

Waterbouwkundig Laboratorium
Borgerhout
BIBLIOTHEEK

0307 015 3082



De simulatie van de afvoer in het waterbekken van de Zwalm volgens verschillende methodes

door A. VAN DER BEKEN

Instituut voor Wetenschappen van het Leefmilieu
Afdeling Hydrologie
Vrije Universiteit Brussel

en F. DE TROCH

Laboratorium voor Hydraulica
Rijksuniversiteit Gent

123564

SAMENVATTING

Het ontwerpen van oppervlaktewater reservoirs moet steunen op de analyse van een lange reeks afvoerwaarnemingen. Aan de hand van het voorbeeld van het Zwalm-bekken, dat ook geologisch en morfologisch beschreven wordt, onderzoeken de auteurs de middelen om dergelijke lange afvoerreeksen samen te stellen indien men slechts beschikt over een korte waarnemingsperiode van afvoeren maar over een lange periode van neerslagen en temperaturen.

Drie methodes worden toegepast en onderling vergeleken: 1. de formule van Turc op jaarlijkse basis; 2. een formule met de gemiddelde maandelijkse afvoercoëfficiënt en een maandelijkse neerslagindex en 3. een conceptueel model dat de dagelijkse afvoeren simuleert met behulp van dagelijkse neerslag en temperatuur.

De tweede en derde methode schenken voldoening en zullen verder uitgewerkt worden.

RESUME

Le calcul des réservoirs d'eau de surface doit être basé sur l'analyse de longues séries de mesures de débits. A l'aide de l'exemple du bassin versant du Zwalm, dont la géologie et la morphologie sont également décrites, les auteurs commentent les moyens qui permettent la composition de ces longues séries de débits lorsqu'on ne dispose que d'une courte série de mesures de débits mais d'une longue période de mesures de précipitations et de températures.

Trois méthodes sont appliquées et comparées: 1. la formule de Turc à l'échelle annuelle; 2. une formule basée sur le coefficient moyen mensuel d'écoulement et un indice de précipitation mensuelle et 3. un modèle conceptuel qui simule les débits journaliers à l'aide des précipitations et des températures journalières. La deuxième et la troisième méthode répondent au problème et seront développées ultérieurement.

SUMMARY

The design of surface water reservoirs is based upon the analysis of discharge measurements made over a long period. When this long period of measurements is not available, there are possibilities to synthesize a long time series using a short period of discharge measurements and long periods of precipitation and temperature data.

Applied to the watershed of the river Zwalm, which is also described in its geological and morphological aspects, the authors discuss and compare three different methods: 1. the formula of Turc on a yearly basis; 2. a formula based upon the mean monthly discharge coefficient and a monthly precipitation index and 3. a conceptual model for simulation of daily discharges from daily precipitation and temperature data.

The second and third method comply with the request and will be developed consequently.

1. Het probleem van het Ontwerpen van Opper- vlakke-Waterreservoirs

Het is algemeen bekend dat de grondwatervoorraden in België in toenemende mate ontoereikend worden voor de voorziening in drinkbaar water, zowel voor industrieel als voor huishoudelijk gebruik. Meer en meer zullen daarom de meest geschikte oppervlakte-watervoorraden moeten aangesproken worden.

In tegenstelling tot het grondwater dat in zijn natuurlijke omgeving rechtstreeks kan uitgebaat worden, moet het oppervlakte-water daarentegen verzameld worden in reservoirs. Er stelt zich derhalve een probleem van ontwerp van deze reservoirs: welke inhoud moeten zij hebben en hoe moeten zij in de toekomst beheerd worden?

Het allereerste element voor het oplossen van dit probleem is de kennis van het volume water waarop men zal kunnen rekenen (kwantiteit en verdeling ervan in de tijd) om het reservoir te vullen en op peil te houden. De afvoer van de rivier die als toevoer voor het reservoir zal dienen moet dus gekend zijn. Alhoewel deze kennis van de afvoer eveneens van primordiaal belang is voor de oplossing van klassieke problemen zoals dimensionering van kunstwerken op de rivier en bescherming tegen overstromingen, is het een feit dat in ons land deze afvoeren pas sinds 1966 systematisch en op een voldoende aantal rivieren gemeten worden.

Men moet hierbij bedenken dat de afvoer van een rivier een zeer grillig verloop vertoont in de tijd, als gevolg van de wisselende meteorologische omstandigheden. De berekening van de toevoer naar een reservoir in kritische perioden van aanhoudende lage afvoeren kan derhalve niet geschieden door rechtstreeks te steunen op een dergelijke, korte waarnemingsperiode.

De afvoer van een rivier kan echter onder zekere voorwaarden als een stochastisch verschijnsel beschouwd worden, waarop de wetten van de probabiliteitsrekening kunnen toegepast worden. Met andere woorden: wij kunnen waarschijnlijkheden berekenen voor maximale of minimale afvoeren of beter voor perioden van hoge of lage afvoeren met een bepaalde grootte en duur. De ontwerper en de toekomstige uitbater van het reservoir zullen hierbij moeten overleggen welke risico's zij kunnen dulden wanneer een bepaald leveringsritme aan afgewerkt water geëist wordt, of welke financiële verliezen zij zullen toestaan wanneer het afgenomen verbruik moet geremd worden. Hoe kleiner dit risico gekozen wordt, hoe groter het reservoir zal moeten zijn en hoe duurder bijgevolg het project zal kosten.

Om tot deze berekeningen te komen is echter de belangrijkste voorwaarde dat men moet beschikken over een voldoende lange reeks van afvoeren over een periode van minimum 20 jaar en liefst 30 of 40 jaar. Deze afvoerreeksen zijn trouwens ook van belang bij de studie van de variatie van de belasting aan verontreinigende elementen in het water. Het spreekt vanzelf dat het volledig beheer van een reservoir voor drinkwatervoorziening hiermede rekening zal moeten houden.

Aan de hand van een hydrologische studie van het stroomgebied van de Zwalm, studie die overigens nog niet afgesloten is, zullen wij hierna bespreken welke mogelijkheden bestaan om toch tot een lange reeks afvoeren te komen als men slechts beschikt over een korte waarnemingsreeks van de afvoeren maar over een voldoende lange periode van waarnemingen van neerslag en temperatuur.

Achtereenvolgens zullen wij behandelen:

— de beschrijving van de kenmerken van het waterbekken van de Zwalm, hetgeen een vergelijking met andere waterbekkens vergemakkelijkt;

— de beschikbare gegevens (neerslagen, debieten en temperaturen);

— de jaarlijkse afvoeren, vergeleken met de formule van TURC;

— de maandelijkse afvoeren berekend met behulp van een gemiddelde afvoercoëfficiënt en een neerslag-index;

— de maandelijkse afvoeren berekend met de eerste voorlopige resultaten van het mathematisch model V.U.B. dat de dagelijkse neerslagen en temperaturen in rekening brengt.

2. Omschrijving van het Waterbekken van de Zwalmbeek

2.1. Topografische, Geologische en Bodemkundige Schets [1] [2] [3] (1)

Het waterbekken van de Zwalm, de voornaamste rechterbijrivier van de Boven-Schelde in de provincie Oost-Vlaanderen, is gelegen in het Plateau van Mid-den-België, meer bepaald in het interfluvium tussen Boven-Schelde en Dender. In grote trekken situeert het zich ten noorden van de heuvels van Flobecq, waar de rivier haar bronnen heeft, over Nederbrakel tot Zottegem in het oosten en Nederzwalm-Hermelgem in het westen, waar zich de monding in de Schelde bevindt (Fig. 1).

Het stroomgebied bevindt zich in de derde hoogtezone van Oost-Vlaanderen, namelijk in het golvend tot heuvelachtig landschap in het zuiden van de provincie, boven de 20 m hoogtelijn. Het draagt duidelijk de sporen van de riviererosie en het reliëf is niets anders dan de golvende overgang van één bijrivier tot de volgende.

De geologische formaties van belang voor onze studie bestaan uit de tertiaire en kwartaire afzettingen. Beter dan een beschrijving toont de karakteristieke geologische N.-Z.-coupe in figuur 2 (zie ook Fig. 1) de samenstelling van de ondergrond. De bovenste laag bestaat uit een kwartaire leemlaag die de andere lagen in wisselende dikte (0-10 m) bedekt. Door riviererosie hebben de valleien zich in de oudere tertiaire sedimenten ingegraven. Waar de uitschuring dieper gaat dan de hoogtelijn van ca. 50 m, komt het Ieperiaans zand onmiddellijk onder de

(1) Zie literatuurlijst achteraan.

