

# De invloed van rotortraagheid en lek op het aanloopgedrag van een molen met pomp

**Citation for published version (APA):**

de Leede, G. L. A. (1981). *De invloed van rotortraagheid en lek op het aanloopgedrag van een molen met pomp.* (TU Eindhoven. Vakgr. Transportfysica : rapport; Vol. R-468-S). Technische Hogeschool Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1981

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

BIBL. TECHNISCHE  
UNIVERSITEIT



\*9305809\*

EINDHOVEN

dokumentatiecentrum bureau  
ontwikkelingsaanpak  
T.H. Eindhoven - gebouw O

DOCUMENTATIECENTRUM	
D.A.S. UNIT	
	AA 11 81.01
	AA 13
datum	130581

De invloed van rotortraagheid en  
lek op het aanloopgedrag van een  
molen met pomp

Gerard de Leede

febr. 1981

R-468-S

Begeleider: P.T. Smulders

Deze stage is verricht in het najaar 1980 in de vakgroep  
Transportfysica van de afdeling der Technische Natuurkunde.  
Technische Hogeschool Eindhoven

De schrijver dankt allen, die bij deze  
stage behulpzaam zijn geweest.

## INHOUD VAN DIT VERSLAG

### Samenvatting.

	blz.
1. Inleiding	1
2. Het gedrag van een molen inclusief rotor- traagheid en lek	3
2.1. Schets van de situatie	3
2.2. Het opstellen van een model	4
2.2.1. Het momentenevenwicht	
2.2.2. Het pompkoppel	
2.2.3. De onbalans	
2.2.4. De lagerwrijving	
2.2.5. De manchetwrijving	
2.2.6. Het invullen van het momenten- evenwicht	
2.3. De dimensieloze schrijfwijze	8
3. Het oplossen van de differentiaalverge- lijkingen	10
3.1. Algemene werkwijze bij het numeriek oplossen van de differentiaalvgn	10
3.2. Berekening van beginvoorwaarden	11
4. Resultaten	13
5. Interpretatie van de resultaten, veldwaar- nemingen en conclusies	29
5.1. Interpretatie	29
5.2. Veldwaarnemingen	32
5.3. Conclusies	32
Literatuurlijst	35
Appendix	36

## SAMENVATTING.

In deze stage werd een model opgesteld voor het instationaire gedrag van een molen gekoppeld aan een zuigerpomp met lekgat, rekening houdend met traagheid, lek en wrijvingsverliezen. Ter oplossing van de hierbij af te leiden differentiaalvergelijkingen werd een computer-programma geschreven, waarmee het gedrag van de THE I/2 windmolen werd doorgerekend voor stapfuncties vanaf nul in de windsnelheid. De resultaten hiervan lijken een goede beschrijving van het gedrag van de molen te vormen en stemmen qua grootte-orde overeen met oriënterende waarnemingen in het veld. Het model met rekenprogramma bleek eveneens geschikt ter beschrijving van het quasi-stationaire gedrag van de molen.

## HOOFDSTUK 1. INLEIDING

De sectie Windenergie (vakgroep Transportfysica) van de afdeling Technische Natuurkunde van de T.H.E. verricht al enige jaren onderzoek naar het gedrag van waterpompen- de windmolens ten behoeve van ontwikkelingslanden.

Deze stage werd verricht om meer inzicht te krijgen in het aanloopprobleem dat bij deze, zo eenvoudig mogelijk gebouwde molens een rol speelt. Om betere aanloopeigenschappen te verkrijgen is de zuiger van de pomp voorzien van een lekgaatje. Met deze stage werd getracht langs theoretische weg gegevens te verkrijgen wat betreft de invloed van zo'n lekgat, rekening houdend met de traagheid van de rotor. Belangrijk is hier dus het instationaire aanloopgedrag van de molen.

Door van Meel (zie lit.1) werden de invloed van een lekgat en de rotortraagheid afzonderlijk bepaald. In het eerste geval, waarbij hij het toerental constant veronderstelde, berekende hij koppel en rendementsverloop als functie van het toerental. In het tweede geval, waarbij hij traagheden van pompstang, zuiger en waterkolom buiten beschouwing liet, loste hij de bijbehorende differentiaalvergelijking numeriek op voor twee verschillende waarden van het rotorkoppel.

Rienstra en Stevens (zie lit.2) hebben een aanzet gegeven om het aanloopgedrag inclusief rotortraagheid en lek te beschrijven door een analytische oplossing te construeren voor een aantal limietgevallen.

In deze stage is het model uitgebreid met o.a. de invloed van mechanische wrijving en zuigergewicht. De verkregen dimensieloze vergelijkingen werden numeriek opgelost voor een stapfunctie vanaf nul in de windsnelheid.

In dit verslag wordt in hoofdstuk 2 beschreven hoe men eenvoudig, uitgaande van het werk van van Meel, de differentiaalvergelijkingen van de molen kan vinden.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 aangegeven hoe deze vergelijkingen numeriek kunnen worden opgelost. In hoofdstuk 4 worden de numerieke resultaten weergegeven.

Hoofdstuk 5 handelt over de interpretatie van de resultaten en conclusies daaruit. In de appendix tenslotte vindt men het complete programma met handleiding en toelichting.

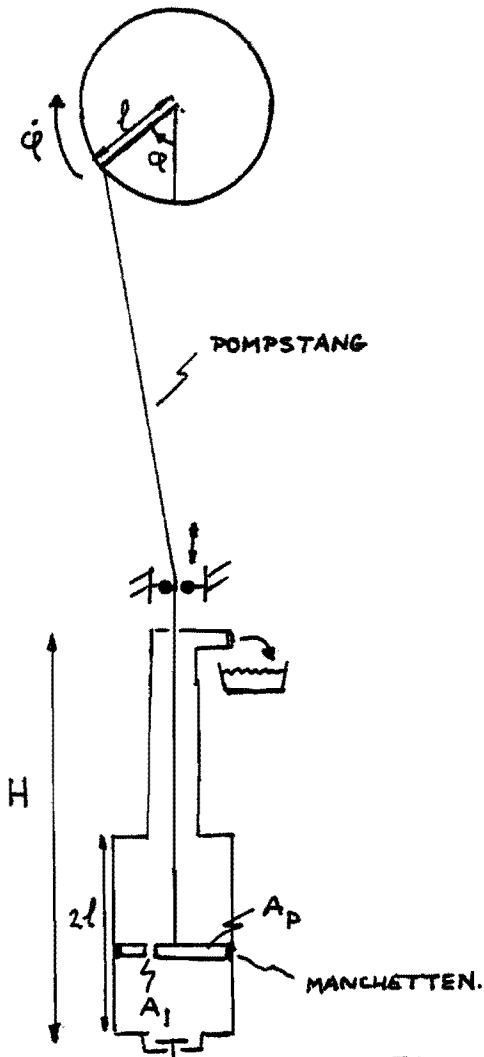
HOOFDSTUK 2. HET GEDRAG VAN EEN MOLEN INCLUSIEF  
ROTORTRAAGHEID EN LEK

2.1. SCHETS VAN DE SITUATIE.

We zullen de molen met pomp op de meest eenvoudige wijze voorstellen. De zuigerstang (zie fig.1) is met behulp van scharnieren aan de toren bevestigd, zodanig dat de zuiger enkel in verticale richting kan bewegen. Bovendien is de pompstang veel langer dan de kruk.

Verklaring symbolen:

- H = totale opvoerhoogte
- $\varphi$  = hoek kruk met vertikaal
- $A_p$  = zuigerdoorsnede
- $A_l$  = doorsnede lekgaatje
- l = lengte van kruk



Figuur 1. Schematische weergave van de molen met pomp.

## 2.2. HET OPSTELLEN VAN EEN MODEL.

Voordat we overgaan tot het afleiden van de differentiaalvergelijkingen doen we eerst enige veronderstellingen. Deze zijn:

- geen wrijvingsverliezen in kleppen en leidingen.
- pompstang veel langer dan kruk.
- de lagerwrijving is recht evenredig met het rotor-koppel.
- de manchetswrijving van de zuiger is bij gegeven opvoerhoogte konstant, doch verschilt van grootte afhankelijk van de richting waarin de kruk beweegt.

Deze veronderstellingen lijken de werkelijke situatie goed te beschrijven en dus is het onnodig geacht om het model in deze fase ingewikkelder te maken.

### 2.2.1. Het momentenevenwicht.

De eerste stap in de afleiding van de differentiaalvergelijkingen is het opstellen van een momentenevenwicht. Daartoe moeten we eerst bekijken welke momenten in het model een rol spelen. Dat zijn:

$M_r$  = het door de rotor aan de rotoras afgegeven moment (volgt uit de  $c_m$ - $\lambda$  curve van de molen en de windsnelheid).

$M_p$  = het koppel dat de pomp vraagt.

$M_g$  = het koppel ten gevolge van de onbalans veroorzaakt door het gewicht  $G$  van zuiger, zuigerstang en kruk.

$M_l$  = het koppel ten gevolge van de lagerwrijving.

$M_m$  = het koppel ten gevolge van de manchetswrijving.

Als we  $I$  het traagheidsmoment van de rotor noemen dan volgt de hoekversnelling  $\ddot{\varphi}$  uit het momentenevenwicht:

$$M_r = I\ddot{\varphi} + M_p + M_g + M_l + M_m \quad (1)$$

### 2.2.2. Het pompkoppel.

Door van Meel (zie lit.1) is een vergelijking afgeleid die het verloop geeft van het pompkoppel  $M_p$ , dit is het



koppel dat de pomp met lek vraagt, als functie van de hoek  $\varphi$  van de kruk. Hij doet dit uitgaande van een konstant toerental waarmee de molen draait. In dit verslag wordt zijn redenering grotendeels overgenomen met dien verstande dat we zeker bij aanloop te maken hebben met variabele hoeksnelheden. Om een uitspraak te doen over de grootte van het pompkoppel moeten we eerst de stroming door het lekgaatje beschouwen. Daaruit zal blijken of wel of geen water wordt opgetild en hoe groot het drukverlies en de lekstroming door het lekgaat zijn.

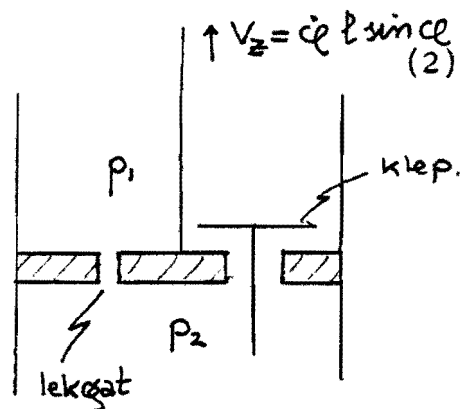
Voor de drukval over de zuiger geldt (zie fig.2):

A) Bij omhooggaande slag (klep dicht)

$$p_1 - p_2 = 1/2 \rho_w c^2 \xi$$

Met:

- $p_1, p_2$  = de drukken resp. boven en onder de zuiger
- $c$  = watersnelheid in lekgaat
- $\rho_w$  = soortelijk gewicht water
- $\xi$  = weerstandsverliescoëff.



figuur 2. Schematische weergave van de zuiger.

of, anders geschreven: 
$$c^2 = \frac{2 (p_1 - p_2)}{\rho_w \xi}$$

Zolang de pomp nog geen water levert geldt:

$$c A_1 = c l \sin(\varphi) A_p \tag{3}$$

oftewel  $c = c l \sin \varphi A_p / A_1$

De pomp levert geen water als:  $p_1 - p_2 < \rho_w g H$

De pomp begint te leveren als:  $p_1 - p_2 = \rho_w g H$

Dan geldt voor de snelheid van het water in het lekgaatje:

$$c = \sqrt{2 g H / \xi} \tag{4}$$

Uit (3) en (4) volgt dat de pomp juist water gaat leveren als:

$$\dot{\varphi} \sin \varphi = \sqrt{2 g H / \gamma} A_1 / (A_p l) =: \Omega_0 \quad (5)$$

$\Omega_0$  is een soort karakteristieke frequentie en is juist die frequentie die van Meel vindt (onder conditie van constant toerental) als de pomp juist water levert.

B) Bij omlaaggaande slag (klep open) is het pompkoppel nul. De stroming door het lekgat wordt hier verwaarloosd omdat de klep geheel open staat.

Tijdens een omwenteling van de kruk kunnen zich nu drie gevallen voordoen:

A)  $0 \leq \varphi \leq \pi$  de opgaande slag - waterlevering mogelijk

I. Als  $\dot{\varphi} \sin \varphi \leq \Omega_0$  dan geldt voor het pompkoppel

$$M_p = A_p (p_1 - p_2) l \sin \varphi$$

Met (2), (3) en (5) is dit te schrijven als:

$$M_p = \pi M_0 \frac{\dot{\varphi}^2}{\Omega_0^2} \sin^3 \varphi \quad (\text{geen waterlevering}) \quad (6)$$

waarin  $M_0 = \frac{1}{\pi} \rho_w g H A_p l$  het gemiddeld koppel is tijdens een omwenteling van een pomp zonder lekgat.

II. Als  $\dot{\varphi} \sin \varphi \geq \Omega_0$  dan geldt dat het drukverschil over de zuiger juist gelijk is aan de totale opvoerhoogte:  $(p_1 - p_2) = \rho_w g H$  en dus

$$M_p = \pi M_0 \sin \varphi \quad (\text{waterlevering}) \quad (7)$$

B)  $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$  de neergaande slag - nooit waterlevering

$$M_p = 0 \quad (8)$$

### 2.2.3. De onbalans.

De zuigerstang en zuiger worden beschouwd als een puntmassa hangend aan de kruk. De kruk dient ook beschouwd te worden als een puntmassa op afstand  $l$  van de rotoras. Bij de bepaling van het gewicht  $G$  moet men dus de werkelijke massa corrigeren.

### 2.2.4. De lagerwrijving.

Zoals reeds opgemerkt wordt de lagerwrijving recht even-

redig aan het rotorkoppel verondersteld zodat we kunnen schrijven:

$$M_r - M_l = D M_r \quad (0 \leq D \leq 1)$$

### 2.2.5. De manchetwrijving.

De manchetwrijving, die bij gegeven opvoerhoogte als constante wordt beschouwd, wordt  $\epsilon_1$  genoemd in de opgaande slag respektievelijk  $\epsilon_2$  in de neergaande slag.

### 2.2.6. Het invullen van het momentenevenwicht.

Met behulp van het voorgaande kan men vergelijking (1) termsgewijs gaan invullen. Alvorens hiermee te beginnen schrijven we nog:

$$M_g + M_m = (G + \epsilon_1) l \sin \varphi \quad \text{in de opgaande slag}$$

en

$$M_g * M_m = (G - \epsilon_2) l \sin \varphi \quad \text{in de neergaande slag.}$$

Gebruikmakend van deze afspraken en de vergelijkingen (6), (7) en (8) voor het pompkoppel wordt het momentenevenwicht nu:

A)

$$D M_r = M_0 \pi \frac{\dot{\varphi}^2}{\Omega_0^2} \sin^3 \varphi + I \ddot{\varphi} + (G + \epsilon_1) l \sin \varphi \quad (9)$$

als  $\dot{\varphi} \sin \varphi \leq \Omega_0$  - geen waterlevering.

$$D M_r = M_0 \pi \sin \varphi + I \ddot{\varphi} + (G + \epsilon_1) l \sin \varphi \quad (10)$$

als  $\dot{\varphi} \sin \varphi \geq \Omega_0$  - wel waterlevering.

B)

$$D M_r = I \ddot{\varphi} + (G - \epsilon_2) l \sin \varphi \quad (11)$$

- nooit waterlevering.

Wij voeren daarbij in de beginvoorwaarden:

$$\begin{cases} t < 0 & M_r = 0 & \varphi = \dot{\varphi} = 0 \\ t \geq 0 & M_r = F(V_w(t)) \end{cases}$$

In woorden: we beschouwen een molen die tot het tijdstip  $t = 0$  stilstaat in de onderste stand en vervolgens een koppel ondervindt ten gevolge van een bepaald windaanbod  $V_w(t)$ .

N.B. De hoekversnelling op tijdstip  $t = 0$  is af te leiden uit (9) en is gelijk aan  $D M_r / I$ .

2.3. DE DIMENSIELOZE SCHRIJFWIJZE.

Alvorens te bedenken hoe men de nu ontstane vergelijkingen zou kunnen oplossen, zullen we deze eerst in dimensieloze vorm schrijven, waarmee het aantal parameters wordt gereduceerd. Deze schrijfwijze is niet alleen duidelijker, doch men kan ook onmiddellijk aan de samenstelling van de dimensieloze getallen zien welke variatie van gegevens tot een andere uitkomst leidt; het kan namelijk zijn dat variatie van meerdere gegevens tegelijk geen effect heeft op de uitkomst. Onnodig rekenwerk kan dus worden vermeden.

