E_8 . e^{-\ (r+5)}}{E_8 . e^{-\ r}}$$

$$\Delta E = 1 - e^{-5\alpha} \qquad (29)$$

$\Delta E$ is dus het energieverlies over 5 m.

Op bijlage 17, kolom 5, staat $\Delta E$ in % van $E_r$.

Door het gemiddelde van de in elke kolom 5 vermelde waarden voor $\Delta E$ in te vullen, kan $\alpha$ voor elke meetsituatie berekend worden.

Opmerkingen:

1) Bij de meetsituaties "zonder schotten" heeft het golffront zich in het "aanloopstuk" van de geul zodanig aangepast, dat het ter plaatse van raai 8 niet of nauwelijks van vorm verandert. In de na raai 8 constant van vorm blijvende geul, houdt het golffront dezelfde gebogen vorm.

2) Bij de meetsituaties "met schotten" verandert het golffront na raai 8 (waar het nog recht is) van vorm. Na raai 13 blijkt het redelijk constant van vorm te blijven. Dit is vermoedelijk de reden, dat het energieverlies tussen raai 8 en raai 13 vaak nogal afwijkt van dat tussen de volgende raaien. Het lijkt daarom beter, om bij het bepalen van het gemiddelde energieverlies, de waarden, die gelden voor het gebied tussen raai 8 en 13 niet mee te nemen.

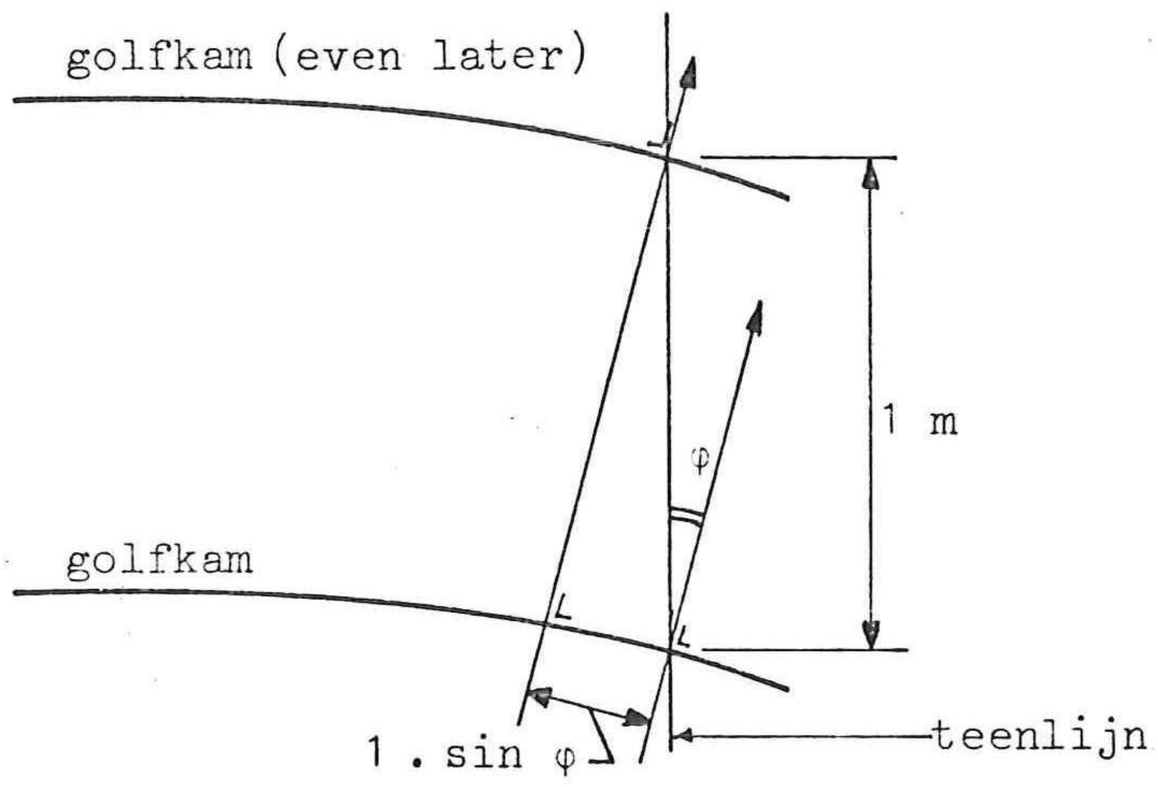
3) Voorts valt op, dat in de dit hoofdstuk genoemde beschouwingen beter opgaan voor de situaties met $d_g$ = 0,35 m, dan voor die bij $d_g$ = 0,275 m. (Zie de waarden in de kolommen 5 op bijlage 17).

Op bijlage 19 zijn voorbeelden van de berekening van $\alpha$ gegeven.

Verband tussen $\alpha$ en de kromming van het golffront

Het feit, dat per lengte-eenheid steeds een even groot gedeelte van de aanwezige energie zijdelings de geul verlaat, en het feit, dat de vorm van de kamlijn nagenoeg constant is, doen vermoeden dat er een verband is tussen de hoek, die de kamlijn boven de teen van het talud maakt met de teenlijn, en de hoeveelheid zijdelings uittredende energie.
In het volgende zal worden getracht een zodanig verband te vinden.

Ter vereenvoudiging wordt aangenomen, dat het deel van de golfkam, dat na 1 meter in de lengterichting van de geul de teenlijn overschrijdt, recht is, en dat ook de golfstralen, die dit deel begrenzen, recht zijn.




Het energie transport per m' kamlengte in de geul bedraagt:

$$\frac{c_{gr}.E}{4,50}$$

Het energietransport tussen de twee golfstralen (zie figuur) is dan:

$$\frac{c_{gr}.E \sin\varphi}{4,50}$$

Dit is de energie die per m' geullengte de geul verlaat per kant; voor twee kanten dus:

$$\frac{2\ c_{gr}.E \sin\varphi}{4,50} = d(E.c_{gr})$$

Dit ingevuld in vergelijking (26) geeft:

$$\frac{2\ c_{gr}.E \sin\varphi}{4,50} = \alpha\ .\ E.c_{gr} \qquad (30)$$

Hieruit volgt: $\sin \varphi = \alpha \cdot \frac{4,50}{2}$ (31)

Naar de voorbeelden op bijlage 19 wordt $\alpha$ berekend, waarna de waarde voor $\varphi$ bepaald kan worden.
Hieronder staan voor $\varphi$ enige waarden, berekend uit $\alpha$-waarden, die op het model van toepassing waren:

| $\alpha$ | $\sin \varphi$ | $\varphi$ |
|---|---|---|
| 0,06 | 0,135 | $7,8^{o}$ |
| 0,065 | 0,146 | $8,4^{o}$ |
| 0,07 | 0,158 | $9,0^{o}$ |
| 0,075 | 0,169 | $9,7^{o}$ |
| 0,08 | 0,180 | $10,2^{o}$ |
| 0,085 | 0,191 | $11,0^{o}$ |

De hoeken $\varphi^{*}$, geconstrueerd naar aanleiding van de fasemetingen, bleken doorgaans echter ongeveer $15^{o}$ te zijn.
Een verklaring voor deze afwijking is de volgende:
Voor het linkerlid van vergelijking (30) is aangenomen, dat de energiestroomdichtheid per m' kamlengte over de gehele geulbreedte even groot is. De golfhoogte boven de teenlijnen is echter geringer dan in het midden van de geul. Daarom is de werkelijke energiestroom door een stukje kamlijn boven de teenlijn kleiner dan op grond van de gemiddelde energiestroomdichtheid werd aangenomen.
Stel nu, dat de energiestroom door het stukje $\sin \varphi^{*}$ een factor p ( $< 1$) is van de gemiddelde energiestroom:

$$\frac{2p\ c_{gr}.E.\sin \varphi^{*}}{4,50} = \alpha E\ c_{gr}$$

$$\sin \varphi^{*} = \frac{1}{p}\ \alpha\ \frac{4,50}{2} \qquad (31a)$$

en

$$p = \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi^{*}}$$

Voorts geldt:

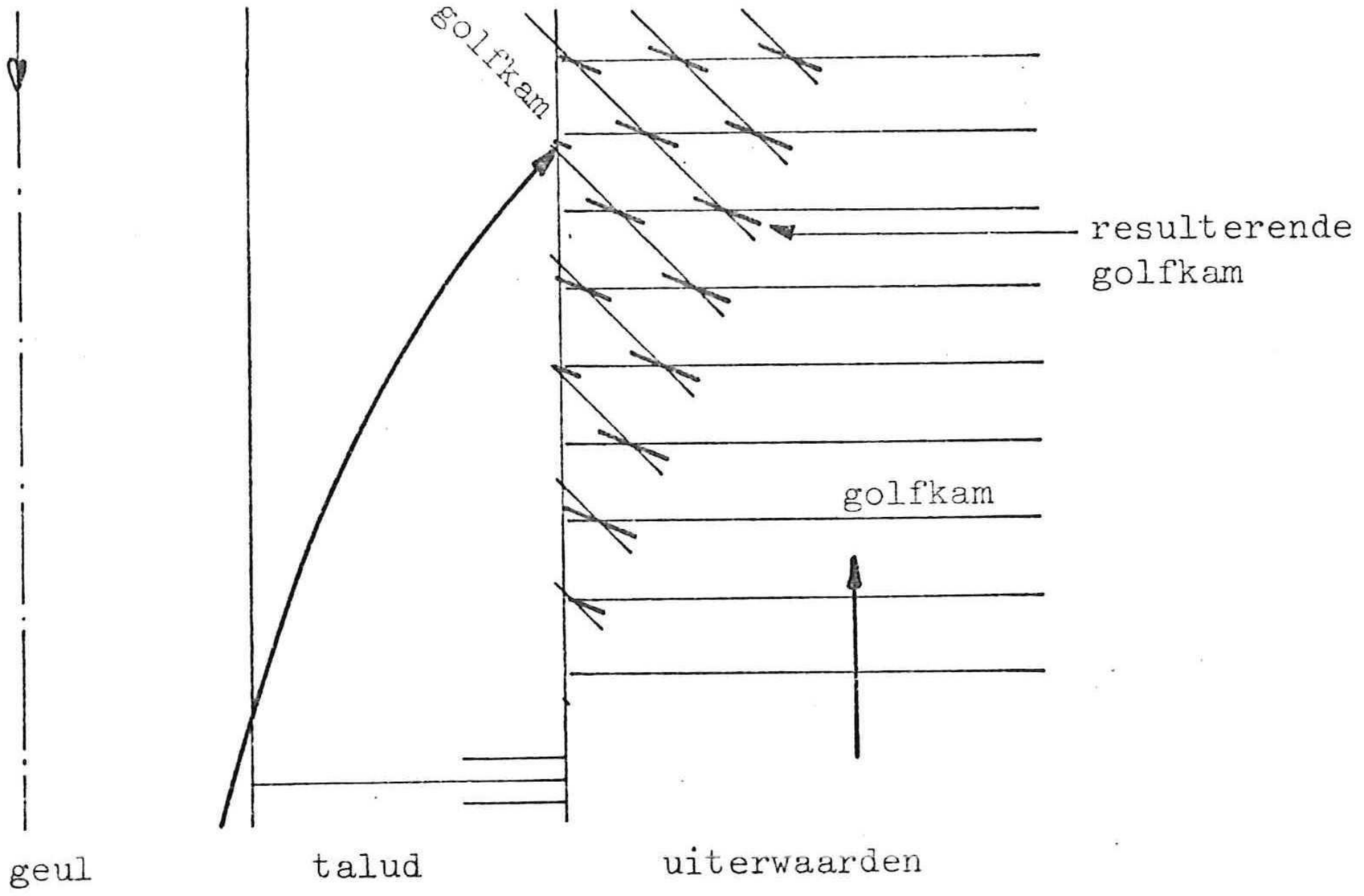
$$p = \frac{\text{energiestroom door stukje } \sin \varphi^{*}}{\text{gemiddelde energiestroom}} = \frac{H^{2}_{\text{teenlijn}}}{H^{2}_{\text{gem.}}}$$

Dus:

$$\frac{H^{2}_{\text{teenlijn}}}{H^{2}_{\text{gem.}}} = \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi^{*}} \qquad (31b)$$

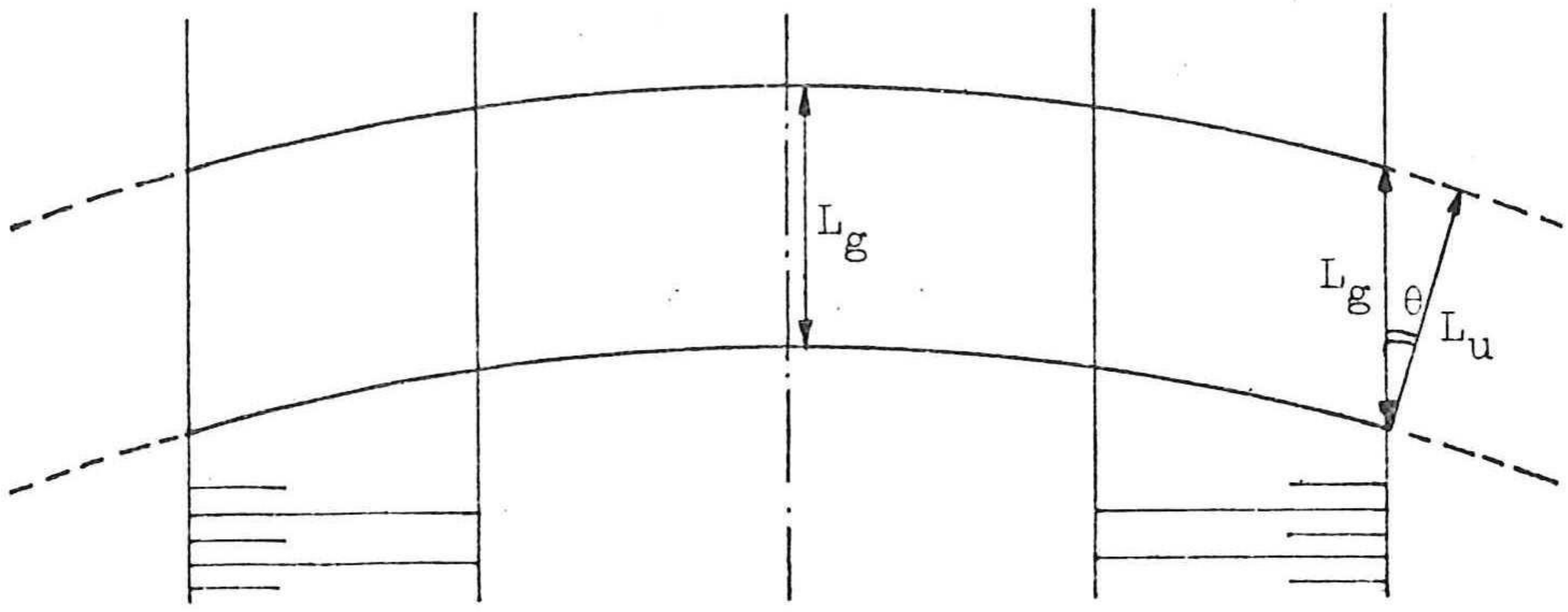
Dit blijkt in veel meetsituaties redelijk te kloppen.

Hoek tussen golfstraal en kruinlijn.




Interferentie tussen golven, die uit het golfschot rechtdoor de uiterwaarden oplopen, en golven, die vanuit de geul de uiterwaarden opkomen.

De resulterende golven op de uiterwaarden zijn in beginsel kortkammig, waarbij de visueel waargenomen kammen een hoek maken, die de hoek tussen de kruisende golven doormidden deelt. De hoek van de resulterende golven kan uit de waarnemingen opgemeten worden, zodat ook de hoek bepaald kan worden, waaronder de uit de geul tredende golven de kruin overschrijden.
Met behulp van de methode Tjallema [5] zijn golfstralen geconstrueerd, die onder een hoek van ca. $40^{o}$ (afhankelijk van d en T) de kruinlijn bleken te passeren. De constructie van golfstralen volgens de methode Tjallema loopt in dit geval echter stuk op het feit, dat vooralsnog onbekend is, onder welke hoek met de teenlijn de te construeren golfstraal moet beginnen.
Een andere methode ter bepaling van de hoek tussen golfstraal en kruinlijn kan wellicht gebaseerd worden op de relatie tussen de golflengte op de uiterwaarden en die in de geul. Als verondersteld wordt, dat het golffront "evenwijdig opschuift", is de afstand in de lengterichting van de geul tussen twee golfkammen over de gehele beschouwde breedte dezelfde.




De hoek met de kruinlijn kan bepaald worden uit:

$$\cos \theta = \frac{L_u}{L_g}$$

Ook uit deze overweging kwam naar voren, dat de bedoelde hoek ca. $40^o$ was.
De resulterende hoek van de golfkam met de y-as is inderdaad ruwweg $20^o$.
Als aangenomen wordt, dat het energietransport plaatsvindt in de richting van de golfstraal, zal de energie de kruinlijn onder een hoek van $40^o$ overschrijden.
Op dezelfde wijze als de berekening van het verband tussen de kromming van het golffront en de grootte van het energietransport over de teenlijn, kan een berekening met betrekking tot het energietransport over de kruinlijn opgezet worden.

Bovenstaande beschouwing moet gezien worden als een kleine toevoeging aan diepgaander wiskundige berekeningen ter bepaling van de vorm van de golfkamlijn.

## VIII. THEORETISCHE BESCHOUWINGEN

In de gebruikelijke refractietheorieën wordt het golfgetal k afhankelijk gesteld van d en T, waarbij verder geldt, dat bij diep water, als $d > \frac{1}{2}L_o$, alleen T nog de bepalende factor is.
Een algemene uitdrukking voor een sinusvormige golf is:

$$\Phi = A(x,y,z)\ \cos\{\ \omega t - \psi(x,y,z)\} \qquad (32)$$

waarin $\psi$ de informatie bevat over de fase, waarin de lopende golf zich bevindt, op een afstand van een bepaald vergelijkingspunt.
In een meebewegend assenstelsel is de term $\omega t - \psi$ constant en de afgeleide naar t dus nul.

$$d(\omega t - \psi) = 0$$
$$\omega\ dt - d\psi = 0 \qquad (33)$$

De verandering langs een golfstraal kan als $\frac{d\psi}{ds}$ geschreven worden of ook wel als de gradient $\nabla\psi$.
Vergelijking (33) gaat dan over in

$$\omega = \nabla\psi.\frac{ds}{dt} \quad (\text{nl.: } |\nabla\psi|.\left|\frac{ds}{dt}\right|\cos 0^o\ )$$
$$\omega = \nabla\psi.c \qquad (34)$$

$\psi$ is een functie van x, y en z. Doorgaans is de afhankelijkheid in de z-richting te verwaarlozen bij een hellende bodem, flauwer dan ca. 1 : 10 (zie [7])
Bovendien geldt voor $\nabla\psi$, dat deze raakt aan de golfstraal.
Uit de literatuur [2] en [10] is bekend de zg. gecombineerde refractie-diffractie-vergelijking:

$$\nabla_j(cc_{gr}\ \nabla_j\zeta\ ) + k^2.cc_{gr}.\ \zeta = 0 \qquad (35)$$

en hieruit:

$$\frac{1}{cc_{gr}}\ \nabla_j(cc_{gr}\ \nabla_j a) + a(k^2 - |\nabla\psi|^2) = 0 \qquad (36)$$

Vergelijking (35) geldt voor een zodanig flauwe helling, dat de bodemverhoging per golflengte te verwaarlozen is.
Bij een sinusvormige langkammige cylindrische golf boven een vlakke bodem zijn $cc_{gr}$ en a constant; dan gaat (36) over in:

$$a(k^2 - |\nabla\psi|^2) = 0$$

Dus: $$k^2 = |\nabla\psi\ |^2 \qquad (37)$$

In de gebruikelijke refractietheorieën wordt er van uitgegaan, dat bij een hellende bodem de reflecties zo gering zijn, dat hierdoor

ter plaatse het golfpatroon niet verstoord wordt en het zelfde is als het golfpatroon boven een vlakke bodem, zodat vergelijking (37) blijft gelden.

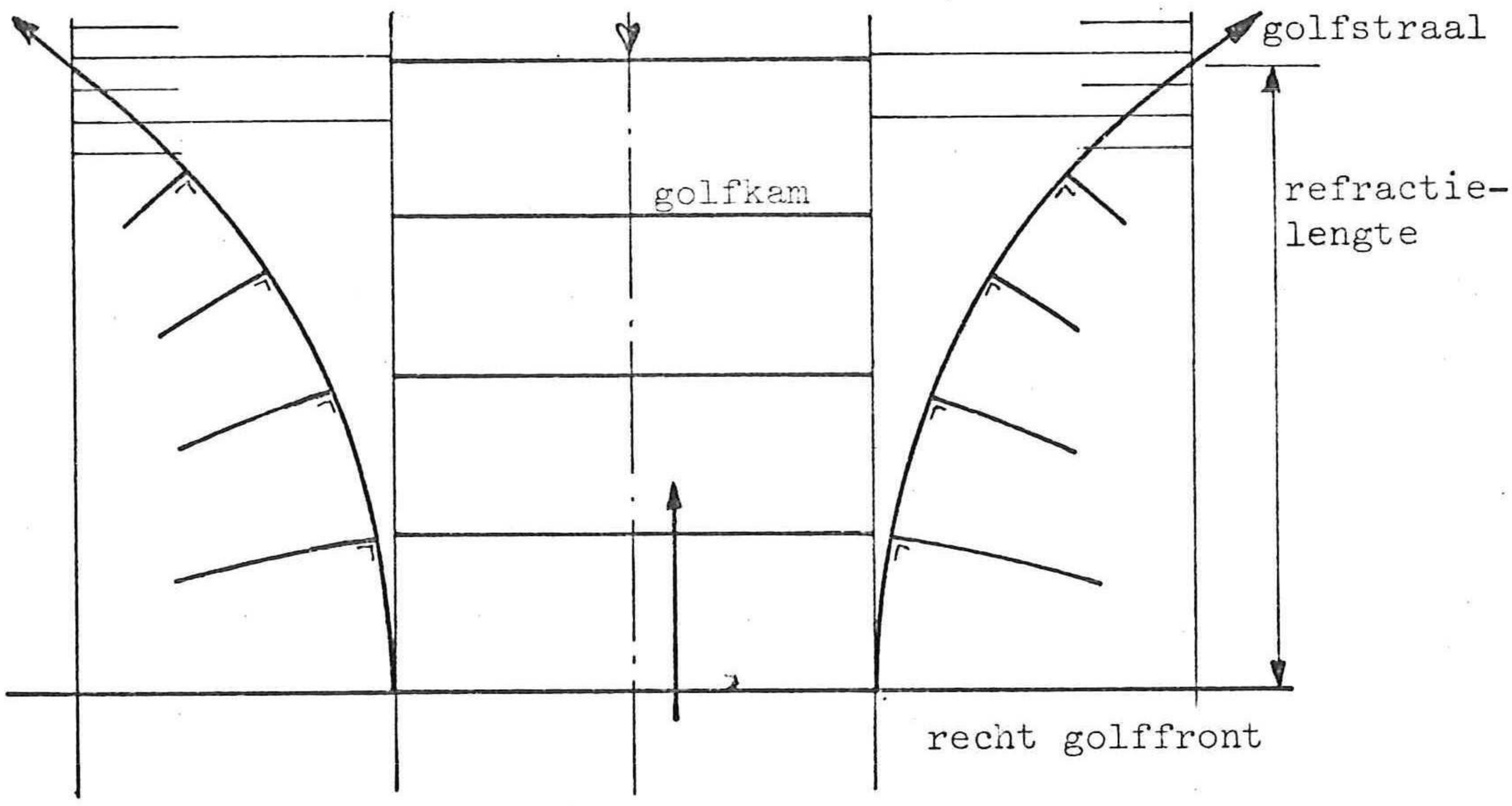
Dan kan bewezen worden, dat er golfstralen bestaan, waaraan de vector $\nabla\psi$ in elk punt raakt. De kromming van deze stralen is gelijk aan $\frac{1}{k}.\frac{\partial k}{\partial n}$

(Als de dieptelijnen evenwijdig zijn en met de y-richting samenvallen, dan is $\psi$ alleen in x-richting variabel: $k = \frac{\partial \psi}{\partial x} \longrightarrow \psi = kx$. )

Bij een vlakke bodem is k constant en de kromming nul, hetgeen wil zeggen, dat de golfstralen rechte lijnen zijn en het golffront dus ook.

Op een talud, waar k met de diepte varieert, is er een voortdurende verandering en ontstaan kromme lijnen en een gebogen golffront.

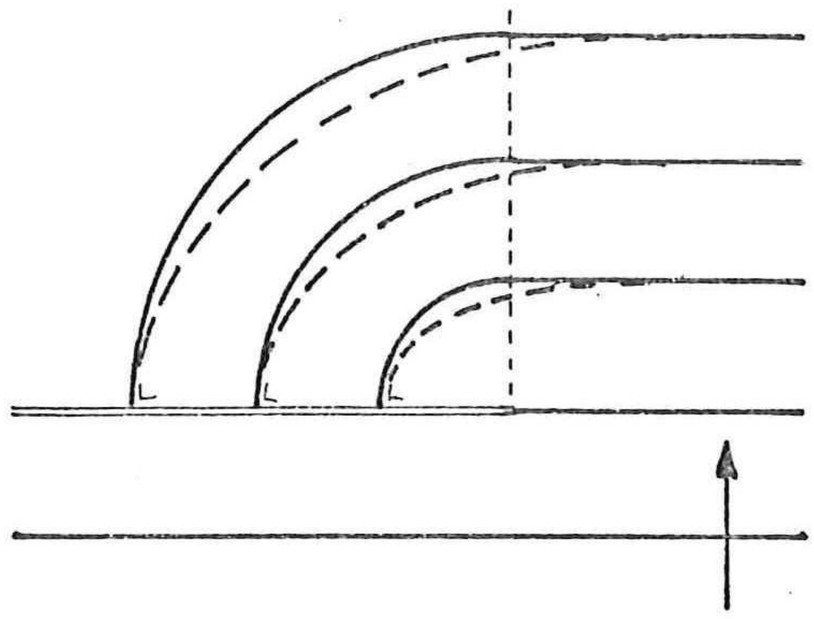
Dit geprojecteerd op de onderhavige geul levert het volgende beeld:




Volgens Battjes [7] kan aangenomen worden, dat het energietransport alleen langs de golfstralen plaatsvindt. Dan ontstaat een wel zeer onwaarschijnlijke situatie, namelijk dat na één refractielengte volledig stil water op het talud is ontstaan. (Het gezonde verstand en de waarnemingen zeggen, dat dit niet kan.)

Een analoge situatie doet zich voor bij diffractie rond een verticale ondoorlatende halfoneindige golfbreker.

Als de diepte in de omgeving overal even groot is, zijn de golfstralen recht en ontstaan vanuit de kop van de golfbreker cirkelvormige golfkammen. Daar geldt namelijk $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ volgens zuivere-refractie-theorie.



De eerste gedachte zou zijn, dat er toch energie langs de golfkammen wordt getransporteerd, maar aangezien dat niet gebeurt, moet het golffront in het ongestoorde deel bij het schaduwgebied gekromd gaan worden en kan het op deze wijze het schaduwgebied met een hoeveelheid energie injecteren (stippellijnvorm in figuur).
In geval van diffractie wordt er van constante diepte uitgegaan, zodat c en $c_{gr}$ ook constant zijn bij bepaalde T.
Helmholtz heeft hiervoor afgeleid:

$$\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\zeta}{\partial y^2} + k^2\zeta = 0 \qquad (38)$$

Met behulp van de vergelijking van Schönfeld (35) krijgen we hetzelfde resultaat, als we daarin $cc_{gr}$ constant aannemen.
Bij aanwezigheid van een talud in het schaduwgebied worden de gediffracteerde golven bovendien gerefracteerd.
Dit nu heeft ook betrekking op een geul: het optreden van diffractie èn refractie.
Nu wordt nog eens de Schönfeld-vergelijking beschouwd:

$$\frac{1}{cc_{gr}} \nabla_j(cc_{gr} \nabla_j a) + a(k^2 - |\nabla\psi|^2) = 0 \qquad (36)$$

Hierin vertegenwoordigt de eerste term het diffractie-effect en de rest het refractie-effect.
De variaties in $\nabla\psi$ worden bepaald door de variaties in k (als de diepte d varieert. De variaties van de amplitude leveren een aanvullende correctie.
Met behulp van deze vergelijking kan aangetoond worden, dat ook boven een vlakke bodem een gebogen golffront kan ontstaan, mits de diffractie-term in rekening gebracht wordt.

Door fasemetingen in de raai om de 0,50 m (zie hoofdstuk VI - 1) is het mogelijk het golffront in de geul te construeren. Bij raai 8 is het nog recht. Vervolgens buigt de golfkam boven de taluds af naar buiten en gaat interfereren met die op de uiterwaarden. Het golffront wordt,vanaf de teenlijn geulwaarts bekeken, ronder van vorm en na enkele golflengten ontstaat een vrij constante kamvorm, met een constant blijvende hoek boven de teenlijnen.

In het volgende zal, in strijd met het in hoofdstuk V - 1 gestelde, uit symmetrie-overwegingen de x-as in de hartlijn van de geul gelegd worden, zulks ter vereenvoudiging van de wiskundige beschouwingen. Op het practisch resultaat heeft dit uiteraard geen invloed.
In [2] en [10] wordt de reeds besproken gecombineerde refractie-diffractie-vergelijking van Schönfeld afgeleid. Deze luidt:

$$\nabla_j(cc_{gr}\,\nabla_j\zeta) + k^2 cc_{gr}\,\zeta = 0 \qquad (35)$$

Hierin geeft $\zeta$ de uitwijking van het wateroppervlak ten opzichte van de ruststand weer. ( $\eta = \mathrm{Re}\{\zeta . e^{i\omega t}\}$ ). (39)
Voorwaarden voor de mogelijkheid de vergelijking te gebruiken:

- oscillerende golven; dit zijn golven, waarvan het oppervlak zich aan beide zijden van het fictieve wateroppervlak bevindt (dus bijvoorbeeld niet de eenlinggolf, die als het ware alleen maar "boven water uitsteekt".)
- flauwe bodemhellingen (weinig diepteverandering per golflengte).

De vergelijking biedt verder de mogelijkheid, het effect van de amplitude op de fasesnelheid te bestuderen.
In het model is $cc_{gr}$ een functie van y alleen, want de diepte varieert niet in de x-richting.
Voor het oplossen van de vergelijking wordt de methode van scheiding der variabelen aanbevolen.
Stel: $\zeta = f(y).g(x)$, kortweg: f.g (40)

$$\nabla_j\{\, cc_{gr}\,\nabla_j(\, f.g\,)\} + k^2 cc_{gr}.f.g. = 0 \qquad (41)$$

$$cc_{gr}.f.\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + g\,\frac{\partial}{\partial y}(cc_{gr}\,\frac{\partial f}{\partial y}) + k^2.cc_{gr}.f.g = 0 \qquad (42)$$

Scheiding van variabelen:

$$\frac{1}{cc_{gr}.f}.\frac{\partial}{\partial y}(cc_{gr}.\frac{\partial f}{\partial y}) + k^2 = -\frac{1}{g}\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} \qquad (43)$$

De termen van het linkerlid zijn slechts van y afhankelijk, die van het rechterlid slechts van x.
Gelijkheid is alleen mogelijk als beide leden constant zijn. Deze constante wordt $1^2$ genoemd en kan complex zijn.

$$-\frac{1}{g}.\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = 1^2 \qquad (44)$$

Hieruit volgt:

$$g = C_1.e^{+i1x} + C_2.e^{-i1x} \qquad (45)$$

Vergelijking (43) gaat nu over in

$$\frac{\partial}{\partial y}(cc_{gr}\frac{\partial f}{\partial y}) + cc_{gr}.f.(k^2-1^2) = 0 \qquad (46)$$

Voor de functies f(y) en g(x) kunnen we substitueren:

$$f(y) = a.\ e^{-i\psi^*(y)} \qquad (47a)$$

waarbij $\psi(x,y) = \psi^*(y) + i1x$

$$g(x) = e^{\pm i1x} = e^{-1_2 x}.e^{-i1_1 x} \qquad (47b)$$

In deze substituties is

$a = a(y)$

$\psi^*$= fasefunctie in y-richting

$1 = 1_1 - i1_2$

Van de mogelijkheden $\pm i1x$ is $-i1x$ genomen, omdat uit de meetresultaten het negatief exponentiele karakter blijkt.
Een algemene uitdrukking voor de amplitude wordt nu

$$A = a(y).e^{-\ 1_2 x} \qquad (48)$$

Hierin komt tot uitdrukking, dat de amplitude negatief exponentieel afneemt in de x-richting en zich in de y-richting vooralsnog onbekend gedraagt.
Voorts kan over vergelijking (47b) nog opgemerkt worden, dat de factor $e^{-i1_1 x}$ de fase van de golven beschrijft.
De meetresultaten suggereren, dat de vorm van het golffront niet verandert. Dit kan aannemelijk gemaakt worden, door de golfkamlijnen op elkaar af te beelden. Ze verschillen dan slechts een factor $e^{-i1_1 x}$ voor een bepaalde waarde van y.

Voor het beschrijven van het oppervlak van het water (en dus de vorm van de golfkamlijn in het bestudeerde model) moet de vergelijking van Schönfeld opgelost worden (vgl. (35)).
Dit kan numeriek gebeuren, waarbij de afstand tussen de hartlijn van de geul en de kruinlijn in stukjes verdeeld wordt, op de grenzen waarvan geldt, dat de toestand in een vakje de randvoorwaarde is voor die in het volgende vakje.
Als randvoorwaarde op de hartlijn geldt op grond van symmetrie-overwegingen

$$\frac{\partial f}{\partial y} = 0 \rightarrow \quad \frac{\partial \psi^{*}(y)}{\partial y} = 0$$

Op de kruinlijn moet de fasefunctie $\psi$ bekeken worden. De gradient ervan is een indicatie voor de looprichting van de golven. De randvoorwaarde is dan, dat het karakter van $\psi$ moet aangeven, dat de golven over de kruin weglopen en niet terugkomen.
Bij het discretiseren voor de numerieke oplossing komen verschillende problemen naar voren:

1) Het bepalen van a(y).
   Vermoedelijk kan deze bepaald worden door er een kromme voor te nemen, die voortkomt uit de meetresultaten. Deze kromme moet dan aan de hand van de resultaten van het rekenproces gecorrigeerd worden (iteratief).
2) De grootte van 1.
   Deze is niet gemakkelijk uit de invallende golf te bepalen.
   De grootte van $1_2$ kan wellicht vergeleken worden met de coëfficient $\alpha$ uit hoofdstuk VII.

Het oplossen van (35) komt door het verdelen in vakjes in het gebied van de eindige-elementen-methode te liggen.
Het komt er op neer een aantal vergelijkingen op te lossen, die in een matrix gevat kunnen worden, waarvan de determinant nul moet zijn.
Het oplossen van a en $1^2$ komt hierdoor in de sfeer van een zg. "eigenwaarde-probleem".

