

OMVORMING VAN NEERSLAG TOT RIOOLINVOER
BIJ EEN BEPAALD TYPE "INLET AREA"

J.G. Zondervan

A. Dommerholt

Nota No. 33

Laboratorium voor
Hydraulica en Afvoerhydrologie
december 1975
(73-151).

INHOUD

	Blz.
1. INLEIDING	1
2. BESCHRIJVING VAN DE MEETOPSTELLING	1
3. UITGEVOERDE PROEVEN	4
4. VERWERKING EN INTERPRETATIE VAN DE MEETRESULTATEN	6
5. CONCLUSIES EN OPMERKINGEN	21
6. LIJST VAN SYMBOLEN	22
7. LIJST VAN LITERATUURVERWIJZINGEN	23
8. APPENDIX	25
8.1. MEETCIJFERS UITGEVOERDE PROEVEN	25
8.2. PULSRESPONSIES	27

1. INLEIDING

De mogelijkheid tot het uitvoeren van een reeks beregeningsproeven op het dak van het eigen gebouw werd begin 1974 geopperd door prof. Kraijenhoff van de Leur. Vervolgens is na enige voorbereiding in de tweede helft van 1974 door de schrijvers een reeks beregeningsproeven uitgevoerd op een deel van het dak van de hydraulica hal van de afdeling Hydraulica en Afvoerhydrologie.

Doel van de experimenten was de transformatie van neerslag tot riool-invoer door een bepaald type "inlet area" bij verschillende neerslagintensiteiten te onderzoeken en met een rekenmodel te beschrijven. Onder een "inlet area" wordt verstaan een gebiedje, waarvan de afvoer ten gevolge van neerslag op één punt het riool binnenkomt. (Voorbeelden van inlet areas zijn een stuk straat, een parkeerterrein, een dak van een gebouw, enz.).

Bij de heer Ten Cate (Instituut voor Tuinbouwtechniek) is advies ingewonnen over de te plaatsen beregeningsinstallatie. Met behulp van eenvoudige tuinbouwapparatuur bleek een zeer bevredigend resultaat te kunnen worden bereikt tegen relatief geringe kosten.

Tijdens zijn verblijf gedurende de maand augustus 1975 stelde J.Ph. O'Kane (University of Dublin) een programma beschikbaar van prof. J.C.I. Dooge en hemzelf waarmee de parameters van een aantal modellen voor een gegeven neerslag-afvoerreeks kunnen worden geschat m.b.v. momenten. Van dit programma is dankbaar gebruik gemaakt en op de resultaten wordt in het navolgende teruggekomen.

In het hierna volgende wordt met een nummer tussen vierkante haken verwezen naar de literatuurlijst.

2. BESCHRIJVING VAN DE MEETOPSTELLING

Op het platte dak van de afdeling Hydraulica en Afvoerhydrologie (24,60 x 44,30 m) was een gedeelte van 17,40 x 24,60 m = 428 m² gescheiden van de rest van het dak. Op dit gedeelte bevonden zich een gedeelte van een lichtkoepel en een afzuigkap. Voor de berging op het dak kwam daarom slechts 409 m² in aanmerking. Het dak was geteerd en afgestrooid met fijn grind met een gemiddelde diameter van 3 à 4 mm in een laagdikte van gemiddeld 5 mm. Op het afgescheiden gedeelte was een beregeningsinstallatie opgesteld met sproeileidingen zoals die in de tuinbouw veel toegepast worden. Het maximale verschil in sproeidebiet tussen de sproeiers ten gevolge van het drukverloop in het stelsel sproeileidingen was bij de grootste beregeningsintensiteit klei-

ner dan 3% (berekend). De verdeling van de leidingen werd zo gekozen dat het dak zo gelijkmatig mogelijk beregend kon worden (zie fig. 1a en fotopagina). Om dit bij verschillende beregeningsintensiteiten te realiseren werd gebruik gemaakt van sproeiërs met verschillende doorlaatopeningen. Ook was de mogelijkheid aanwezig om een gedeelte van de sproeiërs dicht te zetten. Omdat zich in twee, aan weerszijden van de voedingspijp tegenover elkaar gelegen, sproeileidingen in totaal 19 sproeiërs bevonden, konden, door dichtzetten van sproeiërs, de onderlinge afstanden van de sproeiërs in een rij worden verdubbeld of verdrievoudigd, waarbij de sproeiërs aan de uiteinden open bleven.

Omdat het water vrij fijn verneveld uit de sproeiërs kwam kon alleen gemeten worden bij vrijwel windstil weer. Als extra voorzorg waren nog schermplaten van plastic folie rondom het te beregenen dakgedeelte geplaatst om het verlies tot een minimum te beperken. De installatie werd door middel van pompen gevoed uit het watercircuit van de modellenhal van de afdeling. Achter de pompen bevonden zich in de toevoerleiding een elektromagnetische debietmeter met digitale uitlezing en een afsluiter waarmee de beregeningsintensiteit geregeld kon worden.

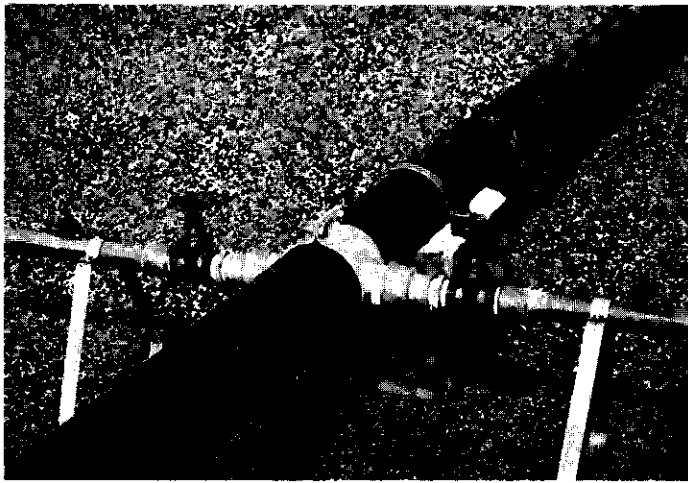
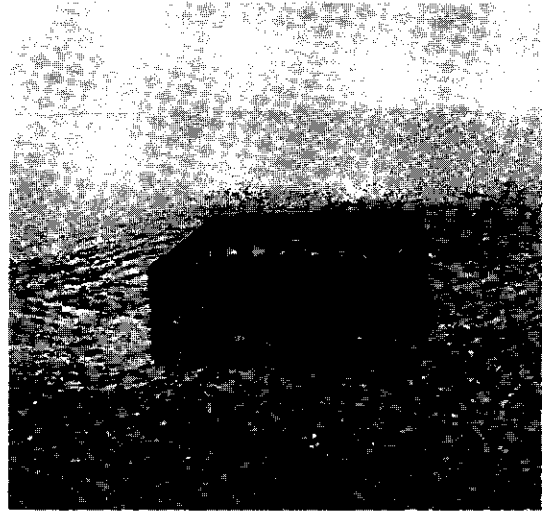
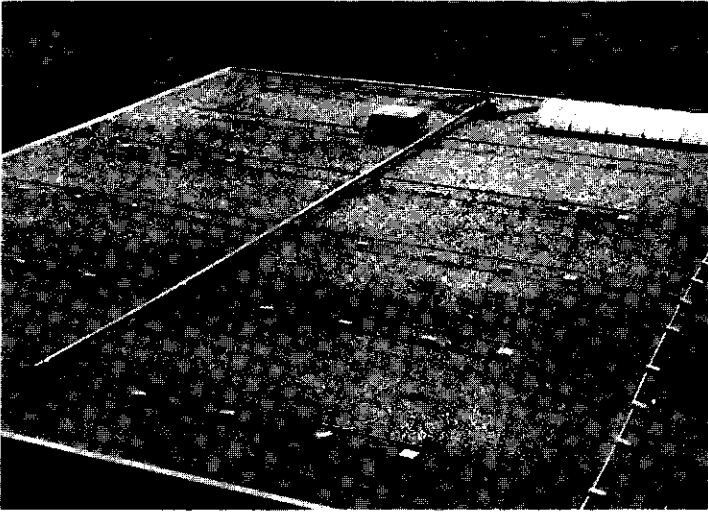
De afvoer vond plaats via vier afvoerputjes, waarvan er drie in één lijn lagen tussen de 2e en 3e sproeileiding (zie fotopagina en figuur 1a). Het vierde putje bevond zich vlak bij de aansluiting van de aanvoerslang aan de voedingsleiding. Het dakoppervlak lag onder een helling van gemiddeld $\pm 1\%$, waarbij zich de bovengenoemde putjes op het laagste gedeelte bevonden en het dak naar weerskanten opliep. In de lengterichting van het dak (dus in de richting van de sproeileidingen) was geen helling aanwezig.

Vanwege de helling van het dak leverde het vierde afvoerputje praktisch geen afvoer.

In het gebouw verenigde de afvoer zich in twee afvoerpijpen met een lengte van 53 meter, waarvan

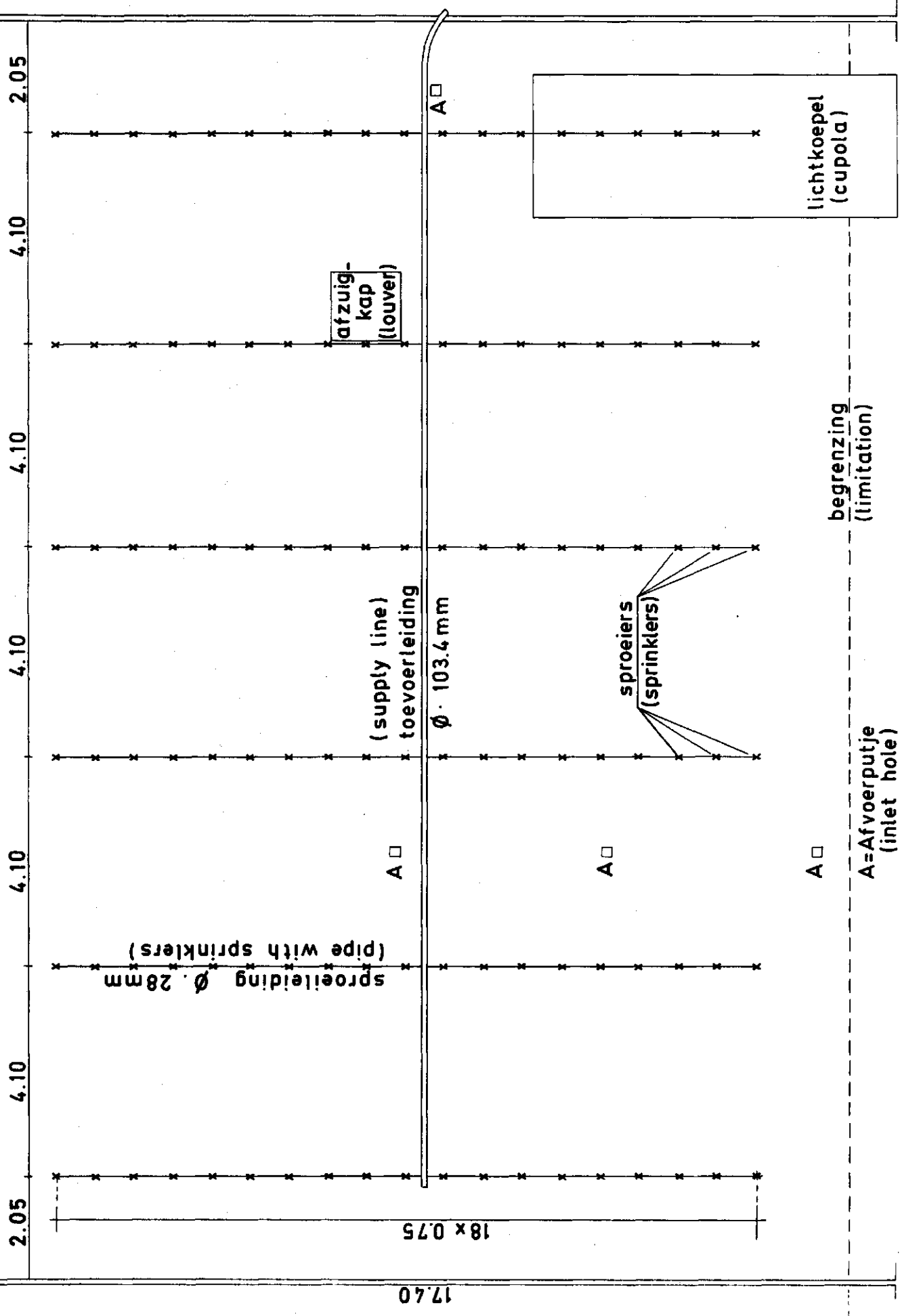
4.5 meter met een doorsnede van 10	cm
12.5 " " " " "	12.5 cm
36 " " " " "	15.0 cm

De drie afvoerputjes in één lijn waren op één van deze twee leidingen aangesloten, zodat vrijwel de gehele afvoer plaatsvond via één leiding (zie figuur 1.b). De gemiddelde helling van deze leiding bedroeg $\pm 0.5\%$. In het leidinggedeelte met $\emptyset = 15$ cm bevond zich een valpijp. De twee afvoerpijpen kwamen uit in een meetput die zich juist buiten het gebouw bevond. In deze

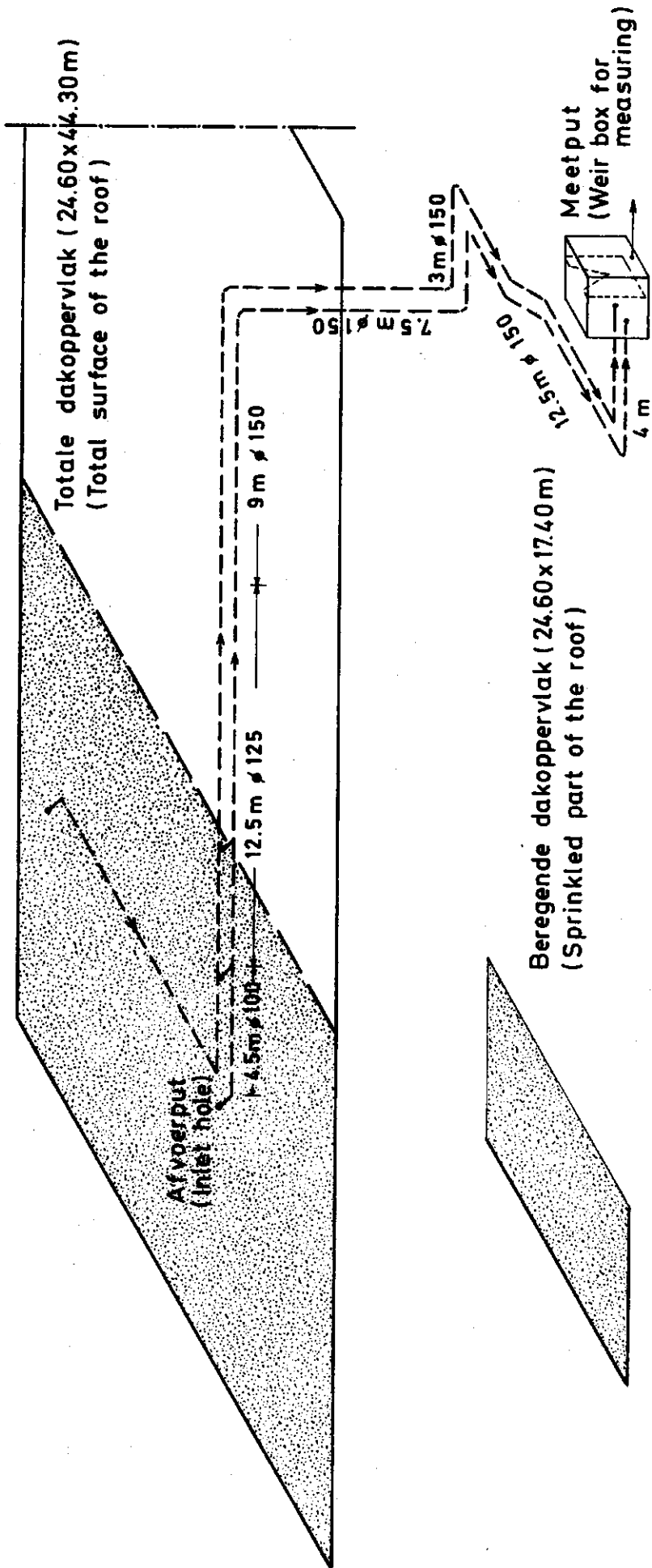


FIGUUR 1a (Schaal 1:100)

(FIGURE 1a (Scale 1:100))

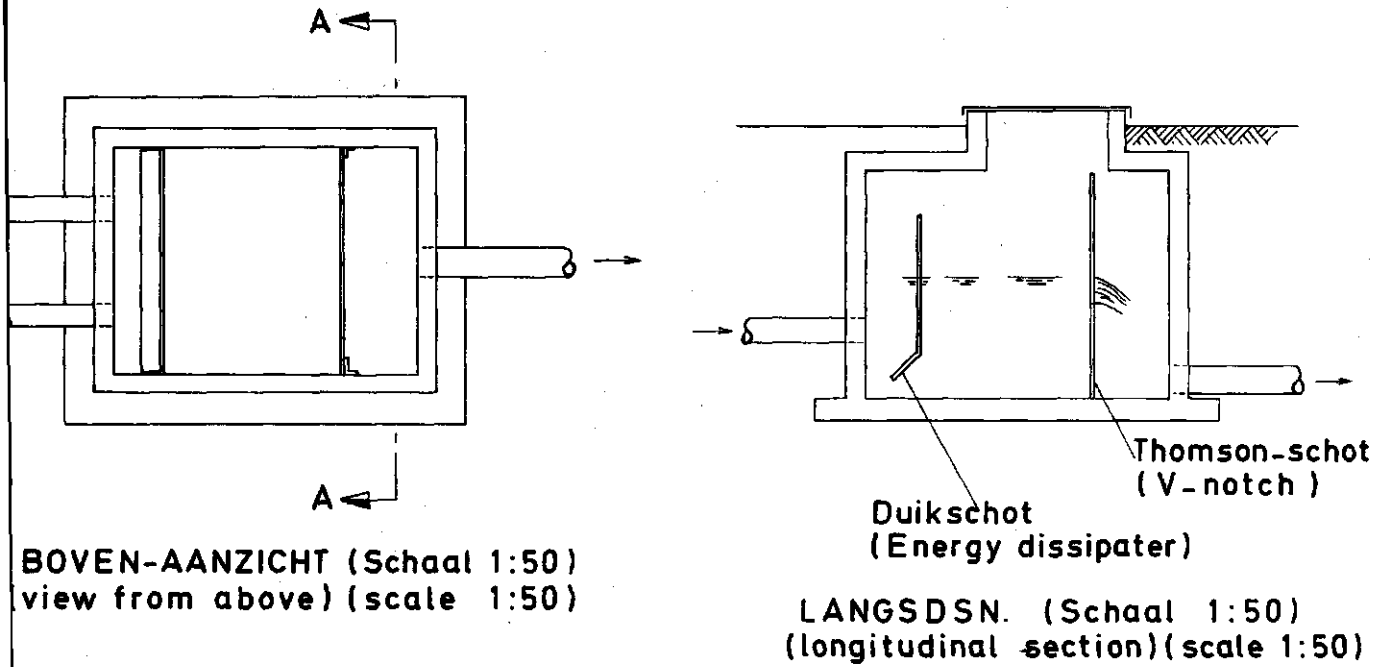


FIGUUR 1b
(FIGURE 1b)



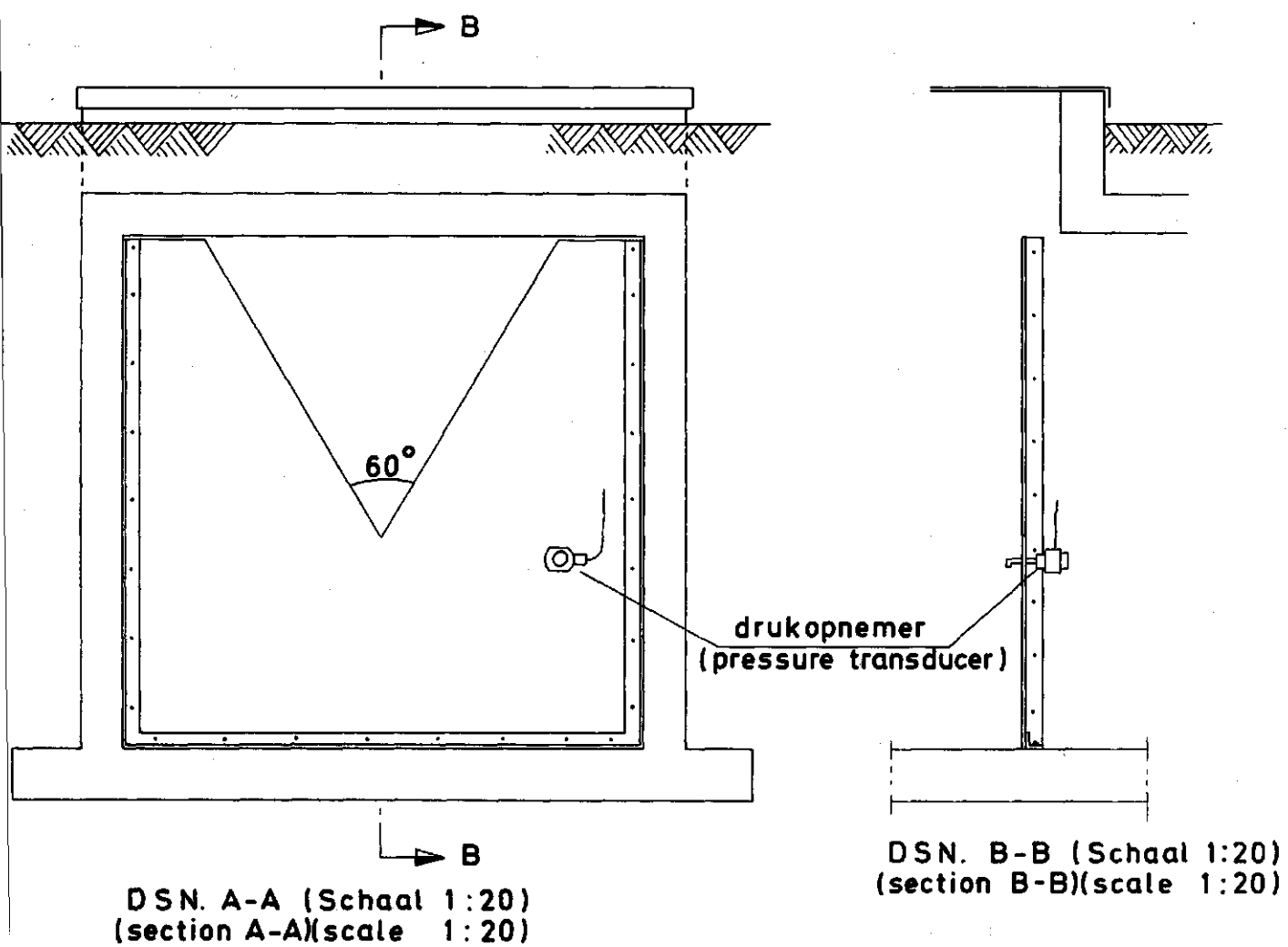
FIGUUR 2
(FIGURE 2)

MEETPUT DAKAFVOEREN
(WEIR BOX FOR MEASURING)



BOVEN-AANZICHT (Schaal 1:50)
view from above) (scale 1:50)

LANGSDSN. (Schaal 1:50)
(longitudinal section)(scale 1:50)



DSN. A-A (Schaal 1:20)
(section A-A)(scale 1:20)

DSN. B-B (Schaal 1:20)
(section B-B)(scale 1:20)

meetput was een V-vormige scherpe overlaat (Thomson-meetschot met een hoek van 60°) geplaatst, waarmee kleine afvoeren ook nog met een redelijke nauwkeurigheid kunnen worden gemeten (zie figuur 1b en 2).

Het registreren van de afvoer vond plaats door middel van een aan het meetschot gemonteerde drukverschilopnemer die aangesloten was op een continu registrerende flat-bed recorder.

Door ijking m.b.v. de eerder genoemde elektromagnetische debietmeter was bij iedere recorderstand de afvoer over het meetschot bekend. Om deze ijking uit te voeren was tijdelijk een verbinding gemaakt waarbij via de debietmeter direkt water in de put werd gebracht.

