

9882

256872



**RELATIES TUSSEN CONCENTRATIES VAN OPGELOSTE  
STOFFEN EN DEBIET VAN OPPERVLAKTEWATER IN HET  
ALGEMEEN EN IN DE ZWALMBEEK**

door

**F.P. DE TROCH**

Burgerlijk bouwkundig ingenieur en Doctor in de Toegepaste Wetenschappen,  
eerstaanwend assistent bij het Laboratorium voor Hydraulica van de R.U. Gent  
(Directeur: Prof. ir. G. TISON)

01341



# RELATIES TUSSEN CONCENTRATIES VAN OPGELOSTE STOFFEN EN DEBIET VAN OPPERVLAKTEWATER IN HET ALGEMEEN EN IN DE ZWALMBEEK

door

F.P. DE TROCH

Burgerlijk bouwkundig ingenieur en Doctor in de Toegepaste Wetenschappen,  
eerstaanwend assistent bij het Laboratorium voor Hydraulica van de R.U. Gent  
(Directeur: Prof. ir. G. TISON)

## INLEIDING

De steeds toenemende interesse voor en de noodzaak van bescherming en controle van de kwaliteit van onze oppervlaktewateren ligt aan de basis van het groeiend besef dat de chemische bestanddelen van het water een integraal deel uitmaken van het hydrologische systeem. Dit heeft geleid tot een grotere nadruk op studies betreffende de verbanden tussen de concentraties van opgeloste stoffen in het oppervlaktewater en andere hydrologische parameters.

De algemene oorsprong van het water in het beschouwde deel van de hydrologische cyclus is het neerslagwater. Een gedeelte van de neerslag wordt getransfereerd doorheen en beïnvloed door de vegetatie, de bodem en de diepere grondlagen en geeft aanleiding tot oppervlaktewater met debiet  $Q$  en concentraties  $C$  en uiteindelijk tot een afvoer of vracht  $L$  van opgeloste minerale stoffen.

Alle hogergenoemde delen van de cyclus worden in meerdere of in mindere mate beïnvloed door menselijke activiteiten en ingrepen.

## METHODEN VOOR DE BEREKENING VAN DE MASSA-AFVOER VAN OPGELOSTE STOFFEN

De algemene uitdrukking voor de massa-afvoer  $L$  van een opgeloste stof stromend doorheen een dwarsdoorsnede  $A$  van een waterloop in een tijdsinterval  $T$ , wordt gegeven door:

$$L = \int_0^T dt \int_A C(y,z,t) \cdot v(y,z,t) dy dz \quad (1)$$

met  $y$  en  $z$  de dwarsafmetingen van de doorsnede  $A$ ,  $t$  de tijd en  $v$  de watersnelheid.

In de onderstelling dat  $C$  uniform verdeeld is over de dwarsdoorsnede herleidt (1) zich tot:

$$L = \int_0^T C(t) \cdot Q(t) dt \quad (2)$$

met het waterdebiet

$$Q = \int_A v(y,z,t) dy dz \quad (3)$$

Indien metingen van dagelijkse gemiddelde waterdebieten en van concentraties voorhanden zijn en aangenomen wordt dat zij als representatief gelden voor de beschouwde dag, kan de jaarlijkse vracht berekend worden als

$$L = \sum_{i=1}^{365} C_i Q_i \quad (4)$$

In de praktijk rijst echter dikwijls het probleem dat de waarden van de concentraties  $C_i$  niet beschikbaar zijn omwille van het feit dat de beschouwde dwarsdoorsnede van de waterloop slechts periodisch wordt bemonsterd. Waarden van de dagelijkse gemiddelde debieten staan echter meestal wel ter beschikking. Voor de berekening van de gemiddelde dagelijkse concentraties, ontbrekend tussen de bemonsteringsdagen, kunnen dan in principe twee benaderingswijzen gevolgd worden:

