

# Het transport van conservatieve stoffen in het Albertkanaal en de Kempische kanalen

F. DE SMEDT en A. VAN DER BEKEN  
Dienst Hydrologie, Vrije Universiteit Brussel

## 1. INLEIDING

De bevoorrading in drinkwater van de Antwerpse agglomeratie wordt verzekerd met water afkomstig uit het Albertkanaal.

Dit water wordt afgetapt in Oelegem uit het Albertkanaal en in Lier uit het Netekanaal.

Alhoewel dit water een redelijke kwaliteit heeft, is deze wijze van watervoorziening niet zonder problemen.

Inderdaad, het Albertkanaal en de Kempische Kanalen worden gevoed door Maaswater, dat sterk aan bezoedeling onderhevig is ten gevolge van industriële lozingen. Ook accidentele verontreinigingen kunnen optreden. Het is daarom noodzakelijk om het transport in de natuurlijke rivieren, in het Albertkanaal en de Kempische kanalen te voorspellen, teneinde het beheer van de watervangen te optimaliseren. De resultaten van een eerste fase van het onderzoek hieromtrent wordt in dit artikel voorgesteld.

Deze tekst steunt op de voordracht gehouden op de studiedag van 14 mei 1981 voor de Belgische Commissie voor de Studie van de Waterverontreiniging (De Smedt en Van der Beken, 1981). De volledige tekst van de voordracht is verkrijgbaar op aanvraag bij de auteurs.

## 2. THEORETISCHE BESCHOUWINGEN

Stoffen die opgelost zijn in het water van rivieren of kanalen zijn onderhevig aan een stroming gelijkaardig aan de stroming van het water. Dit wordt convector genoemd. In de meeste rivieren en kanalen is de concentratie van een opgeloste stof homogeen verdeeld in een dwarsdoorsnede van de waterstroom. Aldus bestudeert men slechts de variatie van deze concentratie volgens de longitudinale stroomrichting, en volgens de tijd. De convector is in dit geval de stroming van de pollutant gelijk aan de gemiddelde longitudinale waterstroming.

De opgeloste stoffen zijn ook onderhevig aan een dispersieve stroming. Deze beweging is een gevolg van moleculaire diffusie, turbulente menging en menging ten gevolge van variaties in een dwarsdoorsnede tussen de werkelijke waterstroming en de gemiddelde waterstroming. De dispersieve stroming wordt evenredig genomen met de concentratiegradiënt (wet van Fick).

De hoeveelheden aan opgeloste stoffen zijn afhankelijk van lozingen en onttrekkingen in de rivieren of kanalen. Bovendien wordt het gehalte ook beïnvloed door de chemische en biochemische reacties die plaats grijpen tussen de ver-

schillende opgeloste componenten. Tenslotte kunnen de opgeloste bestanddelen ook uit de waterfase treden door precipitatie of door adsorptie op sedimenten.

Wanneer het principe van behoud van massa, van een bepaalde stof, uitgedrukt wordt voor een elementair volume in de rivier (Figuur 1), dan wordt de volgende stromingsvergelijking bekomen :

$$S \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( DS \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial QC}{\partial x} + q_i C_i - q_u C + RS \quad (1)$$

Waarin C de concentratie is, Q het waterdebiet, D de dispersiecoëfficiënt,  $q_i$  het geloosd waterdebiet per rivierlengte,  $C_i$  de concentratie in dit water,  $q_u$  het onttrokken waterdebiet per lengte, R de totale opbrengst ten gevolge van reacties, S de gemiddelde natte doorsnede van de rivier, t de tijd, en x de longitudinale lengte langs de rivier.