De aanpak is bijna dezelfde als die van Riemstra en Stevens (zie lit.2) doch voor de tijdkonstante  $\tau$  kiezen we:

$$\tau = \sqrt{I/M_0} \tag{12}$$

De fysische betekenis van  $\tau$  is dat dit de trillingstijd is bij de vgl.  $I\ddot{\varphi} + M_0\pi \sin\varphi = 0$  voor kleine  $\varphi$ .

We voeren de volgende dimensieloze grootheden in:

$$t' = t/\tau, \quad A_1 = G l/M_0, \quad E_1 = \epsilon_1 l/M_0, \quad E_2 = \epsilon_2 l/M_0$$

$$\text{Er rekening mee houdend dat: } \frac{d\varphi}{dt'} = \tau \frac{d\varphi}{dt}, \quad \frac{d^2\varphi}{dt'^2} = \tau^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

zien we dat vergelijking (9) te schrijven is als (we laten de accenten weer weg):

$$D M_r/M_0 = \frac{\pi}{\Omega_0^2 \tau^2} \dot{\varphi}^2 \sin^3\varphi + \ddot{\varphi} + (A_1 + E_1) \sin\varphi$$

$$\text{als } \dot{\varphi} \sin\varphi \leq \tau \Omega_0.$$

Schrijf nu de uitdrukking voor het rotorkoppel als:

$$D M_r/M_0 = \frac{D C_m(0) 1/2 \rho V_{ref}^2 \pi R^3}{M_0} \left( \frac{V_w(\tau t)}{V_{ref}} \right)^2 \frac{C_m(\lambda)}{C_m(0)}$$

Hierin is  $V_{ref}$  een gekozen referentiesnelheid die gegeven wordt door de volgende uitdrukking:

$$V_{ref}^2 = M_0 / (D C_m(0) 1/2 \rho \pi R^3)$$

Fysisch gezien is dit juist die windsnelheid waarbij de stilstaande rotor een koppel levert gelijk aan het gemiddeld koppel dat een ideale pomp vraagt (d.i.  $M_0$ ).

Vervolgens kunnen we deze schrijfwijze verder vereenvoudigen door te stellen:

$$C = \tau \Omega_0, \quad \left( \frac{V_w(\tau t)}{V_{ref}} \right)^2 = g(t) \quad \text{en} \quad \frac{C_m(\lambda)}{C_m(0)} = f(\lambda).$$

Als we het voorgaande toepassen op de vergelijkingen (9) t/m (11) dan volgt uiteindelijk:

A)

$$\ddot{\varphi} + \frac{\pi}{C^2} \dot{\varphi}^2 \sin^3 \varphi + (A_1 + E_1) \sin \varphi = f(\lambda(t)) g(t) \quad (13)$$

voor  $\dot{\varphi} \sin \varphi \leq C$ .

$$\ddot{\varphi} + (A_1 + \pi + E_1) \sin \varphi = f(\lambda(t)) g(t) \quad (14)$$

voor  $\dot{\varphi} \sin \varphi \geq C$ .

B)

$$\ddot{\varphi} + (A_1 - E_2) \sin \varphi = f(\lambda(t)) g(t) \quad (15)$$

Met beginvoorwaarden:  $\begin{cases} t < 0 & \varphi = \dot{\varphi} = 0 \quad \text{en} \quad g(t) = 0 \\ t \geq 0 & g(t) \neq 0 \end{cases}$

Het resultaat van dit schrijfwerk is dat we met vgl. (13) t/m (15) drie dimensieloze differentiaal vergelijkingen hebben gevonden met (natuurlijk) dimensieloze beginvoorwaarden. Het is gemakkelijk in te zien dat het stelsel differentiaalvergelijkingen steeds andere oplossingen heeft als we  $A_1$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $C$ , de  $C_m$ - $\lambda$  curve of het windpatroon variëren. Die hangen dus in het algemeen af van meerdere moleneigenschappen tegelijk. Voor de oplossing van de vergelijkingen moeten dus de volgende dimensieloze systeemgrootheden bekend zijn:

$$A_1 = G \cdot 1/M_0, \quad ,$$

$$E_1 = \epsilon_1 \cdot 1/M_0, \quad , \quad C = \tau \Omega_0, \quad ,$$

$$E_2 = \epsilon_2 \cdot 1/M_0, \quad , \quad f(\lambda) = \frac{C_m(\lambda)}{C_m(0)}, \quad ,$$

Men moet hierbij bedenken dat voor de snellopendheid

$$\lambda \text{ nu geldt:} \quad = \frac{\dot{\varphi} R}{\tau V_w(\tau t)}$$

### HOOFDSTUK 3. HET OPLOSSEN VAN DE DIFFERENTIALVERGELIJKINGEN

#### 3.1. ALGEMENE WERKWIJZE BIJ HET NUMERIEK OPLOSSEN VAN DE DIFFERENTIALVERGELIJKINGEN.

De vergelijkingen (13) t/m (15) behoren tot de differentiaalvergelijkingen met als algemene vorm:

$\ddot{q} = \text{functie}(t, q, \dot{q})$  met beginvoorwaarden.

Deze vergelijkingen kunnen alleen numeriek worden opgelost. Een oplossingsmethode voor dit probleem is de Runga-Kutta methode. Hiervoor is een standaardprocedure RK2 beschikbaar (zie lit. 3) waarvan de beschrijving is terug te vinden in de RC-informatie.

Men kiest de tijd als onafhankelijke parameter en kan dan stapsgewijs de bijbehorende  $q$  en  $\dot{q}$  uitrekenen door het herhaaldelijk aanroepen van de RK2 procedure. In deze procedure wordt dan nog eens stapsgewijs over het betreffende interval geïntegreerd, dit om meer nauwkeurigheid te bereiken. Na elk stapje worden opnieuw de bijbehorende termen van de betreffende d.v. berekend, zo ook het produkt  $f(\lambda) g(t)$  waarvan de waarde door een procedure-aanroep wordt bepaald (voor meer precieze informatie wordt verwezen naar de appendix). Er doen zich nu echter twee problemen voor die weliswaar van gelijke aard zijn.

Normaal worden na elke integratiestap de eindwaarden van het laatste interval gebruikt als beginwaarden voor doorintegreren. Het kan nu gebeuren dat na een integratiestap waarbij gebruik is gemaakt van een der drie d.v.n.:

- het produkt van  $q$  en  $\sin q$  zodanig van grootte is veranderd dat de voorwaarde wat betreft wel of geen waterlevering is overschreden.

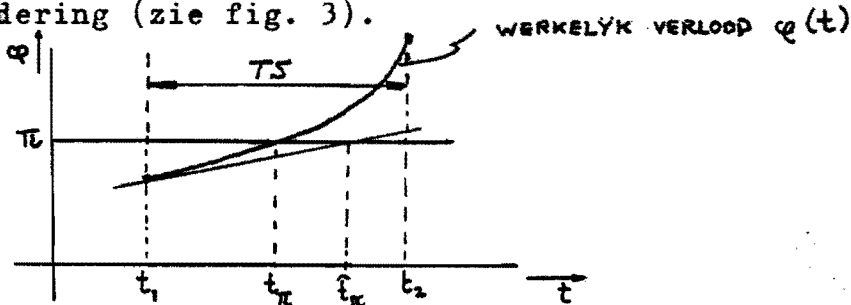
- dat de waarde van  $q$  zodanig is veranderd dat in de laatste stap juist één van de grenzen  $q = n\pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) wordt overschreden.

In beide gevallen is de berekende waarde aan het interval eind niet juist omdat de d.v. er niet meer geldig is.

Het probleem is dat men niet weet op welk tijdstip de overschrijding precies plaatsvindt; men moet dus een benadering gaan maken.

3.2. BEREKENING VAN BEGINVOORWAARDEN.

1. Om te beginnen met het eenvoudigste geval:  $\varphi = n\pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) wordt overschreden in een integratiestap. We maken gebruik van een eerste orde benadering (zie fig. 3).



Figuur 3. Voorbeeld benadering als  $\varphi = \pi$   
TS is de stapgrootte i.d. tijd.

De benodigde tijdsduur  $t_{\pi} - t_1$  wordt benaderd met

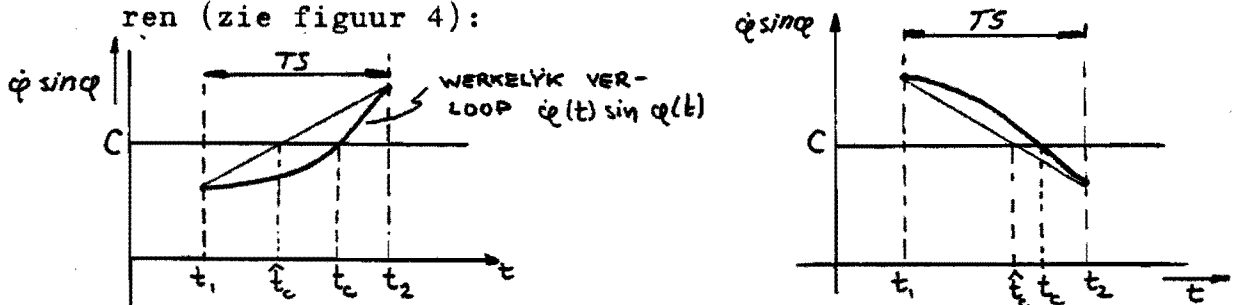
$$t_{\pi} - t_1 = \Delta\varphi / \dot{\varphi}(t_1) = \{\pi - \varphi(t_1)\} / \dot{\varphi}(t_1)$$

Vervolgens wordt de snelheid  $\dot{\varphi}(t_{\pi})$  weer benaderd

$$\text{door de vgl. } \hat{\dot{\varphi}}(t_{\pi}) = \dot{\varphi}(t_1) + (t_{\pi} - t_1) \ddot{\varphi}(t_1)$$

We hebben nu dus een benadering voor  $t$  en  $\dot{\varphi}$  als  $\varphi = \pi$  en kunnen de berekening voortzetten met de andere d.v.

2. Nu het geval dat de voorwaarde  $\dot{\varphi} \sin\varphi = C$  wordt overschreden. Dit kan op de volgende twee manieren (zie figuur 4):



figuur 4. Voorbeeld benadering tijdstip waarop waterlevering begint of eindigt.

\* De indices onder hebben de volgende betekenis:  
 $t_1$  = voorlaatste tijdstip       $t_2$  = laatste tijdstip  
 $t_{\pi}$  = tijdstip als  $\varphi = \pi$        $t_C$  = tijdstip  $\dot{\varphi} \sin\varphi = C$   
 ^ geeft aan dat sprake is van een benadering.

Omdat de stapgrootte in de tijd niet vastligt bepalen we de fractie  $\frac{t_C - t_1}{t_2 - t_1}$  d.m.v. de benadering:

$$\frac{t_C - t_1}{TS} = \frac{C - \dot{\varphi}(t_1) \sin \varphi(t_1)}{\dot{\varphi}(t_2) \sin \varphi(t_2) - \dot{\varphi}(t_1) \sin \varphi(t_1)}$$

Hiermee is het tijdje  $t_C - t_1$  bepaald. We moeten nu  $\varphi$  en  $\dot{\varphi}$  bepalen op het tijdstip dat  $\dot{\varphi} \sin \varphi = C$ . Dit kan op de volgende twee manieren:

- Benader  $\dot{\varphi}(t_C)$  door  $\hat{\dot{\varphi}}(t_C) = \dot{\varphi}(t_1) + (t_C - t_1) \ddot{\varphi}(t_1)$   
en benader vervolgens  $\varphi(t_C)$  door  $\hat{\varphi}(t_C) = \arcsin(C / \hat{\dot{\varphi}}(t_C))$
- Benader  $\varphi(t_C)$  door  $\hat{\varphi}(t_C) = \varphi(t_1) + (t_C - t_1) \dot{\varphi}(t_1) + 1/2 \ddot{\varphi}(t_1) (t_C - t_1)^2$   
en benader vervolgens  $\dot{\varphi}(t_C)$  door  $\hat{\dot{\varphi}}(t_C) = C / \sin \hat{\varphi}(t_C)$

Bij gebruikmaking van deze methoden in de berekening bleek de eerste beter te werken ingeval  $\sin \varphi$  klein is, de tweede bleek gunstiger bij groter waarden van  $\sin \varphi$ . Dit is begrijpelijk als men de verschillende steilheden van de grafieken van  $\sin \varphi$  en  $\arcsin \varphi$  in beschouwing neemt. Immers, hoe steiler het verloop van de functie is, des te groter zal het verschil in functie-waarde zijn voor naburige punten. Bovendien is als  $\sin \varphi$  zeer klein is, deling erdoor op de rekenmachine niet mogelijk, zodat methode b dan zeker niet toepasbaar is.

Verder is gebleken dat bij hoge hoeksnelheden ( $>10$ ) de genoemde benaderingen zeer slecht werken, zodat dan gesteld wordt dat de hoeksnelheid  $\hat{\dot{\varphi}}(t_C) = \dot{\varphi}(t_1)$ . Dus er wordt verondersteld dat bij grotere snelheden de snelheid van de zuiger bij aanvang van waterlevering nog gelijk is aan de snelheid even ervoor, toen nog geen water werd geleverd. Er volgt dan nog:

$$\hat{\dot{\varphi}}(t_C) = \arcsin(C / \dot{\varphi}(t_1)) \quad \text{en} \quad t_C = t_1 + \frac{\hat{\varphi}(t_C) - \varphi(t_1)}{\dot{\varphi}(t_1)}$$



HOOFDSTUK 4. RESULTATEN

Op basis van het voorgaande is een programma geschreven waarvan de volledige tekst in de appendix is afgedrukt. Dit programma is gedraaid met als invoergegevens van de THE I/2 windmolen (rotordiam. 1.37 m. , slag 0.05 m. , pompdiam. 0.145 m.). Voor een meer precieze beschrijving van deze molen wordt verwezen naar bouwtekeningen en -beschrijving (zie lit. 4).