(a) interpolatie-metoden steunend op waargenomen concentratiewaarden, volgens eenvoudige of meer ingewikkelde manieren. De invloed van de keuze van een dergelijke methode op de uitkomsten van de berekende vrachten wordt beschreven door Weber et al. {9}. Deze methoden hebben als nadeel dat zij in geen of slechts in beperkte mate gebruik maken van de informatie bevat in de beschikbare dagelijkse debieten;

(b) uitgaande van de ter beschikking zijnde gelijktijdige (dagelijkse) waarnemingen van concentraties en debieten wordt een mathematisch model geconstrueerd dat de concentraties  $C_i$  berekent, steunend op de debieten  $Q_i$  zodat

$$C_i = F(Q_i) \quad (5)$$

en (4) wordt:

$$L = \sum_{i=1} Q_i \cdot F(Q_i) \quad (6)$$

waarmede de jaarlijkse vrucht kan berekend worden.

### ALGEMENE MODELLEN VOOR DE RELATIE CONCENTRATIE-DEBIET

Steunend op min of meer theoretische grondslagen werden door Hal {6} en later door Balland {1} verschillende vormen voor het verband C-Q (vergelijking (5)) voorgesteld. In grote lijnen zijn deze relaties te rangschikken onder drie hoofdtypes:

$$\text{type I : } C = A \cdot Q^B \quad (7)$$

$$\text{type II : } C = A + B \log Q \quad (8)$$

$$\text{type III: } C = \frac{A}{1 + BQ^D} \quad (9)$$

De vraag welke van deze modellen het meest geschikt is voor de voorstelling van het verband concentratie – debiet voor een bepaalde waterloop is zeer moeilijk te beantwoorden.

Uit het onderzoek van de gegevens afkomstig van verscheidende stroombekkens concludeert Hall {6, p. 600} dat in tal van gevallen twee of meer types van modellen even goed kunnen aansluiten bij de waarnemingen.

Gelet op de relatieve onzekerheid en onnauwkeurigheid van de metingen van zowel concentraties als debieten, is het weinig waarschijnlijk dat, op basis van de meetgegevens alleen, definitief in het voordeel van een of andere modelvorm kan worden gekozen. Veel eerder lijkt het aangewezen om een modeltype te kiezen uitgaande van alle beschikbare globale kennis van het stroombekken en van de waterloop en daarna geschikte waarden of uitdrukkingen van de modelparameters te zoeken, steunend op de meetgegevens en eventueel op andere ter beschikking zijnde grootheden.

Het hieronder beschreven model voor de Zwalmbeek is een voorbeeld van deze laatste zienswijze en steunt op een model van het type I.

### MODEL VOOR DE RELATIE CONCENTRATIE – DEBIET IN DE ZWALMBEEK TE NEDERZWALM

De Zwalmbeek is een rechterbijrivier van de Schelde, in het interfluvium tussen Dender en Schelde. De uitmonding in de Schelde ligt zowat 20 km ten zuiden van Gent en de hier beschouwde meetdoorsnede voor

de debieten en de concentraties van opgeloste stoffen bevindt zich te Nederzwalm-Herlegem, op 1,7 km van de samenvloeiing met de Schelde.

Enige algemene informatie over het bekken en de rivier is samengevat in de tabel I en meer gegevens zijn te vinden in {4}.

TABEL I

Algemene gegevens van het Zwalmbekken {4}.