## IX. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

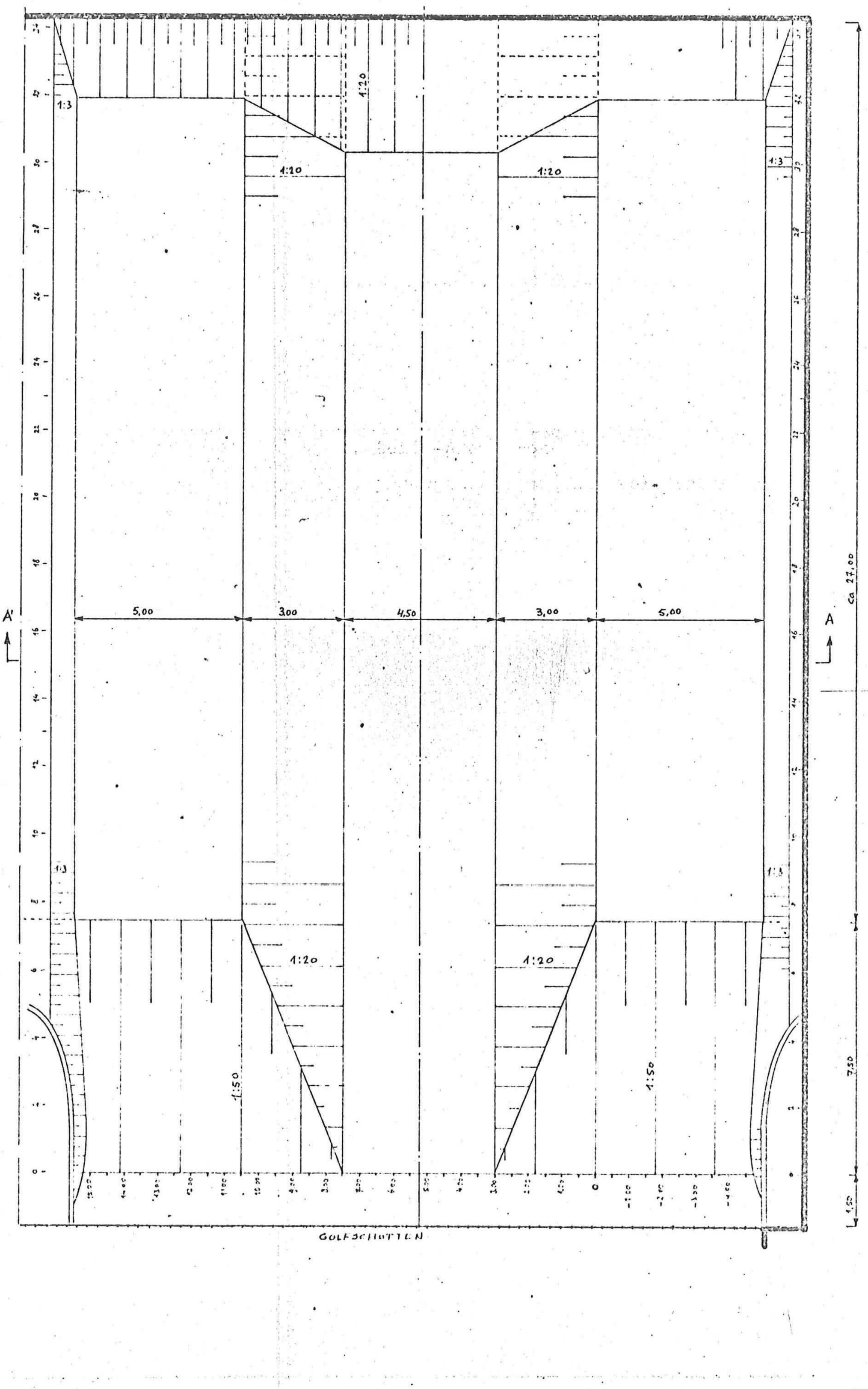
Uit de metingen blijkt, dat het zijdelingse energieverlies negatief exponentieel over de lengte van de geul afneemt. Dit betekent, dat per lengte-eenheid een even groot gedeelte van de ter plaatse aanwezige energiestroom zijdelings wegvloeit.
De afstand in de richting van de geul, die een golfstraal nodig heeft om vanaf de teenlijn de kruinlijn te kruisen, wordt hier refractielengte genoemd. (Zie figuur op blz. 36). Deze lengte is voor kortere golven groter, de divergentie van de golfstralen is geringer en het golffront is minder gebogen dan bij relatief lange golven. Bij golven met een relatief korte periode (relatief grote verhouding d/L), is het zijdelingse energieverlies kleiner dan bij golven, waarbij d/L groter is.
De invloed van het talud op de golven boven de geulbodem is afhankelijk van de divergentie, en dus van de taludhelling.

Voor een theoretische benadering van de hier optredende verschijnselen schiet de refractietheorie tekort. Hiermee wordt immers niet het krommen van golfstralen bij constant blijvende diepte gevat. Het is nodig ook de diffractie erbij te betrekken.

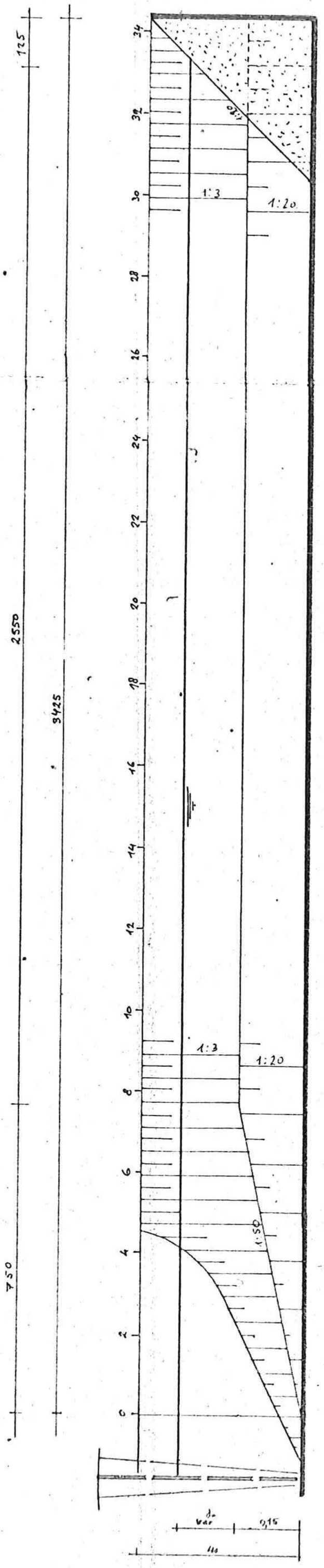
Uiteraard ligt in de resultaten van deze proef geen exacte oplossing van het gestelde probleem. De conclusies mogen slechts gezien worden als aanwijzing in welke richting gezocht moet worden. Voor een nauwkeurige beschrijving van het probleem zal dieper ingegaan moeten worden op de theoretische achtergronden ervan. De in deze materie geïnteresseerde wordt aanbevolen, zeker kennis te nemen van wat de heren Hart, Booy, Battjes en Berkhoff gepubliceerd hebben (met name resp. [1], [2], [7] en [10]).

Bijlage 1a

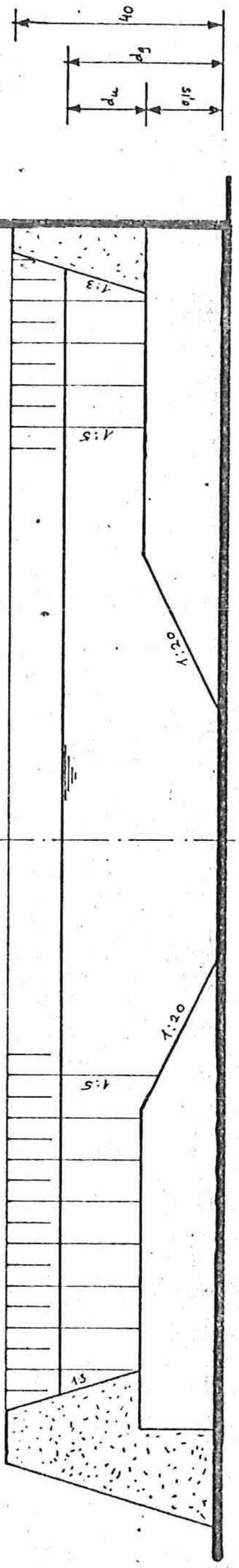
# VORM MODEL: Plattegrond



# VORM MODEL: Doorsneden

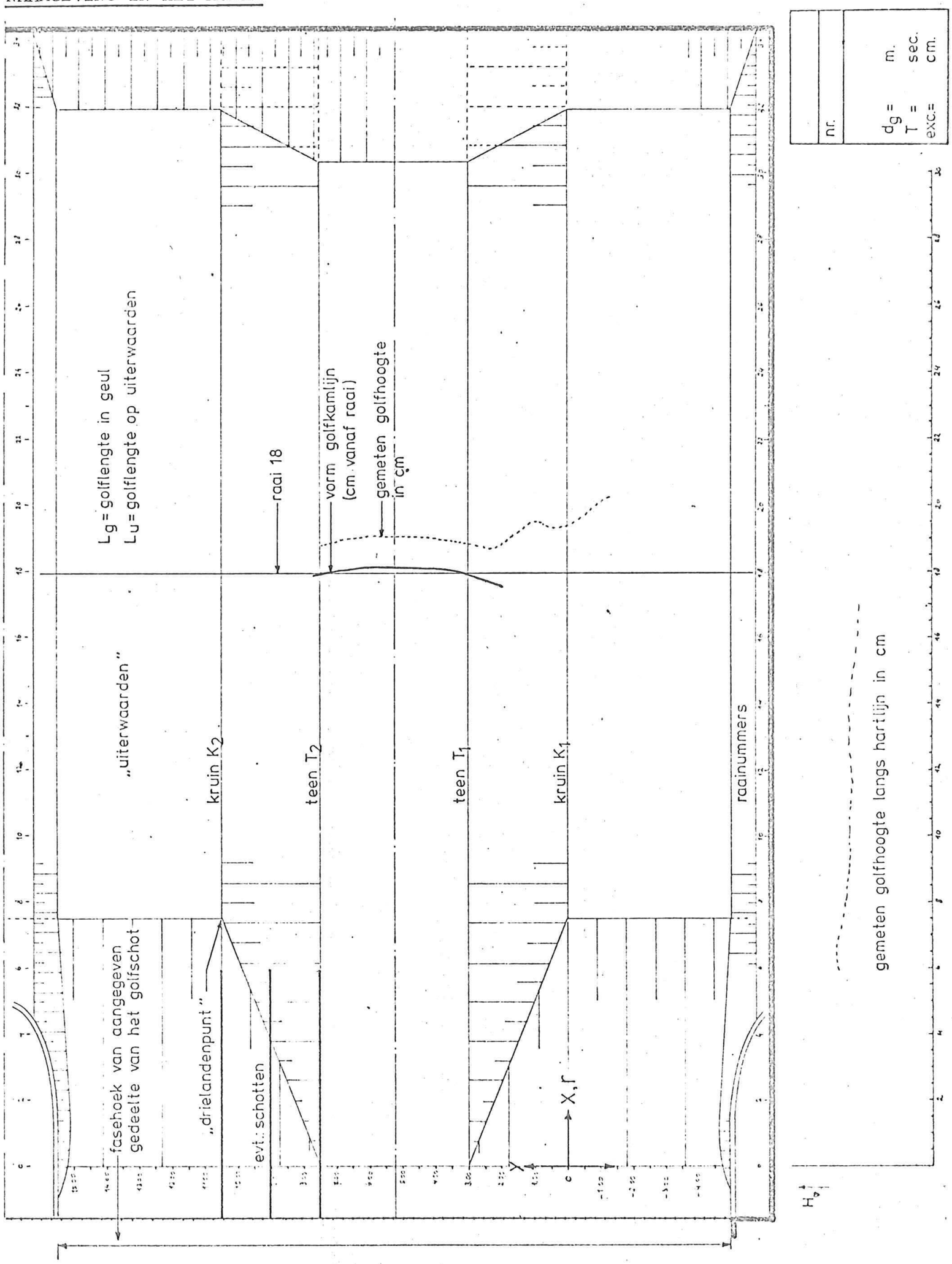



LANGSDOORSNEDE over de hartlijn




DOORSNEDE A-A'

NAAMGEVING IN HET MODEL



## INSTELLING GOLFSCHOT: Uitwijkingen.

Met behulp van vergelijkingen (12) en (18) en $l_{AB}$ = 0,60 m:

$$S_B = S_A \frac{\frac{d}{0,60}}{\cosh kd + \frac{d}{0,60} - 1} = \alpha S_A$$

De waarden van $\alpha$ voor de verschillende gevallen staan vermeld in onderstaande tabel.

De te verwachten golfhoogte H kan als volgt berekend worden:
Uit vergelijkingen (16) en (18) en a = $\frac{1}{2}$ H volgt:

$$H = S_B \cdot \frac{\omega^2}{gk} \cosh kd$$

Hieruit en uit (2) volgt:

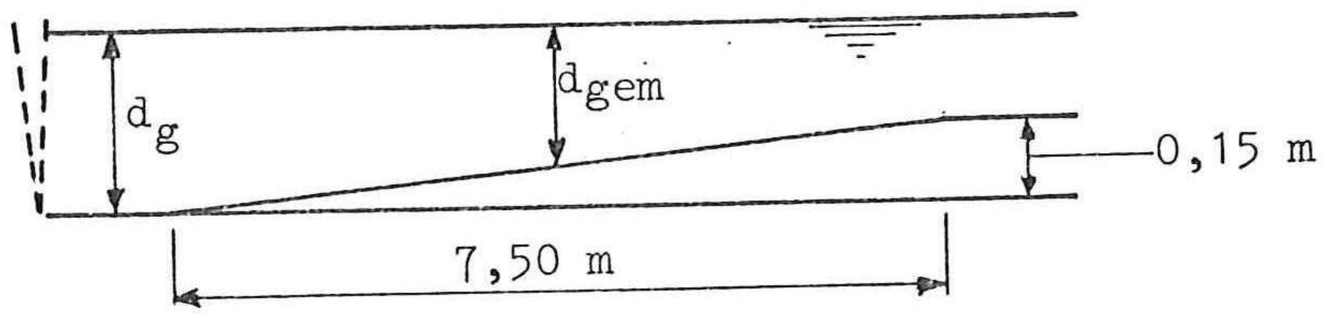
$$H = S_B \cdot \sinh kd$$

| $d_g$ (m) | T (sec) | $L_o$ (m) | $d/L_o$ | cosh kd | $\alpha$ | $S_B$ (cm) | | sinh kd | H (cm) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | (1) | (2) | | (1) | (2) |
| 0,35 | 2,2 | 7,57 | 0,0462 | 1,1639 | 0,780 | | 6,1 | 0,5924 | | 3,6 |
| | 1,62 | 4,09 | 0,0857 | 1,3431 | 0,628 | | 4,9 | 0,8974 | | 4,4 |
| | 1,4 | 3,05 | 0,1145 | 1,5015 | 0,539 | | 4,1 | 1,1210 | | 4,6 |
| | 1,2 | 2,25 | 0,1560 | 1,7850 | 0,427 | | 3,3 | 1,4790 | | 5,0 |
| 0,275 | 2,2 | 7,57 | 0,0363 | 1,1260 | 0,785 | 4,1 | 6,0 | 0,5170 | 2,1 | 3,1 |
| | 1,62 | 4,09 | 0,0672 | 1,2537 | 0,643 | 3,3 | 4,9 | 0,7561 | 2,5 | 3,7 |
| | 1,4 | 3,05 | 0,0902 | 1,3653 | 0,556 | 2,9 | 4,2 | 0,9295 | 2,7 | 3,9 |
| | 1,2 | 2,25 | 0,1222 | 1,5579 | 0,458 | 2,4 | 3,5 | 1,1820 | 2,8 | 4,1 |

Voor $S_B$ en H: kolom (1): exc. = 1,3 cm → $S_A$ = 5,2 cm
kolom (2): exc. = 1,9 cm → $S_A$ = 7,6 cm

INSTELLING GOLFSCHOT: Faseverschillen.

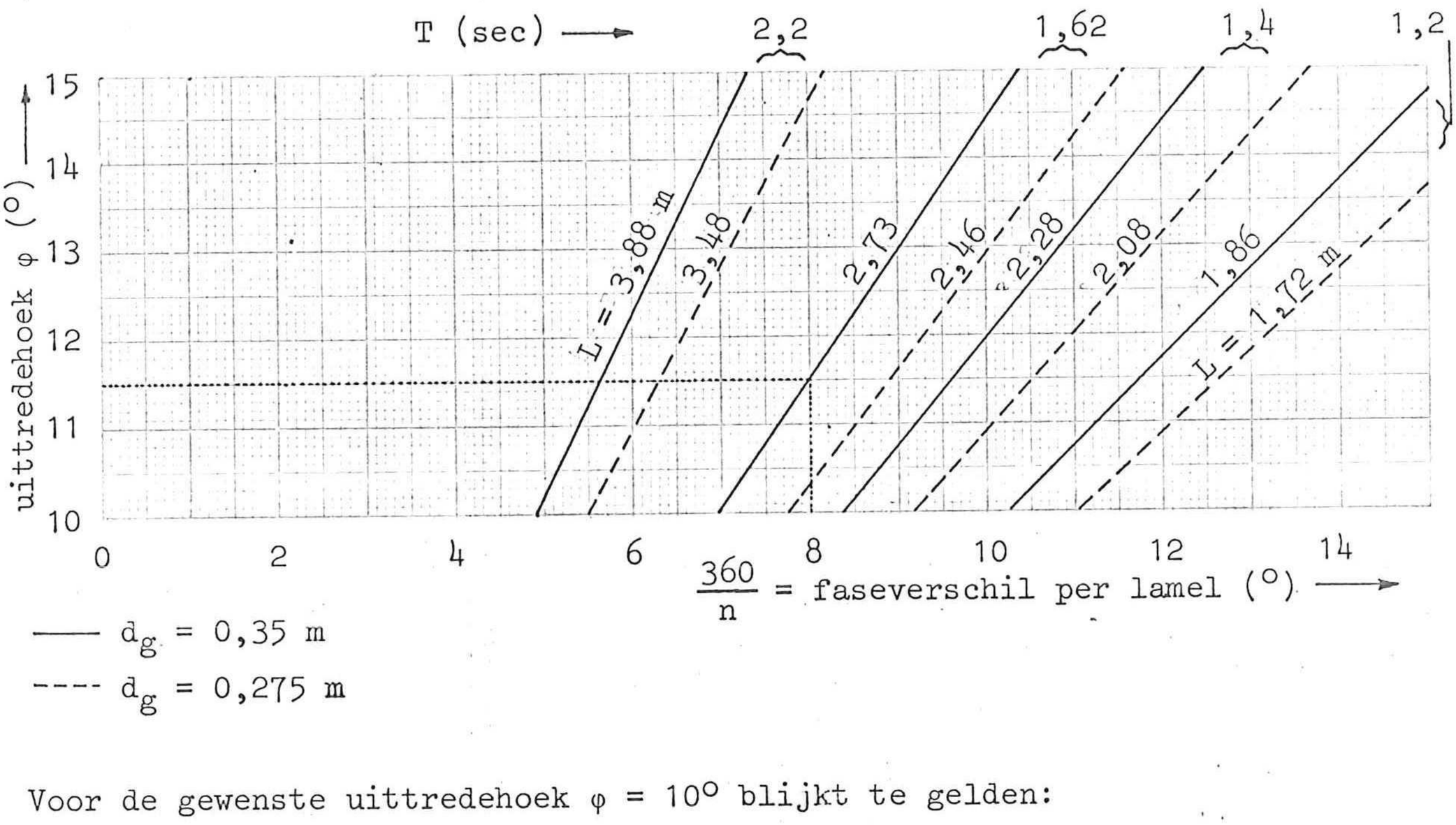
In onderstaande tabel is het faseverschil tussen de geul- en uiterwaard-secties van het golfschot weergegeven.




| $d_g$ (m) | $d_{gem}$ (m) | T (sec) | d/L | $L_{gem}$ (m) | $\frac{7,50}{L_{gem}}$ T | $L_g$ (m) | $\frac{7,50}{L_g}$ T | T | fase-verschil |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,35 | 0,275 | 2,2 | 0,0790 | 3,34 | 2,25 T | 3,88 | 1,94 T | 0,3 T | 120° |
| | | 1,62 | 0,1111 | 2,47 | 3,04 T | 2,74 | 2,74 T | 0,3 T | 120° |
| | | 1,4 | 0,1322 | 2,08 | 3,60 T | 2,28 | 3,30 T | 0,3 T | 120° |
| | | 1,2 | 0,1590 | 1,73 | 4,30 T | 1,87 | 4,00 T | 0,3 T | 120° |
| 0,275 | 0,20 | 2,2 | | 3,00 | 2,50 T | 3,48 | 2,15 T | 0,35T | 126° |
| | | 1,89 | | 2,54 | 2,96 T | 2,96 | 2,52 T | 0,44T | 159° |
| | | 1,62 | | 2,16 | 3,47 T | 2,47 | 3,04 T | 0,43T | 155° |
| | | 1,4 | | 1,82 | 4,13 T | 2,08 | 3,60 T | 0,53T | 191° |
| | | 1,2 | | 1,53 | 4,90 T | 1,78 | 4,22 T | 0,68T | 245° |
| | | 1,03 | | 1,26 | 5,94 T | 1,42 | 5,28 T | 0,66T | 238° |

INSTELLING GOLFSCHOT: Beredenering voor "schuin golffront"

Diagram voor: $\frac{360^\circ}{n} = \frac{0{,}305 \cdot 360 \cdot \sin \varphi}{L}$




—— $d_g$ = 0,35 m

---- $d_g$ = 0,275 m

Voor de gewenste uittredehoek $\varphi = 10^\circ$ blijkt te gelden:

faseverschil per lamel bij - grootste L : ca. $5^\circ$
- kleinste L : ca. $11^\circ$ } gemiddeld: $8^\circ$

Gemiddelde waarde van grootste en kleinste L : $\frac{3{,}88 + 1{,}72}{2} = 2{,}80$ m;

dichtstbijliggende mogelijke golflengte:

L = 2,73 m ( $d_g$ = 0,35 m , T = 1,62 sec)

Berekende uittredehoek voor deze meetsituatie: $11{,}5^\circ$

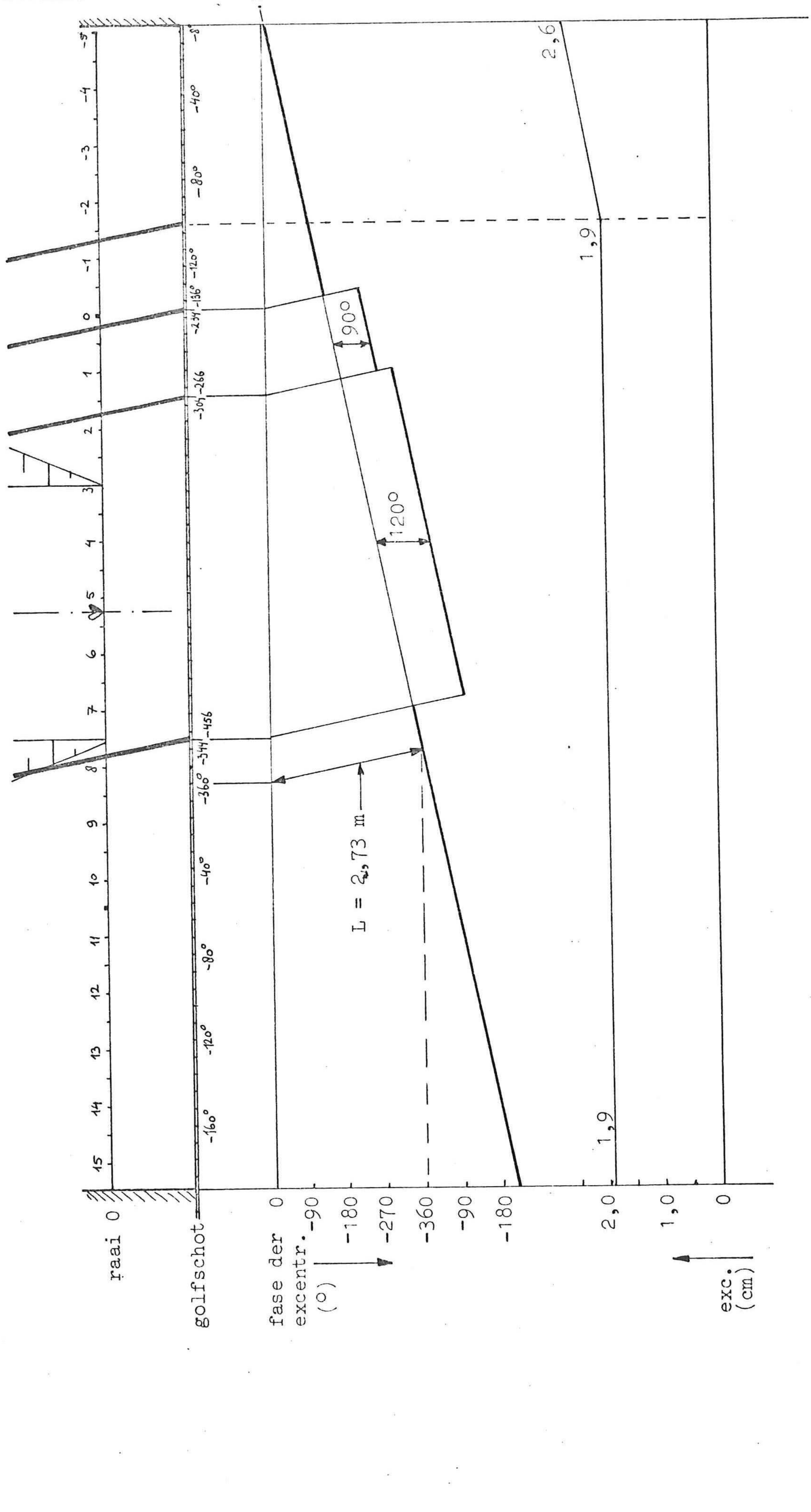
Opmerking: Bij het construeren van bovenstaand diagram, bleek dat zelfs voor waarden van $\varphi = 15^\circ$ geldt: $\sin \varphi \approx \varphi$

( $\sin 15^\circ = 0{,}259$; $15^\circ = \frac{15}{360} \cdot 2\pi = 0{,}261$ )

Bijlage 3c-2

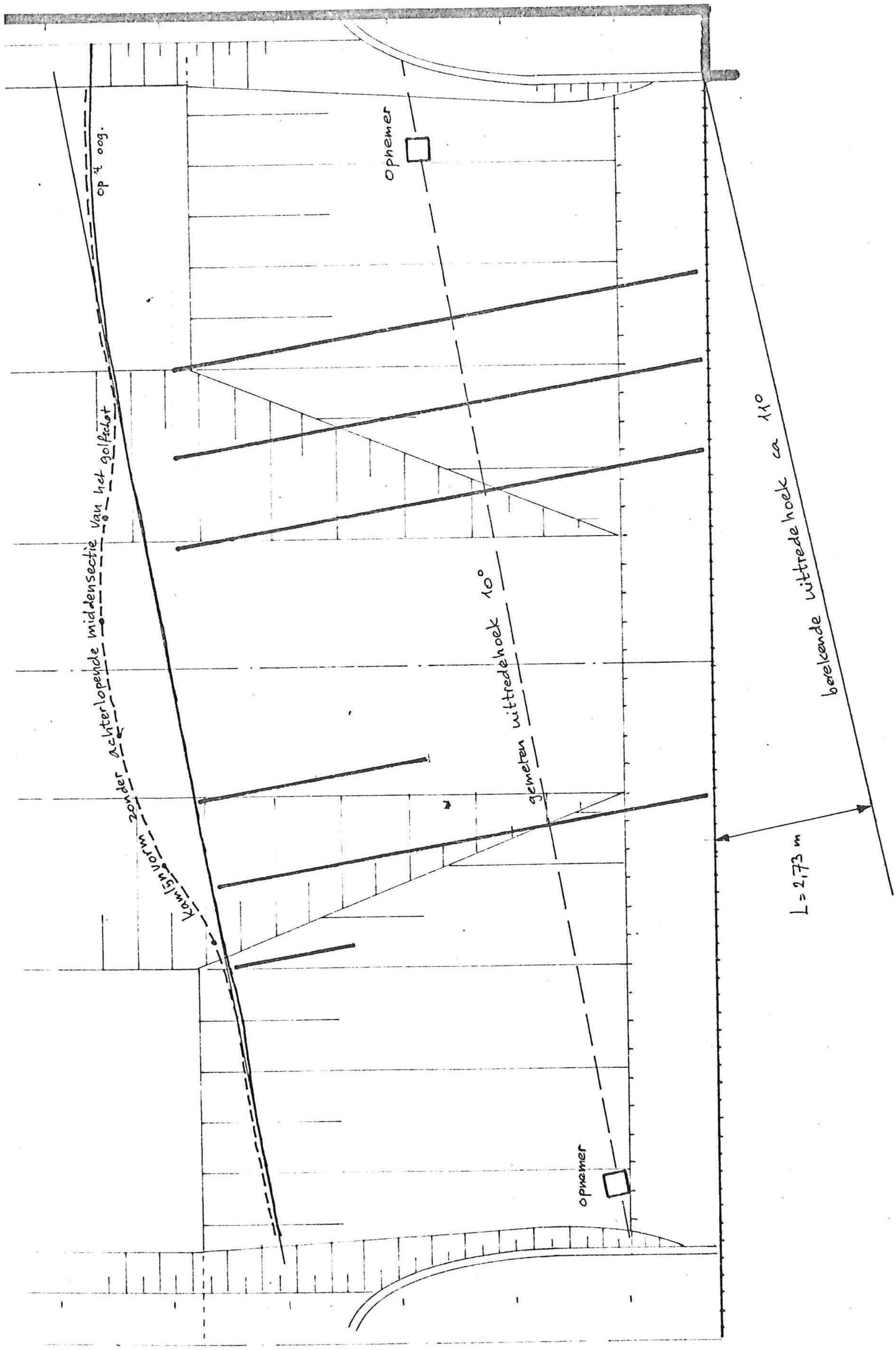
INSTELLING GOLFSCHOT

Definitieve instelling voor schuin golffront



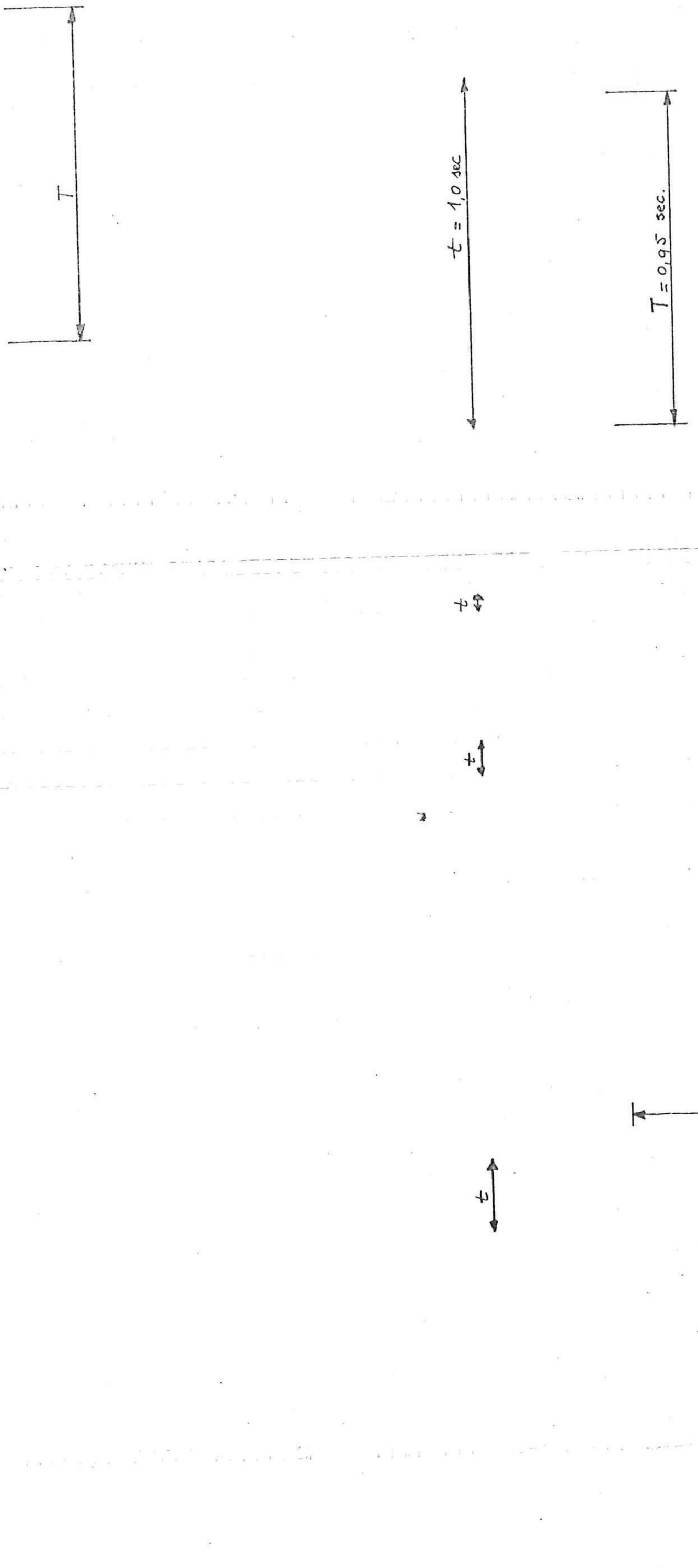
Bijlage 3c-3

INSTELLING GOLFSCHOT: Instelresultaten scheef golffront.

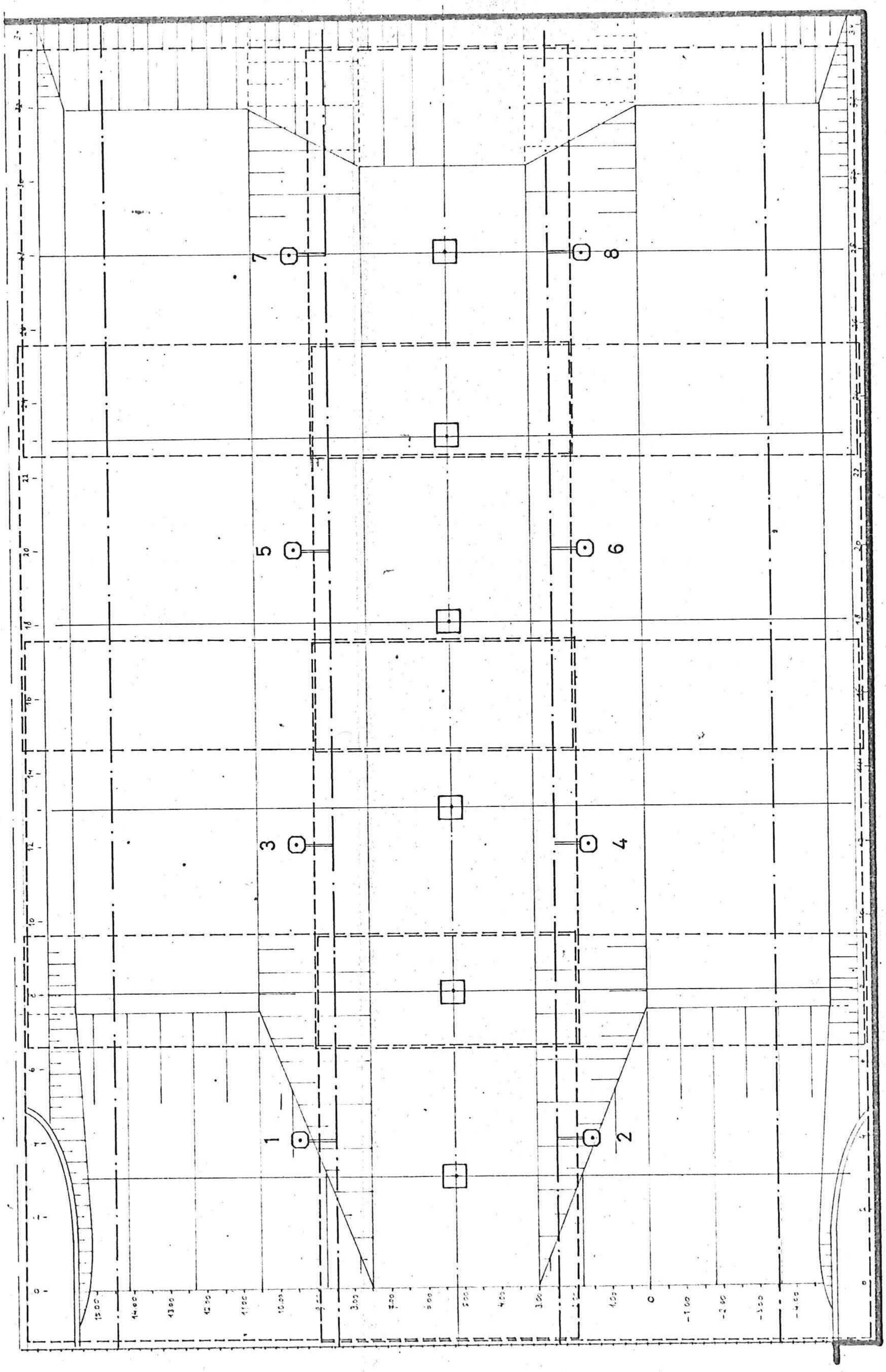


Bijlage 4

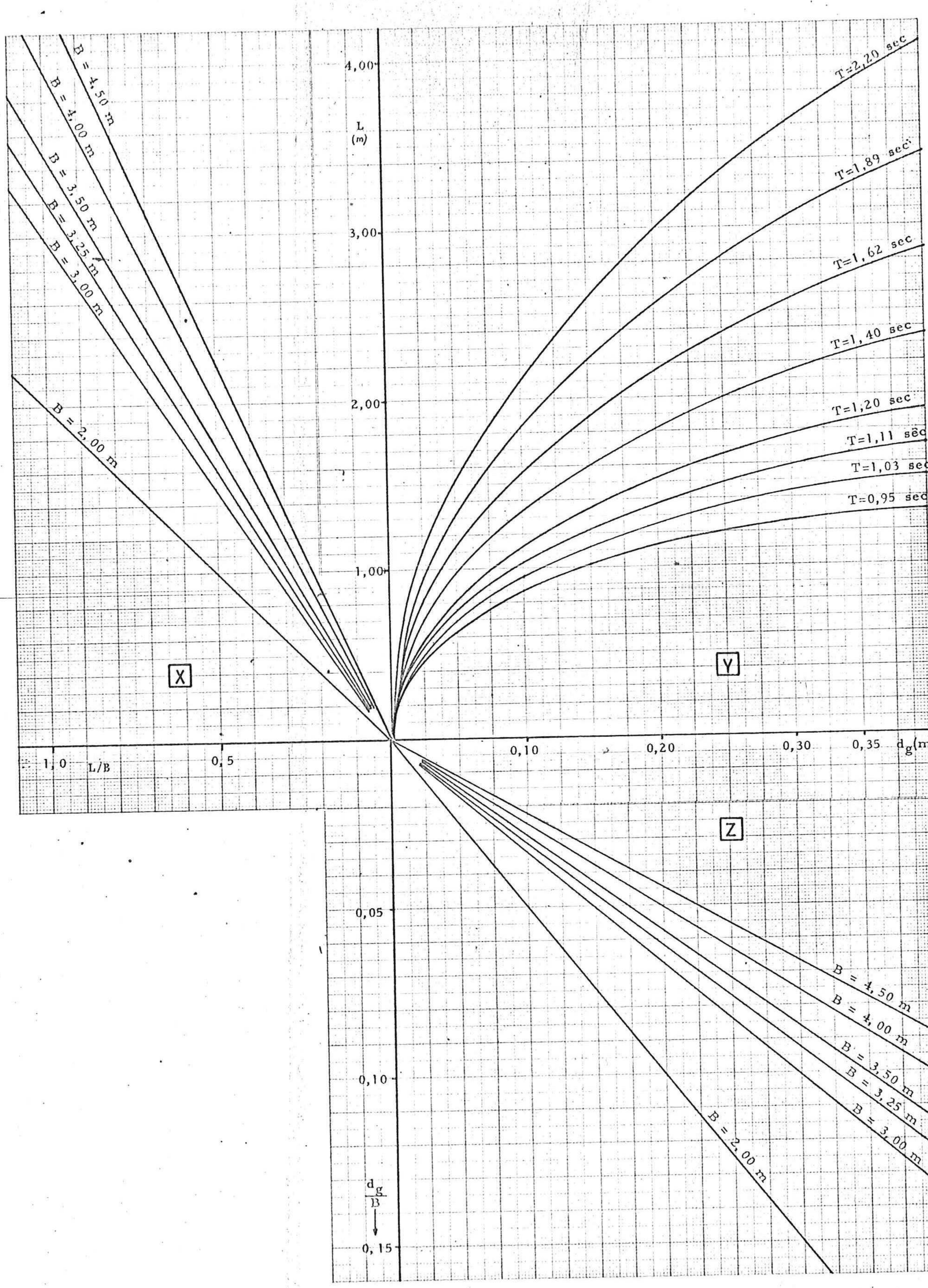
VOORBEELD REGISTRATIESTROOK



Bijlage 5


1
2
3
4
5
6
7
8
plaats hartlijn loopbrug boven model.
plaats camera-opstelling aan loopbrug.
begrenzing gebieden van opname.
witte merktekens op de foto's.