Massabehoud van de hoeveelheid water geeft

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = q_i - q_u \quad (2)$$

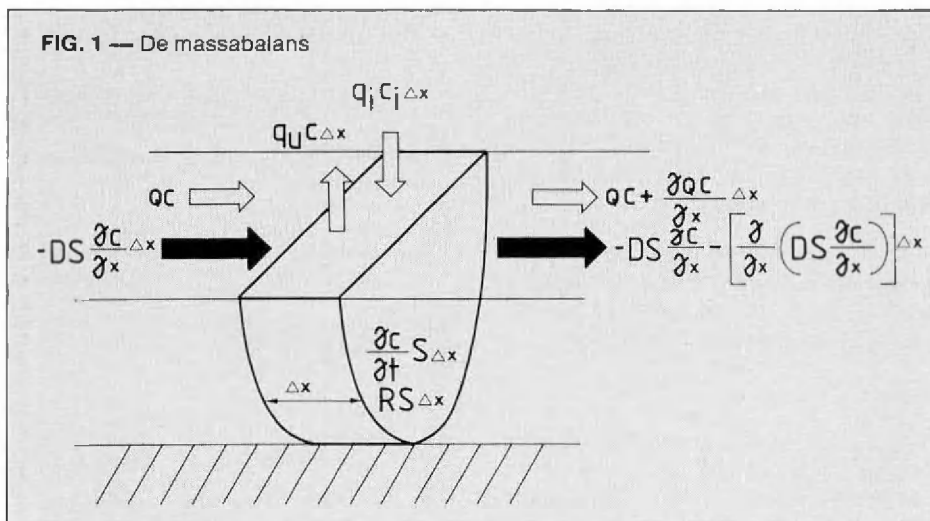
Opgeloste stoffen die met elkaar reageren vormen *samengestelde systemen*. Voorbeelden hiervan zijn nitraten en fosfaten. Voor de simulatie van samengestelde systemen moeten de stromingsvergelijkingen voor al de componenten van het systeem tegelijk worden opgelost. Een ingewikkeld probleem hierbij is de specificatie van de verschillende reacties die voorkomen in het systeem.

Opgeloste stoffen die niet afhankelijk zijn van de concentraties van andere opgeloste stoffen noemt men *enkelvoudige systemen*. Indien de totale hoeveelheid van de opgeloste stof verandert, bijvoorbeeld door biodegradatie of adsorptie, spreekt men van *niet-conservatieve enkelvoudige systemen*. Indien er geen processen optreden die de totale hoeveelheid in het water veranderen, spreekt men van *conservatieve enkelvoudige systemen*. In dit geval is de term R in de stromingsvergelijking gelijk aan nul. Meestal kan men ook veronderstellen dat de variatie van de term DS volgens x verwaarloosbaar is, zodat de stromingsvergelijking kan geschreven worden als

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{q_i}{S} (C_i - C) \quad (3)$$

waarin  $v = Q/S$  de gemiddelde stroomsnelheid van het water is.

FIG. 1 — De massabalans



Omdat de coëfficiënten in de stromingsvergelijkingen afhankelijk zijn van de plaats en de tijd, zijn exacte analytische oplossingen niet mogelijk. In dit geval zal men zijn toevlucht moeten nemen tot numerieke oplossingen op de computer.

Indien echter de concentratievariatie in een bepaalde plaats uitgedrukt wordt in

functie van een bepaalde concentratievariatie, op een afstand  $L$  stroomopwaarts, dan kan men een benaderende analytische oplossing bekomen door gemiddelde coëfficiënten te kiezen voor het rivierpand tussen deze beide plaatsen (zie bijvoorbeeld De Smedt and Wierenga, 1978).

toenemend tot  $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  in 1979 ten gevolge van verbredingswerken. Gemiddeld is dit  $43,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

Wanneer we ons beperken tot conservatieve enkelvoudige parameters, zoals chloriden en fluoriden, dan geeft vergelijking (4) de concentratie in Herentals in functie van de concentratie in Luik. Hierbij werd verondersteld dat de input in Maastricht identiek is aan deze van Luik. Wanneer men de concentratiemetingen van Luik en Maastricht vergelijkt, blijkt deze veronderstelling aanvaardbaar te zijn.

De concentratie  $C_2$  op een afstand  $L$  stroomafwaarts van de plaats met concentratie  $C_1$  kan dan geschreven worden als

$$C_2 = C_0 + \int_{-\infty}^t \frac{\sqrt{P} C_1(t-\tau)}{\sqrt{4\pi \tau / t_0}} \exp \left[ \frac{P (1-\tau/t_0)^2}{-4 \tau / t_0} - (1-F) \frac{\tau}{t_0} \right] \frac{d\tau}{\tau} \quad (4)$$

waarin  $\tau$  een integratie-variabele is

$$\text{met } c_0 = c_1 \left[ 1 - \exp \frac{P}{2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4(1-F)}{P}} \right) \right] \quad (5)$$

Hierin zijn de volgende parameters geïntroduceerd.