<b>Rivierbekken:</b>		
Oppervlakte	114	km <sup>2</sup>
Strahler-orde:	5	
Lengte waterloop:	21,5	km
Drainagedichtheid:	1,55	km/km <sup>2</sup>
Maximum hoogteverschil:	146	m
Gemiddelde hoogte boven zeespiegel:	61	m TAW
<b>Gemiddelde neerslag: (1951-1973): 736 mm</b>		
<b>Gemiddelde afvoer: (1967-1976): 270 mm</b>		
<b>Bodemgebruik (1973):</b>		
Landbouwgrond:	58%	
Grasland:	22%	
Bebossing:	9%	
Urbanisatie:	11%	

De gebruikte basisgegevens voor de bouw van het C-Q-model zijn (a) dagelijkse gemiddelde waterdebieten en (b) concentraties van opgeloste anorganische stoffen bekomen door analyse van steekmonsters genomen om de veertien dagen in de periode juli 1970 – december 1973. De analyses zijn uitgevoerd door het Laboratorium voor Analytische en Agrochemie (Prof. Dr. ir. A. Cottenie) van de R.U.G., na filtratie van de watermonsters. Naast een aantal sporenelementen zijn de gehalten bepaald van de belangrijkste ionen: Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> en van de nutriënten NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. De gemiddelden en de standaardafwijkingen van de gemeten concentraties zijn gegeven in de Tabel II.

TABEL II

Gemiddelde Concentraties en standaardafwijkingen gemeten in steekmonsters van het Zwalmwater (1970-73)

Element	Gemidd. (mg/l)	St. afw. (mg/l)	Element	Gemidd. (mg/l)	St. afw. (mg/l)
Cl <sup>-</sup>	62	10	Na <sup>+</sup>	34	14
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	360	68	K <sup>+</sup>	11	2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	87	14	Ca <sup>2+</sup>	118	18
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9,6	7,9	Mg <sup>2+</sup>	15	2,6
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	3,7	2,6			

Als basis voor het concentratie-debietmodel is het type I (vergelijking (7)) aangenomen. Daarnaast is eveneens verondersteld dat de concentraties gevonden in de watermonsters representatief zijn voor de beschouwde dag van de monstername.

### Structuur van het concentratie-debietmodel (1ste stap)

Steunend op de basisformule (7) is, voor alle hierboven vermelde anorganische bestanddelen van het beekwater, een eerste eenvoudige lineaire regressie uitgevoerd van  $\ln C$  op  $\ln Q$ . Voor alle onderzochte elementen is het gebleken dat hierbij nog belangrijke afwijkingen tussen de berekende regressierechte en de waarnemingen blijven bestaan. Hieruit blijkt dat nog andere veranderlijken dan het ogenblikkelijke (dagelijkse) debiet een rol spelen bij de bepaling van de concentraties van de elementen; deze invloeden worden verwaarloosd indien de parameters A en B beschouwd worden als constanten.

Bij nader onderzoek van de bekomen waarden van de regressiecoëfficiënten B is gebleken dat door de invoering van een zeker model-'geheugen' (door de verder besproken AFI-parameter), ten dele met de genoemde invloeden kan rekening gehouden worden. Daarenboven is ook vastgesteld dat de waarden van B nog een zekere afhankelijkheid van de waarde van het debiet Q vertonen.

Uiteindelijk is aldus de constante waarde van de exponent B vervangen door de uitdrukking:

$$B = A_o + A_f \cdot \ln(\text{AFI}) + A_q \cdot Q^N \quad (10)$$

waarin:

B: de exponent in de basisformule (7);

AFI: de 'antecedent flow index', een parameter die, in afnemende mate, rekening houdt met de debieten van de dagen voorafgaande aan de beschouwde dag;

N: exponent van de afhankelijkheid van B op de debieten Q;

$A_o$ ,  $A_f$  en  $A_q$ : parameters, te schatten uit de gegevens.

Bij deze stap van de modelopbouw rijzen twee problemen:

- de keuze van een algemene uitdrukking voor de AFI-parameter. Deze parameter introduceert een zeker 'debietgeheugen' in het model en maakt, zoals hieronder zal aangetoond worden, dat het model het lusvormig verloop van het C-Q-verband dat optreedt bij variërend debiet kan stimuleren;
- de keuze van een (constante) waarde voor de parameter N.