De waarden van de voor berekening benodigde grootheden bedragen dan

$A_1$	=	7.0686 $10^{-6}$	$m^2$	
$A_p$	=	1.65 $10^{-2}$	$m^2$	
$l$	=	0.025	m	
$G$	=	138	N	
$H'$	=	6	m	
$I^*$	=	13.95	kg $m^2$	*Deze waarde is geschat uit bouwtekeningen.
$R$	=	1.37	m	
$\xi$	=	1		
$\epsilon_1$	=	0	N	
$\epsilon_2$	=	0	N	
$D$	=	0.99		

Uit de bovenstaande getallen volgen:

$M_0$	=	7.7285	Nm
$\tau$	=	1.3435	s
$\Omega_0$	=	0.1859	$s^{-1}$
$V_{ref}$	=	3.7596	$ms^{-1}$

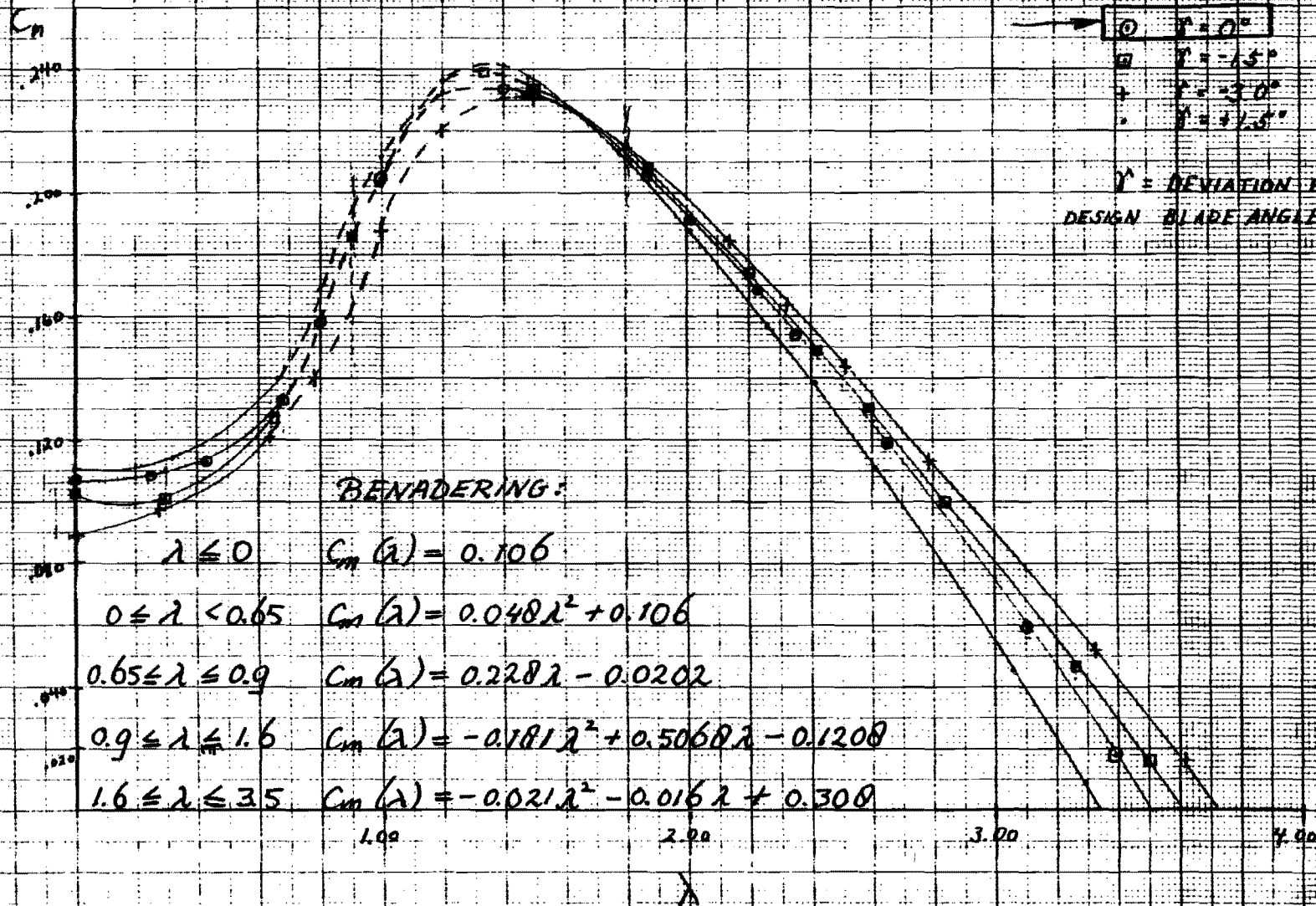
De dimensieloze getallen zijn dan:

$C$	=	0.2489	$A_1$	=	0.4464
$E_1$	=	0	$E_2$	=	0

N.B.  $\pi/C^2$  uit vgl. (13) bedraagt nu: 50.3502

We moeten nu nog de functie  $f(\lambda)$  bepalen voor de THE I/2. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een benadering van de karakteristiek zoals Schumack die heeft gemeten in de windtunnel (zie lit. 5). We maken gebruik van de resultaten voor een scheefhoek van  $0^\circ$ , waarvan een afdruk is toegevoegd op de volgende pagina. Hierin is vermeld welke benadering is gemaakt.

THE T/A MODEL 1.5 m DIA  
 WADDINXVEEN 29/10/79  
 MARK SCHUMACK  
 JOS BEURSKENS



$\gamma$  = DEVIATION FROM ORIGINAL  
 DESIGN BLADE ANGLES

Lit:

BENADERING VAN DE  $C_m$ - $\lambda$  CURVE M.B.V. 2<sup>e</sup> GRAADSPOLYNOMEN (SCHEEFHOEK  $\gamma=0^\circ$ )

Beradering van de

16 op 11/1/1980

Als laatste werd de functie  $g(t)$  bepaald door voor de windsnelheid stapfuncties te nemen van verschillende grootte. Vervolgens werd het programma gedraaid op de B7700 van de T.H. Eindhoven.

Als eerste resultaat is uitgezet in de grafieken 1 en 2 het gedrag van de molen bij 5 m/s windsnelheid om te laten zien hoe het programma werkt, vooral de in §3.2. besproken benaderingen.

Daarna is voor verschillende windsnelheden  $\varphi(t)$  uitgezet in één grafiek. Zo ook  $\dot{\varphi}(t)$  (zie grafieken 3, 4a en 4b).

Hetzelfde is gedaan voor een molen met dezelfde eigenschappen, echter voorzien van een lekgat met diameter 10 mm. i.p.v. 3 mm. (zie grafieken 5 en 6).

Vervolgens laten de grafieken 7, 8a en 8b zien wat de invloed is van balanceren door de berekening uit te voeren met het halve gewicht G (zuigerstang, zuiger en kruk).

Verder zijn in de hieronder afgebeelde tabel I de eindsnelheden  $\dot{\varphi}_e$  uitgezet die na voldoende rotaties (25) bereikt worden, dit ook bij verschillende windsnelheden. Uiteraard treden dan nog kleine schommelingen om deze stationaire waarden op. Als waarde van genoemde eindsnelheid is gekozen de waarde van de hoeksnelheid als de pomp door de onderste stand gaat. We hebben hiermee meteen een controle op de resultaten omdat de genoemde hoeksnelheden ook direct uit de vergelijkingen (13) t/m (15) kunnen worden bepaald. Hierbij wordt verondersteld dat de molen dusdanig snel draait dat gedurende de gehele opgaande slag water wordt geleverd en dat de hoekversnelling nul is. Middelen van het resterende koppel in (14) resp. (15) over een hele slag levert een evenwichtswaarde  $\bar{\varphi}_e$ , waarvoor het geleverde koppel gelijk is aan het gevraagde koppel.

$\frac{\dot{\varphi}_e}{\text{wind}}$	$\phi_2 3 \text{ mm.}$	$\phi_2 10 \text{ mm.}$	$\bar{\varphi}_e \text{ (ber.)}$
4 $\frac{m}{s}$	11.17	11.03	11.09
5 $\frac{m}{s}$	15.15	14.93	15.05
6 $\frac{m}{s}$	18.82	18.82	18.79

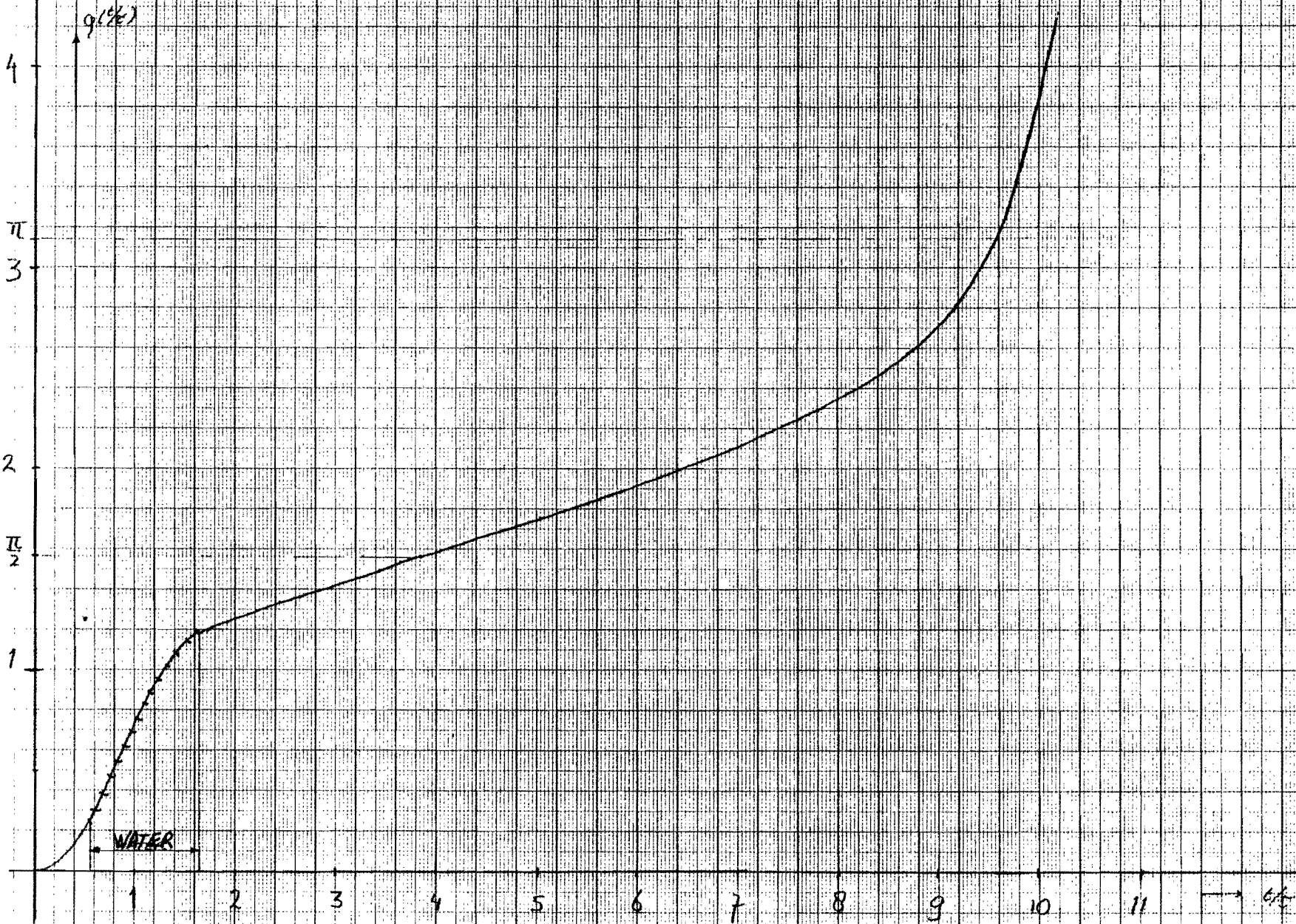
Tabel I. De hoeksnelheid na vele rotaties. N.B.: de werkelijke waarden zijn een factor  $\tau$  kleiner v.w. dimensieloos rekenen.

Grafiek 9 geeft vervolgens het verloop van de tijd die verstrikt alvorens de eerste opgaande slag is voltooid, als functie van de windsnelheid.

Grafiek 10 geeft tenslotte het verloop van de hoeksnelheid in opvolgende rotaties bij doorgang in  $\varphi = 0$ . De windsnelheid bedraagt 6 m/s.

Bij dit alles nog de opmerking dat niet alle resultaten zijn vermeld, dit vanwege de omvang. Gepoogd is om met de getekende grafieken een zo duidelijk en compleet mogelijke weergave van de tabellen  $t$ ,  $\varphi$  en  $\dot{\varphi}$  te geven zoals deze uit de berekeningen volgen.

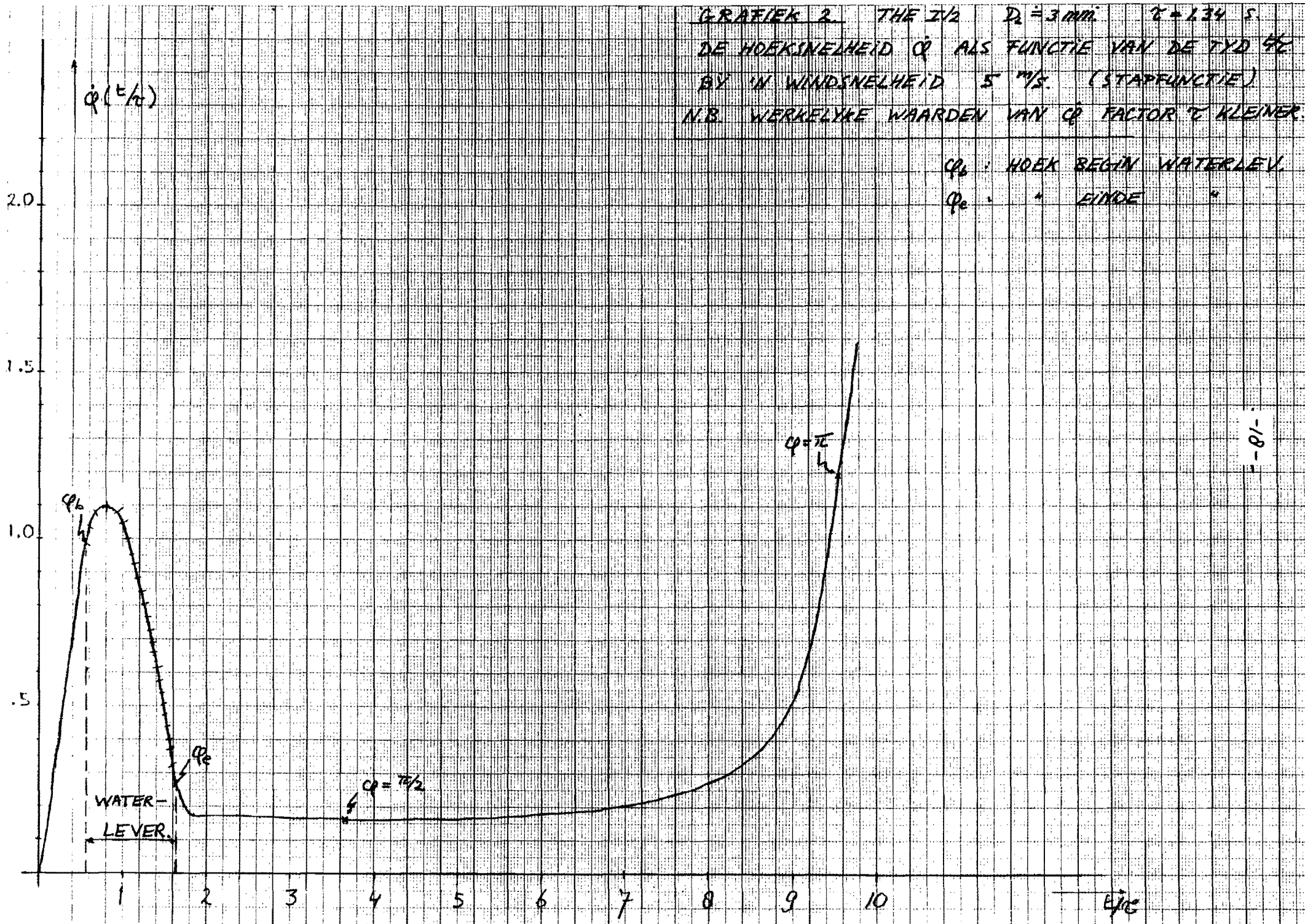
GRAFIEK 1      $T_{HE} \text{ I/A}$       $D_L = 3 \text{ mm}$       $\tau = 1.34 \text{ s}$   
 DE HOEK  $\varphi$  ALS FUNCTIE VAN DE TIJD  $t/\tau$   
 BIJ EEN STAP I.D. WINDSNELHEID VAN  
 0 TOT 5  $\text{m/s}$ .