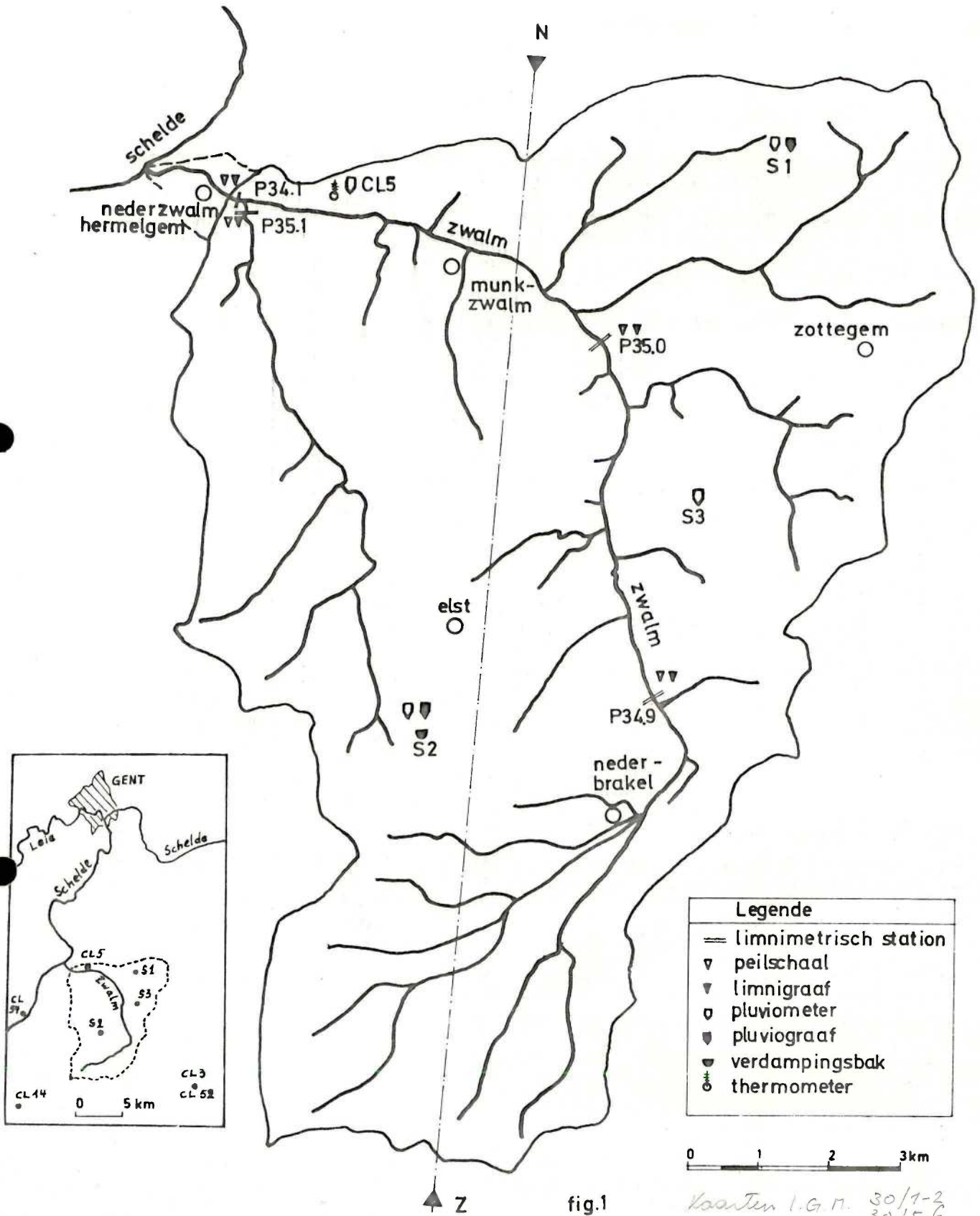


fig.1

leem voor. Op de grotere hoogten is deze zandlaag bedekt door de afzettingen van het Paniseliaan (kleiachtig onderaan en zandachtig bovenaan). Het gebied waar de grens tussen Paniseliaans zand en de eronder liggende Paniseliaanse klei de heuvelflanken

raakt, is gekenmerkt door talrijke waterbronnen. Volgens DE LEENHEER [2] mag het aantal bronnen in de Zwalmstreek op ongeveer 250 geschat worden; meer dan 3/4 hiervan zouden behoren tot het bronniveau van het Paniseliaan.

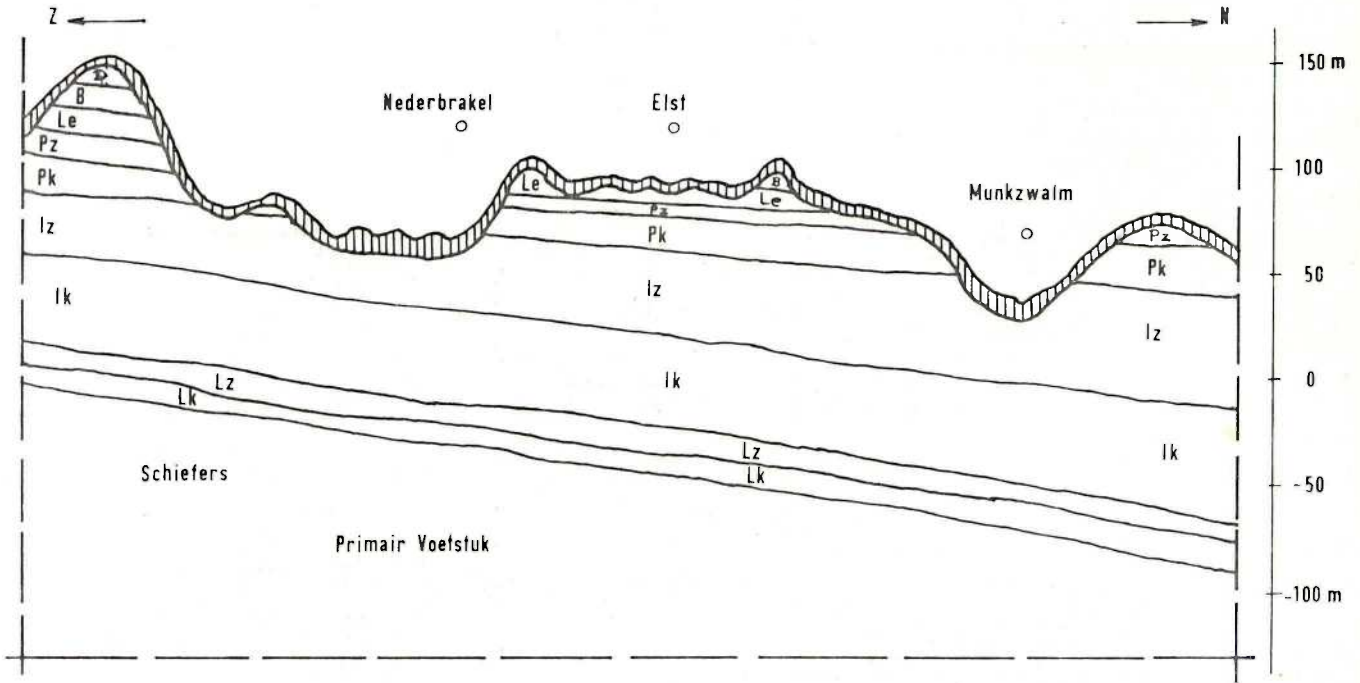


Fig. 2

D	Diestiaan	Pz	Paniseliaan Zand
B	Barfoon Klei	Pk	Paniseliaan Klei
Le	Lediaan Zand	lz	leperiaan Zand
		lk	leperiaan Klei

▨▨▨▨ Kwartaire Leem

Op de heuvels boven ca. 100 m bedekken de jongste lagen van het Eoceen, namelijk het zand van Lede en de Bartoon klei (Assiaan), de Paniseliaanse afzettingen. Op de hoogste toppen (boven 145 m) wordt zelfs Diestiaan aangetroffen.

De kwartaire leemafzettingen op de heuvels van het Zwalmbecken zijn van zeer wisselende dikte naargelang het reliëf, de ligging en oriëntatie. Daarboven ontwikkelden zich veel heterogene gronden welke, volgens de aard van het door erosie aangesneden tertiaire substraat, uit meer kleiige of uit meer zandige bestanddelen bestaan (hellingsgronden).

De valleien werden tijdens het Holoceen gedeeltelijk opgevuld met alluvium en ten dele ook met organoecen materiaal (veen). In de recente tijd greep bodemerrosie plaats. Het geërodeerd materiaal werd dan als colluvium afgezet aan de voet van de hellingen en in de depressies (vallei- en depressiegronden).

2.2. *Morfologische Schets*

De systematische beschrijving van een waterloopenet dat ontstaan is door het natuurlijke proces van erosie en beekvorming kan beschouwd worden in het kader van een orde-nummering systeem, voorgesteld door HORTON [4] en verder uitgewerkt door STRAHLER [5].

Beschouwen wij een boomvormig waterloopenet (Fig. 3): in elk inwendig knooppunt komen drie segmenten samen (twee opwaartse en één afwaarts) en uit elk uitwendig punt (vingertop) vertrekt slechts één (afwaarts) segment. De segmenten

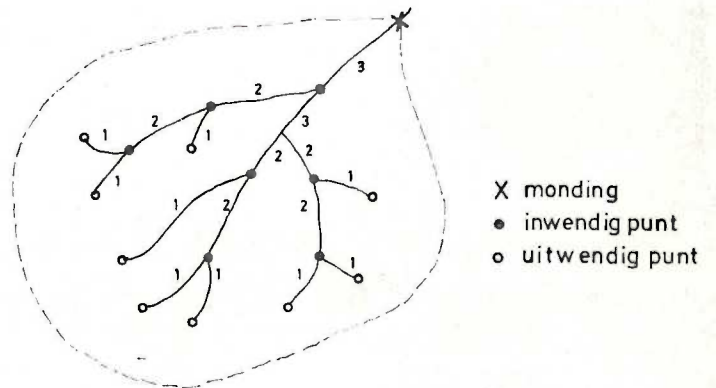


fig. 3

afwaarts van de vingertoppen zijn van orde 1. De afwaartse segmenten vertrekkend uit de inwendige punten waar twee (opwaartse) segmenten van 1ste orde samenvloeien, worden van 2de orde. Wanneer een dergelijk segment op zijn beurt samenvloeit met een ander segment van 2de orde, wordt het afwaartse segment van 3de orde, enz.

Aan deze orde-nummering worden vervolgens morfometrische karakteristieken, zowel van de waterlopen zelf als van hun stroombekken, verbonden. Hierbij kan men een onderscheid maken tussen de lineaire, de oppervlakte- en de reliëfaspecten van het netwerk en van het bekken. Een dergelijke kwantitatieve analyse moet ons in staat stellen een vergelijking te maken tussen bekkens en waterloopenetwerken, die zowat overal ter wereld bestudeerd worden doch dikwijls veel verschillen in afmetingen [6].