Wij kunnen hier niet in detail op de methoden en de problemen van de afschatting van de modelparame-

ters ingaan en vermelden slechts dat voor de AFI-parameter verschillende uitdrukkingen werden uitgetest en uiteindelijk is gekozen voor de uitdrukking die globaal voor alle beschouwde anorganische elementen de beste resultaten opleverde;

$$(\text{AFI})_i = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{j} Q_{i-j} \quad (11)$$

met i: de beschouwde dag van het jaar.

De parameter N wordt voor elk element bepaald door een lineaire regressie van  $\ln B$  op  $\ln Q$ .

Tenslotte worden de waarden van de parameters  $A_o$ ,  $A_f$  en  $A_q$ , voor elk element, gevonden uit een meervoudig lineaire regressie van B op  $\ln \text{AFI}$  en  $Q^N$ . De waarden van de parameters gevonden voor de verschillende elementen zijn gegeven in het eerste gedeelte van de tabel III.

### Structuur van het concentratie-debietmodel (2de stap)

Bij de analyse van de residuele afwijking tussen de concentraties berekend met het model (1ste stap) en de waargenomen waarden was het mogelijk rekening te houden met seizoensale trends in deze afwijkingen. Aldus is een periodische functie (periode 1 jaar) van de tijd aangepast voor de procentuele afwijkingen  $\Delta\%$ , door optimalisatie van de parameters R, S en  $\theta$ :

$$\Delta \text{ (in \%)} = R \cos \left\{ \frac{\pi}{26} (t_i - \theta) \right\} + S \quad (12)$$

waarin  $t_i$ : het nummer van de week van het burgerlijk jaar die de beschouwde dag i bevat. De waarden van de parameters R, S en  $\theta$  voor de verschillende elementen zijn opgenomen in tabel III.

### Samenvatting van de structuur van het model

Uitgaande van de kennis van de dagelijkse debieten:  $Q_i$ ,  $Q_{i-1}$ ,  $Q_{i-2}$  en  $Q_{i-3}$  van de beschouwde dag i en de drie voorgaande dagen worden achtereenvolgens berekend:

$$(\text{AFI})_i = Q_{i-1} + \frac{1}{2} Q_{i-2} + \frac{1}{3} Q_{i-3} \quad (13)$$

$$B_i = A_o + A_f \ln(\text{AFI})_i + A_q \cdot Q_i^N \quad (14)$$

$$C_{1,i} = A \cdot Q_i^{B_i} \quad (15)$$

$$\Delta_i = R \cos \left\{ \frac{\pi}{26} (t_i - \theta) \right\} + S \quad (16)$$

$$C_{2,i} = \frac{100}{100 - \Delta_i} \cdot C_{1,i}$$

(17)

Een voorbeeld van een grafische voorstelling van het model is gegeven in fig. 1 voor het  $\text{HCO}_3^-$ -gehalte.