MEETPROGRAMMA: Diagram



MEETPROGRAMMA: Toelichting op het diagram.

Om uitgaande van een bepaalde T, d en B een andere T, d en B te vinden, waarvoor moet gelden, dat L/B en d/B constant blijven, moet de grafiek als volgt gebruikt worden:
Bepaal voor zekere d en T (in [Y]) snijpunten met de lijn B = 4,50 m in [X] en [Z]. Lees op de abscis van [X] de verhouding L/B en op de ordinaat van [Z] d/B af. Beweeg vervolgens met een assenstelsel (bijv. de twee rechthoekszijden van een transparante driehoek) langs een kromme, waarvoor T = constant, in [Y], tot er in [X] en [Z] eenzelfde B kan worden afgelezen, waarbij L/B en d/B gelijk zijn aan de oorspronkelijke waarden.

De volgende methode leidt doorgaans het snelst tot een resultaat: Neem een waarde op een bepaalde T-kromme bij een grote diepte in [Y]. Als hierbij nu in [X] een waarde voor B, B([X]), die kleiner is dan de waarde voor B in [Z], B([Z]), dan is een oplossing mogelijk. Als men namelijke de T-kromme afzakt, is in [Y]: $\Delta d > \Delta L$. De waarde van B([Z]) zal dus sneller afnemen dan die van B([X]) tot B([Z]) gelijk wordt aan B([X]).

Het bovenstaande geldt alleen in het gebied, waarvoor $\frac{\partial L}{\partial d} < 1$. Voor het gebied d > 0,15 m is dit steeds het geval.

MEETPROGRAMMA: Tabel I

| T sec | $d_g$ m | B = 4,50 m | | B = 3,50 m | | B = 3,25 m | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | L/B | d/B | L/B | d/B | L'B | d'B |
| 2,2 | 0,40 | 0,92 | 0,089 | | | | |
| 1,89 | 0,29 | | | | | 0,92 | 0,089 |
| 2,2 | 0,35 | 0,86 | 0,078 | | | | |
| 1,89 | 0,25 | | | | | 0,86 | 0,078 |
| 1,62 | 0,375 | 0,62 | 0,083 | | | | |
| 1,4 | 0,27 | | | | | 0,62 | 0,083 |
| 1,89 | 0,35 | 0,73 | 0,078 | | | | |
| 1,62 | 0,275 | | | 0,73 | 0,078 | | |
| 1,62 | 0,40 | 0,64 | 0,089 | | | | |
| 1,4 | 0,31 | | | 0,64 | 0,089 | | |
| 1,89 | 0,30 | 0,69 | 0,089 | | | | |
| 1,89 | 0,234 | | | 0,69 | 0,067 | | |
| 1,4 | 0,35 | 0,50 | 0,078 | | | | |
| 1,2 | 0,275 | | | 0,50 | 0,078 | | |
| 2,2 | 0,35 | 0,86 | 0,078 | | | | |
| 1,89 | 0,275 | | | 0,86 | 0,078 | | |
| 1,89 | 0,255 | | | | | 0,86 | 0,078 |
| 1,62 | 0,35 | 0,61 | 0,078 | | | | |
| 1,4 | 0,275 | | | 0,61 | 0,078 | | |
| 1,4 | 0,255 | | | | | 0,61 | 0,078 |
| 1,2 | 0,35 | 0,41 | 0,078 | | | | |
| 1,03 | 0,275 | | | 0,41 | 0,078 | | |
| 1,03 | 0,255 | | | | | 0,41 | 0,078 |

MEETPROGRAMMA: Tabel II

| T<br>sec | $d_g$<br>m | B<br>m | $d_u/d_g$ | L/B | $d_g/B$ | codenummer<br>(zie bijlage 7a) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,2<br>1,89 | 0,35<br>0,275 | 4,50<br>3,50 | 0,58<br>0,45 | 0,86 | 0,078 | 1/2.1.1. |
| 1,62<br>1,4 | 0,35<br>0,275 | 4,50<br>3,50 | 0,58<br>0,45 | 0,61 | 0,078 | 1/2.1.3. |
| 1,4<br>1,2 | 0,35<br>0,275 | 4,50<br>3,50 | 0,58<br>0,45 | 0,50 | 0,078 | 1/2.1.4. |
| 1,2<br>1,03 | 0,35<br>0,275 | 4,50<br>3,50 | 0,58<br>0,45 | 0,41 | 0,078 | 1/2.1.5. |
| 2,2 | 0,275 | 4,50 | 0,45 | 0,80 | 0,061 | 1/2.3.1. |
| 1,62 | 0,275 | 4,50 | 0,45 | 0,55 | 0,061 | 1/2.3.3. |
| 1,4 | 0,275 | 4,50 | 0,45 | 0,46 | 0,061 | 1/2.3.4. |
| 1,2 | 0,275 | 4,50 | 0,45 | 0,38 | 0,061 | 1/2.3.5 |
| schuin invallende golf: | | | | | | |
| 1,62 | 0,35 | 4,50 | 0,58 | 0,61 | 0,078 | 3.1.3. |

Bijlage 7a

OVERZICHT MEETSITUATIES

| schotten? | $d_g$ (m) | T (sec) | B (m) | codenummer (zie bijlage 7b) | bijlage nr. |
|---|---|---|---|---|---|
| nee | 0,35 | 2,2 | 4,50 | 1.1.1. | 11a-I |
| | | 1,62 | 4,50 | 1.1.3. | 11b-I |
| | | 1,4 | 4,50 | 1.1.4. | 11c-I |
| | | 1,2 | 4,50 | 1.1.5. | 11d-I |
| nee | 0,275 | 2,2 | 4,50 | 1.3.1. | 12a-I |
| | | 1,62 | 4,50 | 1.3.3. | 12b-I |
| | | 1,4 | 4,50 | 1.3.4. | 12c-I |
| | | 1,2 | 4,50 | 1.3.5. | 12d-I |
| | | 1,03 | 4,50 | 1.3.6. | 12e-I |
| ja | 0,35 | 2,2 | 4,50 | 2.1.1. | 13a-I |
| | | 1,62 | 4,50 | 2.1.3. | 13b-I |
| | | 1,4 | 4,50 | 2.1.4. | 13c-I |
| | | 1,2 | 4,50 | 2.1.5. | 13d-I |
| ja | 0,275 | 2,2 | 4,50 | 2.3.1. | 14a-I |
| | | 1,62 | 4,50 | 2.3.3. | 14b-I |
| | | 1,4 | 4,50 | 2.3.4. | 14c-I |
| | | 1,2 | 4,50 | 2.3.5. | 14d-I |
| schuin golffront | 0,35 | 1,62 | 4,50 | 3.1.3. | 15 -I |

CODERING VAN DE MEETSITUATIES

De codering van de verschillende meetsituaties bestaat uit een combinatie van cijfers.

EERSTE CIJFER:

1. Situatie "zonder schotten".
2. Situatie "met schotten".
3. Situatie "scheef invallend golffront".

TWEEDE CIJFER: Waterdiepte.

1. $d_g$ = 0,35 m
2. $d_g$ = 0,30 m
3. $d_g$ = 0,275 m

DERDE CIJFER: Golfperiode.

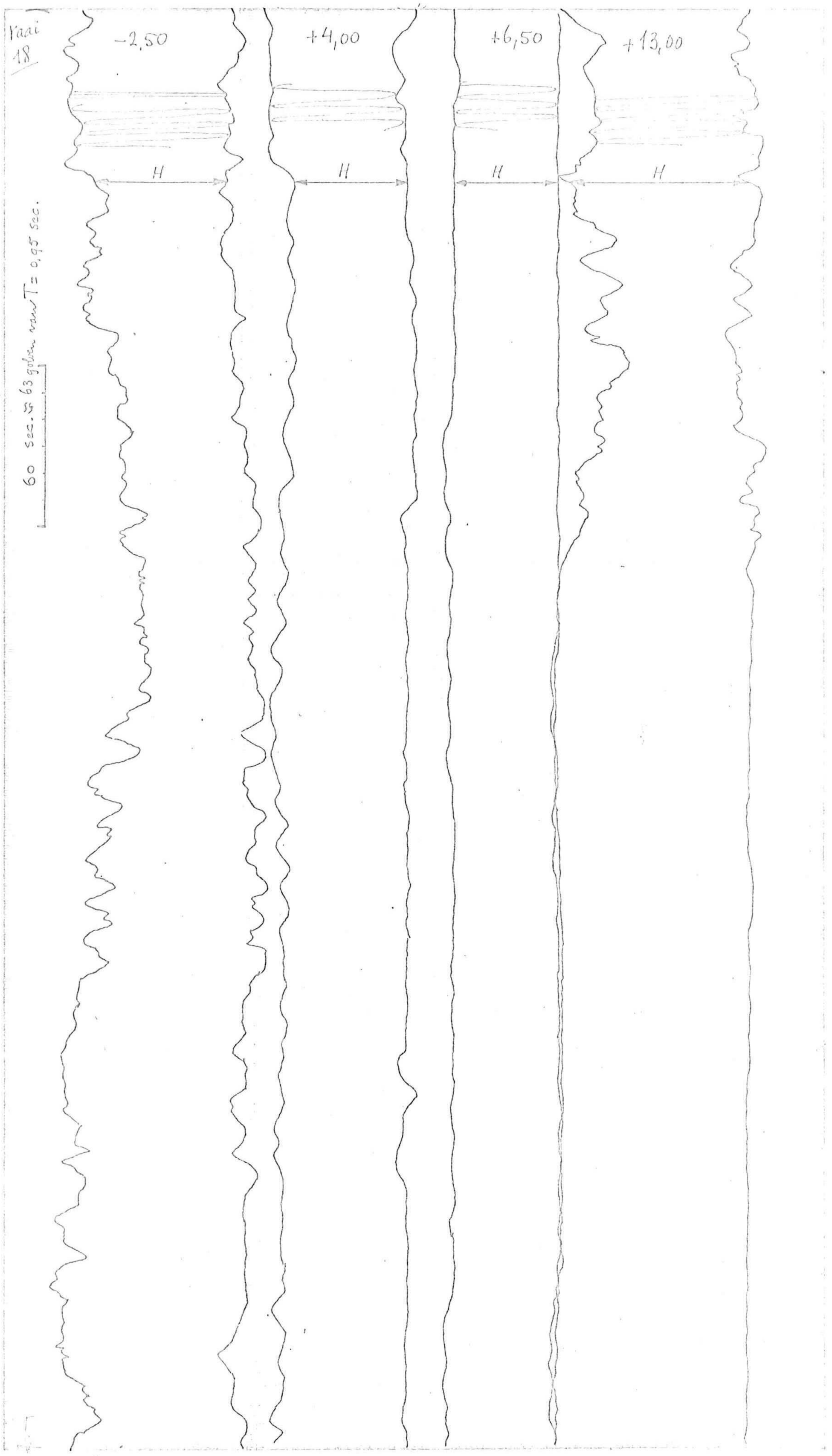
1. T = 2,2 sec
2. T = 1,89 sec
3. T = 1,62 sec
4. T = 1,4 sec
5. T = 1,2 sec
6. T = 1,03 sec
7. T = 0,95 sec

VIERDE CIJFER: Gedeelte van de bak, dat per foto gefotografeerd is.

Deze cijfers corresponderen met de "vak"-nummers op bijlage 5.

Bijlage 8a

# REGISTRATIE LANGE-DUUR-METING ("Bakslingeringen")

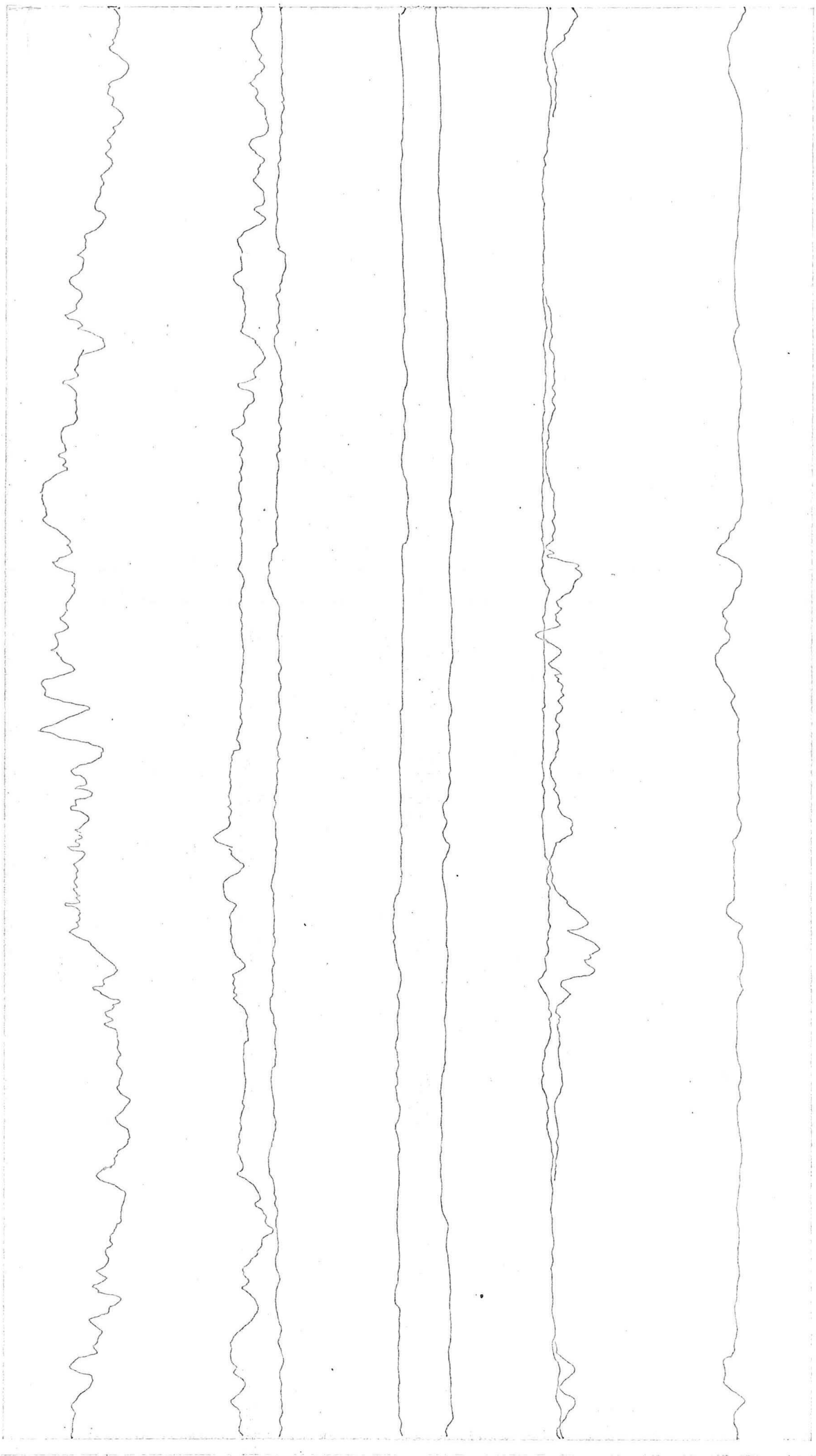


Bijlage 8b

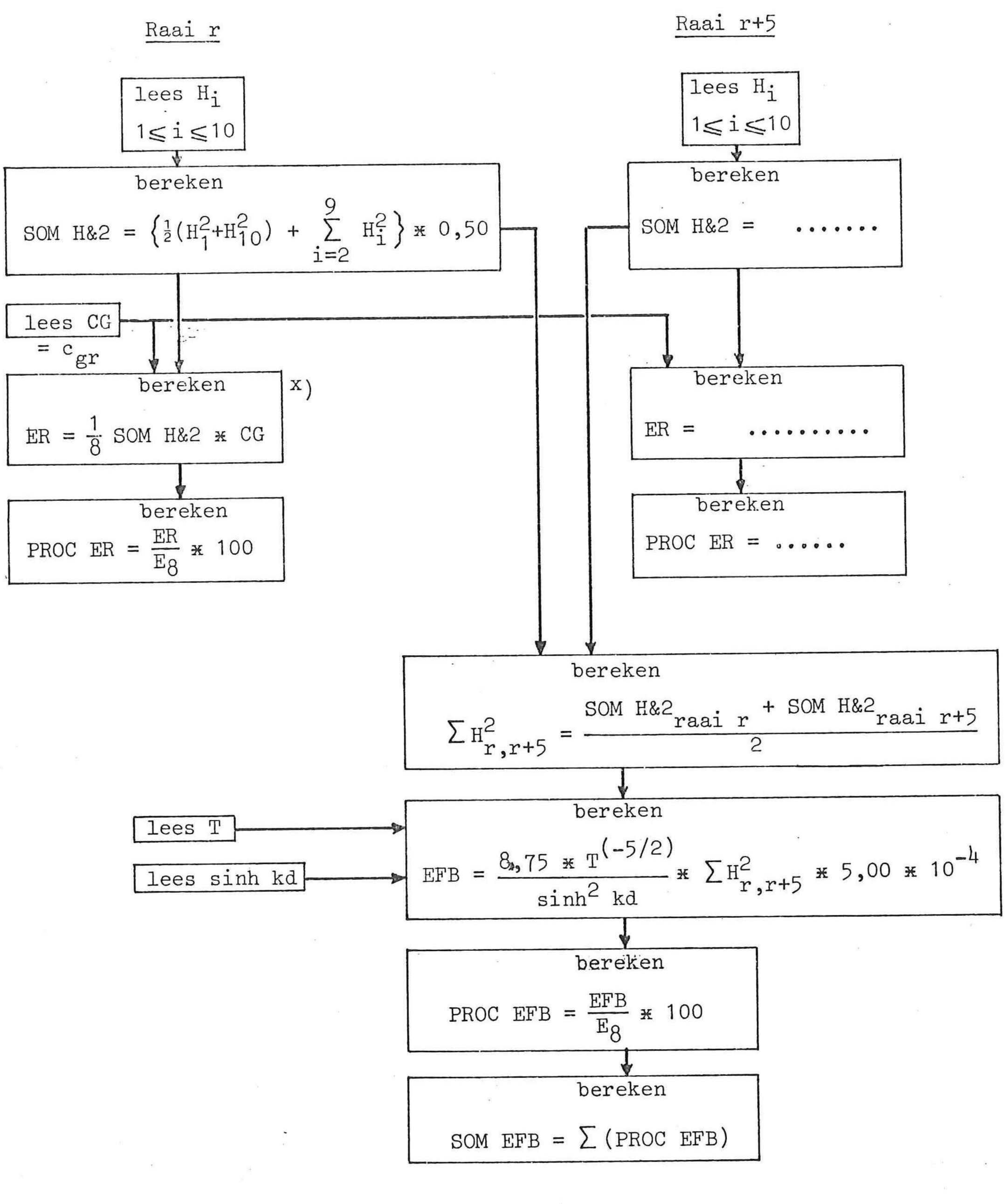
Registratie lange-duur-meting (vervolg)

Bijlage 8c

Registratie lange-duur-meting (vervolg)



SCHEMA VAN HET REKENPROGRAMMA




x) H in cm $\longrightarrow$ $ER = \frac{1}{8}\rho g H^2 * c_{gr} \Rightarrow \frac{1}{8}.10^3.10.H^2.10^{-4}.c_{gr} = \frac{1}{8}.H^2.c_{gr}$ ,
als de andere waarden wel in S.I.-eenheden worden ingevuld.

# HET REKENPROGRAMMA

```
0:
0→R8:GTO 8⊢
1:
"SUB":1→C:0→A:0→
B⊢
2:
ENT "H1",B:B*B/2
→X:PRT "H1=",B⊢
3:
A+X→A:C+1→C⊢
4:
ENT "H",B:B*B→X:
A+X→A:C+1→C:PRT
"HN=",B:PRT "N="
,C-1:SPC 1⊢
5:
IF C<9:GTO -1⊢
6:
ENT "H10",B:B*B/
2→X:A+X→A:PRT "H
10=",B⊢
7:
A*.50→R1:PRT "SO
M H&2",R1:RET ⊢
8:
FXD 4⊢
9:
ENT "SINH",R2:
ENT "T",R3:ENT "
CG",R4⊢
10:
PRT "PERIODE IN
SEC",R3⊢
11:
GSB "SUB"⊢
12:
R1→R6⊢
13:
R6*R4/8→R5⊢
14:
PRT "ER",R5⊢
15:
PRT "PROC ER",10
0⊢
16:
GSB "SUB"⊢
17:
R1*R4/8→R7⊢
18:
PRT "ER",R7⊢
19:
100*R7/R5→R7⊢
20:
PRT "PROC ER",R7
⊢
21:
(R6+R1)/2→R6⊢
22:
8.75*R3↑(-5/2)*R
6*5/R2↑2→R6⊢
23:
R6*1E-4→R6⊢
24:
PRT "EFB",R6⊢
25:
100*R6/R5→R6⊢
26:
R6+R8→R8⊢
27:
PRT "PROC EFB",R
6⊢
28:
PRT "SOM EFB",R8
⊢
29:
R1→R6⊢
30:
GTO 16⊢
31:
END ⊢
R103
```

VERKLARING VAN DE COMPUTER-OUTPUT (bijlagen 11 t/m 15,-II)

HN = per meetpunt gemeten $H_i$ in cm.

N = volgnummer i.

SOM H&2 = in $cm^2$ x m .

ER = energietransport door raai over geulbodembreedte in W

PROC ER = ER in % van $E_8$.

EFB = bodemwrijvingsenergieverlies over geulbodembreedte tussen twee raaien in $W/_{m'}$

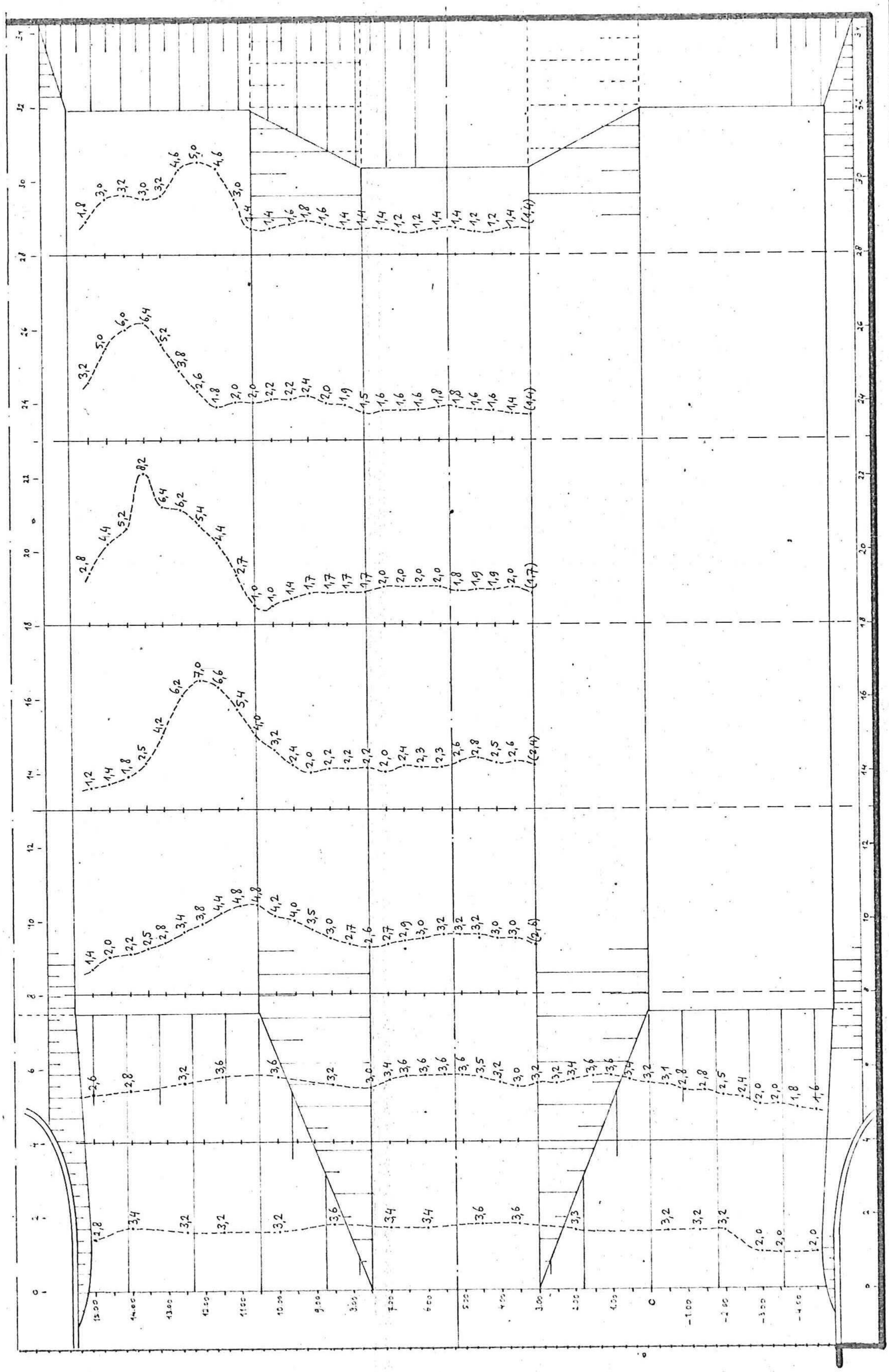
PROC EFB = EFB in % van $E_8$.

SOM EFB = som van PROC EFB.

De voor het uitvoeren van de computerberekeningen benodigde waarden voor T, sinh kd en $c_{gr}$ zijn opgezocht in T.R 4 [3] en vermeld in onderstaande tabel:

| T sec | $d_g$ = 0,35 m | | $d_g$ = 0,275 m | |
|---|---|---|---|---|
| | sinh kd | $c_{gr}$ | sinh kd | $c_{gr}$ |
| 2,2 | 0,5954 | 1,61 | 0,5190 | 1,46 |
| 1,62 | 0,8989 | 1,40 | 0,7600 | 1,32 |
| 1,4 | 1,117 | 1,29 | 0,9295 | 1,23 |
| 1,2 | 1,479 | 1,12 | 1,183 | 1,11 |

Bijlage 11a-I



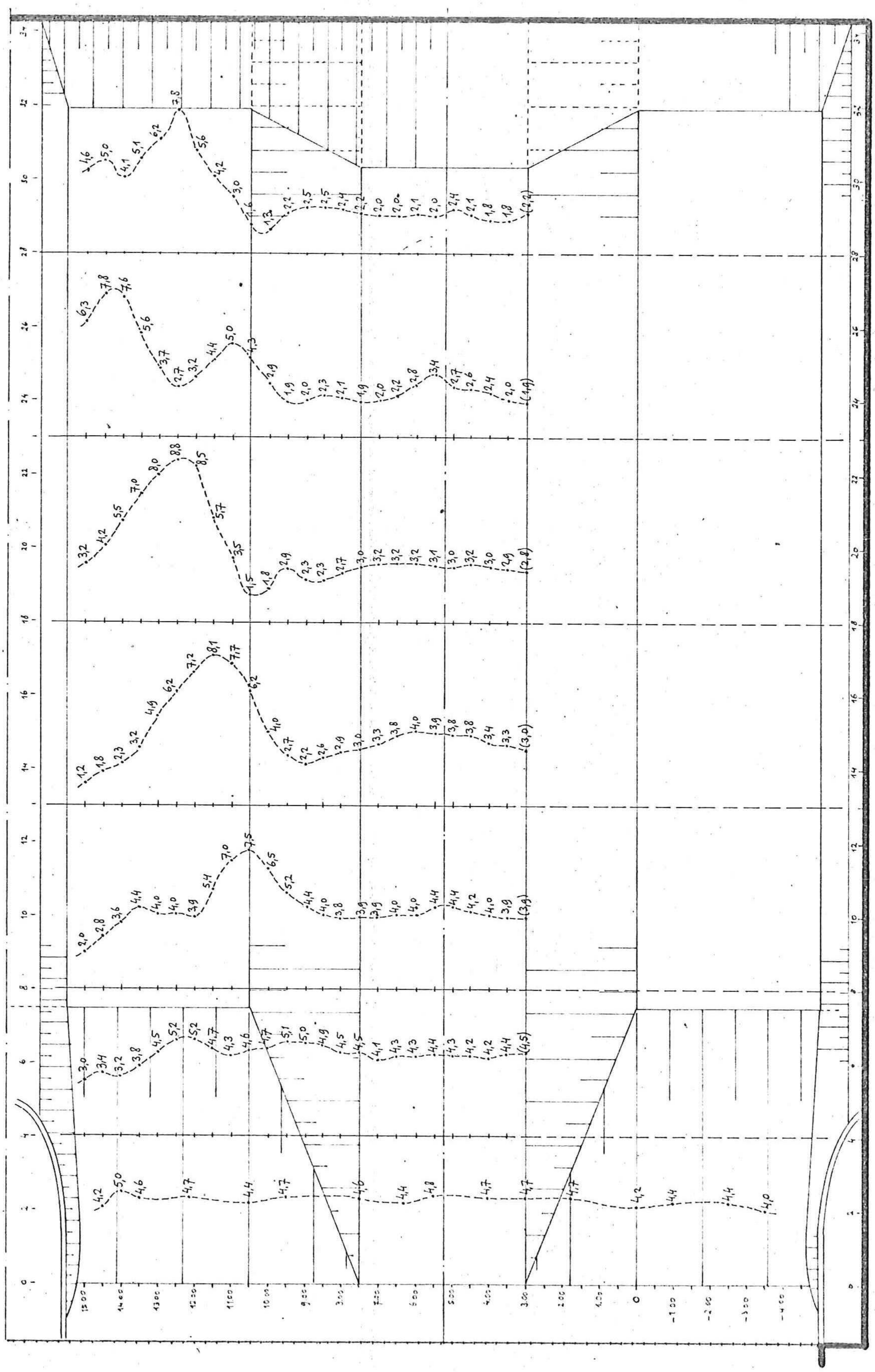
Zonder schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 1.1.1.

| raai 0 | 4 | | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | 2.20 | | | | |
| | | H1= | 2.60 | 2.20 | 1.70 | 1.50 | 1.40 |
| 3.50 | 3.00 | | | | | | |
| | | HN= | 2.70 | 2.00 | 2.00 | 1.60 | 1.40 |
| 3.50 | 3.40 | | | | | | |
| | | N= | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 2.00 | 2.00 | | | | | | |
| | | HN= | 2.90 | 2.40 | 2.00 | 1.60 | 1.20 |
| 3.40 | 3.60 | | | | | | |
| | | N= | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| 3.00 | 3.00 | | | | | | |
| | | HN= | 3.00 | 2.30 | 2.00 | 1.60 | 1.20 |
| 3.40 | 3.60 | | | | | | |
| | | N= | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| 4.00 | 4.00 | | | | | | |
| | | HN= | 3.20 | 2.30 | 2.00 | 1.80 | 1.40 |
| 3.50 | 3.60 | | | | | | |
| | | N= | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 5.00 | 5.00 | | | | | | |
| | | HN= | 3.20 | 2.60 | 1.80 | 1.80 | 1.40 |
| 3.60 | 3.60 | | | | | | |
| | | N= | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| 6.00 | 6.00 | | | | | | |
| | | HN= | 3.20 | 2.80 | 1.90 | 1.60 | 1.20 |
| 3.60 | 3.50 | | | | | | |
| | | N= | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| 7.00 | 7.00 | | | | | | |
| | | HN= | 3.00 | 2.50 | 1.90 | 1.60 | 1.20 |
| 3.50 | 3.20 | | | | | | |
| | | N= | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| 8.00 | 8.00 | | | | | | |
| | | HN= | 3.00 | 2.60 | 2.00 | 1.40 | 1.40 |
| 3.50 | 3.00 | | | | | | |
| | | N= | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| 9.00 | 9.00 | | | | | | |
| | | H10= | 2.60 | 2.40 | 1.70 | 1.40 | 1.40 |
| 3.50 | 3.20 | | | | | | |
| | | SOM H&2 | 40.09 | 26.62 | 16.67 | 11.67 | 7.78 |
| 55.14 | 52.25 | | | | | | |
| | | ER | 8.06 | 5.35 | 3.35 | 2.34 | 1.56 |
| 11.09 | 10.51 | | | | | | |
| | | PROC ER | 100.00 | 66.41 | 41.59 | 29.11 | 19.40 |
| 137.55 | 130.34 | | | | | | |
| | | EFB | | .05 | .03 | .02 | .01 |
| | | PROC EFB | | .71 | .46 | .30 | .20 |
| | | SOM EFB | | .71 | 1.17 | 1.47 | 1.68 |

Bijlage 11b-I

nr. 1.1.3

$d_g$ = 0,35 m.
T = 1,62 sec.
exc. = 1,9 cm.