In de meetput was nog een duikschot aangebracht teneinde de golving, die veroorzaakt werd door het binnenkomende water, uit te dempen. Met behulp van de bovenomschreven beregeningsinstallatie zijn neerslagintensiteiten gesimuleerd tot ruim 70 mm/uur. Het meten van afvoeren boven 8 l. sec^{-1} bleek niet mogelijk omdat zich dan in de afvoerpijpen druk opbouwde die een pulserende uitstroming met medeneming van luchtbellens in de meetput tot gevolg had; het was dan onmogelijk de afvoer nauwkeurig te meten.

Nauwkeurigheid van de meetcijfers

De afleesfout van de magnetische flowmeter bleek bij volumetrische ijking ten hoogste 1% te zijn voor een meetbereik: $1 \text{ l. sec}^{-1} < Q < 10 \text{ l. sec}^{-1}$. De fout van de drukverschilopnemer was maximaal 0.5 mm. Deze fout komt overeen met 0.1 schaaldeel van de flat-bed recorder.

Het afgelezen signaal van de flat-bed recorder was dupliceerbaar tot op een maximale afwijking van $\frac{1}{4}$ % van de volle schaal, wat overeenkomt met $\frac{1}{4}$ schaaldeel. De nauwkeurigheid van de afvoerdebietcijfers bleek voornamelijk te worden bepaald door de recorder.

De som van de onnauwkeurigheid van de flat-bed recorder, de maximale fout van de magnetische flowmeter en de onnauwkeurigheid van de drukverschilopnemer levert de grootst mogelijke fout in de gemeten afvoerdebieten.

Onder de aannamen:

- de afwijkingen van de drie onderdelen zijn onafhankelijk en normaal verdeeld
- de onnauwkeurigheid van een onderdeel kan door tweemaal de standaardafwijking van dat onderdeel worden getypeerd

kan met behulp van de voortplantingswet der fouten, met gebruikmaking van de afvoerformule van het Thomson meetschot, de standaardafwijking in een

afvoercijfer worden geschat, zie b.v. [9].

Afvoer Q 1/s	Grootst mogelijke fout		Standaardafwijking van een afvoercijfer	
	1/s	%	1/s	%
1	.08	8	.03	2.8
4	.18	5	.06	1.6
8	.29	4	.10	1.1

3. UITGEVOERDE PROEVEN

a. Bepaling van het "staartverloop"

Omdat bij debieten $< 1 \text{ l.s}^{-1}$ de meting van de afvoer met het Thomson meetschot in de meetput en de recorder te onnauwkeurig werd, werd voor de bepaling van de "staart" van het afvoerverloop t.g.v. berekening een andere methode toegepast. Het deel van de recessiecurve met een afvoer $< 1 \text{ l. sec}^{-1}$ bleek voor verschillende proeven, waarbij de beregeningsintensiteit $> 2 \text{ l. sec}^{-1}$ was, identiek te zijn. Om deze reden is dit deel van de recessiecurve (dus het deel met een $Q < 1 \text{ l. sec}^{-1}$) slechts enkele malen gemeten. Dit algemeen geldende deel van de recessiecurve kon bij iedere proef worden toegevoegd aan het gemeten afvoerverloop tot 1 l. sec^{-1} .

Voor de bepaling van dit staartverloop werd, na het stopzetten van de berekening, de Thomson overlaat met een plaat ineens afgesloten wanneer de afvoer was afgenomen tot ruim 1 l. sec^{-1} . Omdat het oppervlak (A) van de meetput bovenstrooms van het meetschot en het bij de berging betrokken gedeelte van de toevoerpijpen bekend was en van tevoren de relatie tussen de recorder-eenheid en het hiermee overeenkomende niveauverschil in de meetput bepaald was, kon de putinvoer per tijdseenheid (l. sec^{-1}) worden bepaald als

$$Q(t_i) = A \frac{\{R(t_i + \Delta t) - R(t_i - \Delta t)\} \alpha}{2 \Delta t}$$

$Q(t_i)$ = putinvoer op tijdstip t_i

$R(t_i)$ = recorderstand op tijdstip t_i

α = omrekeningsfactor van recordereenheden naar niveauverschil in de meetput

Δt = tijdsinterval

A = oppervlak van de meetput bovenstrooms van het meetschot en het bij de berging betrokken gedeelte van de toevoerpipen.

Zie voor het afvoerverloop 8.1.a.

b. Proeven met constante beregeningsintensiteit tot de stationaire toestand was bereikt

Zodra de stationaire toestand was bereikt werd de berekening stopgezet. Op de recorder werd zowel het stijgende als het dalende afvoerverloop geregistreerd. Om de invloed van de meetput op het afvoerverloop te elimineren werden de waarden, verkregen uit de recorderaflezing, dan nog gecorrigeerd met de bergingsverandering in de meetput. Dus:

$$Q(t) = Q_m(t) + \frac{dB}{dt}$$

$Q(t)$ = afvoer op tijdstip t

B = berging in meetput

$Q_m(t)$ = debiet over meetschot op tijdstip t (af te lezen uit ijktafel met behulp van $R(t)$).

$R(t)$ = recorderstand op tijdstip t .

We kunnen de formule ook schrijven als:

$$Q(t) = Q_m(t) + \frac{A \cdot \{R(t + \Delta t) - R(t - \Delta t)\} \cdot \alpha}{2 \Delta t}$$

(N.B.: In het stijgende gedeelte is $\frac{dB}{dt} > 0$,

in het dalende gedeelte is $\frac{dB}{dt} < 0$.)

Een aantal van de onder dit hoofdstuk vallende proeven werden zowel met een "droog" als een "nat" begin gedaan. Onder een "nat" dak wordt verstaan de toestand waarin het dak verkeert wanneer het, na afloop van een berekening, tenslotte geen afvoer meer levert.

Overzicht van de genomen proeven onder punt b.

Proef nr.	Beregeningsintensiteit l/s	Toestand dak bij aanvang proef		Gebruikt voor bepaling van		
		droog	nat	T, d(zie p. 7)	S-curve	Recessiecurve
b 1	3.56	x		x		
b 2	3.56		x	x	x	
b 3	5.92	x		x		
b 4	5.92		x	x	x	
b 5	6.93	x		x		
b 6	6.93		x	x	x	x
b 7	3.02		x		x	
b 8	2.50		x		x	
b 9	1.50		x		x	
b 10	ruim 8					x

De resultaten van de proeven staan vermeld in 8.1.b.

c. Proef met wisselende beregeningsintensiteit

Tijdens deze proef (de "testbui") werd de beregeningsintensiteit meerdere keren gewijzigd. De verwerking van de gegevens was gelijk aan die onder punt b.

6 min. - 4.0 l/s
 3 min. - 6.0 l/s
 3 min. - 8.0 l/s
 6 min. - 0 l/s
 3 min. - 8.0 l/s
 3 min. - 6.0 l/s
 3 min. - 4.0 l/s.

Zie voor het gemeten afvoerverloop 8.1.c.

4. VERWERKING EN INTERPRETATIE VAN DE MEETRESULTATEN

Tijdens de experimenten bleek dat na het stopzetten van de berekening het dak enkele uren bleef "nalopen". Wanneer het water -enkele plassen

uitgezonderd- beneden het oppervlak van het grind komt, vindt alleen stroming plaats tussen de grindsteentjes, wat veel trager verloopt dan stroming over het grind.

Uit de verschuiving van de hydrograaf met een nat en een droog begin volgt het waterlaagje d dat nodig is ter bevochtiging van het droge dak.

Volgens de proeven b 1 en b 2: $d = 2.75 \text{ min.} \times 0.523 \text{ mm/min.} = 1.44 \text{ mm}$

" " " b 3 en b 4: $d = 1.50 \text{ min.} \times 0.854 \text{ mm/min.} = 1.28 \text{ mm}$

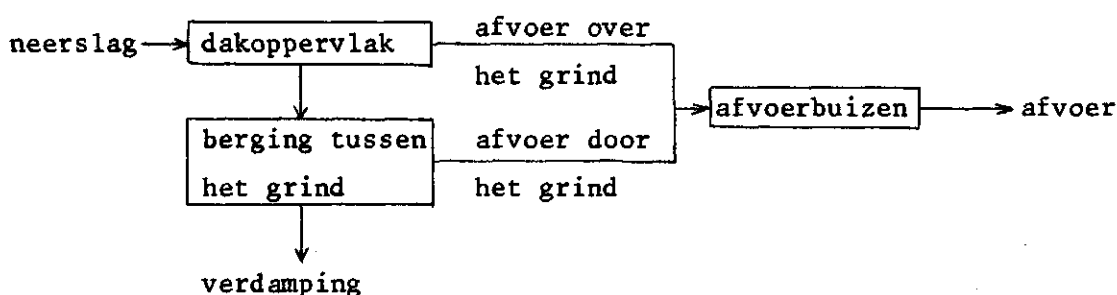
" " " b 5 en b 6: $d = 1.75 \text{ min.} \times 1.007 \text{ mm/min.} = 1.76 \text{ mm}$

→ d is te schatten op 1.5 mm.

Bij een aantal van de toegepaste modellen is de stroming door de afvoerbuizen apart weergegeven als een zuivere translatie T . Deze translatie is als volgt bepaald:

Voor verschillende neerslagdebieten is een tijd berekend met een constante intensiteit, waarna plotseling de regenintensiteit werd verhoogd. De tijd die het duurde voordat de recorder reageerde was gelijk aan de tijd die de golfverhoging nodig had om zich door de afvoerbuizen voort te planten. Wanneer het basisdebiet zeer laag was (2 l. sec^{-1}) bleek deze tijd één minuut te zijn. Bij hoge debieten liep deze tijd terug tot 40 à 50 sec.

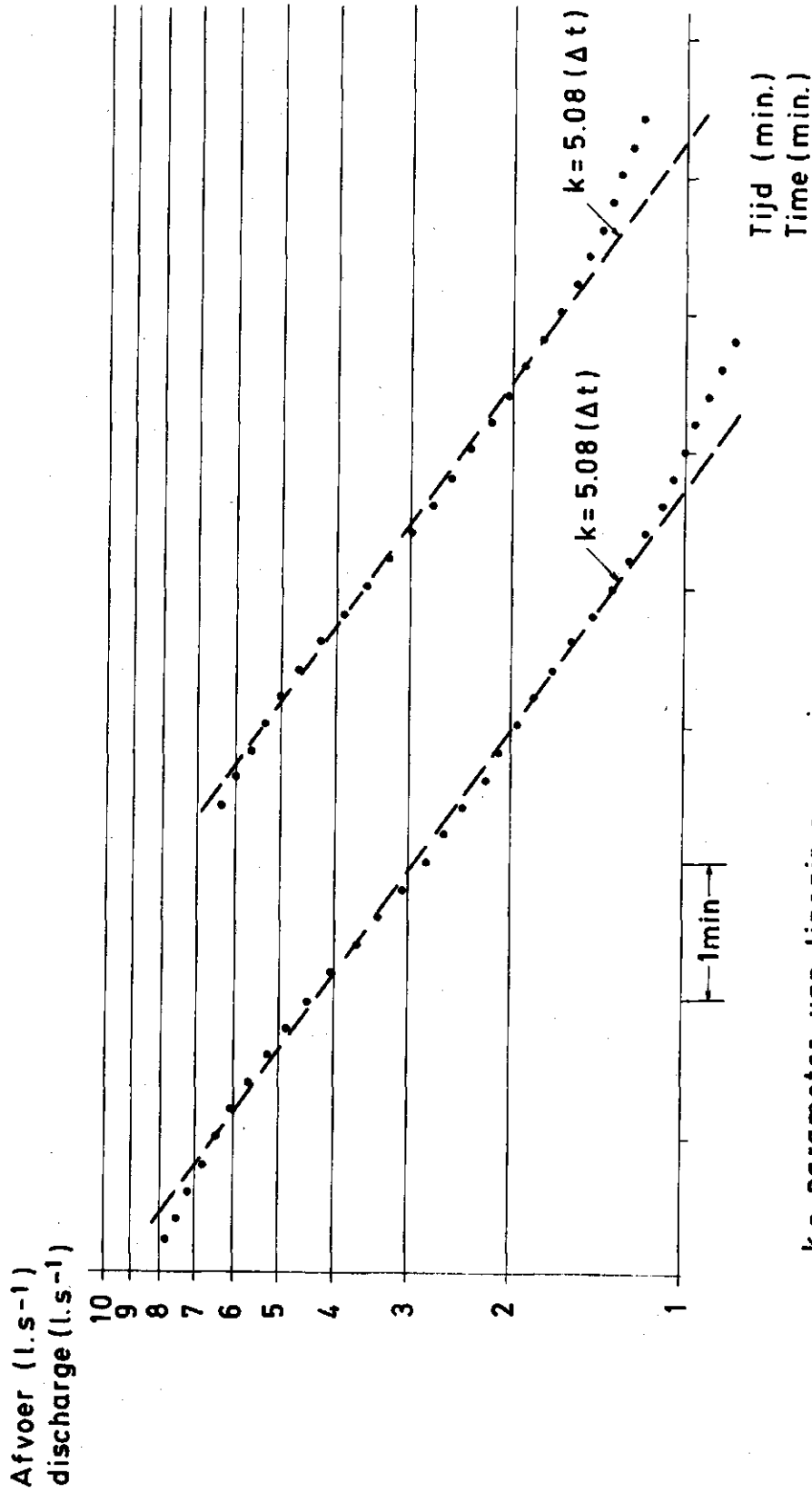
Als een eerste benadering is voor een aantal gevallen op grond van deze uitkomsten de stroming door de afvoerbuizen weergegeven met een zuivere translatie $T = 1 \text{ min.}$ Voor het neerslag-afvoerverloop van het dak plus afvoerbuizenstelsel laat zich het volgende schema opstellen:



Daar de proeven òf in de herfst, òf 's zomers gedurende de vroege morgen of late namiddag werden gehouden en daar de proeven zelf vrij kort duurden waren verliezen t.g.v. verdamping klein, zodat met verdamping tijdens de proeven géén rekening behoefde te worden gehouden.

In figuur 3 zijn twee recessiecurven (van proef b 6 en b 10) uitgezet op semilogaritmisch papier. Globaal gezien zijn de curven binnen het traject 1.5 l. sec^{-1} en 7.0 l. sec^{-1} goed te benaderen m.b.v. een rechte lijn. Dit be-

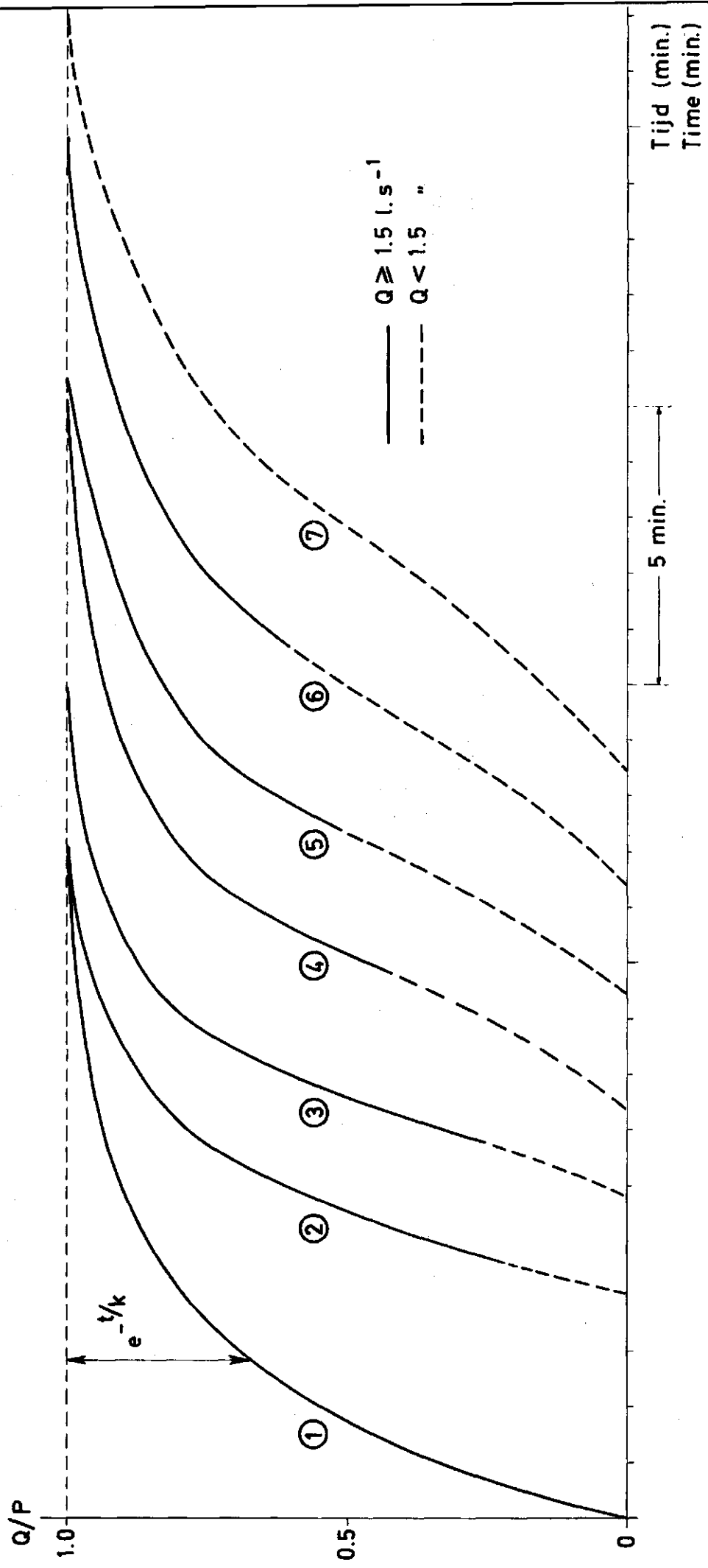
FIGUUR 3
 (FIGURE 3)
 RECESSIE CURVES
 (RECESSION CURVES)



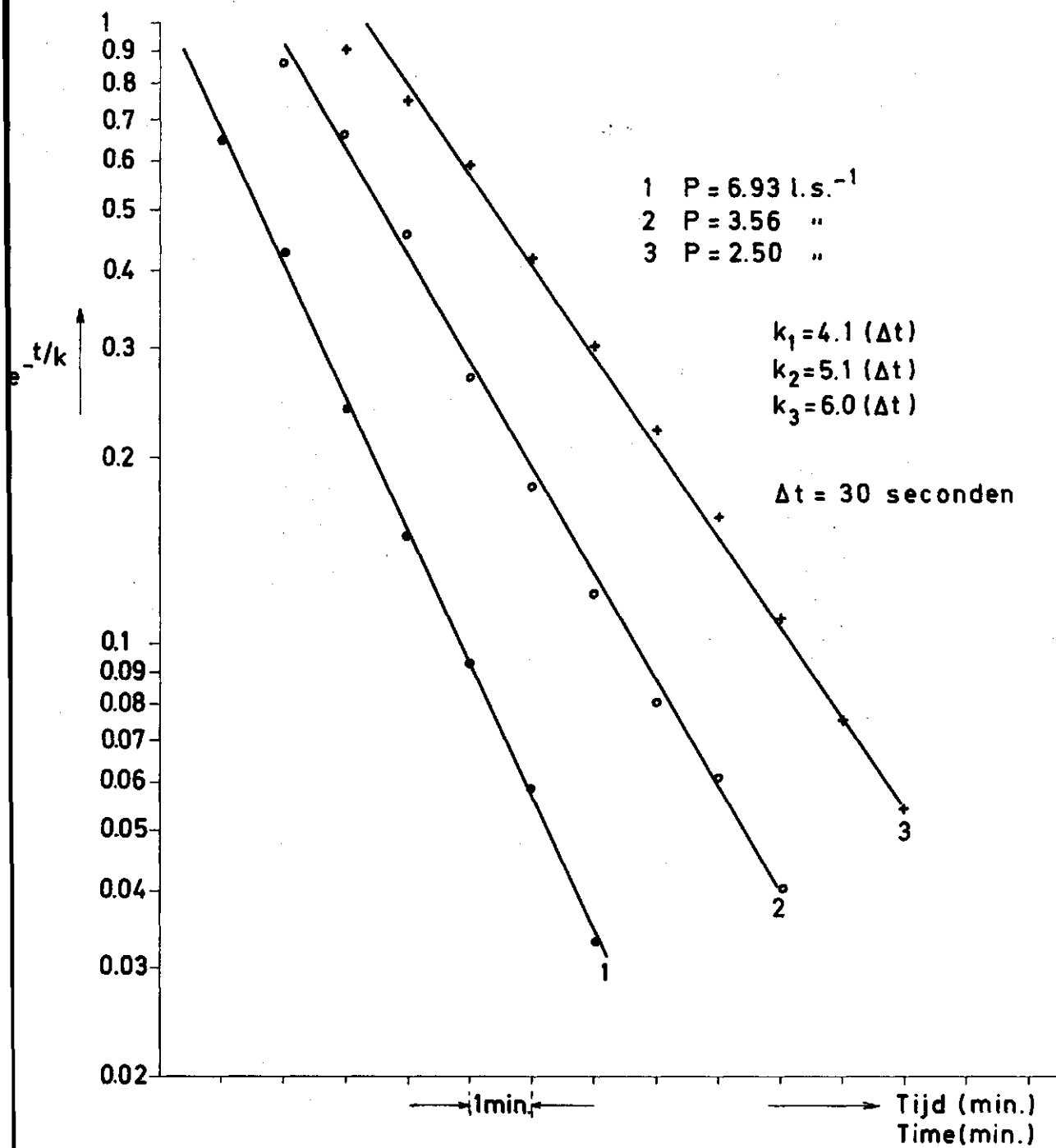
k = parameter van lineair reservoir
 (k = parameter of linear reservoir)
 $\Delta t = 30$ seconden

FIGUUR 4
(FIGURE 4)
EENHEIDSSSTAPRESPONSIES
(UNIT STEP RESPONSES)

- ① Lineair reservoir $k = 5.08 (\Delta t)$
- ② $P = 6.93 \text{ l.s}^{-1}$
- ③ $P = 5.92 \text{ "}$
- ④ $P = 3.56 \text{ "}$
- ⑤ $P = 3.02 \text{ "}$
- ⑥ $P = 2.50 \text{ "}$
- ⑦ $P = 1.50 \text{ "}$



FIGUUR 5
(FIGURE 5)



tekent dat het afvoerverloop na het stopzetten van de berekening kan worden vergeleken met het leeglopen van een lineair reservoir (ook andere modellen kunnen een exponentiële uitputtingsverloop vertonen; het lineaire reservoir kan evenwel worden beschouwd als het basismodel met dit verschijnsel).

Om de lineariteit tijdens regenval nader te onderzoeken werd een aantal eenheidsstapresponsies (S-curven) geconstrueerd m.b.v. de beregeningsproeven b 2, 4, 6, 7, 8 en 9 (zie figuur 4).

Zie voor beschrijving van de eenheidsstapresponsie [1], [2] of [3].

Indien het beschouwde systeem zuiver lineair zou reageren, zou, afgezien van afwijkingen ten gevolge van meetfouten, een aantal identieke S-curven zijn gevonden.

Dit bleek niet het geval (zie figuur 4). Zoals verder zal blijken bij de afvoersimulatie m.b.v. modellen is dit gedeeltelijk toe te schrijven aan een verschijnsel dat verder zal worden aangeduid met "het aanloopverschijnsel". Dit houdt in dat er zich eerst een bepaalde laagdikte moet ontwikkelen voordat de afvoer "op gang komt".

Afgezien hiervan en ook wanneer die gedeelten van de S-curven die corresponderen met een afvoerdebit $\leq 1.5 \text{ l.s}^{-1}$ buiten beschouwing worden gelaten is duidelijk een steiler verloop van de curven met de toename van de toegepaste debieten te constateren.

Om een vergelijking te kunnen maken met de recessiecurve is van enkele proeven (b 2, 6 en 8) het complement van $S(t)$ tot één ($= e^{-t/k}$) uitgezet op semilogaritmisch papier (figuur 5). De eenheidsstapfunctie (S-curve) van een lineair reservoir is:

$$S(t) = 1 - e^{-t/k}$$

Indien men het beschouwde systeem benadert met een lineair reservoir kunnen door de punten in figuur 5 lijnen worden getrokken en uit de helling van de verkregen lijnen kunnen de parameterwaarden k worden berekend.

Bij een hogere neerslagintensiteit wordt een kleinere waarde voor k gevonden, hetgeen betekent dat het dak dan sneller reageert.