— een gemiddelde looptijd van het water tussen punten 1 en 2 gegeven door

$$t_0 = L/v \quad (6)$$

— een verdunningsparameter, gelijk aan 1 min de verhouding tussen het totale geloosde debiet en het gemiddelde debiet in de rivier

$$F = 1 - \frac{q_1 L}{vS} = 1 - \frac{q_1 L}{Q} \quad (7)$$

merk op dat  $F$  altijd kleiner is dan 1.

— een getal van Peclet, dat de verhouding geeft tussen convectieve en dispersieve stroming

$$P = \frac{vL}{D} = \frac{L^2/D}{t_0} \quad (8)$$

De oplossing in geval van niet-conservatieve enkelvoudige systemen wordt gegeven door De Smedt en Van der Beken (1981).

Vermits de concentraties in Luik en Herentals voor chloriden en fluoriden wekelijks opgemeten werden, kan men met vergelijking (4), de stromingsparameters  $C_0$ ,  $t_0$ ,  $F$  en  $P$  berekenen door een optimalisatieproces, waarbij de kwadraten van de verschillen tussen gemeten en berekende concentraties in Herentals geminimaliseerd worden. Details van de berekeningen voor chloride vindt men in Ideler, 1980. De resultaten voor chloride en fluoride worden besproken in De Smedt et al., 1981.

In een eerste poging werden waargenomen concentraties gebruikt, wekelijks opgemeten gedurende de periode 1973-1979. De bekomen parameterwaarden voor chloriden, gegeven in tabel 1, zijn dus gemiddelde waarden voor de ganse periode 1973-1979.

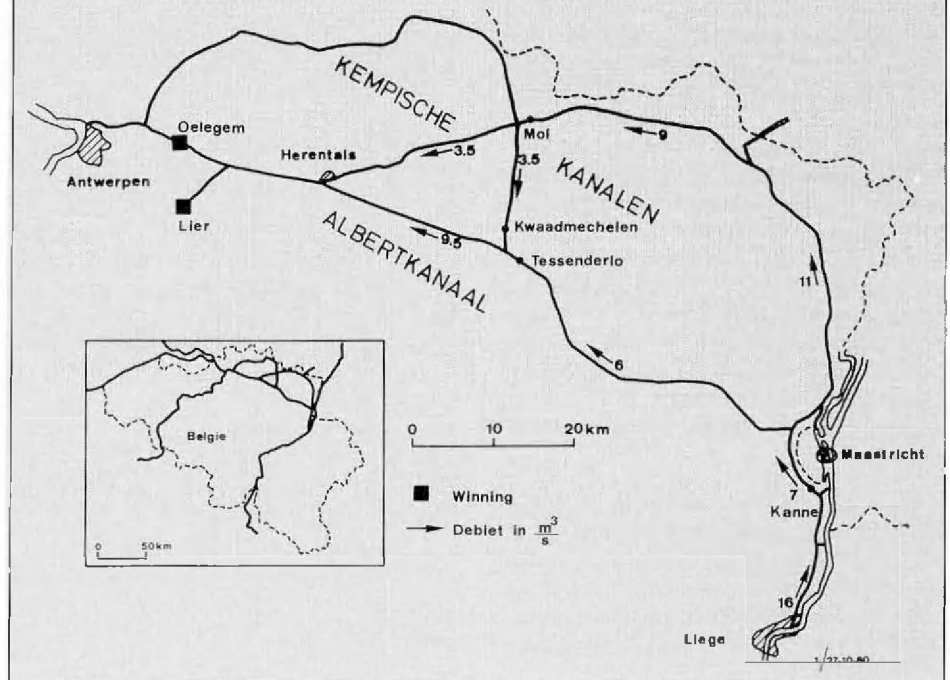
De basisconcentratie van  $C_0 = 18,7 \text{ mg/l}$  in Herentals is te wijten aan de chloride-lozingen van de mijnindustrieën te Eisden. In Eisden wordt da-