2.2.1. *Lineaire Aspecten van het Waterloppennetwerk van de Zwalm*

Steunend op de topografische kaarten op schaal 1/10.000 en 1/25.000 voerden wij de ordennummering volgens Strahler uit voor het Zwalmbekken, opwaarts van het station P 34.1 (Fig. 1 - Brug onder de Provinciale Baan Oudenaarde-Erpe te Nederzwalm). Tegelijkertijd werden de lengten van de verschillende segmenten opgemeten. Onderstaande tabel I geeft de samenvatting van de bekomen resultaten met:

- u : ordenummer;
- N_u : aantal segmenten van orde u ;
- $R_{n,u} = \frac{N_u}{N_{u+1}}$: bifurcatiegetal van orde u ;
- L_u : gemiddelde lengte van de segmenten van orde u (m).

Tabel I

u	N_u	$R_{n,u}$	L_u (m)	A_u (ha)	$R_{a,u}$
1	219	4,47	232	11	8,37
2	49	4,08	682	94	4,36
3	12	4,0	1.143	410	5,44
4	3	3,0	4.125	2.230	5,13
5	1		4.942	11.430	

Totale lengte waterloppennet: 177,5 km
Totale lengte hoofdwaterloop: 21,4 km

2.2.2. *Oppervlakte Aspecten van het Bekken*

De omtrek van de bekkens die afwateren in een segment van orde u kunnen eveneens op een geografische kaart getekend worden. De oppervlakte van een dergelijk bekken van orde u kan dan door planimetrenen bepaald worden.

Tabel I vermeldt de gemiddelde oppervlakte A_u (in ha) van de bekkens van orde u en de verhouding $R_{a,u} = \frac{A_{u+1}}{A_u}$. De totale oppervlakte van het bekken opwaarts P34.1 (5e orde) bedraagt 114,3 km².

2.2.3. *Vorm van het Bekken*

Het afvoerregime aan de monding van een stroombekken wordt sterk beïnvloed door de geometrische vorm van het bekken. Langwerpige bekkens met hoge bifurcatiegetallen vertonen veelal minder scherpe afvoerpieken, terwijl bekkens met een meer ronde vorm en kleinere bifurcatiegetallen meer scherp afgelijnde wasafvoeren vertonen (Fig. 4).

Verschillende kwantitatieve grootheden ter karakterisering van de vorm van een stroombekken zijn in de literatuur voorgesteld. De meest gebruikelijke (in Europa) is de zgn. coëfficiënt van Gravelius d.i. de verhouding van de actuele omtrek S van het bekken

tot de omtrek van een cirkel met zelfde oppervlakte als het bekken:

$$K_G = \frac{S}{2\sqrt{\pi A}}$$

Voor het Zwalmbekken opwaarts P 34.1 (5e orde) wordt $K_G = 1,39$.

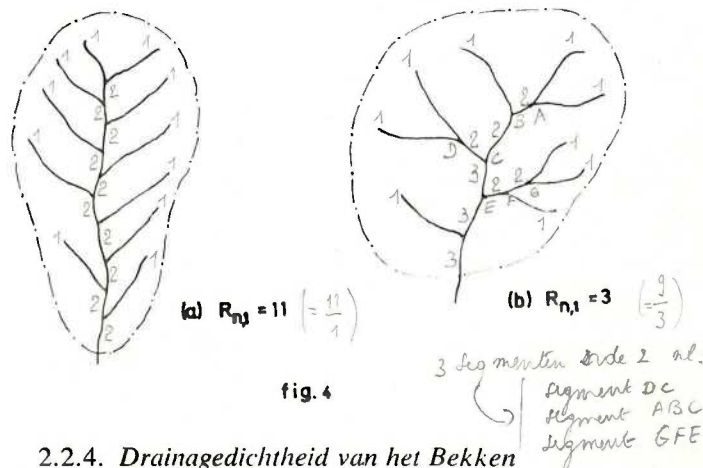
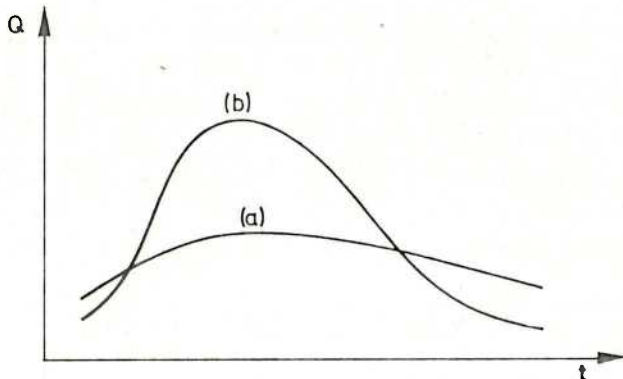


fig. 4

2.2.4. *Drainagedichtheid van het Bekken*

De drainagedichtheid D van een waterbekken is gedefinieerd als de verhouding van de totale lengte van het waterloppennet binnen dit bekken tot de oppervlakte van het bekken. In het geval van het hierboven vermeld bekken wordt:

$$D = \frac{177,5}{114,3} = 1,55 \text{ km/km}^2.$$

2.2.5. *Reliëf Aspecten van het Waterloppennet en van het Bekken*

Figuur 5 geeft een beeld van het lengteprofiel van de Zwalmbeek, zoals opgemeten op de reeds vermelde topografische kaarten.

De klassieke hypsometrische kromme voor het bekken opwaarts P 34.1 is voorgesteld in Fig. 6. Het maximale niveauverschil bedraagt ca. 146 m en de gemiddelde hoogte 61 m boven de zeespiegel of 49 m boven de monding van het beschouwde bekken.

3. *Bespreking van de Beschikbare Gegevens*

3.1. *Neerslag*

Tot onlangs beschikten wij voor de berekening van de neerslag over het Zwalmbekken slechts over de