In [4] wordt voor het in model brengen van de afvoer van een weggedeelte gebruik gemaakt van een lineair reservoir, waarvan de tijdconstante tijdens neerslag een andere waarde heeft dan tijdens afwezigheid van neerslag. Als verklaring hiervan is de extra weerstand, die de stroming ondervindt ten gevolge van neerslag, aangegeven.

Het gemiddelde van de k -waarden van figuur 5, dat betrekking heeft op

afstroming tijdens neerslag, is hetzelfde als de waarde die werd gevonden uit de recessiecurve. Er kan dus worden geconcludeerd dat de nu uitgevoerde experimenten de in [4] toegepaste differentiatie naar het al dan niet optreden van neerslag niet ondersteunen. Wel blijkt hier dat het lineaire reservoir het systeem redelijk kan beschrijven, terwijl de neerslagintensiteit de parameter lijkt te beïnvloeden.

M.b.v. de systeembenadering is onderzocht hoe het beschouwde dakgedeelte en de afvoerbuizen met behulp van een lineair model kan worden beschreven.

Bij het in model brengen van het neerslag-afvoer proces zijn de volgende werkwijzen gevolgd:

1. Het dak plus de afvoerbuizen zijn beschouwd als één systeem.
2. De stroming door de buizen is voorgesteld als een zuivere translatie van één minuut (er is steeds gewerkt met een tijdstaplengete $\Delta t = 30$ sec, en daar, zoals al eerder vermeld, de stroomtijd door de buizen kan worden geschat op $+ 1$ minuut is een translatie van $2 \cdot \Delta t$ aangehouden).

Aanvankelijk werden de volgende drie deelmodellen gebruikt:

1. het lineaire reservoir (zie [1], [2] of [3])
2. het j-model (zie [2] of [6])
3. een zuivere translatie

Tijdens zijn verblijf te Wageningen in de zomer van 1975 vestigde J.Ph. O'Kane onze aandacht op een convective diffusion model met bovenstroomse toevoer. Dit model van Harley bleek een zeer goede benadering op te leveren, zodat dit model alsook een convective diffusion model met gedeeltelijke zijdelingse voeding van Th.J. van de Nes als 4e en 5e aan de reeks zijn toegevoegd (zie [3] resp. [8]).

Deze vijf basismodellen kunnen worden beschreven m.b.v. hun impulsresponsies:

$$1. \quad u(t) = 1/k \cdot e^{-t/k} \quad (4.1)$$

$$2. \quad u(t) = 8/\pi^2 j \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} e^{-n^2 t/j} \quad (4.2)$$

$$3. \quad u(t) = 0 \text{ voor } t \neq \tau \\ = \delta \text{ voor } t = \tau \quad (4.3)$$

$$4. \quad u(t) = \frac{E}{\sqrt{\pi t^3}} \cdot e^{-\frac{(E-Ft)^2}{t}} \quad (4.4)$$

$$5. \quad u(t) = \frac{1}{2 G.H.I} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{H-t/I}{\sqrt{2.t/I}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{H(1-G)-t/I}{\sqrt{2.t/I}} \right) \right\} \\ + \frac{1}{2 G.H.I} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \pi t/I}} \left\{ e^{-\frac{(H(1-G)-t/I)^2}{2 t/I}} - e^{-\frac{(H-t/I)^2}{2 t/I}} \right\}$$

(4.5)

$\tau, k, j, E, F, G, H, I$: parameters

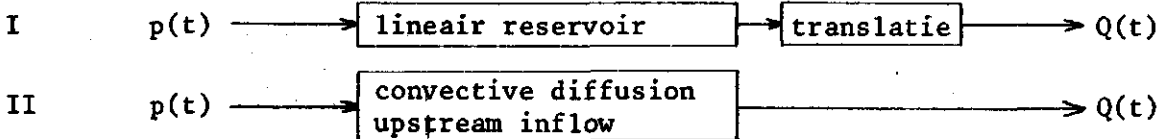
$u(t)$: impulsresponsie, als functie van de tijd

δ : delta-functie.

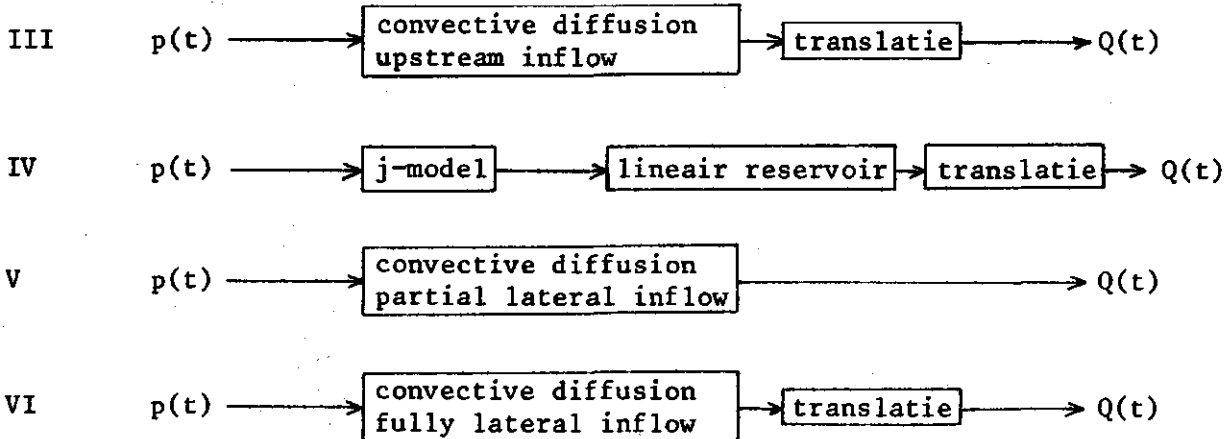
Indien bij model 5. $G = 1$, dan wordt het randgeval "fully lateral inflow" verkregen.

M.b.v. bovengenoemde basismodellen zijn de volgende modellen samengesteld:

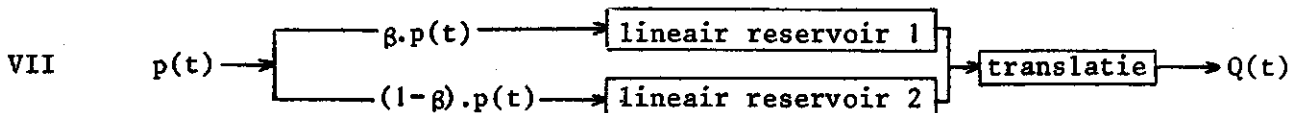
tweeparametermodellen

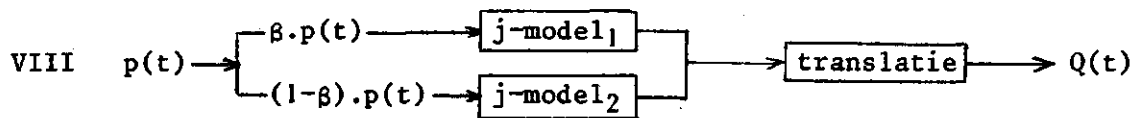


drieparametermodellen



vierparametermodellen





$p(t)$: regen

$Q(t)$: meetputinvoer

Impulsresponsies van de beschreven modellen

model I:
$$u(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-(t-\tau)/k} \quad \text{voor } t > \tau \quad (4.6)$$

$$u(t) = 0 \quad \text{voor } t < \tau$$

model II: zie (4.4)

model III:
$$u(t) = \frac{E}{\sqrt{\pi(t-\tau)^3}} \cdot e^{-\frac{\{E-F(t-\tau)\}^2}{t-\tau}} \quad \text{voor } t > \tau \quad (4.7)$$

$$u(t) = 0 \quad \text{voor } t < \tau$$

model IV: De impulsresponsie van dit model wordt verkregen door de impulsresponsie van het j-model te convolueren met die van het lineaire reservoir.

$$u(t) = \frac{8}{\pi^2} \left[\frac{1}{j-k} (e^{-(t-\tau)/j} - e^{-(t-\tau)/k}) \right. \\ \left. + \frac{1}{j-9k} (e^{-9(t-\tau)/j} - e^{-(t-\tau)/k}) \right. \\ \left. + \frac{1}{j-25k} (e^{-25(t-\tau)/j} - e^{-(t-\tau)/k}) + \dots \right]$$

voor $t > \tau$

(4.8)

$$u(t) = 0 \quad \text{voor } t < \tau$$

model V: Zie (4.5).

$$\begin{aligned} \text{model VI: } u(t) = & \frac{1}{2 H \cdot I} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{H - (t-\tau)/I}{\sqrt{2(t-\tau)/I}} \right) + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{(t-\tau)}{2I}} \right) \right\} \\ & + \frac{1}{2 H \cdot I} \cdot \sqrt{\frac{I}{2 \pi(t-\tau)}} \left\{ e^{-(t-\tau)/2I} \right. \\ & \left. - e^{-I \left(H - \frac{(t-\tau)}{I} \right)^2 / 2(t-\tau)} \right\} \quad \text{voor } t > \tau \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$u(t) = 0 \quad \text{voor } t < \tau$$

$$\text{model VII: } u(t) = \frac{\beta}{k_1} \cdot e^{-(t-\tau)/k_1} + \frac{(1-\beta)}{k_2} \cdot e^{-(t-\tau)/k_2} \quad \text{voor } t > \tau \quad (4.10)$$

$$u(t) = 0 \quad \text{voor } t < \tau$$

$$\begin{aligned} \text{model VIII: } u(t) = & \frac{8\beta}{\pi^2 \cdot j_1} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} e^{-n^2(t-\tau)/j_1} + \\ & + \frac{8(1-\beta)}{\pi^2 \cdot j_2} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} e^{-n^2(t-\tau)/j_2} \quad \text{voor } t > \tau \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$u(t) = 0 \quad \text{voor } t < \tau$$

Toelichting bij de gekozen modellen

De modellen II, III, V en VI berusten op de convective diffusie vergelijking:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - A_{\tau} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (4.12)$$

	dimensie
Q : afvoer	(L ³ · T ⁻¹)
A _τ : translatiecoëfficiënt	(L · T ⁻¹)
D : diffusiecoëfficiënt	(L ² · T ⁻¹)

(Zie voor de afleiding van deze vergelijking als vereenvoudiging van de Saint Venant vergelijkingen [8]). Met (4.12) kan o.a. stroming door een kanaal worden beschreven. Tussen de parameters E en F van model II en III en de coëfficiënten D en A_τ uit (4.12) bestaat het volgende verband (zie [7]):

$$E = \frac{x}{\sqrt{4D}} \qquad F = \frac{A_\tau}{\sqrt{4D}}$$

Tussen de parameters H en I van model V en VI en D en A_τ geldt (zie [8]):

$$H = \frac{x \cdot A_\tau}{2D} \qquad I = \frac{2D}{A_\tau^2}$$

terwijl de parameter G in deze modellen het gedeelte van het kanaal aangeeft waarover voeding plaatsvindt. Model V van Van de Nes beschrijft het geval "partial lateral inflow" in een oneindig kanaal, waar een zeker basisdebiet door stroomt. Doordat het kanaal oneindig is, is het bij dit model mogelijk dat de stroming bovenstrooms van het traject waar voeding plaats vindt, door deze voeding wordt beïnvloed. De "kanaaltjes" die men zich op het dak aanwezig kan denken zijn natuurlijk eindig, maar daar het hier om stroming in dunne laagjes gaat zal het optreden van het "backwater"-effekt niet belangrijk zijn, zodat deze afwijking t.o.v. het model niet van groot belang is.

Model V heeft als speciale gevallen:

G = 0: "tributary inflow"

G = 1: "fully lateral inflow".

Daar, zoals hiervoor genoemd, bij de stroming over het dak het "backwater"-effekt geen belangrijke rol zal spelen is te verwachten dat het geval tributary inflow van model V ongeveer dezelfde resultaten zal geven als het geval "upstream inflow" van model III. (Zie voor een uitgebreide analyse van de verschillen tussen genoemde gevallen [8] hoofdstuk 5).

Bij model IV was de gedachtengang om de stroming naar de waargenomen plassen om de afvoerputjes weer te geven met een j-model en het plassenstelsel zelf door een lineair reservoir.

Bij model VII en VIII zijn twee reservoirs, resp. j-modellen parallel geschakeld om de stroming over, resp. dōōr het grind te beschrijven.

Van model VII valt nog op te merken dat men eenvoudig kan laten zien dat een cascade van twee lineaire reservoirs met parameters k_1 en k_2 een speciaal geval is van model VII, namelijk het geval

$$\beta = \frac{k_1}{k_1 + k_2}$$

Wijze van optimalisatie en vergelijking van de modellen

Voor de optimalisatie van de parameters van de verschillende modellen en het beoordelen van hun geschiktheid is gebruik gemaakt van de proeven b 4 en c. De afvoeren t.g.v. deze twee buien zijn gegeven om de $\Delta t = 30$ sec, terwijl de blokjes van het neerslaghistogram een tijdsduur van 30 seconden beslaan.

Voor een model met bepaalde parameterwaarden kan voor een neerslaghistogram het afvoerverloop worden berekend door dit neerslaghistogram te convolveren met de discrete waarden van de pulsresponsie op $t = \Delta t$, $t = 2\Delta t$, $t = 3\Delta t$, enz. (het gaat hier om de responsie op een puls met een tijdsduur van $\Delta t = 30$ seconden). Deze waarden van de pulsresponsie werden verkregen door integratie van de impulsresponsie. Voor de modellen I, IV, VII en VIII kon dit analytisch gebeuren. Voor de modellen II, III, V en VI is numeriek geïntegreerd m.b.v. de regel van Simpson. Het berekenen van de impulsresponsies om de $\Delta t/4$ (= 7.5 sec) bleek voldoende nauwkeurig. Bij het berekenen van de impulsresponsies van de modellen IV en VIII is in (4.8) en (4.11) de sommatiereeks van het j-model afgekapt na de zevende term. Bij het berekenen van de errorfuncties in (4.5) en (4.9) is gebruik gemaakt van de volgende benadering (zie [10]):

$$\text{erf}(x) = 1 - (a_1 w + a_2 w^2 + a_3 w^3 + a_4 w^4 + a_5 w^5) \cdot e^{-x^2} + \epsilon(x) \quad (4.13)$$

$x > 0$

met

$$w = \frac{1}{1 + zx}$$

$$|\epsilon(x)| \leq 1.5 \cdot 10^7$$

$$z = .3275911$$

$$a_1 = .254829592$$

$$a_2 = - .284496736$$

$$a_3 = 1.421413741$$

$$a_4 = - 1.453152027$$

$$a_5 = 1.061405429$$

Het integreren van de impulsresponsie van model VI levert nog een probleem op, daar deze voor $t-\tau = 0$ een singulariteit vertoont. Evenwel voor kleine positieve waarden van $t-\tau$ blijkt (in 4.9) voor reëel voorkomende parameterwaarden te gelden:

$$e^{-(t-\tau)/2I} - e^{-I\{H-(t-\tau)/I\}^2/2(t-\tau)} \approx e^{-(t-\tau)/2I} \quad (4.14)$$

Voor $t-\tau < \Delta t/4 = 7.5$ sec is de vereenvoudiging volgens (4.14) toegepast en is de e-macht benaderd volgens:

$$e^{-x} = 1 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \epsilon(x) \quad (4.15)$$

$$0 < x \leq \ln 2 = 0.7$$

$$|\epsilon(x)| \leq 3 \cdot 10^{-5}$$

$$a_1 = - .9998684$$

$$a_2 = .4982926$$

$$a_3 = - .1595332$$

$$a_4 = .0293641$$

Daar

$$\lim_{t \rightarrow \tau^+} \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{(t-\tau)}{2 \cdot I}}\right) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \tau^-} \operatorname{erf}\left(\frac{H - (t-\tau)/I}{\sqrt{2(t-\tau)/I}}\right) = 1$$

kan de eerste term van (4.9) vanaf $t = \tau$ numeriek worden geïntegreerd. Voor de tweede term van (4.9) is dit niet mogelijk, maar daar hiervan m.b.v. (4.14) + (4.15) de primitieve functie kan worden bepaald is de bijdrage van deze term voor $0 < x < \Delta t/4$ analytisch bepaald. Voor alle modellen zijn de pulsresponsies afgekapt na 35 min.

Om de parameters van de verschillende modellen aan de hand van een gegeven neerslag-afvoerverloop te bepalen zijn twee werkwijzen mogelijk:

1e via momenten

In het geval van een n-parameter model dient men dan te beschikken over de formules die voor de eerste n-momenten de relaties weergeven tussen deze momenten en de parameters.

2e Men gaat de parameters optimaliseren, waarbij aan de hand van een gekozen criterium, die parameterkombinatie wordt bepaald, waarmee, bij het model waarmee men werkt, het gemeten afvoerverloop het best wordt benaderd door het gesimuleerde afvoerverloop.

Het voordeel van de eerste methode is dat de berekening relatief weinig rekentijd vergt.

De tweede methode kost veel meer rekentijd, omdat iteratief volgens een bepaalde zoekmethode steeds nieuwe parameterwaarden worden gekozen, vervolgens de pulsresponsie berekend en met deze pulsresponsie het afvoerverloop wordt berekend. Daarna wordt dit berekende afvoerverloop vergeleken met het gemeten afvoerverloop. Een veel gebruikt criterium hiervoor is de som van de kwadraten van de afwijkingen tussen het gemeten en het gesimuleerde afvoerverloop.

De tweede methode levert over het algemeen bevredigender resultaten dan de eerste. Ter illustratie is in fig. 6 het afvoerverloop t.g.v. de testbui

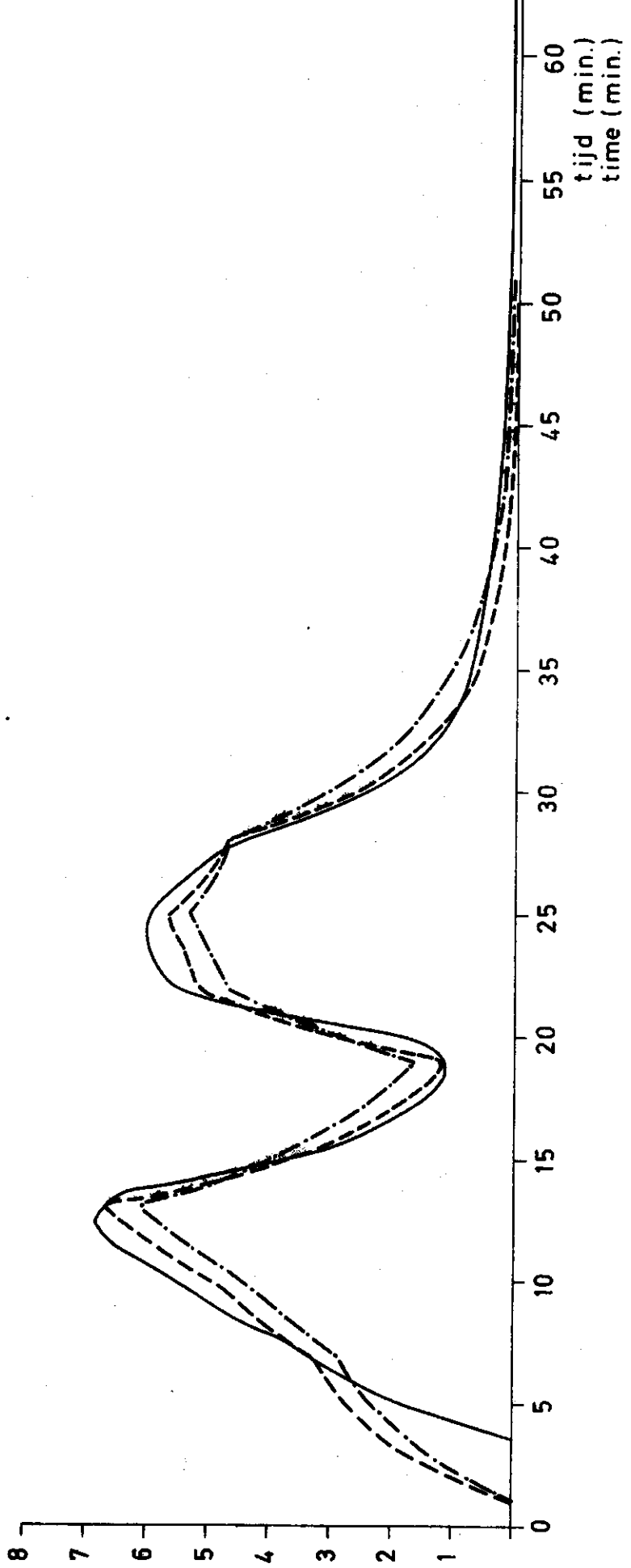
FIGUUR 6
(FIGURE 6)

Afveersimulatie van de testbui
(Simulation discharge teststern)

MODEL VII (two reservoirs)

- gemeten (measured)
- · - · - kwadratenkriterium ($t = 1 - 63 \text{ min.}$)
(least sum of squares)
- - - - - momenten (moments)

afvoer (l. s^{-1})
discharge (l. s^{-1})



FIGUUR 7
(FIGURE 7)

Afveersimulatie van de testbui
(Simulation discharge testbuis)

MODEL I (one reservoir)

— gemeten (measured)

- · - · - kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) $k = 6.23 \Delta t$
(least sum of squares)

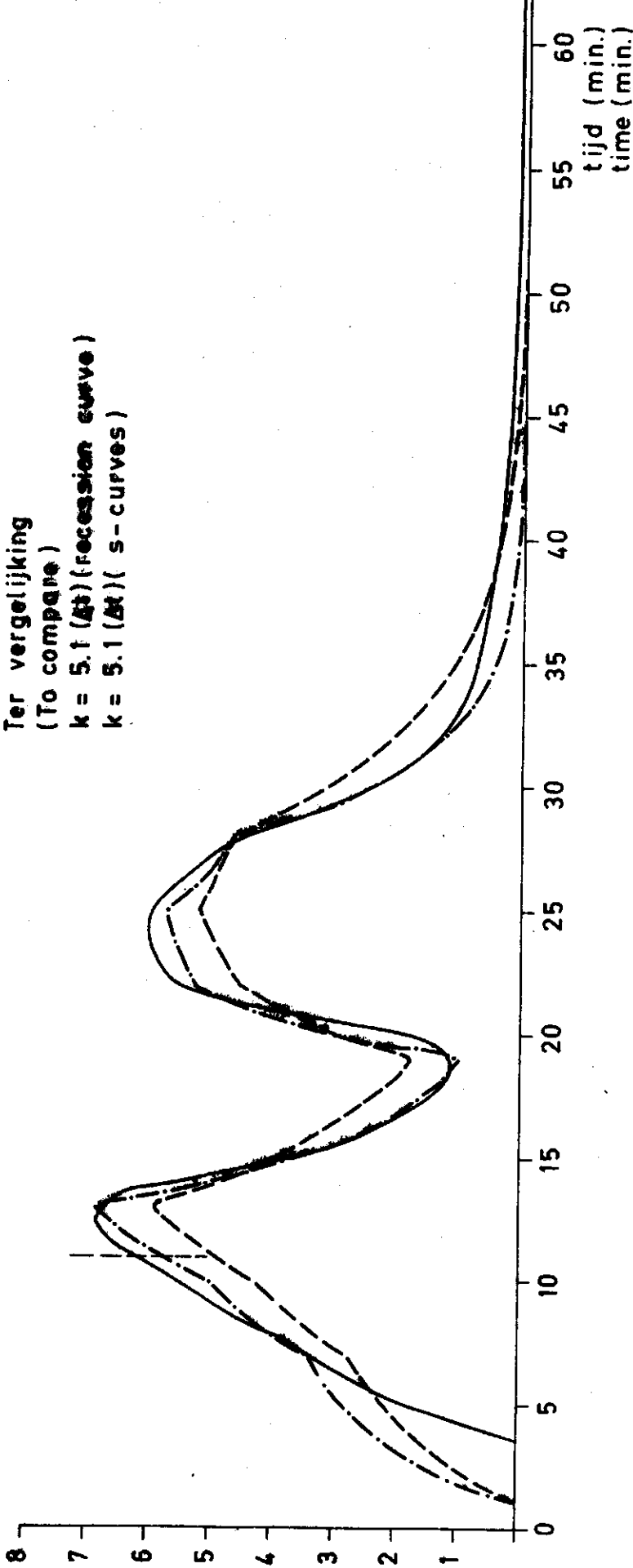
- - - - - momenten (moments) $k = 9.90 \Delta t$

Ter vergelijking
(To compare)

$k = 5.1 \Delta t$ (recession curve)

$k = 5.1 \Delta t$ (s-curves)

afvoer ($l.s^{-1}$)
discharge ($l.s^{-1}$)



tijd (min.)
time (min.)

weergegeven, gesimuleerd met model VII. Nadat de translatie τ van tevoren gesteld was op één minuut zijn de parameters met beide methoden bepaald.

