IKSR/KHR Expertengruppe

Comité Commun d'experts de la CIPR et de la CHR

Alarmmodell für den Rhein

Modèle d'alerte pour le Rhin

P.S. Griffioen

CHR
KHR

Bericht Nr. II-2 der KHR
Rapport no. II-2 de la CHR

Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution

Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

derlicher Abflüsse auf die Fließzeit eingegangen. Kapitel 4 befaßt sich mit der Konzentrationsberechnung. Der zweite Teil des Berichtes enthält eine Gebrauchsanleitung für das Alarmmodell.

2. AUSGANGSPUNKT

Der Unfall im Chemiewerk Sandoz hat deutlich gezeigt, daß sich wirkliche und geschätzte Eintreffzeit einer Verunreinigungswelle stark unterscheiden können. Dies trifft besonders für den staugeregelten Abschnitt des Oberrheins, aber auch für den freifließenden Rhein unterhalb von Iffezheim zu.

Ebenfalls wurden zwischen dem berechneten bzw. geschätzten und dem gemessenen Konzentrationsverlauf große Unterschiede festgestellt, die teilweise auf mangelnden Information über die in das Oberflächenwasser geratene Verunreinigungsmenge zurückzuführen sind. In der Regel ist eine derartige Informationslücke kennzeichnend für Unfälle und schränkt einerseits die Zuverlässigkeit der Vorhersagen ein, unterstreicht aber andererseits die Bedeutung eines Informationsaustausches zwischen den betroffenen Instanzen. Nach einer von einem DVWK-Arbeitskreis [DVWK, 1987] durchgeführten Untersuchung hat sich herausgestellt, daß die Unterschiede zwischen vorhergesagter und wirklicher Eintreffzeit nicht unbedingt eine Folge des angewandten Modellkonzeptes, sondern vielmehr eine Konsequenz der den Berechnungen zugrunde liegenden Daten sind.

Die Empfehlungen des DVWK betreffen daher auch nicht so sehr die mathematisch-physikalische Modellformulierung, sondern vielmehr die Qualität und den Umfang der Eingabedaten. Diese Aussage gilt insbesondere für den Dispersionskoeffizienten, die Fließgeschwindigkeit und die Abflüsse. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse ist der IKSR/KHR-Expertenausschuß folgendermaßen vorgegangen:

- zunächst Erarbeitung eines einfachen Modells;
- Berechnungen aufgrund aktueller, allgemein verfügbarer hydrologischer Daten;
- Schematisierung des Einzugsgebietes nach den von den Rheinanliegerstaaten gelieferten Daten;
- erster Arbeitsschritt: Verbesserung der Fließzeitberechnung.

Das Modell wird auf einem Personal Computer zur Verfügung gestellt. Um auch ohne technische Hilfsmittel Vorhersagen über die Eintreffzeit erstellen zu können, sollen ergänzende Nomogramme erarbeitet werden.

3. SCHEMATISIERUNG UND HYDROLOGISCHE DATEN

3.1 Schematisierung

Der in der vorliegenden Fassung des Alarmmodells schematisierte Teil des Rheins erstreckt sich vom Pegel Kembs (Oberrhein, km 173,6) bis zu den Pegeln Vuren (Waal, km 951,8), Hagestein (Lek, km 946,6) und Kampen (IJssel, km 994,5), siehe Abbildungen 1 und 2. Zwischen Kembs und Plittersdorf ist der Oberrhein staugeregelt und wird durch fünf Parallelstrecken gekennzeichnet, u.a. den 53 km langen Rheinseitenkanal (Abb. 3). Die Abflußverteilung über die niederländischen Rheinzweige wird durch Stauregulierung im Nederrijn und Lek erreicht. Im Laufe des Jahres 1989 soll die Schematisierung bis zur Aaremündung und um wichtige Nebenflüsse wie Saar und Mosel erweitert werden.

Der Rhein ist in Teilabschnitte unterteilt. Diese wurden so gewählt, daß sie als hydraulisch einheitlich (z.B. bezüglich Querschnitt und Fließgeschwindigkeit) angenommen werden dürfen. Die derzeitige Fassung des Alarmmodells besteht aus 71 Teilabschnitten. Die Einteilung der deutschen Flußstrecke basiert auf einer Arbeit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) [BfG, 1988]. Die niederländische Schematisierung wurde vom Dienst Binnenwateren/ RIZA (DBW/RIZA) erstellt, siehe [WL, 1988].

3.2 Basisdaten

Für die Berechnung von Fließzeiten und Konzentrationen werden Fließgeschwindigkeiten und Abflüsse benötigt. Das Alarmmodell ist ein Stofftransportmodell, für das die hydrologischen Daten nicht mit Hilfe eines Abflußmodelles berechnet, sondern aus Tabellen entnommen werden. Diese Tabellen sind das Ergebnis von Messungen und vorab ausgeführten Abflußmodellrechnungen.

– *Wasserstände*

Für das Alarmmodell gilt, daß die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und Abflüssen auf aktuellen und allgemein verfügbaren Daten begründet sein muß. Im Falle einer störfallbedingten Einleitung muß eine Berechnung unabhängig von Dritten erstellt werden können. Daher wurden für das Alarmmodell Wasserstände als primäre Eingabedaten gewählt. Wasserstände sind an einer großen Anzahl von Pegeln im Rheineinzugsgebiet direkt verfügbar.

Die für das Modell benutzten und von den im Paragraphen 3.1 genannten Dienststellen ausgewählten Meßstellen sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Mit Ausnahme der Daten der Pegel Kehl-Kronenhof und Plittersdorf können die Wasserstände aller Meßstellen über Anrufbeantworter abgefragt werden. Plittersdorf wird in nächster Zeit mit einer derartigen Anlage ausgerüstet. In der Zwischenzeit können die Daten für Kehl-Kronenhof – und vorläufig auch für Plittersdorf – aus Wasserstandsbezugslinien, bezogen auf den Pegel Rheinfelden, ermittelt werden [BfG, 1988, Anlage 15].

– *Stauregelungen*

Im freifließenden Abschnitt des Rheines zwischen Plittersdorf und Lobith sind Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten in den Teilabschnitten mittels der dort auftretenden Wasserstände festgelegt. Auf der staugeregelten Flußstrecke zwischen Kembs und Plittersdorf wie auch auf den niederländischen Rheinzweigen werden Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten durch Stauregelungen bestimmt. Für den Abschnitt zwischen Kembs und Plittersdorf geht man im Modell von festen Regelungen aus (siehe Paragraph 3.3).

Für die niederländischen Rheinzweige unterscheidet das Modellprogramm zwischen der Stauregelung nach dem Stauprogramm S285 einerseits und dem ungestauten, freifließenden Rhein, auch bei niedrigen Abflüssen, andererseits. Das Stauprogramm S285 ermöglicht eine Abflußregelung von IJssel und Nederrijn und gilt als normale Bewirtschaftung. Durch Einbeziehung des ungestauten, freifließenden Flusses können eventuelle Änderungen berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu der deutschen staugeregelten Flußstrecke sind für die niederländische Strecke Angaben über die Stauregelung erforderlich.

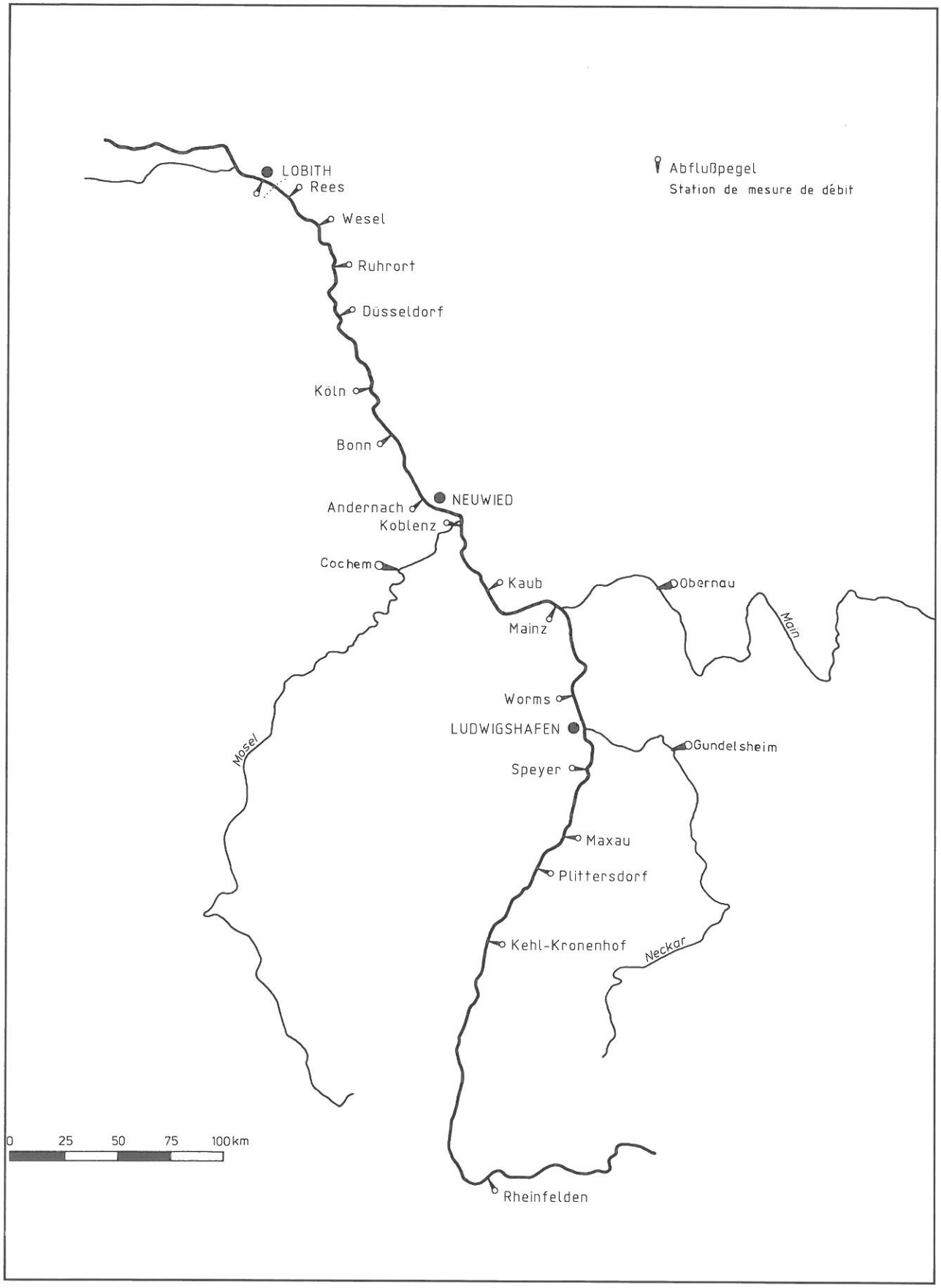


Abb. 1 Bezugspegel für das Alarmmodell

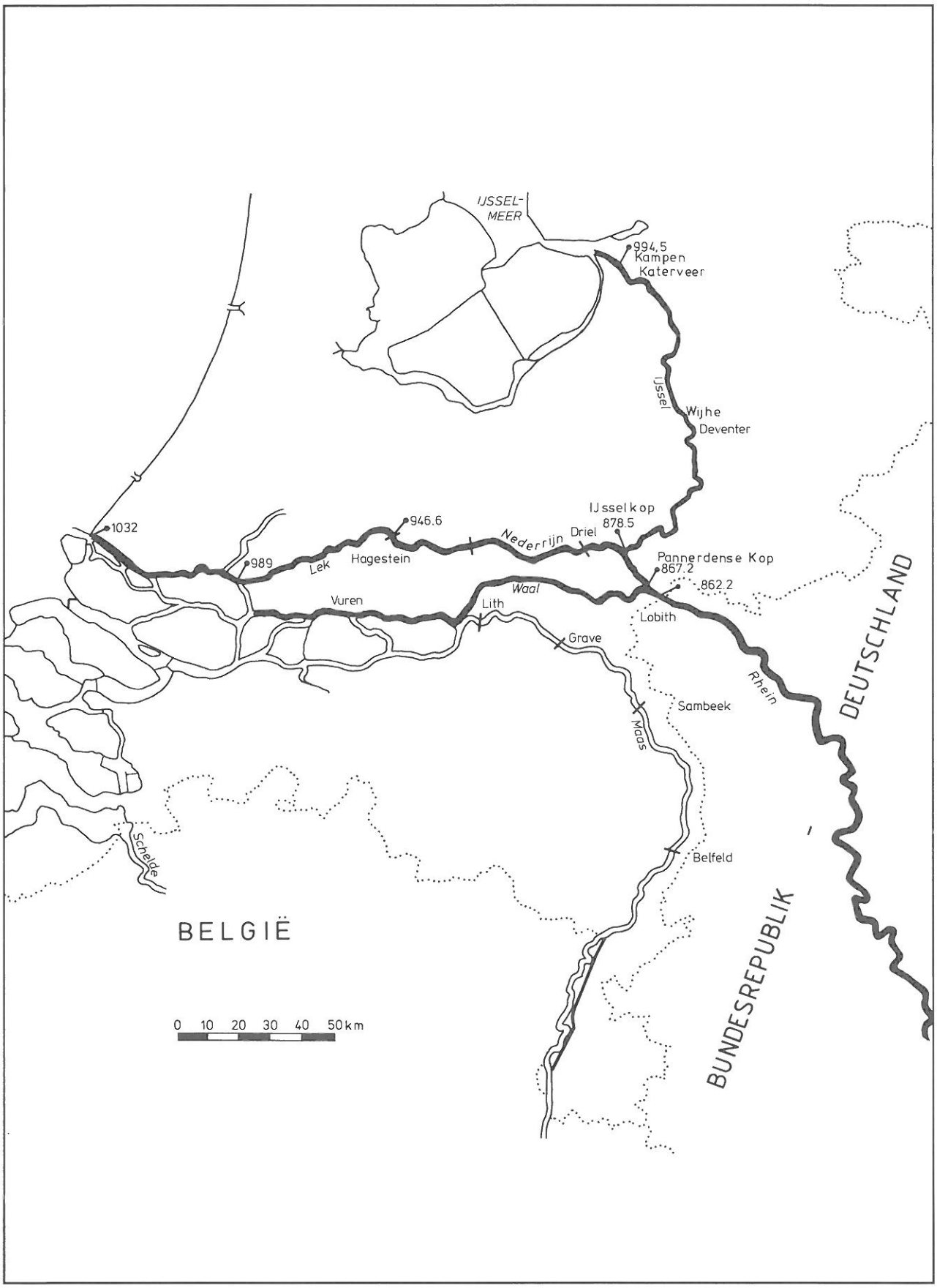


Abb. 2 Die niederländischen Rheinzweige

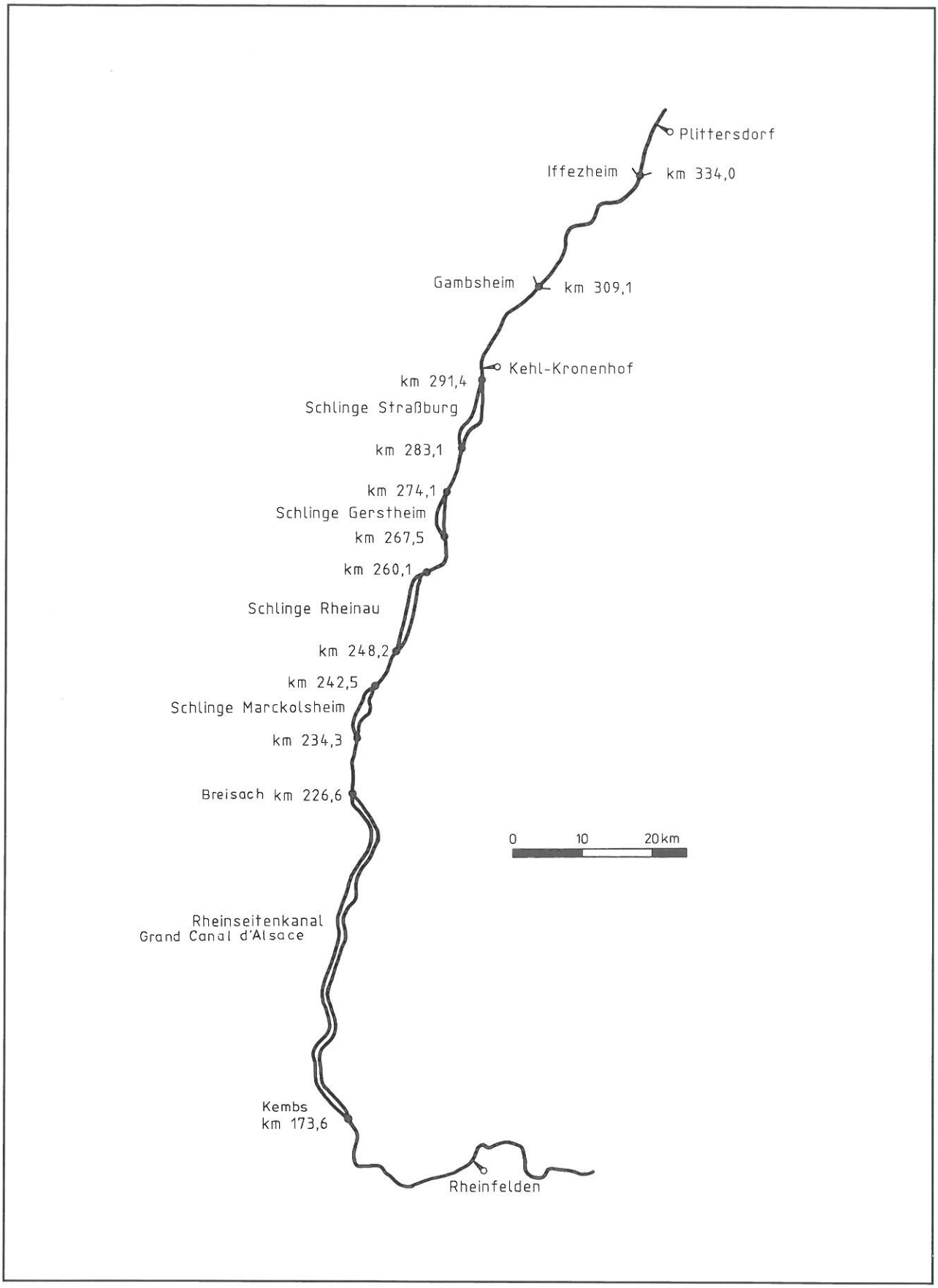


Abb. 3 Die Parallelstrecken im staugeregelten Abschnitt des Oberrheins

3.3 Abflußverteilung und Abflüsse

Die Verdünnung einer Verunreinigung wird von der Wasserführung des Flusses bestimmt. Dementsprechend muß die Abflußverteilung an den Verzweigungspunkten bekannt sein. Das Alarmmodell geht davon aus, daß die Verteilung der Verunreinigung an einem Verzweigungspunkt der Abflußverteilung an diesem Punkt entspricht (siehe Kapitel 4).

Das Alarmmodell enthält insgesamt 7 Verzweigungspunkte: 5 zwischen Kembs und Plittersdorf und 2 auf der niederländischen Strecke, nämlich Pannerdense Kop und IJsselkop. Die Abflußverteilung im staugeregelten Abschnitt des Oberrheins zwischen Kembs und Plittersdorf basiert auf einem Vertrag zwischen der Bundesrepublik Deutschland und Frankreich aus dem Jahre 1956. Darin wird vereinbart, daß maximal 1400 m^3/s durch die Kanalstrecken und minimal 30 m^3/s durch den Restrhein fließen. Die aktuelle Abflußverteilung wird aus dem Abfluß am Pegel Rheinfelden oder am Pegel Kehl-Kronenhof bestimmt. Die Abflußverteilung über die niederländischen Rheinzweige wird aus dem Abfluß am Pegel Lobith und den Stauregelungen für die niederländischen Rheinzweige bestimmt. Abbildung 4 gibt die Abflußverteilung nach Stauprogramm S285 wieder.