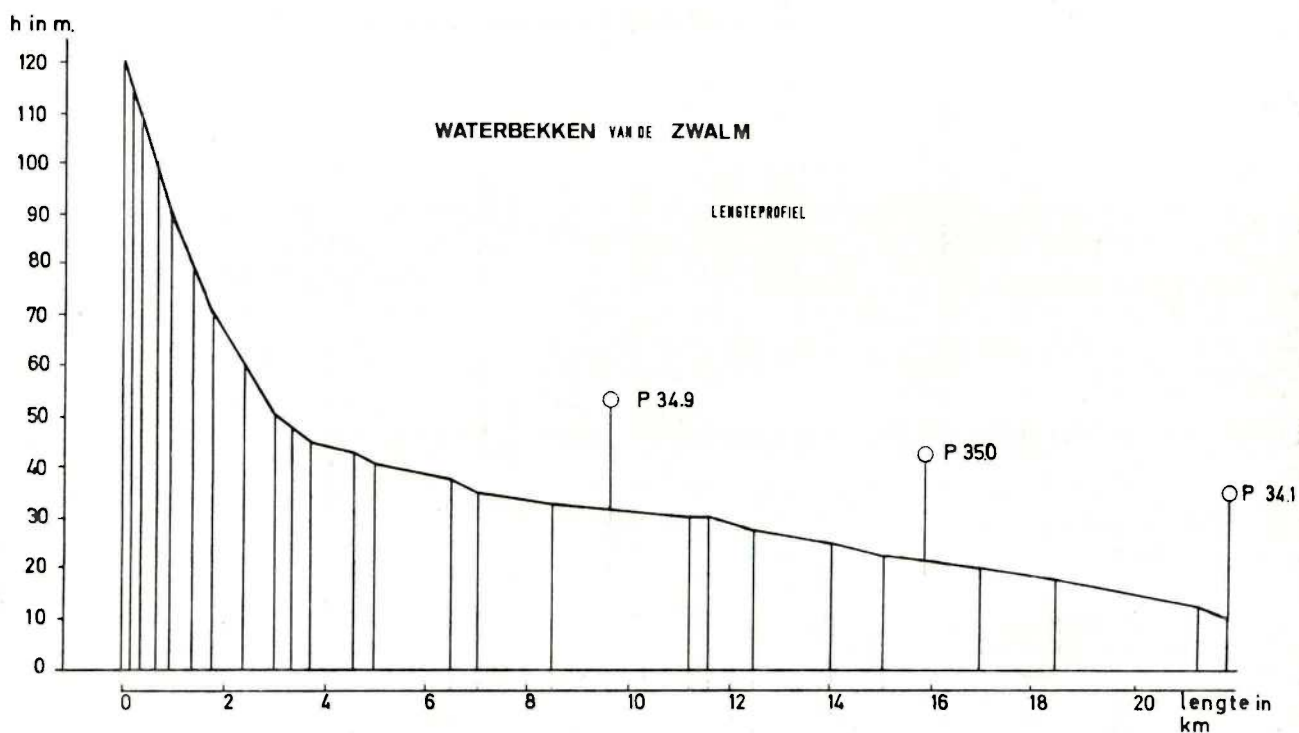


Fig. 5

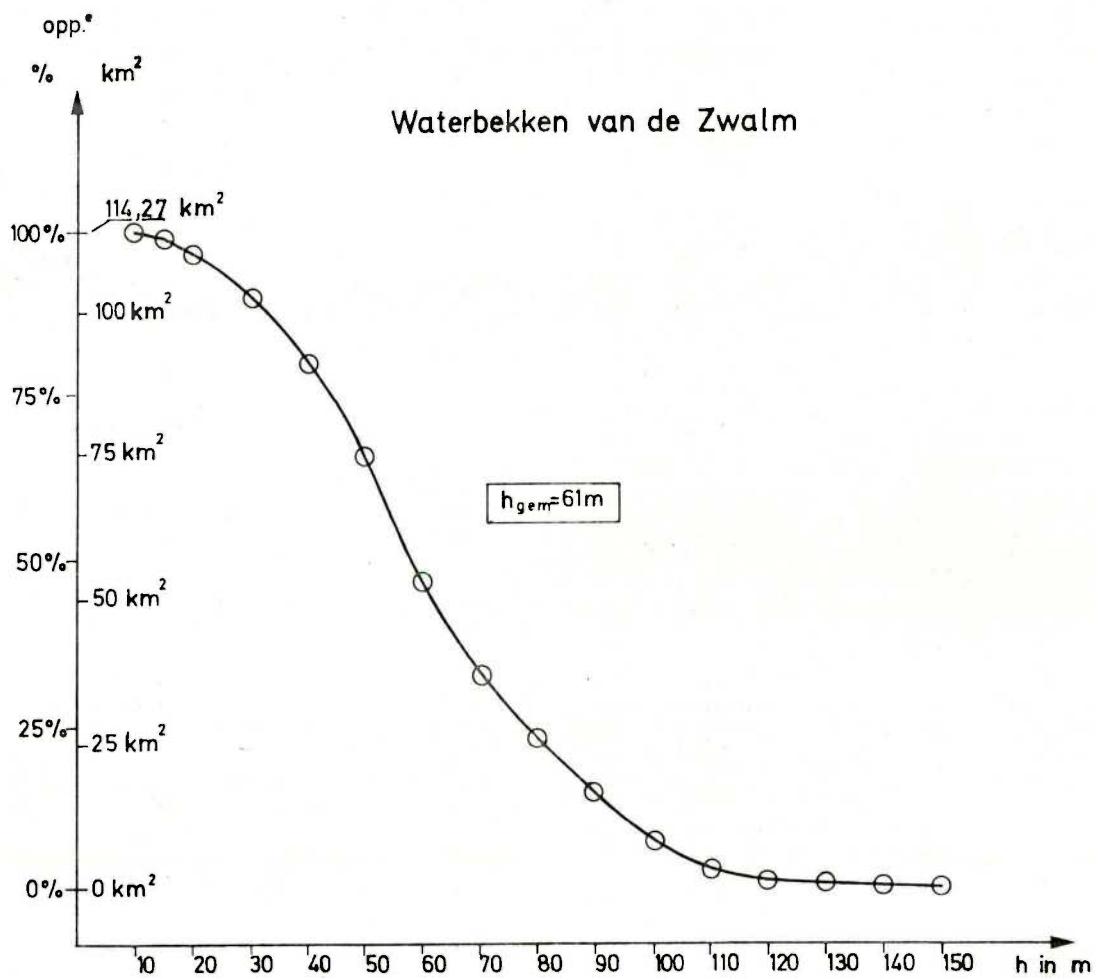


fig6

meetgegevens (sedert 1951) van 5 stations die deel uitmaken van het secundaire meteorologisch net van het K.M.I. Dit net bestaat (voor gans België) uit enkele honderden kleine stations, waarvan de meeste slechts uitgerust zijn met een regenmeter. We beschikken dus enkel over informatie betreffende de hoeveelheid neerslag gevallen per etmaal en niet over intensiteiten.

Hierbij komt nog dat van de vijf stations, die het Zwalmgebied bestrijken, nl. Geraardsbergen (CL 3 en CL 52), St.-Maria-Latem (CL 5), Ronse (CL 14) en Oudenaarde (CL 54), alleen dit van St.-Maria-Latem binnen het bestudeerde waterbekken ligt (Fig. 1).

De overgang van de gemeten puntneerslagen naar de gemiddelde neerslag P over het stroomgebied werd uitgevoerd volgens de klassieke Thiessenmethode. De gebruikte formule luidt:

$$P = 0,719 \cdot P(\text{CL5}) + 0,087 \cdot P(\text{CL54}) + 0,075 \cdot P(\text{CL3}) + 0,075 \cdot P(\text{CL52}) + 0,044 \cdot P(\text{CL14}) \quad (1)$$

waarin $P(\text{CL}...)$: de gemeten neerslag (in mm) in het corresponderend station.

Ten einde in de toekomst te kunnen beschikken over neerslagwaarden en -intensiteiten gemeten binnen het gebied zelf, hebben wij onlangs drie bijkomende regenmeters en twee pluviografen geïnstalleerd (Fig. 1: S1, S2, S3).

3.2. Afvoer

Op de Zwalmbeek bevindt zich één limnimetrisch station (P 34.1 — Fig. 1) dat deel uitmaakt van het hydrometrisch net van het K.M.I. Dit station is in dienst sedert 1967 (peilschaalaflezings) en werd sedert juli 1972 tevens uitgerust met een limnigraaf. Ten einde de verdeling van de afvoer over het bekken te kunnen bestuderen, installeerde het Laboratorium voor Hydraulica (R.U.G.), in samenwerking met de Afdeling Hydrologie (V.U.B.), nog twee bijkomende limnigrafen (P 34.9 en P 35.0) op de Zwalmbeek zelf en één limnigraaf op een belangrijke zijloop (P 35.1).

Om de opgemeten waterstanden om te zetten in debieten en afvoeren moet men beschikken over een

ijkingskromme die het verband waterstand-debiet weergeeft. Te dien einde worden door het Laboratorium voor Hydraulica sinds november 1969 tweemaal per maand debietsmetingen uitgevoerd waarbij tegelijkertijd de waterstand wordt opgetekend.

Bij de omrekening van de dagelijkse peilaflezings aan de hand van een dergelijke ijkingskromme dient opgemerkt te worden dat deze aflezings slechts momentopnamen zijn van de waterstand en niet de gemiddelde dagelijkse waterstanden. Als men echter een voldoende lange periode beschouwt, kan men redelijkerwijze aannemen dat de afvoer berekend uit deze momentopnamen weinig van de werkelijke gemiddelde waarde zal afwijken. Met deze restrictie, beschikken wij dan over de debieten in P 34.1 sinds 1 januari 1967.

3.3. Temperatuur

In de vijf vermelde stations van het secundaire meteorologisch net van het K.M.I. worden sedert 1951 ook de dagelijkse minimum- en maximumtemperaturen opgetekend. De gemiddelde dagelijkse temperatuur wordt dan zoals gebruikelijk bekomen als het rekenkundig gemiddelde van de maximale en minimale temperaturen.

Vermits de variatie van deze gemiddelde temperaturen vrij regelmatig is in de tijd en de schommelingen tussen de verschillende stations zeer klein, hebben wij ons beperkt tot de gemiddelde dagelijkse temperatuur in het station CL 5 (St.-Maria-Latem).

4. De Jaarlijkse Afvoeren vergeleken met de Formule van TURC

De neerslag P (mm) en de temperatuur T (°C) zijn de eenvoudigste klimatologische factoren die met de afvoer van een waterbekken zeer nauw in betrekking staan. Op intuïtieve wijze is te begrijpen dat de neerslag niet alleen rechtstreeks de afvoer Q (mm) beïnvloedt maar ook onrechtstreeks, via de evapotranspiratie E (mm): hoe meer water beschikbaar is, hoe meer er (onder dezelfde klimatologische voorwaarden) zal kunnen verdampen.

Ook de temperatuur heeft zijn invloed op deze evapotranspiratie: hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de verdamping.

Overzicht van de beschikbare gegevens

1951-1965	66	67	68	69	70	71	72	73	Beschikbare Gegevens
									Dagelijkse Neerslag
									Pluviografische
									Limnimetrische
									Limnigrafische
									Debietsmetingen
									Dagelijkse Temperat.

$$\frac{Q}{P} = \frac{\text{afvoer (gemeten)}}{\text{neerslag}}$$

A = afvoer (berekend)

Ref [9]

P_a = antecedent-precipitation index
= indice de saturation (Rochus 164)

$$\text{def } P_a = b_1 P_1 + b_2 P_2 + \dots + b_t P_t \quad (1)$$

where b_t = constant (function of t , and as $b_t = \frac{1}{t}$)

P_t = amount of precipitation which occurred t days prior to the storm under consideration

generally 20 to 60 terms in (1)

$$P_{at} = P_{a0} k^t, \quad k^t = b_t$$

$$t=1 \rightarrow P_{a1} = k P_{a0}$$

Thus index for any day = a constant k times the index of the day before

Table with values of $k^t = f(k, t)$

Deze evapotranspiratie is echter begrensd naar boven, zodat algemeen wordt aanvaard dat er een niet-lineair verband bestaat tussen E , P en T .

TURC [7] heeft dit verband, op jaarlijkse basis, weergegeven door volgende eenvoudige formule, afgeleid uit de analyse van meer dan 250 waterbekkens:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (E \text{ en } P \text{ in mm}) \quad (2)$$

waarin $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$ (T in °C) (3)

De berekende waarde van de afvoer A (mm) wordt nu bekomen door $A = P - E$, waarbij dus de verliezen door diepe infiltratie worden verwaarloosd.

De waargenomen afvoer Q en de berekende waarde A worden in Tabel III vergeleken. Het blijkt dat de formule van Turc een vrij goede schatting geeft voor het totaal volume afgevoerd over een periode van 5 jaar: de totale relatieve afwijking $\frac{Q - A}{Q}$ bedraagt slechts 3,6 %. De individuele jaarlijkse schattingen wijken echter alle veel meer af van de waarnemingen.

5. Simulatie van de Maandelijke Afvoeren met behulp van de Gemiddelde Afvoercoëfficiënt en een Neerslag-Index

De gemiddelde maandelijke temperaturen in het Zwalmbecken vertonen over een periode van 1 jaar een typisch sinusoidaal verloop dat als redelijk constant kan worden beschouwd. De vergelijking in

Fig. 7 werd afgeleid uit de gemiddelde temperaturen van 1967 tot 1972.

In onze streken vertoont de verhouding $\frac{Q}{P}$ (op maandelijke basis berekend) dikwijls een gelijkwaardige sinusoidale allure. CHAUDOIR [8] toonde dit aan voor de Vesder en haar bijrivieren.