Een ander voordeel van de optimalisatiemethode is de mogelijkheid te optimaliseren m.b.v. een bepaald gedeelte van het afvoerverloop. Hiervan is ook gebruik gemaakt. Vanwege de duidelijke niet-lineariteit van het systeem, als het pas begonnen is te regenen, leek het verstandig bij het optimaliseren van alle modellen het begin van het afvoerverloop niet in de optimalisatie te betrekken. Om deze reden is bij het optimaliseren als criterium genomen de som van de kwadraten van de afwijkingen tussen gemeten en berekend afvoerverloop vanaf elf minuten na het aanzetten van de berekening. Het verschijnsel dat na het aanzetten van de berekening de afvoer enige tijd op zich laat wachten komt overeen met het al eerder genoemde "aanloopverschijnsel".

Dit aanloopverschijnsel kan zeker niet worden opgevat als translatie, daar tijdens de proeven, wanneer de afvoer eenmaal op gang was, het debiet dat de vier putjes op het dak instroomde vrijwel direkt reageerde op een verandering in het regendebiet.

In figuur 7 is nog een illustratie gegeven van twee simulaties met beide methoden voor model I. De translatie is van tevoren gesteld op $\tau = 1$ minuut. Bij de optimalisatie van de resterende parameter m.b.v. het kwadratenkriterium is geoptimaliseerd vanaf $t = 11$ minuten. Ook hier blijkt de simulatie van het afvoerverloop m.b.v. de momentermethode het minst bevredigend.

Om bovenstaande redenen is gekozen om de parameters van de modellen via optimalisatie aan de hand van het kwadratenkriterium te bepalen.

Hiertoe zijn twee computerprogramma's geschreven die gebruik maken van een zgn. "directe zoekmethode":

één voor de optimalisatie van de parameters van tweeparametermodellen,
één voor de optimalisatie van de parameters van drieparametermodellen.

Deze programma's zijn geschreven voor interactief computergebruik. Dit heeft het voordeel dat vanaf de terminal het verloop van de optimalisatie kan worden gevolgd, zodat tijdens het optimaliseren de stapgrootten, waarmee parameterveranderingen worden aangebracht, kunnen worden aangepast.

De omstandigheid dat de modellen VII en VIII vier parameters hebben terwijl geen optimalisatieprogramma voor vierparametermodellen is geschreven was geen bezwaar zoals blijkt uit het navolgende.

Een belangrijke vraag is of bij het in model brengen van de neerslag-afvoerrelatie van dak + afvoerpijpen de translatie inderdaad, zoals in het voorgaande al is verondersteld, geheel werd veroorzaakt door de afvoerbuizen.

In dit geval kan bij alle modellen waar de translatie als apart deelmodel in zit deze translatie buiten de optimalisatie om op grond van het op pag. 7 vermelde experiment worden geschat op twee intervallen (= 1 minuut).

Om dit na te gaan zijn aan de hand van de testbui de parameters geoptimaliseerd van de modellen I en II. Bij deze twee modellen werd voor τ de waarde twee intervallen gevonden.

Van model VIII bezit ons laboratorium een elektrisch analogon, waarmee eveneens de parameters zijn geoptimaliseerd aan de hand van de testbui. Met dit analogon, wat als optimalisatiekriterium werkt met de R.M.S.-error werd gevonden $\tau = 54$ seconden.

Geconcludeerd kan worden dat deze drie uitkomsten (van een twee-, resp. drie-, resp. vierparametermodel) de hypothese, dat het translatie-effekt geheel kan worden toegeschreven aan de afvoerbuizen, ondersteunen.

Vanwege dit gevonden resultaat is voor de modellen I, III, IV, VI, VII en VIII bij parameteroptimalisatie de translatie τ steeds extern gesteld op $\tau = 2$ intervallen.

Voor een eerste selectie zijn de parameters van de acht modellen geoptimaliseerd m.b.v. de testbui, waarbij naar voren moest komen welke modellen in staat zijn het gemeten afvoerverloop te volgen. Het resultaat is gegeven in figuur 8 t/m 15.

Afgezien van het aanloopverschijnsel blijken de modellen I t/m VII het afvoerverloop goed te kunnen weergeven. Model VIII had een waarde voor het kwadratenkriterium dat duidelijk veel hoger lag dan van model I t/m VII, zodat model VIII verder buiten beschouwing wordt gelaten.

Opmerkelijk is het uitstekende resultaat van de modellen die gebaseerd zijn op de "convective diffusion" vergelijking (vergelijking (4.12)), nl. model II, III, V en VI.

Interessant is het om te zien dat de parameter G in het algemene model V van Van de Nes praktisch nul is, wat betekent dat bijna het speciale geval van de "tributary inflow" is verkregen.

Zoals reeds eerder vermeld, is te verwachten dat model II van Dooge en Harley in geval de parameter G in model V erg klein is, ongeveer dezelfde resultaten zal geven als dit model. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn.

Om de verschillen in de gevonden kwadratenkriteria aan iets te kunnen refereren wordt hier een idee van professor Dooge gevolgd, om gebruik te maken van het zgn. "nulmodel".

Een nulmodel doet niets, d.w.z. een signaal dat dit model in gaat komt er onveranderd uit.

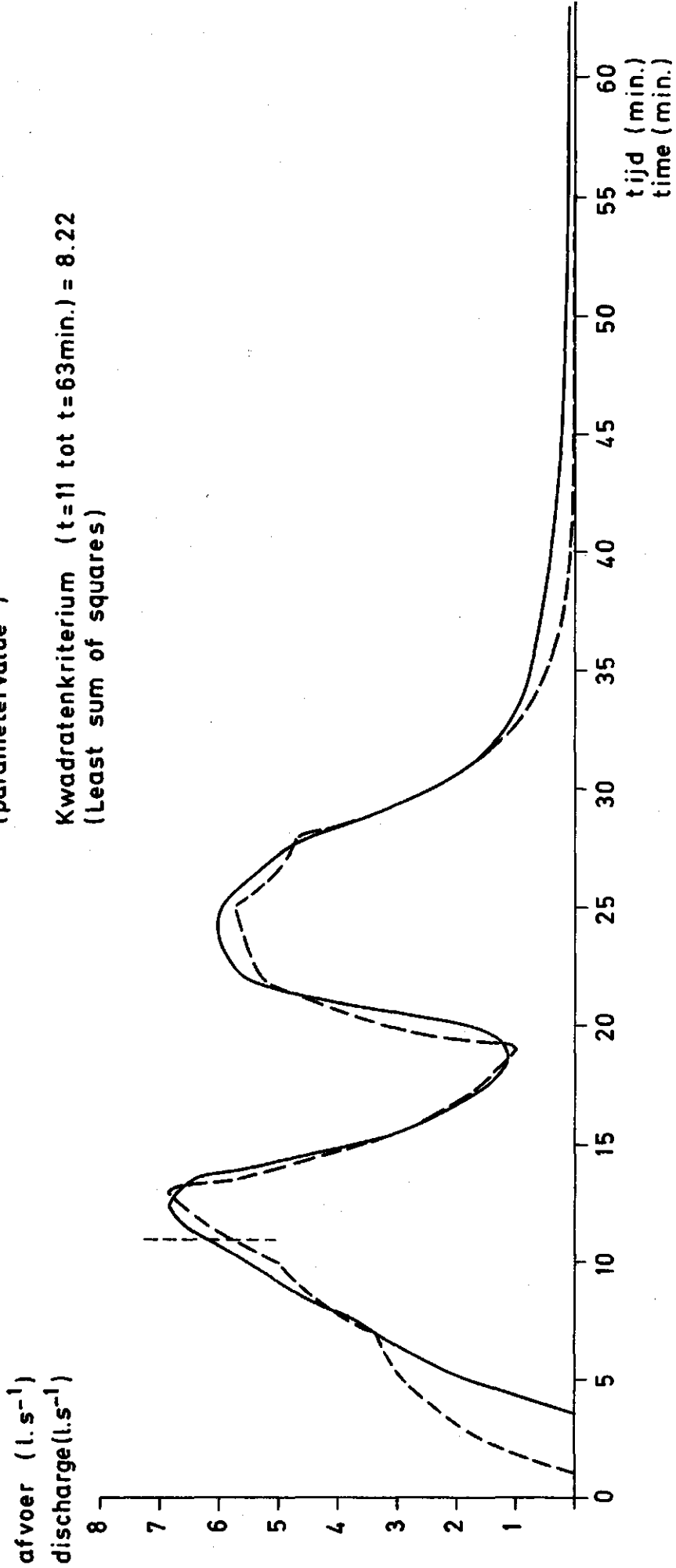
FIGUUR 8
(FIGURE 8)

MODEL I

- gemeten (measured)
- - - - - simulatie (simulation)

parameterwaarde : $k = 6.23 \Delta t$
(parametervalue)

Kwadratekriterium ($t=11$ tot $t=63$ min.) = 8.22
(Least sum of squares)



FIGUUR 9
(FIGURE 9)

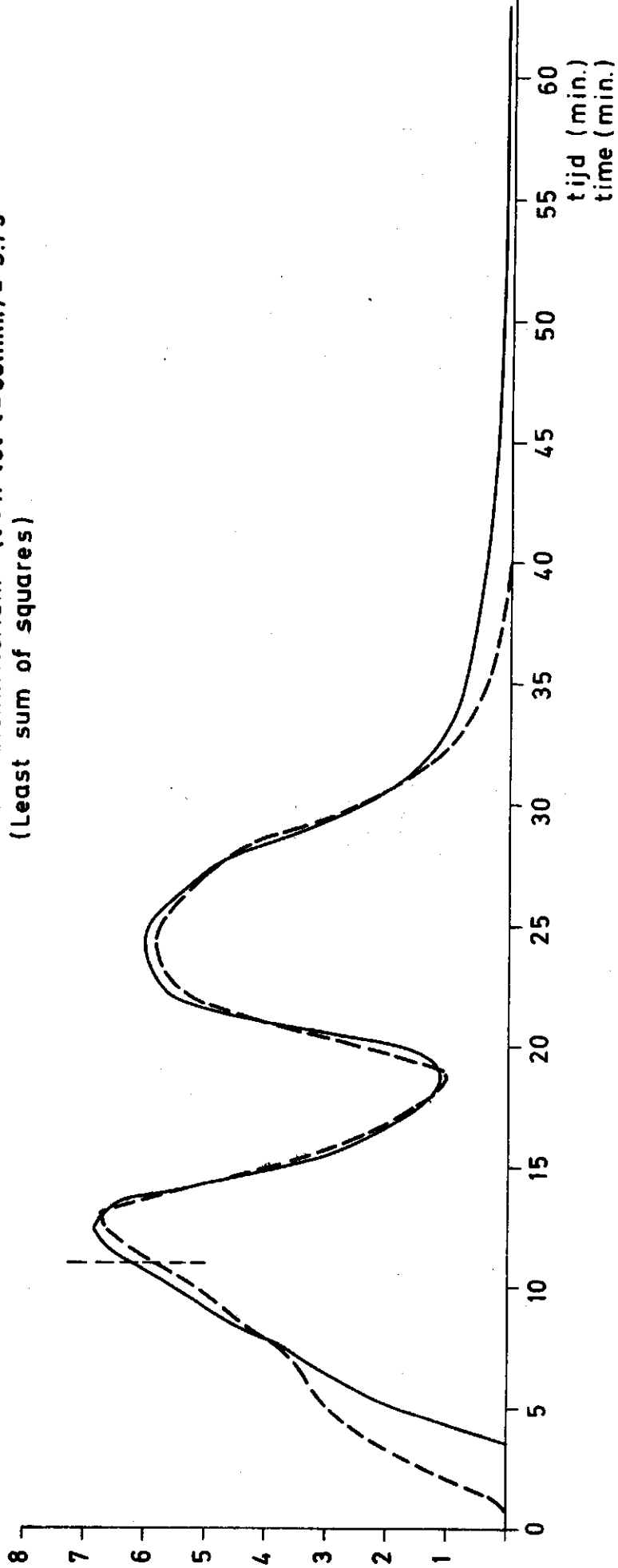
MODEL II

— gemeten (measured)
- - - - simulatie (simulation)

parameterwaarden $E = 2.87 \Delta t^{1/2}$
(parameter values) $F = 0.36 \Delta t^{1/2}$

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 63 \text{ min.}$) = 5.75
(Least sum of squares)

afvoer (l.s^{-1})
discharge (l.s^{-1})



FIGUUR 10
(FIGURE 10)

MODEL III

— gemeten (measured)

- - - simulatie (simulation)

$$E = 1.69 \Delta t^{1/2}$$

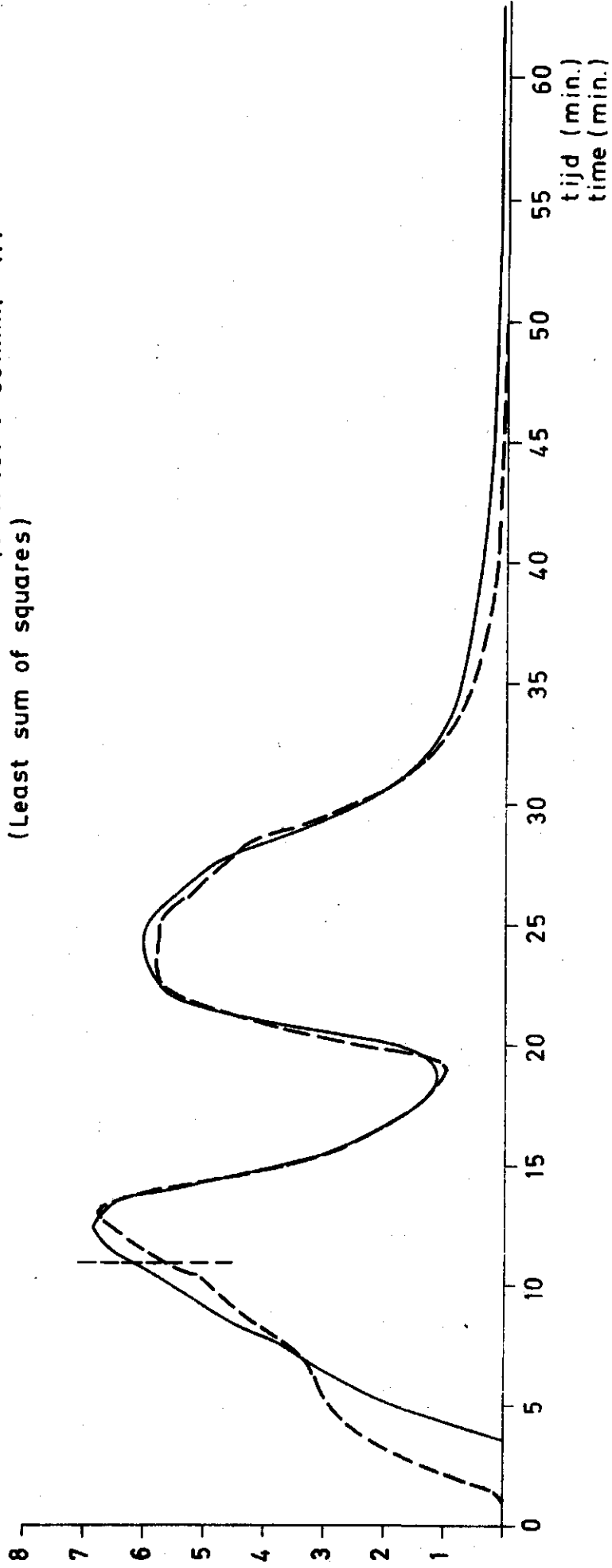
$$F = 0.237 \Delta t^{-1/2}$$

parameterwaarden

(parameter values)

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 4.4
(Least sum of squares)

afvoer ($l.s^{-1}$)
discharge ($l.s^{-1}$)



FIGUUR 11
(FIGURE 11)

MODEL IV

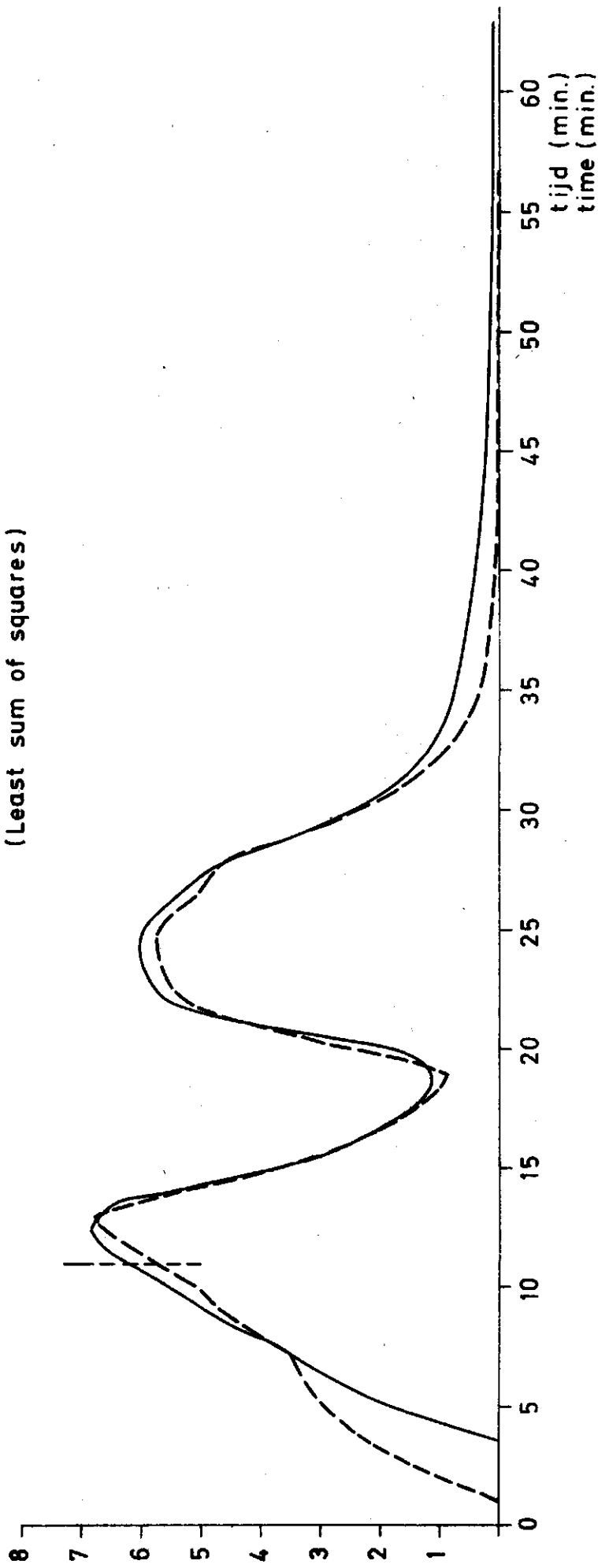
— gemeten (measured)

- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden $\begin{cases} j = 5.11 \Delta t \\ k = 1.59 \Delta t \end{cases}$
(parameter values)

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 7.43
(Least sum of squares)

afvoer ($l.s^{-1}$)
discharge ($l.s^{-1}$)



FIGUUR 12
(FIGURE 12)

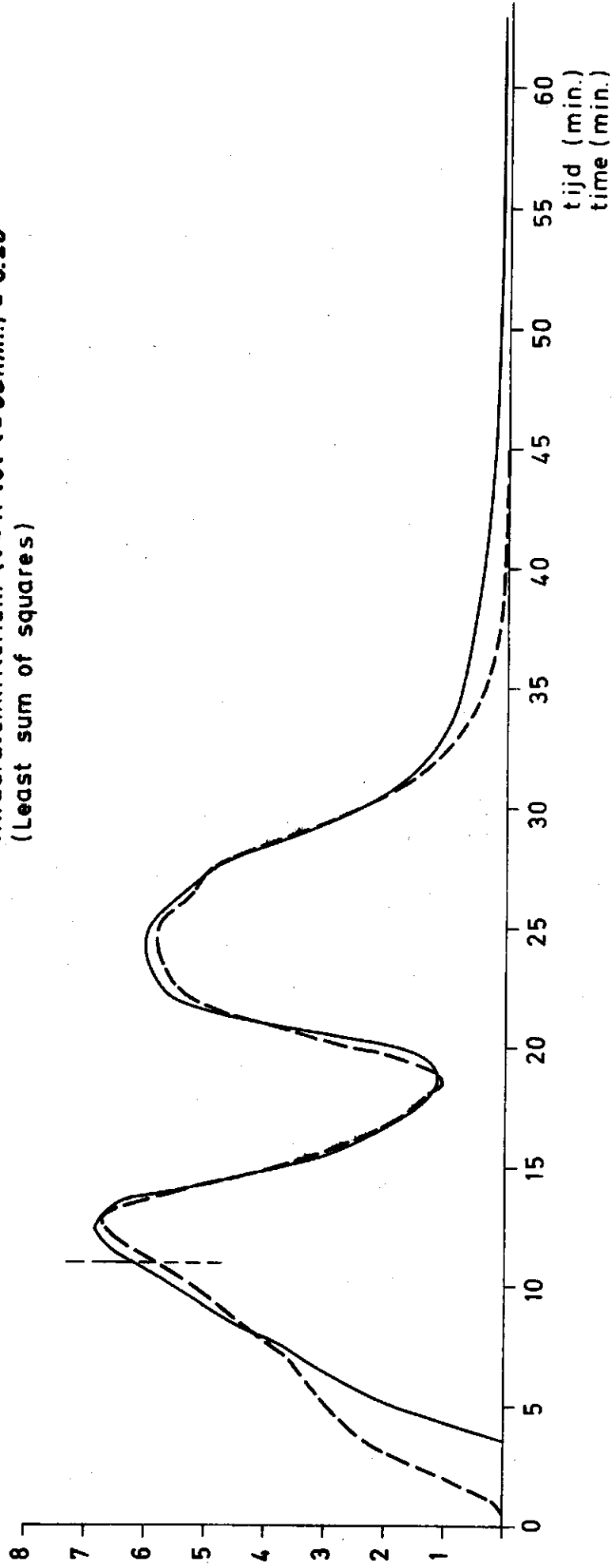
MODEL V

— gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden : $\begin{matrix} G = 0.0008 \\ H = 2.14 \\ I = 3.02 \end{matrix} \Delta t$
(parameter values)

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 6.26
(Least sum of squares)

afvoer ($l \cdot s^{-1}$)
discharge ($l \cdot s^{-1}$)



FIGUUR 13
(FIGURE 13)

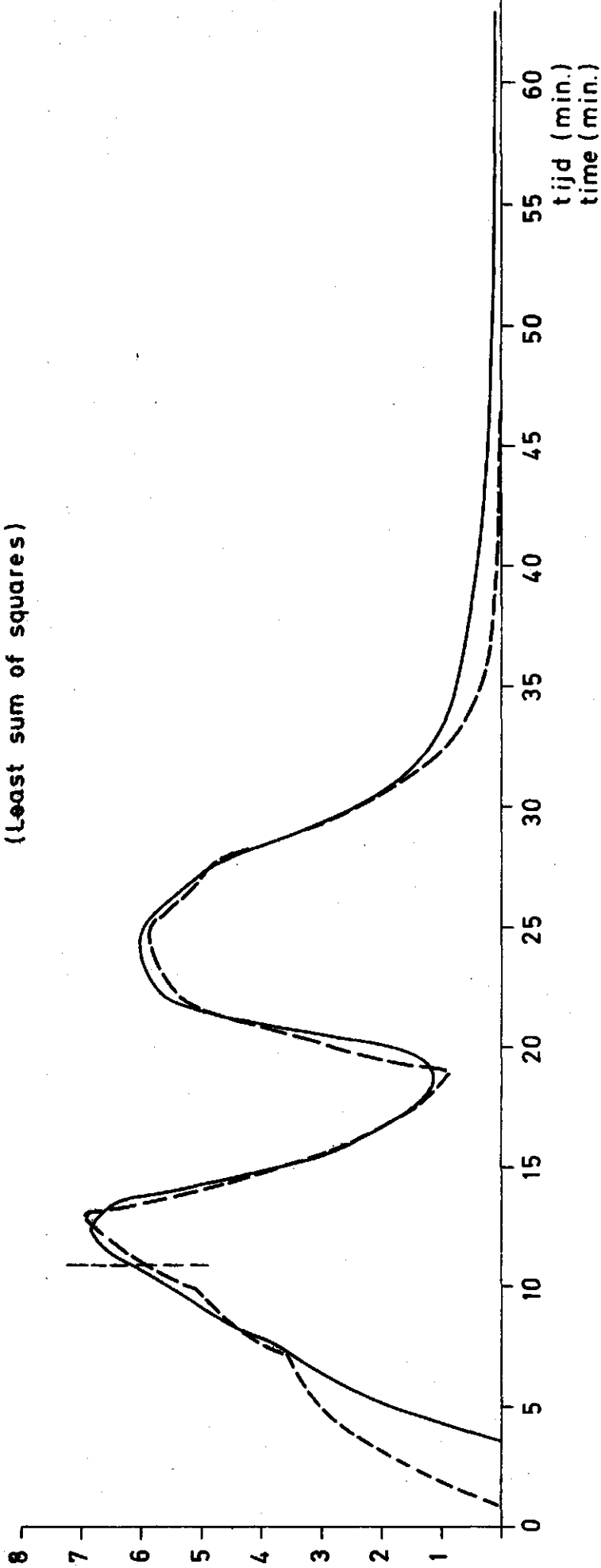
MODEL VI

- gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden $\begin{matrix} H = 3.04 \\ I = 2.92 \Delta t \end{matrix}$
(parameter values)