Aufgrund der zwischen Kembs und Plittersdorf verlaufenden Parallelstrecken kann die Verunreinigung über mehrere Wege transportiert werden. Im Prinzip gibt es ab Kembs bis Plittersdorf 32 Möglichkeiten. Für die Konzentrationsberechnungen wird im Modell jede einzelne Möglichkeit durchgerechnet. Danach werden die Ergebnisse addiert. Da der Transport über einige Wege nur sehr gering ist, ist es gerechtfertigt, diese außer Betracht zu lassen. Bei mittlerer Wasserführung (Abfluß Rheinfelden ca. 700 m^3/s) kommen nur 6 Wege in Betracht. Über die restlichen Wege findet dann weniger als 1% des Transportes statt.

Die Abflüsse an den Bezugspegeln werden über Wasserstand-Abfluß-Tabellen bestimmt, die vom Bundesamt für Umweltschutz in der Schweiz, den Wasser- und Schiffahrtsdirektionen in der Bundesrepublik Deutschland und der Direktion Gelderland des Rijkswaterstaat in den Niederlanden erstellt worden sind.

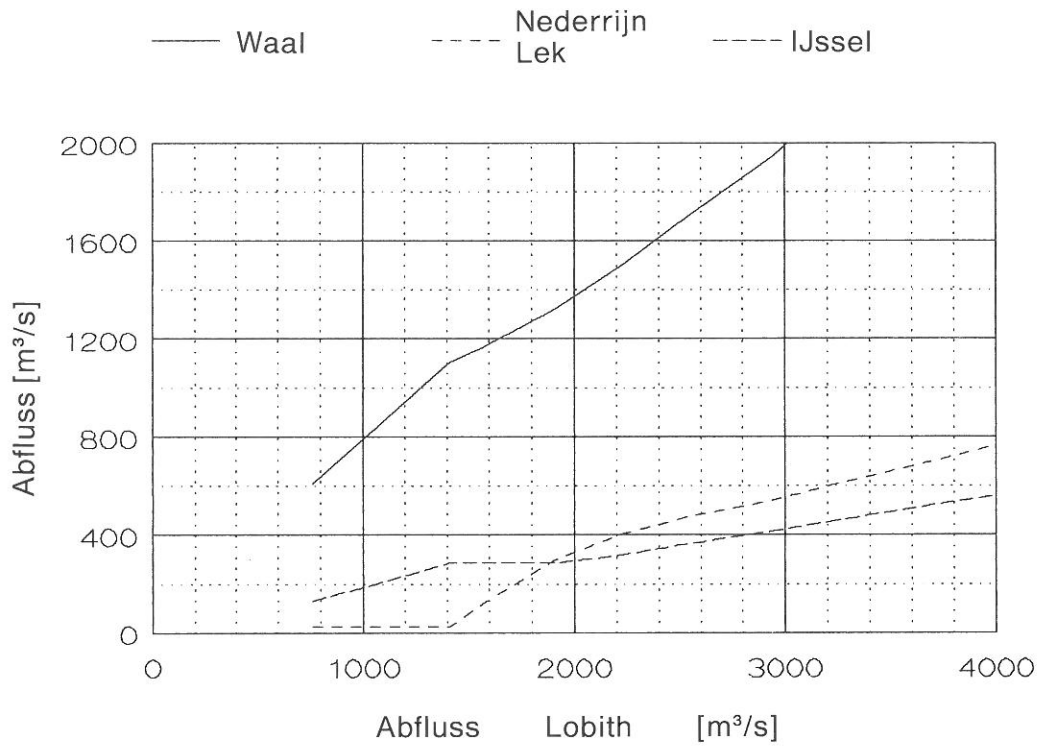


Abb. 4 Abflußverteilung der niederländischen Rheinzweige nach Stauprogramm S285

3.4 Fließzeiten und Fließgeschwindigkeiten

Die Fließzeit zwischen zwei Punkten ist als die Zeitspanne, in der ein Wasserteilchen die Strecke zwischen den betreffenden Punkten zurücklegt, definiert.

Im Alarmmodell ist der Fluß in Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt wurden für bestimmte Abflüsse konstante Fließgeschwindigkeiten ermittelt. So läßt sich die Fließzeit bei stationären Verhältnissen über eine bestimmte Anzahl von Abschnitten wie folgt berechnen:

$$T = \sum_i x_i / u_i \qquad (1)$$

Hierbei ist u_i die Fließgeschwindigkeit im Abschnitt i, x_i die Länge des Abschnittes und T die Fließzeit. Es sei bemerkt, daß x_i/u_i die Fließzeit im Abschnitt i darstellt.

Für die Berechnung der Fließzeit sind Wasserstand-Fließzeit-Tabellen, bezogen auf die Wasserstände an den Bezugspegeln, erstellt worden. Für den deutschen Abschnitt wurden diese Tabellen von der BfG mit Hilfe von Wasserspiegellagenberechnungen ermittelt [BfG, 1988]. Dabei wurden stationäre Verhältnisse vorausgesetzt. Für die niederländischen Rheinzweige sind die Tabellen vom DBW/RIZA anhand von Bezugslinien, Abflußkurven und Bodenprofilen zusammengestellt worden [WL, 1988]. Auch in diesem Falle wurde von stationären Verhältnissen ausgegangen. Daneben unterscheidet man zwischen der Stauregelung nach dem Stauprogramm S285 einerseits und dem ungestauten, freifließenden Fluß, auch bei niedrigen Abflüssen andererseits.

Die Abbildungen 5 und 6 stellen die Beziehung zwischen Wasserstand und Fließzeit für zwei Strecken dar. Die Strecke Kembs (Rhein-km 173,6) – Breisach (Rhein-km 226,6) ist eine Parallelstrecke, die sich aus dem Rheinseitenkanal und dem Restrhein zusammensetzt (siehe Abb. 3). Die Fließzeit wird von Stauregelungen beeinflußt.

Die Fließzeitentabellen umfassen den Abflußbereich von etwa Q_{15} bis zu etwa Q_{95}. Bei höheren Abflüssen, für die es nicht vorgesehen ist, ist das Alarmmodell nur bedingt einsetzbar.

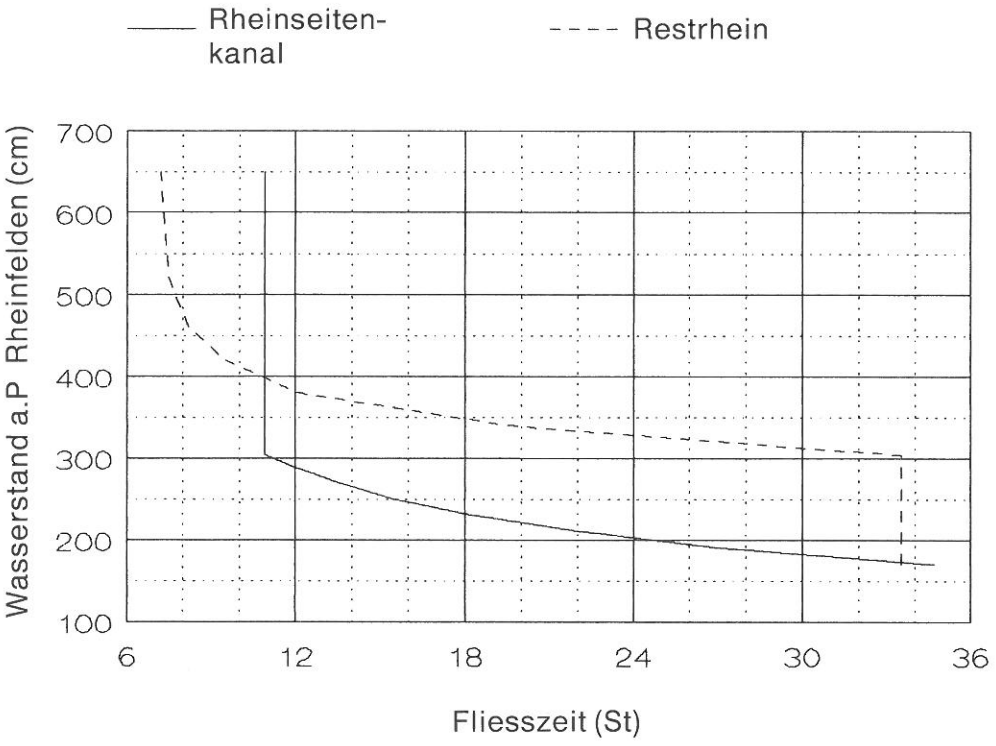


Abb. 5 Wasserstand-Fließzeit-Beziehung für die Strecke Kembs-Breisach

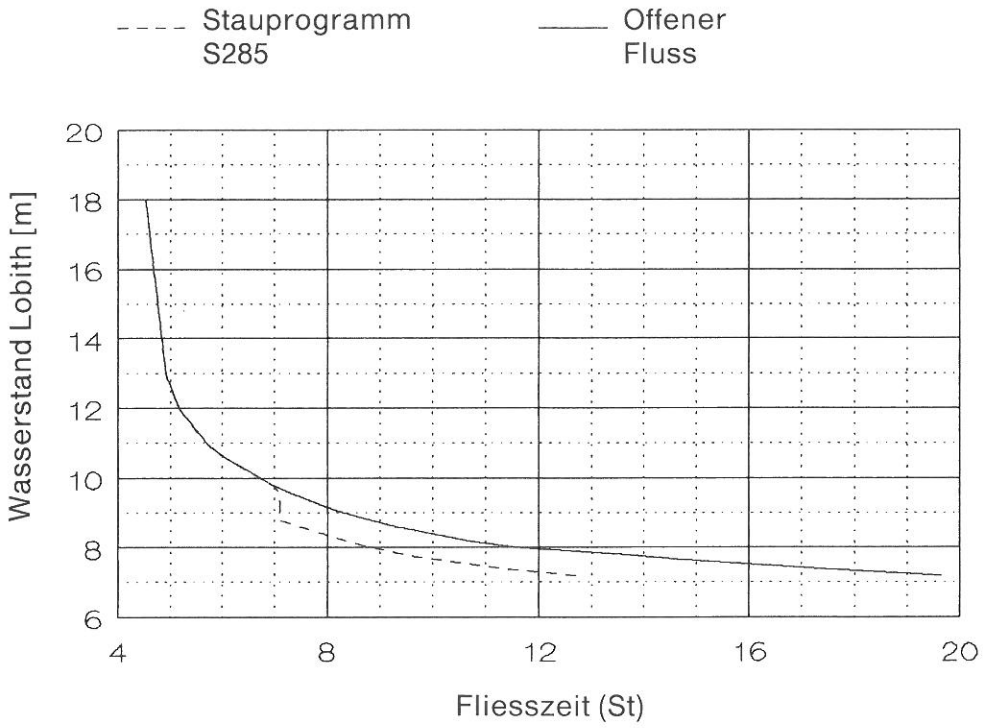


Abb. 6 Wasserstand-Fließzeit-Beziehung für die Strecke Wijhe-Katerveer

3.4.1 Schrittweise Fließzeitberechnung

Gleichung (1) für die Berechnung der Fließzeit gilt für stationäre Verhältnisse, d.h. daß die Fließgeschwindigkeit in einem Teilabschnitt in der Zeit konstant bleibt. In der Praxis wird diese Voraussetzung fast nie erfüllt. Während des Schadstofftransports schwanken die Abflüsse im Einzugsgebiet mehr oder weniger, was sich auf die Transportzeit auswirkt. Eine konstante Fließgeschwindigkeit darf nur für kurze Distanzen angenommen werden. Daher sollten bei größeren Entfernungen Geschwindigkeitsberechnungen schrittweise durchgeführt und durch Messungen fortlaufend verifiziert werden. Die örtliche Fließgeschwindigkeit ergibt sich aus:

$$\Delta T = \Delta x / u(x,T) \qquad (2)$$

Hierbei ist T die Fließzeit vom Eingangspunkt bis zu Punkt x, ΔT die Fließzeit zwischen x und $x + \Delta x$ und u(x,T) die Fließgeschwindigkeit an der Stelle x zum Zeitpunkt T.

Soll die Fließzeit nach diesem Prinzip berechnet werden, müssen die Fließgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt des Durchgangs der Verunreinigung bekannt sein. Da die Fließgeschwindigkeit aus dem Wasserstand abgeleitet wird, bedeutet dies, daß der Wasserstand bekannt sein muß. Die Erstellung von Fließzeitvorhersagen läuft also auf die Erstellung von Wasserstandsvorhersagen hinaus. Zwar können mit dem Alarmmodell keine Wasserstände vorhergesagt werden, doch ermöglicht das Modell den Einsatz von Wasserständen, die bis zum aktuellen Zeitpunkt bekannt sind. Mit Hilfe dieser Wasserstände findet eine schrittweise Fließzeitberechnung statt. Die Vorhersagegenauigkeit hängt vom Umfang der Informationen über die Wasserstände im Einzugsgebiet ab. Für die schrittweise Berechnung ist es erforderlich, daß die Wasserstände in Datenfiles gespeichert sind, damit sie vom Alarmmodell eingelesen werden können.

Abbildung 7 stellt das Ergebnis einer schrittweisen Fließzeitberechnung anhand eines hypothetischen Falls dar, bei dem von einem Unfall am 16. Dezember 1987 in der Nähe von Basel ausgegangen wird. Die Fließzeit wird an drei verschiedenen Tagen berechnet. Bei den Berechnungen am 16. Dezember wurden nur die Wasserstände dieses Tages hinzugezogen. Für die beiden anderen Berechnungen wurden zusätzlich die Wasserstände bis zum Tag der Berechnung mit einbezogen. Es zeigt sich, daß die Abflußänderungen einen beträchtlichen Einfluß auf die Fließzeit haben. Das Berechnungsverfahren muß noch anhand intensiver Tests, wie z.B. Tracerversuche, überprüft werden.

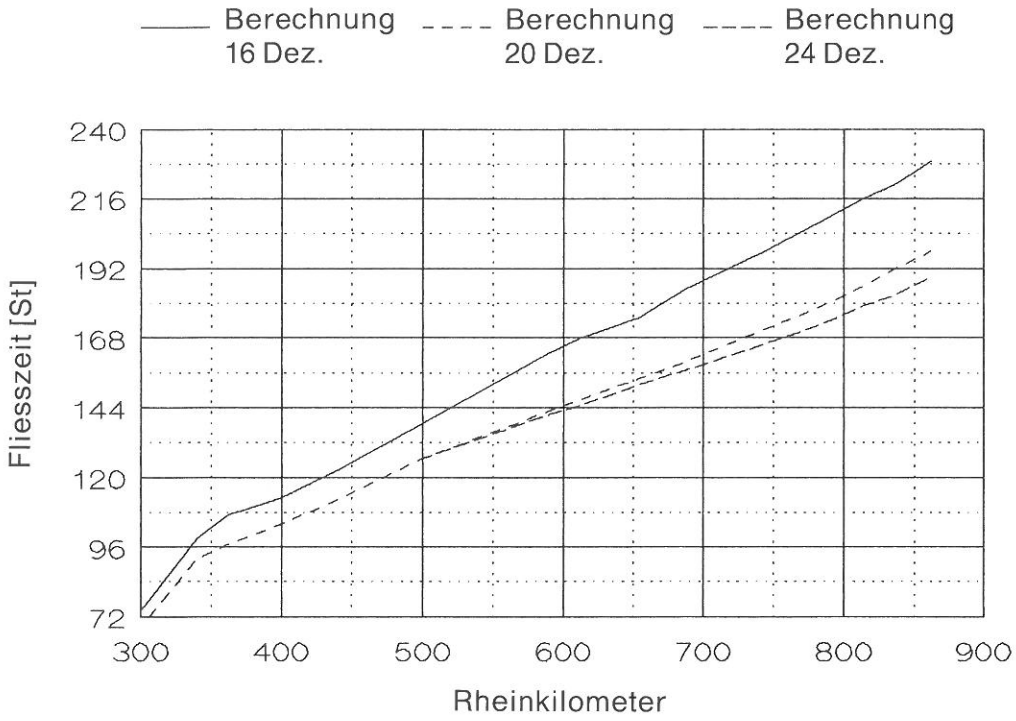


Abb. 7 Ergebnis einer schrittweisen Fließzeitberechnung

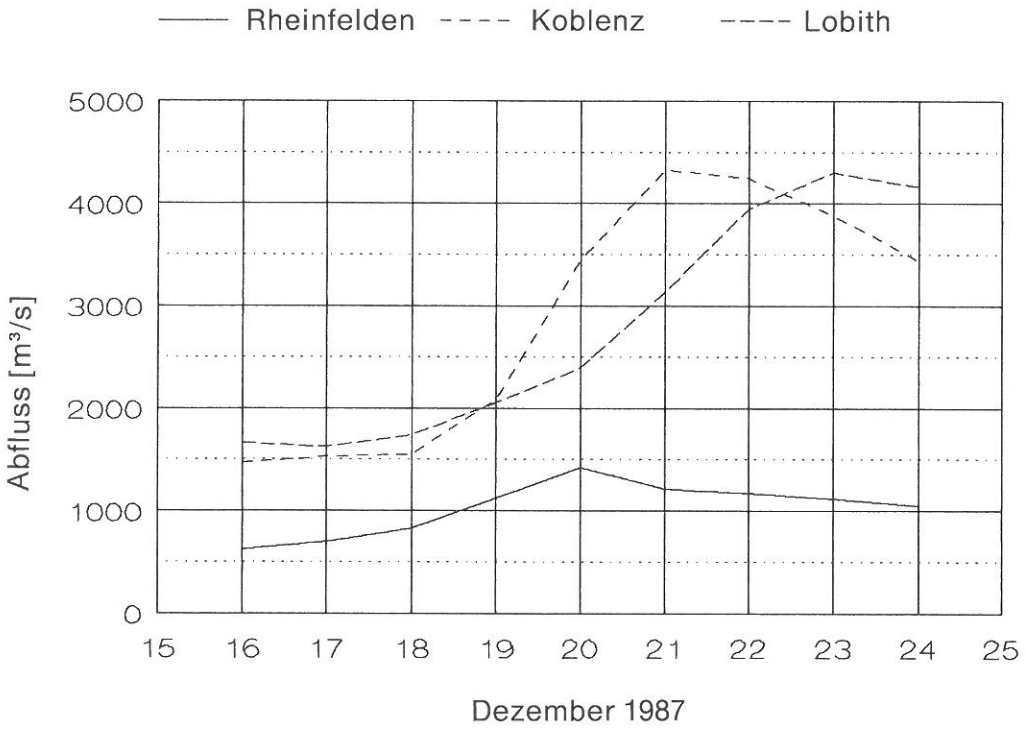


Abb. 8 Abflußverhältnisse im Rhein im Dezember 1987

4. MODELLGLEICHUNGEN

4.1 Konzentrationsberechnung

Das Alarmmodell stützt sich auf die eindimensionale Advektions-Diffusions-Gleichung. Diese beschreibt den Stofftransport in Flüssen infolge von Strömung und longitudinaler Dispersion. Bei stationären hydraulischen Voraussetzungen lautet die Advektions-Diffusions-Gleichung:

$$A\frac{\delta C}{\delta t} = -\frac{\delta}{\delta x}(uAC) + \frac{\delta}{\delta x}\left(AD\frac{\delta C}{\delta x}\right) - q_u C - kAC + S_0\delta(x - x_0) \tag{3}$$

$$\frac{\delta}{\delta x}(Au) = q_i - q_u \tag{4}$$

wobei:

	x	Ortskoordinate
	t	Zeit
	A(x)	Fließquerschnitt
	C(x,t)	Konzentration der Verunreinigung
	u(x)	Fließgeschwindigkeit
	D(x)	longitudinaler Dispersionskoeffizient
	k	Eliminations-Geschwindigkeitskonstante
	x_0	Eingangsstelle
	$\delta(x-x_0)$	Delta-Dirac-Funktion
	$S_0(t)$	Verunreinigungsmenge, die pro Zeiteinheit in das Oberflächenwasser gerät
	$q_i(x)$	laterale Einströmung (Nebenflüsse)
	$q_u(x)$	laterale Ausströmung (Verzweigungspunkte)

Gleichung (3) beschreibt die Konzentrationserhöhung in bezug auf eine eventuell vorhandene Hintergrundkonzentration. Bei der Konzentration C(x,t) und der Fließgeschwindigkeit u(x) handelt es sich um Mittelwerte im Querprofil. In dem Term kC werden Konzentrationsveränderungen infolge Abbau, Sedimentation und/oder Verflüchtigung berücksichtigt. Handelt es sich um eine mehr oder weniger momentane Belastung zum Zeitpunkt $t=0$, kann man $S_0(t)$ mittels einer momentanen Belastung der Form $M\delta(t)$ annähern, wobei M die Verunreinigungsmenge ist. Gleichung (4) beschreibt die Veränderung des Abflusses infolge des Zustroms von Nebenflüssen und der Verteilung an den Verzweigungspunkten.