-17-

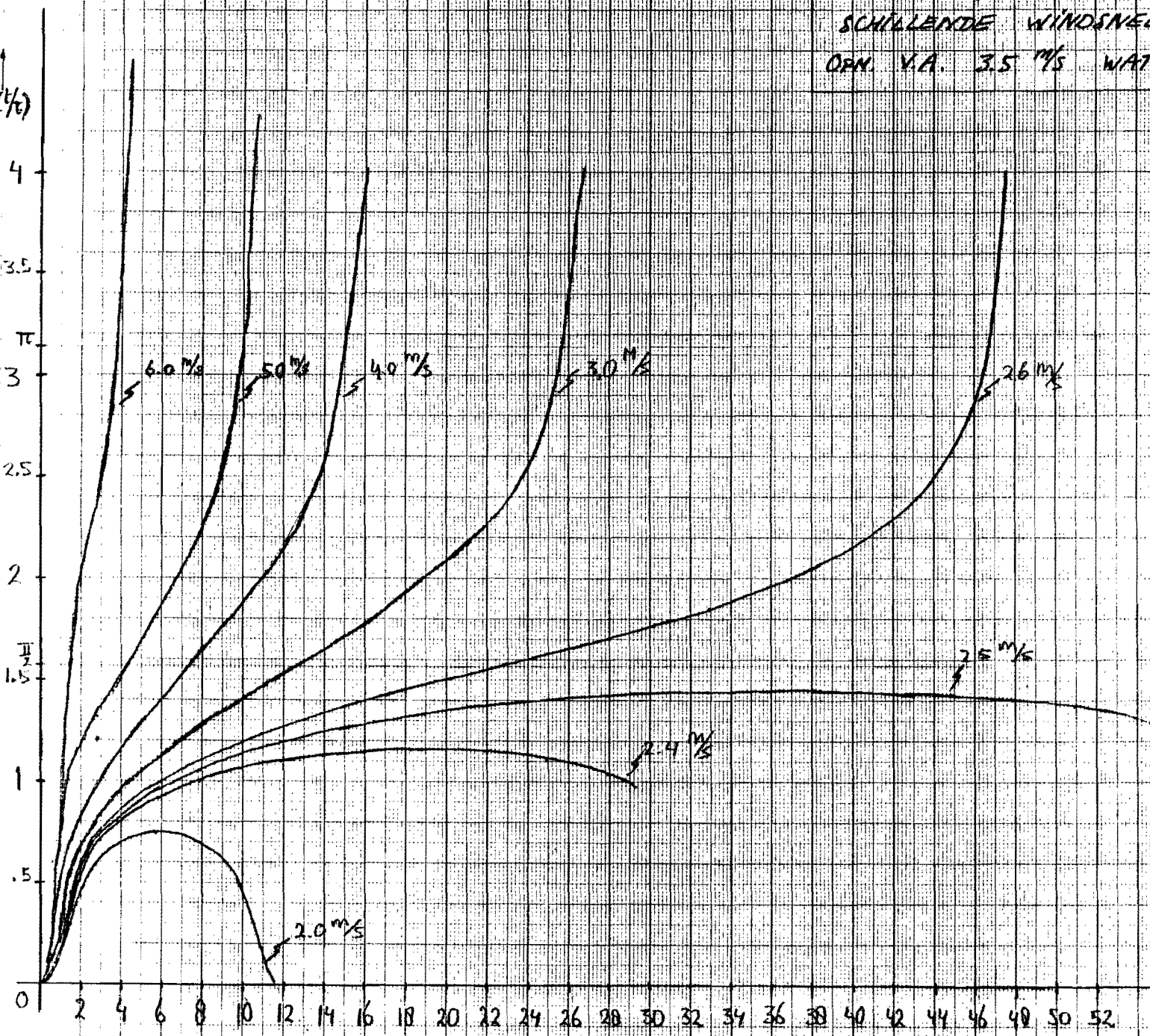
GRAFIEK 2 THE  $T/2$   $D_2 = 3 \text{ mm}$   $\tau = 134 \text{ s}$   
 DE HOEKSNELHEID  $\dot{\varphi}$  ALS FUNCTIE VAN DE TYD  $t$   
 BIJ 'N WINDSNELHEID  $5 \text{ m/s}$ . (STAFFUNCTIE)  
 N.B. WERKELYKE WAARDEN VAN  $\dot{\varphi}$  FACTOR 7 KLEINER.

$\varphi_b$  : HOEK BEGIN WATERLEV.  
 $\varphi_e$  : " EINDE "



F-81-

GRAFIEK 3 THE IR  $D_L = 3 \text{ mm}$   $\tau = 1.34 \text{ s}$   
 DE HOEK  $\theta$  ALS FUNCTIE VAN DE TIJD  $t$  BIJ VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN  
 OPN. V.A.  $3.5 \text{ m/s}$  WATERLEVEN 110 EERSTE SLAG

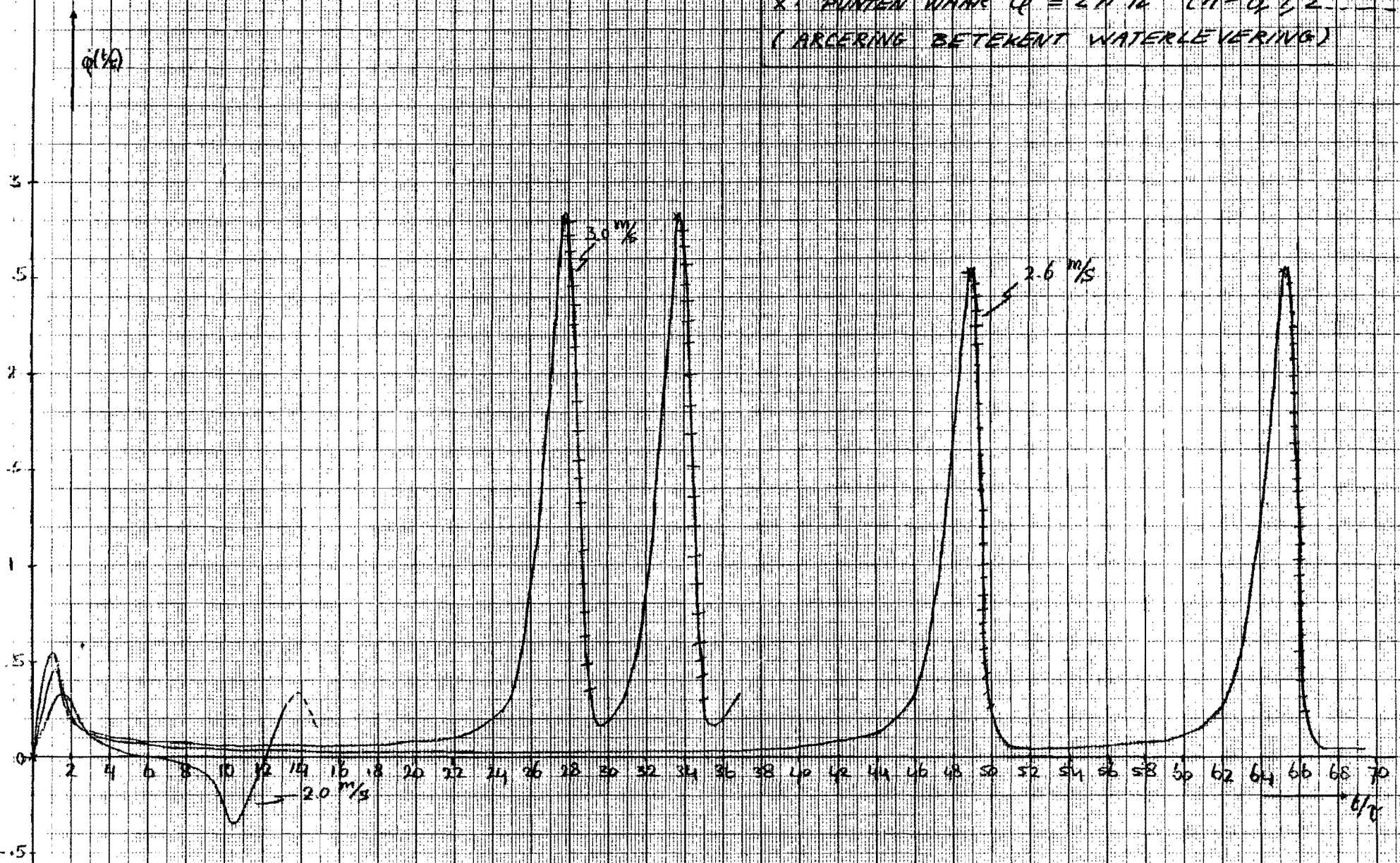


TIJDSINTERVALLEN WATER LEVERING (EERSTE SLAG)

$V_w$	$t_b$	$t_e$	$t_e - t_b$
3.5	1.10	1.58	0.48
4.0	0.82	1.28	0.46
5.0	0.70	1.72	1.02
6.0	0.50	3.53	3.03
7.0	0.35	1.79	1.44
8.0	0.28	1.41	1.13

$t_{b,e}$  : tijdsbippen begin resp. eind waterlevering

GRAFIEK 4.0. THE  $\frac{1}{2}$   $D_L = 3 \text{ mm}$   $\tau = 1.34 \text{ s}$ .  
 DE HOEKSNELHEID  $\dot{\varphi}$  ALS FUNCTIE VAN DE TIJD  $t/\tau$   
 BIJ VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN.  
 x: PUNTEN WAAR  $\varphi = 2\pi$  TE ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )  
 (ARCEERING BETEKENT WATERLEVERING)



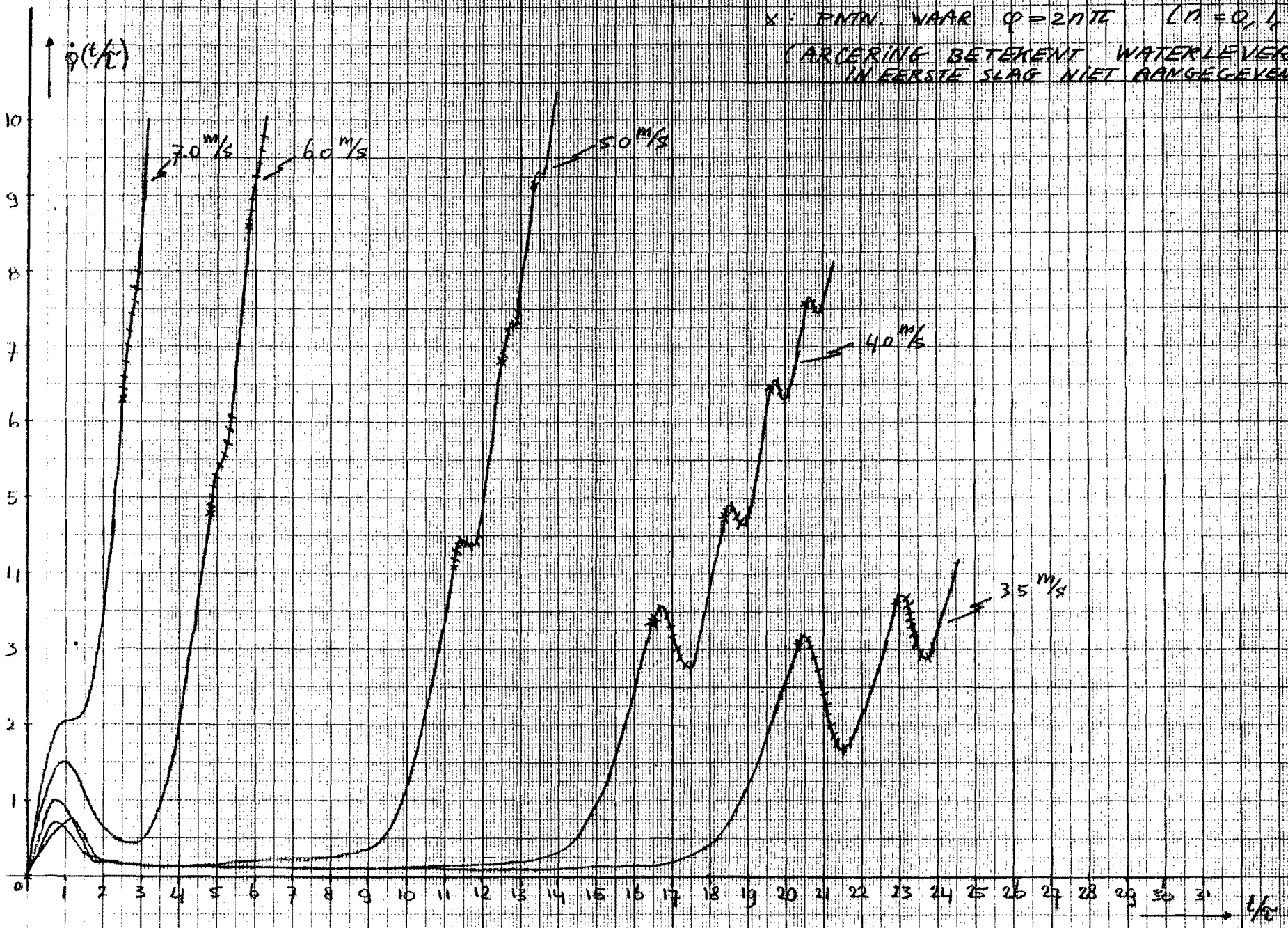


GRAFIEK 4B THEIR  $D_L = 3 \text{ mm}$   $\tau = 134 \text{ s}$

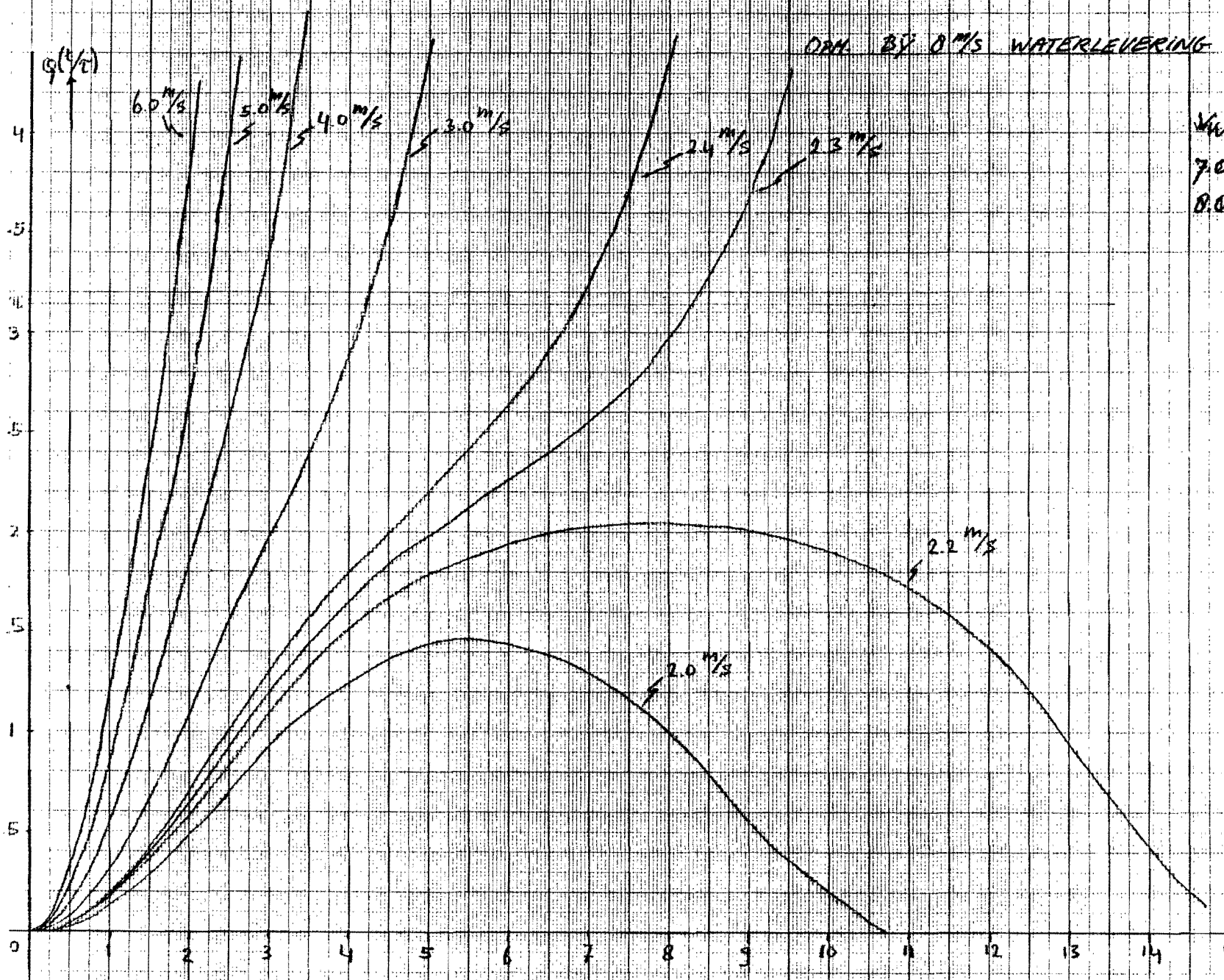
DE HOEKSNELHEID  $\dot{\varphi}$  ALS FUNKTIE VAN DE TIJD  $t/\tau$  BIJ VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN

x: PNTN. WAAR  $\varphi = 2\pi n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )

(RISERING BETEKENT WATERLEVERING)  
IN EERSTE SLAG NIET AANGEGEVEN (ZIE GRAF. 3)