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 7.10
(Least sum of squares)

afvoer ($l.s^{-1}$)
discharge ($l.s^{-1}$)



FIGUUR 14
(FIGURE 14)

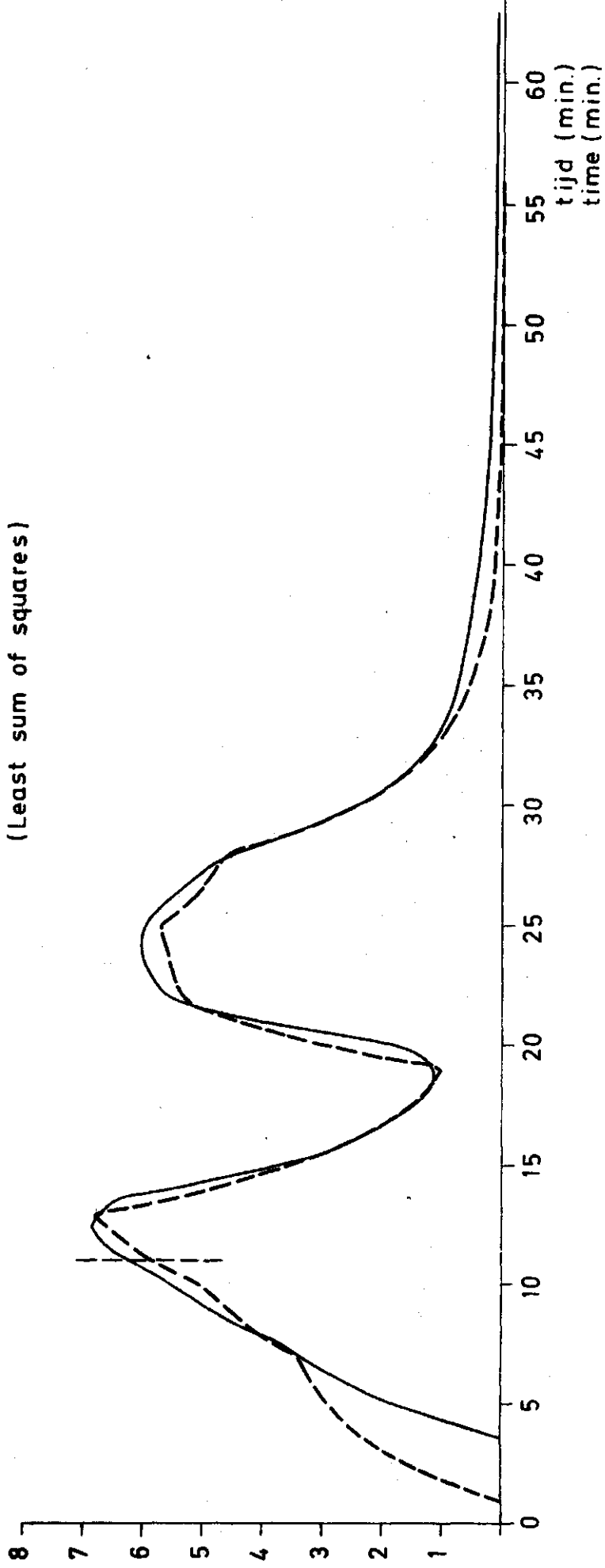
MODEL VII

— gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden
(parameter values) $\left\{ \begin{array}{l} \beta = 0.97 \\ k_1 = 6.09 \Delta t \\ k_2 = 20.0 \Delta t \end{array} \right.$

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 8.17
(Least sum of squares)

afvoer ($l.s^{-1}$)
discharge ($l.s^{-1}$)



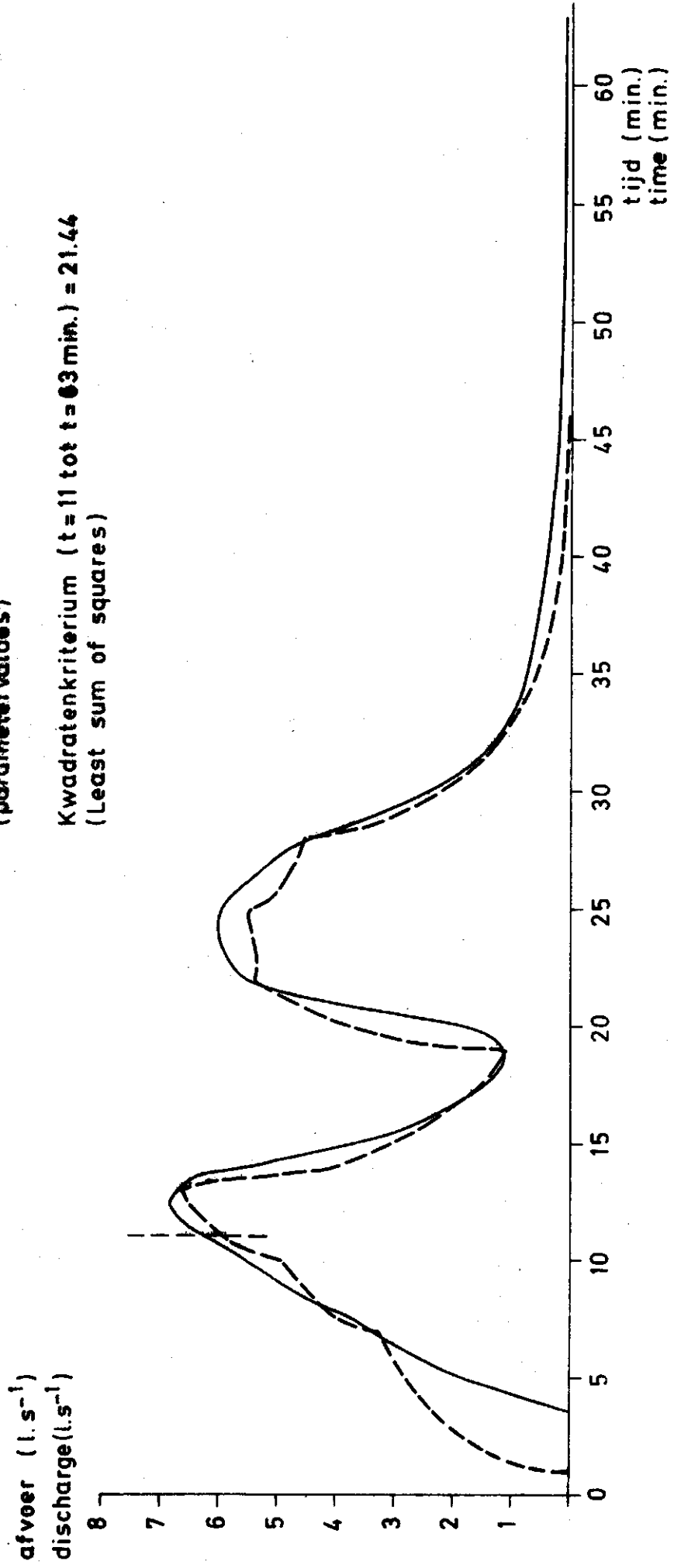
FIGUUR 10
(FIGURE 10.)

MODEL

- gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden $\left\{ \begin{array}{l} \beta = 1.00 \\ \eta = 7.5 \end{array} \right.$
(parameter values)

Kwadratekriterium ($t=11$ tot $t=63$ min.) = 21.44
(Least sum of squares)



De som van de kwadraten van de afwijkingen tussen het afvoerverloop en het beregeningshistogram van de testbui bedraagt voor het traject $t = 11 \text{ min} - t = 63 \text{ min}$: 377.8 (ook hier zijn waarden om de dertig seconden genomen).

In onderstaande tabel worden de waarden van het kwadratenkriterium, bij het fitten aan het afvoerverloop van de testbui, voor de acht modellen gegeven. Daar het interessant is om te zien welk aandeel de translatie van de afvoerbuizen heeft in de neerslag-afvoer transformatie van het gehele systeem (dak + afvoerbuizen) is ook het kwadratenkriterium berekend voor het model $\tau = 1 \text{ min}$.

<u>Model</u>	<u>Aantal parameters</u>	<u>Kwadratenkriterium vanaf $t = 11 \text{ min}$.</u>
nulmodel	0	377.8
$\tau = 1 \text{ min}$	1	165.6
I	2	8.2
II	2	5.8
III	3	4.4
IV	3	7.4
V	3	6.3
VI	3	7.1
VII	4	8.2
VIII	4	21.4

Uit de tabel valt af te lezen dat het model: $\tau = \text{één minuut}$ al een reductie van het kwadratenkriterium geeft tot iets minder dan de helft van dat van het nulmodel. Bij het optimaliseren van de parameters van een model is een inzicht in het verloop van de waarde van het kwadratenkriterium in de ruimte die wordt opgespannen door de parameters wenselijk. Het is immers mogelijk dat verschillende minima van het kwadratenkriterium voorkomen. Bovendien moet men er rekening mee houden dat, indien zich een smalle zône in de parameter ruimte voordoet met lage waarden voor het kwadratenkriterium, een kleine stapgrootte van parameterverandering noodzakelijk is tijdens het optimaliseren om binnen de langgerekte zône naar het minimum te kunnen "kruipen".

Een derde punt van belang is dat indien in de parameter ruimte een langgerekte zône met lage waarden van het kwadratenkriterium voorkomt, parametercombinaties die numeriek erg verschillend zijn toch vrijwel gelijkwaardige afvoersimulaties kunnen produceren.

Alleen voor een tweeparametermodel kan het verloop van het kwadratenkriterium in de parameter ruimte duidelijk in één tekening worden weergegeven.

Van model III is een doorsnede van de parameterruimte gemaakt voor $\tau = 1$ minuut (zie figuur 16) evenals voor model IV (zie figuur 17 en 18) en model VI (zie figuur 19). Voor model IV worden twee extrema gevonden voor het kwadratenkriterium. Voor model VI wordt weliswaar slechts één extremum gevonden, maar de hoogtelijnen van het kwadratenkriterium laten zien dat de bepaling van dit extremum een moeizame onderneming is. Van de twee parameterkombinaties die de twee extrema leveren bij model IV bleken de pulsresponsies nagenoeg identiek te zijn. Voor model VII (zie figuur 20) zijn twee doorsneden van de parameterruimte gemaakt. Indien men zich beperkt tot $\tau = 1$ minuut kan deze doorsnede door de parameterruimte driedimensionaal worden voorgesteld. Hierover kan men opmerken dat, indien zich in deze deelruimte een minimum bevindt van het kwadratenkriterium met coördinaten

$$\begin{aligned}\beta &= a \\ k_1 &= b \\ k_2 &= c, \text{ dat dan een tweede minimum kan worden gevonden met para-} \\ \text{meters}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\beta &= 1 - a \\ k_1 &= c \\ k_2 &= b\end{aligned}$$

Voor model VII is voor 400 parameterkombinaties de waarde van het kwadratenkriterium berekend. De restricties voor de parameters zijn:

$$\begin{aligned}0.0 &\leq \beta \leq 1.0 \\ k_1 &> 0 \\ k_2 &> 0\end{aligned}$$

Het bleek dat de zone met lage waarden voor het kwadratenkriterium zich bevond om de lijnen

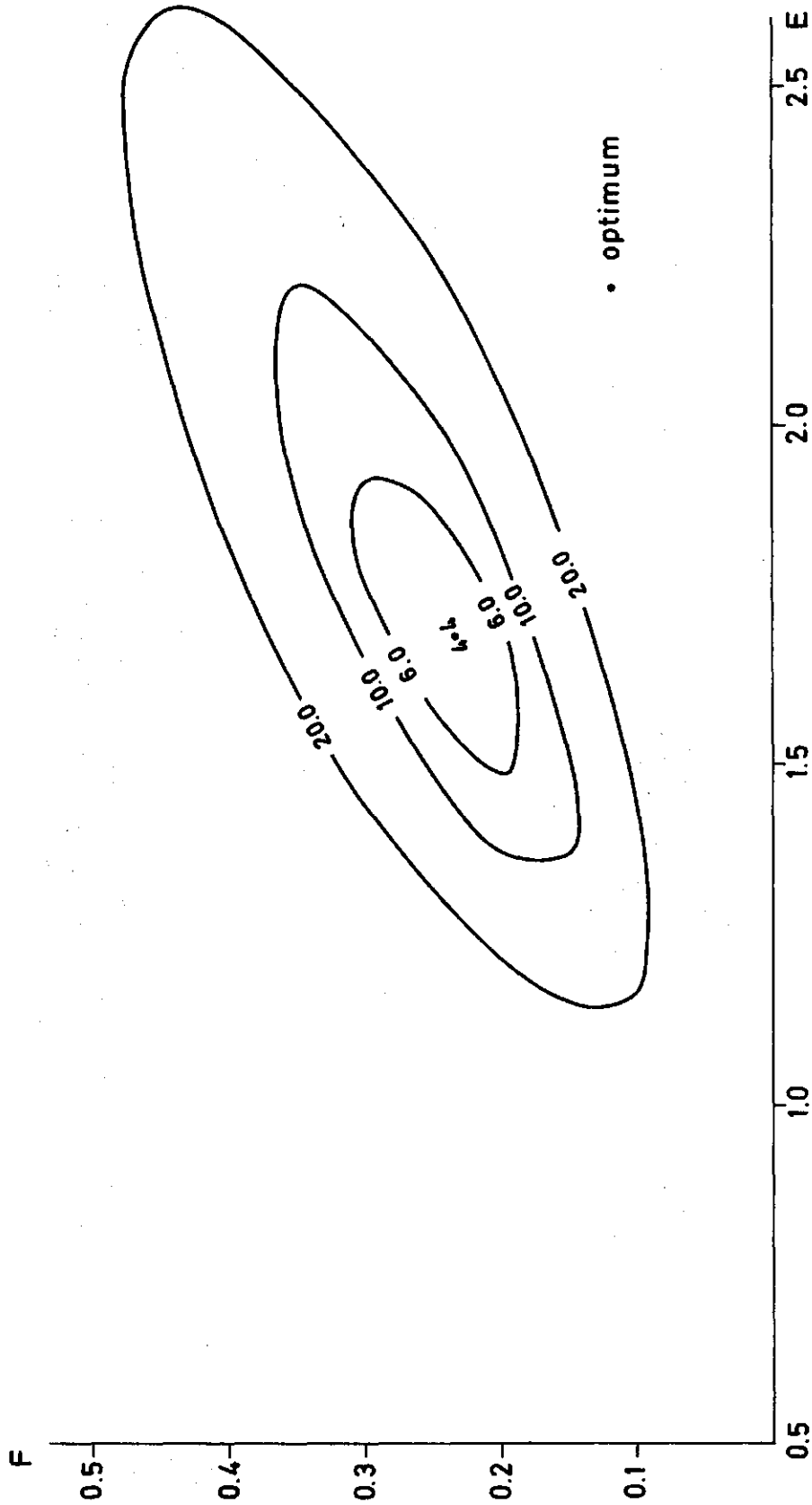
$$\begin{aligned}\beta &= 1.0, & k_1 &= 6.0 & \text{ met } k_2 &> 0 \\ \beta &= 0.0, & k_2 &= 6.0 & \text{ met } k_1 &> 0 \\ 0.0 &< \beta < 1.0, & k_1 &= 6.0 & k_2 &= 6.0\end{aligned}$$

Bovenstaande lijnen zijn onderling loodrecht. Het gebied met lage waarden voor het kwadratenkriterium heeft hier een grillige vorm en laat zich niet binnen bepaalde parameterwaarden inperken. Bij het afscannen van de parameterruimte werd geen aanwijzing gevonden dat er meerdere minima (die niet tot het genoemde geval behoren) zouden zijn.

FIGUUR 16
(FIGURE 16)

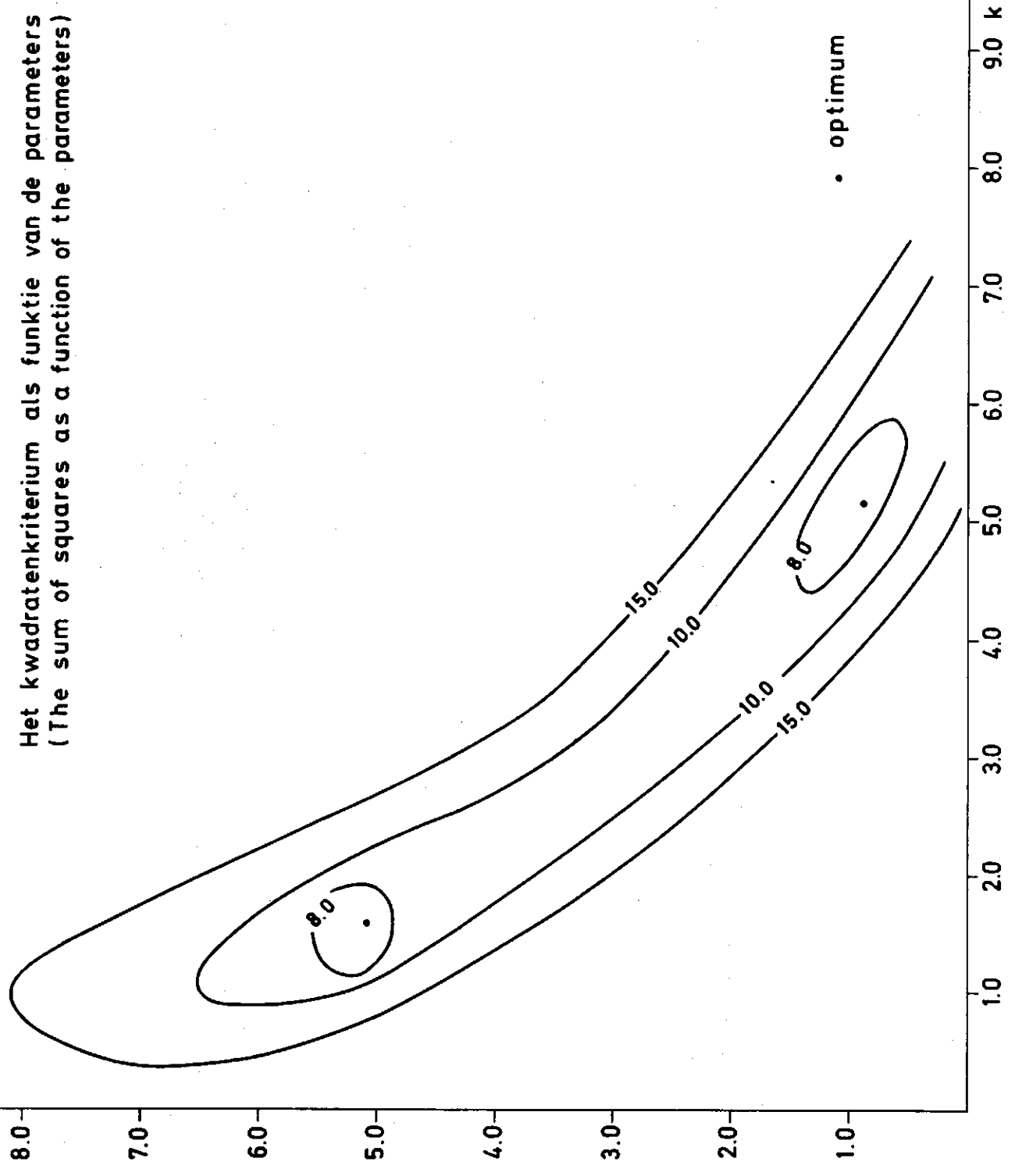
MODEL III

Het kwadratenkriterium als funktie van de parameters
(The sum of squares as a function of the parameters)



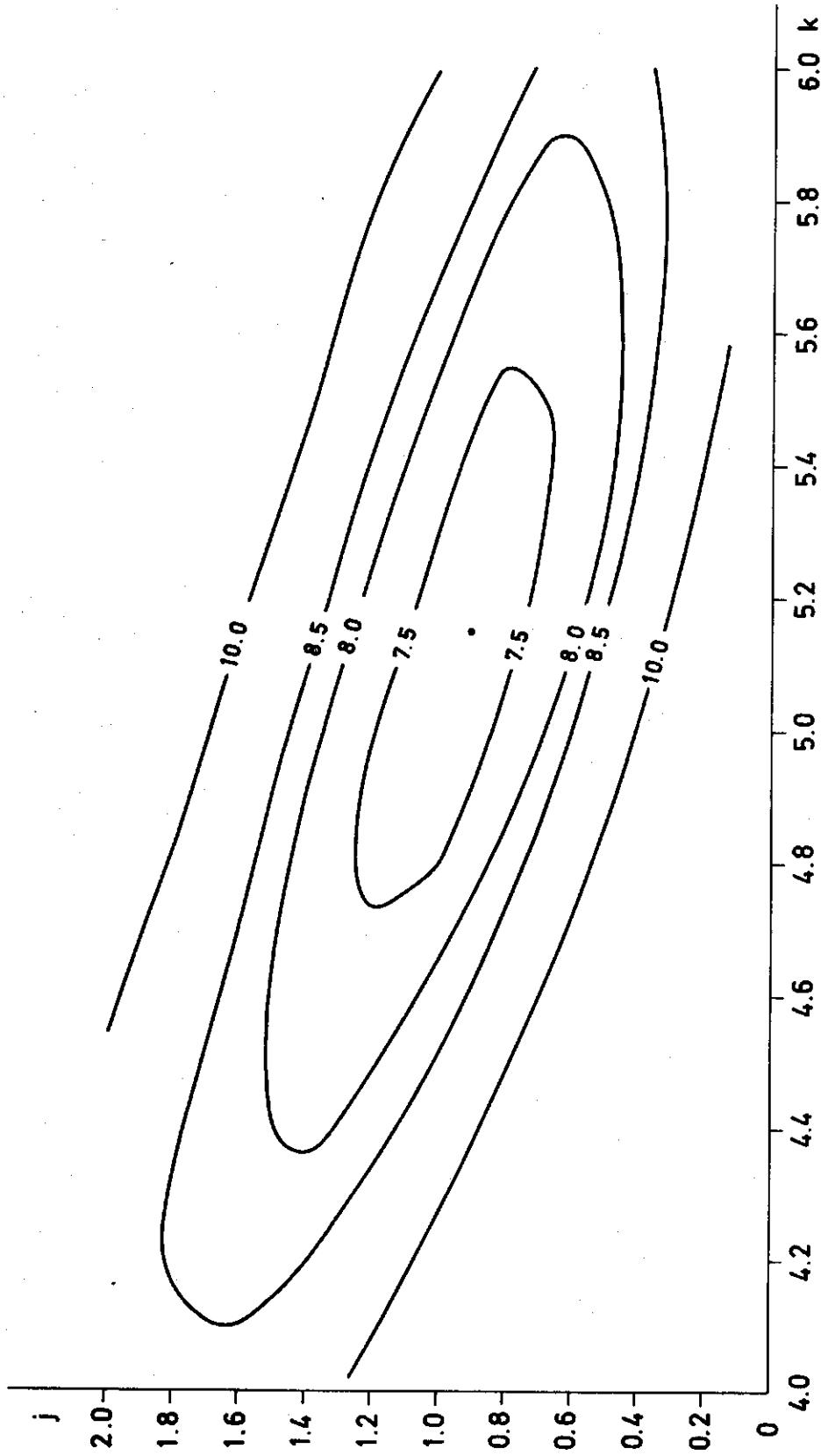
(FIGURE 17)