### 3. TOEPASSINGEN

#### 3.1. Het equivalent kanaalmodel

Een eenvoudig model voor de simulatie van het transport van opgeloste stoffen tussen Herentals en Luik kan als volgt bekomen worden. Het kanalenstelsel tussen Luik en Herentals wordt vervangen door één equivalent kanaal, met constante doorsnede. De lengte  $L$  van het equivalent kanaal kan geschat worden als een gewogen gemiddelde van de lengte van de verschillende wegen waarlangs het water kan stromen van Luik of Maastricht naar Herentals. De gewichtscoëfficiënten zijn de verhoudingen tussen de specifieke waterdebieten en het totale waterdebiet. Met geschatte debieten, die als representatief worden beschouwd door de bevoegde instanties (zie Figuur 2), vindt men een waarde van ongeveer 100 km voor  $L$ . Het watervolume van het equivalent kanaal wordt gelijk genomen aan het volume van het kanalenstelsel tussen Luik en Herentals. Schattingen leiden tot  $37 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  in 1973

FIG. 2 — Situatie Albert- en Kempische Kanalen met geschatte debieten.



**TABEL 1. Optimalisatie resultaten voor chloriden in de periode 1973-1979 gemeten te Luik en Herentals.**

Parameter	Gemiddelde waarde	95 % betrouwbaarheidsinterval
$C_0$	18,7 mg/l	15,6 - 21,8
$t_0$	48,2 dagen	42,8 - 53,6
F	0,892	0,843 - 0,950
P	2,06	1,41 - 2,71

**TABEL 2. Optimalisatiereultaten voor fluoriden voor de periode 1973-1979.**

Parameter	Gemiddelde waarde	95 % betrouwbaarheidsinterval
$t_0$	44,8 dagen	39,7 - 49,9
F	0,850	0,821 - 0,878
P	3,46	2,29 - 4,64

gelijks ongeveer 5.000 m<sup>3</sup> water geloosd met een chlorideconcentratie van 5 g/l. Met de geschatte waterdebieten kan men berekenen dat dit een concentratie zou geven van 26,2 mg/l in de Zuid-Willemsvaart, hetgeen zou resulteren in een concentratie van 14,1 mg/l in Herentals na de samenvloeiing van de verschillende kanalen. Deze waarde komt overeen met de geoptimaliseerde waarde.

De gemiddelde looptijd bedraagt 48,2 dagen. Met het geschatte gemiddeld watervolume van 43,5 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> vindt men een waterdebiet van 10,4 m<sup>3</sup>/sec, wat zeer goed overeenkomt met het geschatte waterdebiet te Herentals van 13 m<sup>3</sup>/sec. De geschatte stroomsnelheid bedraagt 0,024 m/sec, hetgeen eveneens een realistische waarde is.

Het geschatte Peclet-getal resulteert in een dispersiecoëfficiënt van 1165 m<sup>2</sup>/sec. Dit is zeker geen realistische waarde, vermits de dispersiecoëfficiënten vermeld in de literatuur één eenheid kleiner zijn. Deze onrealistische waarde is duidelijk een gevolg van de veronderstellingen die geleid hebben tot het equivalent kanaalmodel. In de werkelijkheid stromen de opgeloste stoffen langs verschillende wegen naar Herentals. Dit resulteert in een grote spreiding van de opgeloste stoffen in Herentals. Het equivalent kanaalmodel kan deze grote spreiding alleen verklaren door een « onrealistisch » grote dispersiecoëfficiënt. De geschatte verdunningsparameter bedraagt ongeveer 0,9. Dit betekent dat het totaal geloosd watervolume, tussen Luik en Herentals, 10 % zou bedragen van het totale debiet.

Een voorbeeld van berekende en gemeten chlorideconcentraties is gegeven in Figuur 3, voor het jaar 1976. De punten geven de gemeten waarden, terwijl de volle lijn de berekende concentratievariatie aangeeft. Men bemerkt een goede overeenkomst.

De resultaten van de optimalisatie, uitgevoerd op de fluoridegegevens van de periode 1973-1979, worden gegeven in Tabel 2. Bij deze optimalisatie werd  $C_0$  gelijkgesteld aan nul, omdat er geen fluoride lozingen voorkomen.