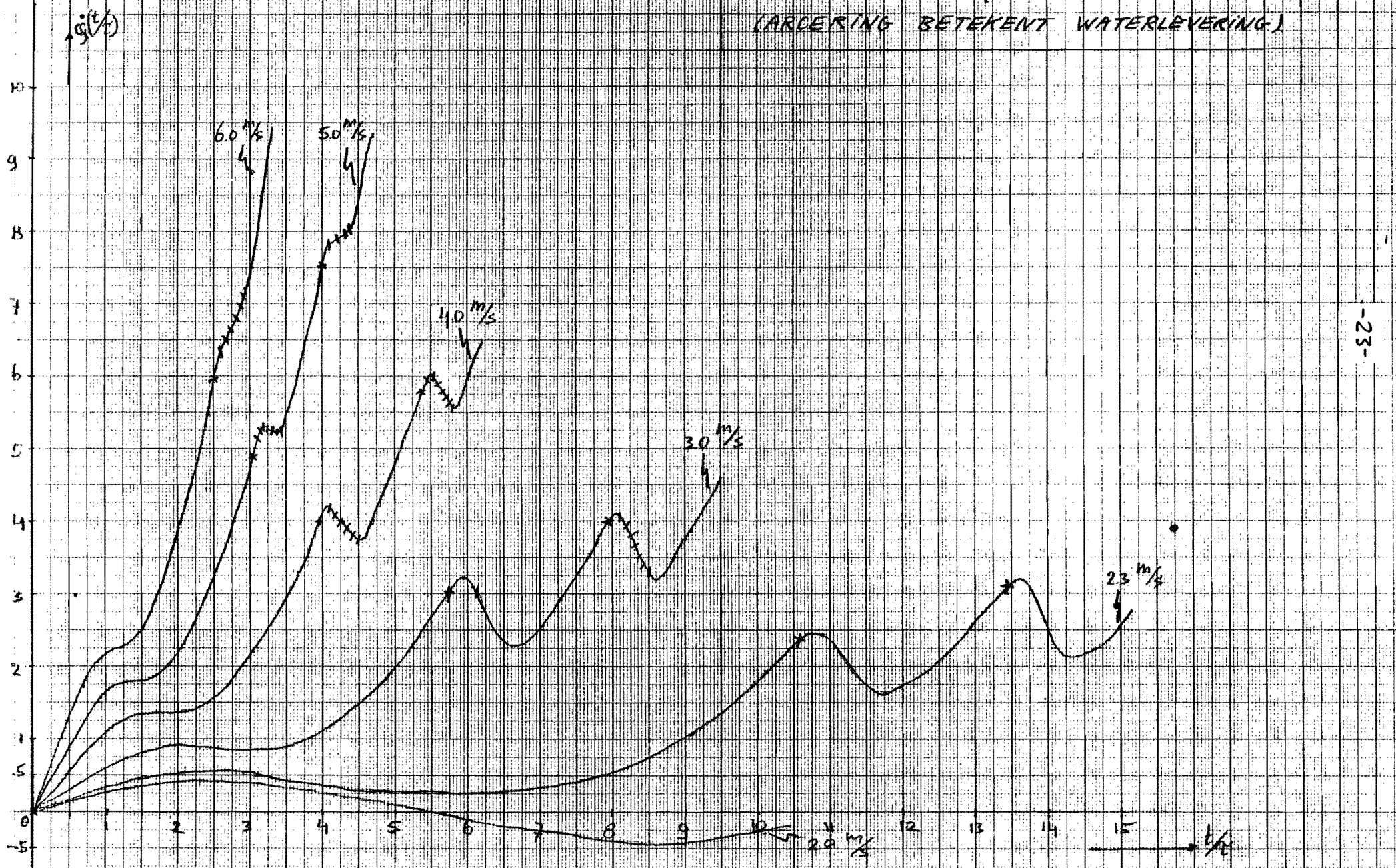
GRAFIEK 5 THE 1/2  $D_L = 10 \text{ mm}$   $\sigma = 1.34$   
 DE HOEK  $C_D$  ALS FUNCTIE VAN DE TIJD  $t/t_0$  BIJ  
 VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN.



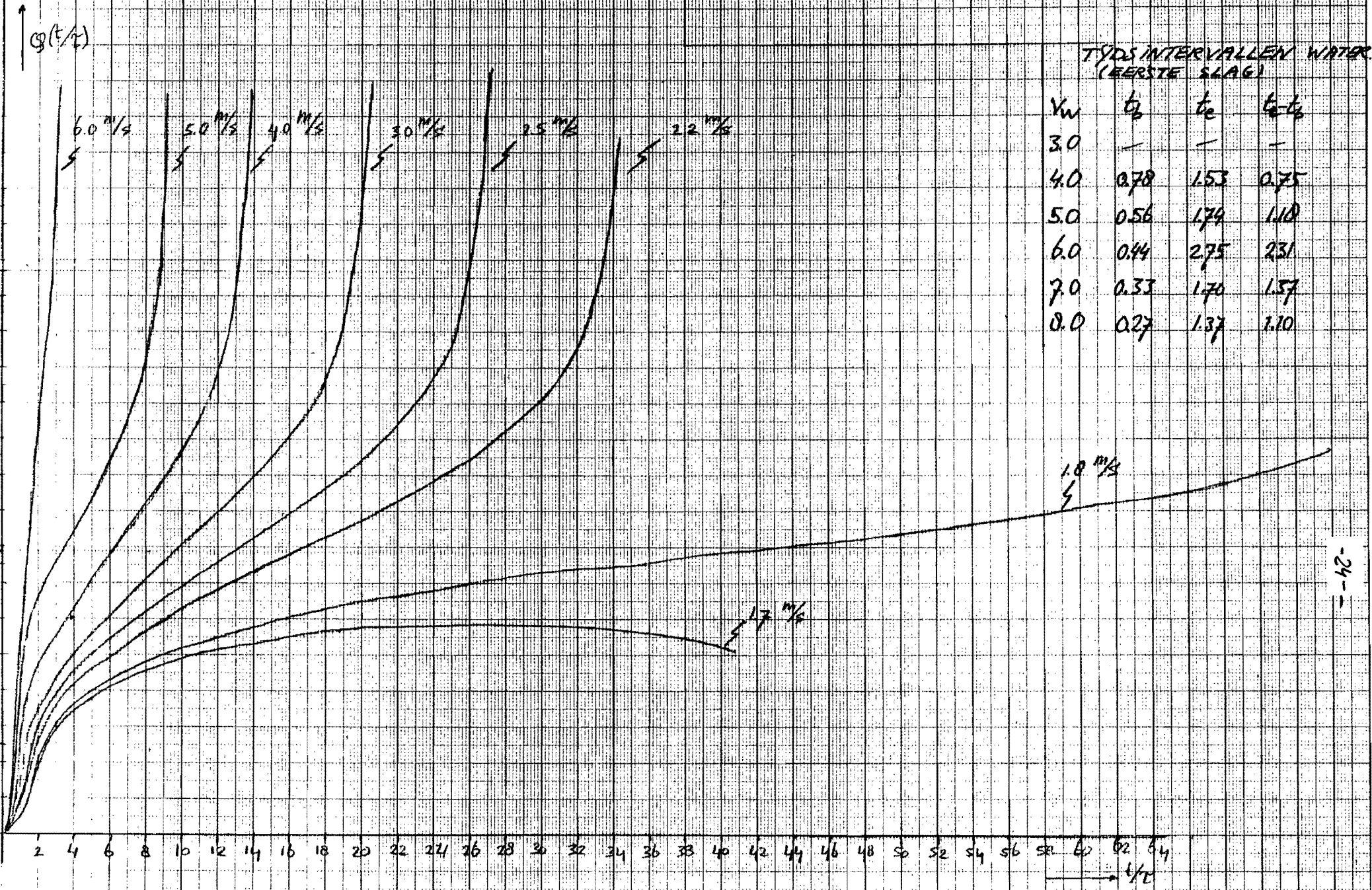
OPM. BIJ 8 m/s WATERLEVERING I.D. EERSTE SLAG  
 TIJDSINTERVALLEN IN WAT  
 (EERSTE VERLAFDE SLAG)

$v_w$	$t_{E1}$	$t_{E2}$	$t_{E1E2}$
7.0	-	-	-
8.0	0.76	1.03	0.27

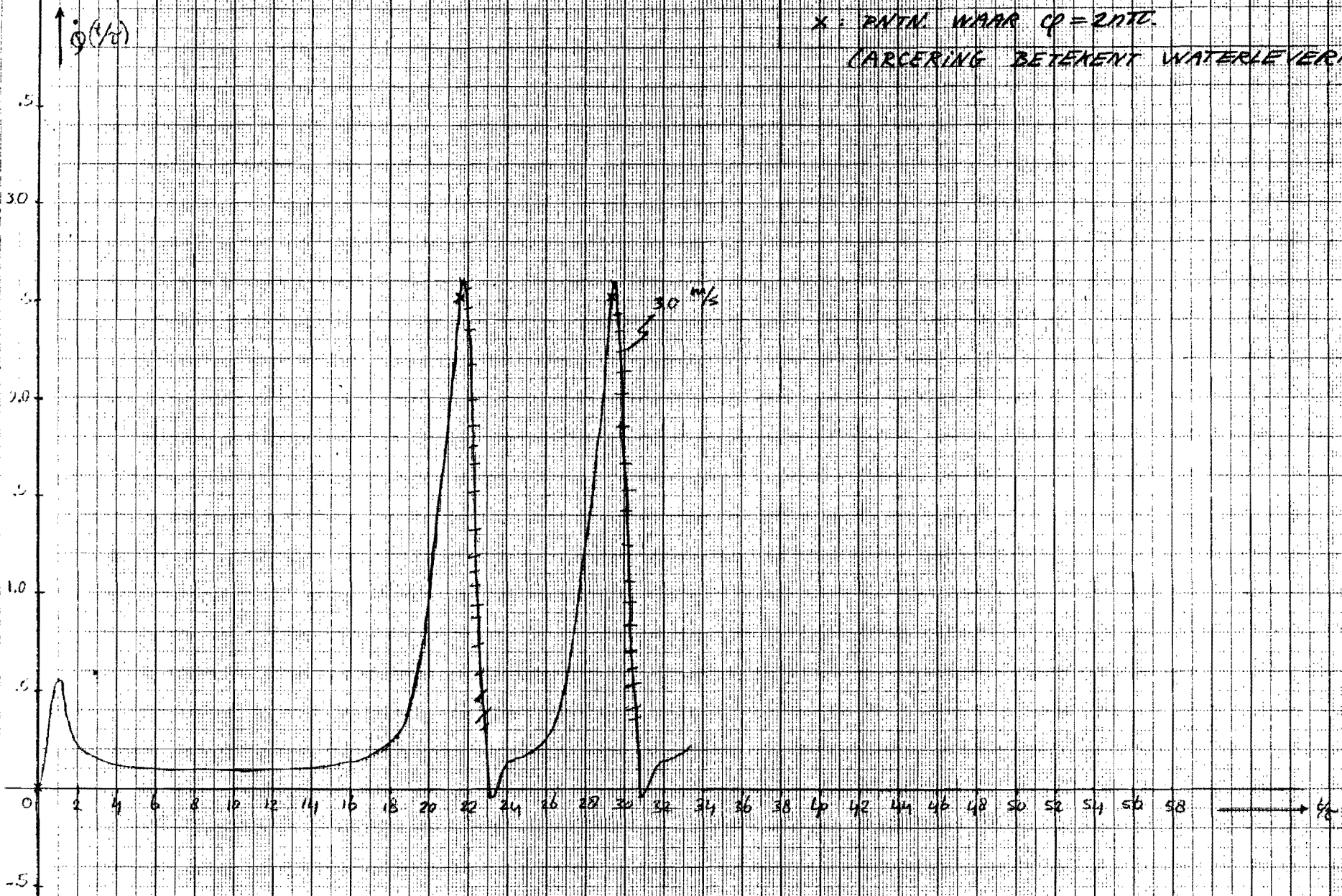
GRAFIEK 6  $\psi_{HE} I/2$   $D_a = 10 \text{ mm}$ .  $\tau = 1.34$   
 DE HOEKSNELHEID  $\dot{\varphi}$  ALS FUNCTIE VAN DE TYD  $t$   
 BIJ VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN  
 X: PUNTEN WAAR  $\varphi = 270^\circ$ .  
 (ARDEERING BETEKENT WATERLEVERING)



GRAFIEK 7 THE  $I/2 G' - 1/2 G \cdot \tau = 1.34 s$   
 DE HOEK  $\varphi$  ALS FUNCTIE VAN DE TIJD  $t$  BIJ  
 VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN.



GRAFIEK B.D. THE IIR  $G' = 1/2 G$   $\tau = 1.34$   
 DE HOEKSNELHEID  $\dot{\varphi}$  ALS FUNCTIE VAN DE TIJD  $t/t_c$   
 BIJ VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN  
 X: PUNTEN WAAR  $\varphi = 2\pi$   
 (CARCERING BETEKENT WATERLEVERING)