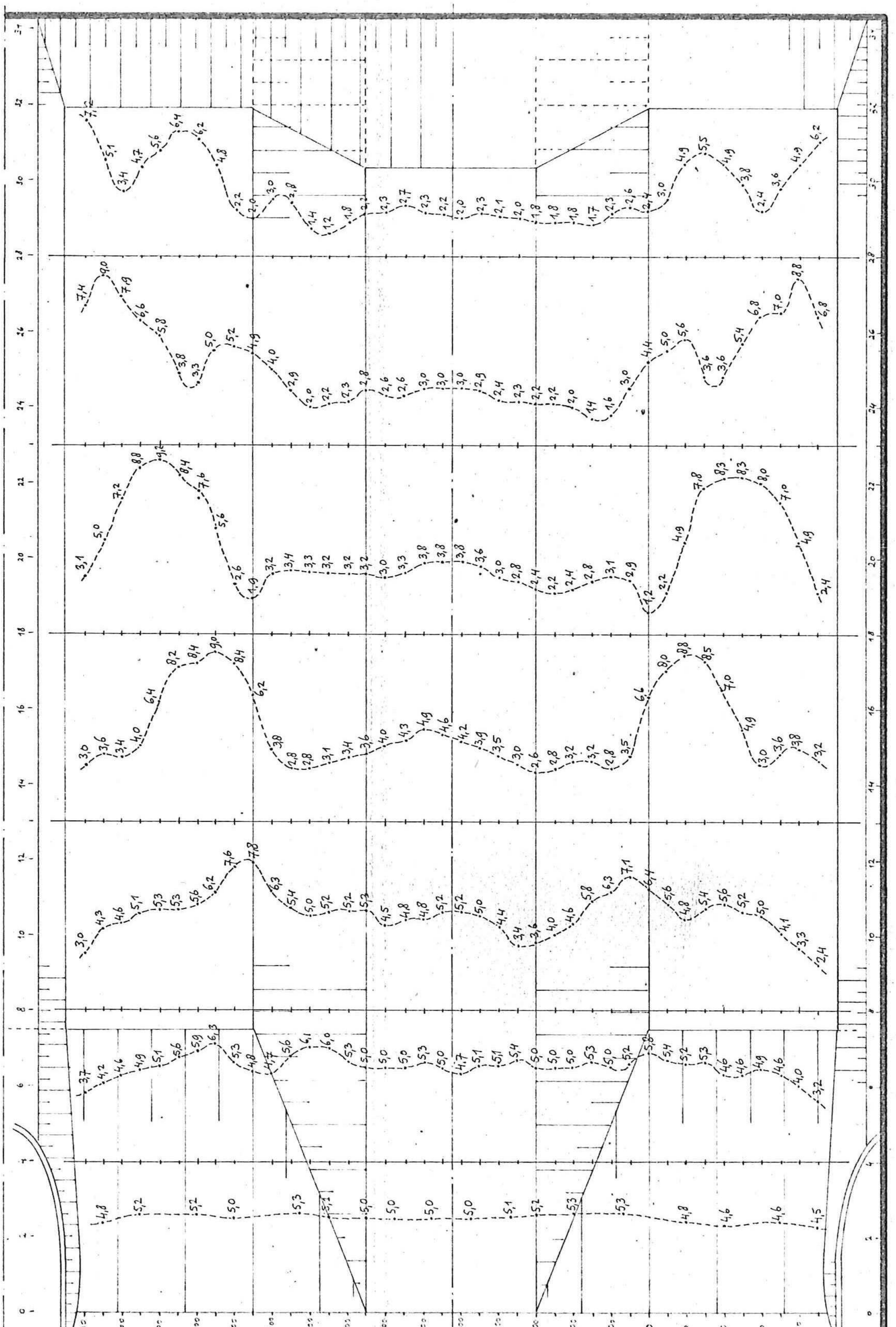
Zonder schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 1.1.3.

| raai 0 | 4 | | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | 1.62 | | | | |
| | | H1= | | | | | |
| 4.60 | 4.50 | | 3.90 | 3.00 | 3.00 | 1.90 | 2.20 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.60 | 4.10 | | 3.90 | 3.30 | 3.20 | 2.00 | 2.00 |
| | | N= | | | | | |
| 2.00 | 2.00 | | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.50 | 4.30 | | 4.00 | 3.80 | 3.20 | 2.20 | 2.00 |
| | | N= | | | | | |
| 3.00 | 3.00 | | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.40 | 4.30 | | 4.00 | 4.00 | 3.20 | 2.80 | 2.10 |
| | | N= | | | | | |
| 4.00 | 4.00 | | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.70 | 4.40 | | 4.40 | 3.90 | 3.10 | 3.40 | 2.00 |
| | | N= | | | | | |
| 5.00 | 5.00 | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.70 | 4.30 | | 4.40 | 3.80 | 3.00 | 2.70 | 2.40 |
| | | N= | | | | | |
| 6.00 | 6.00 | | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.70 | 4.30 | | 4.20 | 3.80 | 3.20 | 2.60 | 2.10 |
| | | N= | | | | | |
| 7.00 | 7.00 | | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.70 | 4.20 | | 4.00 | 3.40 | 3.00 | 2.40 | 1.80 |
| | | N= | | | | | |
| 8.00 | 8.00 | | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 4.70 | 4.40 | | 3.90 | 3.30 | 2.90 | 2.00 | 1.80 |
| | | N= | | | | | |
| 9.00 | 9.00 | | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| | | H10= | 3.90 | 3.00 | 2.80 | 1.90 | 2.20 |
| 4.70 | 4.50 | | | | | | |
| | | SOM H&2 | 74.99 | 58.43 | 42.70 | 27.83 | 18.95 |
| 96.42 | 83.69 | | | | | | |
| | | ER | 13.12 | 10.22 | 7.47 | 4.87 | 3.31 |
| 16.87 | 14.64 | | | | | | |
| | | PROC ER | 100.00 | 77.91 | 56.93 | 37.10 | 25.26 |
| 128.57 | 111.59 | | | | | | |
| | | EFB | | .10 | .08 | .05 | .03 |
| | | PROC EFB | | .82 | .62 | .43 | .28 |
| | | SOM EFB | | .82 | 1.44 | 1.88 | 2.17 |

Bijlage 11c-I

nr. 1.1.4

$d_g$ = 0,35 m.
T = 1,4 sec.
exc.= 1,9 cm.

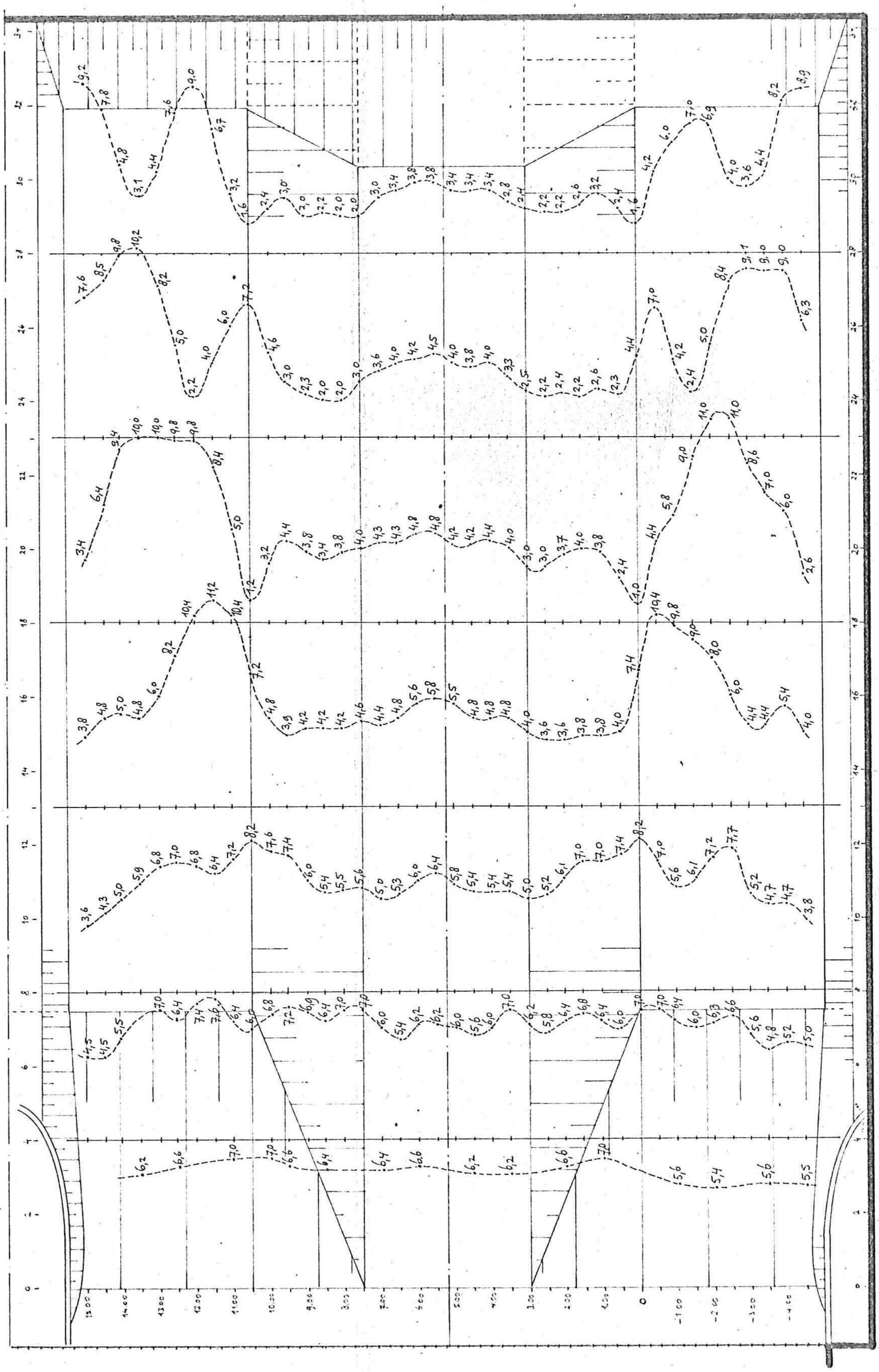


Bijlage 11c-II

Zonder schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 1.1.4.

| raai 0 | 4 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | | | | |
| | | 1.40 | | | | |
| | | HI= | | | | |
| 5.05 | 5.00 | 5.30 | 3.60 | 3.20 | 2.80 | 2.20 |
| | | HN= | | | | |
| 5.00 | 5.00 | 4.50 | 4.00 | 3.00 | 2.60 | 2.30 |
| | | N= | | | | |
| 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | | HN= | | | | |
| 5.00 | 5.00 | 4.80 | 4.30 | 3.30 | 2.60 | 2.70 |
| | | N= | | | | |
| 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| | | HN= | | | | |
| 5.00 | 5.30 | 4.80 | 4.90 | 3.80 | 3.00 | 2.30 |
| | | N= | | | | |
| 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| | | HN= | | | | |
| 5.00 | 5.00 | 5.20 | 4.60 | 3.80 | 3.00 | 2.20 |
| | | N= | | | | |
| 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| | | HN= | | | | |
| 5.00 | 4.70 | 5.20 | 4.20 | 3.80 | 3.00 | 2.00 |
| | | N= | | | | |
| 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| | | HN= | | | | |
| 5.00 | 5.10 | 5.00 | 3.90 | 3.60 | 2.90 | 2.30 |
| | | N= | | | | |
| 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| | | HN= | | | | |
| 5.00 | 5.10 | 4.40 | 3.50 | 3.00 | 2.40 | 2.10 |
| | | N= | | | | |
| 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| | | HN= | | | | |
| 5.10 | 5.40 | 3.40 | 3.00 | 2.80 | 2.30 | 2.00 |
| | | N= | | | | |
| 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| | | H10= | | | | |
| 5.20 | 5.00 | 3.60 | 2.60 | 2.40 | 2.20 | 1.80 |
| | | SOM H&2 | | | | |
| 113.64 | 115.68 | 98.42 | 71.81 | 50.50 | 33.16 | 22.22 |
| | | ER | | | | |
| 18.32 | 18.65 | 15.87 | 11.57 | 8.14 | 5.34 | 3.58 |
| | | PROC ER | | | | |
| 115.45 | 117.52 | 100.00 | 72.95 | 51.31 | 33.68 | 22.58 |
| | | EFB | | | | |
| | | | .12 | .09 | .06 | .04 |
| | | PROC EFB | | | | |
| | | | .81 | .58 | .39 | .26 |
| | | SOM EFB | | | | |
| | | | .81 | 1.39 | 1.79 | 2.05 |

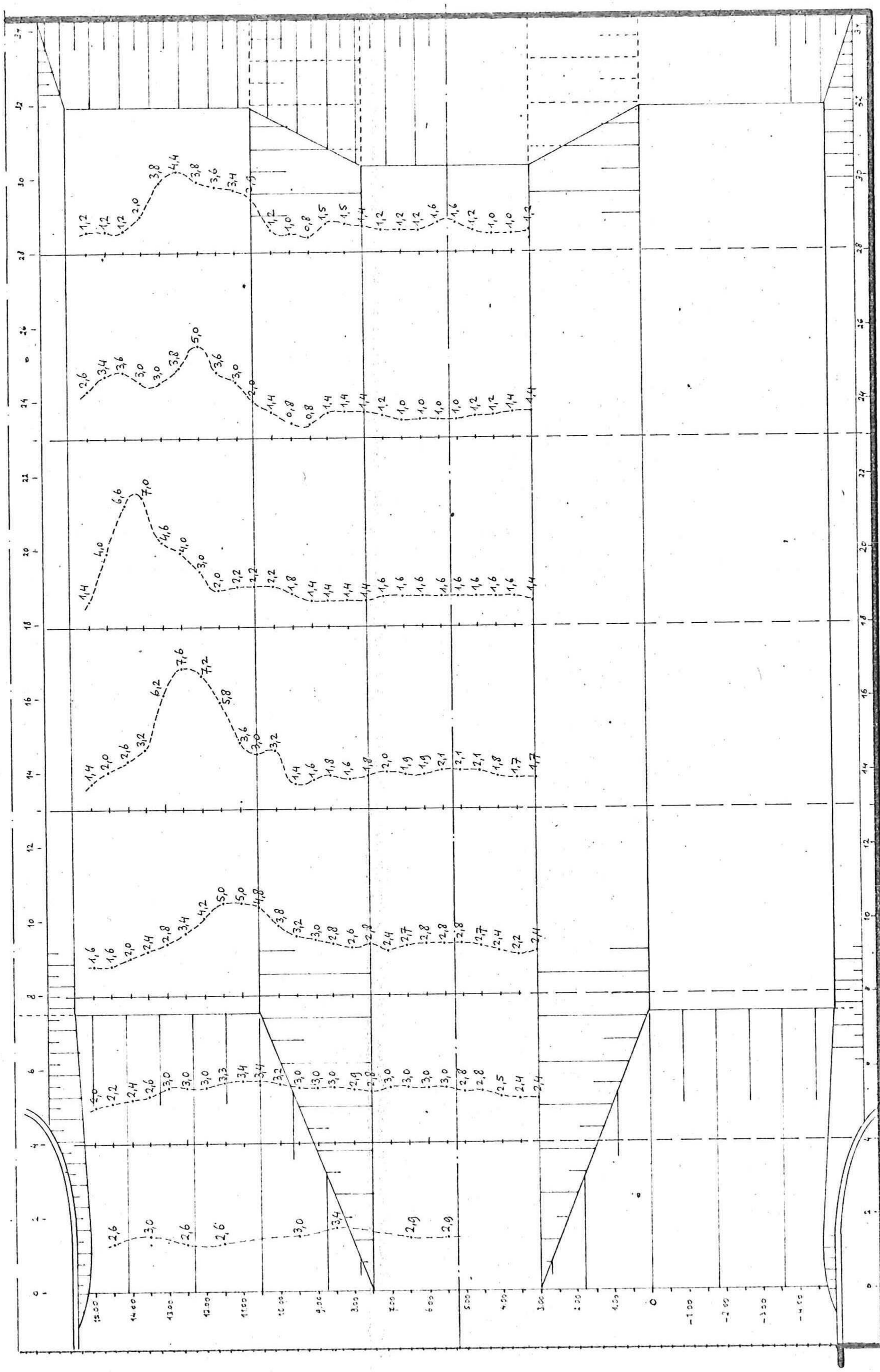
Bijlage 11d-I



Zonder schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 1.1.5.

| raai 0 | 4 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | | | | |
| | | 1.20 | | | | |
| | | H1= | | | | |
| 6.40 | 7.00 | 5.60 | 4.60, | 4.00 | 3.00 | 2.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.40 | 6.00 | 5.00 | 4.40 | 4.30 | 3.60 | 3.00 |
| | | N= | | | | |
| 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.50 | 5.40 | 5.30 | 4.80 | 4.30 | 4.00 | 3.40 |
| | | N= | | | | |
| 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.60 | 6.20 | 6.00 | 5.60 | 4.80 | 4.20 | 3.80 |
| | | N= | | | | |
| 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.50 | 6.20 | 6.40 | 5.80 | 4.80 | 4.50 | 3.80 |
| | | N= | | | | |
| 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.30 | 6.00 | 5.80 | 5.50 | 4.20 | 4.00 | 3.40 |
| | | N= | | | | |
| 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.20 | 5.60 | 5.40 | 4.80 | 4.20 | 3.80 | 3.40 |
| | | N= | | | | |
| 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.20 | 6.00 | 5.40 | 4.80 | 4.40 | 4.00 | 3.40 |
| | | N= | | | | |
| 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| | | HN= | | | | |
| 6.20 | 7.00 | 5.40 | 4.80 | 4.00 | 3.30 | 2.80 |
| | | N= | | | | |
| 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| | | H10= | | | | |
| 6.30 | 6.20 | 5.00 | 4.00 | 3.00 | 2.50 | 2.40 |
| | | SOM H&2 | | | | |
| 182.17 | 169.06 | 139.67 | 112.67 | 83.10 | 65.90 | 48.42 |
| | | ER | | | | |
| 25.50 | 23.66 | 19.55 | 15.77 | 11.63 | 9.22 | 6.77 |
| | | PROC ER | | | | |
| 130.42 | 121.03 | 100.00 | 80.66 | 59.49 | 47.18 | 34.66 |
| | | EFB | .16 | .12 | .09 | .07 |
| | | PROC EFB | .81 | .63 | .48 | .37 |
| | | SOM EFB | .81 | 1.45 | 1.93 | 2.30 |

Bijlage 12a-I

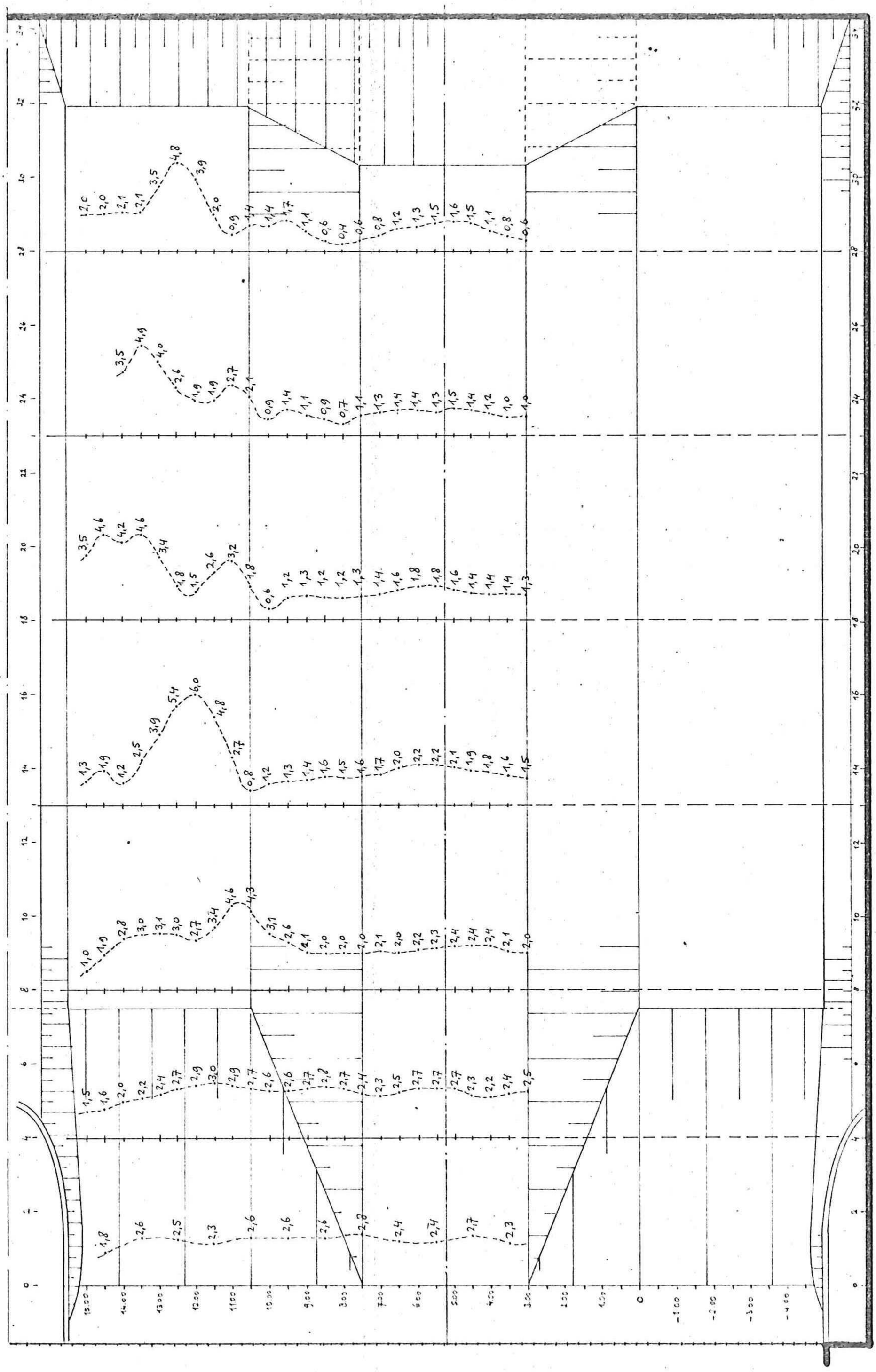


Bijlage 12a-II

Zonder schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 1.3.1.

| raai 0 | 4 | | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | 2.20 | | | | |
| | | H1= | | | | | |
| 2.90 | 2.80 | | 2.80 | 1.80 | 1.40 | 1.40 | 1.40 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 3.00 | | 2.40 | 2.00 | 1.60 | 1.20 | 1.20 |
| | | N= | | | | | |
| 2.00 | 2.00 | | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 3.00 | | 2.70 | 1.90 | 1.60 | 1.00 | 1.20 |
| | | N= | | | | | |
| 3.00 | 3.00 | | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 3.00 | | 2.80 | 1.90 | 1.60 | 1.00 | 1.20 |
| | | N= | | | | | |
| 4.00 | 4.00 | | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 3.00 | | 2.80 | 2.10 | 1.60 | 1.00 | 1.60 |
| | | N= | | | | | |
| 5.00 | 5.00 | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 2.80 | | 2.80 | 2.10 | 1.60 | 1.00 | 1.60 |
| | | N= | | | | | |
| 6.00 | 6.00 | | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 2.80 | | 2.70 | 2.10 | 1.60 | 1.20 | 1.20 |
| | | N= | | | | | |
| 7.00 | 7.00 | | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 2.50 | | 2.40 | 1.80 | 1.60 | 1.20 | 1.00 |
| | | N= | | | | | |
| 8.00 | 8.00 | | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.90 | 2.40 | | 2.20 | 1.70 | 1.60 | 1.40 | 1.00 |
| | | N= | | | | | |
| 9.00 | 9.00 | | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| | | H10= | | | | | |
| 2.90 | 2.40 | | 2.40 | 1.70 | 1.40 | 1.40 | 1.20 |
| | | SOM H&2 | | | | | |
| 37.84 | 35.24 | | 30.63 | 16.82 | 11.22 | 6.12 | 7.29 |
| | | ER | | | | | |
| 6.90 | 6.43 | | 5.59 | 3.07 | 2.04 | 1.11 | 1.33 |
| | | PROC ER | | | | | |
| 123.55 | 115.06 | | 100.00 | 54.92 | 36.63 | 19.98 | 23.80 |
| | | EFB | | .05 | .03 | .01 | .01 |
| | | PROC EFB | | .96 | .56 | .35 | .27 |
| | | SOM EFB | | .96 | 1.52 | 1.87 | 2.15 |

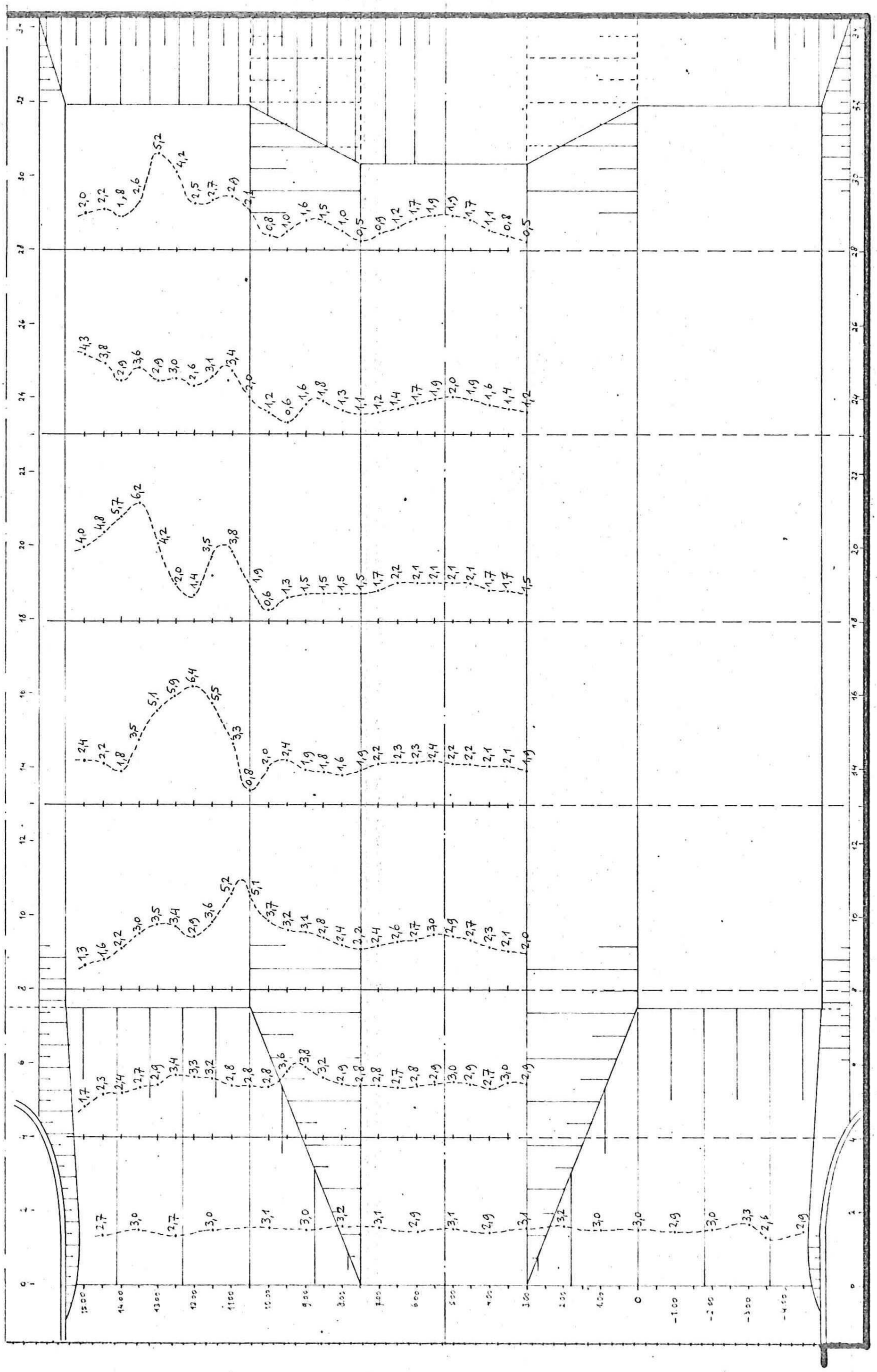
Bijlage 12b-I



Zonder schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 1.3.3.

| raai 0 | 4 | | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | 1.62 | | | | |
| | | H1= | | | | | |
| 2.80 | 2.40 | | 2.00 | 1.60 | 1.30 | 1.10 | .60 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.60 | 2.30 | | 2.10 | 1.70 | 1.40 | 1.30 | .80 |
| | | N= | | | | | |
| 2.00 | 2.00 | | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.40 | 2.50 | | 2.00 | 2.00 | 1.60 | 1.40 | 1.20 |
| | | N= | | | | | |
| 3.00 | 3.00 | | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.40 | 2.70 | | 2.20 | 2.20 | 1.80 | 1.40 | 1.30 |
| | | N= | | | | | |
| 4.00 | 4.00 | | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.40 | 2.70 | | 2.30 | 2.20 | 1.80 | 1.30 | 1.50 |
| | | N= | | | | | |
| 5.00 | 5.00 | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.50 | 2.70 | | 2.40 | 2.10 | 1.60 | 1.50 | 1.60 |
| | | N= | | | | | |
| 6.00 | 6.00 | | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.70 | 2.30 | | 2.40 | 1.90 | 1.40 | 1.40 | 1.50 |
| | | N= | | | | | |
| 7.00 | 7.00 | | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.50 | 2.20 | | 2.40 | 1.80 | 1.40 | 1.20 | 1.10 |
| | | N= | | | | | |
| 8.00 | 8.00 | | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| | | HN= | | | | | |
| 2.40 | 2.40 | | 2.10 | 1.60 | 1.40 | 1.00 | .80 |
| | | N= | | | | | |
| 9.00 | 9.00 | | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| | | H10= | 2.00 | 1.50 | 1.30 | 1.00 | .60 |
| | | SOM H&2 | 22.11 | 16.39 | 10.56 | 7.52 | 6.52 |
| | | ER | 3.64 | 2.70 | 1.74 | 1.24 | 1.07 |
| | | PROC ER | 100.00 | 74.14 | 47.77 | 34.03 | 29.48 |
| | | EFB | | .04 | .03 | .02 | .01 |
| | | PROC EFB | | 1.19 | .83 | .56 | .43 |
| | | SOM EFB | | 1.19 | 2.03 | 2.59 | 3.03 |
| 2.30 | 2.50 | | | | | | |
| 28.07 | 27.65 | | | | | | |
| 4.63 | 4.56 | | | | | | |
| 126.96 | 125.03 | | | | | | |

Bijlage 12c-I



Bijlage 12c-II

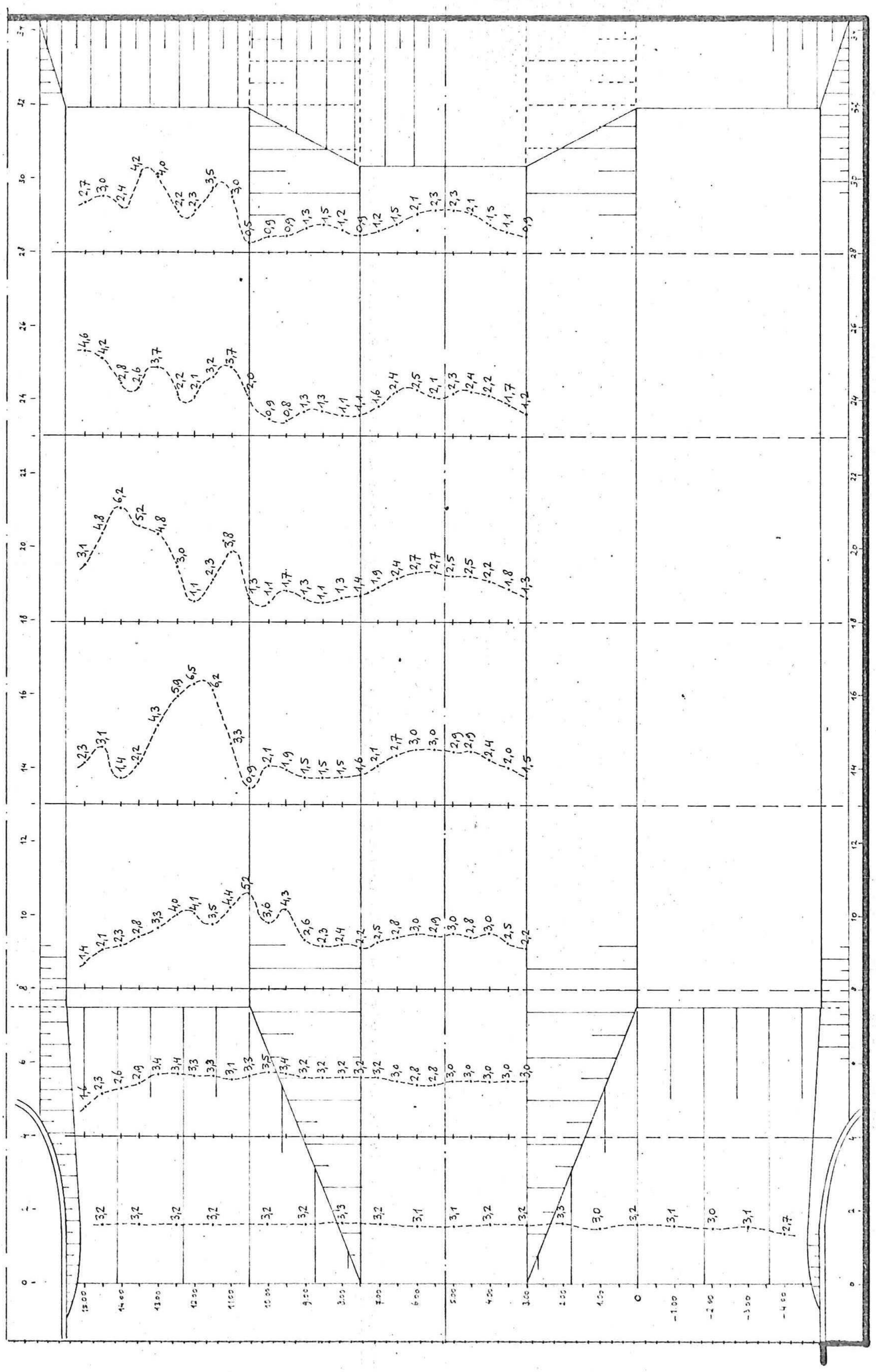
Zonder schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 1.3.4.

| raai 0 | 4 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | 1.40 | | | |
| | | H1= | | | | |
| 3.15 | 2.80 | | 2.20 | 1.90 | 1.50 | 1.10 | .50 |
| | | HN= | | | | |
| 3.10 | 2.80 | | 2.40 | 2.20 | 1.70 | 1.20 | .90 |
| | | H= | | | | |
| 2.00 | 2.00 | | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.00 | 2.70 | | 2.60 | 2.30 | 2.20 | 1.40 | 1.20 |
| | | H= | | | | |
| 3.00 | 3.00 | | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| | | HN= | | | | |
| 2.90 | 2.80 | | 2.70 | 2.30 | 2.10 | 1.70 | 1.70 |
| | | H= | | | | |
| 4.00 | 4.00 | | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.00 | 2.90 | | 3.00 | 2.40 | 2.10 | 1.90 | 1.90 |
| | | H= | | | | |
| 5.00 | 5.00 | | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.10 | 3.00 | | 2.90 | 2.20 | 2.10 | 2.00 | 1.90 |
| | | H= | | | | |
| 6.00 | 6.00 | | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.00 | 2.90 | | 2.70 | 2.20 | 2.10 | 1.90 | 1.70 |
| | | H= | | | | |
| 7.00 | 7.00 | | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| | | HN= | | | | |
| 2.90 | 2.70 | | 2.30 | 2.10 | 1.70 | 1.60 | 1.10 |
| | | H= | | | | |
| 8.00 | 8.00 | | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.00 | 3.00 | | 2.10 | 2.10 | 1.70 | 1.40 | .80 |
| | | H= | | | | |
| 9.00 | 9.00 | | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| | | H10= | 2.00 | 1.90 | 1.50 | 1.20 | .50 |
| | | SOM H&2 | 29.31 | 21.64 | 16.70 | 11.67 | 8.67 |
| | | ER | 4.50 | 3.32 | 2.56 | 1.79 | 1.33 |
| | | PROC ER | 100.00 | 73.83 | 56.96 | 39.83 | 29.59 |
| | | EFB | | .05 | .04 | .03 | .02 |
| | | PROC EFB | | 1.23 | .92 | .68 | .49 |
| | | SOM EFB | | 1.23 | 2.16 | 2.85 | 3.34 |
| 3.10 | 2.90 | | | | | | |
| 40.90 | 36.60 | | | | | | |
| 6.28 | 5.62 | | | | | | |
| 139.52 | 124.85 | | | | | | |

Bijlage 12d-I

nr. 1.3.5

$d_g$ = 0,275 m.
T = 1,2 sec.
exc.= 1,3 cm.