Im allgemeinen Fall ist eine exakte analytische Lösung der o.g. Advektions-Diffusions-Gleichung nicht möglich. Nur im Ausnahmefall, d.h. wenn Fließgeschwindigkeit, Abfluß und Querprofil konstant sind, ist eine exakte, als Taylor-Lösung bekannte Lösung möglich [Fischer, 1979]. Es ist aber eine zu große Vereinfachung, den Rhein mit seinen Nebenflüssen als einen großen Fluß mit konstantem Abfluß und einem einzigen Querprofil zu schematisieren.

Es wurde ein analytischer Ansatz benutzt. Dieser Ansatz wurde der Arbeit von Gelhar & Collins [1971] entnommen, siehe auch [WL, 1988]. Auf die Ableitung dieses Ansatzes wird hier nicht eingegangen. Der Grundgedanke hinter dem Ansatz ist aber eine Koordinatentransformation, wodurch eine konstante Fließgeschwindigkeit entsteht.

4.1.1 Momentane Einleitung ohne Nebenflüsse und Verzweigungspunkte

Die Auswirkung von Veränderungen der Fließgeschwindigkeit und des Dispersionskoeffizienten wird von zwei Integraltransformationen dargestellt. Die Auswirkung der Fließzeit von x_0 zu x ist definiert als:

$$T(x,x_0) = \int_{x_0}^{x} 1/u\, dy \tag{5a}$$

Die Auswirkung des Dispersionskoeffizienten ist definiert als:

$$w(t,x_0) = \int_{x_0}^{x_c(t)} D(x)/u(x)^3\, dx \tag{5b}$$

worin $x_c(t)$ die Stelle ist, die vom Mittelpunkt der Welle in Zeit t erreicht werden kann:

$$x_c(t) = x_0 + \int_0^t u[x_c(s)]\, ds$$

Mit Hilfe dieser Größen, kann die Lösung von Gleichung (3), für eine momentane Einleitung ohne Nebenflüsse und Verzweigungspunkte (d.h. $q_i = 0$ und $q_u = 0$) wie folgt geschrieben werden (setze $x_0 = 0$):

$$C(x,t) = M/[2Q_0\{\pi w(t)\}^{\frac{1}{2}}] \cdot \exp[-\{T(x)-t\}^2/4w(t)] \cdot \exp[-kt] \quad (6)$$

T und w sind in den Gleichungen 5a und 5b in Integralform angegeben. Da der Rhein als eine Reihe von Teilabschnitten betrachtet wird (Kapitel 3), handelt es sich bei den Integralen eigentlich um Additionen dieser Teilabschnitte. T und w sind beide Kennzeichen des Abflußsystems und werden von Fließgeschwindigkeiten und longitudinaler Dispersion bestimmt.

Aus Gleichung (6) geht hervor, daß die maximale Konzentration sich etwa bei $t = T$ einstellen wird. Die Fließzeit T ist also in wichtigem Maße für den Zeitpunkt des Durchgangs der maximalen Konzentration am Zielort bestimmend. Dies unterstreicht die Bedeutung einer guten Fließzeitvorhersage.

Die nach Gleichung (5a) berechnete Fließzeit basiert auf stationären Verhältnissen. Im vorhergehenden Kapitel wurde bereits erläutert, wie man bei der Fließzeitberechnung den Einfluß veränderlicher Abflußbedingungen berücksichtigen kann. Die Fließzeitberechnung muß in diesem Falle schrittweise durchgeführt werden.

Gleichung (6) wurde für $D = \alpha u$ abgeleitet, worin α ein Dispersionsparameter mit konstantem Längenmaßstab ist. Der Ansatz stützt sich auf die Schätzung:

$$\alpha/L \ll 1$$

wobei L ein charakteristischer Längenmaßstab für den Fluß ist. Obwohl die Größe des Dispersionskoeffizienten für den Oberrhein nicht klar ist, kann man doch davon ausgehen, daß die o.g. Schätzung für $L > 20$ km zutrifft. Für die Anwendung der Gleichung (6) im Rheineinzugsgebiet bedeutet dies keine wesentliche Einschränkung.

Von Gelhar & Collins wurde der analytische Ansatz (6) mit numerischen Lösungen verglichen. Unter der Bedingung, daß $\alpha/L \ll 1$, stimmen die Ergebnisse gut miteinander überein. Für eine beliebige Dispersion wurde ein derartiger Vergleich noch nicht vorgenommen.

4.1.2 Beliebige Einleitung

Für eine beliebige Einleitung $S_0(t)$, erfolgt die Lösung mittels Konvolution momentaner Einleitungen:

$$C(x,t) = \int_0^t S_0(s)/[Q_0(4\pi w)^{\frac{1}{2}}]. \exp.[-\{T-(t-s)\}^2/4w]. \exp[-k(t-s)]\, ds \quad (7)$$

Gleichung (7) kann auch angewandt werden, wenn Konzentrationsmessungen von einem stromabwärts vom Unfallort gelegenen Punkt x_1 vorliegen. Durch Multiplikation der Konzentrationsmessungen mit dem dortigen Abfluß erhält man eine fiktive Einleitungsfracht, welche in Gleichung (7) angewandt werden kann. Dies ist eine wichtige, vom Modell gebotene Möglichkeit. Bei Annahme eines gemessenen Konzentrationsverlaufs als Randbedingung für die Berechnungen weiter stromabwärts, ist man weniger von Informationen über den Unfall selbst abhängig.

4.1.3 Einfluß von Nebenflüssen und Verzweigungspunkten

Betrachtet man nur die Auswirkung von Nebenflüssen und Verzweigungspunkten, kann folgendes nachgewiesen werden:
Die Konzentrationsveränderung zwischen einem Punkt x_1 und einem unterhalb gelegenen Punkt x_2 ist gleich:

$$f(x_1,x_2) \cdot Q(x_1)/Q(x_2)$$

wobei $f(x_1,x_2)$ die von x_1 nach x_2 transportierte Massenfraktion und $Q(x)$ der Abfluß am Punkt x ist. Falls es keine Verzweigungspunkte gibt, gilt $f_{=1}$ und ist die Konzentrationsveränderung gleich dem Abflußverhältnis, das in diesem Falle eine Art Verdünnungsfaktor ist. Wenn es dagegen keine Nebenflüsse gibt, ist f gleich $Q(x_2)/Q(x_1)$; die Konzentration ändert sich also nicht.

Durch Multiplikation des rechten Gliedes der Gleichungen (6) und (7) mit $f(x_0,x) \cdot Q(x_0)/Q(x)$ errechnet man annähernd die Auswirkung der Verzweigungspunkte und Nebenflüsse auf den dispersiven Transport. Örtliche Mischungserscheinungen in der Nähe der Einleitung werden dabei vernachlässigt.

4.2 Dispersionskoeffizient

Der Dispersionskoeffizient bestimmt zusammen mit der Fließzeit den Zeitpunkt an dem eine Verunreinigung sich zum ersten Mal am Zielort bemerkbar macht. Darüber hinaus ist der Dispersionskoeffizient für die Dauer des Durchgangs der Verunreinigung und für die maximale Konzentration mitbestimmend. Der Dispersionskoeffizient ist also ein wichtiger Modellparameter.

Über die funktionelle Form des longitudinalen Dispersionskoeffizienten D(x) und über seine Größe besteht noch keine endgültige Klarheit. Dies geht deutlich aus einer DVWK-Untersuchung [DVWK, 1987] hervor. In der Literatur werden verschiedene Ansätze genannt. Außerdem ist die Größe des Dispersionskoeffizienten in hohem Maße vom betreffenden Abflußsystem abhängig; zunächst sollten daher ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden.

Vorläufig bietet das Modell die Möglichkeit
- einen konstanten Dispersionskoeffizienten (durch Anwender) vorzugeben oder
- den Dispersionskoeffizienten in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit und Abfluß zu berechnen $D = \alpha uQ$.

Die Konstante α hat vorläufig den vorgegebenen Wert 0,075.

In der Advektions-Diffusions-Gleichung, die hier als Ausgangspunkt genommen wurde, ist die longitudinale Dispersion der einzige Mechanismus, durch den der Verunreinigungsteppich sich verlängert.

Es stellt sich die Frage, ob eine derartige Vereinfachung für den Transport von Verunreinigungen im Rhein zulässig ist. Auch wenn das Modell nur zu einer ersten Schätzung von Konzentrationsniveaus entwickelt wurde, sollten die Ergebnisse doch einigermaßen verläßlich sein, d.h. die Eintreffzeit (der Zeitpunkt, an dem sich die Verunreinigung zum ersten Mal bemerkbar macht), die maximale Konzentration und auch die Dauer des Durchgangs der Verunreinigung sollten annähernd zutreffen. Weitere Untersuchungen, vor allem Tracerversuche, sind erforderlich.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der Sandoz-Unfall vom November 1986 war Anlaß zur Gründung einer gemeinsamen Arbeitsgruppe der IKSR und der KHR. Die Aufgabe dieses Expertenausschusses war die Entwicklung eines Modells für die Vorhersage von Eintreffzeiten und Konzentrationsniveaus im Falle einer störfallbedingten Einleitung im Rheineinzugsgebiet.

Die IKSR/KHR-Arbeitsgruppe hat sich in erster Instanz der Vorhersage von Eintreffzeiten einer Verunreinigungswelle gewidmet. Dazu sind von den Rheinanliegerstaaten Untersuchungsergebnisse geliefert worden, worauf die Vorhersagen gestützt sind. Ausgangspunkt dabei war, daß das Berechnungsverfahren auf allgemein verfügbaren Informationen basiert sein sollte. So besteht über die Eingabe gemessener Wasserstände die Möglichkeit, veränderlichen Abflüssen Rechnung zu tragen. Für die Vorhersage von Konzentrationsniveaus wurde vorläufig eine vereinfachte Prozeßbeschreibung gewählt. Die Konzentrationsberechnung basiert auf näherungsweiser Lösung der Advektions-Diffusions-Gleichung (Par. 4.1).

Die Arbeiten der IKSR/KHR-Arbeitsgruppe haben zu einer ersten Fassung des sog. Alarmmodells für den Rhein geführt. Das Alarmmodell erstellt gute Vorhersagen der Eintreffzeit einer Verunreinigungswelle. Dagegen erlaubt diese erste Fassung des Modellprogramms z.Zt. nur eine Schätzung der maximal zu erwartenden Konzentration. Das Modell wurde jedoch so konstruiert, daß weitere Anpassungen und Verbesserungen eingearbeitet werden können (Par. 4.1.1 ... 4.2).

Weitere Untersuchungen, u.a. gestützt auf Tracerversuche, werden auf ziemlich kurzer Frist noch zu Verbesserungen des Modells führen. Auf längerer Frist sind Veränderungen von mehr struktureller Art vorgesehen, wodurch das Modell eine exaktere Vorhersage des Konzentrationsverlaufs einer Verunreinigungswelle ermöglichen wird. Da diese Veränderungen aber sicher noch ein bis zwei Jahre in Anspruch nehmen werden, wurde beschlossen schon jetzt die erste Fassung des Modellprogramms als unterstützendes Instrument zur Abschätzung des Ablaufs von Verunreinigungswellen zur Verfügung zu stellen

TEIL II: Gebrauchsanleitung für das Modellprogramm

1. INSTALLATION DES PROGRAMMS

1.1 Hardware-Spezifizierung

- **PC und Festplatte**
  Das Modell wurde für IBM-kompatible PC's mit dem Betriebssystem MS-DOS Version 2.0 und aufwärts entwikkelt. Der Einsatz eines solchen Rechners ist Voraussetzung für die Anwendung des Modells. Eine Festplatte ist ebenfalls erforderlich, da der Umfang der Output-Dateien in manchen Fällen die Speicherkapazität einer 360 KB Diskette übersteigen kann.

- **Grafikkarte und Drucker**
  Das Modell wird mit einem SETUP-Programm geliefert (siehe Paragraph 1.2). Dieses Programm ermöglicht es dem Benutzer, die vorhandene grafische Karte sowie den angeschlossenen Drucker zu definieren. Das Modell unterstützt z.Zt. eine erhebliche Anzahl grafischer Karten und Drucker, u.a. die IBM-Karten CGA, EGA und VGA, die Hercules-Karte sowie die gängigen EPSON-Drucker und einige Laser-Drucker. Vorläufig wurde ein Standard-Output gewählt, der nicht alle Möglichkeiten der betreffenden Hardware ausnutzt.

- **Mathematischer Koprozessor**
  Ein mathematischer Koprozessor ist nicht erforderlich. Es empfiehlt sich jedoch, das Modell auf einen PC mit Koprozessor zu installieren. Auf einem PC-AT mit Koprozessor beträgt die Rechenzeit maximal 15 bis 30 Sekunden. Auf einem PC-XT ohne Koprozessor muß mit einer acht- bis zehnfachen Verlängerung der Rechenzeit gerechnet werden.

- **Kapazität des Rechners**
  Das Programm setzt etwa 375 KB RAM[1] voraus. Dieser Umfang ergibt sich einerseits aus der Größe einiger Datensätze und wird andererseits dadurch verursacht, daß das Rechenprogramm vom Eingabeteil aus gestartet wird. Beide Programmteile befinden sich dadurch zur gleichen Zeit im RAM, was zu erhöhter Funktionalität und größerer Anwenderfreundlichkeit führt.

  Bei PC's mit nur 512 KB RAM kann der Umfang des Alarmmodells in Einzelfällen zu Problemen führen. Die verfügbare RAM-Kapazität kann mit Hilfe des DOS-Befehls <CHKDSK> kontrolliert werden; sie wird von der resident-benötigten RAM-Kapazität bestimmt. Sollte sie sich als unzureichend herausstellen, sollten Sie Ihren PC-Berater konsultieren.

- **Config.sys**
  Für den Input von Daten und den Output von Ergebnissen benutzt das Programm eine Anzahl von Files. In der heutigen Fassung des Modells werden alle vom Programm benötigten Files zur gleichen Zeit eingerichtet. Die maximale Anzahl von Files, die gleichzeitig im DOS eingerichtet werden kann, wird in der Datei CONFIG.SYS mittels des Befehls:

  <FILES=n>

bestimmt, wobei n der Anzahl der Files entspricht. Der Wert von n sollte größer oder gleich 15 sein.

1.2 Das SETUP-Programm

Das Modell wird auf zwei Disketten geliefert, nämlich:

- einer Diskette mit dem SETUP-Programm sowie einigen Hardware-Treibern;
- einer Diskette mit dem Alarmmodell sowie einigen Datenbeständen.

Mittels des SETUP-Programms können Sie die grafische Karte und den Drucker definieren. Das SETUP-Programm speichert diese Daten und kopiert die dazugehörenden Treiber.

[1] RAM : Random Access Memory = Direktzugriffspeicher = interner oder direkter Speicher, der für den Programmablauf benötigt wird.

Bei der Installation des Modellprogramms sollten Sie folgendermaßen vorgehen:

1. Verzweigen Sie in das Subdirectory Ihrer Festplatte, in dem Sie das Modell installieren möchten; falls erforderlich sollten Sie zunächst dieses Subdirectory, mittels des DOS-Befehls <MD> anlegen.
2. Legen Sie die Diskette mit dem SETUP-Programm in das Laufwerk A und geben Sie ein:
   A:SETUP <RETURN>
3. Wählen Sie Ihre grafische Karte sowie den angeschlossenen Drucker mit den angegebenen Tasten. Auch wenn kein Drucker angeschlossen ist, sollte eine Wahl getroffen werden.
4. Über die <F1>-Taste kopieren Sie die gewählten Treiber in das für das Modell bestimmte Subdirectory. Damit ist das SETUP-Programm beendet.
5. Legen Sie jetzt die Diskette mit dem Modellprogramm in das Laufwerk A und geben Sie ein:
   COPY A:*.* <RETURN>

Nachdem die o.g. Handlungen ausgeführt worden sind, können Sie das Modell mittels des Befehls RHEIN <RETURN> starten. Das Modell kann nur von diesem Directory aus gestartet werden.

Wenn Sie das Modell auf einem anderen PC installieren möchten, sollte die o.g. Installation erneut durchgeführt werden. Wechseln Sie nicht den PC, sondern nur den Drucker, brauchen Sie nur das SETUP-Programm erneut ablaufen zu lassen (Punkte 1 bis 4).

2. ALLGEMEINES ZUM PROGRAMM

2.1 Zielsetzung und Möglichkeiten bzw. Beschränkungen des Modells

Das Modell wurde entwickelt, um die Konzentrationsniveaus und Eintreffzeiten einer Verunreinigungswelle schnell abschätzen zu können. Es handelt sich dabei um punktuelle Einleitungen von beschränkter Dauer. Es ist ebenfalls möglich, einen willkürlichen (gemessenen) Konzentrationsverlauf als Ausgangspunkt für die Berechnungen für den Unterlauf einzugeben.

Das Modell berechnet den Konzentrationsanstieg infolge einer störfallbedingten Einleitung. Es werden also keine Hintergrundkonzentrationen berücksichtigt.

Für langfristige, kontinuierliche Einleitungen ist das Modell ungeeignet. Auch bei diffuser Belastung des Oberflächenwassers (z.B. Deposition) ist das Modell weniger geeignet.

2.2 Das Programm: Start und weiteres Arbeiten

Das Programm wird durch folgende Eingabe gestartet:

RHEIN <Return>

Nachdem das Programm gestartet ist, erscheinen einige Mitteilungen über das Einlesen von Dateien auf dem Bildschirm. Anschließend werden eine oder mehrere Eingabemasken durchlaufen, in der die benötigten Daten eingegeben werden können (Paragraph 3 und 4). Schließlich gelangt man in das Hauptmenü, von wo aus man zu den Eingabemasken zurückkehren, die Eingabedaten ausdrucken, oder die Berechnung starten kann (Paragraph 5). Von diesem Hauptmenü aus besteht auch die Möglichkeit, das Programm zu beenden.

Während der Berechnung erscheinen einige Mitteilungen über den Vorgang auf dem Bildschirm. Nach richtiger Beendung der Berechnung, gelangt man in ein Menü von wo aus die Rechenergebnisse dargestellt werden können (Paragraph 6). Von diesem Menü aus kann man auch in das Hauptmenü zurückkehren.

Werden während der Berechnung Fehler festgestellt, wird die Berechnung abgebrochen und der Grund des Abbruchs erscheint in Form eines Fehlercodes auf dem Bildschirm (Paragraph 6). Anschließend kehrt man in das Hauptmenü zurück.

3. EINGABE DER DATEN: DIE EINGABEMASKEN

3.1 Allgemeines

Die Eingabe der für eine Berechnung benötigten Daten findet anhand der dem Benutzer präsentierten Bildschirmmasken statt. Die Eingabemasken bestehen aus einem umrandeten Teil, in den die Daten eingegeben werden müssen und einem Kommentarteil, in dem die einzugebende Information erläutert wird. Lesen Sie zunächst diese Erläuterungen!

In einem »Balken« (schwarze Zeichen auf weißem Grund) wird angezeigt, in welchem Maskenteil die aktuelle Eingabe erfolgt. Die Lage des Balkens kann durch Betätigung der Cursortasten verändert werden. Die erlaubten Cursortasten sind im unteren Bildschirmrand angegeben. Jede Eingabe muß durch <Return> bestätigt werden. Nach Eingabe aller Daten in eine Bildschirmmaske, kann man über die <F1>-Taste in die nächste Maske gehen.