Het kwadratenkriterium als functie van de parameters
(The sum of squares as a function of the parameters)

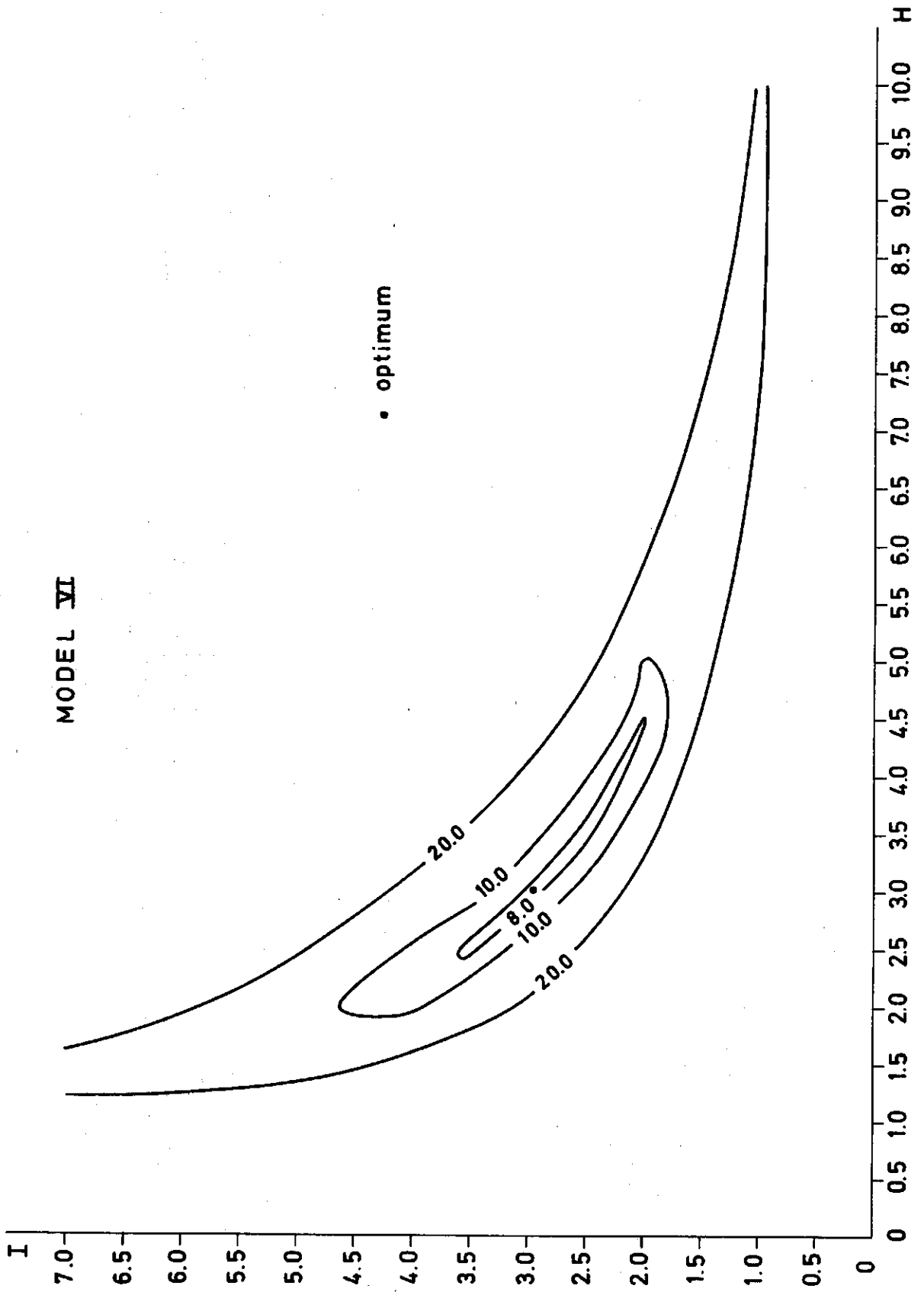


FIGUUR 18
(FIGURE 18)

Detail van figuur 17
(Detail of figure 17)



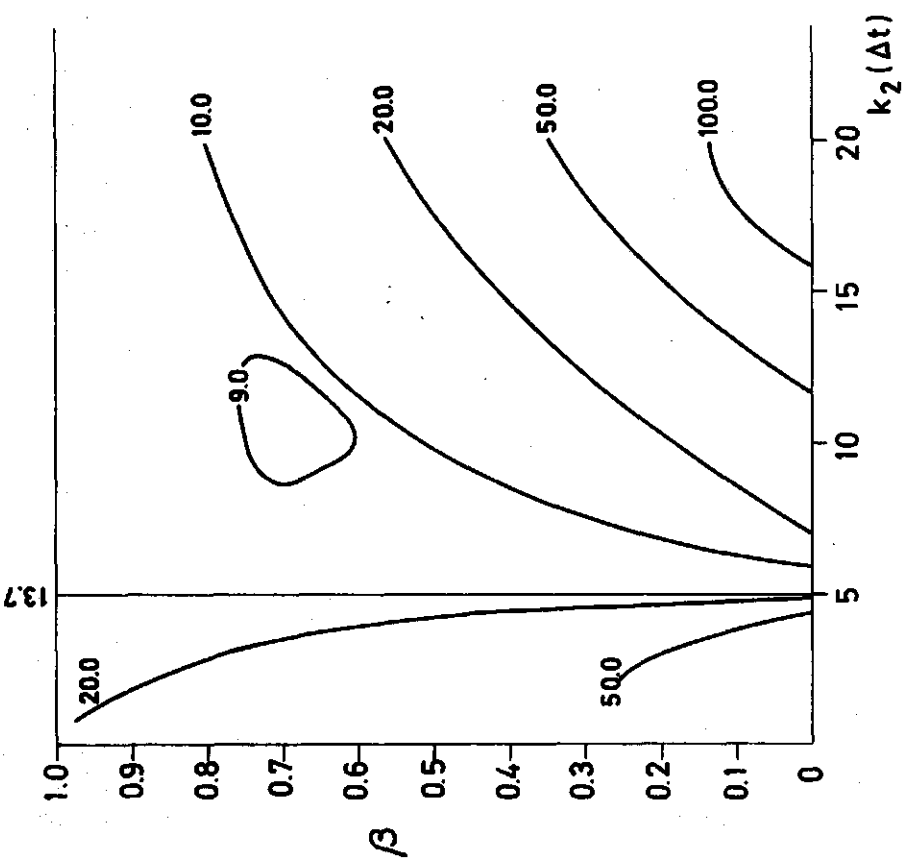
FIGUUR 19 Het kwadratenkriterium als functie van de parameters
(FIGURE 19) (The sum of squares as a function of the parameters)



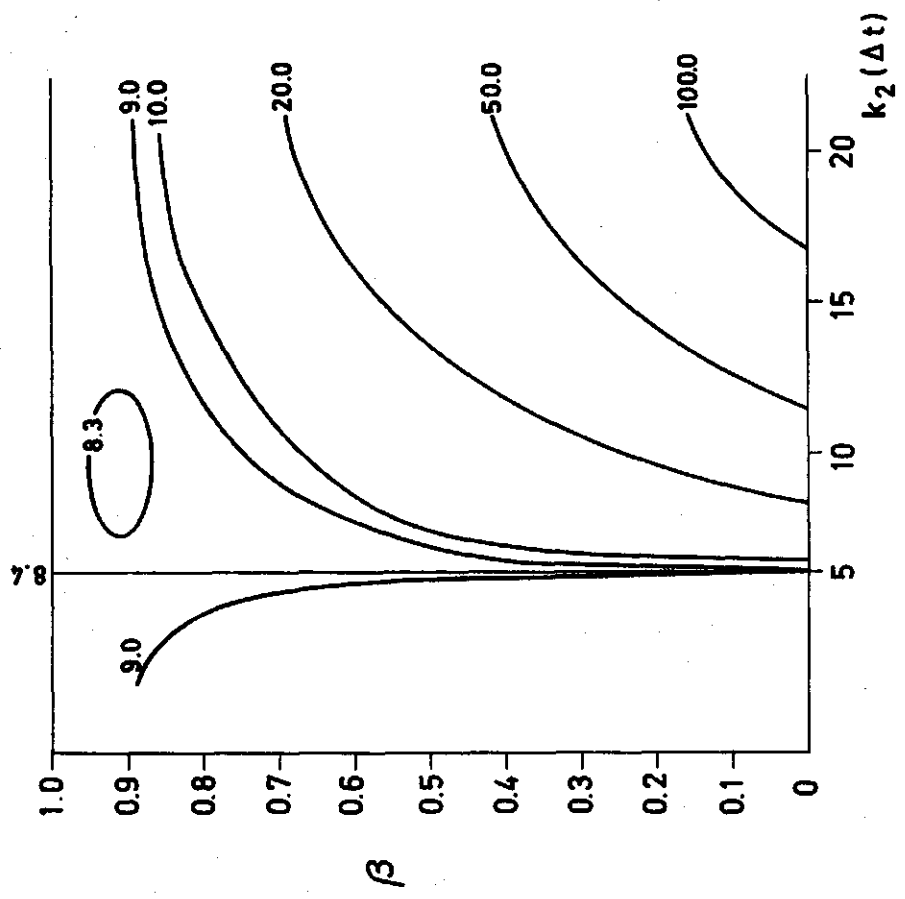
FIGUUR 20
(FIGURE 20)

Het kwadratenkriterium als functie van β en k_2
(The sum of squares as a function of β and k_2)

MODEL VII



$k_1 = 5 \Delta t$
 $\tau = 2 \Delta t$



$k_1 = 6 \Delta t$
 $\tau = 2 \Delta t$

In het voorafgaande zijn de parameters van de verschillende modellen geoptimaliseerd aan de hand van de testbui en de met de modellen gesimuleerde afvoerverlopen vergeleken met het gemeten afvoerverloop.

Voor een verdere vergelijking van de modellen zijn de parameters van de verschillende modellen vervolgens geoptimaliseerd aan de hand van beregeningsproef b 4. Er is, om geen last te hebben van het "aanloopverschijnsel", geoptimaliseerd vanaf $t = 11$ minuten. Met de aldus verkregen parameterkombinaties is het afvoerverloop van de testbui gesimuleerd. De resultaten zijn gegeven in de figuren 21 t/m 33. Voor model I is de parameterwaarde van de recessiecurve genomen.

In onderstaande tabel zijn de resultaten van de simulatie weergegeven. In deze tabel zijn tevens de al eerder gegeven resultaten van die simulatie, waarbij de parameters geoptimaliseerd waren aan de hand van de testbui zelf, gegeven ter vergelijking.

<u>Model</u>	<u>Aantal parameters</u>	<u>K.K. vanaf $t = 11$min. parameters afkomstig van testbui</u>	<u>K.K. vanaf $t = 11$min. parameters afkomstig van b 4</u>
nulmodel	0		377.8
$\tau = 1$ min	1		165.6
I	2	8.2	12.9 ^{*)}
II	2	5.8	17.7
III	3	4.4	11.7
IV	3	7.4	17.6
V	3	6.3	20.7
VI	3	7.1	18.0
VII	4	8.2	13.1
VIII	4	21.4	-

*) Parameter van de recessiecurve

Uit de tabel blijkt dat het diffusiemodel met de upstream inflow, model III, het beste resultaat geeft. Dit betekent dat model V (het algemene model van Van de Nes) met een translatie erachter als vierparametermodel eveneens een zeer goed resultaat zou geven wat van belang is voor verder onderzoek, gezien de grotere mogelijkheden van dit model.

In de appendix 8.2 worden de pulsresponsies gegeven van de modellen I t/m VIII zoals bepaald aan de hand van de testbui.

FIGUUR 21
(FIGURE 21)

Afvoersimulatie van de testbui
(Simulation discharge teststorm)

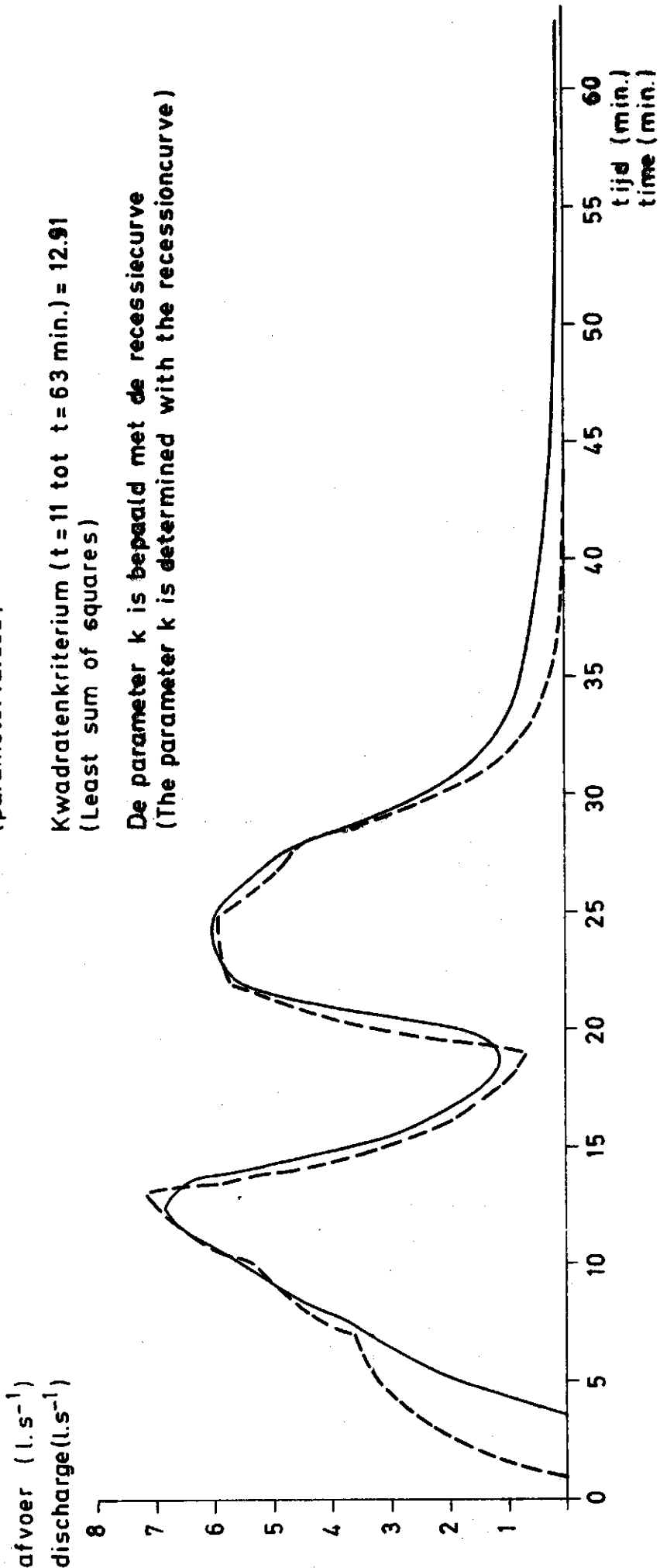
MODEL I

- gemeten (measured)
- - - - simulatie (simulation)

parameterwaarden : $k = 5.08 \Delta t$
(parameter values)

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 12.91
(Least sum of squares)

De parameter k is bepaald met de recessiecurve
(The parameter k is determined with the recessioncurve)



FIGUUR 22
(FIGURE 22)

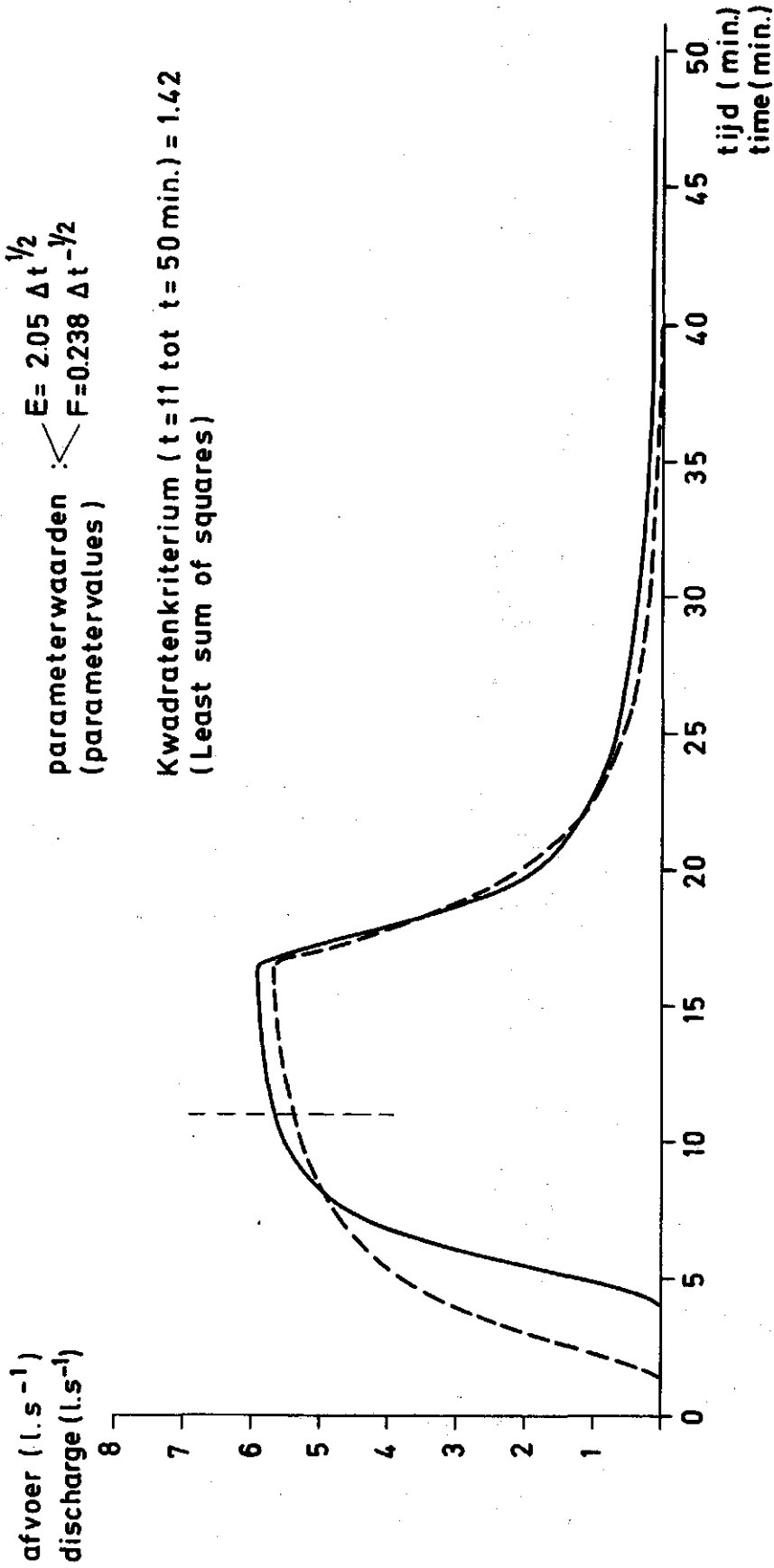
MODEL II

Afvoersimulatie van bui b4
(Simulation discharge experiment b4)

— gemeten (measured)
- - - gesimuleerd (simulated)

parameterwaarden : $E = 2.05 \Delta t^{1/2}$
(parameter values) $F = 0.238 \Delta t^{-1/2}$

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 50$ min.) = 1.42
(Least sum of squares)



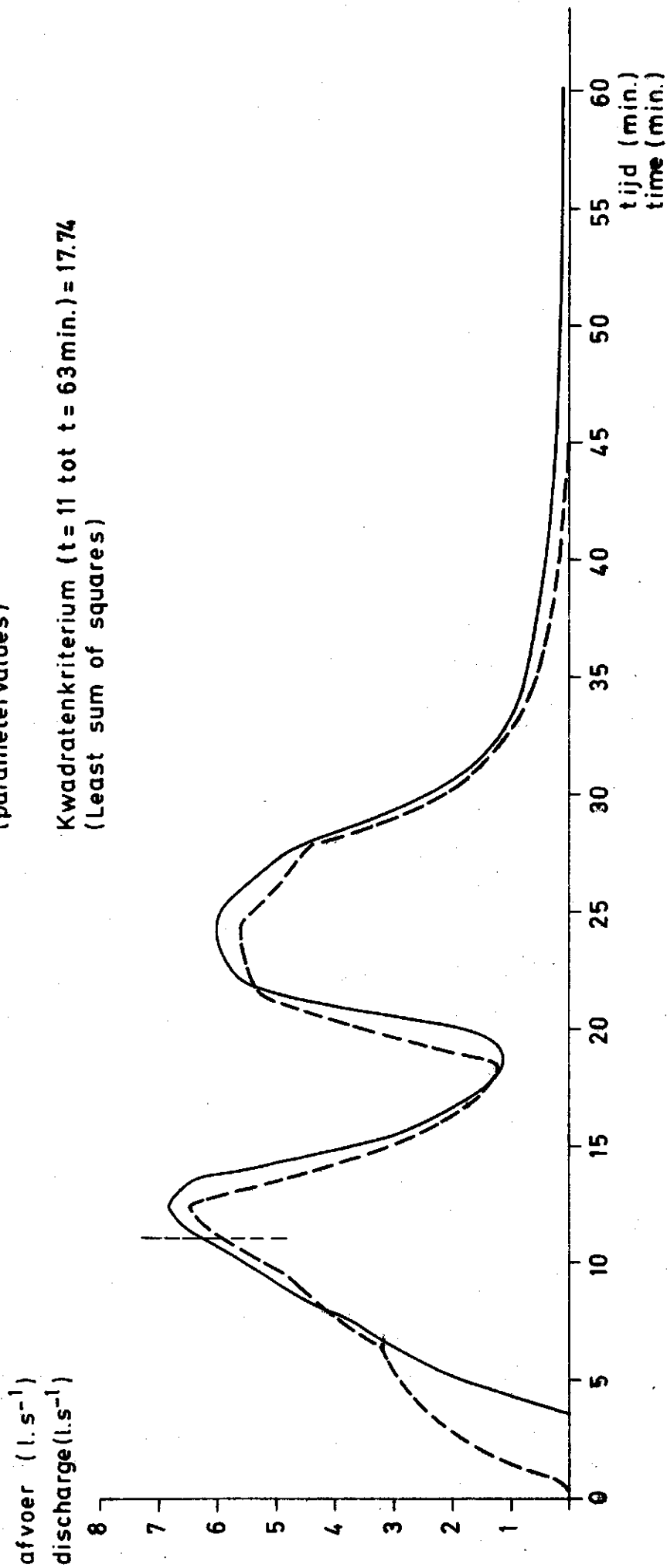
FIGUUR 23
(FIGURE 23)

MODEL II

— gemeten (measured)
- - - - - simulatie (simulation)

parameterwaarden $\begin{cases} E = 2.05 \Delta t^{1/2} \\ F = 0.238 \Delta t^{-1/2} \end{cases}$
(parameter values)

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 17.74
(Least sum of squares)



FIGUUR 24
(FIGURE 24)