De gemiddelde looptijd bedraagt ongeveer 45 dagen. Dit komt zeer goed overeen met de waarde bekomen voor de chloriden. Ook de Peclet waarden komen zeer goed overeen, evenals de verdunningsparameter. De 95 % betrouwbaarheidsintervallen, resulterende uit beide optimalisaties, overlappen elkaar gedeeltelijk voor elke parameter. Dit betekent dat statistisch gezien beide optimalisaties gelijkwaardige uitkomsten geven.

Een voorbeeld van berekende en gemeten fluorideconcentraties wordt gegeven in Figuur 4, voor het jaar 1976. De overeenkomst tussen gemeten (punten) en berekende (volle lijn) concentraties is minder goed dan in het geval van de chloriden. Maar de variaties van de gemeten fluorideconcentraties zijn ook veel onregelmatiger in vergelijking met deze van de chloriden.

De optimalisaties werden ook uitgevoerd voor elk jaar van concentratiemetingen afzonderlijk. Voor de chloridegegevens werden slechts drie parameters geoptimaliseerd, omdat verondersteld werd dat de waarde van  $C_0 = 18,7$  mg/l niet afhankelijk was van de tijd. Geen optimalisatiereultaten werden bekomen voor fluoriden voor de jaren 1974 en 1977, waarschijnlijk te wijten aan de weinig varieërende waarnemingen gedurende deze jaren. De berekende concentraties, resulterende uit deze optimalisaties, worden getoond door de stippellijnen in Figuur 3, voor de chloriden van 1976, en in Figuur 4 voor de fluoriden van 1976. Men bemerkt dat de overeenkomst met de metingen verbeterd is.

De gemiddelde waarden en de 95 % betrouwbaarheidsintervallen voor de looptijd werden uitgezet volgens de jaren, in Figuur 5. Een lineaire regressie werd uitgerekend, rekening gehouden met de verschillende betrouwbaarheidsintervallen