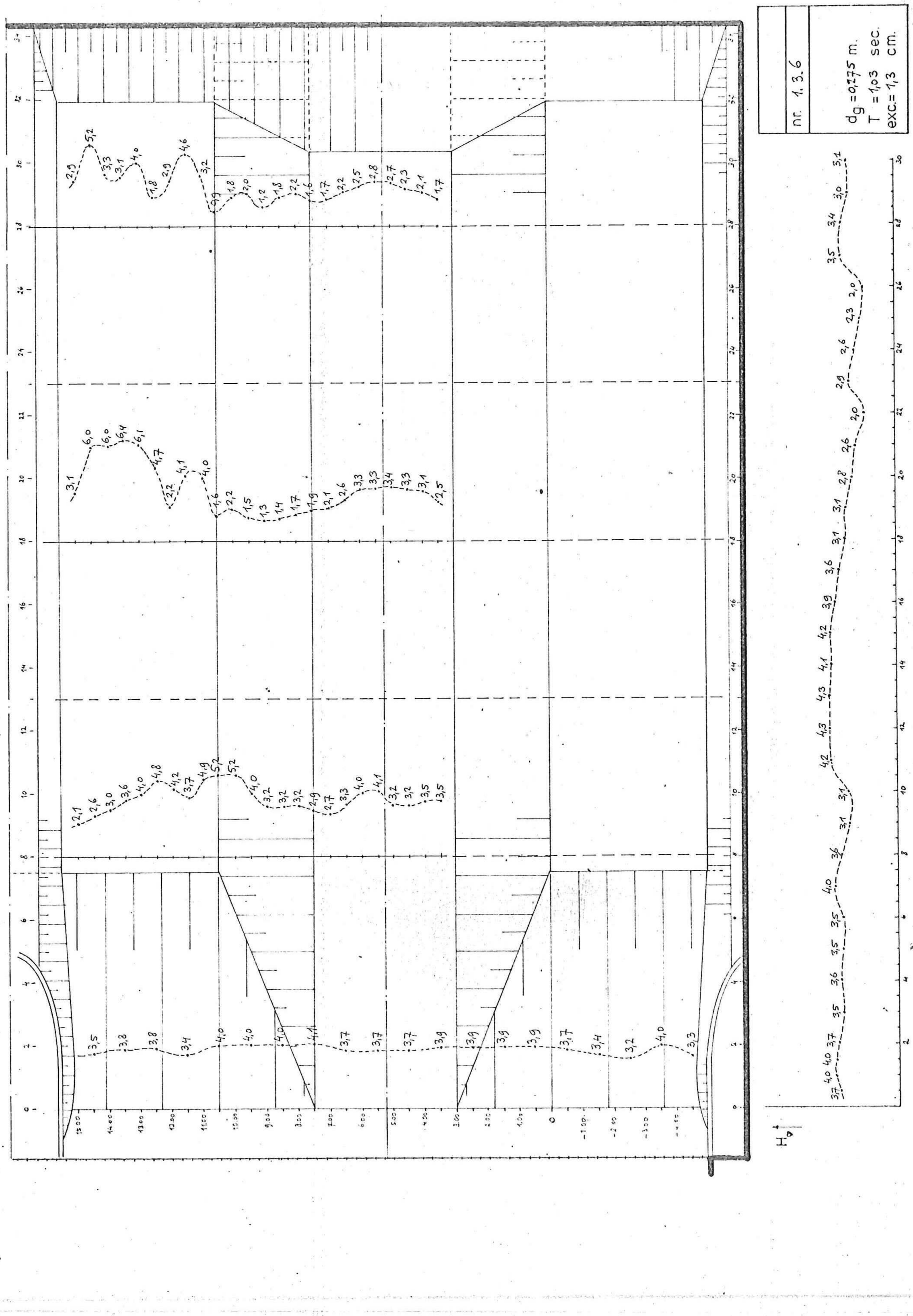


Bijlage 12d-II

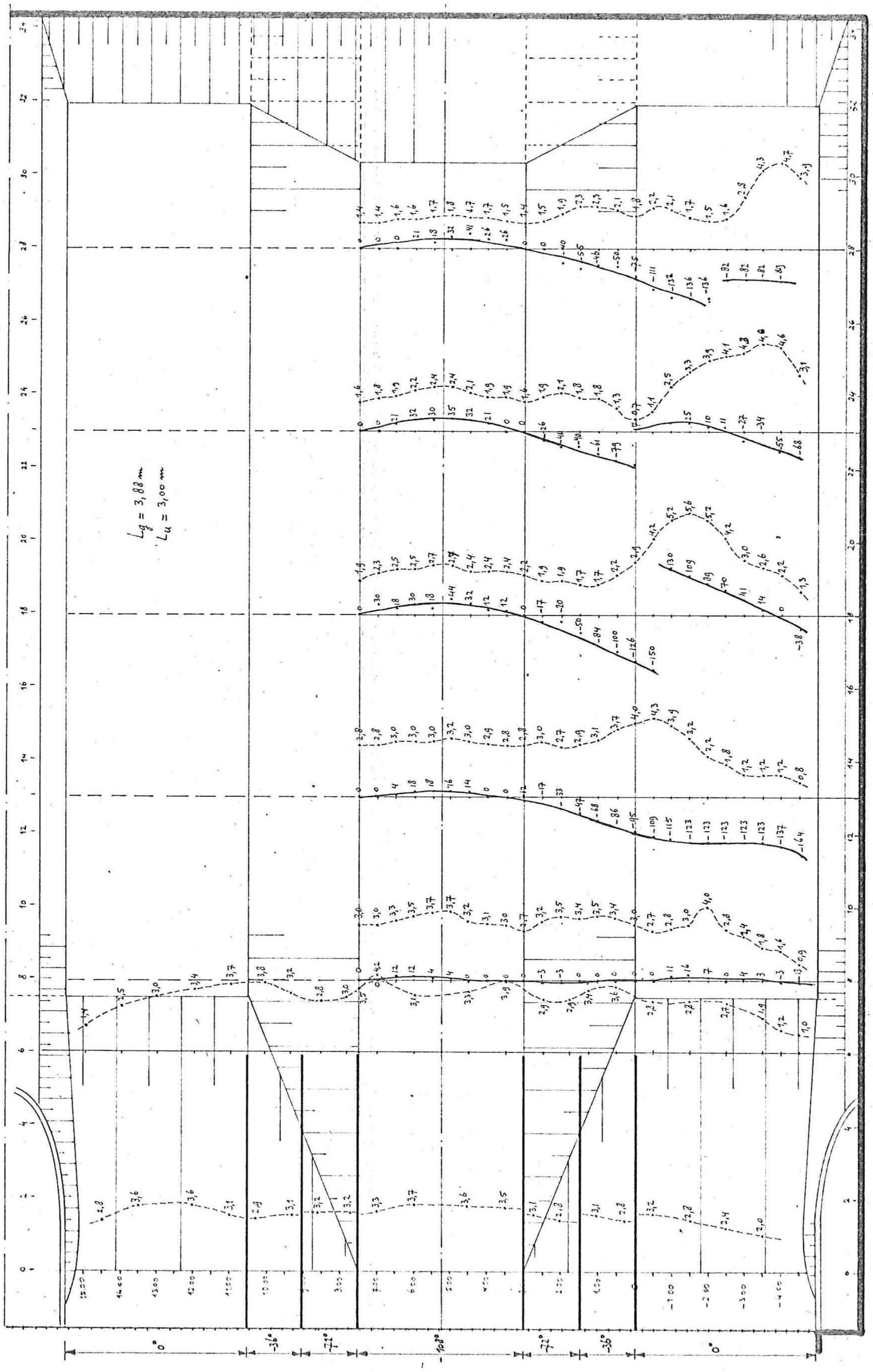
Zonder schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 1.3.5.

| raai 0 | 4 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PERIODE IN SEC | 1.2E | | | |
| | | H1= | | | | |
| 3.25 | 3.20 | | 2.26 | 1.60 | 1.40 | 1.10 .90 |
| | | HN= | | | | |
| 3.2E | 3.20 | | 2.5E | 2.10 | 1.90 | 1.6E 1.20 |
| | | N= | | | | |
| 2.0E | 2.00 | | 2.0E | 2.00 | 2.00 | 2.0E 2.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.1E | 3.00 | | 2.8E | 2.70 | 2.40 | 2.4E 1.50 |
| | | N= | | | | |
| 3.0E | 3.00 | | 3.0E | 3.00 | 3.00 | 3.0E 3.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.1E | 2.80 | | 3.0E | 3.00 | 2.70 | 2.5E 2.10 |
| | | N= | | | | |
| 4.0E | 4.00 | | 4.0E | 4.00 | 4.00 | 4.00 4.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.1E | 2.80 | | 2.9E | 3.00 | 2.70 | 2.1E 2.30 |
| | | N= | | | | |
| 5.0E | 5.00 | | 5.0E | 5.00 | 5.00 | 5.00 5.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.1E | 3.00 | | 3.0E | 2.90 | 2.50 | 2.3E 2.30 |
| | | N= | | | | |
| 6.0E | 6.00 | | 6.0E | 6.00 | 6.00 | 6.00 6.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.1E | 3.00 | | 2.8E | 2.90 | 2.50 | 2.4E 2.10 |
| | | N= | | | | |
| 7.0E | 7.00 | | 7.0E | 7.00 | 7.00 | 7.00 7.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.2E | 3.00 | | 3.0E | 2.40 | 2.20 | 2.2E 1.50 |
| | | N= | | | | |
| 8.0E | 8.00 | | 8.0E | 8.00 | 8.00 | 8.0E 8.00 |
| | | HN= | | | | |
| 3.2E | 3.00 | | 2.5E | 2.0E | 1.8E | 1.7E 1.10 |
| | | N= | | | | |
| 9.0E | 9.00 | | 9.0E | 9.00 | 9.00 | 9.0E 9.00 |
| | | H10= | 2.2E | 1.5E | 1.3E | 1.2E .9E |
| | | SOM H&2 | 34.21 | 29.34 | 23.17 | 19.54 13.68 |
| | | ER | 4.74 | 4.07 | 3.21 | 2.71 1.89 |
| | | PROC ER | 100.00 | 85.75 | 67.74 | 57.1E 39.98 |
| | | EFB | | .06 | .05 | .04 .03 |
| | | PROC EFB | | 1.32 | 1.09 | .8E .69 |
| | | SOM EFB | | 1.32 | 2.42 | 3.31 4.00 |
| 3.2E | 3.00 | | | | | |
| 44.89 | 40.27 | | | | | |
| 6.22 | 5.58 | | | | | |
| 131.2E | 117.69 | | | | | |

Bijlage 12e-I

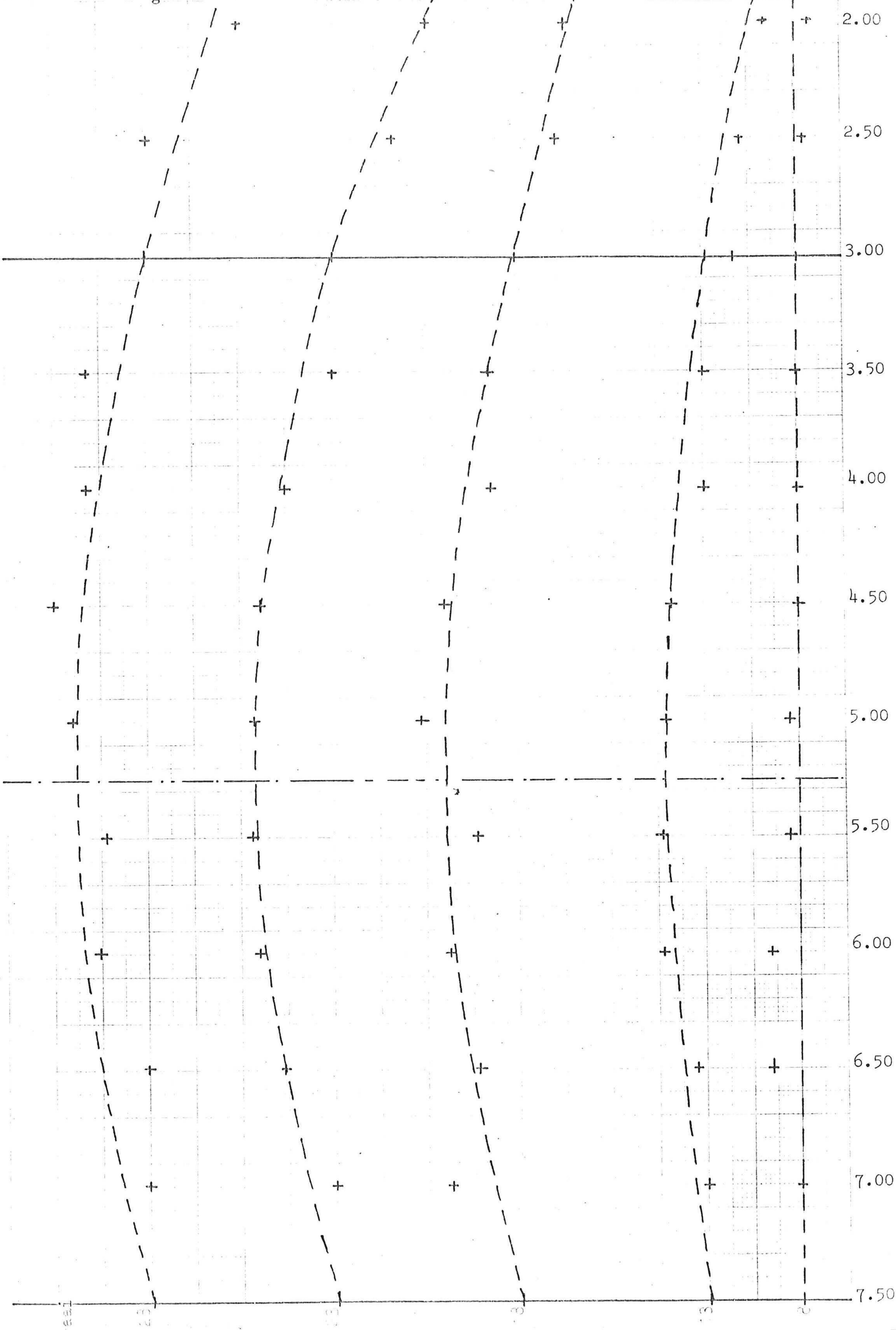


Bijlage 13a-I



Met schotten; $d_g$=0,35 m; T=2,2 sec; codenr 2.1.1 ; schaal 1:20

Bijlage 13a-Ia



Met schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 2.1.1.

| raai 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC 2.20 | | | | |
| H1= 3.00 | 2.80 | 1.90 | 1.60 | 1.40 |
| HN= 3.00 | 2.80 | 2.30 | 1.80 | 1.40 |
| N= 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= 3.30 | 3.00 | 2.50 | 1.90 | 1.60 |
| N= 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= 3.50 | 3.00 | 2.50 | 2.20 | 1.60 |
| N= 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= 3.70 | 3.00 | 2.70 | 2.40 | 1.70 |
| N= 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= 3.70 | 3.20 | 2.70 | 2.40 | 1.80 |
| N= 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= 3.20 | 3.00 | 2.40 | 2.10 | 1.70 |
| N= 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= 3.10 | 2.90 | 2.40 | 1.90 | 1.70 |
| N= 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= 3.00 | 2.80 | 2.40 | 1.90 | 1.50 |
| N= 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= 2.70 | 2.80 | 2.20 | 1.60 | 1.40 |
| SOM H&2 48.25 | 39.08 | 26.93 | 18.70 | 11.60 |
| ER 9.71 | 7.86 | 5.42 | 3.76 | 2.33 |
| PROC ER 100.00 | 80.99 | 55.82 | 38.75 | 24.03 |
| EFB | .07 | .05 | .03 | .02 |
| PROC EFB | .77 | .58 | .40 | .26 |
| SOM EFB | .77 | 1.35 | 1.76 | 2.02 |

Bijlage 13b-I

nr. 2.1.3

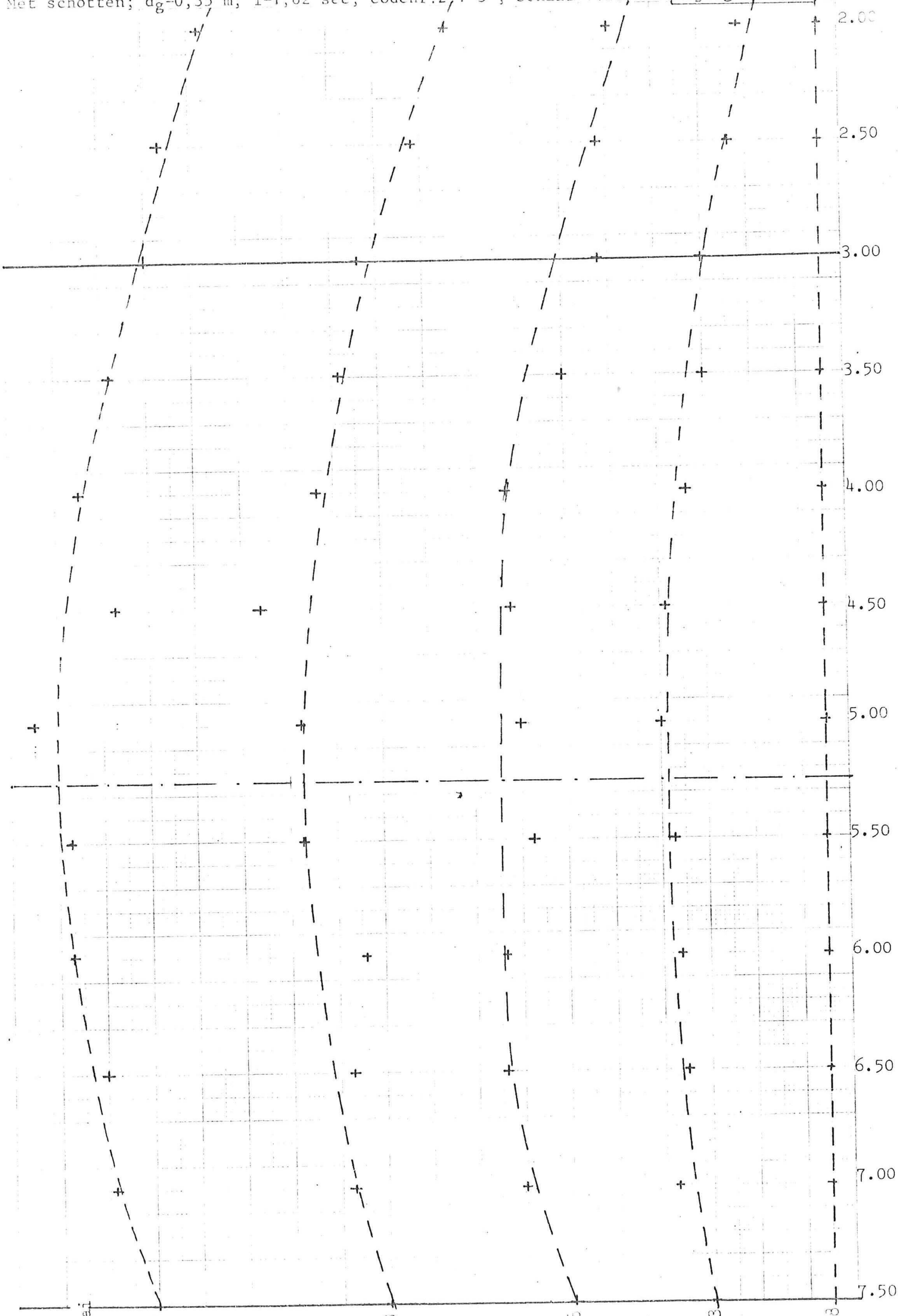
"SCHOTTEN"
$d_g$ = 0,35 m.
T = 1,62 sec.
exc.= 1,9 cm.

$L_g$ = 2,175 m
$L_4$ = 2,14 m

$H_o$

Met schotten; $d_g$=0,35 m; T=1,62 sec; codenr.2,1 3 ; schaal 1:20,

Bijlage 13b-Ia



Bijlage 13b-II

Met schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 2.1.3.

| raai 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC 1.62 | | | | |
| H1= 4.50 | 3.40 | 2.90 | 2.20 | 1.90 |
| HN= 5.40 | 3.80 | 3.30 | 2.50 | 2.00 |
| N= 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= 5.40 | 4.30 | 3.70 | 2.80 | 1.90 |
| N= 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= 4.70 | 4.70 | 3.60 | 3.00 | 2.10 |
| N= 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= 4.60 | 4.90 | 3.70 | 3.00 | 2.20 |
| N= 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= 4.40 | 4.80 | 3.60 | 2.90 | 2.20 |
| N= 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= 4.50 | 4.10 | 3.50 | 2.50 | 2.40 |
| N= 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= 4.90 | 3.80 | 3.10 | 2.60 | 2.30 |
| N= 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= 4.80 | 3.50 | 2.80 | 2.50 | 2.00 |
| N= 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= 4.20 | 3.10 | 2.70 | 2.40 | 1.70 |
| SOM H&2 103.58 | 78.07 | 50.87 | 32.53 | 20.00 |
| ER 10.12 | 13.66 | 8.90 | 5.69 | 3.50 |
| PROC ER 100.00 | 75.37 | 49.10 | 31.40 | 19.30 |
| EFB | .14 | .10 | .06 | .04 |
| PROC EFB | .81 | .57 | .37 | .23 |
| SOM EFB | .81 | 1.38 | 1.76 | 1.99 |

...

Bijlage 13c-I

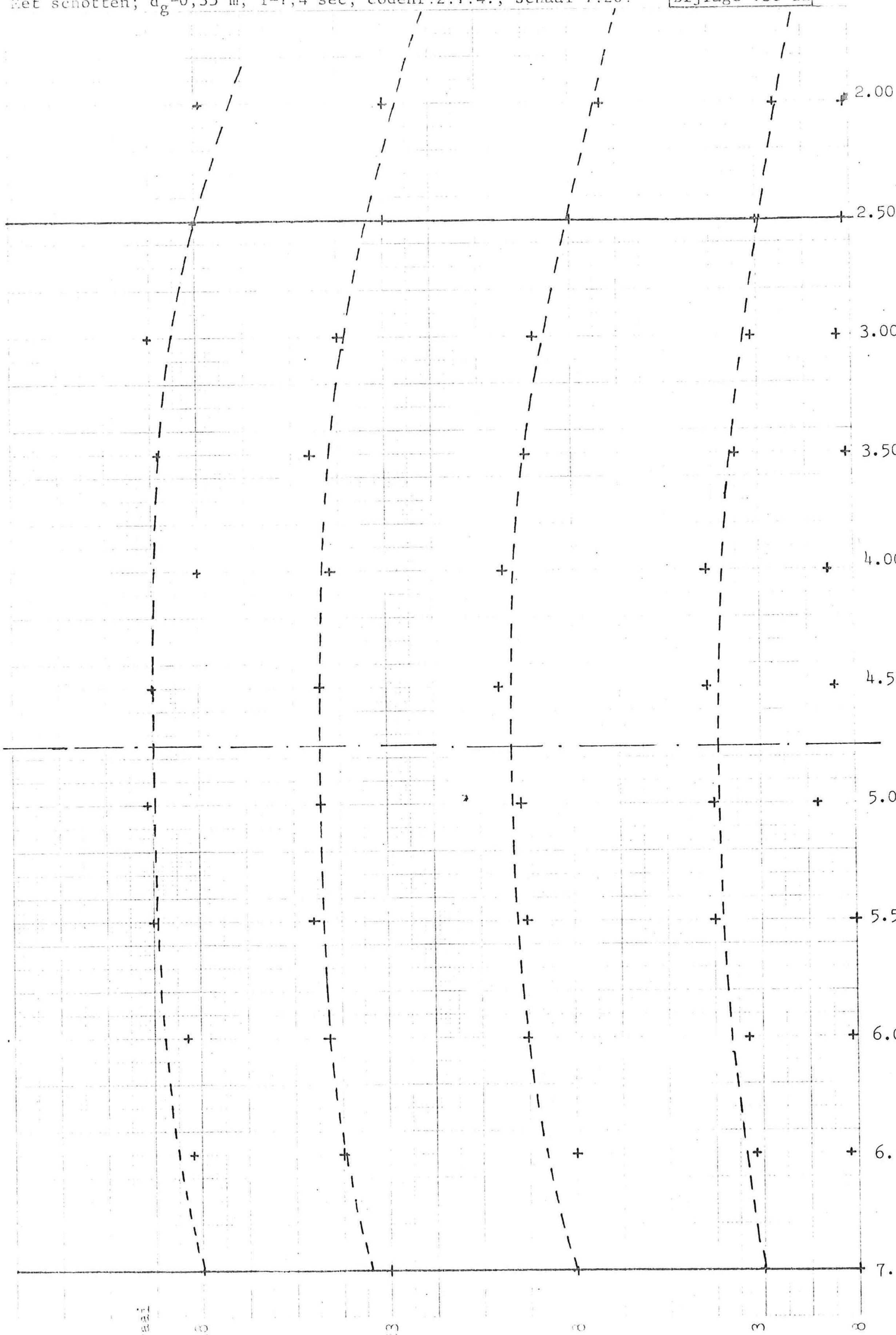
| | |
|---|---|
| nr. 2.1.4 | |
| "SCHOTTEN" | |
| $d_g$ = 0,35 m. | |
| T = 1,4 sec. | |
| exc.= 1,9 cm. | |

$L_g$ = 2,28 m
$L_u$ = 1,82 m

H

Met schotten; $d_g$=0,35 m; T=1,4 sec; codenr.2.1.4.; schaal 1:20.

Bijlage 13c-Ia



Bijlage 13c-II

Met schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 2.1.4.

| raai 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC 1.40 | | | | |
| H1= 4.10 | 3.30 | 3.20 | 2.40 | 2.20 |
| HN= 4.50 | 3.80 | 3.20 | 2.70 | 2.40 |
| N= 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= 4.80 | 4.40 | 3.50 | 3.00 | 2.80 |
| N= 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= 5.00 | 4.60 | 3.70 | 3.20 | 2.90 |
| N= 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= 5.40 | 5.20 | 3.70 | 3.50 | 2.80 |
| N= 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= 5.30 | 4.90 | 4.10 | 3.30 | 2.40 |
| N= 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= 4.90 | 4.30 | 4.00 | 3.10 | 2.20 |
| N= 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= 4.90 | 3.80 | 3.70 | 2.90 | 2.50 |
| N= 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= 4.40 | 3.50 | 3.00 | 3.00 | 2.50 |
| N= 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= 4.20 | 3.40 | 3.00 | 2.40 | 2.10 |
| SOM H&2 105.07 | 81.20 | 57.49 | 41.22 | 28.78 |
| ER 16.94 | 13.09 | 9.27 | 6.64 | 4.64 |
| PROC ER 100.00 | 77.28 | 54.71 | 39.23 | 27.39 |
| EFB | .14 | .10 | .07 | .05 |
| PROC EFB | .83 | .61 | .44 | .31 |
| SOM EFB | .83 | 1.45 | 1.89 | 2.20 |

...

Bijlage 13d-I

nr. 2.1.5.

„SCHOTTEN"

$d_g$ = 9,35 m.

T = 1,2 sec.

exc.= 1,9 cm.

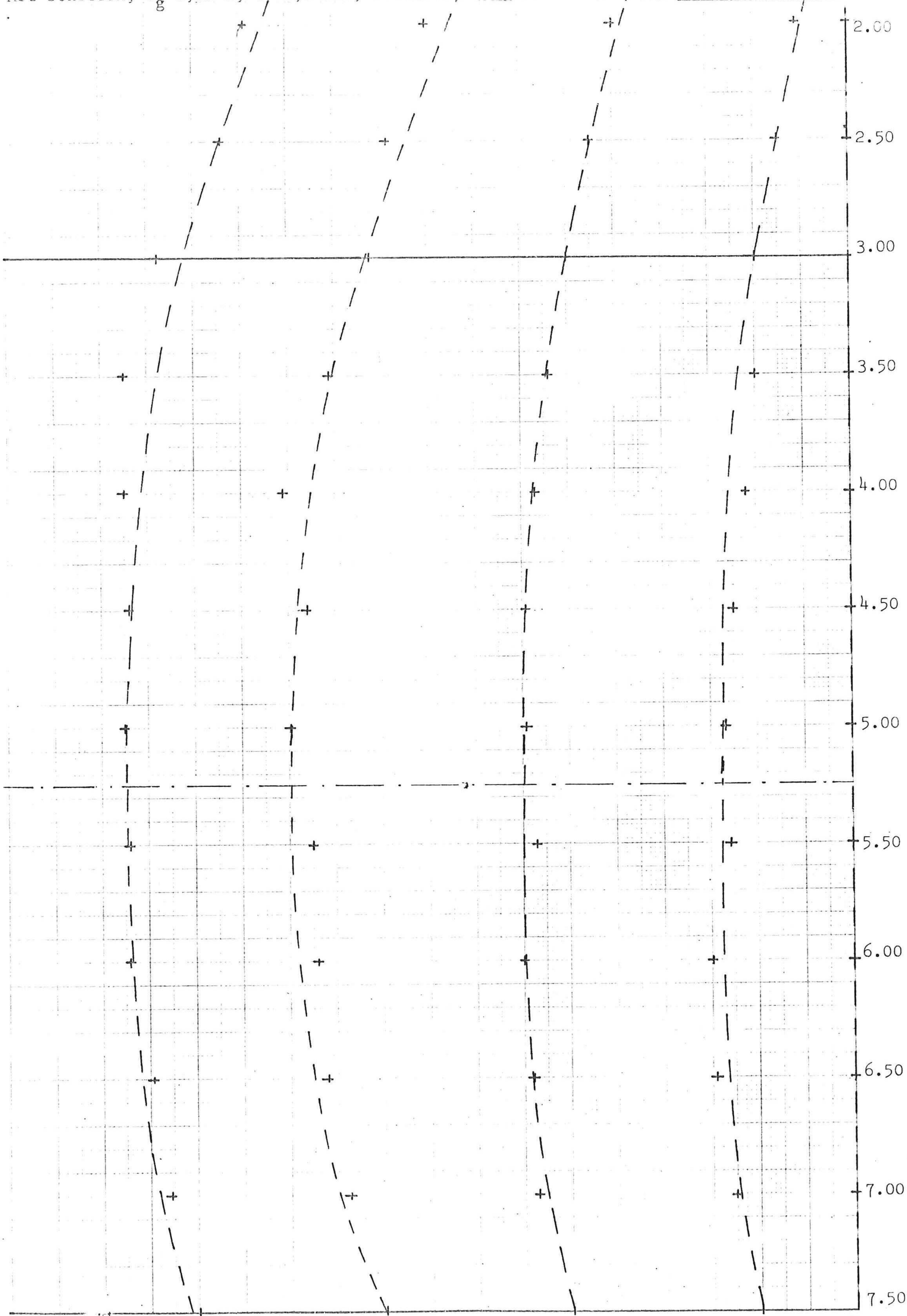
$L_g$ = 1,86

$L_4$ = 1,53

$H_o$

Met schotten; $d_g$=0,35 m; T= 1,2 sec; codenr.2,1.5 ; schaal 1:20

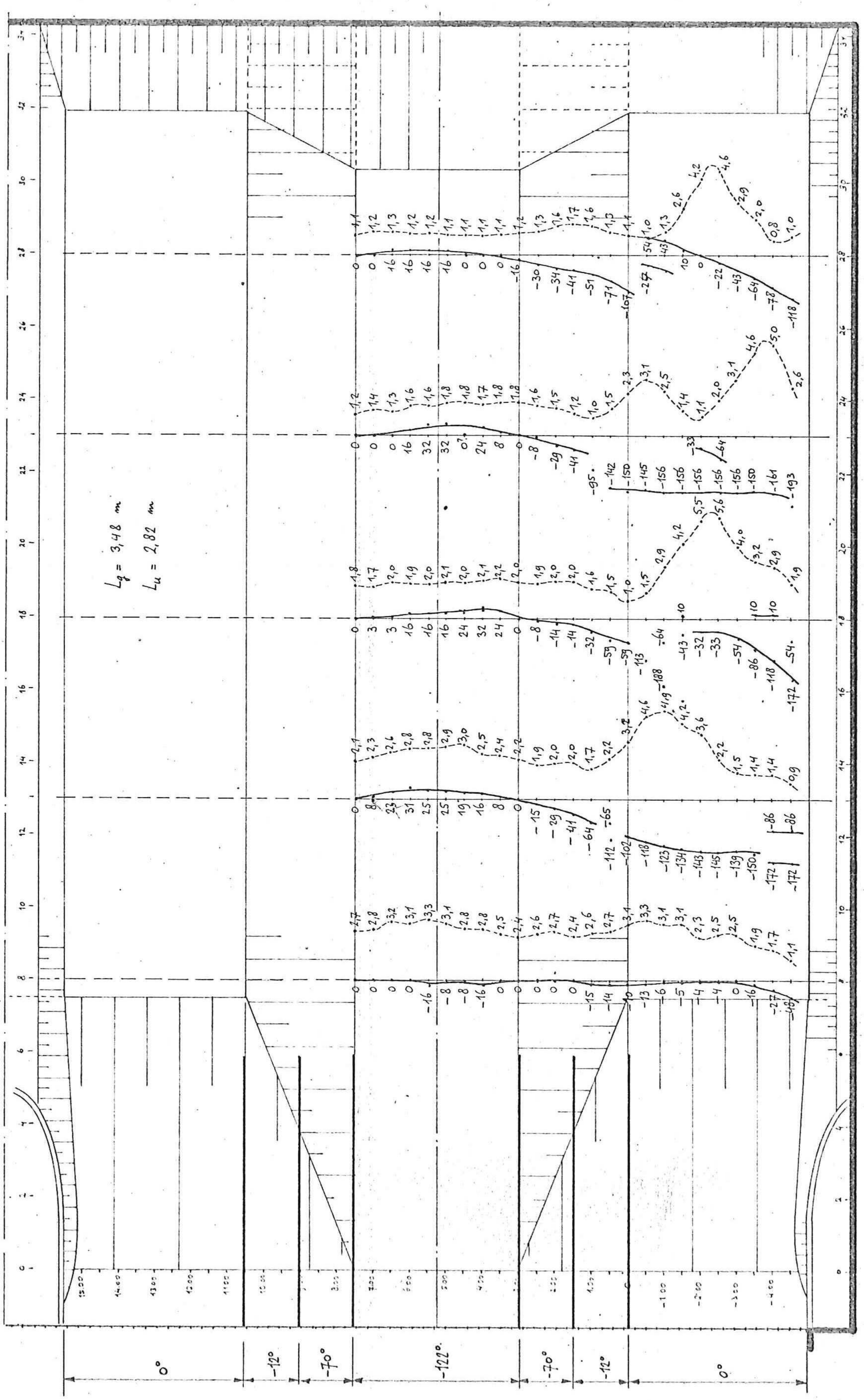
Bijlage 13d-Ia



Met schotten; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 2.1.5.