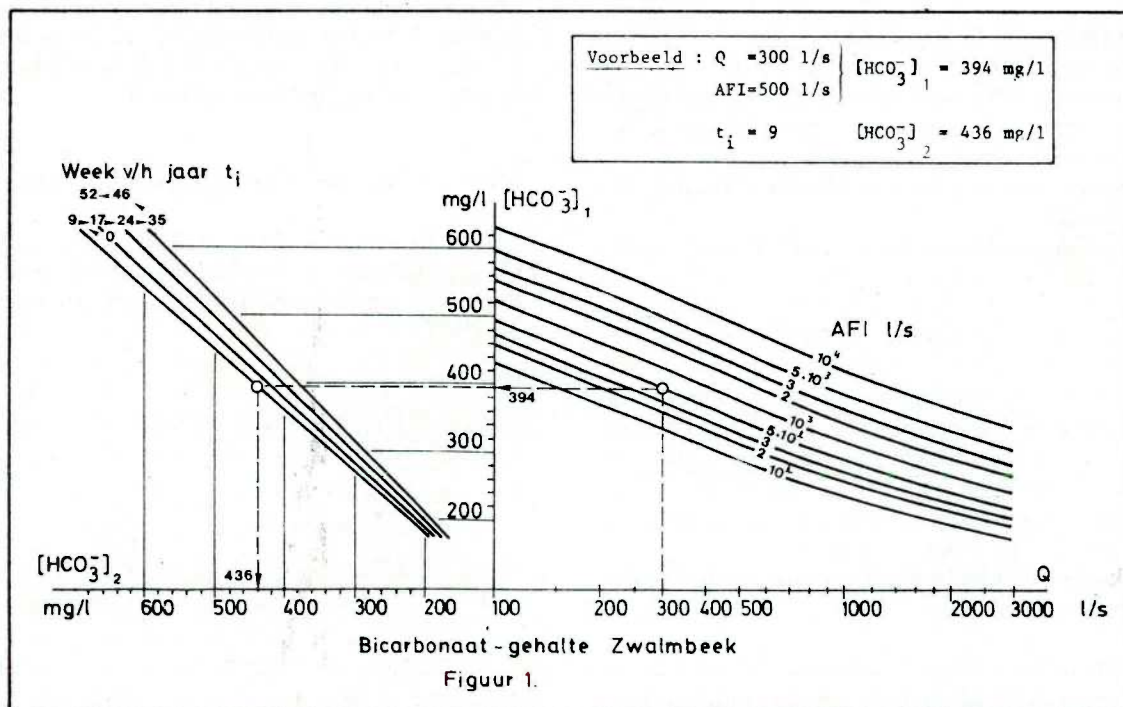
TABEL III  
Parameterwaarden en efficiëntie van het simulatiemodel (AFI en Q in l/s; C in mg/l)

Element (mg/l)	Eerste stap: $C = AQ^B$					Tweede stap: $\Delta\% = R \cos \left\{ \frac{\pi}{26} (t_i - \theta) \right\} + S$			Eff. r
	$B = A_0 + A_f \cdot \ln \text{AFI} + A_q Q^N$					R	S	$\theta$	
	$A_0$	$A_f$	$A_q$	N	A				
$\text{Cl}^-$	-0,0512	0,00649	1,0579	-0,276	20,09	5,794	0,482	-2	0,78
$\text{SO}_4^{2-}$	-2,0037	0,01936	2,0876	-0,011	54,60	8,032	-0,211	5,5	0,74
$\text{HCO}_3^-$	-0,1329	0,01786	1,7910	-0,277	54,60	7,404	2,239	9	0,91
$\text{Na}^+$	-0,0673	0,00645	2,5438	-0,361	7,389	4,006	2,861	0	0,87
$\text{K}^+$	-0,2234	-0,01927	0,3428	-0,153	2,718	14,86	-2,057	-14	0,73
$\text{Ca}^{2+}$	-0,15643	0,01820	1,3632	-0,232	20,09	10,11	-1,318	7	0,74
$\text{Mg}^{2+}$	-0,13857	0,01632	1,3943	-0,244	2,718	7,835	0,268	7	0,70
$\text{NO}_3^-$	-0,22952	0,04834	0,0404	0,236	1,000	(1)	(1)	(1)	0,89
$\text{PO}_4^{3-}$	0,55459	-0,06184	5,9190	-0,439	0,135	-	-	-	0,94

(1) Voor het nitraatgehalte is de correctiefactor benaderd door een som van twee sinusoidale functies, met jaarlijkse en halfjaarlijkse periode:

$$\Delta\% (\text{NO}_3^-) = S + R \left\{ \cos \frac{\pi}{26} (t_i + \theta_1) \right\} + T \sin \frac{\pi}{13} (t_i + \theta_2)$$

met  $S = -3,844$ ;  $R = 27,81$ ;  $\theta_1 = -28$ ;  $T = 10,32$ ;  $\theta_2 = -4,5$ .