$$t_0 = 33,6 + 2,58(N-73) \quad (9)$$

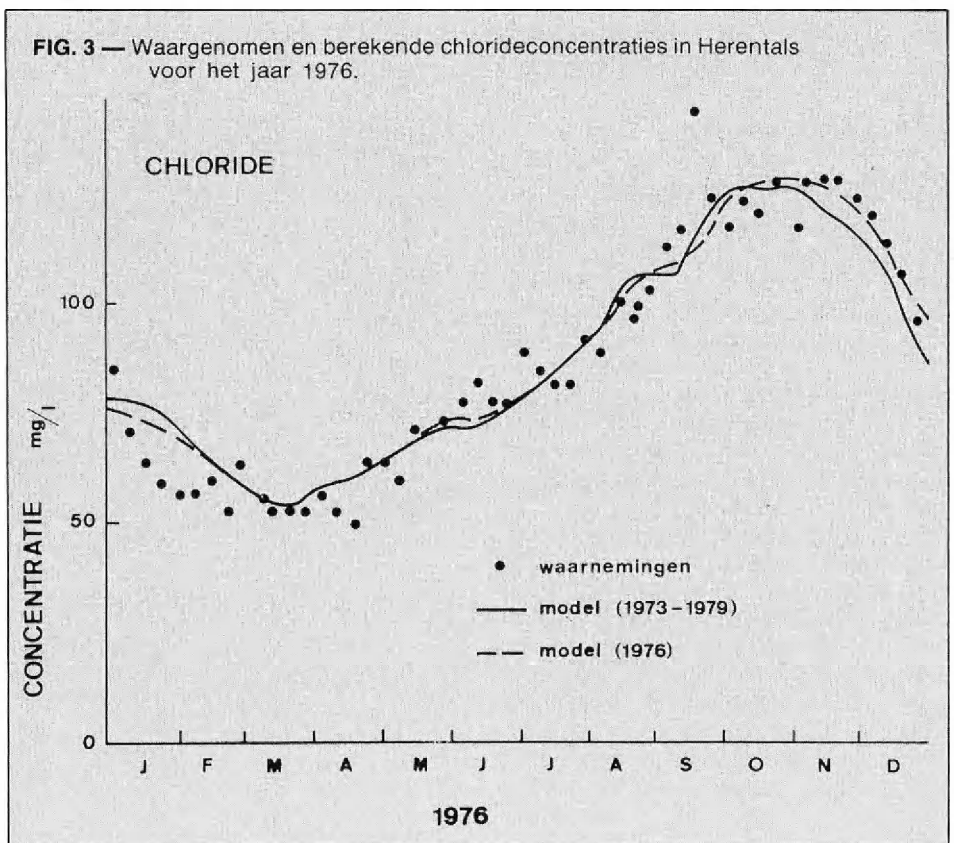
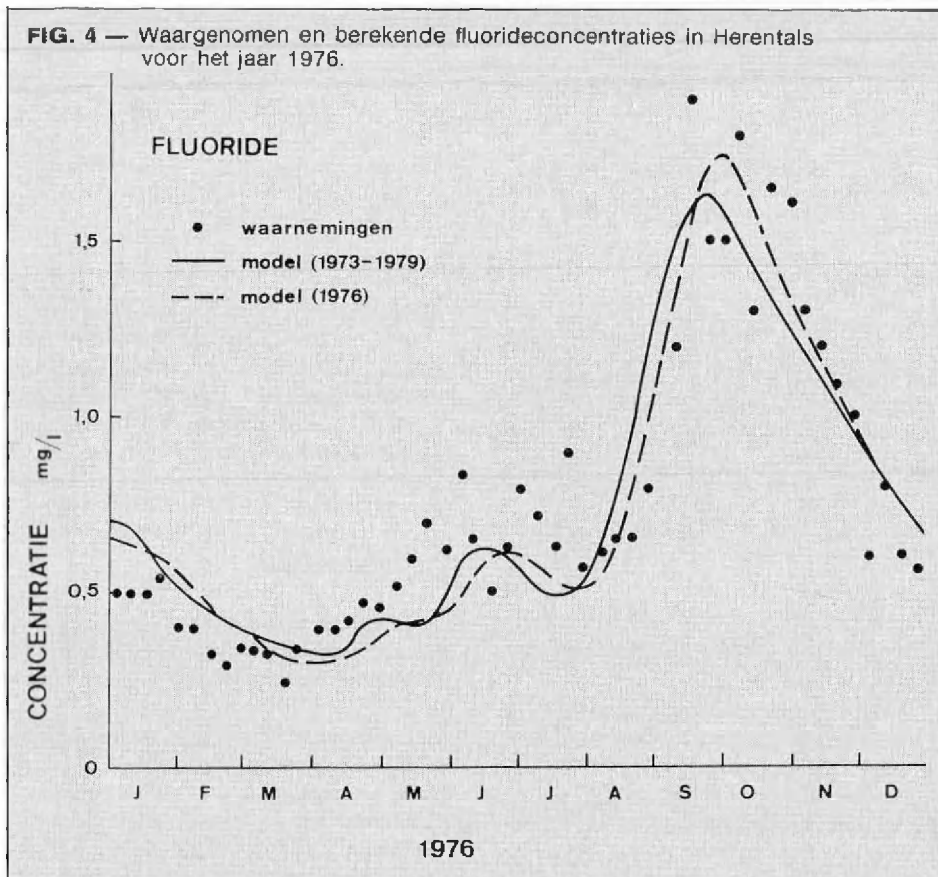


FIG. 4 — Waargenomen en berekende fluorideconcentraties in Herentals voor het jaar 1976.



Het 95 % betrouwbaarheidsinterval van de richtingscoëfficiënt bedraagt 1,08-4,08. De looptijd vertoont dus een significante stijging met de jaren. De looptijd neemt toe van 33,6 dagen in 1973 tot 49,1 dagen in 1979. Dit is zeer waarschijnlijk te wijten aan de toename van het totaal watervolume in het kanalenstelsel, ten gevolge van de verbredingswerken in de periode 1973-1979. Berekenen we de stroomsnelheden met deze looptijden, en daaruit de debieten uitgaande van de geschatte watervolumes, dan vindt men 12,7 m<sup>3</sup>/sec in 1973 en 11,8 m<sup>3</sup>/sec in 1979. Dit toont aan dat het debiet vrij constant bleef gedurende deze periode zodat de toename in looptijd vrijwel uitsluitend kan verklaard worden door de verbredingswerken.