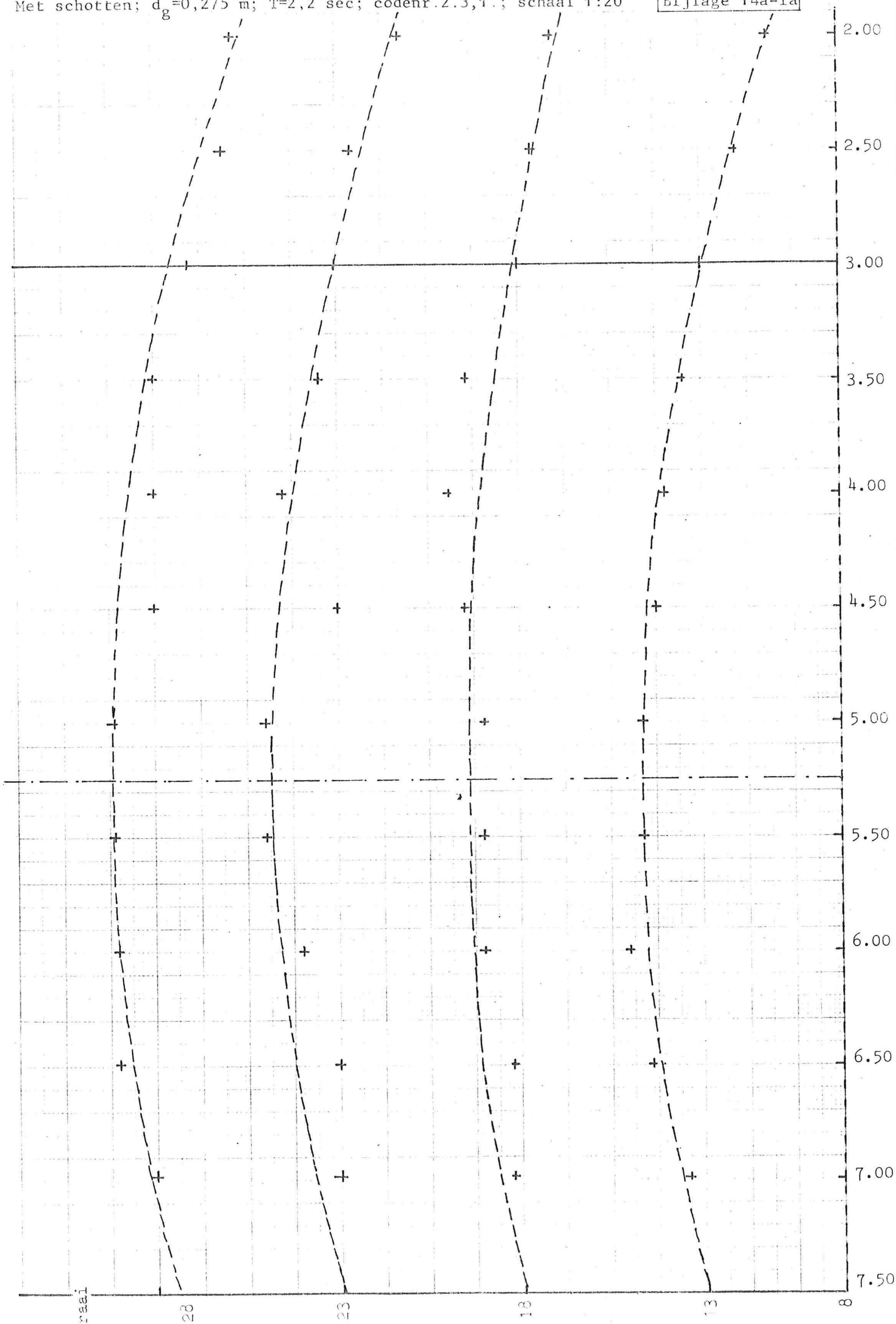
| raai 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC 1.20 | | | | |
| H1= 5.50 | 4.10 | 3.0 | 2.80 | 2.35 |
| HN= 5.60 | 5.20 | 3.4 | 3.60 | 2.80 |
| N= 2.00 | 2.00 | 2.0 | 2.00 | 2.00 |
| HN= 5.40 | 5.60 | 4.2 | 4.30 | 3.50 |
| N= 3.00 | 3.00 | 3.0 | 3.00 | 3.00 |
| HN= 6.00 | 5.80 | 5.1 | 4.00 | 3.50 |
| N= 4.00 | 4.00 | 4.0 | 4.00 | 4.00 |
| HN= 7.30 | 6.10 | 5.5 | 4.20 | 3.60 |
| N= 5.00 | 5.00 | 5.0 | 5.00 | 5.00 |
| HN= 7.10 | 6.20 | 5.7 | 4.60 | 4.00 |
| N= 6.00 | 6.00 | 6.0 | 6.00 | 6.00 |
| HN= 5.60 | 6.00 | 5.0 | 4.20 | 4.00 |
| N= 7.00 | 7.00 | 7.0 | 7.00 | 7.00 |
| HN= 4.80 | 5.30 | 4.6 | 3.90 | 3.50 |
| N= 8.00 | 8.00 | 8.0 | 8.00 | 8.00 |
| HN= 5.00 | 4.80 | 4.1 | 3.60 | 3.20 |
| N= 9.00 | 9.00 | 9.0 | 9.00 | 9.00 |
| H10= 5.00 | 4.30 | 4.00 | 3.20 | 3.00 |
| SOM H&2 153.62 | 136.23 | 96.71 | 70.55 | 53.46 |
| ER 21.50 | 19.07 | 13.53 | 9.87 | 7.48 |
| PROC ER 100.00 | 88.68 | 62.95 | 45.92 | 34.80 |
| EFB | .18 | .14 | .10 | .07 |
| PROC EFB | .85 | .68 | .49 | .36 |
| SOM EFB | .85 | 1.54 | 2.03 | 2.39 |

Bijlage 14a-I



Met schotten; $d_g$=0,275 m; T=2,2 sec; codenr.2.3,1.; schaal 1:20

Bijlage 14a-Ia



Met schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 2.3.1.

| raai | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC | 2.20 | | | | |
| H1= | 2.70 | 2.10 | 1.80 | 1.20 | 1.10 |
| HN= | 2.80 | 2.30 | 1.70 | 1.40 | 1.20 |
| N= | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= | 3.20 | 2.60 | 2.00 | 1.30 | 1.30 |
| N= | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= | 3.10 | 2.80 | 1.90 | 1.60 | 1.20 |
| N= | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= | 3.30 | 2.80 | 2.00 | 1.60 | 1.20 |
| N= | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= | 3.10 | 2.90 | 2.10 | 1.80 | 1.10 |
| N= | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= | 2.80 | 3.00 | 2.00 | 1.80 | 1.10 |
| N= | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= | 2.80 | 2.50 | 2.10 | 1.70 | 1.10 |
| N= | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= | 2.50 | 2.40 | 2.20 | 1.80 | 1.10 |
| N= | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= | 2.40 | 2.20 | 2.00 | 1.80 | 1.20 |
| SOM H&2 | 38.32 | 30.88 | 17.89 | 11.86 | 6.08 |
| ER | 6.99 | 5.63 | 3.26 | 2.16 | 1.11 |
| PROC ER | 100.00 | 80.59 | 46.68 | 30.94 | 15.88 |
| EFB | | .07 | .05 | .03 | .02 |
| PROC EFB | | 1.11 | .78 | .48 | .29 |
| SOM EFB | | 1.11 | 1.90 | 2.38 | 2.67 |

Bijlage 14b-I

nr. 2.3.3

"SCHOTTEN"
$d_g$ = 0,175 m.
T = 1,62 sec.
exc.= 1,9 cm.

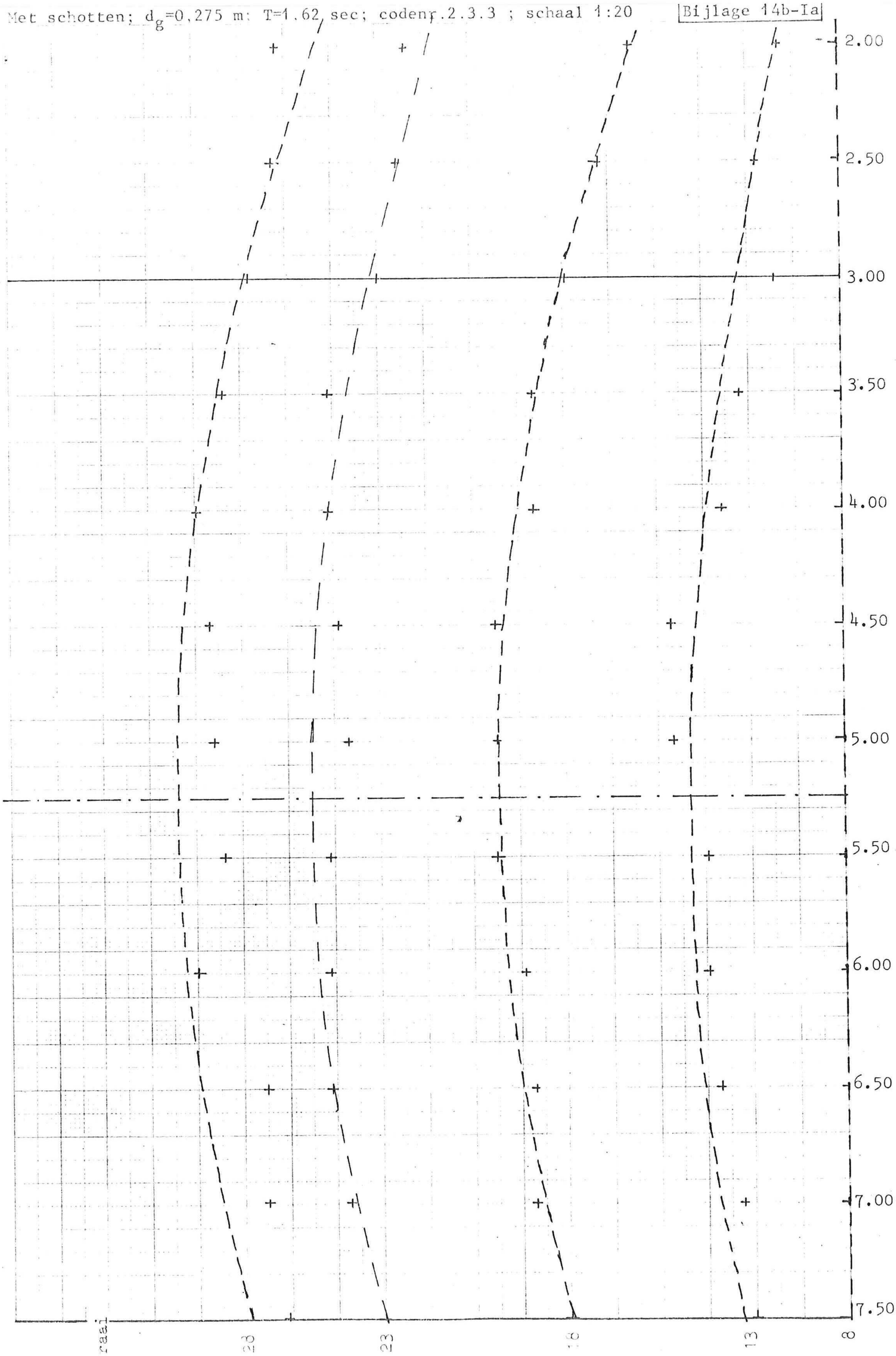
$L_g$ = 2,46 m
$L_u$ = 1,72 m

0°
-25°
-110°
-204°
-110°
-25°
0°

$H_s$

Met schotten; $d_g$=0,275 m; T=1.62 sec; codenr.2.3.3 ; schaal 1:20

Bijlage 14b-Ia



Met schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 2.3.3.

| raai 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC 1.62 | | | | |
| H1= | | | | |
| 2.80 | 2.90 | 2.40 | 2.30 | 1.20 |
| HN= | | | | |
| 3.50 | 3.20 | 2.60 | 2.40 | 1.60 |
| N= | | | | |
| 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= | | | | |
| 4.10 | 3.50 | 3.00 | 2.70 | 2.00 |
| N= | | | | |
| 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= | | | | |
| 4.20 | 3.80 | 3.40 | 2.60 | 2.20 |
| N= | | | | |
| 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= | | | | |
| 4.10 | 3.80 | 3.40 | 2.50 | 2.10 |
| N= | | | | |
| 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= | | | | |
| 4.00 | 4.10 | 3.60 | 2.80 | 2.00 |
| N= | | | | |
| 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= | | | | |
| 4.10 | 3.50 | 3.30 | 2.50 | 2.10 |
| N= | | | | |
| 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= | | | | |
| 3.90 | 3.10 | 2.80 | 2.50 | 1.80 |
| N= | | | | |
| 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= | | | | |
| 4.00 | 2.90 | 2.50 | 2.50 | 1.70 |
| N= | | | | |
| 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= | | | | |
| 3.20 | 2.70 | 2.20 | 2.10 | 1.60 |
| SOM H&2 | | | | |
| 68.28 | 53.15 | 41.06 | 28.75 | 16.17 |
| ER | | | | |
| 11.26 | 8.76 | 6.77 | 4.74 | 2.66 |
| PROC ER | | | | |
| 100.00 | 77.83 | 60.13 | 42.10 | 23.68 |
| EFB | | | | |
| | .13 | .10 | .07 | .05 |
| PROC EFB | | | | |
| | 1.22 | .94 | .70 | .45 |
| SOM EFB | | | | |
| | 1.22 | 2.17 | 2.87 | 3.32 |

Bijlage 14c-I

| | |
|---|---|
| nr. 2.3.4 | |
| "SCHOTTEN" | |
| $d_g$ = 0,275 m. | |
| T = 1,4 sec. | |
| exc.= 1,9 cm. | |

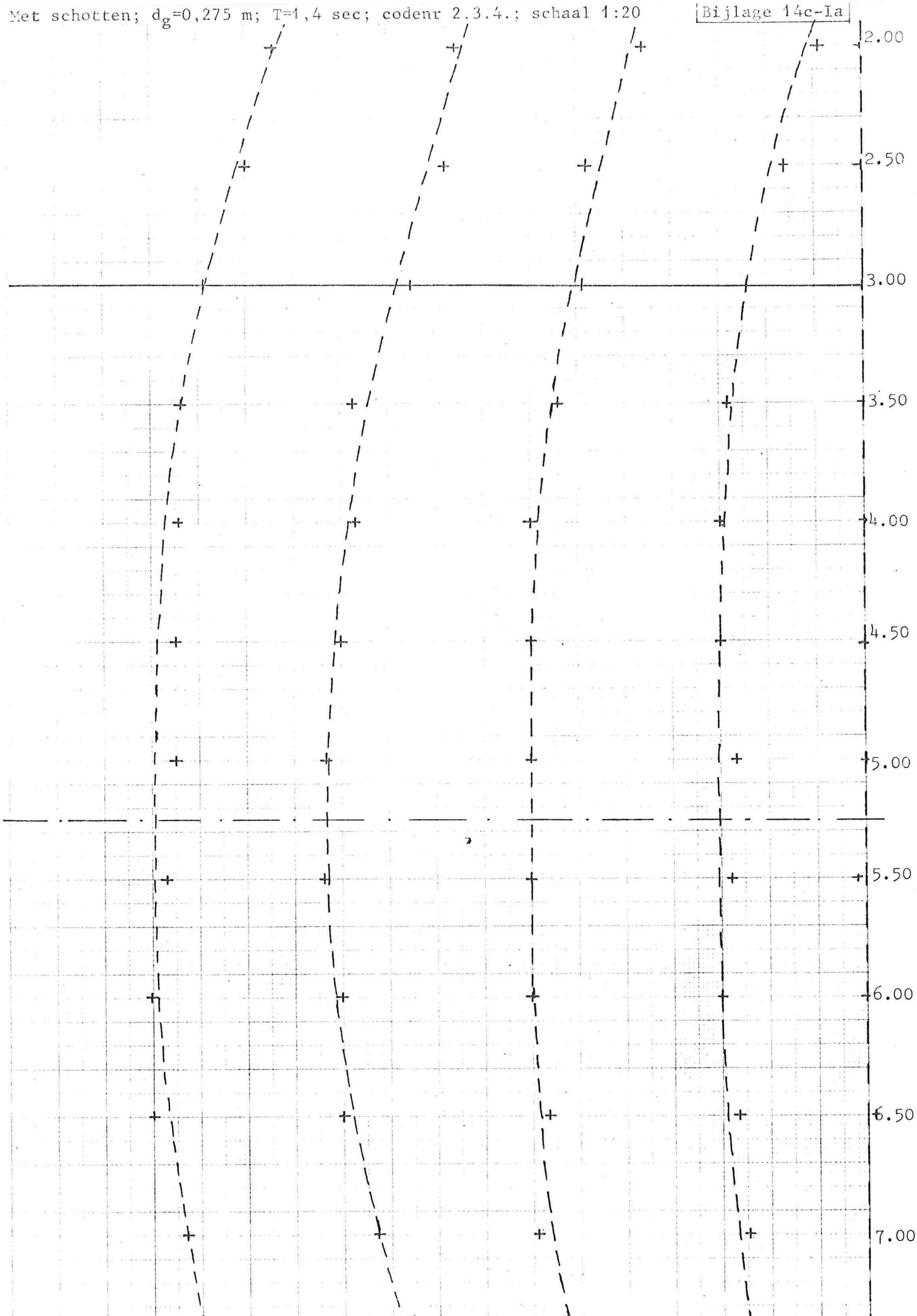
$L_g$ = 2,09 m
$L_u$ = 1,49 m

0° -12° -148° -228° -148° -12° 0°

$H_s$

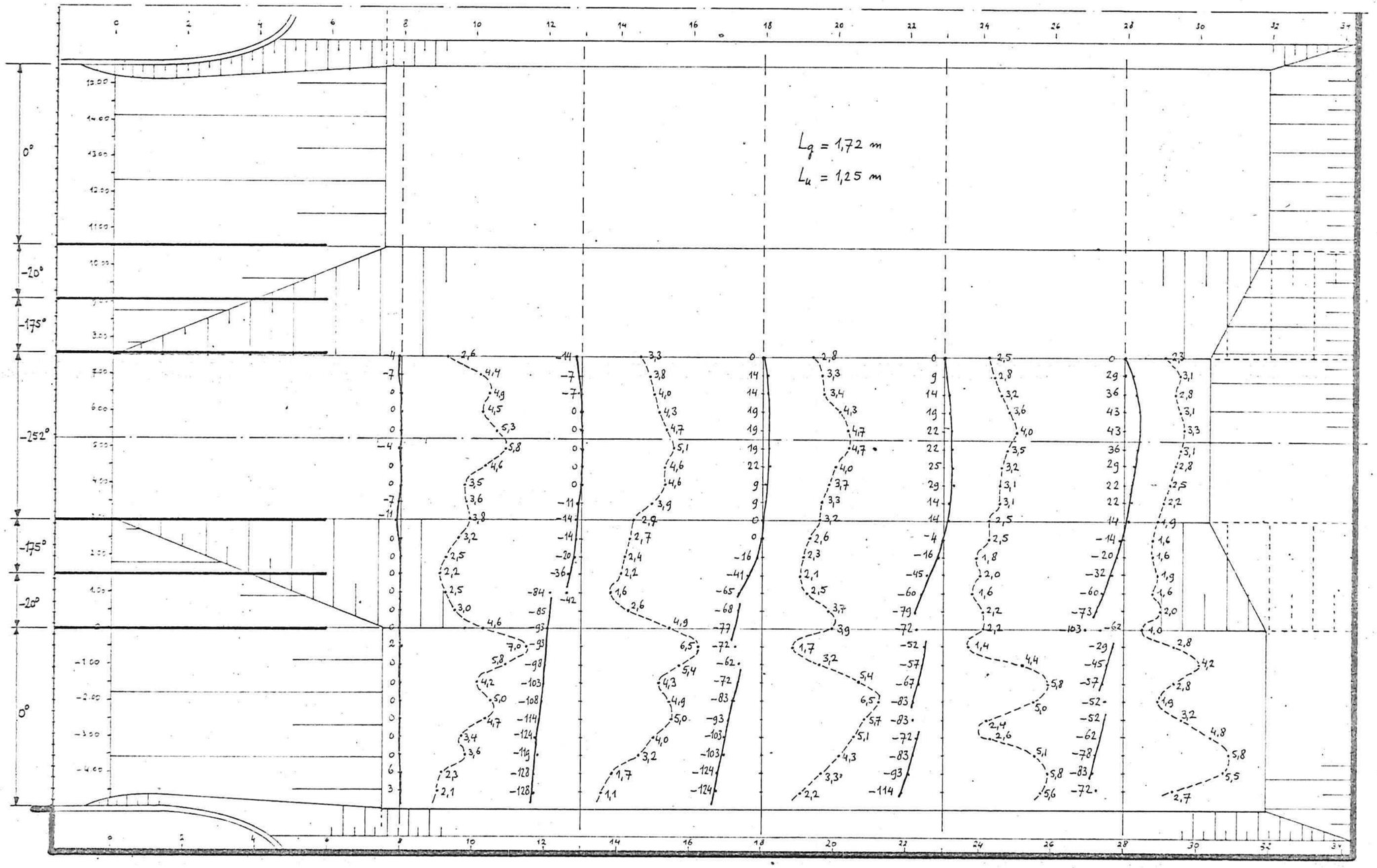
Met schotten; $d_g$=0,275 m; T=1,4 sec; codenr 2.3.4.; schaal 1:20

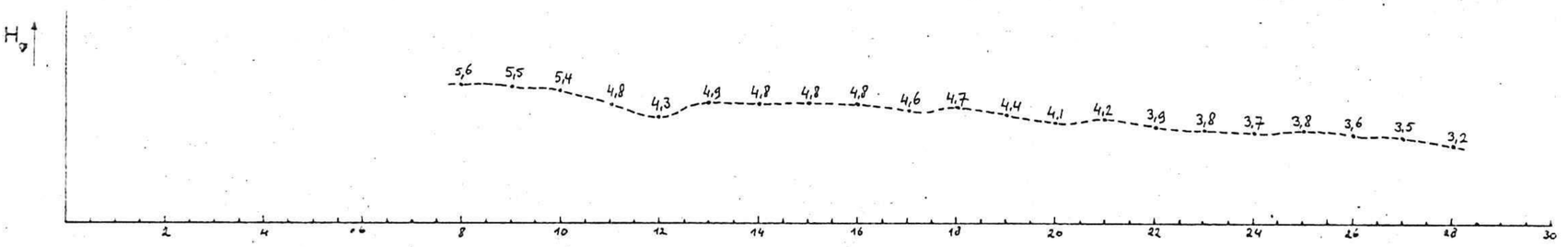
Bijlage 14c-Ia



Met schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 2.3.4.

| raai 8 | | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC | 1.40 | | | | |
| H1= | 3.70 | 3.00 | 2.30 | 2.20 | 1.60 |
| HN= | 3.70 | 3.80 | 2.80 | 2.20 | 2.00 |
| N= | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= | 3.90 | 3.80 | 3.30 | 2.50 | 2.50 |
| N= | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= | 4.40 | 4.00 | 3.70 | 3.00 | 2.80 |
| N= | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= | 4.50 | 3.90 | 3.80 | 3.40 | 2.60 |
| N= | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= | 4.70 | 4.30 | 3.60 | 3.70 | 2.60 |
| N= | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= | 4.20 | 4.00 | 3.30 | 3.40 | 2.70 |
| N= | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= | 4.10 | 3.70 | 3.30 | 3.00 | 2.30 |
| N= | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= | 3.90 | 3.40 | 3.10 | 2.60 | 2.00 |
| N= | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= | 3.50 | 3.20 | 2.60 | 2.30 | 3.10 |
| SOM H&2 | 76.61 | 64.72 | 48.61 | 38.86 | 27.13 |
| ER | 11.77 | 9.95 | 7.47 | 5.97 | 4.17 |
| PROC ER | 100.00 | 84.48 | 63.45 | 50.72 | 35.42 |
| EFB | | .15 | .12 | .09 | .07 |
| PROC EFB | | 1.31 | 1.05 | .81 | .61 |
| SOM EFB | | 1.31 | 2.36 | 3.17 | 3.78 |




nr. 2.3.5

SCHOTTEN

$d_g$ = 0,275 m.

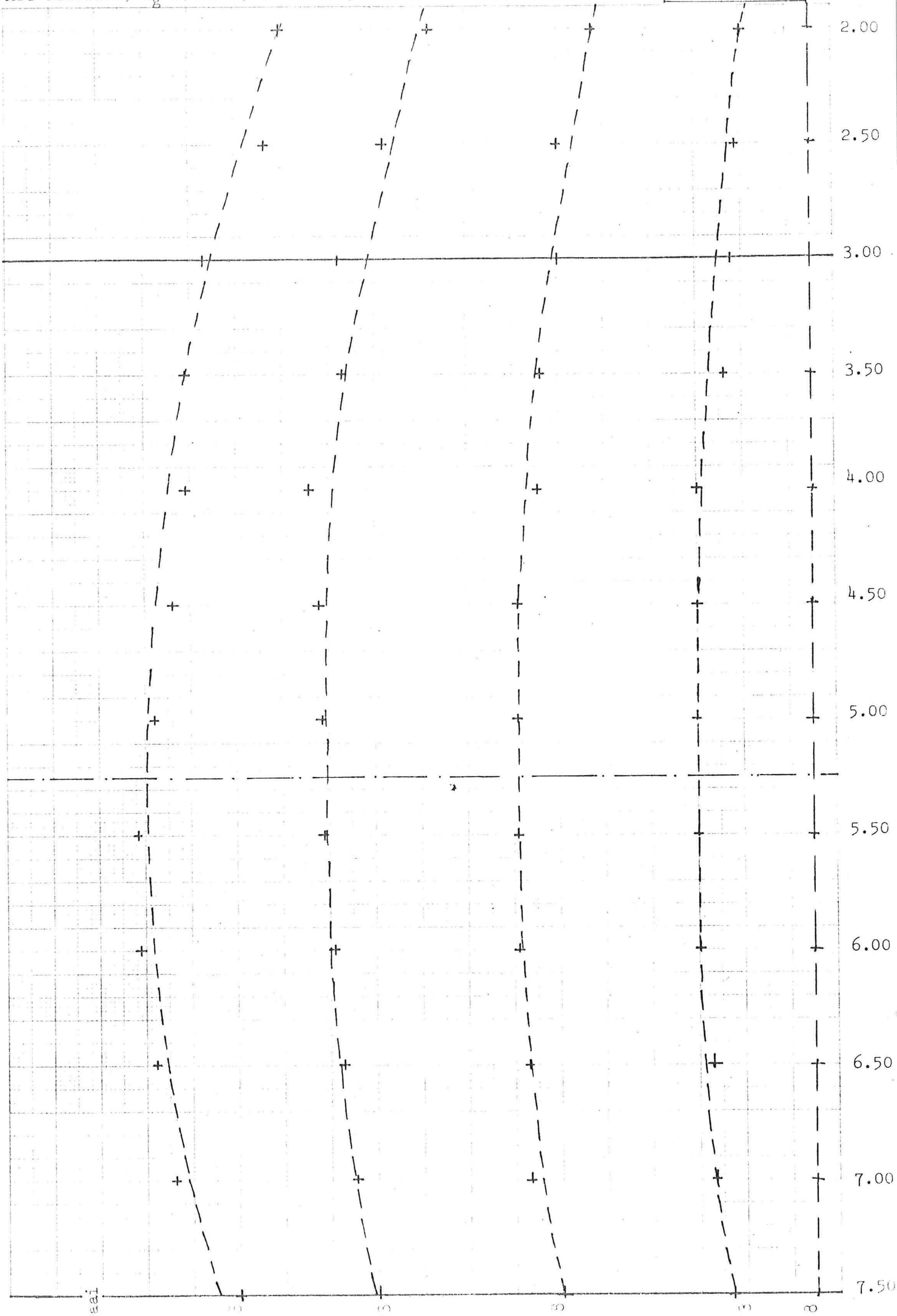
T = 1,2 sec.

exc.= 1,9 cm.

Bijlage 14d-I

Met schotten; $d_g$=0,275 m; T=1,2 sec; codenr. 2.3.5.; schaal 1:20

Bijlage 14d-Ia

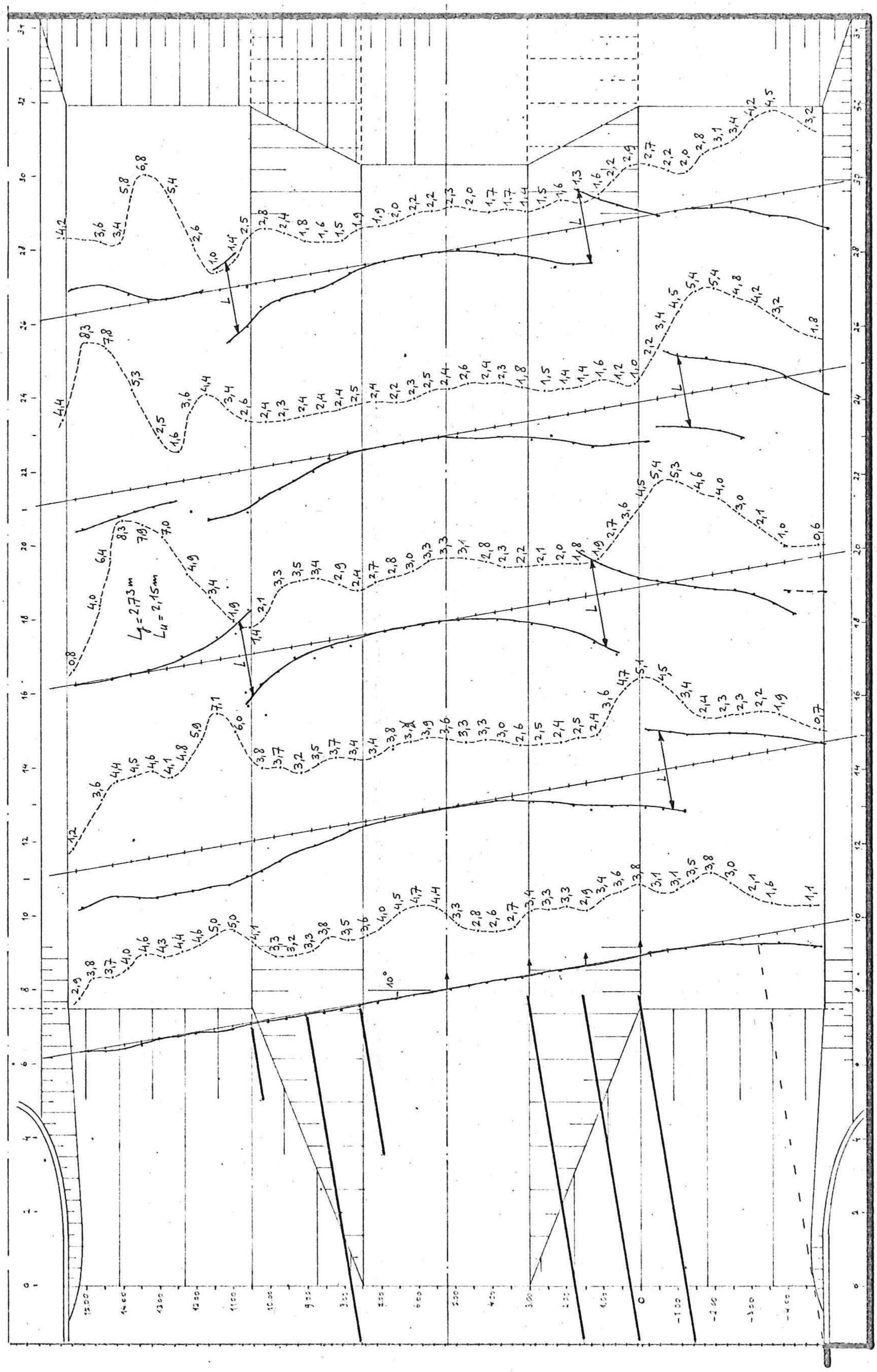


Met schotten; $d_g$ = 0,275 m; codenr. 2.3.5.

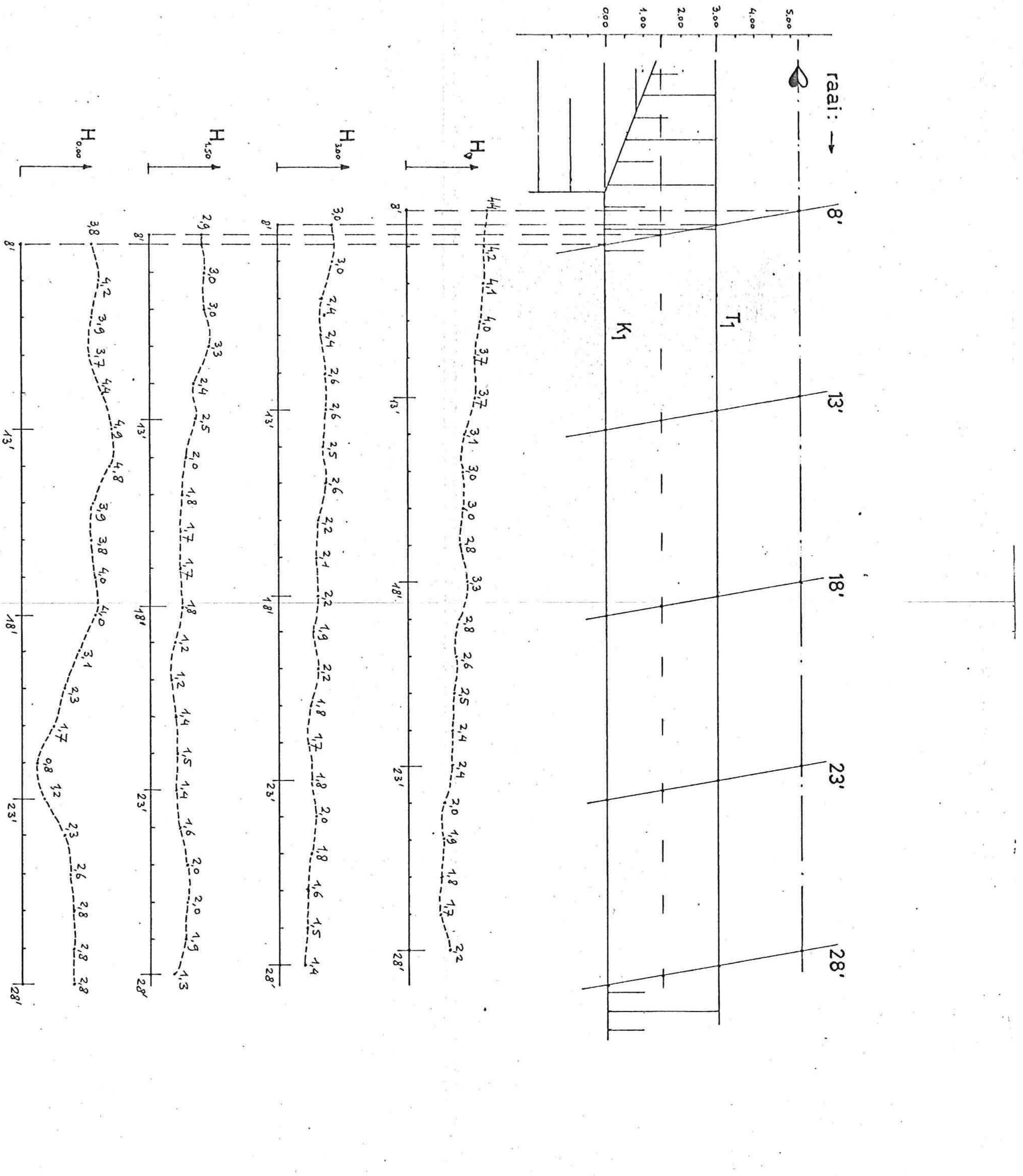
| raai | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC | 1.20 | | | | |
| H1= | 2.60 | 3.30 | 2.80 | 2.50 | 2.30 |
| HN= | 4.40 | 3.80 | 3.30 | 2.80 | 3.10 |
| N= | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= | 4.90 | 4.00 | 3.40 | 3.20 | 2.80 |
| N= | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= | 4.50 | 4.30 | 4.30 | 3.60 | 3.10 |
| N= | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= | 5.30 | 4.70 | 4.70 | 4.00 | 3.30 |
| N= | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= | 5.80 | 5.10 | 4.70 | 3.50 | 3.10 |
| N= | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= | 4.60 | 4.60 | 4.00 | 3.20 | 2.80 |
| N= | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= | 3.50 | 4.60 | 3.70 | 3.10 | 2.50 |
| N= | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= | 3.60 | 3.90 | 3.30 | 3.10 | 2.20 |
| N= | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= | 3.80 | 2.90 | 3.20 | 2.50 | 1.90 |
| SOM H&2 | 91.16 | 82.10 | 67.37 | 47.50 | 35.47 |
| ER | 12.64 | 11.39 | 9.34 | 6.59 | 4.92 |
| PROC ER | 100.00 | 90.06 | 73.90 | 52.10 | 38.90 |
| EFB | | .17 | .14 | .11 | .08 |
| PROC EFB | | 1.35 | 1.17 | .89 | .65 |
| SOM EFB | | 1.35 | 2.52 | 3.42 | 4.07 |

Bijlage 15-IA

| | |
|---|---|
| | nr. 3.1.3 |
| | SCHUIN INVALLEND GOLFFRONT<br>$d_g$ = 0,35 m.<br>T = 1,62 sec.<br>exc.= 1,9 cm. |




ZIE VOOR LANGSMETING: Bijlage 15I-B


raai: →
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
8'
13'
18'
23'
28'
T1
K1
H0.00
H1.50
H3.00
H4.50
H6.00
H7.50
H9.00
H10.50
H12.00
H13.50
H15.00
H16.50
H18.00
H19.50
H21.00
H22.50
H24.00
H25.50
H27.00
H28.50
H30.00

Bijlage 15-II

Schuin golffront; $d_g$ = 0,35 m; codenr. 3.1.3.

| raai | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| PERIODE IN SEC | 1.62 | | | | |
| H1= | 3.60 | 3.40 | 2.40 | 2.50 | 1.90 |
| HN= | 4.00 | 3.40 | 2.70 | 2.40 | 1.90 |
| N= | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| HN= | 4.50 | 3.80 | 2.80 | 2.20 | 2.00 |
| N= | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| HN= | 4.70 | 3.30 | 3.00 | 2.30 | 2.20 |
| N= | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| HN= | 4.40 | 3.90 | 3.30 | 2.50 | 2.20 |
| N= | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| HN= | 3.30 | 3.60 | 3.30 | 2.40 | 2.30 |
| N= | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 |
| HN= | 2.80 | 3.30 | 3.10 | 2.60 | 2.00 |
| N= | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| HN= | 2.60 | 3.30 | 2.80 | 2.40 | 1.70 |
| N= | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| HN= | 2.70 | 3.00 | 2.30 | 2.30 | 1.70 |
| N= | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 | 9.00 |
| H10= | 3.40 | 2.60 | 2.20 | 1.80 | 1.40 |
| SOM H&2 | 61.37 | 54.27 | 36.97 | 25.22 | 17.57 |
| ER | 10.73 | 9.49 | 6.47 | 4.41 | 3.07 |
| PROC ER | 100.00 | 88.43 | 60.24 | 41.10 | 28.63 |
| EFB | | .09 | .07 | .05 | .03 |
| PROC EFB | | .87 | .68 | .46 | .32 |
| SOM EFB | | .87 | 1.56 | 2.03 | 2.35 |

BEREDENERING TABELLEN OP Bijlage 17

Zie ook hoofdstuk VI - 2, vgl. (21).