## ENIGE RESULTATEN BEKOMEN MET HET MODEL

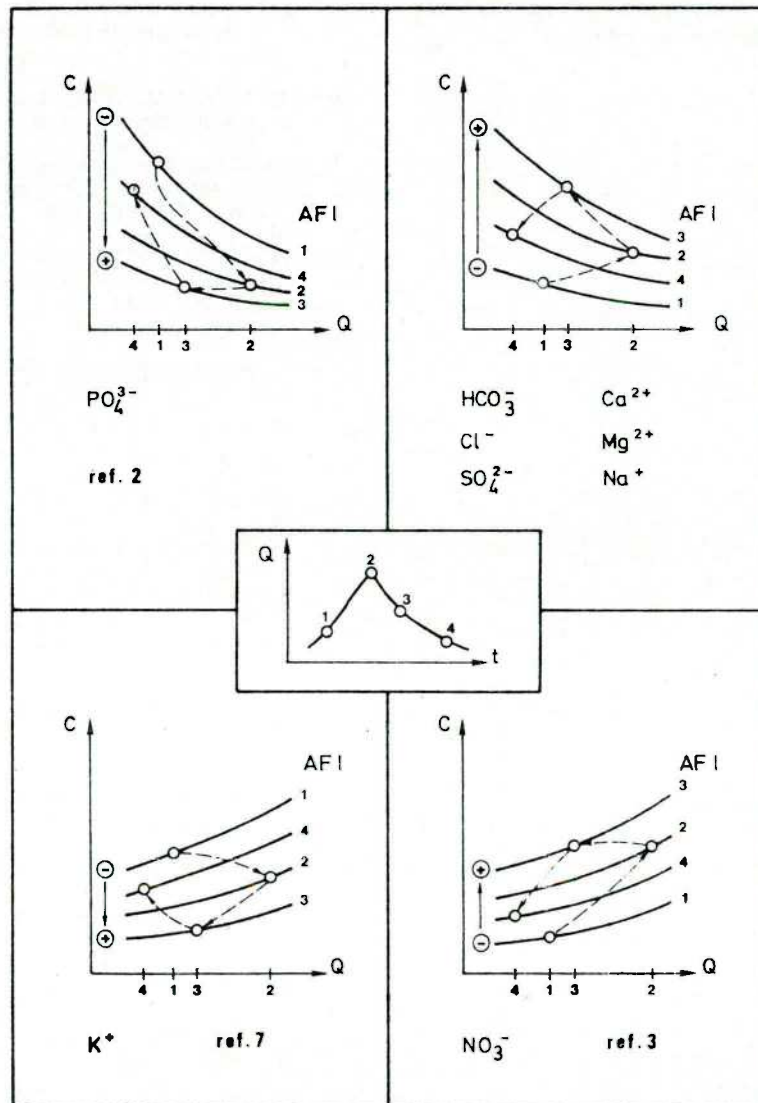
Een aantal resultaten bekomen met het hierboven vermelde model zijn reeds elders beschreven {5}.

Wij zullen hier slechts ingaan op de mogelijkheden geboden door het model op de in de recente literatuur {3,8} beschreven lusvormige verbanden tussen concentraties van anorganische bestanddelen en debieten te simuleren.

Uitgaande van mogelijke combinaties van de algemene trend van het concentratie-debietverband (dalende of stijgende concentraties met toenemende debieten bij constant blijvende AFI-index) met het mogelijke verloop van de concentraties bij constant debiet (dalend of stijgend met toenemende AFI), (kunnen de beschouwde elementen in vier groepen worden ingedeeld (zie fig. 2).

Beschouwt men een typisch debietsverloop  $Q$  in de tijd  $t$  dan is in fig. 2 getoond hoe de waargenomen lusvormige verbanden bekomen worden. Deze 'lusvorming' is in het model mogelijk gemaakt door de invoering van het modelgeheugen via de AFI-index. De studie van deze hysteresiseffecten bij variërende debieten, alsmede het onderzoek naar de onderliggende fysico-chemische verklaringen voor het gedrag van de verschillende elementen zoals weerspiegeld in de indeling in vier groepen, wordt door de auteur voortgezet.