### 3.2. Onderzoek van de kanaalpannen

De kanaalpannen, waarvoor concentratiemetingen aan de in- en uitgang beschikbaar zijn, kunnen geanalyseerd worden met behulp van vergelijking (4) en de optimalisatieprocedure. De metingen in de verschillende takken van het kanalenstelsel zijn echter schaars. Alleen in Kanne werden wekelijkse metingen van chloride verricht gedurende de periode 1973-1977. Verder beschikken wij slechts over maandelijks metingen in

Tessenderlo, Mol, Kwaadmechelen en in Herentals op het Kempisch kanaal vóór de samenvloeiing met het Albertkanaal. De metingen in Mol zijn daarenboven alleen gebeurd in het jaar 1975. Het is dus duidelijk dat alleen voor het pand

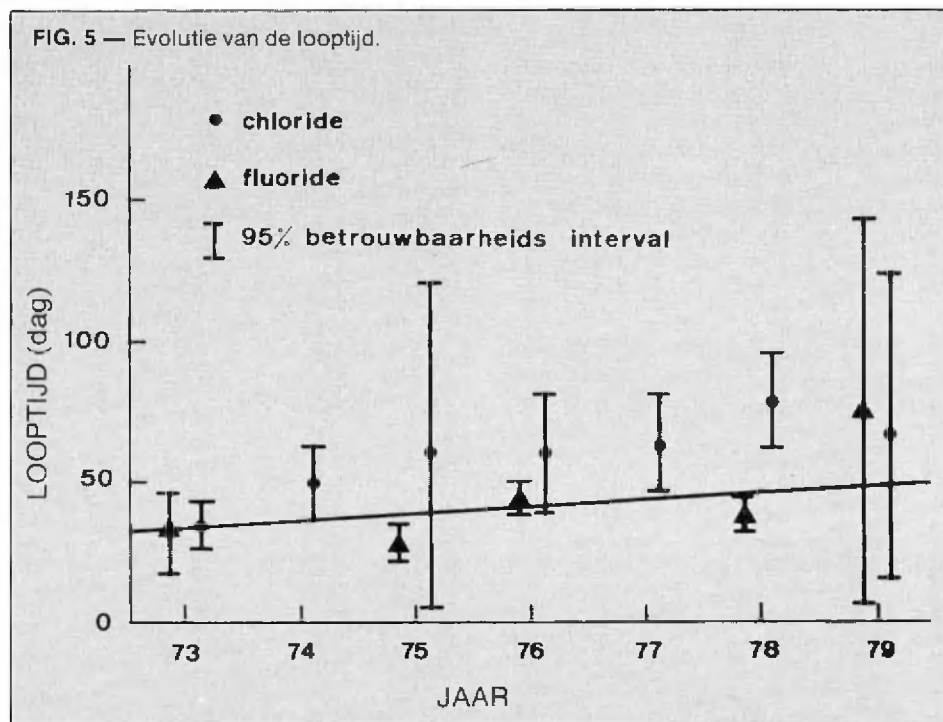
Luik-Kanne een betrouwbare analyse kan uitgevoerd worden. Vermits er geen uitbreidingswerken zijn geweest op dit pand, kan men de transportkarakteristieken schatten voor de gehele periode 1973-1977. De optimalisatie resultaten worden gegeven in Tabel 3. In de tabel vindt men de gemiddelde geschatte waarde plus of min de 95 % betrouwbaarheidsgrenzen.

Men bemerkt in Tabel 3 dat voor dit pand C<sub>0</sub> niet geoptimaliseerd werd, omdat er geen belangrijke lozingen zijn. De gemiddelde looptijd tussen Luik en Kanne bedraagt ongeveer 7 dagen, dit betekent dat de gemiddelde stroomsnelheid ongeveer 0,030 m/sec bedraagt. Voor een gemiddelde doorsnede van 360 m<sup>2</sup> geeft dit een debiet van 10,8 m<sup>3</sup>/sec.

De dispersiecoëfficiënt is ongeveer 250 m<sup>2</sup>/sec. Deze waarde is meer realistisch dan deze gevonden met het equivalent kanaalmodel. Ter illustratie worden in Figuur 6 de gemeten en berekende chlorideconcentraties gegeven voor het jaar 1976. Men bemerkt een goede overeenkomst.