De maandelijke afvoer Q wordt echter niet alleen beïnvloed door de neerslag P van de beschouwde maand. Afhankelijk van de doorlatendheid van de bodem van het waterbekken en van de capaciteit van de lagen die de rivier met grondwater spijzigen, zal de neerslag van een min of meer lange periode vóór de beschouwde maand een invloed uitoefenen.

Deze beschouwingen hebben het Laboratorium voor Hydraulica van de Rijksuniversiteit Gent (R.U.G.) er toe gebracht een neerslag-index te construeren die ook de invloed van de neerslag van de vorige maand in rekening brengt:

$$API = 0,859 P + 0,250 P_{D-1} + 0,111 P_{D-2} + 0,063 P_{D-3} \quad (5)$$

met P : de neerslag in mm van de beschouwde maand;

P_{D-1} , P_{D-2} , P_{D-3} : de neerslag (mm) voor respectievelijk 1, 2, 3 decaden vóór het begin van de beschouwde maand.

In deze index wordt dus (naar analogie met de „antecedent precipitation index” [9]) het grootste gewicht toegekend aan de neerslag van de beschouwde maand terwijl de neerslag van de voorgaande maand verdeeld is in deze van de 3 decaden, die elk met een afnemende gewichtcoëfficiënt in rekening gebracht worden. Tegelijkertijd werd er

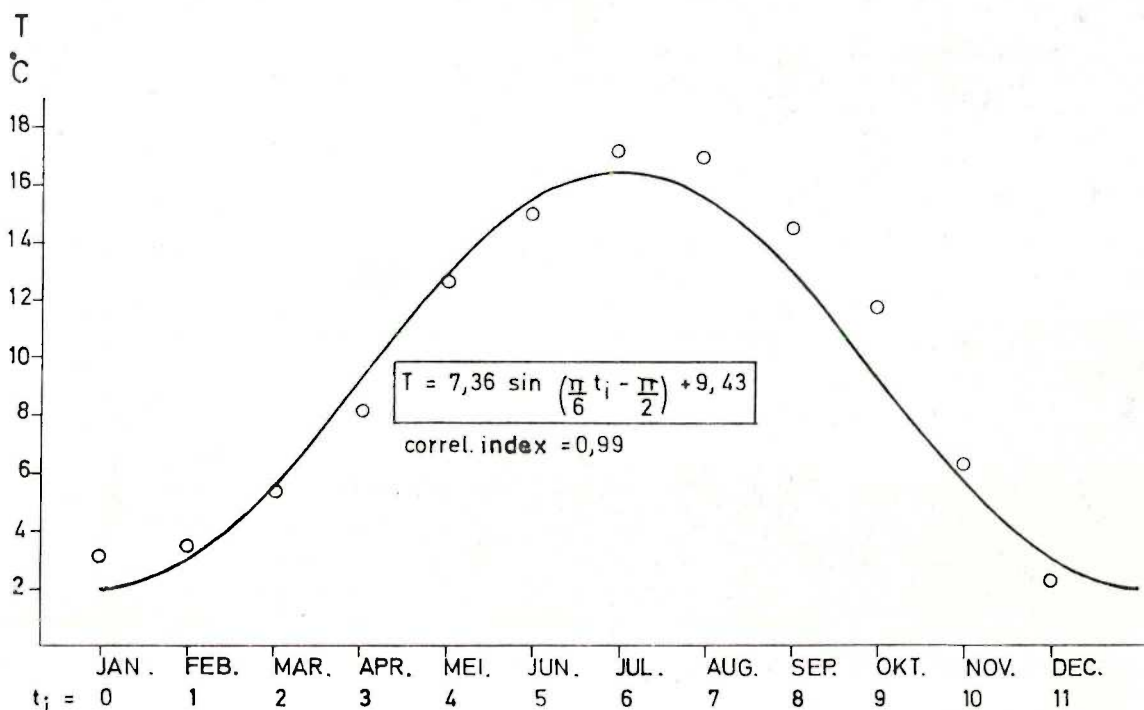


fig.7

$$API = 0,859 P + \frac{P}{3} (0,210 + 0,777 + 0,063)$$

$$= 0,859 P + 0,241 P$$

$$= P$$

voor gezorgd dat, in het geval de neerslag over elk van de drie decaden $P/3$ bedraagt, $API = P$ wordt.

In plaats van, zoals CHAUDOIR [8], de eenvoudige verhouding $\frac{Q}{P}$ te berekenen, hebben wij de verhouding $\frac{Q}{API}$ berekend. Deze verhouding

$$R = \frac{Q}{API} \tag{6}$$

wordt de afvoercoëfficiënt genoemd. Tabel II toont de maandelijkse waarden van P , API , A , R en T voor de periode 1967-1972.

Uit deze tabel blijkt dat de afvoercoëfficiënt niet gelijkmatig verdeeld is over het ganse jaar. Fig. 8 geeft de gemiddelde waarde van R voor de verschillende maanden van het jaar over de periode 1967-1972. Hierbij werd een kromme aangepast met de methode van de kleinste kwadraten. De vergelijking is de som van twee sinusfuncties, respectievelijk met een jaarlijkse en een halfjaarlijkse periode:

$$R = 0,248 \sin \left(\frac{\pi}{6} t_1 + \frac{\pi}{3} \right) + 0,06 \sin \frac{\pi}{3} t_1 + 0,345 \tag{7}$$

met t_1 het volgnummer van de maand van het jaar (Fig. 8). De correlatie blijkt zeer behoorlijk te zijn (correlatie-index: 0,99).

Vergelijken wij dit verloop van R met het verloop van de gemiddelde maandelijkse temperatuur T (Fig. 7), dan is het duidelijk dat een groot gedeelte van de fluctuatie van R moet verklaard worden door de fluctuatie van T . Figuur 9 toont het verband $R-T$, dat als lineair werd aangenomen. De afvoer in het Zwalmbecken blijkt bijgevolg sterk onderhevig te

zijn aan de verdampingsverschijnselen: in de perioden van hoge temperatuur (juli, augustus, september) valt de afvoer tot een laag niveau terug (zie ook Tabel II). Het aandeel van de bronnen, die de afvoer in deze perioden zou moeten ondersteunen, is dus blijkbaar vrij beperkt.

Met behulp van de formules (5) en (7) voor API en R zijn wij nu in staat om de maandelijkse afvoer A te berekenen, uitsluitend gebruik makend van de neerslagegevens per decade:

$$A = R \cdot API \tag{8}$$

De waargenomen afvoeren Q (Tabel II) en de aldus berekende afvoeren A (formule (8)) zijn weergegeven in Fig. 10.

Een globale maat voor de efficiëntie van een dergelijk model is uit te drukken als [10]:

$$r^2 = \frac{U_o - U}{U_o} \tag{9}$$

met

$$U_o = \sum \left(\frac{Q - \bar{Q}}{Q} \right)^2$$

$$U = \sum \left(\frac{Q - A}{Q} \right)^2$$

waarin \bar{Q} : het rekenkundig gemiddelde van Q over de ganse periode (67-72) (= 20,0 mm).

De aldus berekende efficiëntie r^2 bedraagt 88,9 %, hetgeen vrij hoog mag genoemd worden gelet op de eenvoudige formule $A = f(R, API)$.

Mogelijkheden die zouden kunnen leiden tot een nog grotere efficiëntie liggen onzes inziens in het uitbreiden van de formule (5) voor de neerslag-index tot perioden die verder teruggaan in het verleden en in het optimaliseren van de gewichtscoefficienten in deze formule.