Tenslotte is, steunend op het hieronder beschreven model, de massa-afvoer van de verschillende anorganische componenten in de Zwalmbeek te Nederzwalm berekend, uitgaande van dagelijkse debieten in de periode 1967-1973. Het jaarlijkse gemiddelde bedroeg over de beschouwde periode en per hectare: 140 kg chloride, 224 kg sulfaat, 790 kg bicarbonaat, 63 kg natrium, 25 kg kalium, 292 kg calcium, 34 kg magnesium en 50 kg nitraat.



Figuur 2. Lusvormig verband C - Q

## BESLUIT

Uitspoeling uit de bodem en afvloeijing via het grondoppervlak en het grondwater leiden tot een voor ieder element typische concentratie-debietrelatie.

Toenemende debieten leiden voor de Zwalmbeek tot een verdunning van de elementen  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  en  $\text{PO}_4^{3-}$ , gerangschikt volgens stijgend verdunningeffect. Voor  $\text{NO}_3^-$  en in geringere mate voor  $\text{K}^+$  leiden hogere debieten tot een concentratietoename.

Het relatieve aandeel van de verschillende componenten in het totale mineraalgehalte neemt, bij toenemende debieten, af voor  $\text{Na}^+$  en  $\text{HCO}_3^-$ , stijgt in geringe mate voor  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  en  $\text{Cl}^-$  en neemt aanzienlijk toe voor  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$  en  $\text{NO}_3^-$ .

Het voorgestelde simulatiemodel laat toe deze elementspecifieke concentratieschommelingen bij variërende debieten te berekenen en is in staat om de lusvormige hysteresiseffecten te simuleren.

## REFERENTIELIJST

- {1} BALLAND, P. & VARGET, G. (1978). Application des relations concentration-débit à l'estimation quantitative des apports en éléments fertilisants. *Techn. Eau Assain.* **385**, 17-31.
- {2} CAHILL, T., IMPERATO, P. & VERHOFF, F. (1974). Evaluation of Phosphorus Dynamics in a Watershed. *Proceed. ASCE, J. Env. Div.* **EE2**, 439-458.
- {3} DAVIS, J.S. & KELLER, H.M. (1983). Dissolved Loads in Streams and Rivers; Discharge and Seasonally Related Variations. *Proceed. Hamburg Symp., IAHS Publ.* **141**, 79-89.
- {4} DE TROCH, F. (1977). *Studie van de Oppervlaktewaterhydrologie van een Oost-Vlaams Stroombekken: de Zwalmbeek te Neder-Zwalm*. Gent: Fakulteit van de Toegepaste Wetenschappen R.U.G. (Doctoraal Proefschrift).
- {5} DE TROCH, F., DHAESE, A. & COTTENIE, A. (1976). Modeling of Mineral Content Variations in Natural Waters. In: *System Simulation in Water Resources* (ed. G. Vansteenkiste), p. 261-274. Amsterdam: North-Holland.
- {6} HALL, F.R. (1970-1971). Dissolved Solids-Discharge Relationships.  
1. Mixing Models. *Wat. Res. Research* **6**, 845-850.  
2. Applications to Field Data. *Wat. Res. Research* **7**, 591-601.
- {7} TURVEY, N.D. (1975). Water Quality in a Tropical Rain Forested Catchment. *J. Hydrol.* **27**, 111-125.
- {8} WALLING, D.E. & WEBB, B.W. (1980). The Spatial Dimension in the Interpretation of Stream Solute Behaviour. *J. Hydrol.* **47**, 129-149.
- {9} WEBER, H., CLUIS, D. & BOBEE, B. (1979). Accuracy Evaluation in the Calculation of Mass-Discharges. *J. Hydrol.* **40**, 175-184.