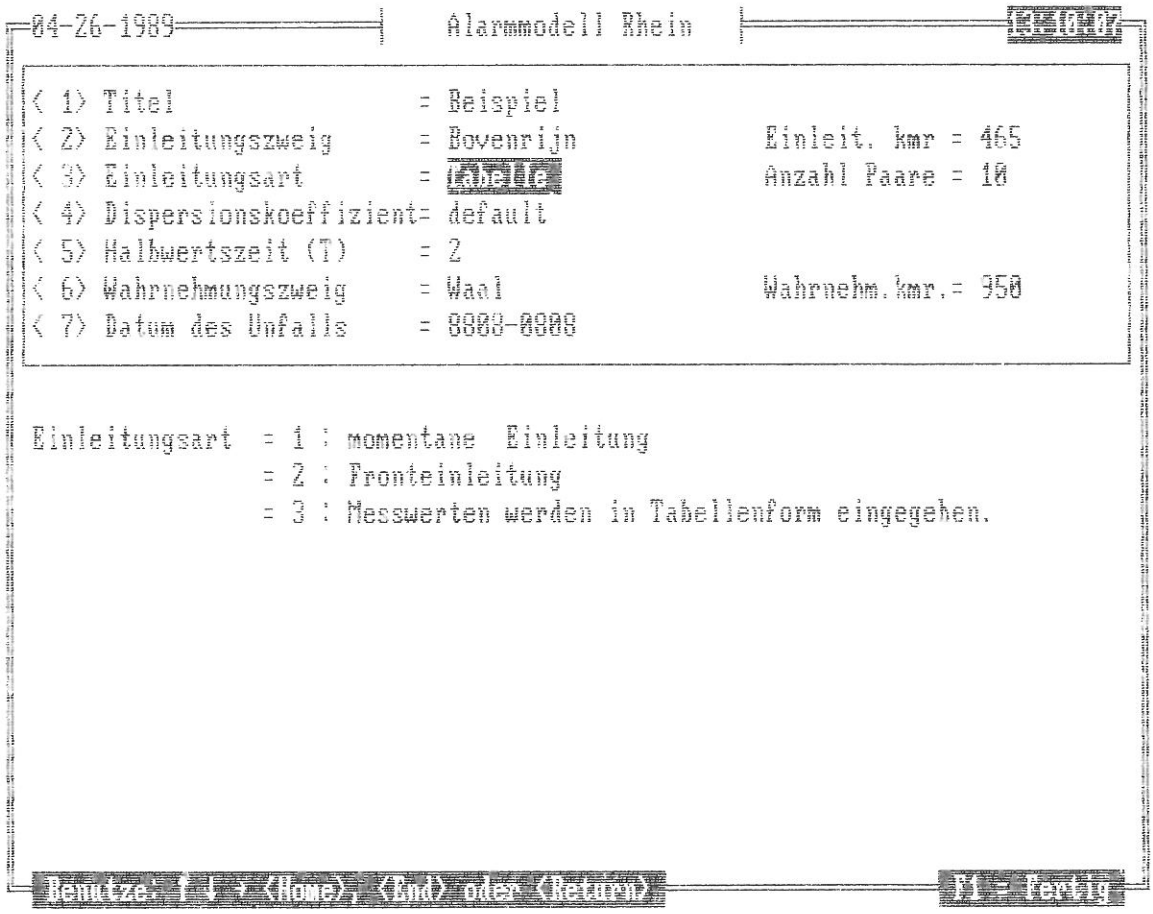
3.2 Fehlermeldungen bei der Eingabe

Während der Eingabe lassen Tippfehler sich über die »Backspace-Taste« korrigieren. Das Programm kontrolliert die eingegebenen Daten auf falsche Angaben, auf die der Benutzer mittels eines »BEEP« hingewiesen wird. Gleichzeitig erscheint eine Fehleranzeige in einem Rahmen auf dem Bildschirm. Aus dieser Fehleranzeige kann man entnehmen, welche Eingabe nicht erlaubt ist. Durch beliebigen Tastendruck verschwindet die Fehleranzeige und wird um eine neue Eingabe gebeten.

3.3 Die Eingabemasken

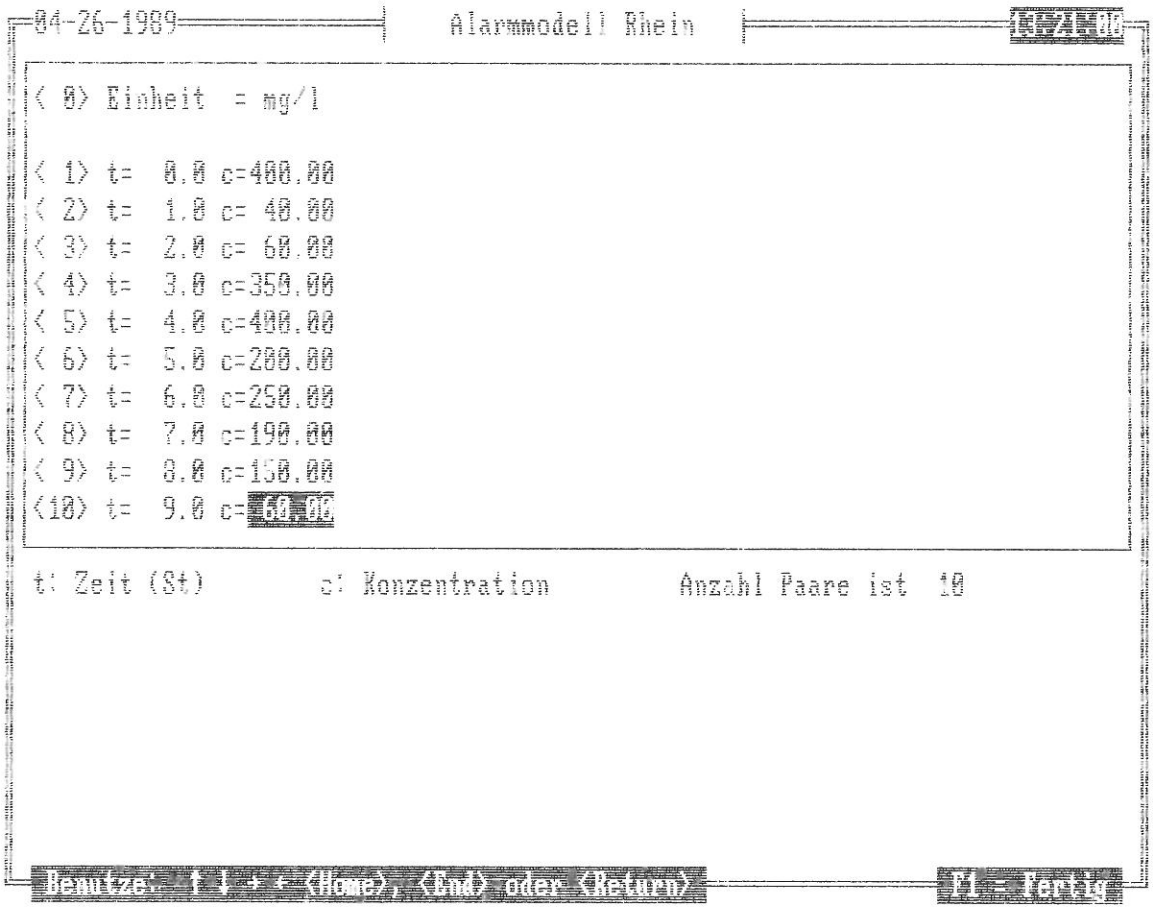
Es gibt maximal drei Eingabemasken, nämlich:

– MASKE 1:



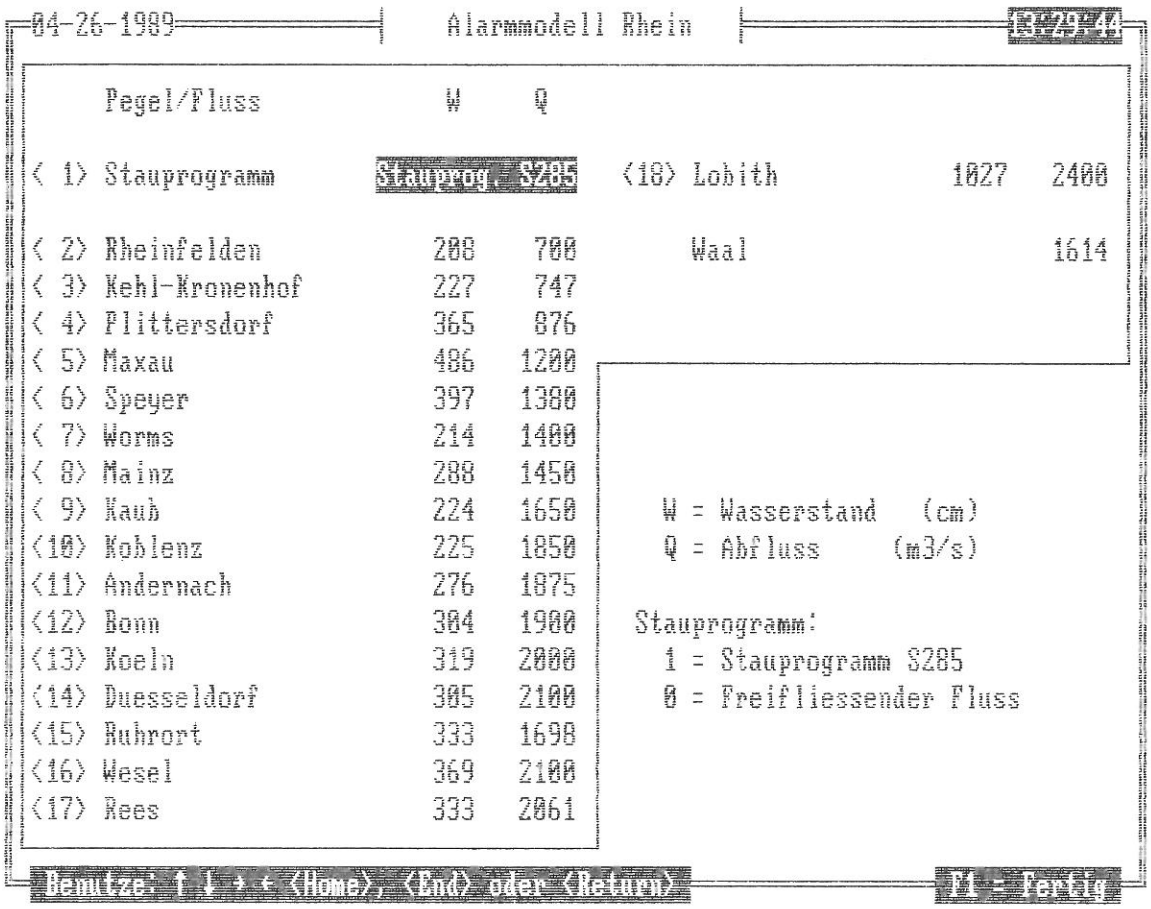
für die Eingabe allgemeiner Daten über die Ortsbestimmung des Unfalls, die Menge des eingeleiteten Stoffes, die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Stoffes, die Beobachtungsstelle, usw.
Die Daten müssen anhand von numerierten Fragen eingegeben werden. Die Art der einzugebenden Information wird mit einem einzigen Wort umschrieben. Anlage B gibt eine kurze Erläuterung zu einigen Fragen.

– MASKE 2 (optional):



für die Eingabe von (gemessenen) Konzentrationen, welche als Ausgangspunkt für die Berechnungen weiter stromabwärts dienen. Diese Maske wird nur dann gezeigt, wenn bei Maske 1 angegeben wurde, daß ein Konzentrationsprofil eingegeben werden soll. In chronologischer Reihenfolge wird nach der Einheit der (gemessenen) Konzentrationen und anschließend nach den Meßzeitpunkten und Meßwerten gefragt.
Die Zeit wird in Stunden nach der ersten Messung angegeben. Der Zeitpunkt der ersten Messung ist also immer gleich 0. Für eine eventuelle Hintergrundkonzentration sollte vorher eine Korrektur vorgenommen werden. Das Programm interpoliert linear zwischen den eingegeben Werten. Anlage C gibt ein Beispiel.

– MASKE 3:



für die Eingabe der benötigten hydrologischen Daten im Rheineinzugsgebiet, wie z.B. Wasserstände am Oberrhein und Stauregelungen im niederländischen Teil. Aus dem Wasserstand wird mit Hilfe von Wasserstands-Abfluß-Tabellen der Abfluß berechnet.

Das Modell berechnet die Abflußverteilung über die niederländischen Rheinzweige anhand des Wasserstandes am Pegel Lobith und der eingegebenen Stauregelungen.

4. BENUTZUNG DER DATEN DER TÄGLICHEN BEKANNTGABE

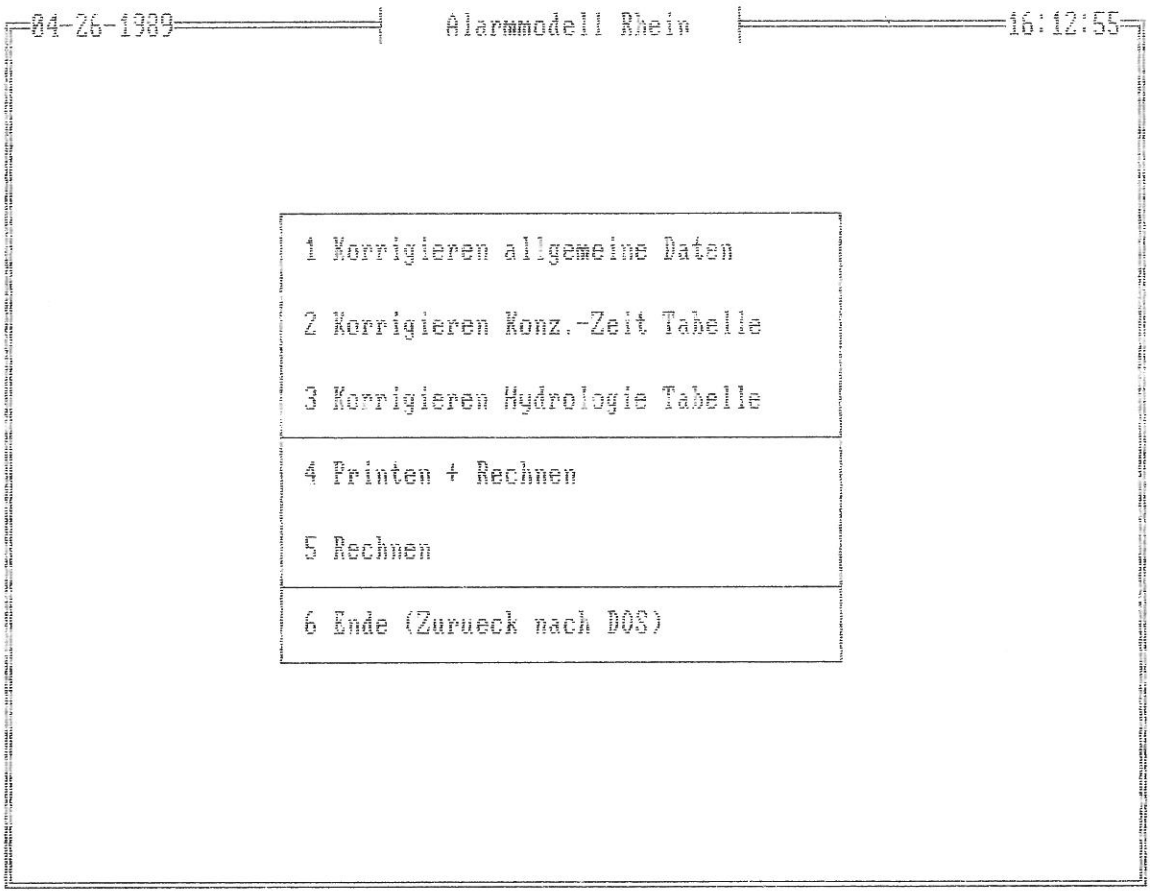
Bei der Entwicklung des Modells wurde von der Benutzung aktueller, allgemein verfügbarer Wasserstands- und Abflußdaten ausgegangen. Anlage D enthält eine Übersicht über die vom Alarmmodell benutzten Pegel mit telephonischen Anrufbeantwortern und deren Telephonnummer. Da die Meßstellen Kehl-Kronenhof und Plittersdorf noch nicht mit automatischen Meßwertansagern ausgestattet sind, wird der Wasserstand dieser Pegel vorläufig mittels Bezugslinien aus dem Wasserstand am Pegel Rheinfelden abgeleitet.

Zur Zeit ist nur für das Hochwassermeldezentrum des DBW/RIZA eine Verbindung mit den dort vorhandenen Datenbeständen der täglichen Bekanntgabe hergestellt worden. Dies bedeutet, daß die benötigten Daten automatisch ausgewählt und auf der betreffenden Bildschirmmaske angezeigt werden. Falls erforderlich sind Änderungen danach zu jeder Zeit möglich.

Falls die Berechnung einen oder mehrere Tage nach dem Unfall durchgeführt oder wiederholt wird, interpoliert das Programm automatisch zwischen den bereits verfügbaren Wasserständen. Die so erhaltenen Wasserstände werden auf der Bildschirmmaske 3 fett gezeigt; dies um den Unterschied zu den Wasserständen, welche nicht mittels Interpolation erhalten wurden und somit Vorhersagen sind, deutlich herauszustellen. Auch jetzt sind Änderungen möglich.

5. DAS HAUPTMENÜ

Wenn alle Daten eingegeben worden sind, kommt man in das Hauptmenü, von wo aus man in die Eingabemasken zurückkehren kann, um Daten zu ändern. Danach kehrt man im Prinzip wieder in das Hauptmenü zurück. Sollten die vorgenommenen Änderungen eine der anderen Eingabemasken beeinflussen, werden diese zunächst durchlaufen, bevor man wieder in das Hauptmenü zurückkehrt.



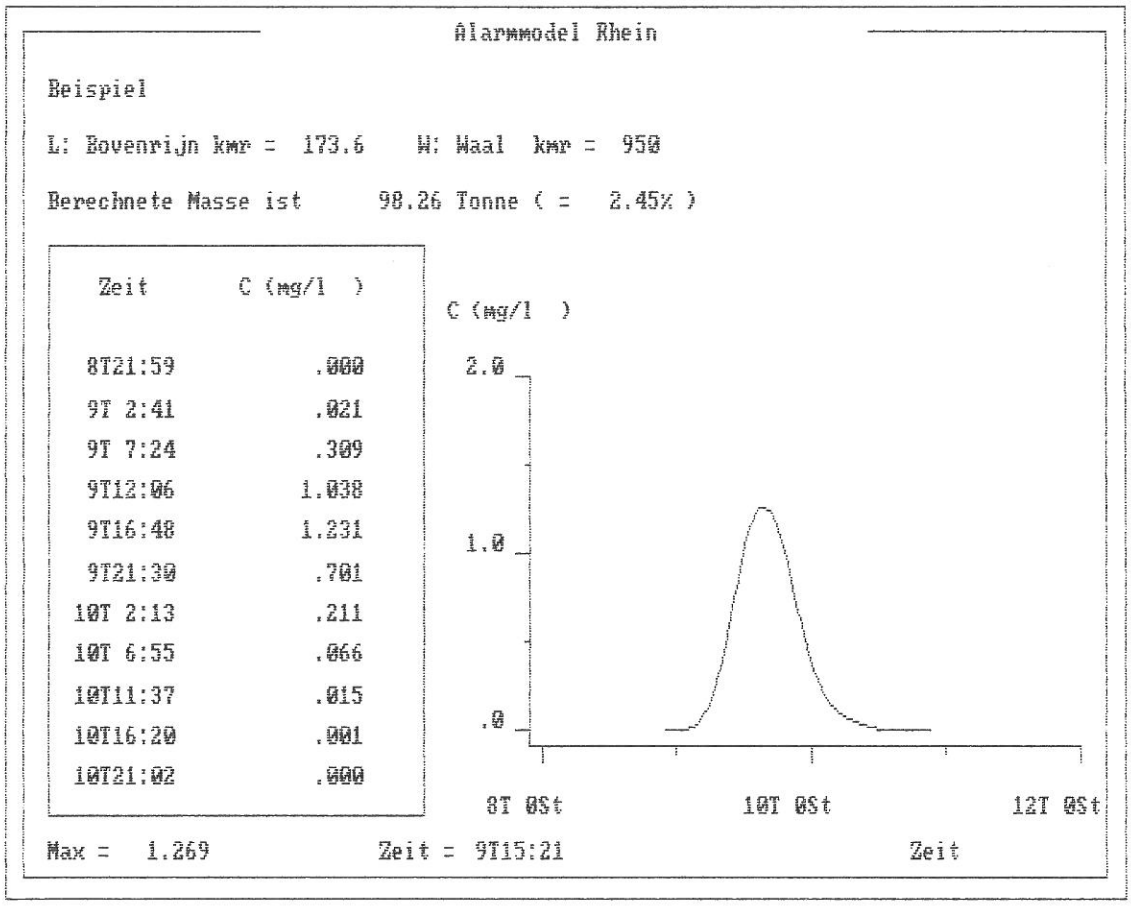
Vom Hauptmenü aus kann man die eingegebenen Daten ausdrucken lassen und die Berechnung starten. Wenn die Berechnung abgeschlossen wird, kehrt man wieder in das Hauptmenü zurück.