De andere kanaalpannen werden eveneens op dezelfde wijze onderzocht, maar wegens de onvoldoende gegevens moeten deze resultaten voorzichtig geïnterpreteerd worden. De volledige details van deze berekeningen vindt men in De Smedt en Van der Beken (1981). Het blijkt dat alleen de schattingen van de looptijden een zekere betrouwbaarheid hebben. Daaruit kunnen debieten en

FIG. 5 — Evolutie van de looptijd.





**TABEL 3. Resultaten voor het pand Luik-Kanne.**

Parameter	Chloride	Fluoride
$C_0$	0	0
$t_0$	$7,1 \pm 1,8$ dagen	$7,5 \pm 4,3$ dagen
F	$1,01 \pm 0,03$	$0,98 \pm 0,08$
P	$2,05 \pm 1,41$	$1,43 \pm 1,32$

**TABEL 4. Resultaten voor de verschillende kanaalpanden.**

Kanaalpand	Lengte (km)	Looptijd (dagen)	Stroomsnelheid (m/sec.)	Debiet (m <sup>3</sup> /sec.)
Luik-Kanne	18	7	0,030	10,8
Kanne-Tessenderlo	50	30	0,020	7,2
Maastricht-Mol	70	9	0,090	7,8
Mol-Herentals	25	26	0,011	1,4
Mol-Kwaadmechelen	15	20	0,009	1,0
Kwaadmechelen-Herentals	25	11	0,026	8,2

stroomsnelheden berekend worden. Deze resultaten worden samengevat in Tabel 4 per kanaalpand. Men bemerkt dat de berekende debieten redelijk goed overeenkomen met de waarden gegeven in Figuur 2. Wanneer wij de gemiddelde transporttijden beschouwen dan stellen we vast dat het transport van Luik tot Herentals, langs het Albertkanaal, 48 dagen duurt. Voor de Kempische kanalen vindt men 35 dagen voor het traject Maastricht-Mol-Herentals, terwijl voor het gemengde deel, Maastricht-Mol-Kwaadmechelen-Herentals, de transporttijd 40 dagen bedraagt. De looptijden langs deze verschillende wegen zijn dus van dezelfde grootte-orde.

#### 4. BESLUIT

Met een relatief eenvoudig mechanistisch model en beperkte meetgegevens blijkt het mogelijk het verloop van de concentraties van conservatieve stoffen zoals chloriden en fluoriden te beschrijven in het Albertkanaal en de Kempische kanalen. Belangrijke conclusies over de transporttijden kunnen hieruit afgeleid worden.

Er wordt thans hoopvol gepoogd deze resultaten met stochastische technieken te verbeteren, terwijl vervolgens de niet-conservatieve stoffen onze grootste aandacht zullen ontvangen.

#### 5. REFERENTIES

De Smedt, F. and P.J. Wierenga, 1978. Solute transport through soil with nonuniform water content. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42 : 7-10.

De Smedt, F. en Van der Beken, A., 1981.

Een kwaliteitsmodel toepasbaar op het Albertkanaal en de Kempische kanalen. Studiedag Belgische Commissie voor de Studie van de Waterverontreiniging (I.A.W.P.R.), 14 mei 1981, 23 pp.

Ideler, W., 1980.

Eén-dimensionaal longitudinaal dispersiemodel toegepast op het Albertkanaal en de Kempische kanalen. Afstudeerwerk, Faculteit van de Toegepaste Wetenschappen, Vrije Universiteit Brussel, 170 pp.

#### 6. DANKWOORD

Deze studie is uitgevoerd in het raam van een onderzoek in opdracht van de Antwerpse Waterwerken.

Wij danken de Antwerpse Waterwerken en in het bijzonder ir. J. Dirickx, Directeur-Generaal, en Dr. W. Van Craenenbroeck voor de grote steun die zij aan dit onderzoek verlenen. Ook de goede samenwerking met de Dienst voor de Scheepvaart wordt graag vermeld.

De Smedt, F., Ideler, W. and Van der Beken, A., 1981.

A water quality transport model for the channel network of Northern Belgium. International Conference on Numerical Modelling of River, Channel and Overland Flow for Water Resources and Environmental Applications. Bratislava, Czechoslovakia, May 3-7, 1981.