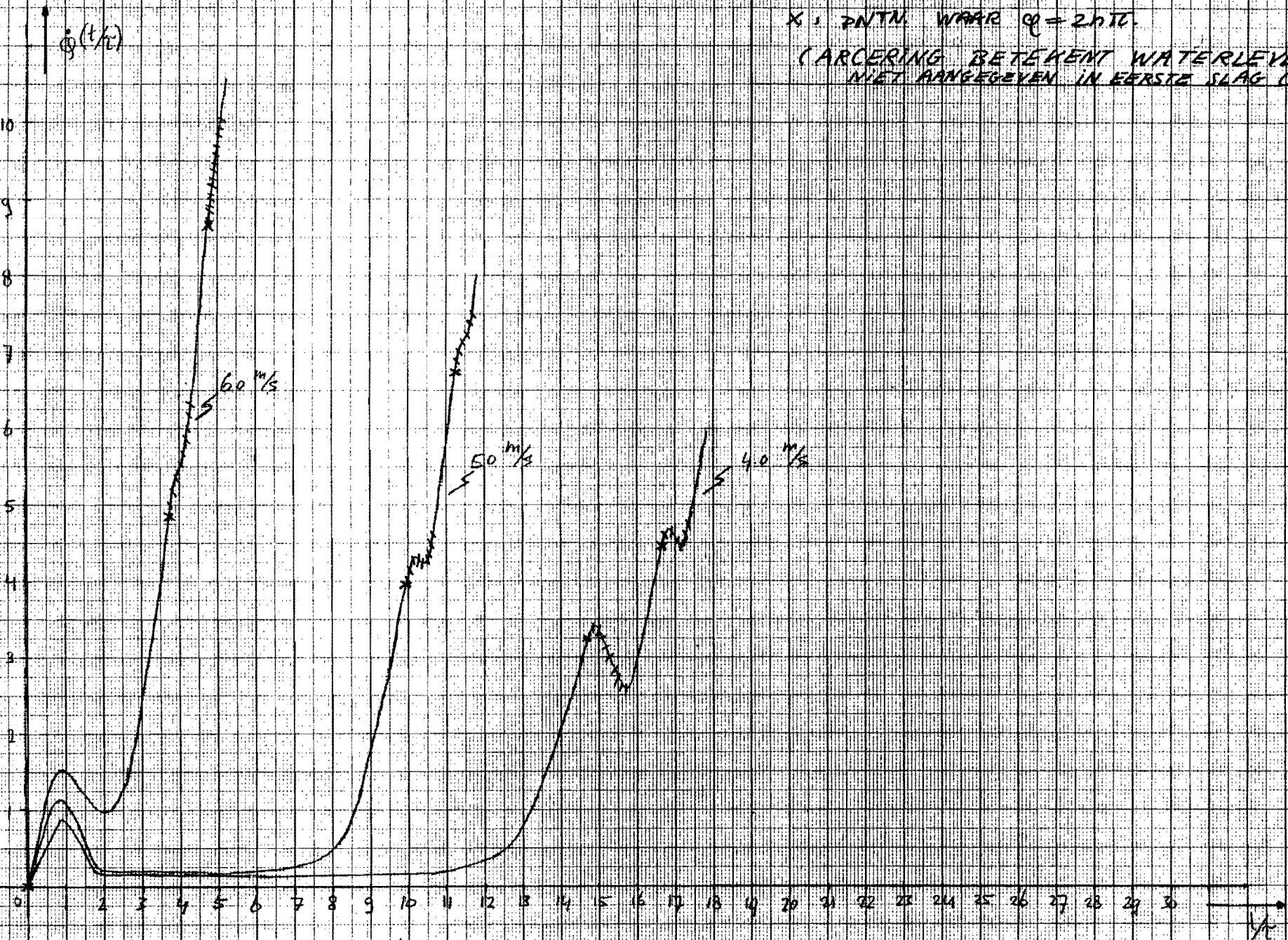
GRAFIEK 8b

THE I/2  $G' = 1/2 G$   $\tau = 1.34$

DE HOEKSNELHEID  $\dot{q}$  ALS FUNCTIE VAN DE TYD  $t/t_c$   
BY VERSCHILLENDE WINDSNELHEDEN

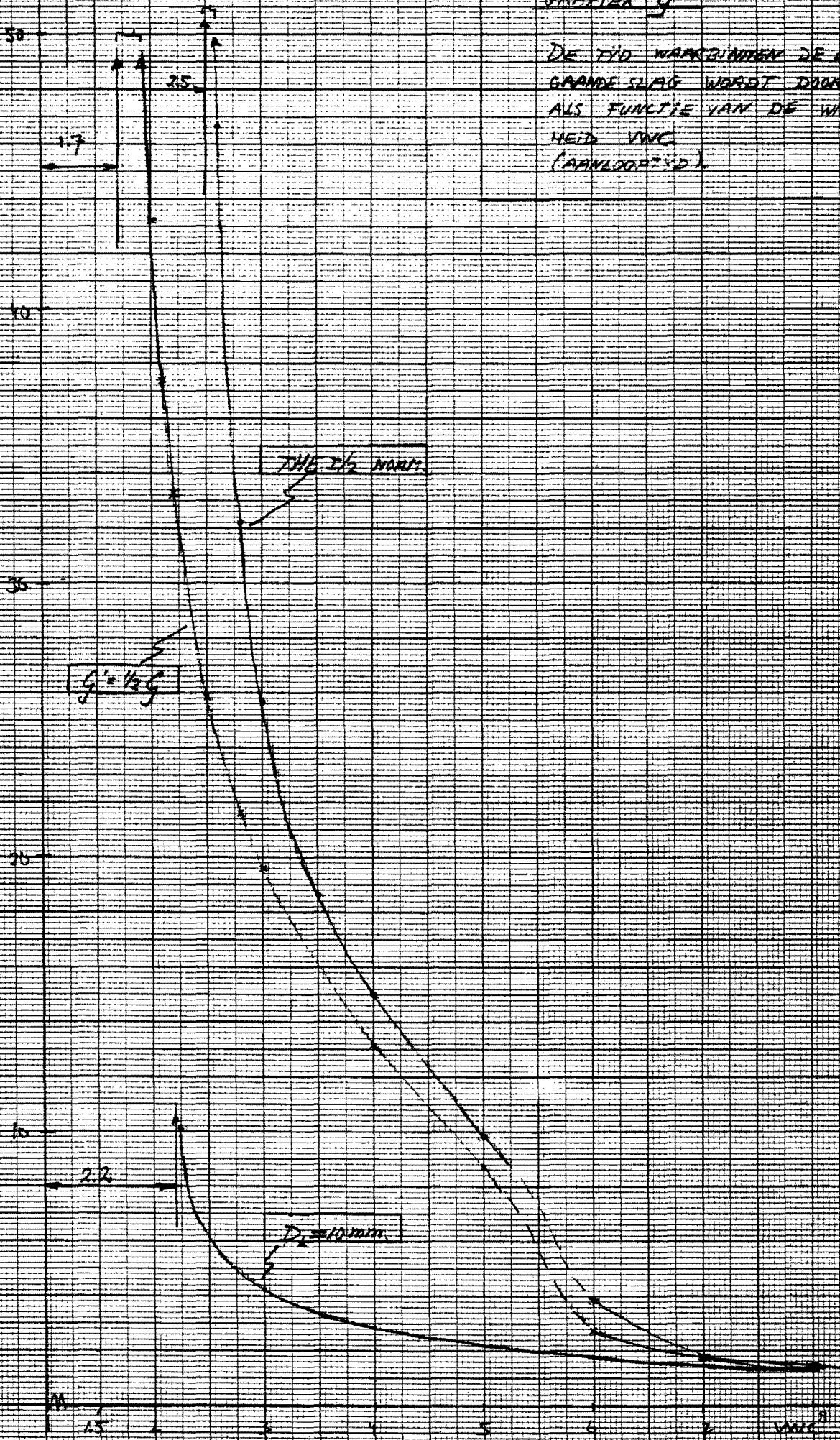
X: PUNT WAAR  $q = 2 \text{ HT}$

(ARCERING BETEKENT WATERLEVERING)  
NIET AANGEGEVEN IN EERSTE SLAG (ZIE GRAF 7)



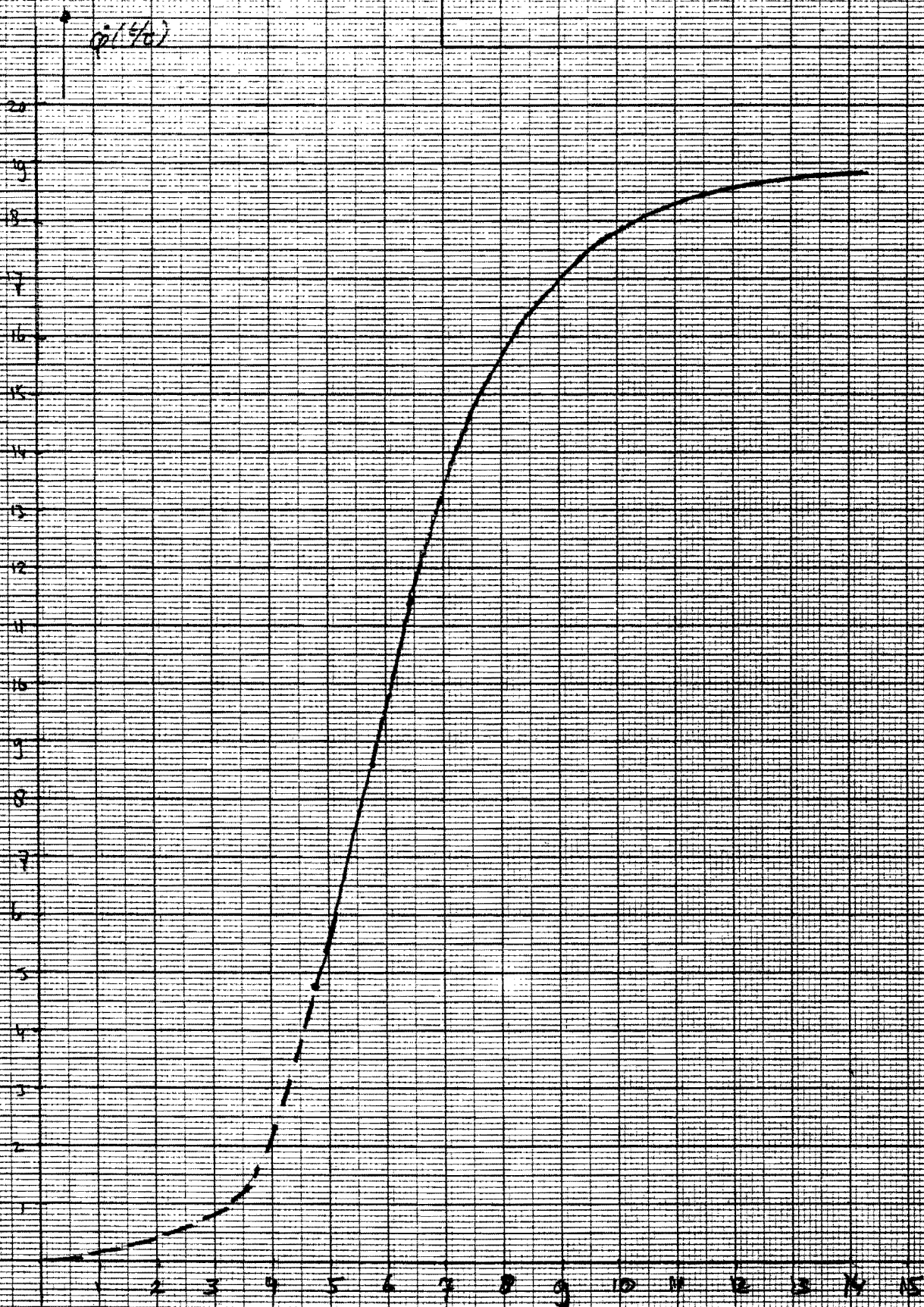
GRAFIEK 9

DE TIJD WARBINNIEN DE EERSTE OP-  
GRANDE SLAG WORDT DOORLOPEN  
ALS FUNCTIE VAN DE WINDSPEE-  
KHEID VWC  
(AANLOOPTIJD)



GRAPHEK 10

MET VERLOOP VAN DE HOEKSNELHEID  $\dot{\varphi}$   
BY DOORLIJST IN DE ONDERSTE STANDE  
(POMPE INDER) GEINTERPOLIERT I/O  
TKD.



TKD



HOOFDSTUK 5. INTERPRETATIE VAN DE RESULTATEN,  
VELDWAARNEMINGEN EN CONCLUSIES

5.1. INTERPRETATIE.

De grafieken 1+2 geven een eerste indruk van de resultaten van numerieke berekening, dit zowel wat betreft de nauwkeurigheid als de gang van zaken bij aanloop.

Wat betreft de nauwkeurigheid zien we dat het verloop van  $\varphi$  en  $\dot{\varphi}$  vrij net is (een gladde kromme). In de punten besproken in §3.2. (begin of beëindiging van waterlevering,  $\varphi = 0, \pi, 2\pi$  enz.) kan men zien dat de gebruikte benadering (binnen de nauwkeurigheid van tekenen) bruikbaar is. De gemaakte fout zal trouwens kleiner worden indien men de stapgrootte in de tijd kleiner maakt.

Uitgaande van grafiek 1 kan men zien dat de molen na korte tijd water gaat leveren, dit enige tijd doet, vervolgens hiermee stopt en vrij langzaam en met konstante snelheid (vooral als  $\varphi$  in de buurt van  $\pi/2$ ) naar boven kruipt. Dit laatste is duidelijk te zien in grafiek 2\*. De reden voor het trager gaan lopen van de molen ligt voor het grootste deel bij de waterlevering, die begint zodra de zuiger voldoende snelheid heeft. Van minder invloed is hierbij de toename van de hoek  $\varphi$ , die ook een verhoging van het gevraagde koppel bewerkstelligt. Dat dit zo is zien we in grafieken 3+4: daarin is te zien dat de invloed van hoekvergroting toeneemt bij afname van de windsnelheid. Bij windsnelheden lager dan ca. 3.5 m/s wordt namelijk in de eerste opgaande slag geen water geleverd, toch neemt de snelheid af en blijkt het kleinst te worden dicht bij  $\varphi = \pi/2$ . Tenslotte zien we dat de molen weer gaat versnellen als de kruk bijna de bovenste stand heeft bereikt.

Na deze wat algemene beschouwing van de werking van het programma kunnen we dieper ingaan op het gedrag van de molen volgens de gebruikte numerieke benadering.

\* Hoewel het bij de berekende windsnelheden niet optreedt, bestaat de mogelijkheid dat de molen na wat water te hebben geleverd, traag langs  $\varphi = \pi/2$  kruipt en vervolgens weer zoveel snelheid opbouwt dat opnieuw water wordt geleverd alvorens  $\varphi = \pi$  wordt bereikt. Met deze mogelijkheid is in het programma rekening gehouden. (bij een eerder gebruikte  $C_m - \lambda$  benadering bleek dit verschijnsel op te treden).

Het gedrag van de THE I/2 is uit grafieken 3+4 af te leiden en is globaal als volgt:

- bij windsnelheden  $\leq$  ca. 2.5 m/s gaat het geheel van pomp en rotor slingeren in de buurt van de onderste stand. Amplitude en frequentie van deze trilling nemen respectievelijk toe en af met toenemende windsnelheid. Omdat het gebruikte programma niet goed bleek te werken bij wat grotere negatieve hoeksnelheden werd de berekening in dat geval afgebroken.
- bij windsnelheden vanaf ca. 2.6 t/m ca. 3 m/s komt de molen over zijn "dooie punt" en maakt een volledige omwenteling, waarbij in de neergaande slag extra kinetische energie wordt opgenomen. Door de grotere hoeksnelheid gaat de molen bij de tweede omwenteling direkt water leveren en verliest daardoor al zijn snelheid. In opvolgende omwentelingen versnelt de molen dus niet. Bovendien is de tijd die de molen nodig heeft om de eerste opgaande slag te voltooien zeer groot ( $t = \text{ca. } 28\tau$  bij 3 m/s windsnelheid).
- bij windsnelheden vanaf ca. 3.5 m/s neemt de hoeksnelheid toe na opeenvolgende omwentelingen. Men kan zien dat de hoeksnelheid steeds terugzakt als een omwenteling is voltooid, doch dit afremmen wordt minder sterk naarmate er meer omwentelingen zijn gemaakt en naarmate de windsnelheid toeneemt. Bij 6 m/s windsnelheid is zelfs in de tweede slag alleen nog een afname van de hoekversnelling te zien, deze wordt echter niet meer negatief. Bij windsnelheden in de buurt van 7 m/s en hoger zakt de snelheid zelfs in de eerste slag niet meer terug.

Verder is te zien dat bij windsnelheden vanaf 3.5 m/s al in de eerste opgaande slag water wordt geleverd.

De aanlooptijden\* worden pas redelijk klein bij windsnelheden vanaf 6 m/s (zie ook grafiek 9). Uit grafiek 9 is nog wat op te merken over de aanlooptijden: het verloop van de kromme vertoont een "kronkel" tussen 5 en 6 m/s windsnelheid, alsof deze een verbinding vormt tussen twee

\* Onder aanlooptijd wordt de tijd verstaan welke de molen nodig heeft voor de eerste opgaande slag.

hyperbolen. Dit is ook te zien in grafiek 4b. Bij de genoemde windsnelheden lijkt een overgang plaats te vinden in de mate waarin de molen geremd wordt door waterlevering.

Dezelfde molen met lekgat 10 mm (grafieken 5+6):

- Bij windsnelheden  $\leq$  ca. 2.2 m/s gaat ook hier de rotor slingeren en geraakt dus niet tot  $\varphi = \pi$ . Opmerkelijk is nog dat we bij een windsnelheid van 2.2 m/s zien dat de waarde  $\varphi = \pi/2$  weliswaar wordt overschreden, doch het geheel blijkt niet genoeg energie over te hebben om tot  $\varphi = \pi$  te geraken en zakt dus terug.
- bij windsnelheden vanaf ca. 2.3 m/s gaat de molen in opeenvolgende omwentelingen versnellen. In de eerste opgaande slag blijft de snelheid van de rotor zodanig laag dat de waarde  $\dot{\varphi} \sin \varphi = C$  niet wordt bereikt (zolang de windsnelheid kleiner blijft dan 8 m/s). Er wordt dan geen water geleverd en men kan zien dat de molen daardoor aanzienlijk sneller aanloopt (ca. 10.5  $\tau$  seconden bij 2.3 m/s windsnelheid) vergeleken met eenzelfde molen met lekgatje 3 mm.

De eigenschappen van de THE I/2 met het halve zuigergewicht (grafieken 7+8):

- bij windsnelheden  $\leq$  ca. 1.7 m/s gaat de rotor een slingerbeweging uitvoeren.
- bij windsnelheden vanaf ca. 1.8 m/s t/m 3 m/s loopt de molen weliswaar aan, maar gaat niet versnellen in de opvolgende omwentelingen (het toerental blijft constant). De aanlooptijd is bovendien zeer groot (ca. 22  $\tau$  bij 3 m/s).
- bij windsnelheden vanaf ca. 3.5 m/s neemt de hoeksnelheid toe in opeenvolgende omwentelingen. Tevens wordt bij windsnelheden van deze grootte in de eerste opgaande slag water geleverd.

Vergelijken we vervolgens de drie curven uit grafiek 9 dan is op te merken dat:

- voor windsnelheden groter dan ca. 7 m/s nauwelijks verschil bestaat in aanlooptijd wat betreft de drie beschouwde gevallen.
- de molen met een lekgat van 10 mm: aanzienlijk sneller aanloopt bij een bepaalde windsnelheid ( $2.2 < V_w < 7$ ) vergeleken met de "andere molens". Uiteraard blijkt de molen met het halve zuigergewicht nog iets sneller aan te lopen dan de normale uitvoering. De invloed van het gewicht is op het eerste gezicht echter niet van zeer grote betekenis.
- wat betreft de windsnelheden waarbij de verschillende molens nog juist aanlopen geldt:

uitvoering:	wind minimaal:
normaal	> 2.5 m/s
diam. lekgat 10 mm.	> 2.2 m/s
halve zuigergewicht G	> 1.7 m/s

- bij windsnelheden tussen 5 en 6 m/s treedt zoals reeds gezegd een overgang op wat betreft aanlooptijd; deze is aangegeven door de gestippelde kromme. Deze overgang werd niet gevonden bij de molen met groot lekgat, althans niet voor de berekende windsnelheden.

## 5.2. VELDWAARNEMINGEN.

Er zijn tijdens deze stage geen metingen verricht. Exacte contrôle van de berekeningen door metingen zouden uiteraard ook niet mogelijk zijn, omdat windfluctuaties nu eenmaal niet zijn uit te schakelen in het veld, zeker niet op de plaats waar de THE I/2 is opgesteld (terrein van de T.H. Eindhoven).