6. DARSTELLUNG DER BERECHNUNGSERGEBNISSE

Nachdem die Berechnung durchgeführt worden ist, kann der Benutzer über das Menü die Ergebnisse auf dem Bildschirm aufrufen und anschließend ausdrucken. Die Ergebnisse werden in einem grafisch dargestellten Konzentrationsverlauf (nach Eingabe einer **1)** und einer sog. Fließzeitentabelle (nach Eingabe einer **2)** zusammengefaßt. Gibt man eine **0** ein, kehrt man in das Hauptmenü zurück (Paragraph 5).

6.1 Darstellung des Konzentrationsverlaufs

Dieser Bildschirm zeigt den grafischen Verlauf der Konzentration als Funktion der Zeit am Beobachtungspunkt. Die Zeitangabe bezieht sich auf den Zeitpunkt der Stoßeinleitung bzw. den Anfang der Fronteinleitung bzw. den Moment der ersten Messung (Konzentration-Zeittabelle). Die Zeit wird in Tagen und Stunden angegeben. Weiter stellt eine Tabelle eine zahlenmäßige Übersicht der Ergebnisse dar und man erhält nähere Informationen, wie z.B. durchgegangene Schadstoffmenge, Zeitpunkt und Größe der maximalen Konzentration.



Durch die Eingabe einer **1** wird dieser Bildschirm ausgedruckt. Benutzen Sie dazu nicht die »Print Screen Taste«!

Durch die Eingabe einer **3** kehrt man in das Menü für die Darstellung der Rechenergebnisse zurück.

Durch die Eingabe einer **2** kann der Benutzer selbst den Maßstab der Zeitachse der Tabelle und der Grafik bestimmen. Dazu müssen Anfang, Ende und Intervall, alle in Tagen und Stunden, angegeben werden. Das Intervall ist der Zeitschritt in der Tabelle.

Gibt man als Anfang oder Ende nur <**Return**> ein, wird der ursprüngliche Wert genommen. Gibt man als Intervall <**Return**> ein, bestimmt das Programm selbst den Zeitschritt. Diese Möglichkeit ist zu empfehlen.

Für die Konzentrationsachse ist kein Maßstab vorgesehen. Es ist möglich, daß das Programm vom angegebenen Anfangs- oder Endezeitpunkt abweicht. Dies ist der Fall, wenn diese Zeitpunkte zu einer »unglücklichen« Zeitangabe auf der Achse führen würden.

6.2 Darstellung der Fließzeitentabelle

Dieser Bildschirm zeigt für einige geografische Punkte (Orte, hydrologische Übergänge, usw.) die Fließzeit der Verunreinigung bis zu diesem Punkt. Unter Fließzeit versteht man hier den Zeitpunkt, an dem die maximale Konzentration im Falle einer Stoßeinleitung auftritt. Die Tabelle macht Angaben zu der zwischen Eingangs- und Zielort gelegenen Stelle, an der sich die Verunreinigung zu einem gegebenen Zeitpunkt befindet.

Die Fließzeitentabelle kann sich aus mehreren Bildschirmen zusammensetzen. Dies ist sicher der Fall, wenn die Verunreinigung über verschiedene Wege vom Eingangs- zum Zielort gelangen kann. Am Anfang jedes Weges wird am oberen Bildschirmrand Information über den Prozentsatz der eingeleiteten Menge, welche über diesen Weg transportiert worden ist, erteilt. Außerdem werden Angaben zum (mittleren) Dispersionskoeffizienten entlang dieses Weges gemacht.

```
                        Alarmmodel Rhein

Pfad:  2  Masse Fraktion:  .025  Mitl. Disp.koeff.(m2/s):   105.

          Stelle                    Km.        Fliesszeit
                                                (Tagen)

          Einleitung              175.00        0T 0:00
          Rheinseitenkanal        200.10        0T 9:25
          Markolsheim-K           238.40        1T 4:41
          Rheinau-R               254.00       1T14:43
          Gerstheim-K             271.00        2T 3:08
          Strassburg-K            287.20       2T12:29
          Kehl-Kronenhof          292.20       2T14:42
          Plittersdorf            340.20       3T18:03
          Maxau                   362.30       3T22:45
          Speyer                  400.60        4T 6:07
          Worms                   443.40       4T15:11
          Mainz                   498.30        5T 5:05

                                        -- Fortsetzung folgt --

type: 1= Fortsetzung, 2= Zurueck, 3= Print, 4= Ende :
```

Durch Eingabe einer **1** oder einer **2** kann man vor- und zurückblättern.

Durch Eingabe einer **3** wird der Bildschirm ausgedruckt. Benutzen Sie dazu nicht die »Print Screen Taste«!

Durch Eingabe einer **4** kehrt man in das Menü für die Darstellung der Rechenergebnisse zurück.

7. Fehleranzeigen und Abbruch des Programms

Obwohl die Dateneingabe so viel wie möglich auf Plausibilität geprüft wird, können nicht alle Fehler in dieser Phase entdeckt werden. Es bleibt also möglich, daß eine fehlerhafte Eingabe während der Berechnung festgestellt wird. Die Berechnung wird dann abgebrochen und der Grund des Abbruchs wird dem Benutzer mittels eines Fehlercodes mitgeteilt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die möglichen Fehlercodes, deren Ursache sowie die Fehlerbeseitigung.

Code	Ursache und Fehlerbeseitigung
061	Der Eingangspunkt wird nicht gefunden. Ursache: der Eingangspunkt befindet sich genau auf einer Abschnittsgrenze. Durch interne Abrundungen kann dies zu Problemen führen. Fehlerbeseitigung: Verlegung des Eingangspunktes z.B. um 100 m.
062	Der Zielpunkt wird nicht gefunden. Ursache und Fehlerbeseitigung siehe 061.
071	Die Dauer einer Fronteinleitung oder einer Konzentrationstabelle ist im Verhältnis zur Fließzeit zu lange. Fehlerbeseitigung: – Wahl größerer Abstände zwischen Eingangs- und Zielpunkt; – Verkürzung der Dauer der Fronteinleitung oder der Konzentrationstabelle.
114	Der Eingangspunkt wird nicht gefunden. Ursache und Fehlerbeseitigung siehe 061.
115	Der Zielpunkt wird nicht gefunden. Ursache und Fehlerbeseitigung siehe 062.

Nach Abbruch der Berechnung sollte zunächst die Eingabe geändert werden, bevor eine neue Berechnung angefangen werden kann!

LITERATUR

BfG: Fließzeiten im Rhein aus Flügelmessungen, BfG-0392, Koblenz, April 1987

BfG: Fließzeiten im Rhein aus Wasserspiegellagenberechnungen, BfG-0429, Koblenz, Februar 1988

DVWK: Eignung und Anwendung von Vorhersagemodellen für einen »Warn- und Alarmplan Rhein«, DVWK-Arbeitskreis, Koblenz, Juli 1987

Fischer, H.B.: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, New York, 1979

Gelhar, L.W. & Collins, M.A.: General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, Water Resour. Res., 1971

WL: Kalamiteitenmodelering Rijn en Maas, Waterloopkundig Laboratorium Delft, T380, Oktober 1988

Fluß	Ortsbezeichnung	Fluß-km
Oberrhein	Rheinfelden	148,3
Oberrhein	Basel	170
Oberrhein	Kehl-Kronenhof	292,2
Oberrhein	Straßburg	293,5
Oberrhein	Mündung Kinzig	298,2
Oberrhein	Mündung Ill	311,3
Oberrhein	Seltz	334
Oberrhein	Plittersdorf	340,2
Oberrhein	Maxau	362,3
Oberrhein	Speyer	400,6
Oberrhein	Mannheim	425
Oberrhein	Mündung Neckar	428,5
Neckar	Plochingen	203
Neckar	Gundelsheim	100
Neckar	Heidelberg	26
Oberrhein	Worms	443,4
Oberrhein	Mündung Main	496,8
Oberrhein	Mainz	498,3
Main	Steinbach	200
Main	Obernau	92
Main	Frankfurt a.M.	37
Oberrhein	Mündung Nahe	529,1
Oberrhein	Kaub	546,2
Oberrhein	Mündung Lahn	585,7
Oberrhein	Koblenz	591,5
Oberrhein	Mündung Mosel	592,5
Mosel	Metz	300
Mosel	Trier	95
Mosel	Cochem	52
Oberrhein	Andernach	613,8
Oberrhein	Bonn	654,5
Oberrhein	Mündung Sieg	659,3
Oberrhein	Köln	688
Oberrhein	Düsseldorf	744,2
Oberrhein	Mündung Ruhr	780
Oberrhein	Ruhrort	780
Oberrhein	Wesel	814
Oberrhein	Mündung Lippe	814,4
Oberrhein	Rees	837,4
Bovenrijn	Lobith	862,2
Bovenrijn	Pannerdense Kop	867,2
Waal	Nimwegen	884,9
Waal	Dodewaard	901,4
Waal	Tiel	913,2
Waal	Vuren	951,8
IJssel	IJsselkop	878,5
IJssel	Deventer	945
IJssel	Kampen	994,5
Nederrijn – Lek	Arnheim	884
Nederrijn – Lek	Amerongen	922
Nederrijn – Lek	Hagestein	946,6

<2> Einleitungszweig

Handlung:
Geben Sie die Nummer des Streckenabschnittes an, auf dem sich der Unfall ereignet hat (siehe Kommentarteil).

Bemerkung:
Falls Sie ein gemessenes Konzentrationsprofil eingeben möchten, sollten Sie hier die Nummer des Streckenabschnitts, auf dem die Messungen durchgeführt worden sind, eingeben.

<2> Einleit.kmr.

Handlung:
Geben Sie den Flußkilometer der Unfallstelle ein. Siehe auch Anlage A und Bemerkung.

Bemerkung:
Falls Sie ein gemessenes Konzentrationsprofil eingeben möchten, sollten Sie hier den Flußkilometer der Stelle, an der die Messungen durchgeführt worden sind, eingeben.

N.B.
Es ist möglich, daß, nachdem der Einleitungs-km eingegeben wurde, das Programm fragt, ob der Unfall in der Kanalstrecke oder im (Rest)-Rhein stattgefunden hat. Dies hängt mit den Parallelstrecken zwischen Kembs und Plittersdorf zusammen (siehe Anlage A). Durch Eingabe eines **K** oder eines **R** kann die betroffene Strecke angegeben werden.

<3> Einleitungsart

Handlung:
Geben Sie eine **1** ein, wenn es sich um eine Stoßeinleitung handelt, eine **2** für eine Fronteinleitung und eine **3** wenn ein gemessenes Konzentrationsprofil eingegeben wird.

Stoßeinleitung = die gesamte Verunreinigung ist auf ein Mal in das Oberflächengewässer geraten.
Fronteinleitung = die gesamte Verunreinigung ist gleichmäßig über eine noch einzugebende Anzahl von Stunden in das Oberflächengewässer geraten.
Tabelle = ein gemessenes Konzentrationsprofil wird eingegeben.

<4> Dispersionskoeffizient

Handlung:
Geben Sie den Wert des Dispersionskoeffizienten (m^2/s) ein oder tippen Sie <**Return**> für den »Default Wert«.

Bemerkung:
Falls ein Wert eingegeben wird, gilt dieser Wert für die ganze Strecke.

Der Default-Wert des Dispersionskoeffizienten wird mittels folgender Formel berechnet:

$$D = 0{,}075 \cdot u \cdot Q$$

wobei: u = die örtliche Fließgeschwindigkeit
Q = der örtliche Abfluß.

Diese Formel wurde noch nicht kalibriert.

<5> Halbwertszeit

Handlung:
Geben Sie die Zahl der Tage ein, in der 50% des eingeleiteten Stoffes aus der Wasserphase verschwindet. Geben Sie <**Return**> ein, falls der Stoff sich nicht abbaut.

Bemerkung:

1) Wenn nicht die Halbwertszeit, sondern die Zahl der Tage, in der ein willkürlicher Prozentsatz des Stoffes verschwindet, bekannt ist, läßt sich die Halbwertszeit wie folgt berechnen:

$$\text{Halbwertszeit} = Tp \cdot \ln(2)/\ln\{100/(100-p)\}$$

In dieser Formel ist Tp die Zeit in der p% des Stoffes verschwinden.
Beispiel: Angenommen wird, daß nach 11,5 Tagen 70% eines Stoffes verschwunden ist, also: p = 70% und Tp = 11,5 (T). Die Halbwertszeit beträgt dann 6,62 Tage.

2) Die Beziehung zwischen der Halbwertszeit und dem ebenfalls viel benutzten linearen Abbaukoeffizienten ist:

$$\text{Halbwertszeit} = 1/\{k \cdot \ln(2)\}$$

wobei: k = dem linearen Abbaukoeffizienten (Dimension 1/T) ist.

Für die Sedimentation kann der lineare Abbaukoeffizient folgendermaßen berechnet werden:

$$k = v \cdot F/h$$

wobei: v = Sedimentationsgeschwindigkeit (m/T)
F = adsorbierte Fraktion (–)
h = (mittlere) Wassertiefe (m).

Die adsorbierte Fraktion F des Gesamtgehaltes kann folgendermaßen berechnet werden:

$$F = K \cdot S/(1+K \cdot S)$$

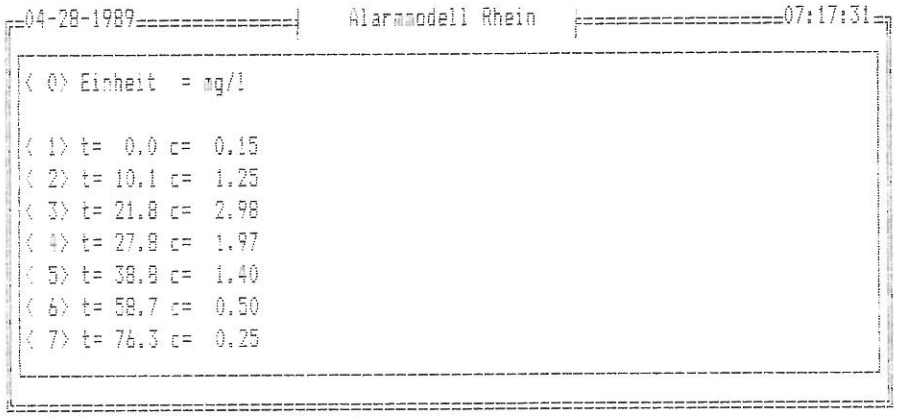
wobei: K = der Partitionskoeffizient, in Volumeneinheit pro Gewichtseinheit Schwebstoff
S = der (mittlere) Schwebstoffgehalt.

Beispiel Konzentration-Zeit-Tabelle

Es wird angenommen, daß nachfolgender gemessener Konzentrationsverlauf vorliegt:

Datum-Zeit	Konzentration (mg/l)
870506-0815	0,35
870506-1820	1,45
870507-0600	3,18
870507-1200	2,17
870507-2300	1,60
870508-1855	0,70
870509-1230	0,45

Weiter wird angenommen, daß die Hintergrund-Konzentration in dieser Periode 0,20 mg/l beträgt. Die einzugebenden Werte sind dann:



Die maximale Zeit, welche eingegeben werden kann ist 999,99 Stunden. Die maximale Konzentration beträgt 9999,99. Wenn nötig, sollte vorher eine andere Einheit gewählt werden.

ANLAGE D **Pegel mit automatischen Anrufbeantwortern und ihre Nummer**

Pegel	Telephonnummer
Rheinfelden	061–875068
Plittersdorf (1989)	07222–19722
Maxau	0721–19722
Speyer	06232–19722
Worms	06241–19722
Mainz	06131–19722
Kaub	06774–19722
Koblenz	0261–19722
Andernach	02632–19722
Bonn	0228–19722
Köln	0221–736263
Düsseldorf	0211–326622
Ruhrort	0203–44098
Wesel	0281–23828
Emmerich	02822–70030
Lobith	08303–1420
IJsselkop	08303–8370
Gundelsheim (Neckar)	06269–277
Cochem (Mosel)	02671–19722
Obernau (Main	06028–6440

Von den Meßstellen Kehl-Kronenhof und Plittersdorf sind die Wasserstände z.Zt. noch nicht über Meßwertansager abrufbar. Für diese Pegel werden deshalb vorläufig Bezugslinien zu dem Wasserstand am Pegel Rheinfelden herangezogen. Der Wasserstand an diesem Pegel wird mittels Pfeiftönen angegeben. Die Meldung beginnt mit einer zweifachen Meldung des momentanen Wasserstandes, danach wird für die vorhergehenden 24 Stunden der Wasserstand an den geraden Stunden angegeben. Dabei wird in der Zeit zurückgegangen.

Ein Bericht könnte wie folgt »aussehen«:

momentaner Wasserstand 315 cm

momentaner Wasserstand 315 cm

Wasserstand 10.00 h: 312 cm

| = Pfeifton; 1 Pfeifton = 1 usw. bis 10 Pfeiftöne = 0

| = lang angehaltener Ton bedeutet eine Trennung zwischen zwei Ziffern

. . . . . = kurze Pfeiftöne bedeuten die Trennung zwischen der 1. und 2. Durchsage des momentanen Wasserstandes.

= wechselnde Töne bedeuten die Trennung zwischen der Durchsage der Wasserstände an verschiedenen Zeitpunkten.