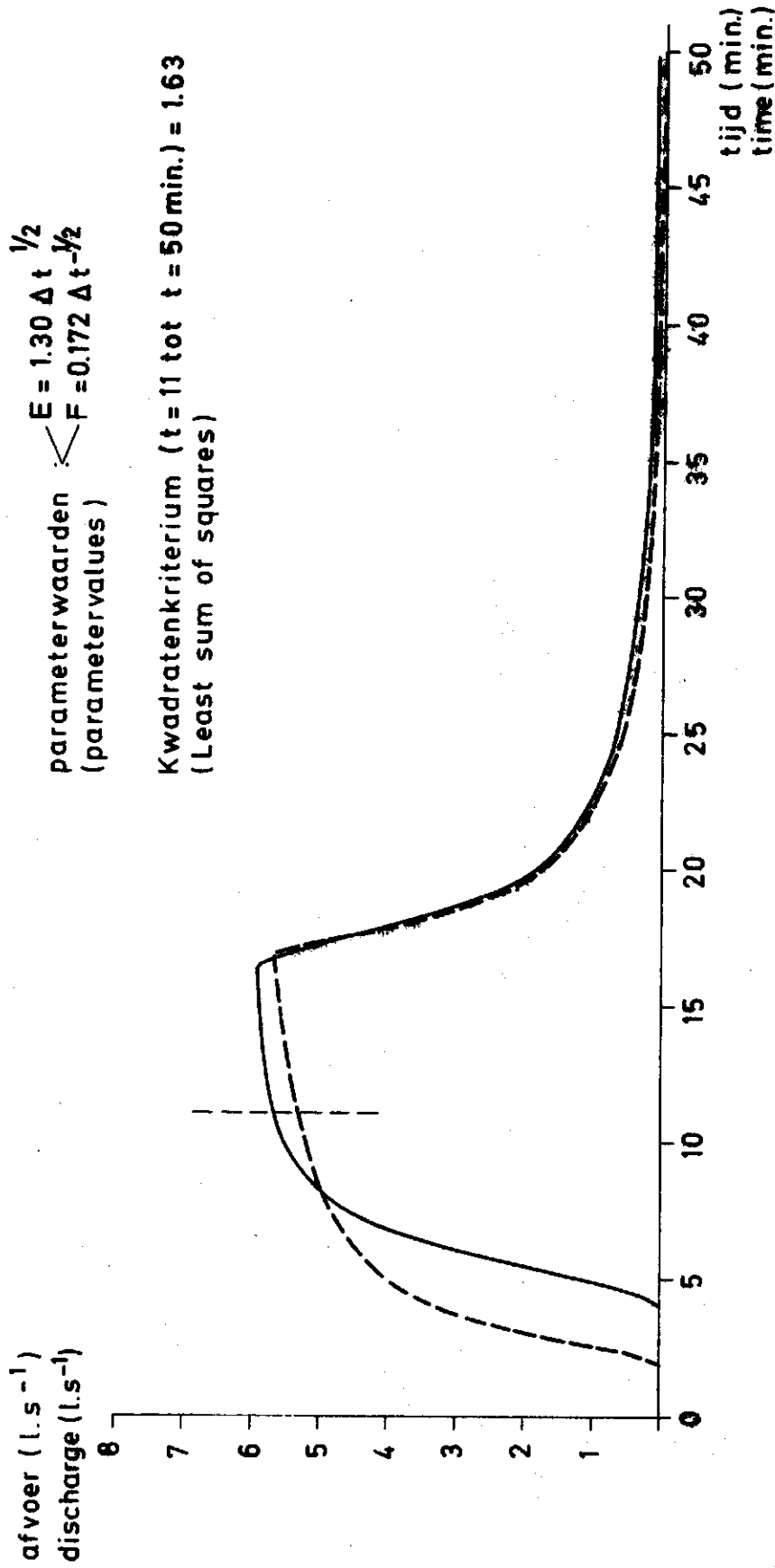
MODEL III

Afvoersimulatie van bui b4
(Simulation discharge experiment b4)

— gemeten (measured)
- - - gesimuleerd (simulated)

parameterwaarden $\begin{cases} E = 1.30 \Delta t^{1/2} \\ F = 0.172 \Delta t^{-1/2} \end{cases}$
(parameter values)

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 50$ min.) = 1.63
(Least sum of squares)

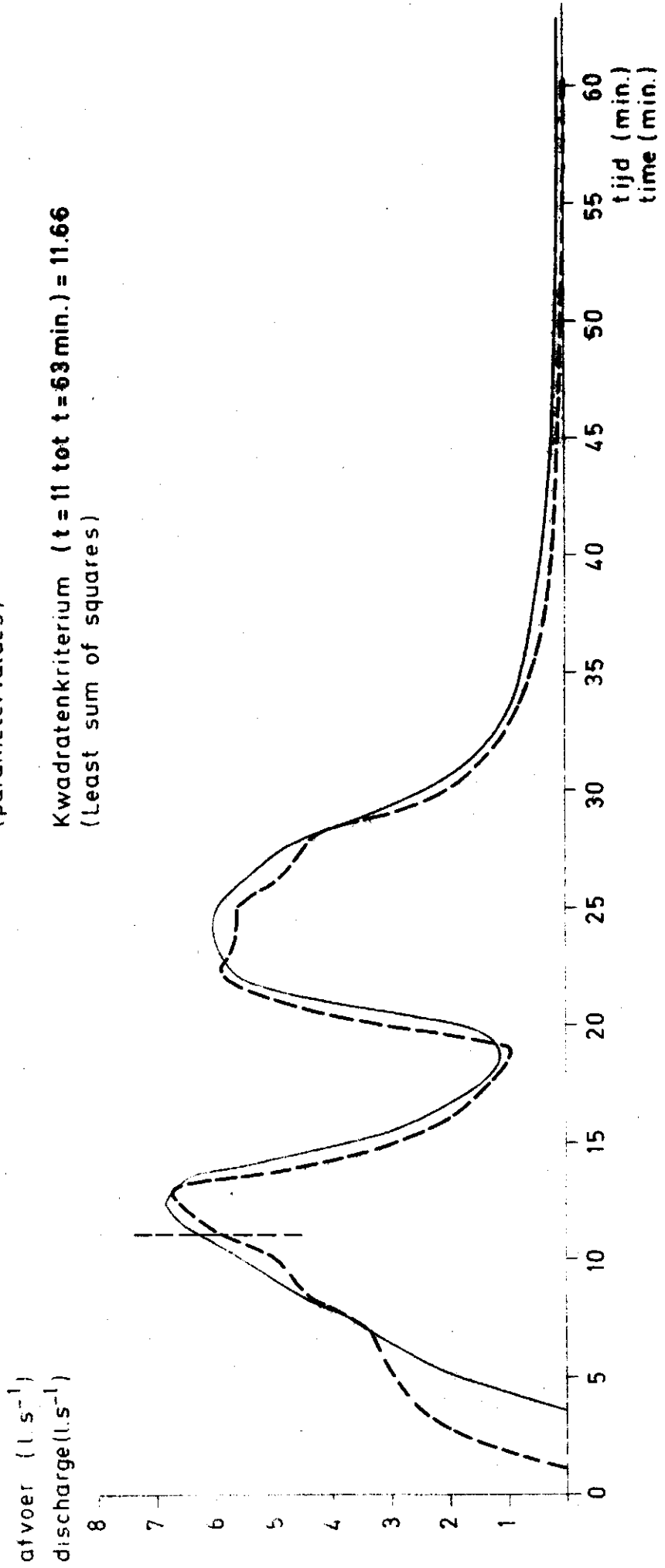


FIGUUR 25
(FIGURE 25)

MODEL III

— gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)
parameterwaarden $\left\langle \begin{array}{l} E = 1.30 \Delta t^{1/2} \\ F = 0.172 \Delta t^{-1/2} \end{array} \right.$
(parameter values)

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 11.66
(Least sum of squares)



FIGUUR 26
(FIGURE 26)

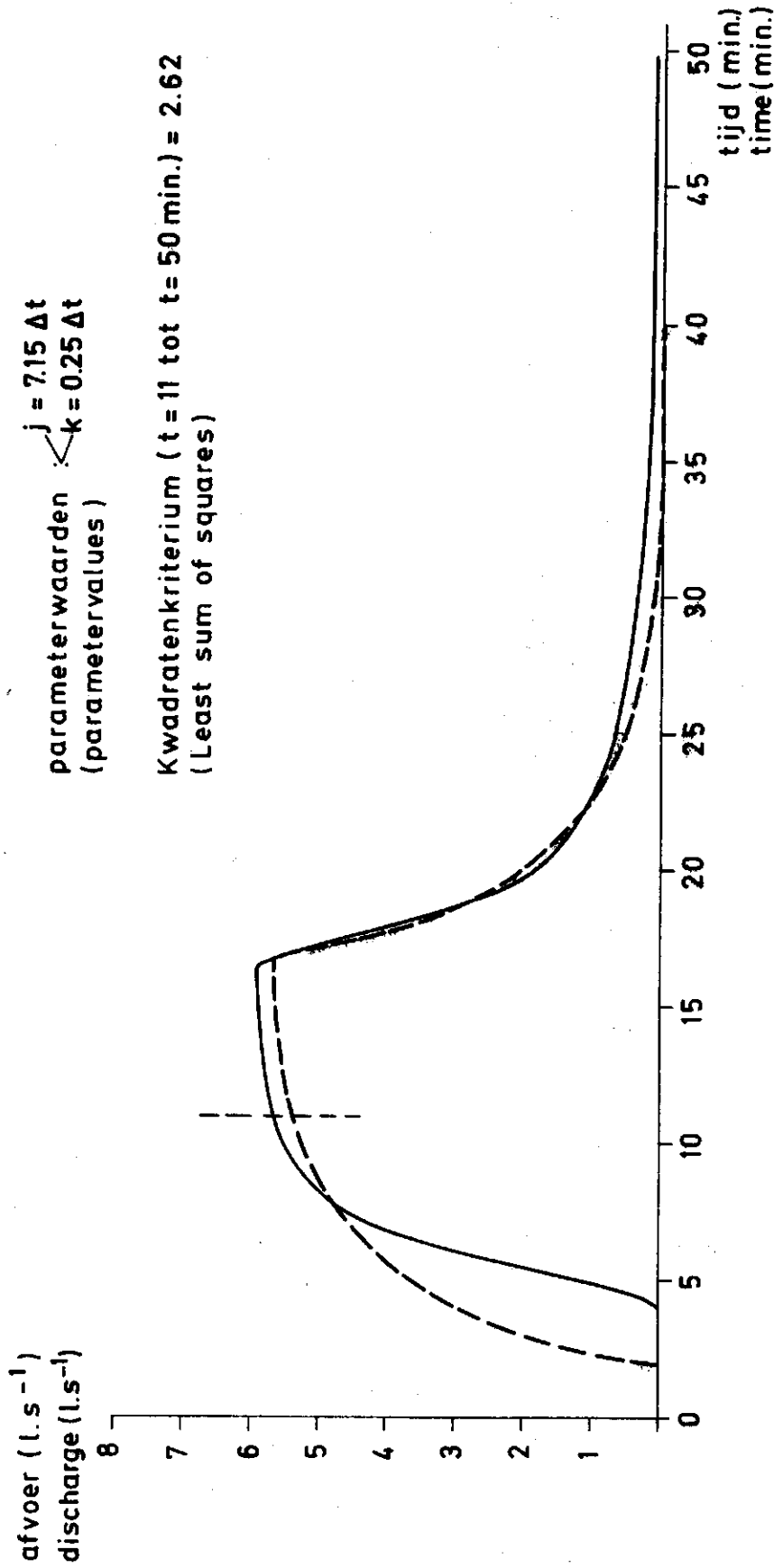
MODEL IV

Afvoersimulatie van bui b4
(Simulation discharge experiment b4)

— gemeten (measured)
- - - gesimuleerd (simulated)

parameterwaarden $\begin{cases} j = 7.15 \Delta t \\ k = 0.25 \Delta t \end{cases}$
(parameter values)

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 50$ min.) = 2.62
(Least sum of squares)



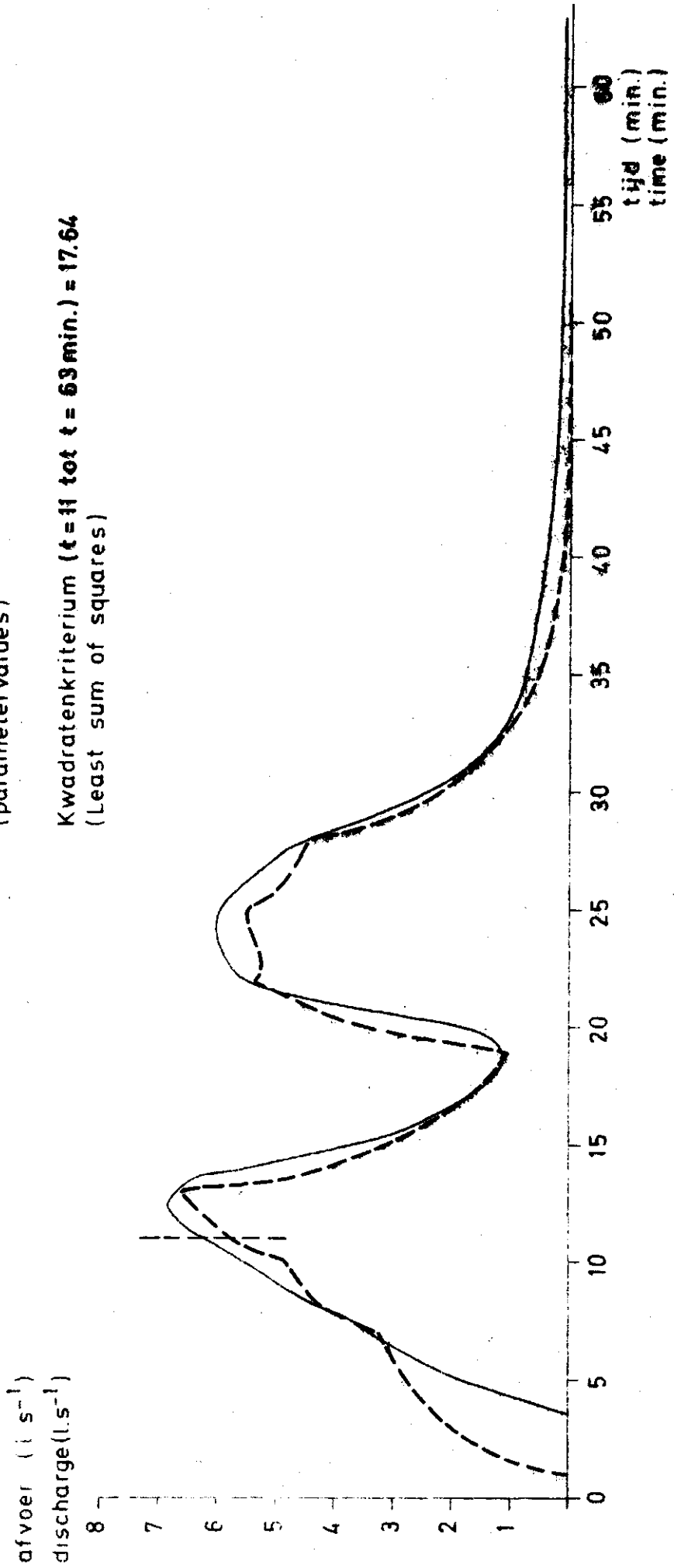
FIGUUR 27
(FIGURE 27)

MODEL IV

— gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden
(parameter values) $\left\{ \begin{array}{l} j = 7.15 \Delta t \\ k = 0.25 \Delta t \end{array} \right.$

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 17.64
(Least sum of squares)



FIGUUR 28
(FIGURE 28)

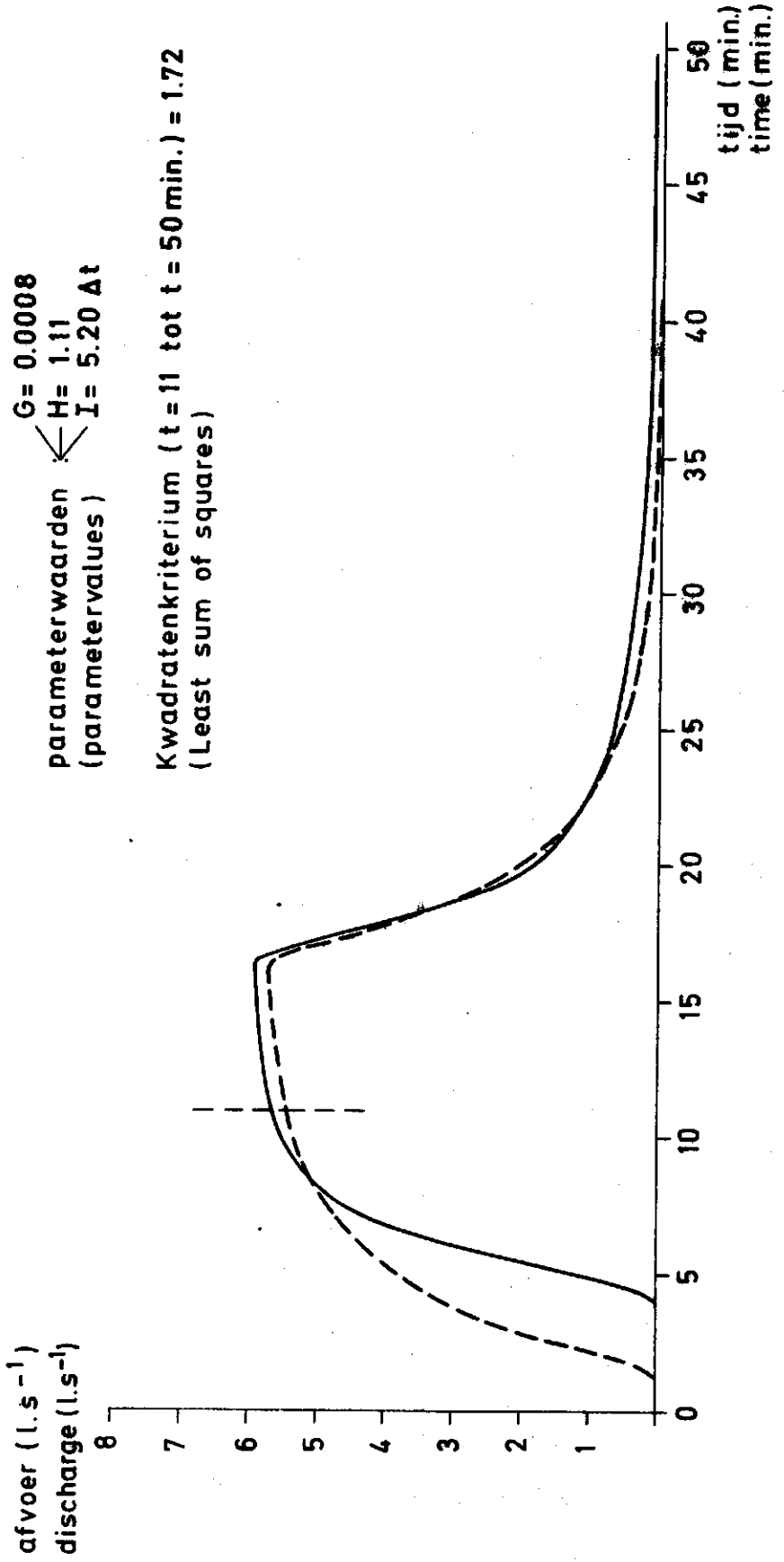
MODEL V

Afvoersimulatie van bui b4
(Simulation discharge experiment b4.)

— gemeten (measured)
- - - gesimuleerd (simulated)

parameterwaarden \swarrow
(parameter values) \searrow
 $G = 0.0008$
 $H = 1.11$
 $I = 5.20 \text{ At}$

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 50 \text{ min.}$) = 1.72
(Least sum of squares)



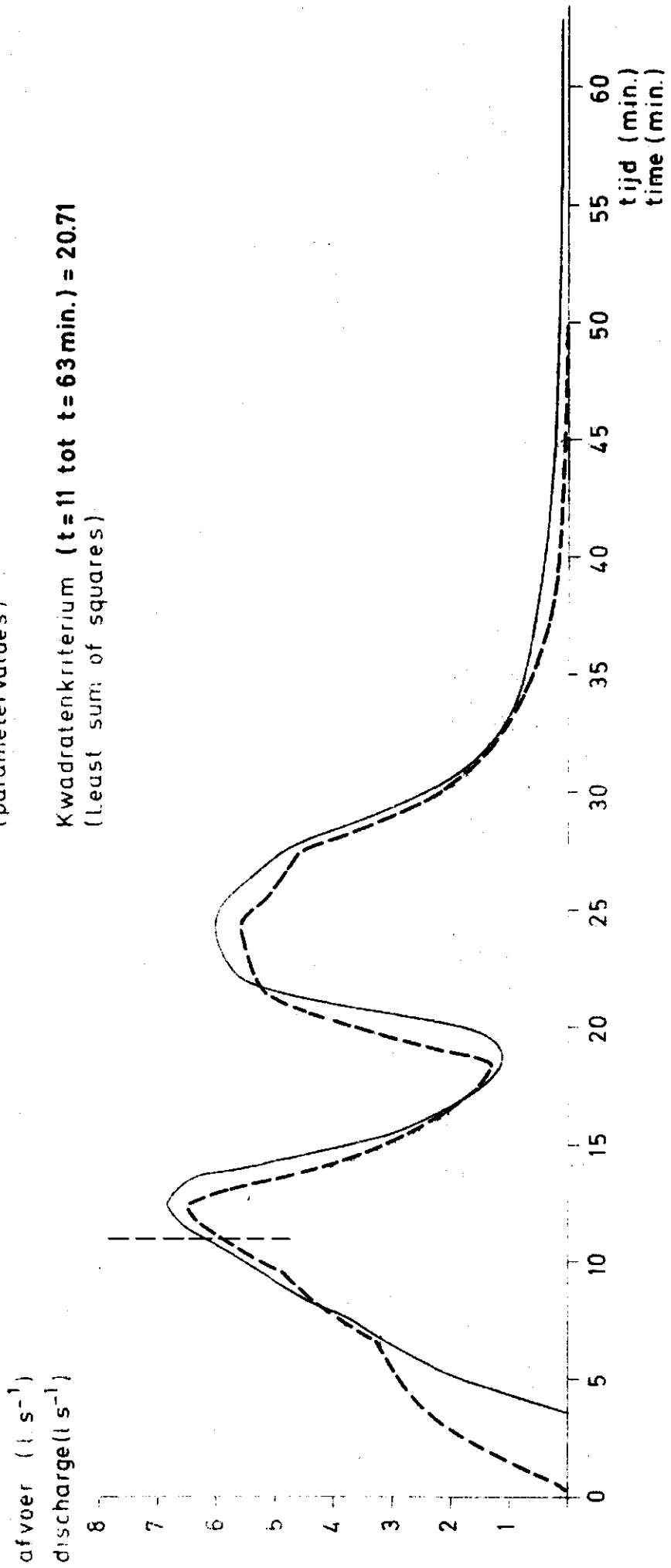
FIGUUR 29
(FIGURE 29)

MODEL V

— gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden
(parameter values)
G = 0.0008
H = 1.11
I = 5.20

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 20.71
(Least sum of squares)



FIGUUR 30
(FIGURE 30)

MODEL VI

Afvoersimulatie van bui b4
(Simulation discharge experiment b4)

— gemeten (measured)
- - - gesimuleerd (simulated)

parameterwaarden $\begin{cases} H = 1.20 \\ I = 6.03 \end{cases}$
(parameter values)

Kwadratekriterium ($t = 11$ tot $t = 50$ min.) = 1.54
(Least sum of squares)