Wel is 3 à 4 maal een "natte-vinger" waarneming gedaan, d.w.z. met een stopwatch werd de aanlooptijd gemeten als de wind snel varieerde van bijna 0 tot 4 à 5 m/s. Dit leverde aanlooptijden in de buurt van 5 seconden, hetgeen in orde van grootte overeenkomt met de resultaten van de berekeningen.

## 5.3. CONCLUSIES.

Het gepresenteerde model en het numeriek rekenprogramma ter beschrijving van het aanloopgedrag van een molen (gekoppeld aan een zuiger met een lekgat) lijken dit gedrag goed te beschrijven. Bovendien blijkt het quasi-stationaire gedrag eveneens goed beschreven.

Om wat meer informatie te verkrijgen over de in de benadering gemaakte fout zou het nuttig zijn als men wat betere metingen zou verrichten. Aan de andere kant is het ook mogelijk om de berekening uit te voeren voor een meer reëel windpatroon, d.w.z. simulatie van bijvoorbeeld in het veld gemeten waarden.

Uit de numerieke resultaten is gebleken dat er windsnelheden zijn waarbij de molen weliswaar op gang komt, maar pas na zeer lang aanhouden van de wind. Hoewel deze situatie in het vrije veld niet voorkomt daar de wind sneller fluctueert, is één aspekt van deze resultaten toch van belang. Afhankelijk van de duur en grootte van een windstoot loopt de molen aan en blijft dan draaien. Vergelijken we het verschil in aanlooptijd van een molen met lekgat 10 mm. t.o.v. 3 mm., dan is duidelijk dat de eerstgenoemde veel eerder aanloopt en dus meer "kans" maakt om na een windstoot te blijven draaien. Dit pleit uiteraard voor een regelbaar lekgat, waarbij men echter weer op technische moeilijkheden zal stuiten (de molens dienen geschikt te zijn voor gebruik in ontwikkelingslanden).

Men zou echter ook met behulp van gegevens over het plaatselijke windpatroon (gemiddeld) en het programma een schatting kunnen maken van de optimale lekgatafmetingen. Uiteraard dient men dan ook meer te weten over debiet en rendementsverloop als functie van de hoeksnelheid en de lekgatafmetingen. Hiertoe moet dan het rekenprogramma worden uitgebreid.

Door omstandigheden is het er niet van gekomen om de molen door te rekenen zonder lekgat, hetgeen echter wel noodzakelijk wordt geacht.

Daarnaast wordt voorgesteld om de invloed van een aantal parameters nader te onderzoeken, bijvoorbeeld rotortraagheid.

De numerieke benaderingswijze schept ook nog andere mogelijkheden. Deze betreffen het inzicht in de werking van de molen, met name de waterlevering en de aanloopsnelheid. De aanloopsnelheid als functie van de windsnelheid, zoals weergegeven in grafiek 9 vertoont een overgang voor windsnelheden tussen 5 en 6 m/s. Het lijkt alsof in de opgaande beweging bij windsnelheden vanaf ca. 6 m/s veel minder remming t.g.v. waterlevering wordt ondervonden. Dergelijke min of meer onverwachte uitkomsten geven een beter beeld van de werking van de molen en kunnen belangrijk zijn bij het zoeken naar verbeteringsmogelijkheden van de molen. Het blijkt ook dat het nuttig is om de resultaten op meerdere manieren grafisch weer te geven.

Samenvattend:

- men kan meer onderzoek doen naar de invloed van de diverse parameters m.b.v. programma en model.
- men kan een "echt" windpatroon doorrekenen.
- een uitbreiding van het programma met rendementsberekening is wenselijk voor verder onderzoek.

LITERATUURLIJST.

1. Twee notities over zuigerpompen gekoppeld aan windmolens:  
traagheid en lek.  
J. van Meel.  
Rapport R - 294 - D. Juni 1977.  
Groep Windenergie T.H. Eindhoven.
  
2. Het aanlopen van een zuigerpomp met een lek.  
M. Stevens en S. Rienstra.  
Rapport R - 368 - D. Februari 1979.  
Groep Windenergie T.H. Eindhoven.
  
3. Integratie van een beginwaardeprobleem voor een gewone  
differentiaalvergelijking, c.q, voor een stelsel van n  
gewone differentiaalvergelijkingen van de tweede orde.  
RC - informatie PP - 3.4.2. December 1976.  
Rekencentrum T.H. Eindhoven.
  
4. THE I/2 windmolen met 6-bladige rotor  
R - 456 - D. Oktober 1980.  
Tekeningenpakket 7702 - 2,3 en -6 7910 - 2.  
Groep Windenergie T.H. Eindhoven.  
(Bouwtekeningen Tanzania pomp R 454 D, oktober 1980)
  
5. Results of windtunnel tests on the scale model of the  
THE I/2 rotor.  
Marck Schumack.  
R - 408 - S. 21 december 1979.  
Groep Windenergie T.H. Eindhoven.

APPENDIX.

Handleiding bij het programma.

Er volgt eerst een lijst van variabelen die voor het gebruik van het programma noodzakelijk zijn, daarachter volgt de schrijfwijze waarmee deze variabele in het verslag wordt voorgesteld en vervolgens de betekenis.

Symbol	programma / verslag	betekenis:
AL	$A_1$	= de doorsnede van het lekgaatje.
AP	$A_p$	= de doorsnede van de pomp.
L	$l$	= de lengte van de kruk.
OH	$H$	= de totale opvoerhoogte.
G	$G$	= gewicht van zuiger, zuigerstang en kruk.
IT	$I$	= traagheidsmoment van de rotor.
R	$R$	= straal van de rotor.
CMO	$C_m(0)$	= de waarde van de koppelcoëfficiënt als $\lambda = 0$ .
PSI	$\xi$	= de weerstand van het lekgaatje.
EPS1, EPS2	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	= de wrijving tijdens de opgaande resp. neergaande slag.
D	$D$	= de coëfficiënt die de lagerwrijving in rekening brengt.
T	$t$	= de tijd.
Q	$\varphi$	= de hoek $Q(t)$ .
DQDT	$\dot{\varphi}$	= de hoeksnelheid $\dot{Q}(t)$ .
SL	$\lambda$	= de snellopendheid.
VWC	$V_w c$	= het konstante deel van de windsnelheid.
MO	$M_0$	= het gemiddeld koppel dat een ideale pomp vraagt.
$A_1, A_2$	$A_1, /$	= dimensieloze getallen die gewicht zuigerstang, resp. zuigerstang + waterkolom voorstellen ( $A_2 = A_1 + \pi$ ).
OMEGAO	$\Omega_0$	= zie vgl. (5).
TK	$\tau$	= tijdskonstante zie vgl. (12).



C	C	=	het produkt $\tau\Omega_0$ .
VREF	$V_{ref}$	=	de referentiesnelheid (zie blz. 8).
$E_1, E_2$	$E_1, E_2$	=	dimensieloze getallen die resp. op en neergaande wrijving voorstellen.

Verder zijn er nog enkele variabelen die niet in de eigenlijke vergelijkingen voorkomen maar welke bij de oplossing ervan nodig of handig zijn. Deze zijn als volgt gedefinieerd:

B	=	$\pi/c^2$ zie vgl. (13).
RK	=	$R/r$ .
I, J, K	=	tellers van het aantal malen dat de standaardprocedure RK2 wordt aangeroepen voor het oplossen van (13), (14) of (15).
MAX AE, RE	=	maximum dat I, J of K mag bereiken.
	=	de absolute resp. relatieve nauwkeurigheid. (zie lit. 3).
M	=	het aantal slagen (bij 1 aanroep van RK2) waarbij de vereiste nauwkeurigheid niet werd gehaald (zie lit. 3).
Z	=	teller van het aantal omwentelingen van de rotor.
NTOER	=	het aantal omwentelingen dat door-gerekend wordt als de molen op gang komt.
H	=	de optimale stapgrootte (zie lit. 3).
TL, QL, DQL	=	hebben steeds de waarde van de voorlaatste $t$ , $q$ en $\dot{q}$ .
VGL1	=	boolean die vgl. (13) aangeeft als true, als deze false is geldt (14) op dat moment.

De regels 24 t/m 50 bevatten declaraties, leesopdrachten c.q. berekeningen van de benodigde grootheden zoals hierboven genoemd.

Toelichting bij het programma.

Voor een globale beschrijving van de werkwijze bij het oplossen van de differentiaalvergelijkingen (13) t/m (15) wordt verwezen naar hoofdstuk 3. Het programma werkt als volgt:

Regels:

- 1 t/m 12 bevatten een real procedure FG die op het tijdstip van aanroep het produkt  $f(\lambda) g(t)$  (zie vgl. (13) t/m (15)) bepaald, d.i. een maat voor de door de wind geleverde kracht in de vorm van een koppel op de rotor.
- 5 de snellopendheid wordt op het tijdstip van aanroep bepaald.
- 7 t/m 10  $f(\lambda) = c_m(\lambda)/c_m(0)$  wordt bepaald.
- 11  $f(\lambda) \cdot g(t) = \frac{c_m(\lambda)}{c_m(0)} * \left( \frac{v_w(t)}{v_{ref}} \right)^2$  wordt bepaald.
- 14 t/m 22 bevatten een real procedure TS die de stapgrootte in de tijd bepaald voor oplossing van één der d.v.n. afhankelijk van de momentane hoeksnelheid.
- 25 t/m 50 declaraties en tussenberekeningen.
- 52 hier kan men aangeven voor welke (konstante) windsnelheid (-heden) men de berekening wil uitvoeren.
- 53 t/m 56 de variabelen worden "ge-reset", d.w.z.  $t = \varphi = \dot{\varphi} = 0$  en er volgt uitvoer.
- 57 het maximum aantal omwentelingen van de rotor bij aanloop (volledig).
- 60 als  $0 \leq \varphi \leq \pi$  vgl. (13) (regels 65 t/m 77) of vgl. (14) (regels 110 t/m 117).
- 66 de laatstberekende waarden van  $t, \varphi$  en  $\dot{\varphi}$  worden opgeslagen om evt. berekening van beginvoorwaarden te bepalen zoals besproken in §3.2. (zie regels 80 t/m 107).
- 69 + 70 aanroep van de procedure die de d.v. (13) oplost.

- 71 t/m 76 als  $\dot{\varphi} < -0.1$  wordt de berkening beëindigd met de mededeling dat de rotor terugvalt.
- 80 t/m 107 Hier worden de beginvoorwaarden bepaald die men nodig heeft voor het oplossen van vgl. (14), d.w.z. als  $\dot{\varphi} \sin \varphi \geq C$ . Dit volgens in §3.2. besproken methoden, afh. van de grootten van  $\varphi$  en  $\dot{\varphi}$  worden verschillende methoden toegepast (eerste: regel 91 t/m 94; tweede: regel 96 t/m 99 en derde; 103 t/m 107).
- 110 t/m 117 analoog aan regels 66 t/m 70, doch nu oplossing van d.v. (14).
- 118 Als  $\varphi < \pi$  dan moet men als  $\dot{\varphi} \sin \varphi \leq C$  is geworden beginvoorwaarden berekenen voor oplossing van vgl. (13) en begint de berekening opnieuw vanaf regel 63.
- 120 t/m 138 berekening van beginvoorwaarden volgens §3.2.
- 141 als de tellers I en/of J groter zijn dan gewenst, of als hoek  $\varphi < 0$ , dan wordt de berekening beëindigd, anders is het punt  $\varphi = \pi$  overschreden.
- 143 t/m 150 berekening van beginvoorwaarden om vgl. (15) op te lossen
- N.B. 146 Men kan bij overschrijding van  $\varphi = \pi$  zowel de laatste maal met vgl. (13) of vgl. (14) hebben gerekend. In werkelijkheid wordt altijd een punt gepasseerd waar  $\dot{\varphi} \sin \varphi = C$  en vgl. (13) wordt dan geldig. Echter, stapsgewijze oplossing zoals deze levert een extra mogelijkheid. Dit verklaart regels 147 en 149.
- 151 zolang als  $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$  geldt vgl. (15).
- 153 t/m 159 oplossing van (15) analoog aan (13) en (14).
- 162 t/m 166 berekening van beginvoorwaarden voor vgl. (13), d.w.z. de molen heeft een omwenteling voltooid en  $\varphi$  wordt 0, t en  $\dot{\varphi}$  worden geschat.

Voorbeeld.

Tenslotte is nog een voorbeeld van de uitvoer gegeven.



```

X AALVERGELIJKINGEN VOORKOMEN.
X VERVOLGENS WORDEN DE RESULTATEN VAN HET REKENWERK GELEVERD; HIERBIJ
X IS DE TIJD ALS ONAFHANKELIJKE PARAMETER BESCHOUWD EN WORDT IN DE EER-
X STE KOLON DE WAARDE ERVAN AFGEDRUKT, GEVOLGD DOOR RESP. DE HOEK Q EN
X DE HOESNELHEID DQDT. VERDER STAAN ONDER DE KOLON MET KOP M DE OPTIMA-
X LE STAPGROOTTE EN ONDER N HET AANTAL STAPPEN WAARBINNEN DE PROCEDURE
X RK2 DE GEEIESTE NAUWKEURIGHEID EVT. NIET HEEFT BEREIKT. M=0 BETEKENT
X HIER DAT DEZE WEL IS BEREIKT (VOOR MEER INFORMATIE HIERONTRENT ZIE RC-
X INFORMATIE PP-3.4.2). TENSLOTTE VOLGT IN DE LAATSTE KOLON DE WAARDE
X VAN DE SLAGENTELLERS I, J OFK (NAAR ACHTEREN INGESPRONGEN CIJFERS GEVEN
X AAN DAT OP DE BIJBEHORENDE TIJDSTIPPEN DE MOLEN WATER LEVERT OF JUIST
X BEGINT TE LEVEREN).
X*****

```

```

REAL PROCEDURE FG(T,TK,VNC,DQDT,RK,VREF);
VALUE TK,VNC,DQDT,RK,VREF; REAL T,TK,VNC,DQDT,RK,VREF;
BEGIN REAL F,G,SL;

```

```

    G:=VNC;
    SL:=RK*DQDT/G;
    IF SL<0 THEN F:=1;
    IF SL>=0 AND SL<=0.65 THEN F:=1+0.453*SL**2;
    IF SL>0.65 AND SL<=0.9 THEN F:=-0.1906+2.151*SL;
    IF SL>0.9 AND SL<=1.6 THEN F:=-1.14+4.781*SL-1.708*SL**2;
    IF SL>1.6 AND SL<=3.5 THEN F:=2.906-0.151*SL-0.198*SL**2;
    FG:=F*(G/VREF)**2
END FG;

```

```

REAL PROCEDURE TS(DQDT);
VALUE DQDT; REAL DQDT;
BEGIN REAL H; H:=ABS(DQDT);

```

```

    IF H=0 THEN TS:=0.2;
    IF H<=0.1 AND H>0 THEN TS:=1;
    IF H>0.1 AND H<3 THEN TS:=0.2;
    IF H>=3 AND H<10 THEN TS:=0.1;
    IF H>=10 THEN TS:=0.05
END TS;

```

```

X*****
INTEGER M,Z,I,J,K,NTQER,MAX; REAL A1,A2,B,C,VREF,TK,T,Q,DQDT,TL,QL,
DQL,H,P,I,R,E1,E2,VNC,RK,AE,RE,AP,AL,L,OH,G,IT,CHO,EPS1,EPS2,D,PSI,MO,
OMEGA;
BOOLEAN VGL;
READ(INPUT,/,AL,AP,L,OH,G,IT,R,CHO,PSI,EPS1,EPS2,D,AE,RE,NTQER,MAX);
PI:=4*ARCTAN(1);
MO:=9*10*OH*AP*L/PI;
A1:=G*L/MO;
A2:=A1*PI;
OMEGA:=AL*SQRT(2+9.81*OH/PSI)/(AP*L);
TK:=SQRT(IT/MO);
C:=TK*OMEGA;
VREF:=SQRT(MO/(D*CHO*0.5*1.29*PI*R**3));
E1:=EFS1*L/MO;
E2:=EFS2*L/MO;
B:=PI/(C**2);
RK:=R/TK;
WRITE(OUTPUT, </, "DOORSNEDE LEK", X3, "DOORSNEDE POMP", X3, "KRUKSTRAAL",