IKSR/KHR Expertengruppe

Comité Commun d'experts de la CIPR et de la CHR

Alarmmodell für den Rhein

Modèle d'alerte pour le Rhin

P.S. Griffioen
Rijkswaterstaat,
Dienst Binnenwateren/RIZA, Lelystad

IKSR/CIPR
Sekretariat/Secrétariat
Postfach 309
D-5400 Koblenz
Bundesrepublik Deutschland/
République fédérale d'Allemagne

CHR/KHR
Sekretariat/Secrétariat
Postbus 17
NL-8200 AA Lelystad
Niederlande/Pays-Bas

Bericht Nr. II-2 der KHR
Rapport no. II-2 de la CHR
Originalsprache: Niederländisch
Langue originale: néerlandais

© 1989, CHR/KHR
ISBN 907098007x

CHR

Institution

1970 A la suite de la coopération des comités nationaux pour le PHI dans le cadre de la coopération régionale du programme de l'UNESCO de la Décennie Hydrologique Internationale (DHI)

1975 Poursuite des travaux dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO et du Programme d'Hydrologie Opérationnelle (PHO) de l'OMM

1978 Appui des travaux de la Commission par l'échange d'une note verbale par l'intermédiaire des Ministères des affaires étrangères des pays concernés

Pays participants

la Suisse, l'Autriche, la République fédérale d'Allemagne, la France, le Luxembourg, les Pays-Bas

Langues de travail

français et allemand

Tâches

* Encourager la coopération des instituts hydrologiques scientifiques et des services hydrologiques dans le bassin du Rhin
* Faciliter l'échange de données et d'informations dans le bassin du Rhin (par exemple données actuelles et prévisions)
* Harmoniser les données de base dans le bassin du Rhin
* Echange des résultats de recherches hydrologiques scientifiques dans le bassin du Rhin

CIPR

Institution

1950 Première séance de la CIPR suite à la Commission du Saumon fondée en 1886 à laquelle participaient les parties du traité de cette Commission

1963 La souscription du Traité de Berne (Convention à propos de l'institution de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution)

1976 Adhésion des Communeautés Européennes à la Commission

Les parties de la Convention

la Suisse, la République fédérale d'Allemagne, la France, le Luxembourg, les Pays-Bas, les CEE

Langues officielles

français et allemand

Tâches

1. La Commission doit
   a) préparer et faire réaliser toutes les recherches pour la détermination du caractère du volume et de l'origine de la pollution du Rhin, et évaluer les résultats,
   b) proposer aux gouvernements souscrites des mesures appropriées à la protection du Rhin contre les pollutions,
   c) préparer les bases pour les conventions éventuelles entre les gouvernements souscrits à propos de la protection du Rhin contre la pollution.

2. En plus, la Commission est compétente dans toutes les autres affaires que les gouvernements souscrits la transmettent dans un accord commun.

Préface

La grave pollution du Rhin survenue à la suite de l'incendie de chez Sandoz AG près de Bâle, le 1er novembre 1986, constituait le thème de discussion de la 7ième conférence des Ministres à propos de la pollution du Rhin, qui a eu lieu le 19 décembre 1989 à Rotterdam. Ces discussions ont abouti à des décisions envisageant l'amélioration de la qualité de l'eau du Rhin d'une façon considérable et de prevenir les dégâts causés par l'introduction de substances nuisibles à la suite d'accidents dans le bassin du Rhin ou de restreindre leurs effets.

La mise en oeuvre détaillée de ces conventions revient aux états riverains individuels et à la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution (CIPR). Cependant les ministres tenaient pour une collaboration entre la CIPR et la Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR) dans le domaine de l'élaboration et de l'amélioration d'un modèle pour le calcul de la propagation des ondes de pollution dans le Rhin. Comme cette collaboration correspondait bien au projet de recherches de la CHR intitulé »Temps d'écoulement dans le Rhin«, la CHR était disposée à apporter sa part à la collaboration envisagée.

Afin de réaliser les améliorations du modèle, un groupe de travail commun a été institué en mars 1987. Le président de la CHR s'est chargé de la présidence de ce groupe, tandis que le secrétaire de la CIPR s'est chargé du secrétariat. En plus les services suivants étaient représentés par des experts:

- le Service hydrologique et géologique national à Berne
- le Service de la Navigation à Strasbourg
- Bundesanstalt für Gewässerkunde à Coblence
- Dienst Binnenwateren/RIZA du Rijkswaterstaat à Lelystad

Le groupe de travail s'est concentré d'abord sur deux thèmes, à savoir l'élaboration d'un modèle d'alerte relativement simple fournissant de bons résultats avec des temps de calcul brefs et l'évaluation des essais avec traceur déjà réalisés de même que la coordination des essais avec traceur envisagés.

La première version du modèle est déjà achevé et implantée auprès les services concernés. Il s'agit d'un modèle essentiellement unidimensionnel, qui peut, éventuellement, aussi prendre en compte les accidents dans les affluents les plus importants du Rhin. Comparé à la situation de 1986, on a déjà atteint une amélioration considérable avec ce modèle pour un ordinateur personnel. En cas d'accidents en amont, le modèle fournit pour plusieurs stations du Rhin en aval une prévision du temps d'arrivée et de la concentration maximale. Ces deux résultats étant déjà très proches de la réalité, la forme de l'onde de pollution à attendre ne peut cependant pas encore être prévue d'une façon satisfaisante. On envisage donc l'amélioration de la version actuelle du modèle, dès que d'autres données et résultats de recherches en cours seront disponibles. Il s'agit des résultats qui d'une part proviendront d'une analyse de sensibilité et d'autre part des essais avec traceurs (éventuellement aussi d'autres données).

Ce n'est probablement que dans une année et demie que les résultats des recherches en cours seront disponibles et qu'une deuxième version améliorée du modèle d'alerte pourra être réalisée. Par conséquent, on a jugé utile de publier le programme du modèle disponible à présent, y compris sa description (même si sans aucun doute beaucoup d'adaptations seront nécessaires pour la réalisation de la deuxième version). Il était tout indiqué d'insérer le rapport dans une des séries des publications de la CHR. Nous sommes d'avis que ce rapport n'est pas seulement très utile aux utilisateurs du modèle, mais aussi à tous ceux qui s'intéressent en général aux modèles de ce genre.

Le président de la CIPR
R. Pedroli

Le président de la CHR
J. van Malde

TABLE DES MATIÈRES

Préface 49

PARTIE I: COMPOSITION DU MODÈLE D'ALERTE

1. Introduction 55

2. Points de départ 57

3. Schématisation et données hydrologiques 58
3.1 Schématisation 58
3.2 Données de base 58
3.3 Débits et répartition des débits 62
3.4 Temps d'écoulement et vitesse du courant 63
3.4.1 Calcul des temps d'écoulement pas à pas 64

4. Equations du modèle 66
4.1 Calcul de la concentration 66
4.1.1 Déversement momentané sans affluents ni points de défluence 66
4.1.2 Déversement quelconque 67
4.1.3 L'effet d'affluents et des points de défluence 67
4.2 Coefficient de dispersion 68

5. Résumé 69

PARTIE II: MODE D'EMPLOI POUR LE PROGRAMME DU MODÈLE

1. Installation du modèle 73
1.1 Spécification du hardware 73
1.2 Le programme SETUP 73

2. Généralités à propos du programme 75
2.1 Objectif et (im)possibilités du modèle 75
2.2 Le programme: démarrage et déroulement 75

3. Entrée des données: les masques d'entrée 76
3.1 Généralités 76
3.2 Messages d'erreur à l'entrée 76
3.3 Les masques d'entrée 76

4. Utilisation des données des rapports journaliers 79

5. Le menu principal 80

6. Sortie des résultats des calculs 81
6.1 Sortie de l'évolution des concentrations 81
6.2 Sortie du tableau des temps de parcours 82

7. Messages d'erreur et interruption du programme 83

Bibliographie 84

Annexe A
Désignations des lieux et kilométrages 85

Annexe B
Explication écran 1 86

Annexe C
Exemple de tableau temps-concentration 88

Annexe D
Echelles avec répondeur automatique et leur numéro 89

Figures
Fig. 1 Stations de référence pour le modèle d'alerte 59
Fig. 2 Les ramifications du Rhin aux Pays-Bas 60
Fig. 3 La section parallèle du tronçon du Rhin supérieur retenu par barrages 61
Fig. 4 Répartition des débits sur les ramifications néerlandaises selon le programme de manoeuvre S285 62
Fig. 5 Relation niveau d'eau – temps d'écoulement pour le tronçon Kembs-Breisach 63
Fig. 6 Relation niveau d'eau – temps d'écoulement pour le tronçon Wijhe-Katerveer 64
Fig. 7 Résultat d'un calcul des temps d'écoulement pas à pas 65
Fig. 8 Conditions de débit dans le Rhin en décembre 1987 65

PARTIE I: Composition du modèle d'alerte

1. INTRODUCTION

Le Rhin et ses affluents remplissent des fonctions importantes pour la société et l'environnement. Le fleuve approvisionne partiellement les pays riverains en eau potable; il alimente également des régions naturelles et touristiques importantes. De plus, cependant, le bassin du Rhin est industrialisé dans une large mesure et le Rhin compte parmi les fleuves avec la navigation la plus intense. Par conséquent, il y a un danger continuel que des accidents causés par l'industrie ou la navigation occasionnent des rejets de substances dangereuses au courant. Tels accidents constituent une menace pour les conditions sociales et écologiques posées au fleuve.

Au cours des dernières années la qualité des eaux de surface dans le bassin du Rhin s'est améliorée peu à peu. Vu les mesures d'assainissement plus drastiques prévues, on peut attendre que cette tendance continuera pendant les années prochaines. En même temps on s'occupe également sur le plan international du rétablissement écologique du Rhin.

L'amélioration de la qualité des eaux de surface a pour conséquence que les fonctions sociales et écologiques deviennent plus sensibles à une aggravation soudaine. En outre, des perturbations de l'écosystème deviennent de plus en plus intolérables du point de vue de la société. Par conséquent, il faut réduire au minimum le danger dû à des accidents.

Un des accidents les plus graves jusqu'à aujourd'hui s'est présenté le 1er novembre 1986, quand un incendie est survenu à l'usine chimique Sandoz AG à Bâle. L'eau usée pour l'extinction a apportée au Rhin des grandes quantités de produits chimiques qui ensuite ont été transportées à travers la France, la République fédérale d'Allemagne et les Pays-Bas. Cet accident a perturbé l'approvisionnement en eau le long du Rhin et a forcé les pêcheurs professionnels de cesser leurs activités. Il y a eu une mortalité des poissons loin en aval du lieu de l'accident. En outre, l'accident a fortement nui aux organismes inférieures.

L'accident chez Sandoz a clairement révélé que des prévisions concernant le temps de parcours d'une vague de pollution sont indispensables dans le bassin du Rhin. Après l'accident il y avait de l'incertitude concernant le temps d'arrivée de la vague de pollution et les niveaux de concentration possibles. D'une part cette incertitude a été due à la distribution d'information qui a été restreinte et défectueuse, d'autre part aux imperfections des estimations des temps de parcours. Des prévisions fiables sont un aide important pour prendre des mesures de sécurité et des contre-mesures ainsi que pour l'organisation de programmes de mesurage.

Lors de la conférence des ministres responsables des Etats riverains du Rhin, tenue en décembre 1986 à la suite de l'incendie chez Sandoz, le Programme d'action »Rhin« a été établi. Dans ce cadre, la CIPR et la CHR ont été priées de développer un modèle pour la prévision des temps de parcours de substances dans le Rhin. Ensuite, la CIPR et la CHR ont constitué un comité commun d'experts, comprenant des représentants d'Etats riverains du Rhin. La mission du comité d'experts a été de développer le modèle et d'y apporter les données nécessaires.

Lors du développement du modèle le comité d'experts a choisi une méthode échelonnée. Lors de la première phase, il s'est concentré au premier abord sur la prévision du temps d'arrivée d'une pollution. A l'automne de 1988, ces travaux ont abouti à une première version du modèle appelé »modèle d'alerte pour le Rhin«.

La description du procès étant simplifiée, le modèle ne permet à présent qu'une première estimation du niveau de concentration à attendre. Dans la phase suivante on envisage de s'occuper surtout de la concentration et d'élaborer une deuxième version améliorée du programme du modèle. Indépendemment de cela, il a été décidé de publier déjà la première version du modèle, par ce qu'elle peut être considerée comme un pas important vers un modèle d'alerte fiable pour le bassin du Rhin.

Le modèle est fondé sur les résultats des recherches des pays riverains du Rhin et couvre actuellement déjà la plus grande partie du Rhin. Des extensions du modèle jusqu'à quelques affluents importants sont prévues. Dès que les données nécessaires deviendront disponibles, ils pourront être incorporées dans le modèle. A ce propos le comité d'experts est d'avis qu'il faut soutenir la réalisation et l'évaluation des essais de traçage.

Le présent rapport comprend deux parties. La première partie décrit la composition du modèle d'alerte et justifie les données sur lesquelles le modèle est basé. Dans le deuxième chapitre les points de départ du comité d'experts sont formulés. Le chapitre 3 expose la schématisation du bassin du Rhin, ainsi que les données servant de base

au modèle. Ce chapitre discute également le calcul du temps de parcours et l'effet de débits variables sur le temps de parcours. Le chapitre 4 expose le calcul de concentration. La deuxième partie contient un mode d'emploi du modèle d'alerte.

2. POINTS DE DÉPART

Comme le montre l'examen de l'accident à l'usine chimique Sandoz, de grosses différences peuvent apparaître entre les temps d'arrivée de la vague de pollution prévus et ceux réellement observés. C'est particulièrement valable sur la partie du Rhin supérieur réglé par des retenues, mais sur le secteur du Rhin sans retenues en aval d'Iffezheim des différences peuvent aussi être observées.

De grosses différences entre les concentrations calculées resp. évaluées et les concentrations réellement mesurées peuvent également apparaître. Cette grande différence provenait principalement d'un manque d'information sur la quantité de polluant déversé dans les eaux. Ce manque d'information est en règle générale caractéristique des accidents et limite d'une part la fiabilité des prévisions mais souligne d'autre part l'importance de l'échange d'information entre les instances concernées. Une étude menée par un groupe de travail DVWK [DVWK, 1978] a mis en évidence que les différences entre les temps de passage prévus et réels n'étaient pas liées au concept de modélisation utilisé mais plutôt une conséquence des données utilisées à la base des calculs.

D'après les conclusions du DVWK il ne s'agit pas tant de la formulation mathématique et physique du modèle que plutôt de la quantité et le volume des données de base. En particulier le coefficient de dispersion, les vitesses du courant et les débits y sont cités. Sur la base de cette situation, le groupe de travail CIPR/CHR »Modèle d'alerte« s'est fixé les objectifs suivants:

- en premier lieu, obetenir un modèle d'utilisation facile;
- les calculs devront être basés sur les données hydrologiques actuelles généralement disponibles;
- la schématisation du bassin sera basée sur les données fournies par les pays riverains du Rhin;
- première phase des travaux: amélioration du calcul des temps de parcours.

Le modèle sera disponible sur Ordinateur PC. Afin de pouvoir établir des prévisions sur le temps d'arrivée sans l'aide de moyens techniques, des abaques additionnels seront établis.

3. SCHÉMATISATION ET DONNÉES HYDROLOGIQUES

3.1 Schématisation

La partie du bassin du Rhin qui est schématisée dans la présente version du modèle s'étend de l'échelle de Kembs (Rhin supérieur PK 173,6) jusqu'aux échelles de Vuren (Waal, PK 951,8), Hagestein (Lek, PK 946,6) et Kampen (IJssel, PK 994,5) (cf. cartes 1 et 2). Le tronçon supérieur entre Kembs et Plittersdorf est canalisé et caractérisé par cinq dérivations parmi lesquelles le Grand Canal d'Alsace d'une longueur de 53 km (carte 3). La répartition des débits entre les ramifications néerlandaises est réglée par les retenues sur le Lek et le Nederrijn. Il est envisageable d'étendre la schématisation courant 1989 jusqu'à l'embouchure de l'Aare ainsi qu'aux affluents importants comme la Sarre et la Moselle.

Le Rhin est divisé en tronçons. Les tronçons ont été choisis de manière à ce qu'ils puissent être considérés comme des unités hydrauliques (par ex. relativement à profil en travers et vitesse du courant). La présente version du modèle d'alerte contient 71 tronçons. La séparation en tronçons pour la partie allemande est basée sur le travail de la Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) [cf. BfG, 1988]. La schématisation néerlandaise a été réalisée par le Dienst Binnenwateren/RIZA (DBW/RIZA) [cf. WL, 1988].

3.2 Données de base

Pour le calcul des temps de parcours et des niveaux de concentration, les données sur la vitesse du courant et les débits sont indispensables. Cependant, le modèle d'alerte est un modèle de transport de substances, pour lequel les données hydrologiques nécessaires ne sont pas calculées à l'aide d'un modèle de débit, par contre, elles sont déduites au moyen de tableaux. Ces tableaux résultent de mesures et de calculs de modèles de débit antérieurement faits.

– *Niveaux d'eau*

Le modèle d'alerte prend comme point de départ que la détermination des vitesses d'eau et des débits doit être basée sur de l'information actuelle et publiquement disponible. En cas de rejet dû à un accident, il doit être possible de faire un calcul indépendant de tiers. Voilà pourquoi on a choisi les données sur les niveaux d'eau comme données principales. A un grand nombre d'échelles dans le bassin du Rhin le niveau d'eau est immédiatement disponible.

Les stations de mesure nécessaires au modèle et choisies par les instances mentionnées dans le paragraphe 3.1 figurent sur les cartes 1 et 2. A l'exception des données des échelles de Kehl-Kronenhof et Plittersdorf les niveaux d'eau de ces stations sont disponibles à partir de répondeurs automatiques. Plittersdorf sera équipé d'un tel appareil sous peu. A l'intervalle les niveaux d'eau à Kehl-Kronenhof – et provisoirement de Plittersdorf – sont tirés de courbes de relation des niveaux d'eau à l'échelle de Rheinfelden [BfG 1988, annexe 15].

– *Gestion de retenues*

Dans la partie du Rhin sans retenue entre Plittersdorf et Lobith, les niveaux d'eau sur les tronçons sont déterminants pour les débits et les vitesses d'eau concernés. Les débits et les vitesses du courant sur le tronçon réglé par des retenues entre Kembs et Plittersdorf comme dans les ramifications néerlandaises du Rhin sont déterminés par la manoeuvre des retenues. En ce qui concerne le tronçon entre Kembs et Plittersdorf, le modèle d'alerte part d'un programme de manoeuvre fixé (voir le paragraphe 3.3).

En ce qui concerne les ramifications néerlandaises du Rhin le modèle différencie d'une part le programme de manoeuvre S285 et d'autre part l'état sans retenue, aussi pour les faibles débits. Le programme S285 règle normalement le débit de l'IJssel et du Nederrijn. En incorporant l'état sans retenue dans le modèle, on peut tenir compte de changements éventuels. Contrairement au tronçon allemand canalisé, pour le tronçon néerlandais des indications concernant les règles de manoeuvre sont nécessaires.