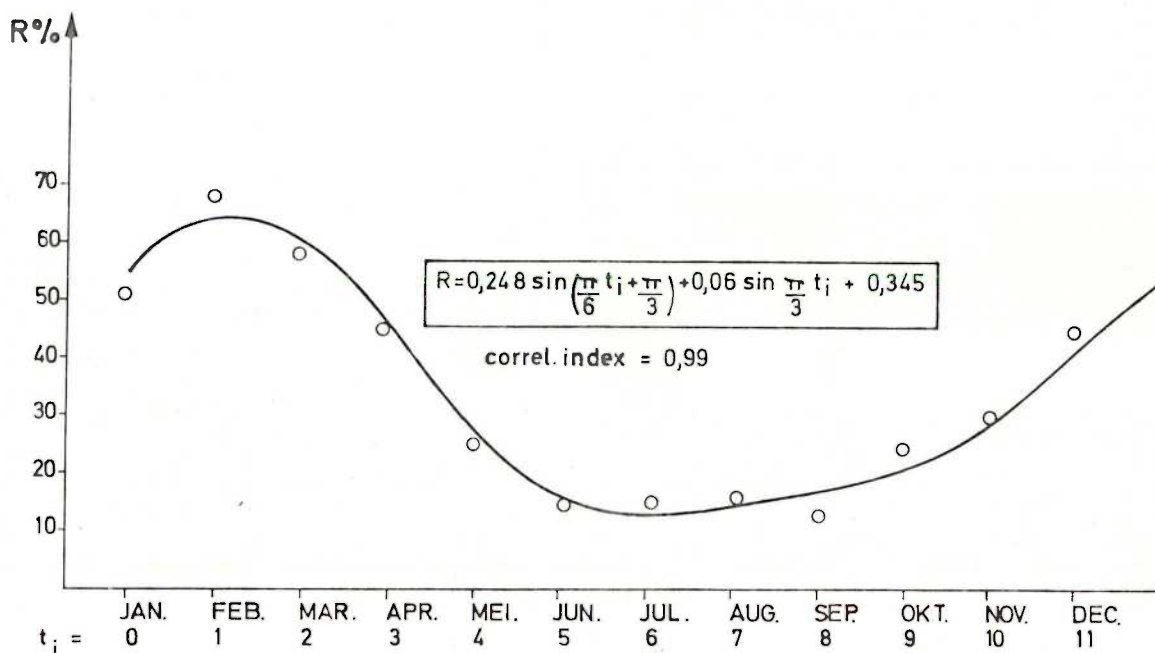


fig.8

Tabel II
Maandelijks totale en gemiddelden

	1967					1968					1969				
	P (mm)	API (mm)	Q (mm)	R (%)	T (°C)	P (mm)	API (mm)	Q (mm)	R (%)	T (°C)	P (mm)	API (mm)	Q (mm)	R (%)	T (°C)
Januari	31,3	46,0	60,5	—	3,4	78,0	81,3	57,8	71,1	2,3	25,4	35,6	44,7	—	4,8
Februari	50,9	49,2	40,4	82,1	5,6	71,9	69,4	47,9	69,0	2,1	53,2	50,2	40,9	81,5	2,0
Maart	55,5	55,0	47,0	85,5	7,0	48,3	49,0	28,3	57,8	6,5	48,3	46,3	30,6	66,1	4,5
April	46,0	46,5	34,6	74,4	7,8	39,4	40,1	13,3	33,2	9,7	47,7	47,8	20,2	42,3	8,1
Mei	67,7	62,4	13,9	22,3	13,0	52,6	53,2	14,9	28,0	11,1	58,7	59,8	12,5	20,9	13,4
Juni	44,2	51,5	13,9	27,0	14,6	49,3	47,5	5,3	11,2	15,3	93,3	86,6	11,4	13,2	15,3
Juli	40,1	43,2	13,1	30,3	18,1	134,8	124,1	12,7	10,2	16,7	50,5	60,4	5,6	9,3	18,4
Augustus	59,9	58,9	5,3	9,0	17,2	71,1	76,6	12,7	16,6	17,6	89,1	80,6	5,3	6,6	17,6
September	72,4	69,3	8,7	12,6	14,6	115,9	107,9	23,6	21,9	17,2	7,2	24,4	3,1	12,7	14,7
Oktober	82,3	79,3	11,8	14,9	11,9	52,2	64,7	32,2	49,8	12,4	7,5	8,2	2,5	30,5	13,0
November	43,4	48,7	19,7	40,5	5,0	26,0	28,8	22,3	77,4	5,4	97,6	85,4	8,7	10,2	7,0
December	68,8	64,4	30,2	46,9	2,7	61,6	56,1	23,4	41,7	0,6	53,0	57,8	23,7	41,0	0,2
Jaarlijks totaal of gemiddelde	662,4	674,4	299,2	40,5	9,99	801,0	798,7	294,4	36,9	9,73	631,5	643,1	209,2	30,4	9,91

Tabel II
Maandelijks totale en gemiddelden (vervolg)

	1970					1971					1972					Gemiddelde (1967-72)	
	P (mm)	API (mm)	Q (mm)	R (%)	T (°C)	P (mm)	API (mm)	Q (mm)	R (%)	T (°C)	P (mm)	API (mm)	Q (mm)	R (%)	T (°C)	R (%)	T (°C)
Januari	40,3	41,9	20,3	48,4	3,0	55,2	50,4	23,4	46,4	3,2	57,8	50,8	21,9	43,1	2,2	52,3	3,2
Februari	109,9	101,5	57,3	56,5	2,8	33,0	41,3	26,2	63,4	4,3	37,3	42,1	25,2	59,9	4,3	68,7	3,5
Maart	63,6	69,8	39,1	56,0	3,5	41,2	38,8	17,8	45,9	3,5	46,5	44,2	18,6	42,1	7,3	58,7	5,4
April	94,9	92,3	53,0	57,4	6,6	27,1	28,3	9,1	32,2	9,0	87,9	82,6	30,9	37,4	8,3	46,1	8,2
Mei	41,4	49,4	19,6	39,7	13,4	75,2	71,4	12,9	18,1	14,5	100,6	95,5	24,9	26,1	11,9	25,8	12,9
Juni	52,5	52,0	6,9	13,3	17,7	118,0	114,3	24,2	21,2	14,4	86,6	88,5	11,4	12,9	13,9	16,4	15,2
Juli	67,2	67,9	6,9	10,2	16,4	40,8	51,2	10,1	19,7	17,8	61,9	65,3	7,8	11,9	17,3	15,3	17,4
Augustus	39,2	41,8	4,7	11,2	17,2	50,0	53,2	6,8	12,8	17,6	67,5	68,3	27,6	40,4	16,0	16,1	17,2
September	92,2	82,9	5,5	6,6	15,6	32,7	32,7	5,4	16,5	14,1	70,6	66,5	5,9	8,9	12,3	13,2	14,8
Oktober	80,1	80,9	9,0	11,1	11,1	24,3	29,0	5,8	20,0	11,1	24,1	26,6	6,6	24,8	—	25,2	11,9
November	76,2	76,4	18,6	24,3	8,7	116,2	102,3	20,8	20,3	5,8	86,3	78,5	8,6	11,0	—	30,6	6,4
December	25,2	30,6	14,7	48,0	2,8	9,8	24,4	11,4	46,7	5,4	—	—	26,3	—	—	44,9	2,3
Jaarlijks totaal of gemiddelde	782,7	787,4	255,6	32,5	9,90	623,5	637,3	173,9	27,3	10,04	(727,1)	(708,9)	(189,5)	(26,7)	—	32,4	9,86

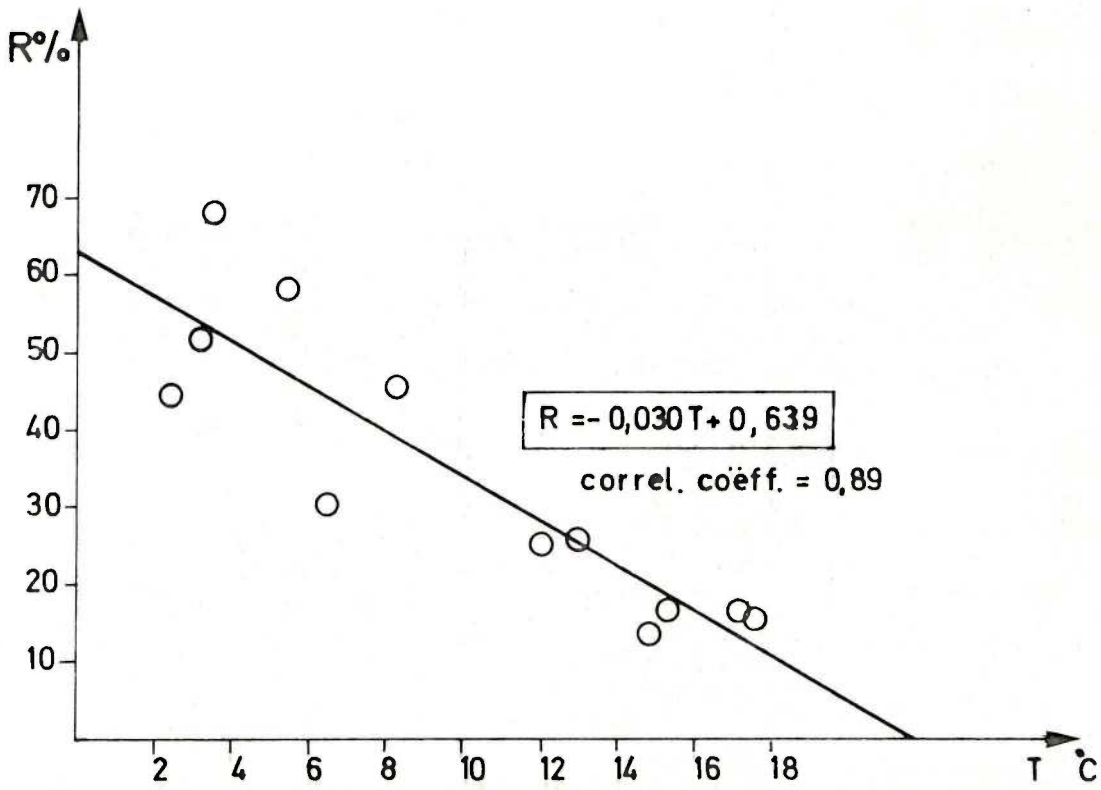


fig.9.