Kolom 5 = 100 - kolom 4

kolom 4 = onderlinge percentages van kolom 3 = o.p.(kol.3)

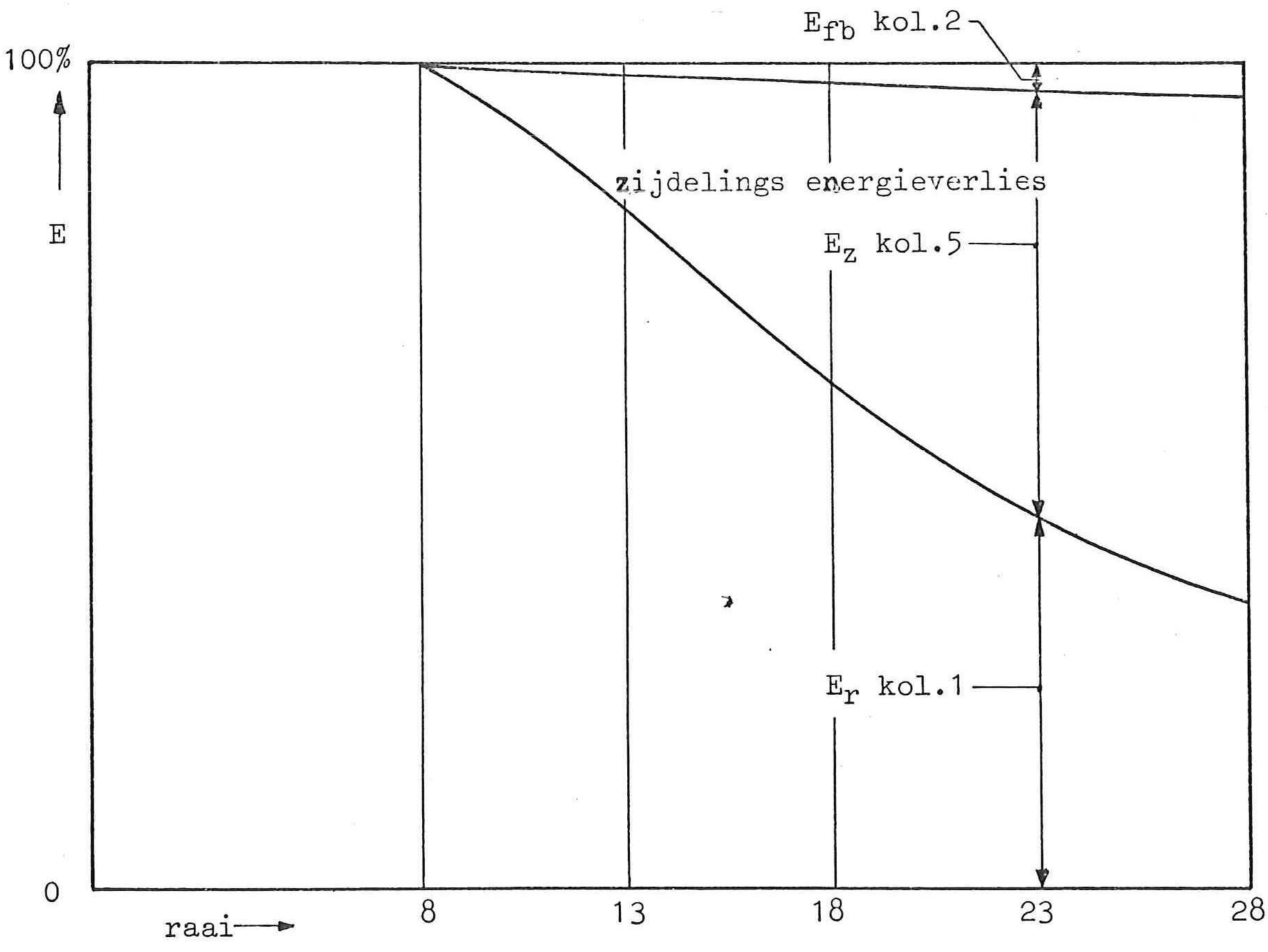
kolom 3 = kolom 1 + kolom 2 ⟶ kol.4 = o.p.(kol.1 + kol.2)

kol.5 = 100 - o.p.(kol.1 + kol.2)

↑ zijdel. energie-verlies in % van $E_r$

↑ gemeten restant per raai

↑ bodem-wrijving




Op bijlage 18 zijn de waarden uit kolom 3 uitgezet. Het "gebied" boven de lijnen is het zijdelingse energieverlies.

| T (sec) | raai | $d_g$ = 0,35 m; zonder schotten | | | | | $d_g$ = 0,275 m; zonder schotten | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2,2 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 66,4 | 0,7 | 67,1 | 67,1 | 32,9 | 54.9 | 1,0 | 55,9 | 55,9 | 44,1 |
| | 18 | 41,6 | 1,2 | 42,8 | 64,0 | 36,0 | 36,6 | 1,5 | 38,1 | 68,0 | 32,0 |
| | 23 | 29,1 | 1,5 | 30,6 | 71,2 | 28,8 | 20,0 | 1,9 | 21,9 | 68,1 | 31,9 |
| | 28 | 19,4 | 1,7 | 21,1 | 69,0 | 31,0 | 24,0 | 2,2 | 26,2 | -,- | -,- |
| 1,62 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 77,9 | 0,8 | 78,7 | 78,7 | 21,3 | 74,1 | 1,2 | 75,8 | 75,3 | 24,7 |
| | 18 | 56,9 | 1,4 | 58,3 | 74,2 | 25,8 | 47,8 | 2,0 | 49,8 | 66,8 | 33,2 |
| | 23 | 37,1 | 1,9 | 39,0 | 66,6 | 33,4 | 34,0 | 2,6 | 36,6 | 73,3 | 26,7 |
| | 28 | 25,3 | 2,2 | 27,5 | 70,5 | 29,5 | 29,5 | 3,0 | 32,5 | 89,0 | 11,0 |
| 1,4 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 73,0 | 0,8 | 73,8 | 73,8 | 26,2 | 73,8 | 1,2 | 75,0 | 75,0 | 25,0 |
| | 18 | 51,3 | 1,4 | 52,7 | 71,5 | 28,5 | 57,0 | 2,2 | 59,2 | 79,0 | 21.0 |
| | 23 | 33,7 | 1,8 | 35,5 | 67,4 | 32,6 | 39,8 | 2,9 | 42,7 | 71,0 | 29,0 |
| | 28 | 22,6 | 2,1 | 24,7 | 69,2 | 30,8 | 29,6 | 3,3 | 32,9 | 77,2 | 22,8 |
| 1,2 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 80,7 | 0,8 | 81,5 | 81,5 | 18,5 | 85,8 | 1,3 | 87,1 | 87,1 | 12,9 |
| | 18 | 59,5 | 1,5 | 61,0 | 75,0 | 25,0 | 67,7 | 2,4 | 70,1 | 80,5 | 19,5 |
| | 23 | 47,2 | 1,9 | 49,1 | 80,5 | 19,5 | 57,1 | 3,3 | 60,4 | 86,0 | 14,0 |
| | 28 | 34,7 | 2,3 | 37,0 | 75,5 | 24,5 | 40,0 | 4,0 | 44,0 | 73,0 | 27,0 |

Omschrijving van de kolommen 1 t/m 5:

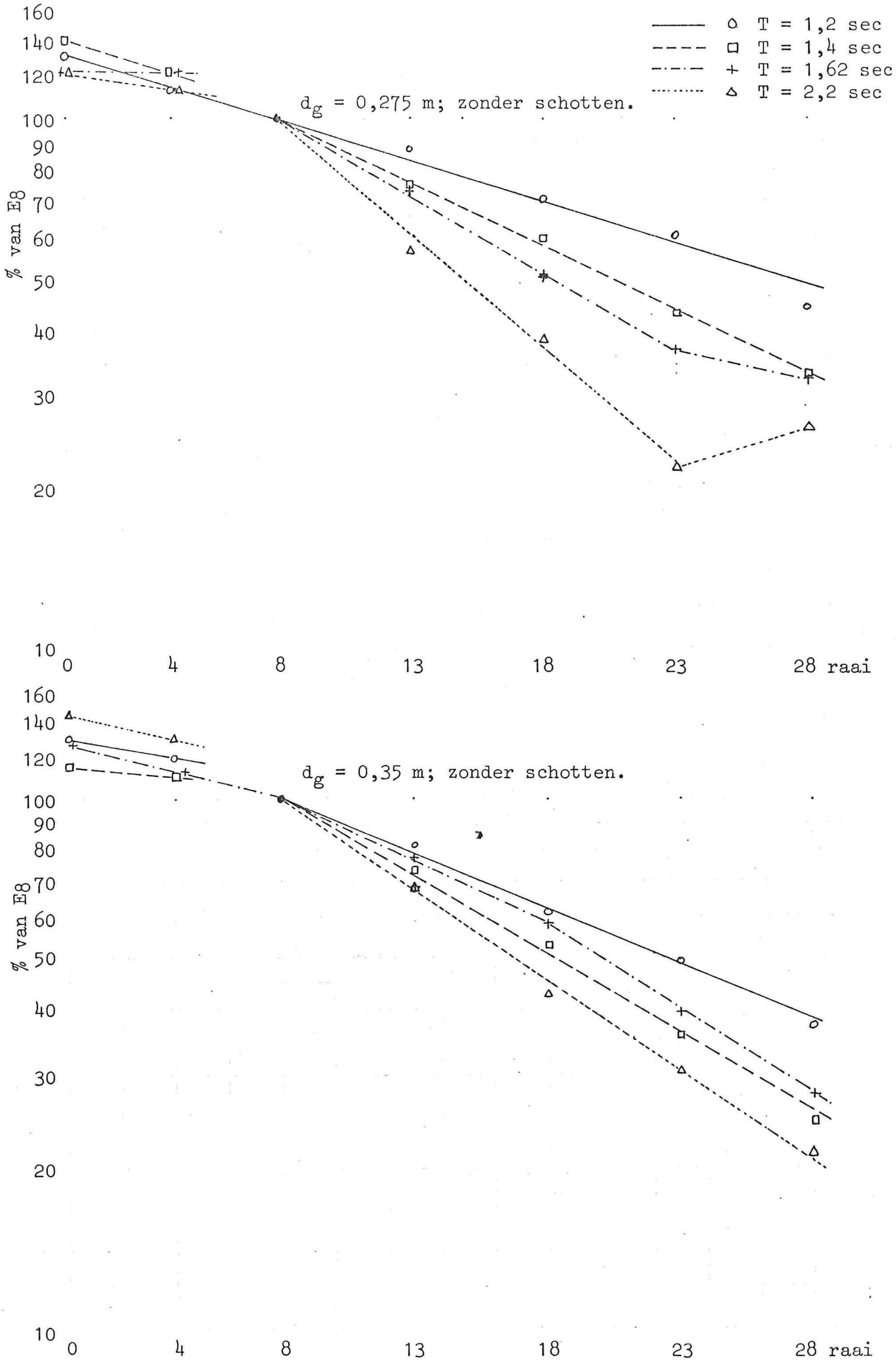
1: gemeten energietransport in desbetreffende raai, in % van dat in raai 8. ("PROC ER")
2: berekend energieverlies tgv. bodemwrijving, in % van het energietransport in raai 8. ("SOM EFB")
3: kolom 1 + kolom 2.
4: energieprocenten uit kolom 3 in raai r t.o.v. die in raai r-5.
5: 100 - kolom 4 = zijdelings energieverlies tussen raai r-5 en raai r, in % van het energietransport in raai r-5.

| T (sec) | raai | $d_g$ = 0,35 m; met schotten | | | | | $d_g$ = 0,275 m; met schotten | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2,2 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 81,0 | 0,8 | 81,8 | 81,8 | 18,2 | 80,6 | 1,1 | 81,7 | 81,7 | 18,3 |
| | 18 | 55,8 | 1,4 | 57,2 | 70,0 | 30,0 | 46,7 | 1,9 | 48,6 | 59,5 | 40,5 |
| | 23 | 38,8 | 1,8 | 40,6 | 71,0 | 29,0 | 30,9 | 2,4 | 33,3 | 31,5 | 68,5 |
| | 28 | 24,0 | 2,0 | 26,0 | 64,0 | 36,0 | 15,9 | 2,7 | 18,6 | 55,5 | 44,5 |
| 1,62 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 75,4 | 0,8 | 76,2 | 76,2 | 23,8 | 77,8 | 1,2 | 79,0 | 79,0 | 21,0 |
| | 18 | 49,1 | 1,4 | 50,5 | 66,4 | 33,6 | 60,1 | 2,2 | 62,3 | 79,0 | 21,0 |
| | 23 | 31,4 | 1,8 | 33,2 | 65,7 | 34,3 | 42,1 | 2,9 | 45,0 | 72,4 | 27,6 |
| | 28 | 19,3 | 2,0 | 21,3 | 64,2 | 35,8 | 23,7 | 3,3 | 27,0 | 60,0 | 40,0 |
| 1,4 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 77,3 | 0,8 | 78,3 | 78,1 | 21,9 | 84,5 | 1,3 | 85,8 | 85,8 | 14,2 |
| | 18 | 54,7 | 1,5 | 56,2 | 71,7 | 28,3 | 63,5 | 2,4 | 65,9 | 76,8 | 23,2 |
| | 23 | 39,2 | 1,9 | 41,1 | 73,2 | 26,8 | 50,7 | 3,2 | 53,9 | 82,0 | 18,0 |
| | 28 | 27,4 | 2,2 | 29,6 | 72,0 | 28,0 | 35,4 | 3,8 | 39,2 | 73,0 | 27,0 |
| 1,2 | 8 | 100,0 | | 100,0 | | | 100,0 | | 100,0 | | |
| | 13 | 88,7 | 0,9 | 89,6 | 89,6 | 10,4 | 90,1 | 1,4 | 91,5 | 91,5 | 8,5 |
| | 18 | 63,0 | 1,5 | 64,5 | 72,0 | 28,0 | 73,9 | 2,5 | 76,4 | 83,5 | 16,5 |
| | 23 | 45,9 | 2,0 | 47,9 | 74,3 | 25,7 | 52,1 | 3,4 | 55,5 | 73,0 | 27,0 |
| | 28 | 34,8 | 2,4 | 37,2 | 77,5 | 22,5 | 38,9 | 4,1 | 43,0 | 77,5 | 22,5 |

Voor omschrijving van de kolommen, zie bijlage 17a.

Bijlage 18a

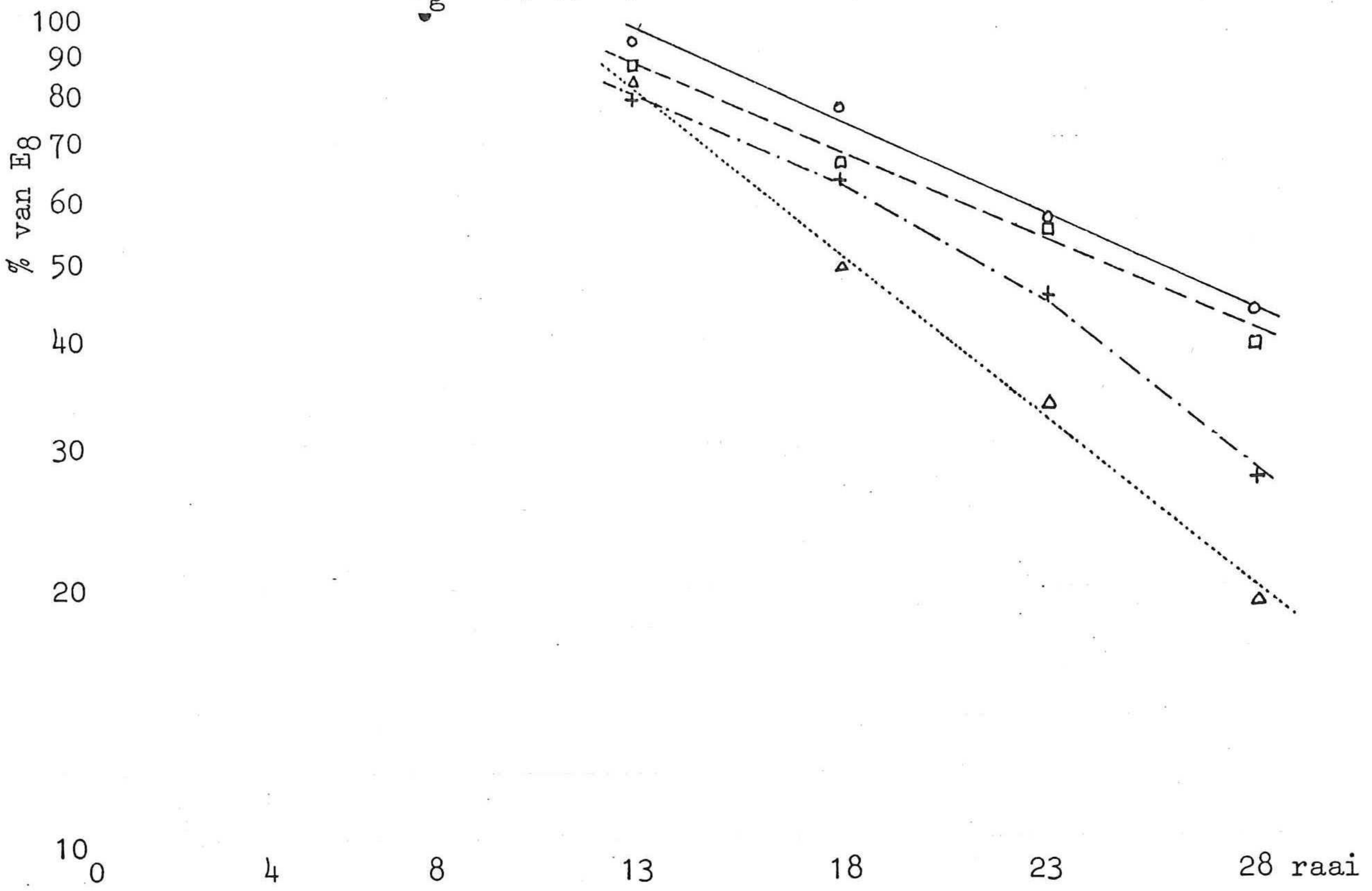
## GRAFISCHE WEERGAVE UITEINDELIJKE RESULTATEN



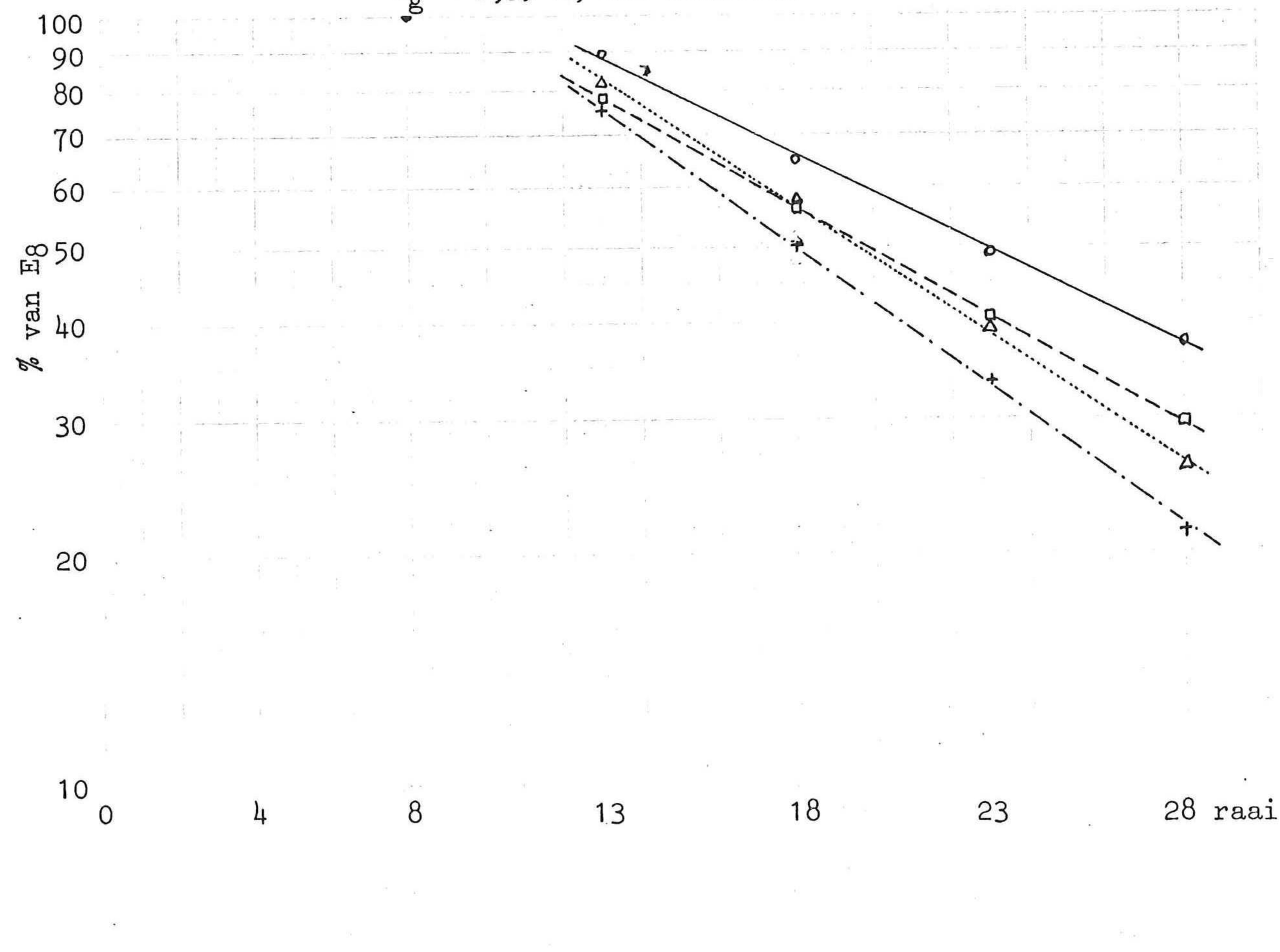
## GRAFISCHE WEERGAVE UITEINDELIJKE RESULTATEN

o T = 1,2 sec
□ T = 1,4 sec
\+ T = 1,62 sec
Δ T = 2,2 sec

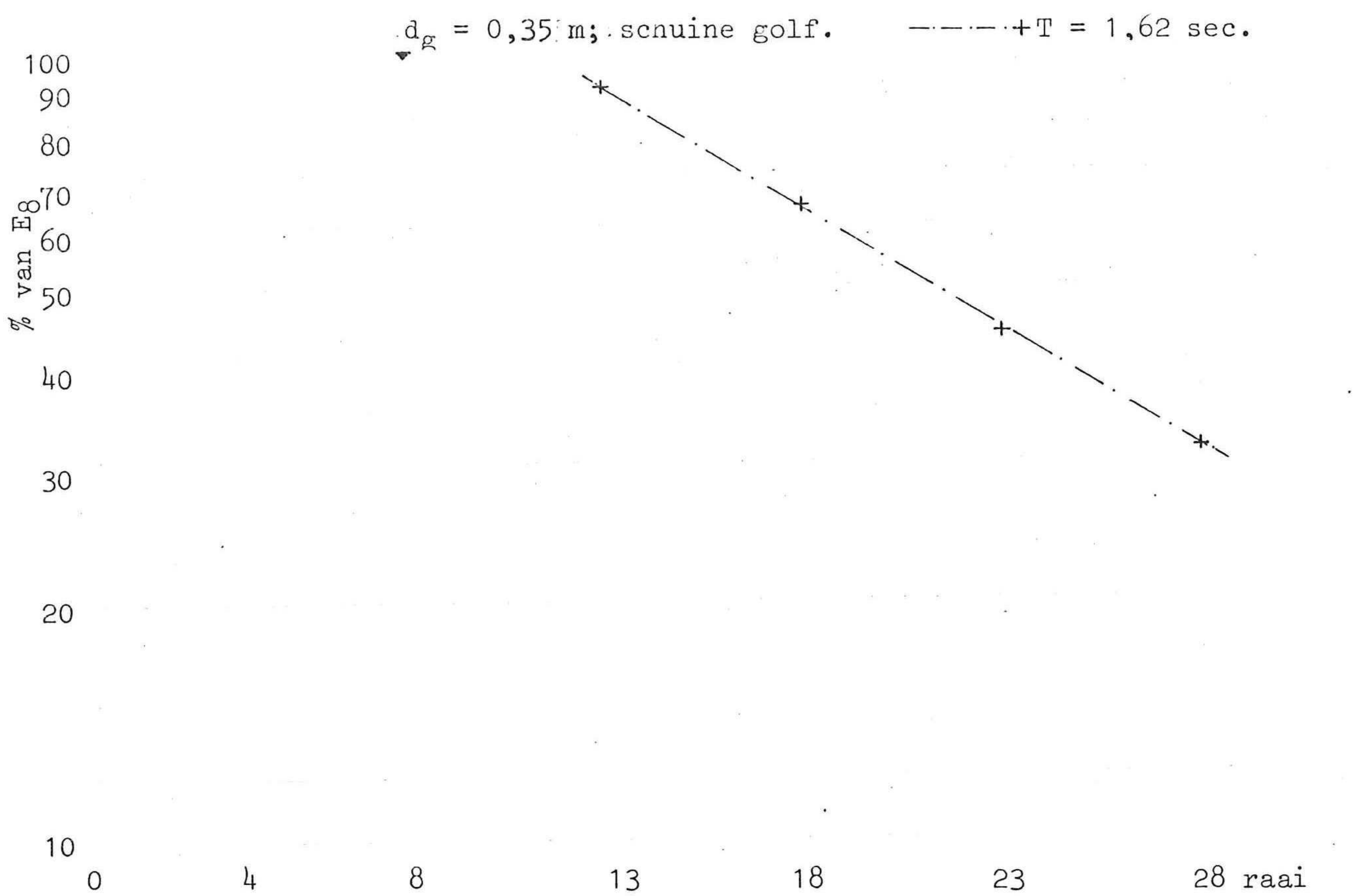
$d_g$ = 0,275 m; met schotten.




$d_g$ = 0,35 m; met schotten



GRAFISCHE WEERGAVE UITEINDELIJKE RESULTATEN




De in de schuin liggende raaien gemeten waarden werden op dezelfde wijze als in de andere gevallen in de computer ingevoerd. De berekeningen zijn dus uitgevoerd alsof het ging om recht liggende raaien. Daar dit uiteraard niet juist is, dient bovenstaande grafiek dan ook slechts om een indruk te geven van het verloop van een grootheid, die niet het eigenlijke energietransport in de geul is, maar er mee verwant is.

VOORBEELD BEREKENING $\alpha$.

Voorbeeld 1. (Zonder schotten; $d_g$ = 0,35 m; T = 1,62 sec)

Uit de metingen: $\Delta E_{8,13} = 21,3\%$
$\Delta E_{13,18} = 25,8\%$
$\Delta E_{18,23} = 33,4\%$ $\quad (\Delta E)_{gem} = 29,0\%$
$\Delta E_{23,28} = 29,5\%$

Vergelijking (29): $\Delta E = 1 - e^{-5\alpha}$

$0,29 = 1 - e^{-5\alpha}$

$\underline{\alpha = 0,069}$

Voorbeeld 2: (Met schotten; $d_g$ = 0,35 m; T = 1,62 sec)

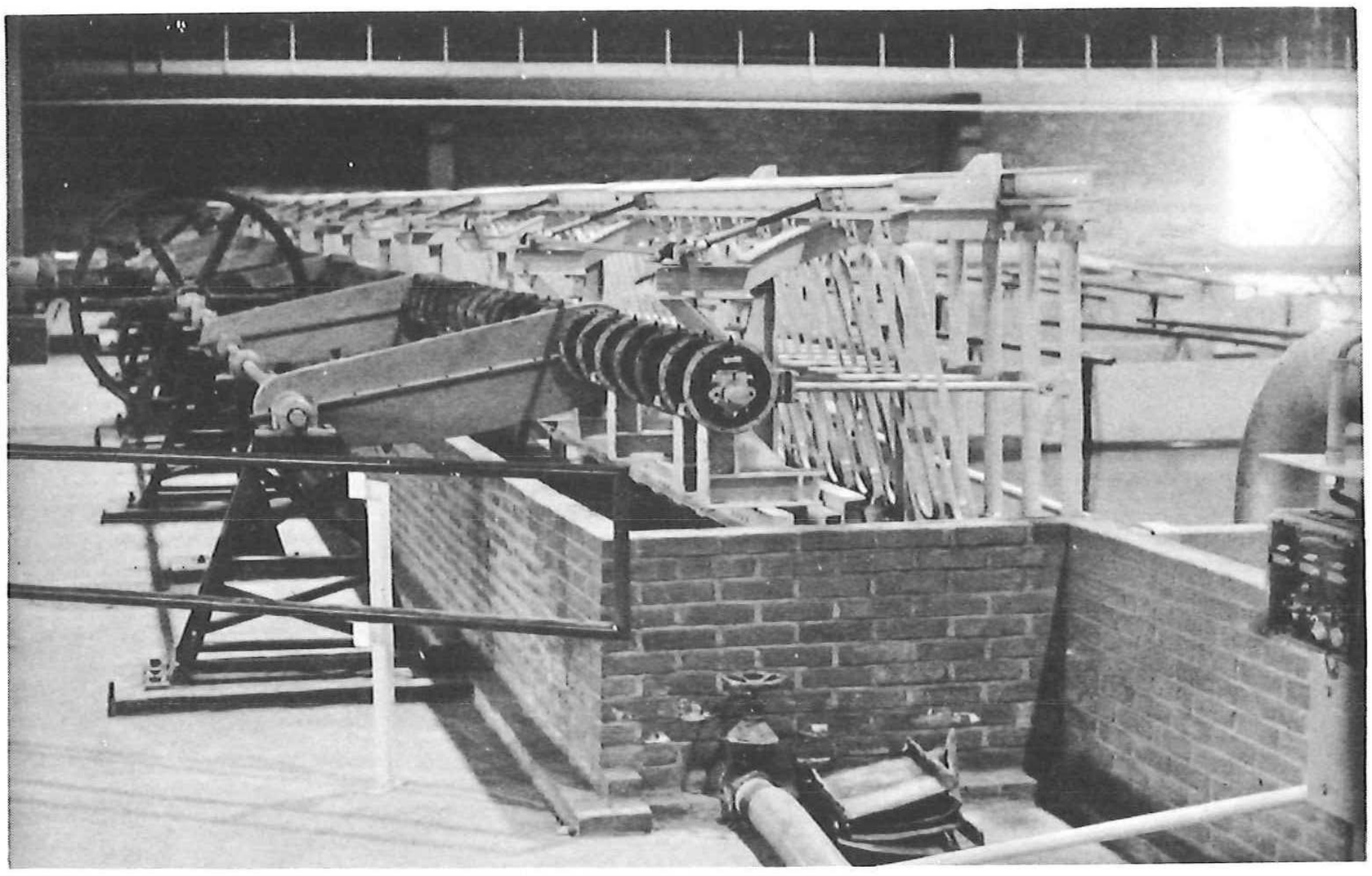
$\Delta E_{13,18} = 33,6\%$
$\Delta E_{18,23} = 34,3\%$ $\quad (\Delta E)_{gem} = 34,6\%$
$\Delta E_{23,28} = 35,8\%$