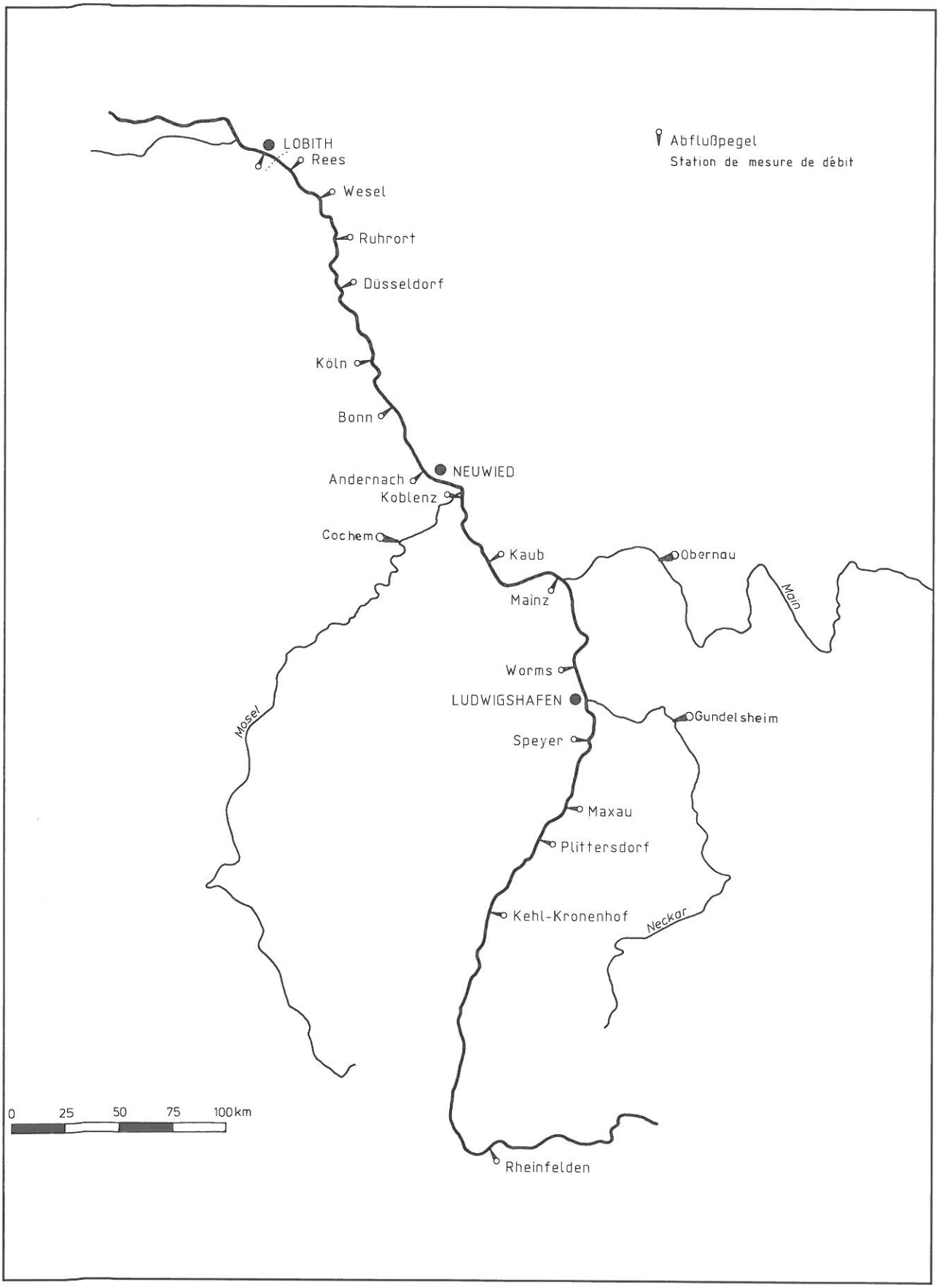


Fig. 1 Stations de référence pour le modèle d'alerte

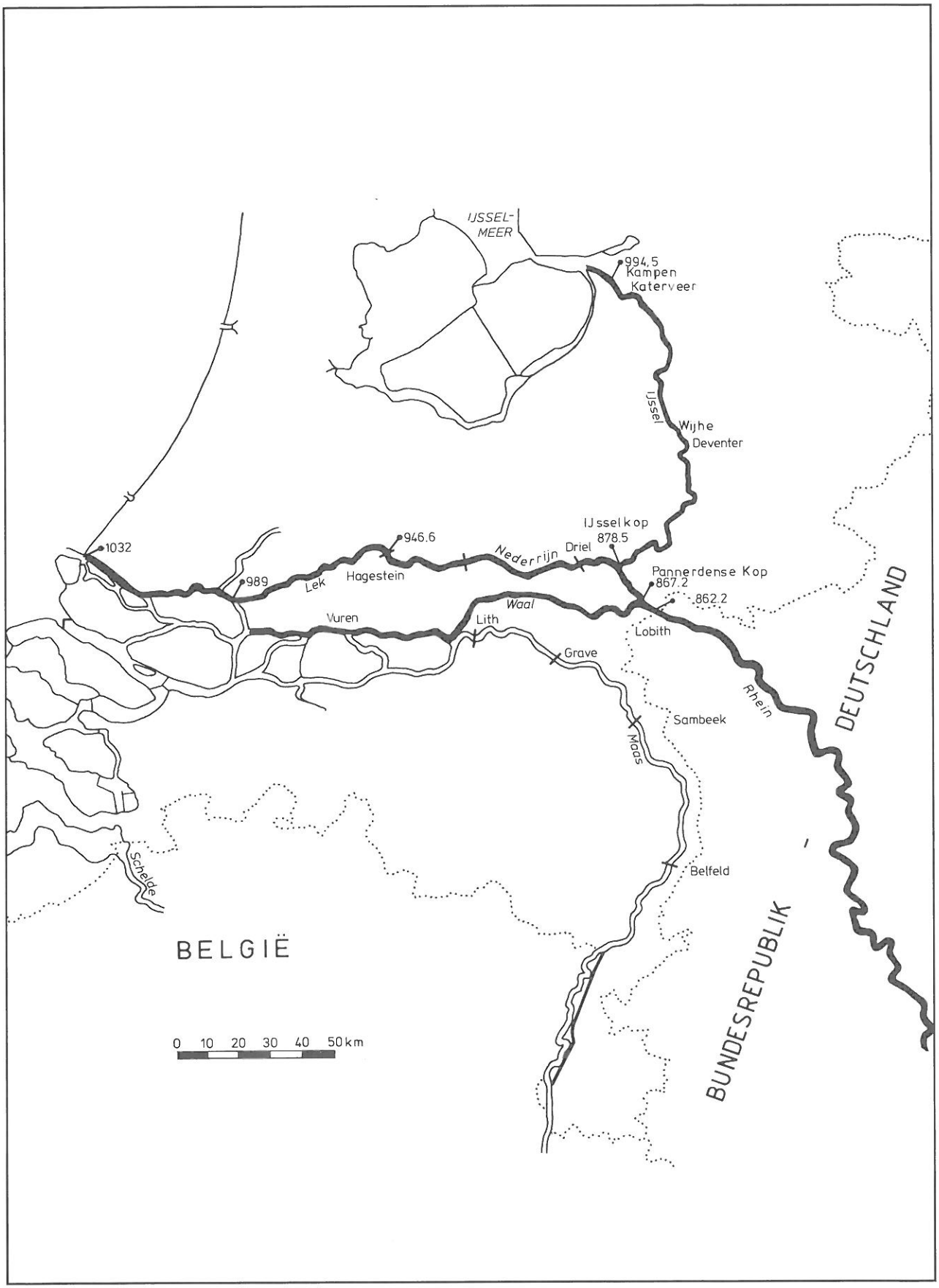


Fig. 2 Les ramifications du Rhin aux Pays-Bas

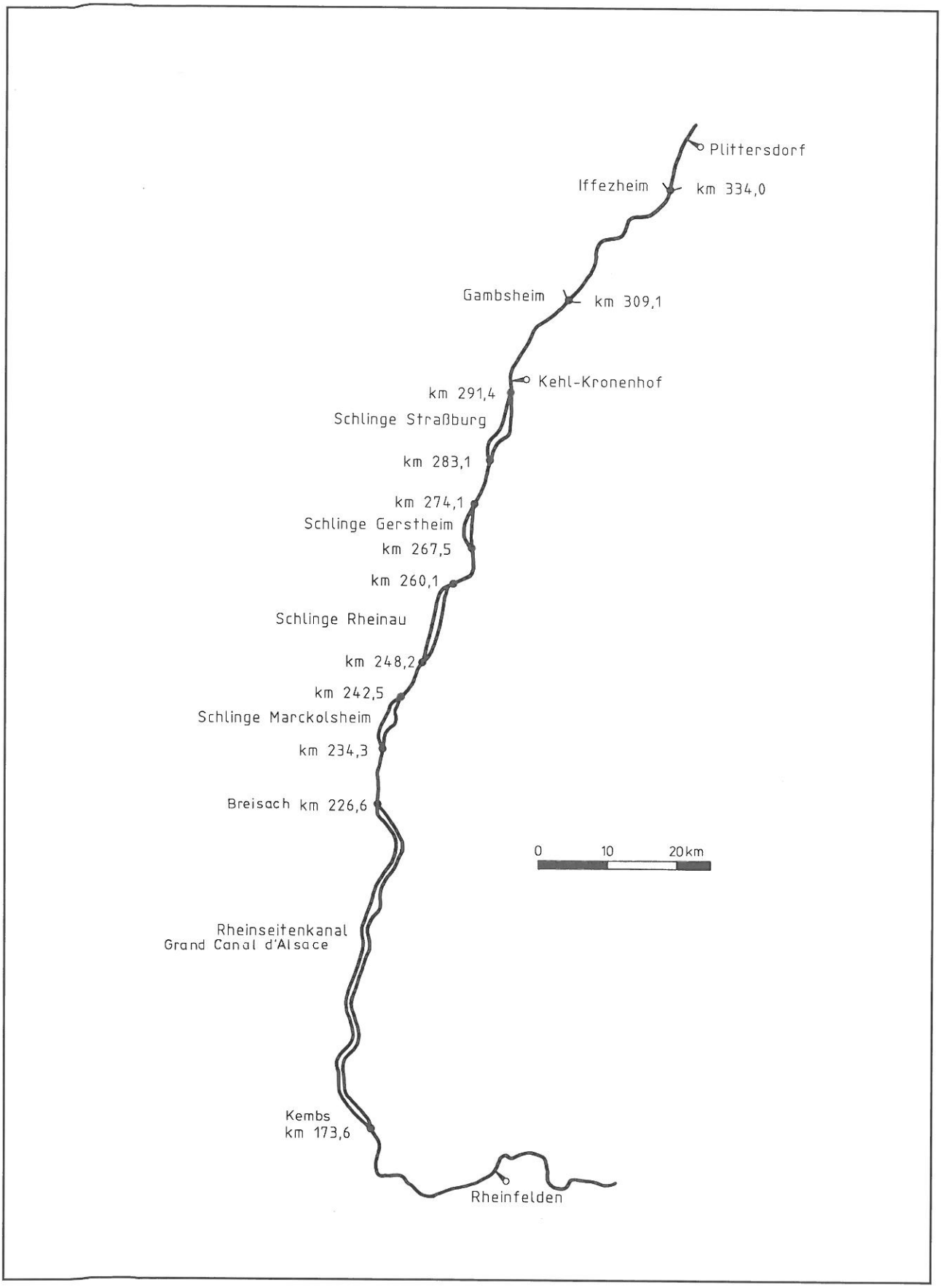


Fig. 3 La section parallèle du tronçon du Rhin Supérieur retenu par barrages

3.3 Débits et répartition des débits

Le débit fluvial est déterminant pour la mesure de dilution d'une pollution. Par conséquent, il est nécessaire de connaître la répartition des débits sur les points de défluence. Le modèle d'alerte suppose que la répartition de la pollution sur un point de défluence correspond à la répartition du débit à cet endroit (voir le chapitre 4).

Au total il y a sept points de défluence dans le modèle d'alerte: 5 entre Kembs et Plittersdorf et 2 dans la partie néerlandaise du Rhin, à savoir Pannerdense Kop et IJsselkop. La répartition des débits sur la partie canalisée du Rhin supérieur est basée sur une convention de 1956 entre la République fédérale d'Allemagne et la France. Cette convention stipule qu'au niveau des dérivations le débit maximal dans le canal est de 1400 m^3/s et le débit minimal dans le Rhin de 30 m^3/s. La répartition actuelle des débits est estimée à partir du débit à l'échelle de Rheinfelden ou de Kehl-Kronenhof. La répartition des débits dans la ramifications néerlandaises est estimée à partir des débits à l'échelle de Lobith et des règles de manoeuvre sur les ramifications néerlandaises. La figure 4 représente la répartition des débits selon le programme de manoeuvre S285.

A cause des dérivations entre Kembs et Plittersdorf, la pollution peut emprunter de nombreux cheminements. En principe, il y a 32 possibilités à partir de Kembs jusqu'à Plittersdorf. Dans le modèle d'alerte chaque possibilité est calculée séparément pour le calcul de concentration. Ensuite, les résultats sont totalisés. Comme il y a plusieurs voies par lesquelles peu de pollution est transportée, il est juste de ne les pas prendre en considération. Aux conditions de débits moyens (débit à Rheinfelden ca. 700 m^3/s) il n'y a que 6 voies qui sont pertinentes. En ce cas, c'est moins que 1% de la pollution qui est transportée par les autres voies.

Les débits aux échelles concernées sont calculés à l'aide des tableaux hauteur/débit, qui sont établis par l'Office fédéral de la protection de l'environnement en Suisse, les Wasser- und Schiffahrtsdirektionen en République fédérale d'Allemagne et la direction Gelderland du Rijkswaterstaat aux Pays-Bas.

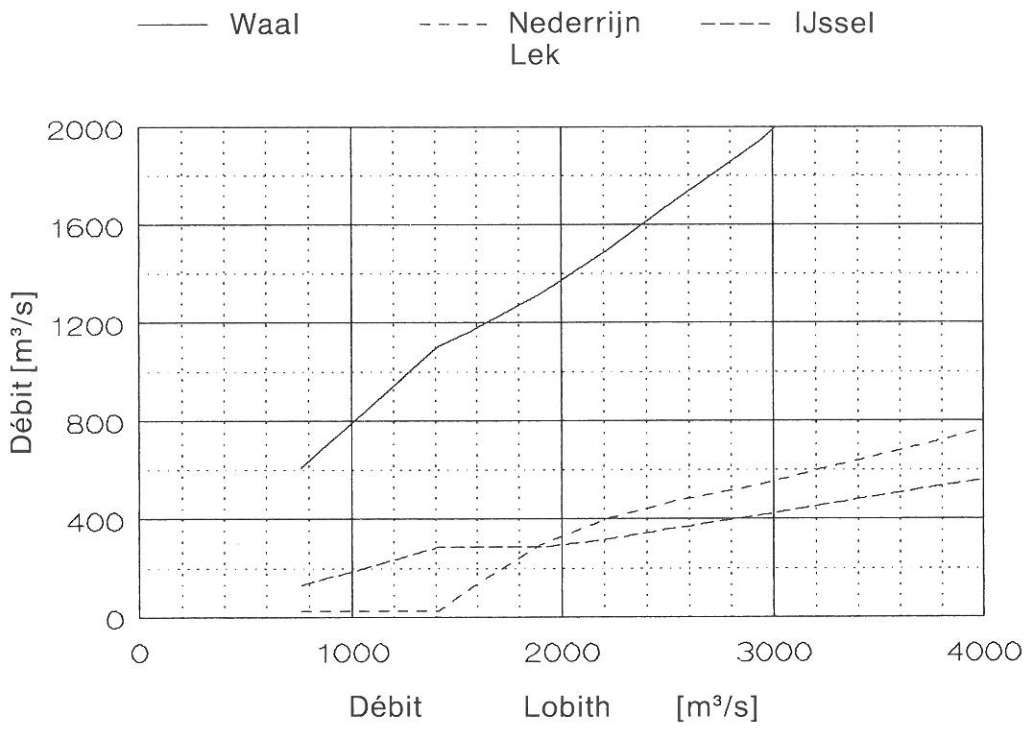


Fig. 4 Répartition des débits sur les ramifications néerlandaises selon le programme de manoeuvre S285

3.4 Temps d'écoulement et vitesse du courant

Le temps d'écoulement entre deux points est défini comme le temps pendant lequel un particule d'eau parcourt la distance entre ces points.

Dans le modèle d'alerte, le fleuve est subdivisé en tronçons. Pour chaque tronçon des vitesses du courant constantes ont été déterminées pour certains débits. Ainsi, dans des conditions stationnaires le temps d'écoulement sur un nombre de tronçons peut être calculé comme suit:

$$T = \sum_i x_i / u_i \qquad (1)$$

où u_i est la vitesse du courant dans le tronçon i, x_i le longueur du tronçon et T le temps d'écoulement. Notez que x_i/u_i représente le temps d'écoulement sur le tronçon i.

Le temps d'écoulement sur un tronçon est estimé à partir des tableaux niveaux d'eau/temps d'écoulement. Dans ces tableaux, le temps d'écoulement sur un tronçon est donné en fonction du niveau d'eau à l'une des échelles retenues. Pour la partie allemande ces tableaux ont été établis par la BfG à l'aide de calculs de niveaux d'eau, en partant de conditions stationnaires [BfG, 1988]. Pour les ramifications néerlandaises ces tableaux ont été établis par le DBW/RIZA à partir de débits et les profils du fond [WL, 1988]. Ici on est également parti d'une situation stationnaire. En outre on a différencié d'une part le programme de manoeuvre S285 et d'autre part l'état sans retenue, aussi pour les faibles débits.

Les figures 5 et 6 montrent la relation entre niveau d'eau et temps d'écoulement pour deux tronçons. Le tronçon Kembs (PK 173,6) – Breisach (PK 226,6) est un tronçon parallèle composé du Grand Canal d'Alsace et du Rhin (voir fig. 3). Le temps d'écoulement est influencé par le manoeuvre des retenues.

Les tableaux sur les temps d'écoulement couvrent la portée de débit d'environ Q_{15} à environ Q_{95}. En cas des débits extrêmement hauts l'utilité du modèle d'alerte n'est que limitée, parce que ces situations ne sont pas prévues dans le modèle.

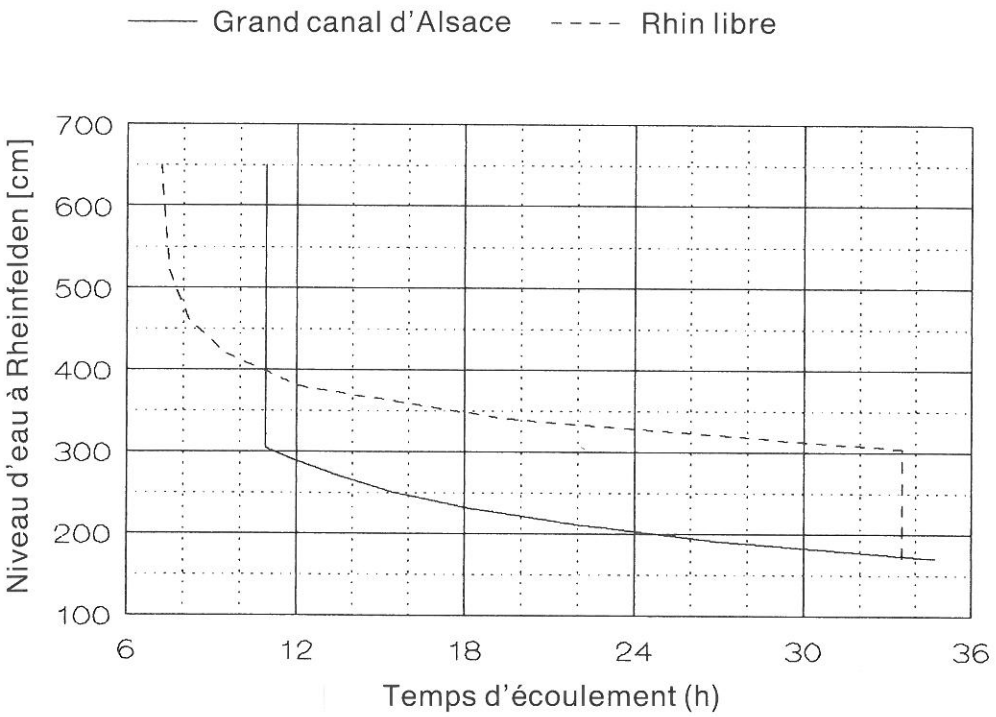


Fig. 5 Relation niveau d'eau – temps d'écoulement pour le tronçon Kembs-Breisach

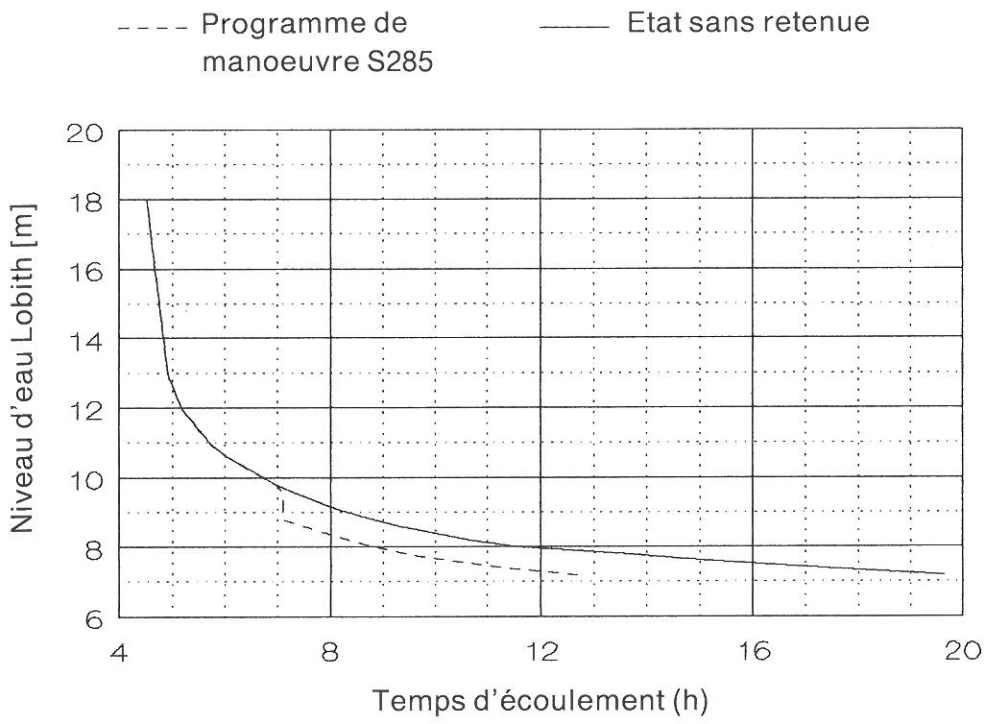


Fig. 6 Relation niveau d'eau – temps d'écoulement pour le tronçon Wijhe-Katerveer

3.4.1 Calcul des temps d'écoulement pas à pas

L'équation (1) pour le calcul des temps d'écoulement est basée sur des circonstances stationnaires, c.-à.-d. la vitesse du courant dans un tronçon ne change pas dans le temps. Dans la pratique cette condition n'est presque jamais remplie. Lors du transport des substances nuisibles les débits dans le bassin changeront plus ou moins, ce qui influe sur le temps de transport. On peut seulement supposer que la vitesse du courant soit constante sur des faibles distances. Par conséquent, en cas de distances plus longues, il faut effectuer des calculs de vitesse pas à pas et les vérifier continuellement à l'aide de mesures. La vitesse du courant locale résulte de:

$$\Delta T = \Delta x / u(x,T) \qquad (2)$$

où T est le temps d'écoulement du point de départ jusqu'au point x; ΔT le temps d'écoulement entre x et $x+\Delta x$ et u(x,T) la vitesse du courant à l'endroit x et à l'instant T.