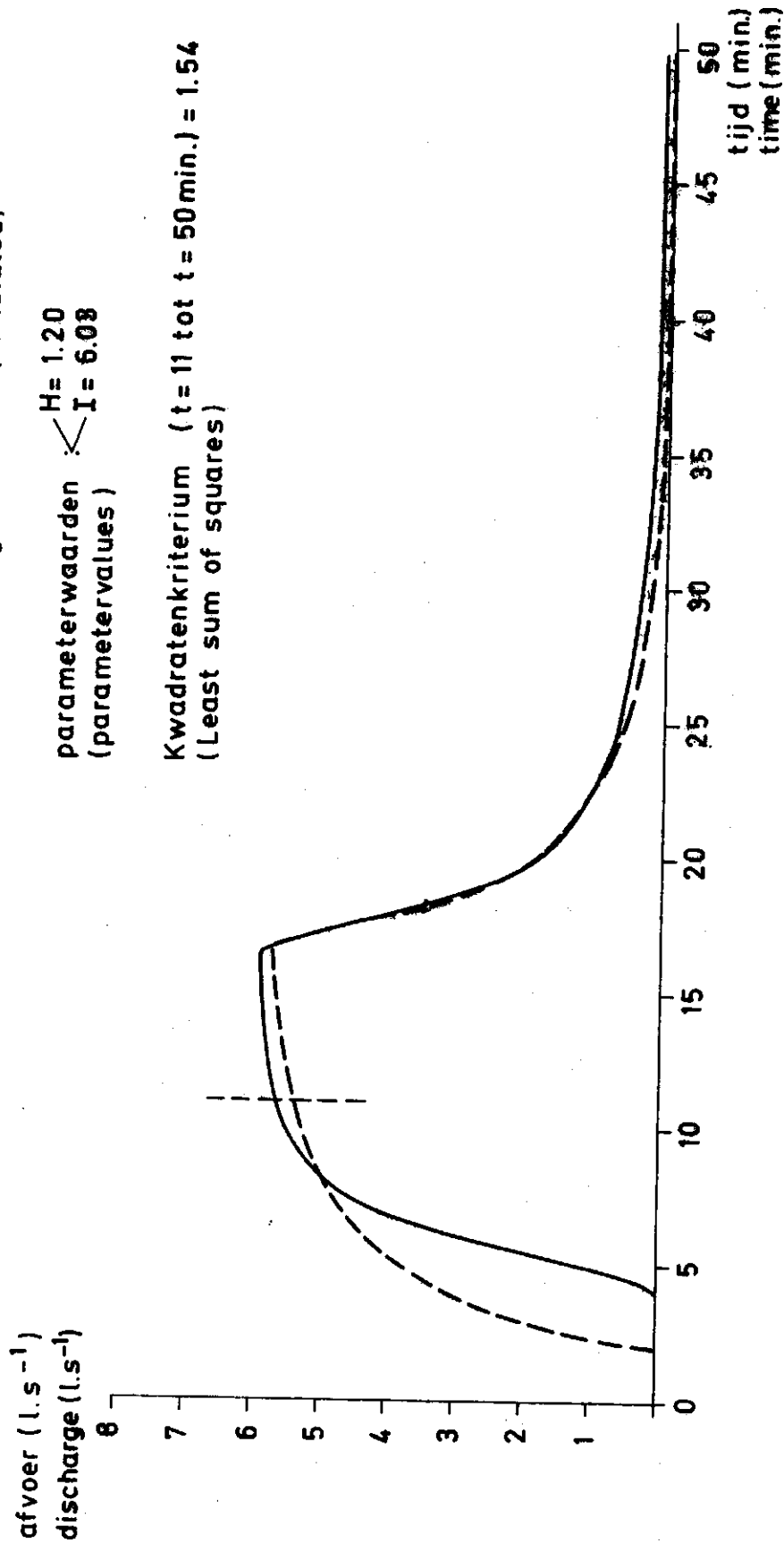


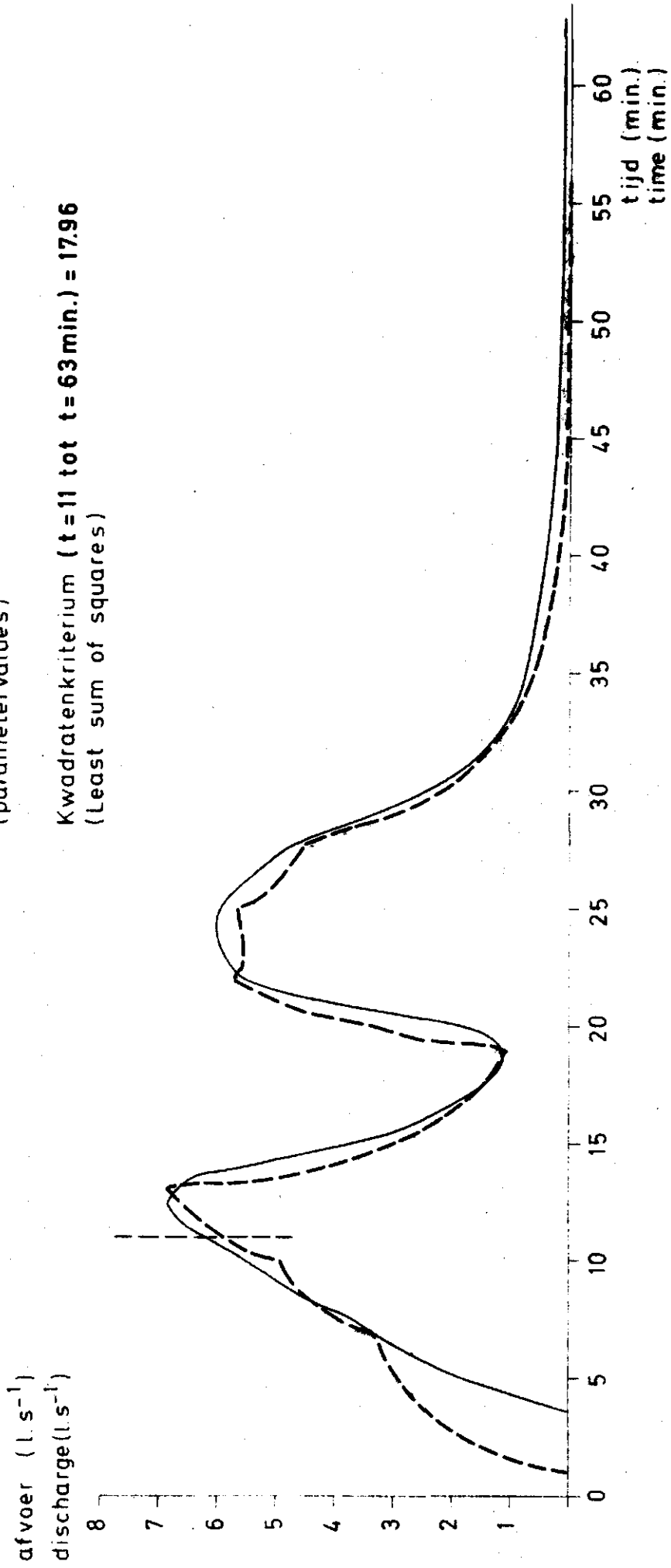
FIGURE 31
(FIGURE 31)

MODEL VI

- gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden $\begin{matrix} H= 1.20 \\ I= 6.03 \end{matrix}$
(parameter values)

Kwadratenkriterium ($t=11$ tot $t=63$ min.) = 17.96
(Least sum of squares)



FIGUUR 32
(FIGURE 32)

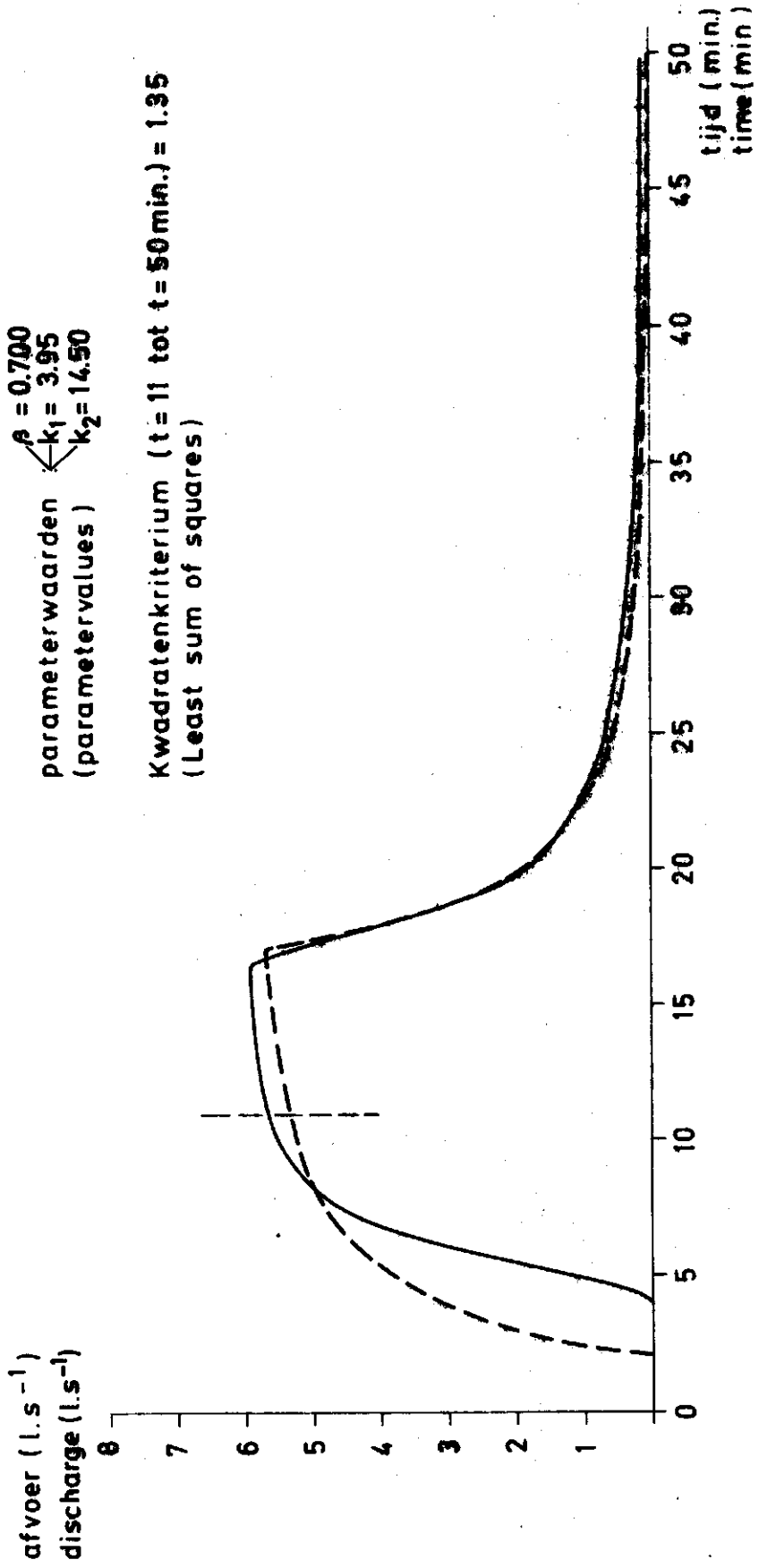
MODEL VII

Afvoersimulatie van bui b4
(Simulation discharge experiment b4)

— gemeten (measured)
- - - gesimuleerd (simulated)

parameterwaarden
(parameter values) $\left\{ \begin{array}{l} \beta = 0.700 \\ k_1 = 3.95 \\ k_2 = 14.50 \end{array} \right.$

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 50$ min.) = 1.35
(Least sum of squares)



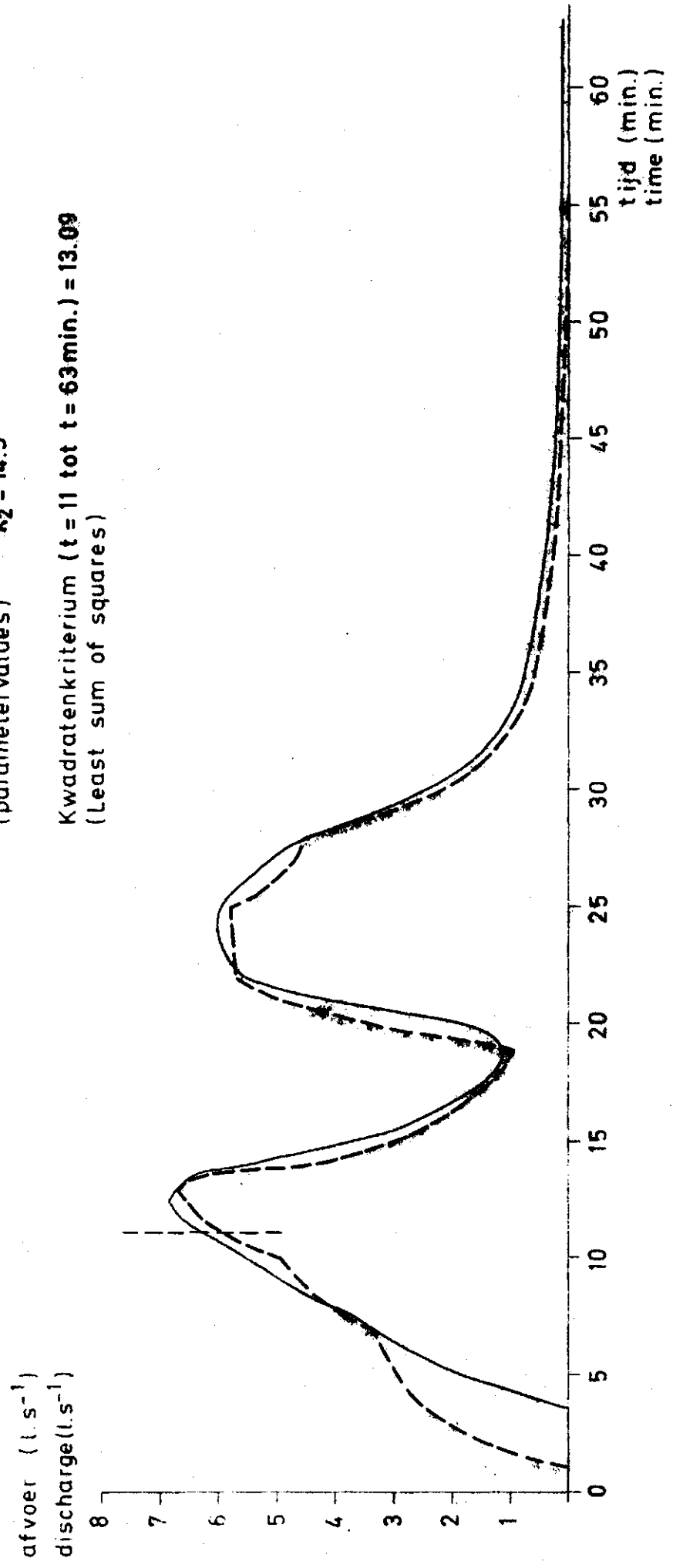
FIGUUR 33
(FIGURE 33)

MODEL **XVI**

— gemeten (measured)
- - - simulatie (simulation)

parameterwaarden
(parameter values) $\left\{ \begin{array}{l} \beta = 0.70 \\ k_1 = 3.95 \\ k_2 = 14.5 \end{array} \right.$

Kwadratenkriterium ($t = 11$ tot $t = 63$ min.) = 13.09
(Least sum of squares)



5. CONCLUSIES EN OPMERKINGEN

- Van de beschouwde modellen gaf model III, dat is gebaseerd op de convective diffusion equation, het beste resultaat. Opvallend is verder het goede resultaat van model I, het lineaire reservoir gevolgd door een translatie. Het verschil in resultaat wanneer gewerkt wordt met het kwadratenkriterium, is, wanneer men dit uitdrukt als percentage van het kwadratenkriterium bij het nulmodel, voor de modellen I t/m VII klein.
- Het invoeren van twee k-waarden bij het model "een lineair reservoir" zoals dit wordt toegepast in [4] bleek voor het beschouwde systeem niet zinvol. De grote ruwheid kan hier de reden van zijn. Wel bleek dat de waarde van de parameter k, zoals deze werd gevonden uit de verschillende S-curven, afhankelijk was van de hoogte van de neerslagintensiteit.
- In de herfst waren de korfjes om de afvoerputjes flink geblokkeerd door bladeren van een naburige rij populieren. Aan zijn lot overgelaten zou het beschouwde systeem buitengewoon tijdsvariant zijn.
- Daar $\int_{t=0}^{5 \text{ min}} u(t)dt = 0.7$ kan worden geconstateerd dat het dak snel reageert. Het lijkt interessant een soortgelijk experiment uit te voeren bij een dak met grof grind. Enerzijds zal de berging tussen dat grind vele malen groter zijn dan die bij het beschouwde dak, terwijl aan de andere kant de doorlatendheid door het grind veel groter is.

6. LIJST VAN SYMBOLEN

x	lengte	(m)
t	tijd	(secondes of minuten)
Δt	tijdsinterval	(30 s)
O	beregend dakoppervlak	(m ²)
A	oppervlak meetput bovenstrooms van het V-schot + een gedeelte van de toevoerpippen	(m ²)
B	berging in de meetput	(m ³)
Q(t)	put invoer, afvoer	(l.s ⁻¹)
P(t)	beregeningsdebiet	(l.s ⁻¹ of mm.uur ⁻¹)
Q _m (t)	putafvoer	(l.s ⁻¹)
R(t)	recorderaanwijzing	
α	omrekeningsfaktor recordereenheden - niveauverschil in meetput	
T	verblijftijd van het water in de afvoer vanaf de putjes op het dak tot de meetput	(secondes of minuten)
d	hoeveelheid water die nodig is om het droge dak te bevochtigen	(mm)
u(t)	impulsresponsie	
S(t)	eenheidsstapresponsie, S-curve	
δ	deltafunctie	
D	"hydraulic diffusivity"-coëfficiënt	(m ² .s ⁻¹)
A _{τ}	translatiecoëfficiënt	(m.s ⁻¹)
k	parameter	(30 s)
j	parameter	(30 s)
E	parameter	(30 s) ^{1/2}
F	parameter	(30 s) ^{-1/2}
G	parameter	dimensieloos
H	parameter	dimensieloos
I	parameter	(30 s)
τ	parameter	(30 s)
β	parameter	dimensieloos

7. LIJST VAN LITERATUURVERWIJZINGEN

- [1] Capita Selecta Hydraulica en Afvoerhydrologie 1973
I. Voortgezette Systeemtheorie
II. Numerieke Oplossingsmethoden
D.H. Keuning.
- [2] U.S.D.C. "Drainage Principles and Applications"
Precipitation - Runoff Relations
D.A. Kraijenhoff van de Leur.
- [3] Linear Theory of Hydrologic Systems
J.C.I. Dooge
Agricultural Research Service U.S. Dept. of Agriculture
Technical Bulletin No. 1468, October 1973.
- [4] Conceptual model design for motorway stormwater drainage
C.J. Swinnerton
M.J. Hall
T. O'Donnell
Civil Engineering, February 1973.
- [5] The hydrology of small impervious areas
Warren Viessman, Jr.
Water Resources Research, Vol. 2, No. 3, 1966.
- [6] A study of non-steady groundwater flow with special reference
to a reservoir coefficient
D.A. Kraijenhoff van de Leur
De Ingenieur, Vol. 70, No. 19, 1958.
- [7] Problems and Methods of Rainfall-Runoff Modelling
J.C.I. Dooge
Workshop on Mathematical Models in Hydrology,
Pisa, 9th - 12th December 1974.
- [8] Linear analysis of a physically based model of a distributed
surface runoff system
T.J. van de Nes
Thesis Landbouwhogeschool Wageningen, 1973.

- [9] Handleiding kandidaatscollege Wiskundige Statistiek
Vakgroep Wiskunde, Landbouwhogeschool
L.C.A. Corsten.
- [10] Handbook of Mathematical Functions
M. Abramowitz
I.A. Stegun.

8. APPENDIX8.1. Meetcijfers uitgevoerde proeven (1/s)

8.1.b ($\Delta t = 1 \text{ min.}$)										
	b 1	b 2	b 3	b 4	b 5	b 6	b 7	b 8	b 9	b 10
tijd van aanvang bereg. tot begin afvoer	7 min. 15 sec.	4 min. 30 sec.	4 min. 45 sec.	3 min. 15 sec.	4 min. 30 sec.	2 min. 45 sec.	4 min. 50 sec.	5 min. 55 sec.	9 min. 10 sec.	n.v.t.
tijd van begin af- voer tot eerste afvoer- cijfer	30 sec.	30 sec.	30 sec.	40 sec.	45 sec.	45 sec.	10 sec.	1 min.	30 sec.	n.v.t.
afvoer- cijfers met $\Delta t =$ 1 min.	1.04	0.23	1.44	0.82	2.86	2.44	0.14	0.29	0.29	8.68
	1.62	0.78	1.96	2.57	4.37	3.96	0.65	0.59	0.42	8.13
	2.36	1.55	3.40	4.02	5.24	5.28	1.27	1.03	0.66	6.39
	2.77	2.28	4.30	4.83	5.52	5.88	1.80	1.45	0.87	4.48
	2.91	2.78	4.67	5.19	5.77	6.28	2.19	1.74	1.08	2.78
	3.05	3.02	4.92	5.47	6.00	6.53	2.41	2.01	1.13	2.04
	3.13	3.12	5.06	5.62	6.23	6.70	2.59	2.13	1.19	1.34
	3.18	3.26	5.23	5.75	6.31	6.79	2.65	2.26	1.31	0.89
	3.22	3.35	5.37	5.77	6.35	6.84	2.73	2.31	1.37	
	3.28	3.46	5.44	5.77	6.41	6.85	2.83	2.39	1.43	
	3.27	3.51	5.49	5.81	6.53	6.35	2.89	2.48	1.46	
	3.32	3.53	5.59	5.84	6.64	4.60	2.93	2.52	1.48	
	3.35	3.53	5.63	5.87	6.74	2.94	2.96	2.53	1.49	
	3.39	3.57	5.68	5.89	6.77	2.01	2.98			
	3.43		5.73	5.90	6.80	1.44	3.00			
	3.46		5.77		6.83	1.16	3.01			
	3.49		5.77		6.85	0.92				
	3.51		5.82		6.87	0.78				
	3.53		5.85		6.89					
	3.55		5.87							
			5.89							
			5.90							
			5.91							

Voor zover in de verwerking van bovenstaande meetcijfers met $\Delta t < 1 \text{ min.}$ gewerkt is, zijn deze waarden verkregen door uitlezing uit de grafiek getekend door bovenstaande punten.

8.1.a	8.1.c ($\Delta t = 30 \text{ sec.}$)	
staart- verloop $\Delta t = 1 \text{ min}$	$t = 0$ ↑	1.35
	3 min.	1.74
	30 sec.	2.94
1.02	↓	4.04
0.83	0	4.97
0.70	0.58	5.56
0.60	1.17	5.76
0.53	1.88	5.85
0.47	2.32	5.96
0.42	2.67	6.02
0.38	3.07	6.03
0.35	3.41	5.97
0.32	3.70	5.81
0.28	4.13	5.57
0.25	4.55	5.35
0.23	4.90	5.09
0.21	5.17	4.88
0.19	5.53	4.46
0.18	5.82	3.96
0.17	6.24	3.33
0.16	6.55	2.84
0.15	6.74	2.45
0.15	6.82	2.02
0.14	6.74	1.79
0.14	6.47	1.56
0.13	5.57	1.40
0.13	4.72	1.21
0.12	3.84	1.09
0.12	2.99	1.03
0.11	2.48	0.91
0.11	2.04	0.84
0.10	1.76	0.79
Over een	1.47	0.76
periode van	1.33	0.70
+ 2 uur komt	1.18	0.65
nog + 200 l.	1.15	0.60
tot afstro-		
ming.		

8.2. Pulsresponsies ($\Delta t = 30$ sec.)

Tijd (min.)	Model						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
1	0.000	0.026	0.000	0.083	0.034	0.000	0.000
	0.148	0.085	0.037	0.127	0.090	0.146	0.149
2	0.126	0.117	0.151	0.124	0.114	0.110	0.126
	0.108	0.119	0.148	0.109	0.114	0.106	0.107
3	0.092	0.109	0.118	0.092	0.103	0.098	0.091
	0.078	0.094	0.092	0.076	0.090	0.087	0.077
4	0.066	0.079	0.072	0.063	0.076	0.076	0.066
	0.057	0.065	0.058	0.052	0.064	0.064	0.056
5	0.048	0.054	0.046	0.043	0.053	0.054	0.048
	0.041	0.044	0.038	0.035	0.044	0.045	0.040
6	0.035	0.036	0.032	0.029	0.037	0.037	0.034
	0.030	0.030	0.026	0.024	0.030	0.031	0.029
7	0.025	0.024	0.022	0.020	0.025	0.025	0.025
	0.022	0.020	0.019	0.016	0.021	0.021	0.021
8	0.018	0.017	0.016	0.013	0.017	0.017	0.018
	0.016	0.014	0.014	0.011	0.014	0.014	0.015
9	0.013	0.011	0.012	0.009	0.012	0.012	0.013
	0.011	0.009	0.011	0.007	0.010	0.010	0.011
10	0.010	0.008	0.009	0.006	0.008	0.008	0.010
	0.008	0.005	0.008	0.005	0.007	0.007	0.008
11	0.007	0.005	0.007	0.004	0.006	0.006	0.007
	0.006	0.005	0.006	0.003	0.005	0.005	0.006
12	0.005	0.004	0.006	0.003	0.004	0.004	0.005
	0.004	0.003	0.005	0.002	0.003	0.003	0.004
13	0.004	0.003	0.004	0.002	0.003	0.003	0.004
	0.003	0.002	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003
14	0.003	0.002	0.004	0.001	0.002	0.002	0.003
	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002
15	0.002	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002
	0.002	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002
16	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002
	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001

8.2. (vervolg)

Tijd (min.)	Model						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
17	0.001	0.001	0.002		0.001	0.001	0.001
	0.001	0.001	0.002		0.001	0.000	0.001
18	0.001	0.000	0.002		0.000		0.001
	0.001		0.001				0.001
19	0.001		0.001				0.001
	0.000		0.001				0.001
20			0.001				0.001
			0.001				0.000
21			0.001				
			0.001				
22			0.001				
			0.001				
23			0.001				
			0.001				
24			0.001				
			0.000				
25							