Waterbekken van de Zwalm

maandelijkse afvoer in mm

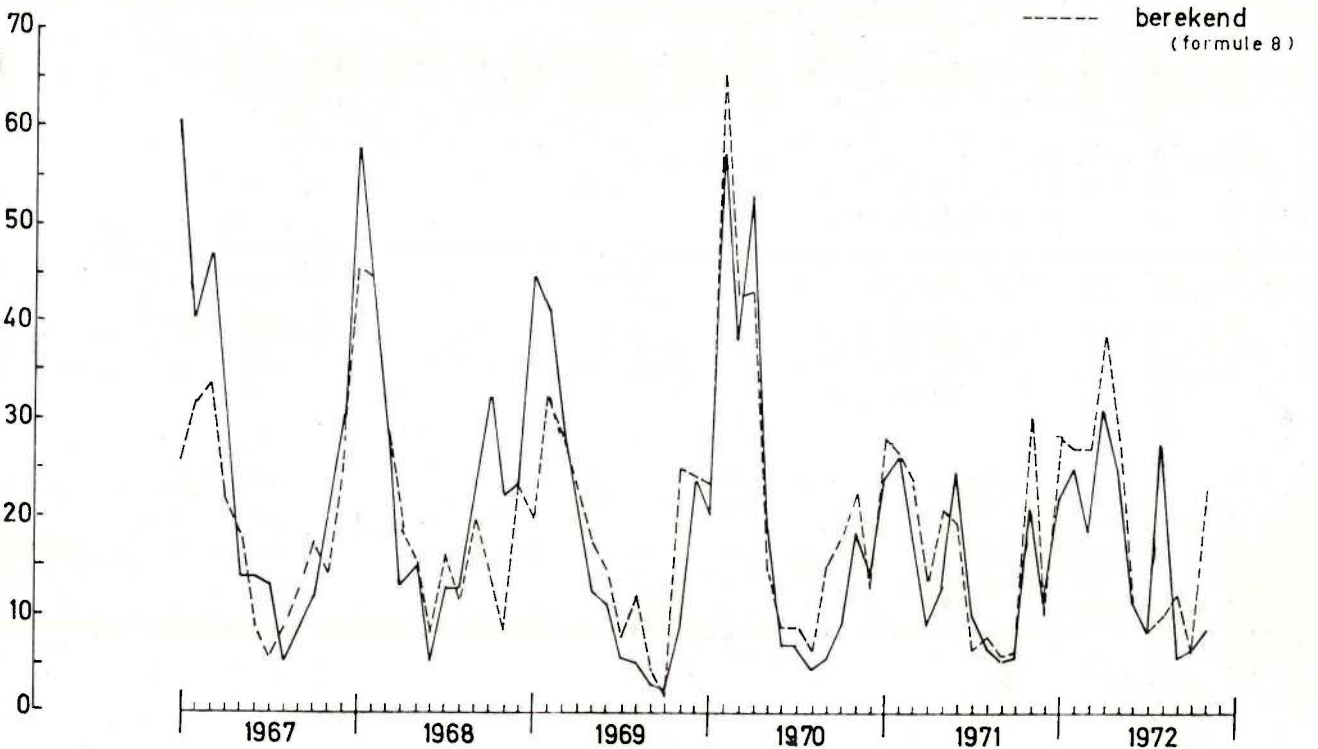


fig.10

6. Simulatie van de Dagelijkse Afvoeren met behulp van het Mathematisch Model V.U.B.

Door de Afdeling Hydrologie en het Centrum voor Statistiek en Operationeel Onderzoek van de Vrije Universiteit Brussel (V.U.B.) werd een conceptueel model opgebouwd om de dagelijkse afvoeren in een waterbekken te simuleren [11]. In dit mathematisch model worden alleen de dagelijkse waarnemingen van neerslag en temperatuur gebruikt. Uit de bespreking van de beschikbare gegevens (§ 3.1 en 3.2) is duidelijk dat dit model onmogelijk het verloop van de afvoer binnen de tijdsperiode van één dag zal kunnen simuleren. Hiertoe zouden op zijn minst continue waarnemingen van de neerslag (regenintensiteiten) moeten beschikbaar zijn, hetgeen tot voor kort nog niet het geval was.

Het model bevat niet-lineaire vergelijkingen met 8 parameters. Een eerste schatting van deze parameters met behulp van de lineaire regressiemethode, maar zonder optimalisering van de parameters, leverde reeds hoopvolle resultaten op. Fig. 11 geeft als voorbeeld de waargenomen en berekende dagelijkse afvoeren gedurende de winterperiode januari en februari 1968, terwijl Fig. 12 de maandelijkse afvoeren vergelijkt. Het blijkt dat het model de waargenomen afvoeren kwalitatief reeds zeer goed simuleert en zelfs ook kwantitatief goede benaderingen geeft. Het eerste jaar 1967 van de beschouwde periode is echter slecht gesimuleerd. Uit de samenvattende Tabel III blijkt echter dat ook de formule

van Turc en het *API*-model ditzelfde jaar zeer slecht benaderen.

7. Besluiten

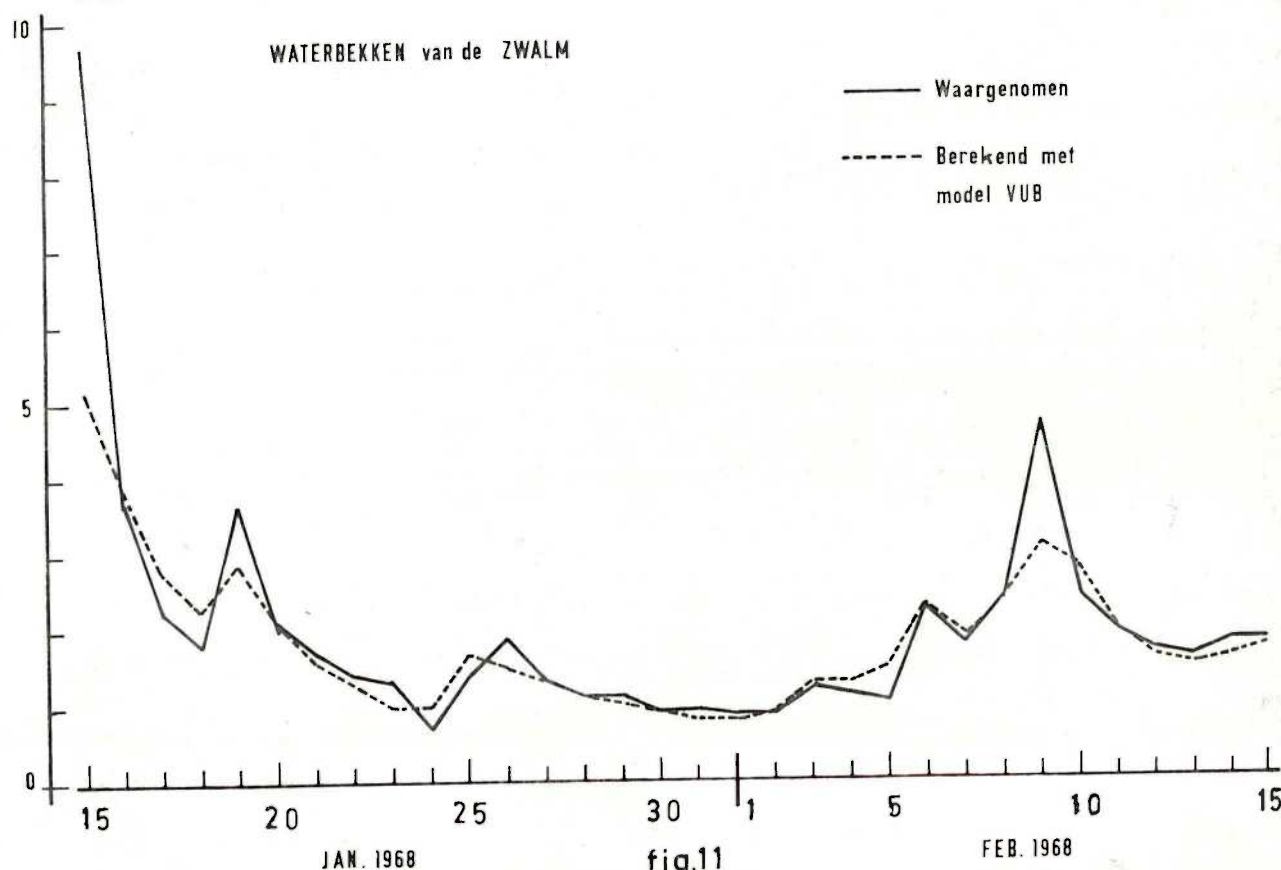
Tabel III vat de studie samen door de jaarlijkse totale afvoeren berekend volgens de drie verschillende methodes te vergelijken met de waargenomen afvoeren.

Allereerst weze opgemerkt dat de drie methodes de simulatie op een verschillende basis verwezenlijken: de formule van Turc geeft uitsluitend de totale jaarlijkse afvoer, het *API*-model berekent op maandelijkse basis, terwijl het model V.U.B. de dagelijkse gegevens aanwendt.

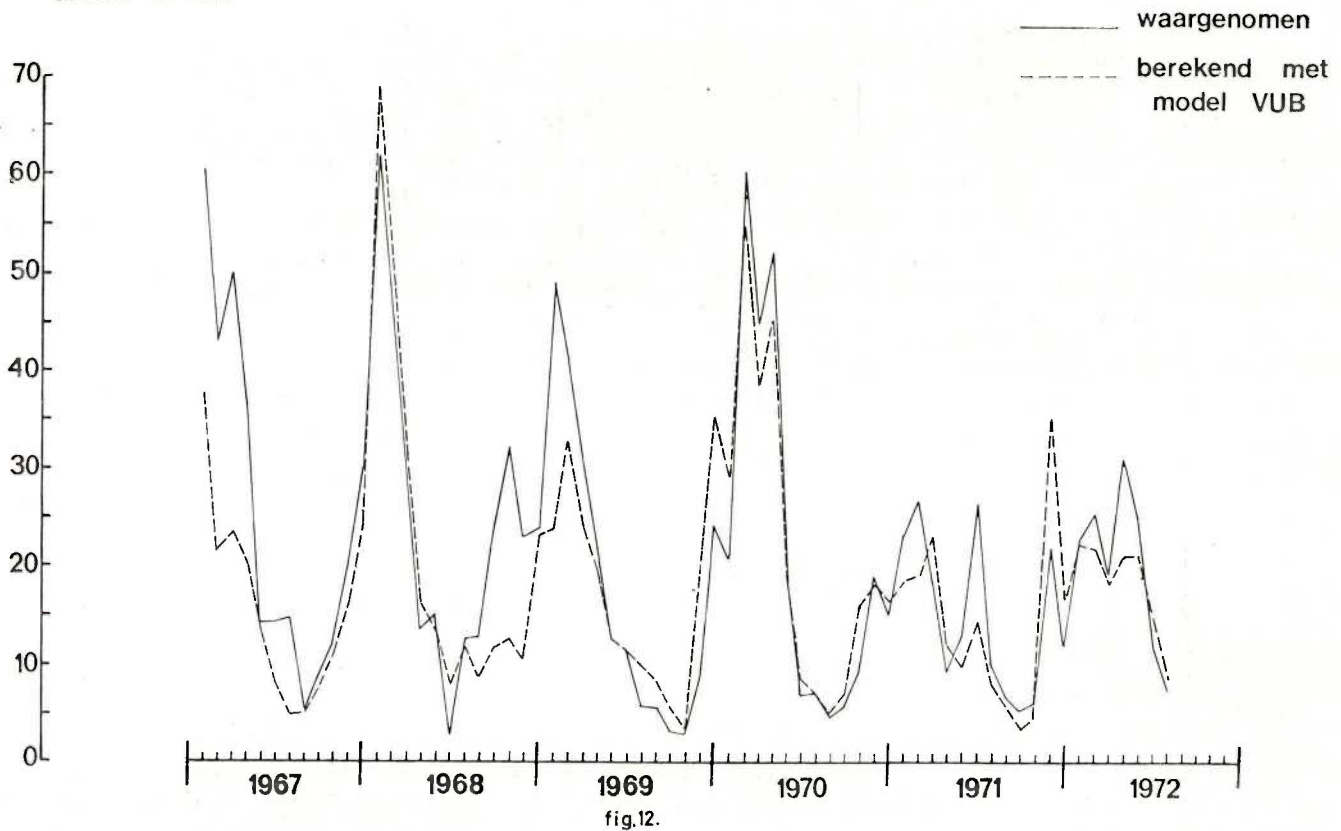
Alhoewel het *API*-model, in tegenstelling met de twee andere methodes, de temperatuur niet expliciet in rekening brengt, is toch duidelijk dat de invloed ervan impliciet bevat is in het sinusoidaal verloop van de afvoercoëfficiënt.