Vergelijking (29): $\Delta E = 1 - e^{-5\alpha}$

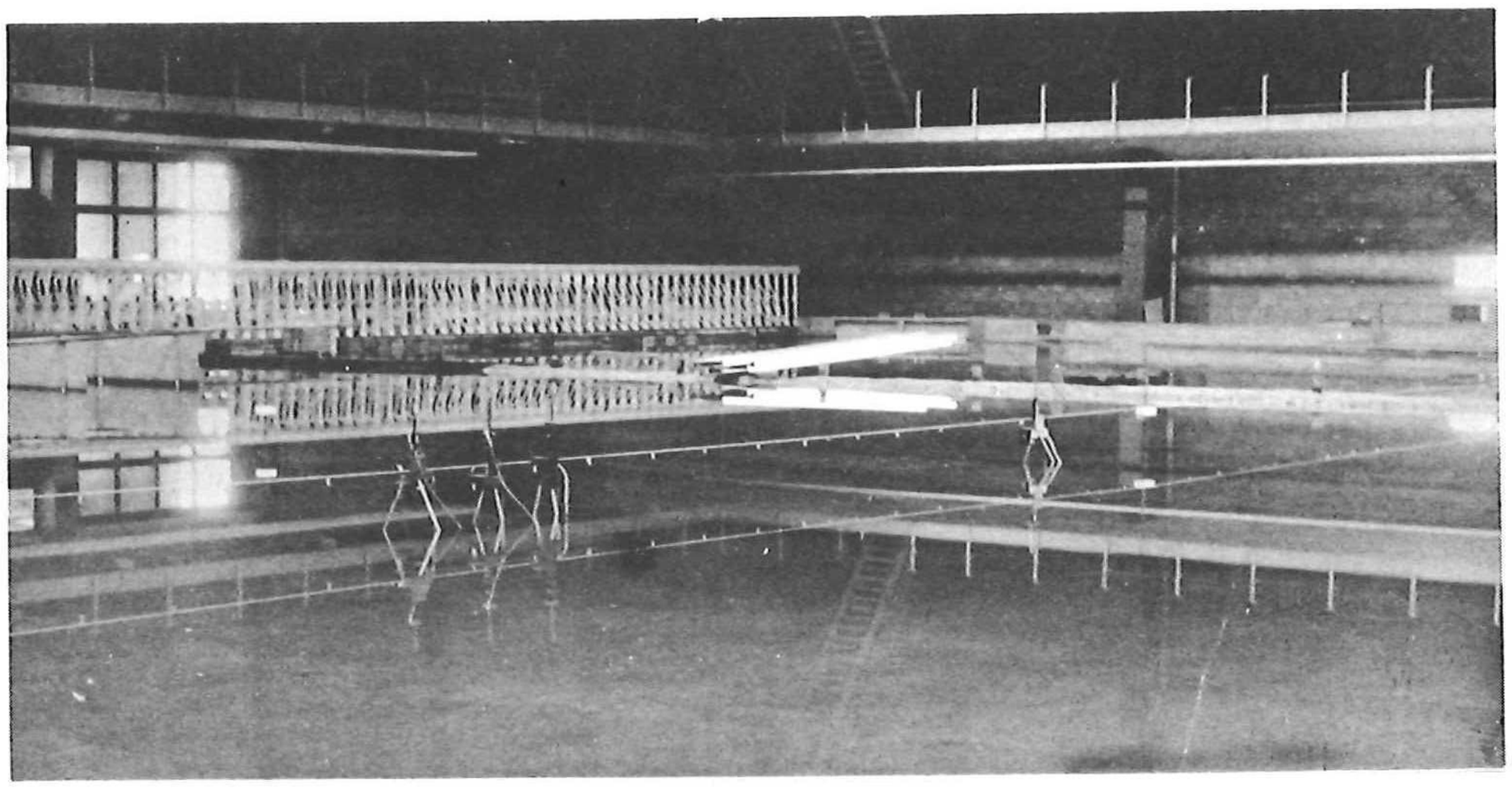
$0,346 = 1 - e^{-5\alpha}$

$\underline{\alpha = 0,085}$

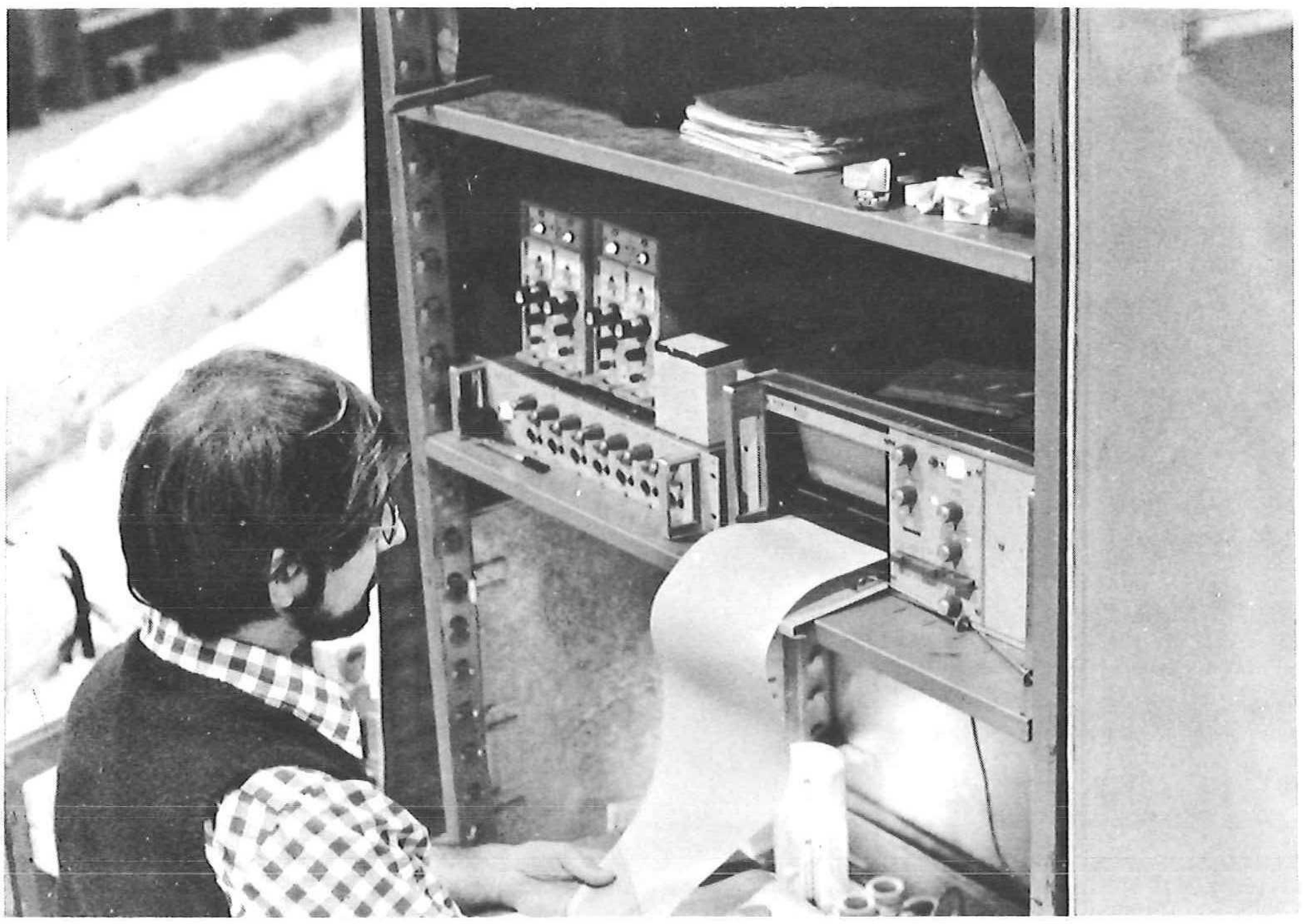
Afbeelding 1



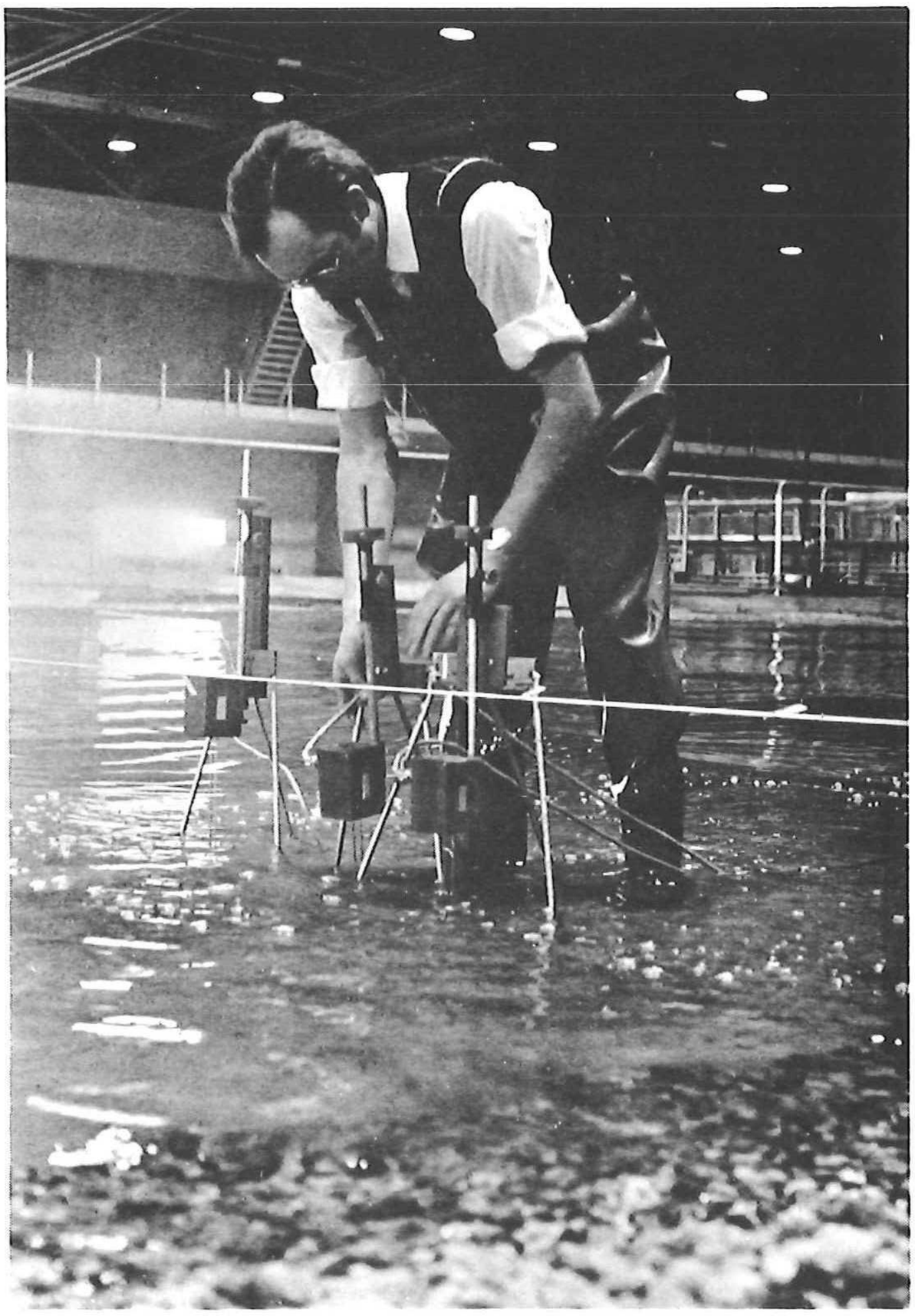
a. Het aandrijvingsmechanisme van de lamellen van het golfschot.



b. Het golfschot, de golfhoogte-opnemers en de meetpuntaanduiding aan het koord, dat als raai over de golfbak lag.



a. Registratie-apparatuur

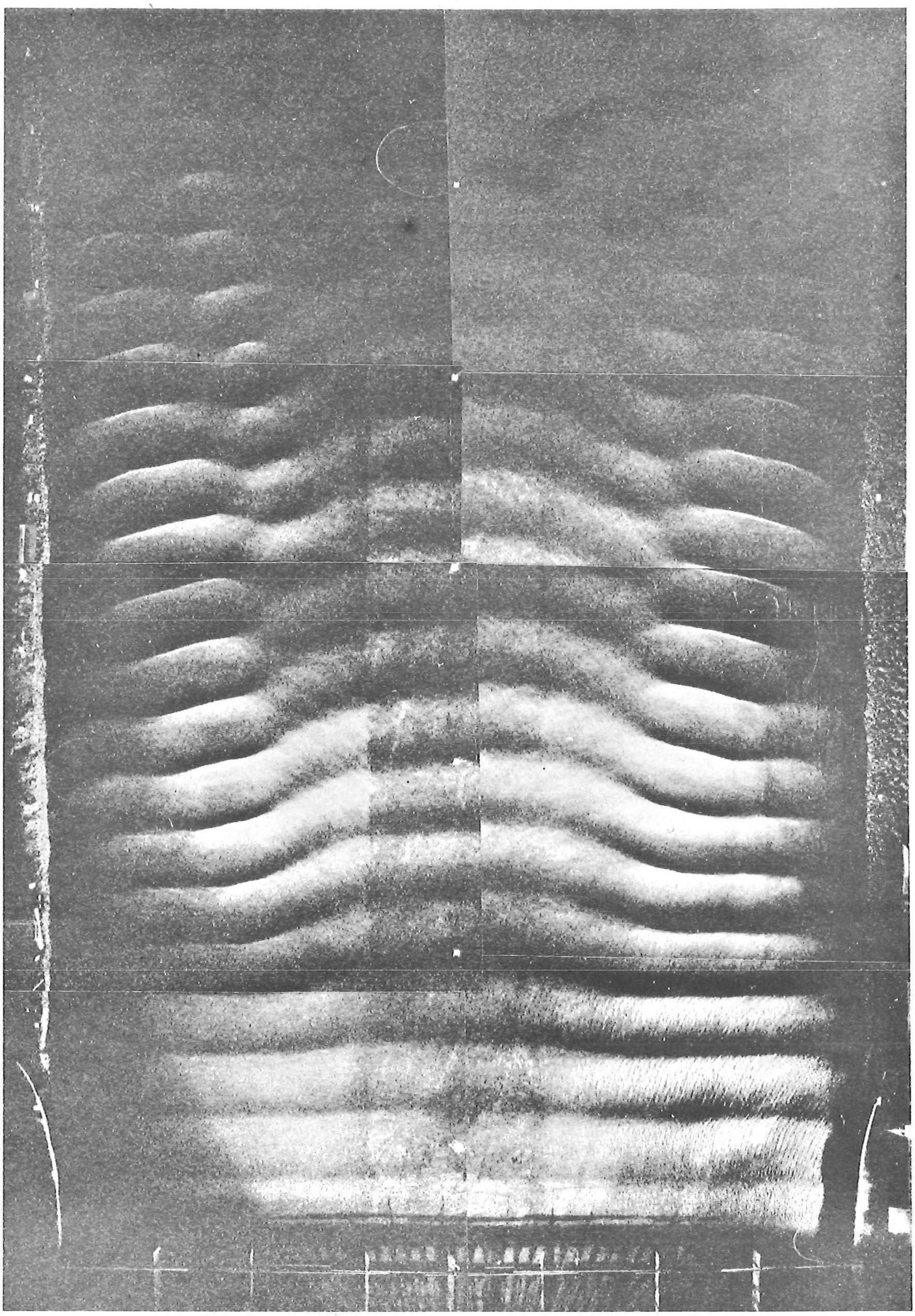


b. Plaatsen golfhoogte-opnemers.

Overzicht golfbak vanaf loopbrug erboven.
Meetsituatie: "zonder schotten"; $d_g$ = 0,30 m;
T = 0,95 sec; exc = 1,9 cm; codenr 1.2.7

Afbeelding 3

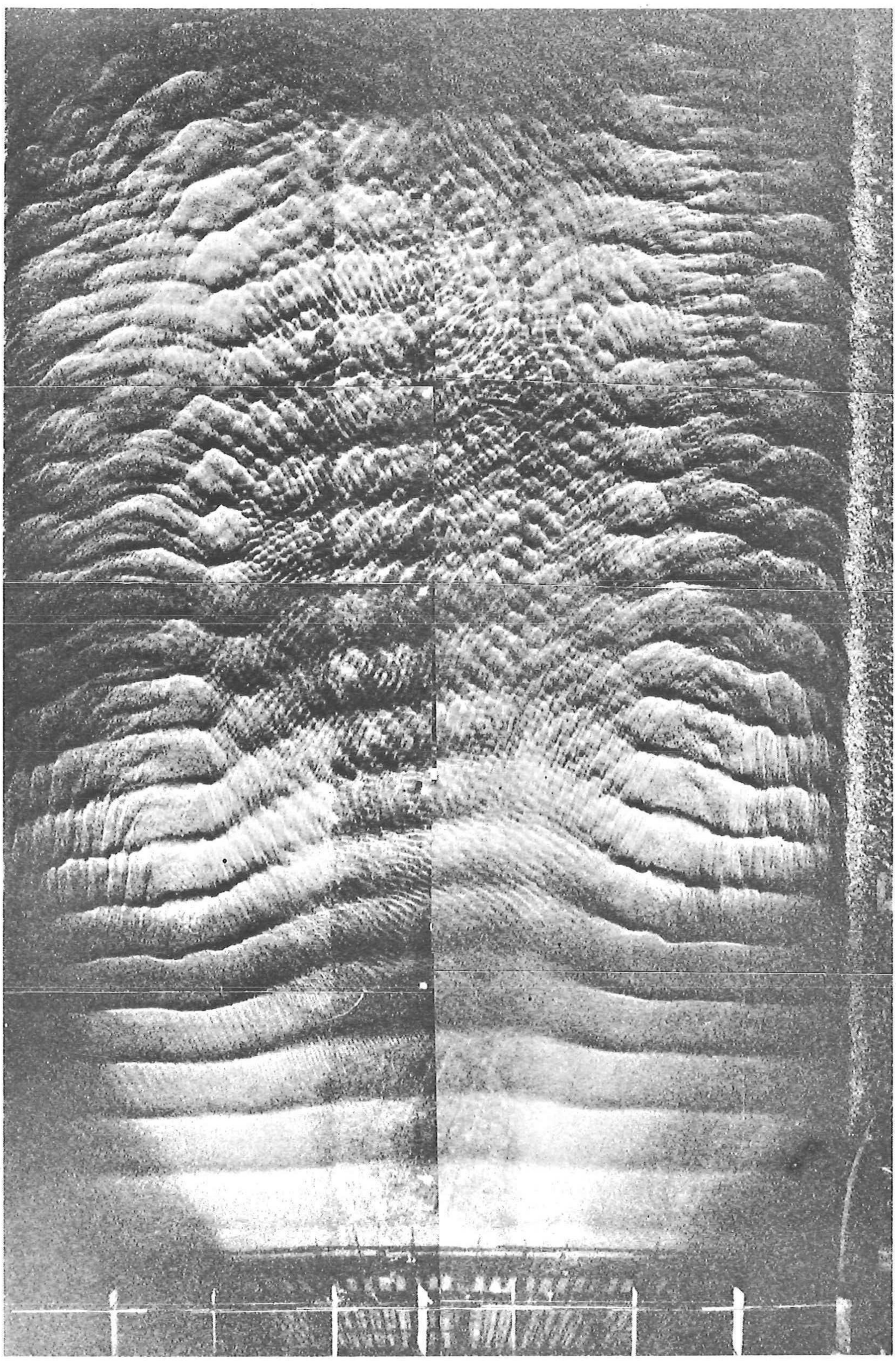
Afbeelding 4



"zonderschotten"; $d_g$ = 0,35 m; T = 1,2 sec; exc. = 1,9 cm;
codenr.1.1.5.

(zie ook bijlage 11d-I)

Afbeelding 5



28

23

18

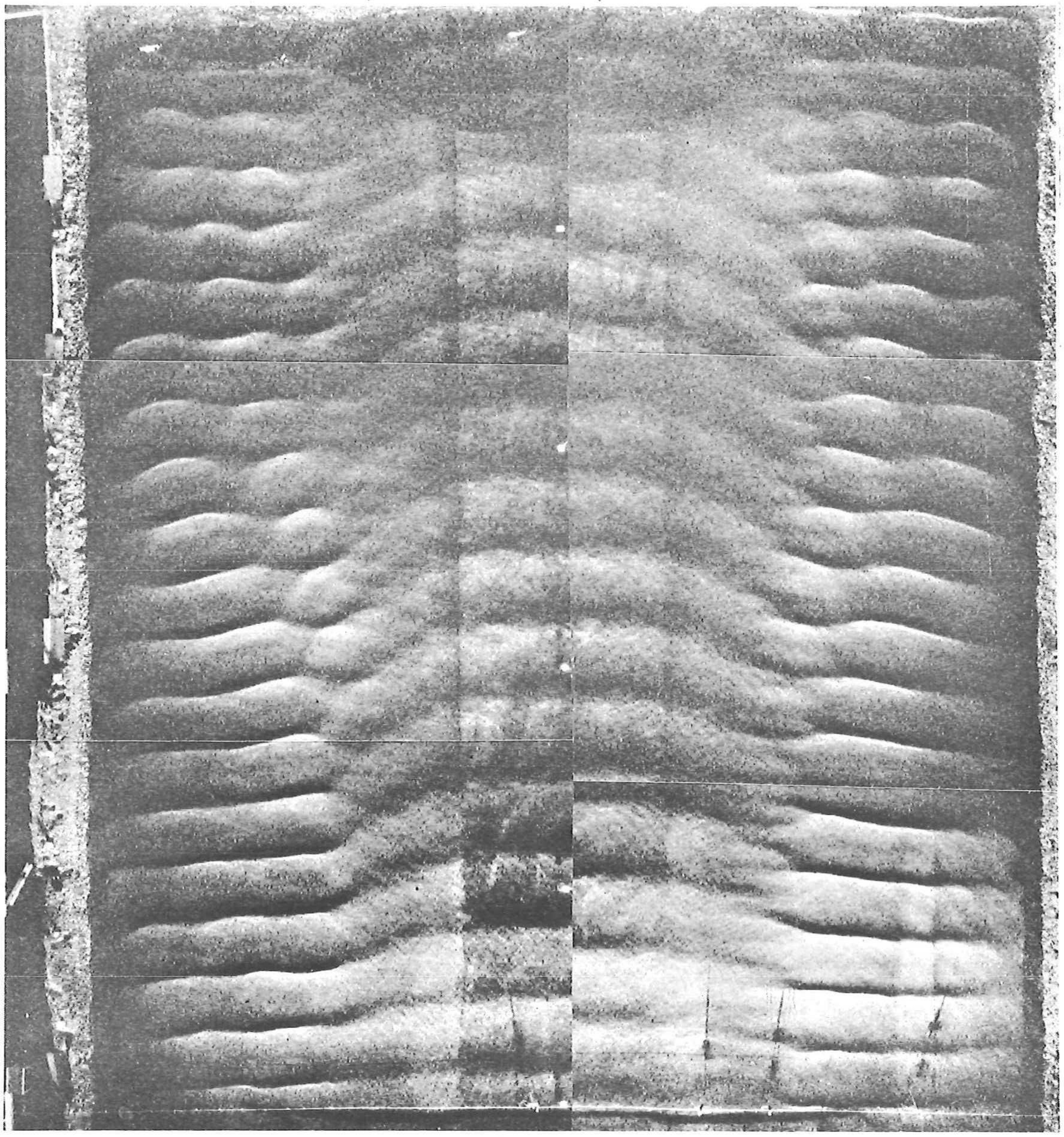
13

8

3

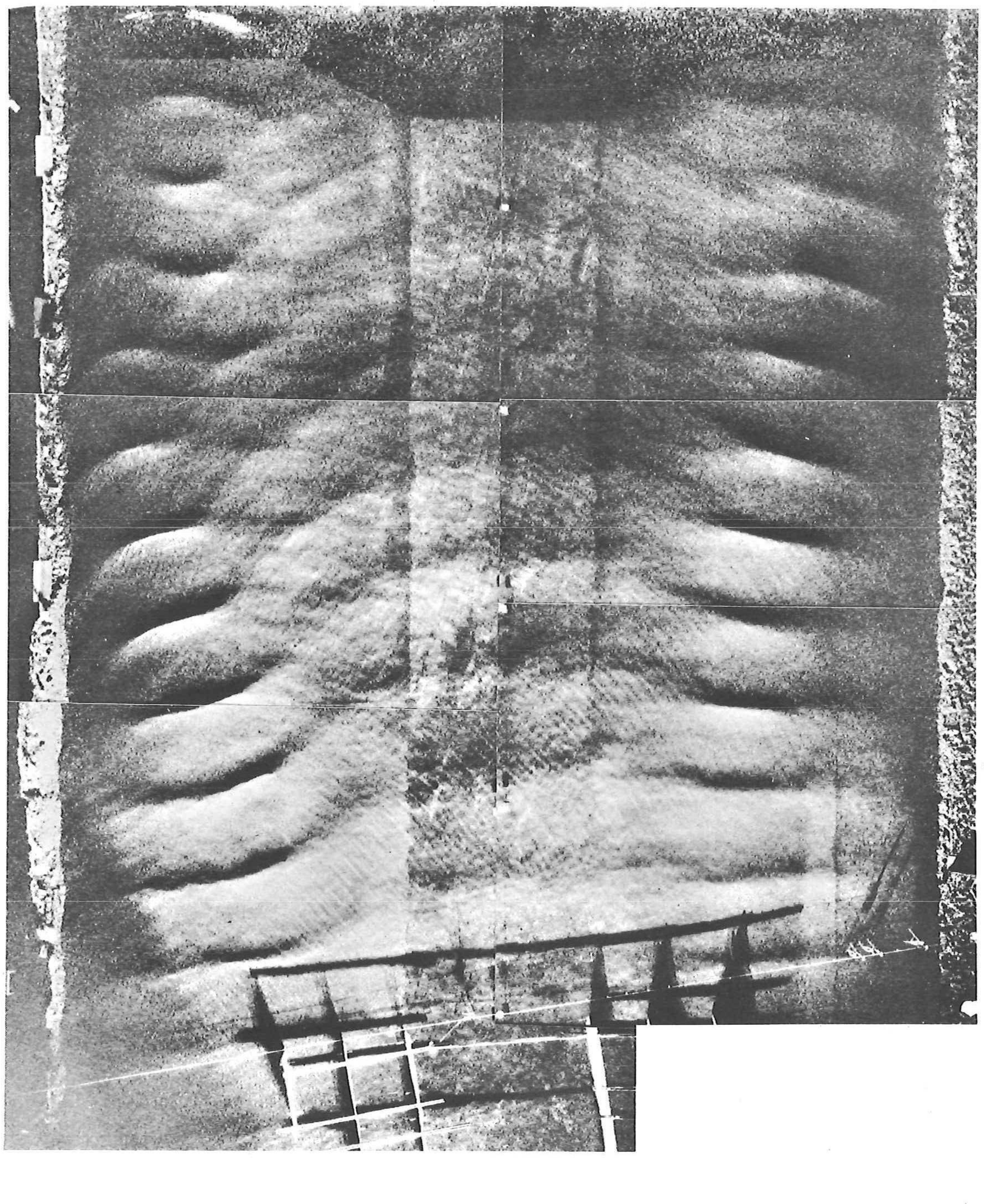
"zonder schotten"; $d_g$ = 0,275 m; T = 1,2 sec; exc.= 1,9 cm; codenr.1.3.5.

(zie ook bijlage 12d-I en blz.14)




"met schotten"; $d_g$ = 0,275 m; T = 1,2 sec; exc.= 1,9 cm;
codenr.2.3.5.

(zie ook bijlage 14-I)




"scheef golffront"; $d_g$ = 0,35 m; T = 1,62 sec;
codenr.3.1.3.

(zie ook bijlage 15-I)

REFRACTIE-THEORIEËN

Uit de literatuur is voor een drie-dimensionale golf de volgende uitdrukking bekend:

$$\Phi = A(x,y,z)\ \cos\{\omega t - \psi(x,y)\} \qquad (I,1)$$

Anders geschreven:

$$\Phi = \frac{g}{\omega}\,\zeta(x,y)\ Z(z,d)\ e^{i\omega t}$$

$$\zeta = a(x,y)\ e^{-i\psi(x,y)}$$

$$Z = \frac{\cosh\, k(h+z)}{\cosh\, kh}$$

Schönfeld,Booy [2] en Berkhoff [10] hebben de volgende uitdrukking afgeleid:

$$\nabla(cc_{gr}\,\nabla\zeta) + k^2 cc_{gr}\zeta = 0 \qquad (I,2)$$

$$(\nabla_j = \frac{\partial}{\partial x}\ ;\ \frac{\partial}{\partial y}\ )$$

Bij een constante diepte verandert verg.(I,2)in:

$$\nabla^2\zeta + k^2\ \zeta = 0 \qquad (I,3)$$

$$(\nabla_j^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2}\ \ ;\ \frac{\partial^2}{\partial y^2}\ )$$

Dit is de bekende diffractie-vergelijking bij een constante waterdiepte.

Substitutie in vergelijking(I,2) van $\zeta = a\ e^{-i\psi}$ doet deze overgaan,na uitsplitsing in een reëel en imaginair deel,in de volgende twee uitdrukkingen :

$$\frac{1}{cc_{gr}}\nabla_j(cc_{gr}\,\nabla_j a) + a(k^2 - |\nabla\psi|^2\ ) = 0 \qquad (I,4)$$

$$\nabla_j(cc_{gr}\ a^2\ \nabla_j\psi\ ) = 0 \qquad (I,5)$$

Als in verg.(I,4)de eerste term genegeerd wordt ontstaat er een uitdrukking voor de refractie.De variatie van $\nabla\psi$ wordt in de eerste plaats bepaald door de veranderingen in het golfgetal k (d varieert).
De variaties in de amplitude (de eerste term) leveren een aanvullende correctie.Dit laatste zou men diffractie kunnen noemen.
Uit verg.(I,2)kunnen we dus zowèl diffractie-termen àls refractie-termen halen;vandaar dat deze uitdrukking de naam draagt van de gecombineerde refractie-diffractie-vergelijking.
De vergelijking(I,5) betekent niets meer dan dat de hoeveelheid energietransport tussen twee golfstralen konstant is.Deze ongewone presentatie wordt in appendix II-2 met de gebruikelijke uitdrukking voor het energietransport vergeleken.

Met behulp van vergelijking(I,4) is het dus mogelijk,de invloed te beschrijven van een amplitude,die in x-en y-richting varieert,op de fasesnelheid.

Battjes [7] verwaarloost de term $\nabla_j cc_{gr} \cdot \nabla_j a$ en stelt $\frac{\nabla^2 a}{k^2 a} = \delta$

Dan gaat(I-4) over in :

$$|\nabla\psi|^2 = k^2(1+\delta)$$

Gecombineerd met:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad \text{en} \quad c^* = \frac{\omega}{\nabla\psi}$$

levert dit de volgende uitdrukking op:

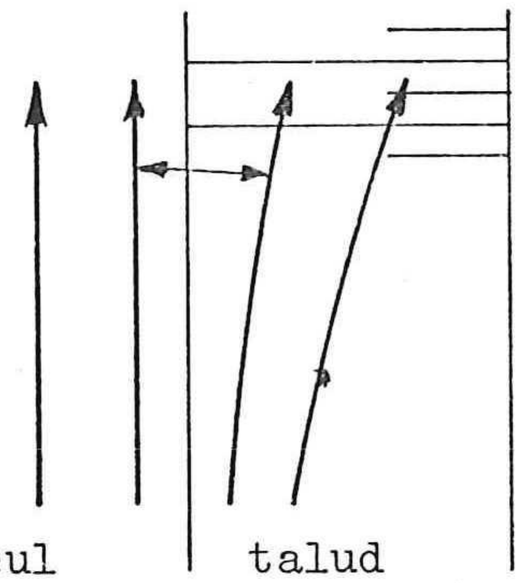
$$c^* = \left(\frac{g}{k} \tanh kd\right)^{\frac{1}{2}} (1+\delta)^{-\frac{1}{2}} = c\ (1+\delta)^{-\frac{1}{2}}\ ,\ L^* = L(1+\delta)^{-\frac{1}{2}}.$$

(c = is de fase snelheid van een twee-dim. sin.vorm. golf)

Daar waar voor a een maximum geldt(bij convergentie van de golfstralen) is $\delta$ negatief en de fasesnelheid $c^*$ neemt dus toe t.o.v. de snelheid c voor een cilindrische golf.

Bij een minimum voor a (divergentie van de golfstralen) is $\delta$ positief en wordt $c^*$ kleiner dan c.

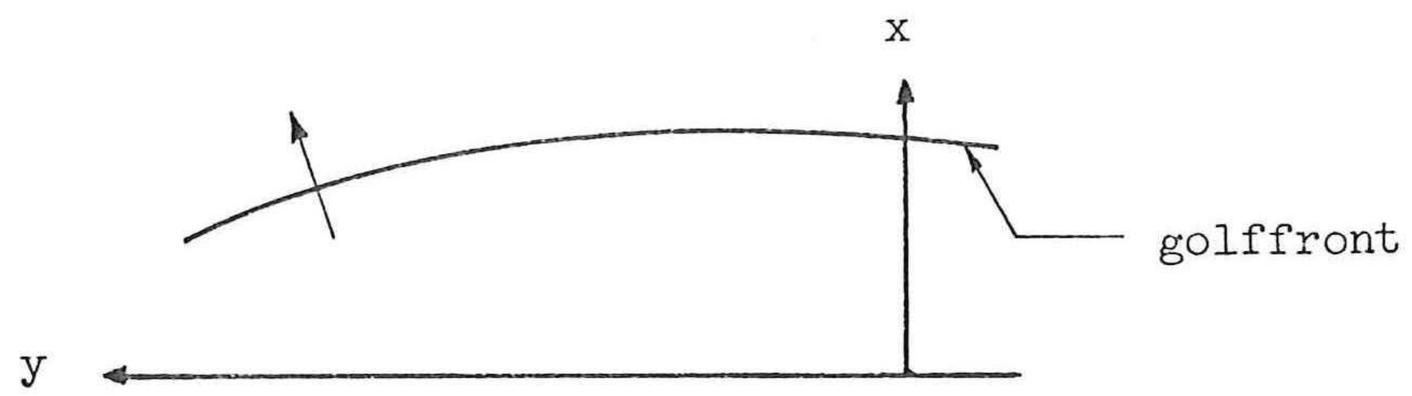
Bij de overgang van een vlakke geulbodem op het ernaast liggende talud is van zulk een divergentie sprake.




Hierdoor wordt de fasesnelheid van de golven in de geul bij de teenlijn lager,waardoor de golfkam in het midden van de geul vóórloopt op die aan de rand van de geul.

De invloed hiervan op de kromming van het golffront zal,naar het geulmidden toe,steeds minder worden zodat het golffront in deze richting, een steeds minder gebogen verloop zal hebben.

## ENERGIE TRANSPORT BIJ EEN 3-DIMENSIONALE GOLF




Aannamen :

1. Lin. golftheorie (amplitude van de golf << golflengte, water-snelheden klein en een rotatievrije golf.)
2. Vlakke bodem op een diepte van d.

Gegeven :

$$\Phi = \frac{g}{\omega}\,\zeta\,Z\cos(\omega t-\psi)$$

$\zeta$ en $\psi$ zijn functies van x en y ; $Z = \dfrac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}$ .

Energieflux $F = -\rho \dfrac{\partial\Phi}{\partial t}\dfrac{\partial\Phi}{\partial n}$ (per eenheid van opvl.en per tijd)

Gemiddeld over de tijd :

$$\bar{F} = \frac{1}{T}\int_0^T -\rho \frac{\partial\Phi}{\partial t}\frac{\partial\Phi}{\partial n}\,dt$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T -\rho\Big\{ \frac{g}{\omega}\frac{\partial\zeta}{\partial n} Z\cos(\omega t-\psi) + \frac{g}{\omega}\,\zeta\,Z\sin(\omega t-\psi)\frac{\partial\psi}{\partial n}\Big\}\cdot$$

$$\cdot\Big\{-\frac{g}{\omega}\,\zeta\,Z\sin(\omega t-\psi)\cdot\omega\Big\}\,dt.$$

$$\Big(\int_0^T \sin\alpha\cos\alpha\,dt = 0\ ;\ \int_0^T \sin^2\alpha\,dt = \frac{1}{2}T\ .\Big)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{2}\frac{\rho g^2}{\omega}\zeta^2 Z^2\frac{\partial\psi}{\partial n}$$ ( Energie transport per eenheid van oppervlakte en per tijdseenheid).

Het energietransport per meter kamlengte over de totale hoogte en per sec.:

$$\bar{E} = \frac{1}{2}\rho g^2\zeta^2\frac{\partial\psi}{\partial n}\int_{-d}^{0}\frac{Z^2\,dz}{\omega} \qquad (\text{II},1)$$

De integraal heeft als uitkomst :

$$\frac{c}{gk}\frac{1}{2}\Big(1+\frac{2kd}{\sinh 2kd}\Big) = \frac{cn}{gk} = \frac{c_{gr}}{gk}$$

Uiteindelijk hebben we nu gekregen:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g \, \zeta^2 \, c_{gr} \frac{1}{k} \frac{\partial \psi}{\partial n} \quad \text{(Watt/meter kamlengte)} \qquad (\text{II},2)$$

$\frac{1}{k} \frac{\partial \psi}{\partial n}$ is een richtingsfactor, $\psi$ is de fase van de golf.

($\frac{\partial \psi}{\partial n}$ staat loodrecht op het golffront)

Voor een sinusvormige golf met een rechte golfkam geldt:

$\zeta = a \cos(\omega t - kx)$ (2 dim.golf) $\psi = kx$, $\frac{\partial \psi}{\partial n} = k$ .

$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g a^2 c_{gr}$ dit klopt !

Het energietransport tussen twee golfstralen is konstant dus $\frac{\partial E}{\partial n} = 0$. $\nabla \cdot \bar{E} = 0$

of anders geschreven :

($\frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} = \nabla_j$ ).

$$\nabla E = \nabla(\frac{1}{2} \rho g \, \zeta^2 \, c_{gr} \frac{1}{k} \nabla \psi) = 0$$

Vermenigvuldiging van deze laatste uitdrukking met de konstante $\frac{\omega}{\frac{1}{2}\rho g}$ geeft:

$$\nabla(\zeta^2 \, c_{gr} \frac{\omega}{k} \nabla \psi) = 0 \quad ; \quad \frac{\omega}{k} = c \quad . \qquad (\text{II},3)$$

Tenslotte krijgen we:

$\nabla(\zeta^2 \, c_{gr} \, c \, \nabla \psi) = 0$ ,wat overeenkomt met (I,5) .

BODEMWRIJVING

Uit Ippen [8] komen de volgende zgn. 'Stokes-Navier' vergelijkingen :

$$-g-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\nabla^2 w=\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial w}{\partial x}u+\frac{\partial w}{\partial z}w$$

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\nabla^2 u=\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial x}u+\frac{\partial u}{\partial z}w$$

Waarvan de algemene oplossing onbekend is.
Tijdens de 10.th. Conference on Coastal Engineering in 1966 in Tokyo, hebben Yuichi Iwagaki en Yoshito Tsuchiya de hoeveelheid energieverlies van een laminaire en onsamendrukbare vloeistof t.g.v. de bodemwrijving, geschreven in termen van de snelheidsgradiënt m.b.v. Rayleigh's laminaire dissipatiefunctie. Zie [7] .
De Navier-Stokes vergelijkingen worden met enkele kunstgrepen tot de volgende dimensieloze vorm teruggebracht:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau}+\left(\frac{u_0}{c}\right)\left(\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi}+\bar{w}\frac{\partial \bar{u}}{\partial \zeta}\right)=-\frac{\partial \bar{p}}{\partial \xi}+\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \zeta^2}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi}+\frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta}=0\ ;\ -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \xi}=\frac{\partial \bar{U}}{\partial \tau}+\left(\frac{u_0}{c}\right)\bar{U}\frac{\partial \bar{U}}{\partial \xi}\ .$$

waarin :

$$u=\bar{u}u_0,\ w=\frac{\bar{w}u_0}{\sqrt{R}},\ U=u_0\bar{U}\ ,$$

$$p=\rho u_0^2\bar{p}\ ,\ R=\frac{cL}{2\pi\nu}\ ,\ x=\frac{L}{2\pi}\xi\ ,$$

$$z=\frac{L}{2\pi\sqrt{R}}\zeta\ ,\ t=\frac{L}{2\pi c}\tau\ .$$

u,w, zijn de snelheidscomponenten in resp. x- en z- richting.
t is de tijd,p de druk,$\nu$ de kin.viscositeit,$\rho$ de dichtheid,
U de snelheid net buiten de grenslaag,$u_0$ de max. bodemsnelheid

$$u_0=\frac{\pi H}{T}\cdot\frac{1}{\sinh kh}\ .$$

De vergelijkingen worden nu opgelost m.b.v. een reeksontwikkeling en een parameter $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{u_0}{c} \quad \text{en} \quad \bar{u} = \bar{u}_0 + \varepsilon\bar{u}_1 + \varepsilon^2\bar{u}_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\bar{w} = \bar{w}_0 + \varepsilon\bar{w}_1 + \varepsilon^2\bar{w}_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

Met behulp van de laminaire dissipatiefunctie van Rayleigh,kan het energieverlies t.g.v. de viscositeit voor een grenslaag aan de bodem, bij benadering in de snelheidsgradiënt geschreven worden.

$$\bar{E}_{fb} = \frac{\mu u_0^2}{L} \sqrt{R} \int_0^{2\pi} \int_0^{\partial\zeta} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \zeta} \right)^2 d\zeta \, d\xi$$

$$\bar{u}( \xi, \tau, \zeta )$$

$$\bar{E}_{fb} = \frac{\mu}{2} \beta \left( \frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{1}{\sinh^2 kh} \left\{ 1 - \frac{8\sqrt{2}}{3\pi} ( 0.197 ) \varepsilon + o(\varepsilon^2) \right\} \qquad (23)$$

(per eenheid van oppervlakte en tijd)

waarin: $\beta = \left( \frac{\pi}{\nu T} \right)^{\frac{1}{2}}$ , H is de golfhoogte , $\mu$ = dyn.visc.,$\varepsilon = \frac{\hat{u}_b}{c}$ ,

$\partial_\zeta$ = dimensieloze vorm van de dikte van de grenslaag $\partial$.

$\partial\zeta = \frac{2\pi\sqrt{R}}{L} \cdot \partial$ .