```

```

003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
003:0000:1
00010 003:0000:1
00020 003:0000:1
00030 003:0000:1
FG IS SEGMENT 0004
2 00040 004:0000:1
00050 004:0003:5
00060 004:0005:4
00070 004:0007:1
00080 004:000E:3
00090 004:0017:1
00100 004:0022:3
00110 004:002D:3
00120 004:002E:4
FG(004) IS 0030 LONG
2 00130 003:0000:1
00140 003:0000:1
00150 003:0000:1
00160 003:0000:1
TS IS SEGMENT 0005
2 00170 005:0003:5
00180 005:000E:3
00190 005:000A:1
00200 005:000F:3
00210 005:0013:3
00220 005:0014:5
TS(005) IS 0017 LONG
2 00230 003:0000:1
00240 003:0000:1
00250 003:0000:1
00260 003:0000:1
00270 003:0000:1
00280 003:0000:1
00290 003:0000:1
00300 003:0025:5
00310 003:0027:4
00320 003:002A:4
00330 003:002C:3
00340 003:002D:3
00350 003:0032:5
00360 003:0034:5
00370 003:0035:5
00380 003:003C:4
00390 003:003E:3
00400 003:0040:2
00410 003:0042:0
00420 003:0043:2

```

```

"ROTORSTRAAL",X3,"PSI",X3,/,E12.4,X5,F12.8,X5,F8.5,X4,F8.4,X7,
F10.4,X6,F8.3,X4,F8.4,X4,F5.2,X2,/, "WRIJVINGOP",X3,"WRIJVING"
"NEER",X3,"LAGERS",/,F7.3,X5,F7.3,X9,F5.2,/,/,AL,AP,L,G,OH,IT,
R,PSI,EPS1,EPS2,D);
WRITE(OUTPUT,<///<,X4,"MO",X9,"TK",X9,"OHEGAD",X8,"C",X11,"A1",X10,
"A2",X10,"E1",X10,"E2",X10,"B",X11,"VREF",/,10(F9.4,X3)>,
MO,TK,OHEGAD,C,A1,A2,E1,E2,B,VREF);

FOR VWC:=6 DO
BEGIN T:=0; Q:=0; DQDT:=0; H:=TS(DQDT)/4; M:=0;
WRITE(OUTPUT(SKIP(1)));
WRITE(OUTPUT,<X2,"T",X6,"Q(T)",X10,"DQ/DT",X9,"H",X11,"M",X2,
"I/J/K",X4,"WINDSNELHEID=",F6.2,/,>,VWC);
FOR Z:=1 STEP 1 UNTIL NTGER
DO
BEGIN I:=0; J:=0; K:=0; VGL1:=TRUE;
WHILE Q<PI AND Q>=0 AND I<MAX
DO
BEGIN
IF DQDT*SIN(Q)<=C
THEN
BEGIN I:=I+1; VGL1:=TRUE;
TL:=T; QL:=Q; DQL:=DQDT;
WRITE(OUTPUT,</,F5.2,X2,E11.4,X3,E11.4,X3,E8.1,X3,I4,X3,
I2>,T,Q,DQDT,H,M,I);
RK2(FG(T,TK,VWC,DQDT,RK,VREF)-B*SIN(Q)+(DQDT*SIN(Q))*2-
(A1+E1)*SIN(Q),T,Q,DQDT,TS(DQDT),H,AE,RE,M);
IF DQDT<-0.1
THEN
BEGIN I:=MAX;
WRITE(OUTPUT,</, "DE ROTOR VALT TERUG NAAR DE ONDERSTE "
"STAND">);
END
END
ELSE
BEGIN REAL D,E,DT,A;

A:=SIN(QL);
J:=0;
VGL1:=FALSE;
D:=DQL*A;
E:=(C-D)/(DQDT*SIN(Q)-D);
DT:=TS(DQL)*E;
IF QL<0.5
THEN
BEGIN
IF DQL>10 AND I=1
THEN
BEGIN Q:=ARCSIN(C/DQL);
DQDT:=DQL;
T:=TL+Q/DQL;
END
ELSE
BEGIN T:=TL+DT;
DQDT:=DQL+DT*FG(TL,TK,VWC,DQL,RK,VREF);
Q:=ARCSIN(C/DQDT);
END;
Q:=1.001*Q;
END

```

```

00440 003:0045:1
00450 003:0045:1
00460 003:0045:1
00470 003:0045:3
00480 003:0057:2
00490 003:0059:1
00500 003:005A:1
00510 003:006A:2
00520 003:006A:2
00530 003:006B:1
2 00540 003:006F:5
00550 003:0074:2
00560 003:0076:1
00570 003:0078:2
00580 003:0078:5
00590 003:007F:5
3 00600 003:0082:3
00610 003:0084:3
00620 003:0085:1
4 00630 003:0085:4
00640 003:0087:1
00650 003:0087:4
5 00660 003:008A:1
00670 003:008C:4
00680 003:008E:3
00690 003:009A:2
00700 003:00A1:5
00710 003:00A9:0
00720 003:00A9:2
00730 003:00AB:1
6 00740 003:00AC:4
00750 003:00AE:3
00760 003:00AF:4
6 00770 003:00B1:2
5 00780 003:00B1:2
00790 003:00B1:2
B.0001 IS SEGMENT 000F
5 00800 00F:0000:1
00810 00F:0004:3
00820 00F:0005:1
00830 00F:0005:5
00840 00F:0007:1
00850 00F:000A:4
HY 00F:000C:4
00870 00F:000Q:0
00880 00F:000E:0
6 00860 00F:000E:3
00900 00F:000F:4
7 00910 00F:0010:1
00920 00F:0012:4
00930 00F:0013:3
00940 00F:0014:1
7 00950 00F:0015:2
00960 00F:0015:2
7 00970 00F:0017:1
00980 00F:0018:3
00990 00F:001C:2
7 01000 00F:001D:3
01010 00F:001F:0

```

```

ELSE
  BEGIN T:=TL+DT;
    Q:=QL+DT*DQL+0.5*(FG(TL,TK,VNC,DQL,RK,VREF)
      -B*A+(DQL*A)**2-(A1+E1)*A)*DT**2;
    DQDT:=C/SIN(Q)
  END;
  WHILE DQDT*SIN(Q)>=C AND J<MAX
  DO
  BEGIN
    J:=J+1;
    TL:=T; QL:=Q; DQL:=DQDT;
    WRITE(OUTPUT,</,F5.2,X2,E11.4,X3,E11.4,X3,E8.1,X3,I4,
      X4,I2>,T,Q,DQDT,H,M,J);
    RK2(FG(T,TK,VNC,DQDT,RK,VREF)-(A2+E1)*SIN(Q),T,Q,DQDT,
      TS(DQDT),H,AE,RE,M)
  END;
  IF Q<PI AND J<MAX AND J>0
  THEN
  BEGIN
    A:=SIN(QL);
    D:=DQL*A;
    E:=(C-D)/(DQDT*SIN(Q)-D);
    DT:=TS(DQL)*E;
    T:=TL+DT;
    IF ABS(Q-PI)<0.25
    THEN
    BEGIN DQDT:=DQL+DT*(FG(TL,TK,VNC,DQL,RK,VREF)
      -(A2+E1)*A);
      Q:=PI-ARCSIN(C/DQDT); Q:=1.001*Q
    END
    ELSE
    BEGIN Q:=QL+DQL*DT+0.5*(FG(TL,TK,VNC,DQL,RK,VREF)
      -(A2+E1)*A)*DT**2;
      DQDT:=C/SIN(Q);
      IF Q>PI/2 THEN Q:=1.001*Q
    END
  END
  END
END;
IF I=MAX OR J=MAX OR Q<0 THEN Z:=NTOER+1 ELSE
BEGIN REAL D,A;
  A:=SIN(QL);
  D:=(PI-QL)/DQL;
  T:=TL+D;
  IF VGL1
  THEN DQDT:=DQL+D*(FG(TL,TK,VNC,DQL,RK,VREF)-B*A+(DQL*A)**2
    -(A1+E1)*A)
  ELSE DQDT:=DQL+D*(FG(TL,TK,VNC,DQL,RK,VREF)-(A2+E1)*A);
  Q:=PI;
  WHILE Q>=PI AND Q<2*PI AND K<15
  DO
  BEGIN K:=K+1;
    TL:=T; QL:=Q; DQL:=DQDT;
    WRITE(OUTPUT,</,F5.2,X2,E11.4,X3,E11.4,X3,E8.1,X3,I4,X3,I2>
      ,T,Q,DQDT,H,M,K);
    RK2(FG(T,TK,VNC,DQDT,RK,VREF)
      -(A1-E2)*SIN(Q),T,Q,DQDT,TS(DQDT),H,AE,RE,M)
  END;

```

```

6 01020 00F:0020:0
01030 00F:0020:0
6 01040 00F:0021:5
01050 00F:0026:2
01060 00F:002C:2
01070 00F:002D:1
6 01080 00F:002E:2
01090 00F:0030:4
01100 00F:0031:2
6 01110 00F:0031:5
01120 00F:0033:1
01130 00F:0035:4
01140 00F:0037:3
01150 00F:0043:2
01160 00F:0048:3
01170 00F:0040:4
6 01180 00F:004E:5
01190 00F:0051:0
01200 00F:0051:3
6 01210 00F:0052:0
01220 00F:0053:3
01230 00F:0054:5
01240 00F:0058:2
01250 00F:005A:2
01260 00F:0058:4
01270 00F:005C:5
01280 00F:005E:1
7 01290 00F:0061:4
01300 00F:0064:3
01310 00F:0069:0
7 01320 00F:006A:0
01330 00F:006A:0
7 01340 00F:006F:2
01350 00F:0073:0
01360 00F:0075:0
01370 00F:0078:0
7 01380 00F:0079:0
6 01390 00F:0079:0
5 01400 00F:0079:0
B.0001(00F) IS 007E LONG
4 01410 003:0083:0
01420 003:0087:3
B.0002 IS SEGMENT 0011
4 01430 011:0000:1
01440 011:0004:1
01450 011:0006:0
01460 011:0007:2
01470 011:0007:2
01480 011:0000:2
01490 011:000E:5
01500 011:0016:4
01510 011:0017:3
01520 011:001A:1
01530 011:001A:5
5 01540 011:001C:4
01550 011:001F:1
01560 011:0021:0
01570 011:0020:2
01580 011:0030:4
01590 011:0037:4

```

DOORSNEDE LEK	DOORSNEDE POMP	KRUKSTRAAL	ZUIGERGEWICHT	OPVOERHOOGTE	TRAAGHEID	ROTORSTRAAL	PSI
7.0686E-06	0.01650000	0.62500	138.0000	6.0000	13.950	1.3700	1.00
WRIJVINGOP	WRIJVINGNEER	LAGERS					
0.000	0.000	0.99					

MO	TK	OMEGA0	C	A1	A2	E1	E2	B	VREF
7.7285	1.3435	0.1859	0.2498	0.4464	3.5880	0.0000	0.0000	50.3502	3.7596



T	Q(T)	[Q/CT	F	M	I/J/K	WINDSNELHEID= 7.00
0.00	0.	0.	7.5E-02	0	1	
0.30	1.5554E-01	1.0299E+00	2.3E-01	0	2	
0.35	2.0824E-01	1.2054E+00	1.7E-01	0	1	
0.55	4.9975E-01	1.6744E+00	2.5E-01	0	2	
0.75	8.6471E-01	1.9425E+00	2.5E-01	0	3	
0.95	1.2652E+00	2.0396E+00	2.5E-01	0	4	
1.15	1.6748E+00	2.0519E+00	2.5E-01	0	5	
1.35	2.0880E+00	2.0951E+00	2.5E-01	0	6	
1.55	2.5230E+00	2.2902E+00	2.5E-01	0	7	
1.75	3.0226E+00	2.7640E+00	2.5E-01	0	8	
1.79	3.1416E+00	2.9058E+00	2.5E-01	0	1	
1.99	3.8006E+00	3.6951E+00	2.5E-01	0	2	
2.09	4.1919E+00	4.1302E+00	2.5E-01	0	3	
2.19	4.6274E+00	4.5860E+00	2.5E-01	0	4	
2.29	5.1107E+00	5.0866E+00	2.5E-01	0	5	
2.39	5.6467E+00	5.6396E+00	2.5E-01	0	6	
2.49	6.2400E+00	6.2333E+00	2.5E-01	0	7	
2.50	0.	6.2765E+00	2.5E-01	0	1	
2.52	3.9161E-02	6.3866E+00	5.9E-02	0	1	
2.62	7.0578E-01	6.9156E+00	8.5E-02	0	2	
2.72	1.4172E+00	7.2958E+00	1.2E-01	0	3	
2.82	2.1644E+00	7.6607E+00	1.2E-01	0	4	
2.92	2.9550E+00	8.1953E+00	1.2E-01	0	5	
2.94	3.1416E+00	8.3485E+00	1.2E-01	0	1	
3.04	4.0146E+00	9.1208E+00	1.2E-01	0	2	
3.14	4.9669E+00	9.9266E+00	1.2E-01	0	3	
3.24	5.9994E+00	1.0715E+01	1.2E-01	0	4	
3.27	0.	1.0917E+01	1.2E-01	0	1	
3.27	2.2906E-02	1.0917E+01	3.1E-02	0	1	
3.32	5.7715E-01	1.1236E+01	4.4E-02	0	2	
3.37	1.1451E+00	1.1469E+01	6.4E-02	0	3	
3.42	1.7232E+00	1.1656E+01	6.4E-02	0	4	
3.47	2.3108E+00	1.1854E+01	6.4E-02	0	5	
3.52	2.9098E+00	1.2118E+01	6.4E-02	0	6	
3.54	3.1416E+00	1.2236E+01	6.4E-02	0	1	
3.59	3.7622E+00	1.2567E+01	6.4E-02	0	2	
3.64	4.4004E+00	1.2941E+01	6.4E-02	0	3	
3.69	5.0562E+00	1.3292E+01	6.4E-02	0	4	
3.74	5.7293E+00	1.3629E+01	6.4E-02	0	5	

← begin waterlevering

← einde waterlevering.

T	Q(T)	EQ/QT	H	M	I/J/K	WINDSNELHEID= 8.00
0.00	0.	0.	7.5E-02	0	1	
0.28	1.9873E-01	1.2665E+00	2.3E-01	0	1	
0.48	5.2329E-01	1.9451E+00	2.3E-01	0	2	
0.68	9.6201E-01	2.4056E+00	2.3E-01	0	3	
0.88	1.4735E+00	2.6900E+00	2.3E-01	0	4	
1.08	2.0363E+00	2.9516E+00	2.3E-01	0	5	
1.28	2.6678E+00	3.4188E+00	2.3E-01	0	6	
1.38	3.0282E+00	3.8105E+00	2.3E-01	0	7	
1.41	3.1416E+00	3.9476E+00	2.3E-01	0	1	
1.51	3.5621E+00	4.4665E+00	2.3E-01	0	2	
1.61	4.0364E+00	5.0232E+00	2.3E-01	0	3	
1.71	4.5688E+00	5.6381E+00	2.3E-01	0	4	
1.81	5.1669E+00	6.3378E+00	2.3E-01	0	5	
1.91	5.8390E+00	7.1175E+00	2.3E-01	0	6	
1.97	0.	7.6358E+00	2.3E-01	0	1	
1.99	3.2065E-02	7.7992E+00	5.8E-02	0	1	
2.09	8.5140E-01	8.5526E+00	8.5E-02	0	2	
2.19	1.7375E+00	9.1610E+00	1.2E-01	0	3	
2.29	2.6864E+00	9.8532E+00	1.2E-01	0	4	
2.34	3.1416E+00	1.0234E+01	1.2E-01	0	1	
2.39	3.6658E+00	1.0738E+01	1.2E-01	0	2	
2.44	4.2156E+00	1.1253E+01	1.2E-01	0	3	
2.49	4.7912E+00	1.1772E+01	1.2E-01	0	4	
2.54	5.3926E+00	1.2284E+01	1.2E-01	0	5	
2.59	6.0194E+00	1.2782E+01	1.2E-01	0	6	
2.61	0.	1.2984E+01	1.2E-01	0	1	
2.61	1.9258E-02	1.2984E+01	3.1E-02	0	1	
2.66	6.7930E-01	1.3398E+01	4.5E-02	0	2	
2.71	1.3574E+00	1.3713E+01	6.5E-02	0	3	
2.76	2.0501E+00	1.3996E+01	6.5E-02	0	4	
2.81	2.7578E+00	1.4328E+01	6.5E-02	0	5	
2.84	3.1416E+00	1.4531E+01	6.5E-02	0	1	
2.89	3.8792E+00	1.4974E+01	6.5E-02	0	2	
2.94	4.6390E+00	1.5417E+01	6.5E-02	0	3	
2.99	5.4207E+00	1.5850E+01	6.5E-02	0	4	
3.04	6.2236E+00	1.6259E+01	6.5E-02	0	5	