Opvallend is dat alle modellen het jaar 1967 slecht benaderen: de relatief hoge afvoer bij een relatief lage neerslag kon niet gesimuleerd worden. Een verklaring hiervoor kan onzes inziens gevonden worden in het feit dat de voorgaande jaren 1965 en 1966 zeer vochtig waren: respectievelijk 918 en 982 mm neerslag. Deze lange natte periode kan de kwartaire leemlaag (fig. 2) van het bekken praktisch met water verzadigd hebben, zodat een geringe aanvulling van het bodemvocht voldoende was om in 1967 de toe-

Dagelijkse Afvoer
in mm



Waterbekken van de Zwalm

maandelijkse
afvoer in mm

Tabel III

Vergelijking van de waargenomen en de berekende jaarlijkse afvoeren

Jaar	Waargenomen			Berekend					
	P mm	T °C	Q mm	volgens TURC op jaarlijkse basis		volgens API-model op maandelijkse basis		volgens model V.U.B. op dagelijkse basis	
				A mm	$\frac{Q-A}{Q}$ in %	A mm	$\frac{Q-A}{Q}$ in %	A mm	$\frac{Q-A}{Q}$ in % (*)
1967	662	10,0	299	208	+ 30,4	225	+ 24,7	190	+ 38,3
1968	801	9,7	294	313	- 6,5	256	+ 12,9	258	+ 13,8
1969	632	9,9	209	186	+ 7,1	210	- 0,5	203	+ 5,6
1970	783	9,9	256	299	- 11,9	267	- 4,3	263	- 1,5
1971	624	10,0	174	182	- 4,6	199	- 14,4	169	+ 4,5
Totaal 1967-71			1.232	1.188	+ 3,6	1.157	+ 6,1	1.083	+ 13,9
Totaal 1968-71			933	980	- 5,0	931	+ 0,2	893	+ 6,0

(*) Berekend op basis van afvoeren Q afgeleid uit een eerste ijkingskromme, verschillend van de huidige (cfr. § 3.2).

stand van volledige verzadiging te bereiken. De neerslag gedurende 1967 ging dan ook voor een uitzonderlijk groot deel naar de oppervlakkige afstroming en gaf aanleiding tot de hoge afvoer (ca. 46 % van de neerslag). Waarschijnlijk heeft dit verschijnsel ook nog zijn invloed laten voelen gedurende 1968.

Een belangrijk deel van de toekomstige hydrologische studiën zou dan ook kunnen gewijd worden aan de kwantificering van de vochtcapaciteiten in de kwartaire lagen. Basisgegevens hieromtrent zijn beschikbaar in de bodemkaarten maar deze zouden voor hydrologische toepassingen moeten bestudeerd worden.

De formule van Turc kan slechts aanvaard worden als globale schatting van de waterafvoer in het Zwalmbekken over een periode van meerdere jaren. De individuele jaarlijkse schattingen wijken voor elk jaar tamelijk veel af. Daarenboven zijn de toepassingen van een simulatie op jaarlijkse basis eerder beperkt en zeker niet voldoende voor een gemotiveerd ontwerp en beheer van reservoirs.

De simulatie op maandelijks basis met het *API*-model heeft het voordeel op zeer eenvoudige wijze tot vrij goede resultaten te leiden. Het resultaat voor de globale periode 1968-1971 is zelfs uitstekend.

De hoge afwijking voor 1971 is enigszins verwonderlijk: het model zal dan ook moeten getoetst worden voor een langere periode. Daarenboven rijst de vraag of een eenvoudig verloop van de afvoercoëfficiënt *R*, gelijkwaardig aan het hier berekende, geldig is voor alle waterbekkens (in onze klimaatzone). Het loont zeker de moeite dit verder te onderzoeken. Verder zou ook de optimalisering van formule (5) voor de neerslag-index, zoals aangeduid in § 5, tot nog betere resultaten kunnen leiden.

In verband met het mathematisch model V.U.B. kan worden opgemerkt dat bij de vermelde eerste simulatie de waarden van de parameters nog niet geoptimaliseerd werden. Gelet op het feit dat het model nu reeds de afvoeren kwalitatief goed weergeeft en voor de jaren 1969 tot en met 1972 de simulatie ook kwantitatief goed uitvoert, mag redelijkerwijze verhoopt worden dat een parameteroptimaliseringsprocedure (zoals b.v. [12]) tot de gewenste resultaten zal leiden.

Daarnaast kan trouwens ook gedacht worden aan een verbetering van het model door de optredende verschijnselen beter en vollediger te beschrijven, zoals de vorst- en dooiverschijnselen en de invloed van de bodemvochtcapaciteit.

Het hoeft geen betoog dat een dergelijk mathematisch model, dat in principe voor alle waterbekkens toepasbaar is, zeer veel potentiële gebruiksmogelijkheden bezit. Het laat o.a. toe de gevraagde lange afvoerreksen samen te stellen uitgaande van de dagelijkse neerslag- en temperatuurgegevens. Daarenboven wordt een inzicht verworven in de samenstellende delen van de afvoer en in de verliezen. Wanneer in een waterbekken ingrijpende wijzigingen zouden optreden inzake bodemgebruik (b.v. urbanisatie, industrialisatie, ontbossing of herbebossing), zullen de waarden van de parameters in het model eveneens veranderen. Het wordt dus

mogelijk aan de hand van het model voorspellingen te doen nopens de invloed van deze wijzigingen op het hydrologisch gedrag van het bekken.

Dankwoord

Het past hier het Provinciebestuur van Oost-Vlaanderen en de Tussengemeentelijke Maatschappij der Vlaanderen voor Waterbedeling (T.M.V.W.) te danken die deze studie financieren en technische bijstand verlenen.

De samenwerking met het Koninklijk Meteorologisch Instituut (K.M.I.), dat tal van klimatologische basisgegevens verstrekke en pluviometers in leen gaf, is uitstekend en wordt dan ook ten zeerste geapprecieerd.

Bijzondere dank gaat naar Prof. Dr. Ir. G. Vandewiele (Centrum voor Statistiek en Operationeel Onderzoek, V.U.B.) en Ir. F. De Smedt, navorser in de afdeling Hydrologie (V.U.B.), die tezamen met de senior auteur het conceptueel model ontwikkelden.

Literatuurlijst

- [1] VAN MARCKE-GOTTIGNY, M.C.: De geomorfologische kaart van het Zwalmbekken. Verhandelingen Kon. VI. Acad. Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België, Klasse der Wetenschappen, Jg. XXIX, nr. 99 (1967).
- [2] DE LEENHEER, L.: De natuurspiegel van Oost-Vlaanderen. Provinciebestuur van Oost-Vlaanderen (1966).
- [3] Bodemkaart van België — Blad 99E, Nederbrakel (1966).
- [4] HORTON, R.E.: Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 56 (1945), pp. 275-370.
- [5] STRAHLER, A.N.: Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 63 (1952), pp. 1117-1142.
- [6] VAN DER BEKEN, A.: Het hydrologisch onderzoek van de waterproblemen. Revue C-Tijdschrift, Vol. VI, Nr. 2 (1972), pp. 35-50.
- [7] TURC, L.: Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Thèse — Univ. de Paris, Faculté des Sciences (1953).
- [8] CHAUDOIR, J.: Introduction à l'Hydrologie de la Vesdre. Bull. C.E.R.E.S., Tome II (1947), pp. 251-354.
- [9] LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A. & PAULHUS, J.L.: Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Co., Inc. (1949), pp. 414.
- [10] WATT, W.E. & HSU, C.T.: Continuous Basin Snowmelt Runoff Simulation. Hydrology Symposium No. 8 (1970), Vol. 2, Nat. Research Council of Canada, Associate Committee on Geodesy and Geophysics, Subcommittee on Hydrology.
- [11] DE SMEDT, F.: Statistische studie van de relatie neerslag-afvoer toegepast op het waterbekken van de Zwalm. Thesis, Faculteit Toegepaste Wetenschappen V.U.B. (1973).
- [12] CHAPMAN, T.G.: Optimization of a Rainfall-Runoff Model for an Arid Zone Catchment. Publ. no. 96 (Symposium of Wellington, N.Z.), Association Internationale d'Hydrologie Scientifique (1970).

Bibliografie [4] en [5]

31 Rue Vautier

1040 Bxl.

Tel 02/47 00 14