Si l'on veut calculer le temps d'écoulement selon ce principe-ci, il faut connaître les vitesses du courant au moment du passage de la pollution. Comme la vitesse du courant est déduite du niveau d'eau, cela veut dire qu'il faut connaître le niveau d'eau. L'établissement de prévisions de temps d'écoulement aboutit donc à l'établissement de prévisions de niveaux d'eau. En effet, il n'est pas possible de prévoir des niveaux d'eau à l'aide du modèle d'alerte, mais le modèle permet l'emploi des niveaux d'eau qui sont connus jusqu'au moment présent. A l'aide de ces niveaux d'eau un calcul du temps d'écoulement pas à pas est effectué. L'exactitude des prévisions est dépendante de la quantité d'information disponible sur les niveaux d'eau dans le bassin. Afin de pouvoir effectuer un calcul pas à pas, il est nécessaire que les niveaux d'eau soient mémorisés dans des fichiers de données, de sorte qu'ils peuvent être introduits dans le modèle d'alerte.

La figure 7 représente le résultat d'un calcul de temps d'écoulement pas à pas. Il s'agit d'un cas hypothétique d'un accident survenu le 16 décembre 1987 près de Bâle. Le temps d'écoulement a été calculé à trois jours différents. Dans les calculs au 16 décembre, seulement les niveaux de ce jour-là ont été incorporés. Pour les deux autres calculs on a en plus employé les niveaux d'eau jusqu'au jour auquel le calcul est effectué. Il apparaît que les changements de débit exercent une influence considérable sur le temps d'écoulement. Pour la vérification de la méthode de calcul des tests plus intensifs, par ex. des essais de traçage, sont nécessaires.

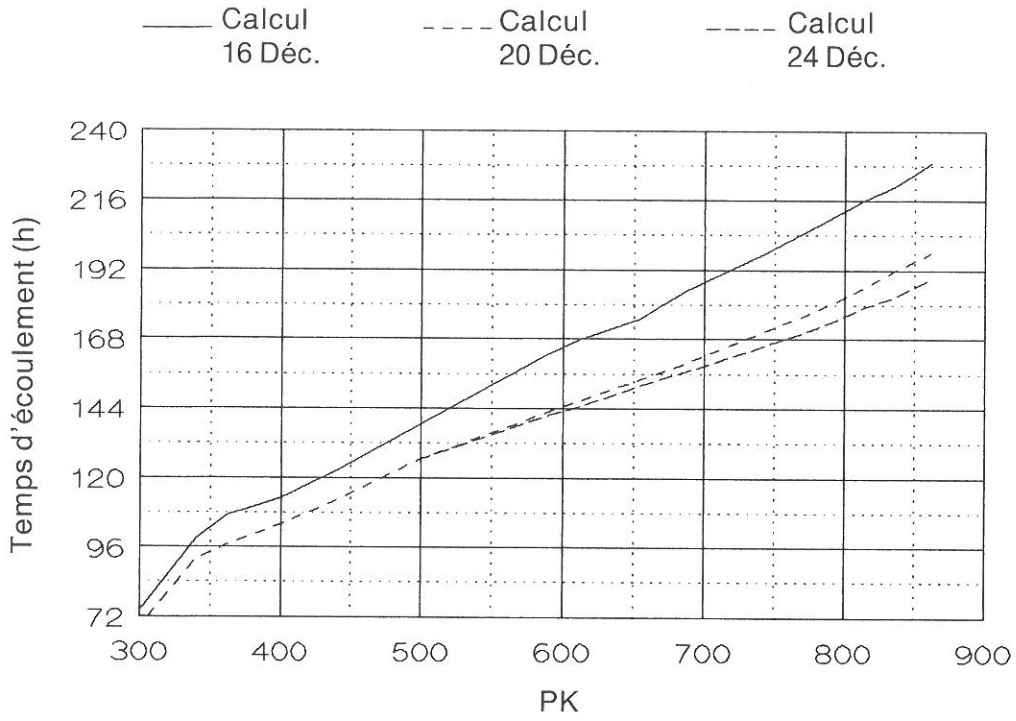


Fig. 7 Résultat d'un calcul des temps d'écoulement pas à pas

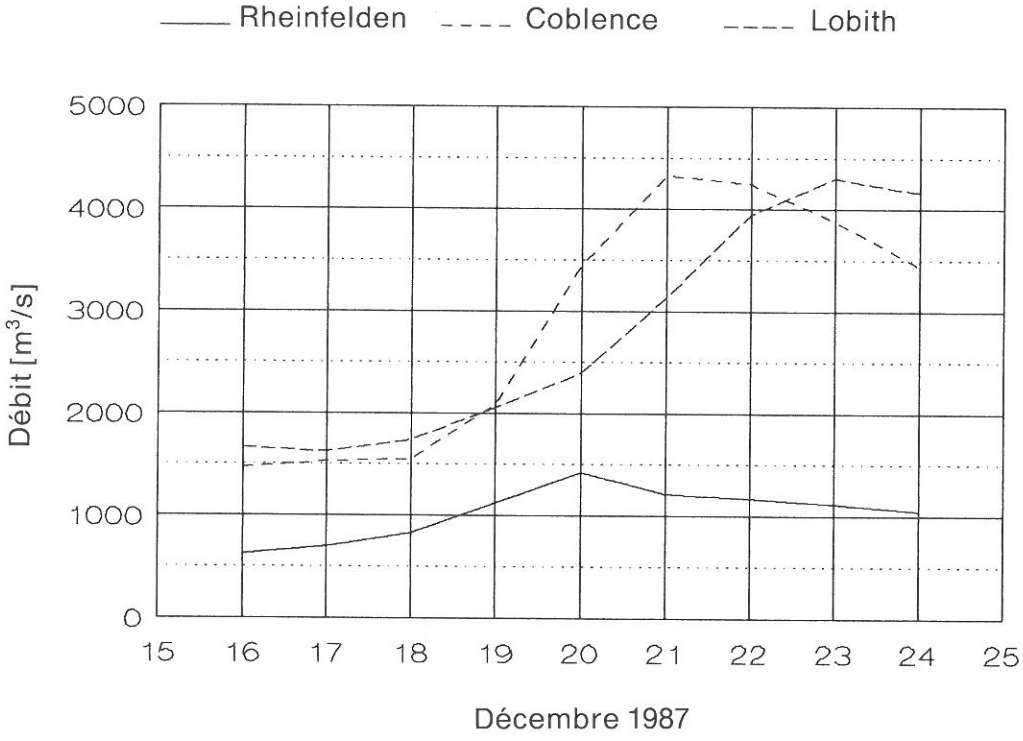


Fig. 8 Conditions de débit dans le Rhin en décembre 1987

4. ÉQUATIONS DU MODÈLE

4.1 Calcul de la concentration

Le modèle d'alerte est basé sur l'équation unidimensionnelle de diffusion avec les équations de continuité correspondantes. Ces équations décrivent le transport de substances dans des fleuves par suite de l'écoulement et de la dispersion longitudinale. Pour un état hydrologique stationnaire les équations donnent:

$$A\frac{\delta C}{\delta t} = -\frac{\delta}{\delta x}(uAC) + \frac{\delta}{\delta x}\left(AD\frac{\delta C}{\delta x}\right) - q_u C - kAC + S_0\delta(x - x_0) \tag{3}$$

$$\frac{\delta}{\delta x}(Au) = q_i - q_u \tag{4}$$

où
x	abscisse du point
t	temps
A(x)	surface du profil en travers participant à l'écoulement
C(x,t)	concentration de la pollution
u(x)	vitesse du courant
D(x)	coefficient de dispersion longitudinale
k	constante de vitesse de dégradation
x_0	lieu de l'accident
$\delta(x\text{-}x_0)$	fonction de Dirac
$S_0(t)$	quantité de polluant qui s'est déversé dans les eaux superficielles par unité de temps
$q_i(x)$	apport en débit (affluent)
$q_u(x)$	perte en débit (point de défluence)

L'équation (3) décrit l'augmentation de la concentration par rapport à une éventuelle concentration chronique existante. Pour la concentration C(x,t) et la vitesse du courant u (x) il s'agit de la valeur moyenne dans le profil. Les évolutions de la concentration liées à la dégradation, la sédimentation ou à l'évaporation sont prise en compte dans le terme kC. Dans le cas d'un déversement plus ou moins long à l'instant $t = 0$, $S_0(t)$ peut être pris égal à $M\delta(t)$ ou M est la quantité de polluant. L'équation (4) décrit le changement du débit par suite de l'apport d'affluents et de la répartition sur les points de défluence.

Une solution analytique exacte de cette équation de diffusion n'est en général pas possible. Ce n'est que dans le cas exceptionnel où les vitesses du courant, les débits et les profils en travers sont constants, qu'une solution exacte est possible; celle-ci est connue sous le nom de la solution Taylor [Fischer, 1979]. Cependant, ce serait une trop grande simplification si l'on schématisait le Rhin avec ses affluents comme un grand fleuve avec un débit constant et un seul profil à travers.

On a utilisé une mise en forme analytique, qui a été tirée des travaux de Gelhar et Collins [1971], voir aussi [WL, 1988]. La dérivation de cette mise en forme n'est pas discutée ici, mais elle est fondée sur l'idée d'une transformation de coordonnées, aboutant à une vitesse du courant constante.

4.1.1 Déversement momentané sans affluents ni points de défluence

L'effet des modifications de vitesse du courant et du coefficient de dispersion est présenté par deux transformations intégrales. L'effet du courant de x_0 vers x est défini comme suit:

$$T(x,x_0) = \int_{x_0}^{x} 1/u\, dy \tag{5a}$$

et du coefficient de dispersion est représenté par:

$$w(t,x_0) = \int_{x_0}^{x_c(t)} D(x)/u(x)^3\, dx \tag{5b}$$

où $x_c(t)$ est le point atteint au temps t par le centre de la vague de pollution:

$$x_c(t) = x_0 + \int_0^t u[x_c(s)]\, ds$$

A l'aide de ces valeurs, la solution de l'équation (3), peut être écrite ainsi, pour un déversement instantané, en l'absence d'affluents ou de défluents (c.à.d. $q_i = 0$ et $q_u = 0$ et aussi en posant $x_o = 0$):

$$C(x,t) = M/[2Q_0\{\pi w(t)\}^{\frac{1}{2}}] \cdot \exp[-\{T(x)-t\}^2/4w(t)] \cdot \exp[-kt] \quad (6)$$

T et w sont représentés sous forme d'une intégrale. Comme le Rhin a été schématisé comme une série de tronçons (chapitre 3), les intégrales sont en réalité des sommations de tronçons. T et w sont tous les deux des caractéristiques du système de débit et sont déterminés par les vitesses du courant et la dispersion longitudinale.

De l'équation (6) il ressort que la concentration maximale est obtenue pour t = T environ. Le temps de parcours T est alors un bon indicateur pour le moment de passage du pic de pollution. Cela souligne l'importance d'une prévision fiable des temps de parcours.

Le calcul des temps de parcours d'après l'équation (5a) est basé sur des conditions stationnaires. Dans le chapitre précédent il a été déjà expliqué comment on peut tenir compte de l'influence de conditions de débit variables lors du calcul de temps de parcours. En ce cas il faut effectuer ce calcul pas à pas.

L'équation (6) a été établie pour $D = \alpha u$ ou α est un paramètre de dispersion d'une échelle de longueur constante. La simplification s'appuie sur l'approximation:

$$\alpha/L \ll 1$$

où L est une échelle de longueur caractéristique du fleuve. Bien que le coefficient de dispersion pour le Rhin supérieur ne soit pas clairement déterminé, on peut estimer que l'approximation susmentionnée est valable pour $L > 20$ km. Donc il n'y a pas de limitation importante à l'application de l'équation (6) sur le bassin du Rhin.

La mise en forme analytique (6) a été comparée aux solutions numériques par Gelhar et Collins. A condition que $\alpha/L \ll 1$ les résultats concordent bien entre eux. Pour une valeur arbitraire de dispersion une telle comparaison n'a pas été encore réalisée.

4.1.2 Déversement quelconque

Pour un déversement quelconque $S_0(t)$, la solution est donnée par l'intégrale suivante:

$$C(x,t) = {}_0\int^t S_0(s)/[Q_0(4\pi w)^{\frac{1}{2}}] \cdot \exp[-\{T-(t-s)\}^2/4w] \cdot \exp[-k(t-s)]\, ds \quad (7)$$

L'équation (7) peut également être appliquée, si des mesures de concentration sont disponibles pour un point x_1 situé en aval du lieu de l'accident. En multipliant les concentrations par les débits à cet endroit on obtient un flux déversé fictif qui peut être utilisé dans l'équation (7). C'est une possibilité importante offerte par le modèle. En utilisant une courbe de concentrations mesurées comme condition limitée pour les calculs plus en aval, on est moins tributaire des informations sur l'accident lui-même.

4.1.3 L'effet d'affluents et des points de défluence

Si l'on veut simplement examiner l'incidence des affluents ou des points de défluence on peut procéder comme suit.

Les variations des concentrations entre un point x_1 et un point x_2 situé en aval sont données par:

$$f(x_1,x_2) \cdot Q(x_1)/Q(x_2)$$

où $f(x_1,x_2)$ est la masse de pollution qui est transportée de x_1 en x_2 et Q(x) le débit au lieu x. Dans le cas où il n'y a pas de point de défluence, on a $f = 1$ et les concentrations varient selon le rapport des débits. Le rapport des débits est dans ce cas une sorte de facteur de dilution. Si par contre il n'y a pas d'affluent on a $f = Q(x_2)/Q(x_1)$ et la concentration n'est pas non plus modifiée.

Par multiplication du membre droit de l'équation (6) et (7) par $f(x_0,x) \cdot Q(x_0)/Q(x)$ on obtient une approximation de l'effet des points de défluence et des affluents sur la diffusion. Le phénomène de mélange à proximité de l'embouchure est toutefois négligé.

4.2 Coefficient de dispersion

Avec le temps de parcours le coefficient de dispersion détermine l'heure où la pollution se fait remarquer pour la première fois. En outre, le coefficient de dispersion est un des facteurs qui déterminent la durée du passage de la pollution et sa concentration maximale. Le coefficient de dispersion est donc un paramètre de modèle important.

Il n'y a pas encore de précisions en ce qui concerne la forme du coefficient de dispersion longitudinale D(x) ni sur son ordre de grandeur. Cela ressort manifestement d'une étude du DVWK [DVWK, 1987]. Diverses méthodes sont mentionnées dans la littérature. En plus l'ordre de grandeur du coefficient de dispersion est hautement fonction du système de débit concernant. Pour éclairer ce point on doit encore mener, tout d'abord, des recherches complémentaires. Pour l'instant le modèle propose deux solutions, à savoir:
- un coefficient de dispersion constant (introduit par l'utilisateur), ou
- une formule dépendant de la vitesse du courant et du débit $D = \alpha uQ$.

La constante α est prise provisoirement égale à 0,075.

Dans les équations de diffusion avec les équations de continuité correspondantes, qui ont été choisies comme point de départ, la dispersion longitudinale est supposée être le seul processus pouvant étendre la tache de pollution.

Il reste à savoir si une telle simplification est admissible pour le transport de pollution dans le Rhin. Même si le modèle n'a été développé que pour une première évaluation de niveaux de concentration, les résultats devraient être passablement fiables, c'est-à-dire le temps d'arrivée (l'heure où la pollution se fait remarquer pour la première fois), la concentration maximale ainsi que la durée de passage de la pollution devraient être approximativement justes. Des études ultérieures, surtout des essais de traçage, sont nécessaires.

5. RÉSUMÉ

L'accident survenu chez Sandoz en novembre 1986 a été l'occasion d'établir un groupe de travail commun de la CIPR et de la CHR. L'objectif de ce comité d'experts était le développement d'un modèle de prévision des temps d'arrivée et des niveaux de concentration en cas d'un déversement dû à un accident dans le bassin du Rhin.

Au premier abord, le groupe de travail commun de la CIPR/CHR s'est occupé de la prévision des temps d'arrivée d'une vague de pollution. A cette fin, les états riverains du Rhin ont fourni des résultats de recherches, sur lesquelles les prévisions se basent. Le point de départ était que la méthode de calcul devait s'appuyer sur des informations publiquement disponibles. Ainsi, il est possible de tenir compte de débits variables lors de l'introduction des niveaux d'eau mesurés. Pour la prévision des niveaux de concentration on a choisi provisoirement une description simplifiée du processus. Le calcul de concentration se base sur la solution approximative de l'équation de diffusion (paragraphe 4.1).

Les travaux du groupe de travail commun de la CIPR/CHR ont abouti à une première version du modèle d'alerte pour le Rhin. Le modèle produit de bonnes prévisions du temps d'arrivée d'une vague de pollution. Cette première version du programme du modèle ne permet cependant à présent qu'une évaluation du maximum de la concentration à attendre. Pourtant ce modèle a été construit de telle façon à permettre des adaptations ultérieures (paragraphe 4.1.1 ...4.2).

Des recherches futures, basees entre autres sur des essais avec traceurs, aboutiront à brève échéance à des améliorations du modèle et à longue échéance à des modifications de caractère plus structurel, grâce auxquelles une prévision plus exacte du déroulement d'une vague de concentration sera possible. Or, comme ces modifications prendront sans doute encore une à deux années, il a été convenu de publier déjà la première version du programme du modèle en tant qu'instrument de soutien pour l'évaluation du parcours des vagues de pollution.

PARTIE II: Mode d'emploi pour le programme du modèle

1. INSTALLATION DU PROGRAMME

1.1 Spécification du hardware

- **PC et disque dur**
  Le modèle a été établi pour les ordinateurs compatibles IBM munis d'un système d'exploitation MS-DOS version 2.0 ou plus récent. Un tel ordinateur est indispensable à l'utilisation du modèle. En plus, cet ordinateur doit disposer d'un disque dur, car le volume des données de sortie peut être parfois si grand, que la capacité de stockage d'une disquette 360 KB ne suffit pas.

- **Carte graphique et imprimante**
  Le modèle est livré avec le programme SETUP (voir paragraphe 1.2). Grâce à ce programme, l'utilisateur peut définir la carte graphique présente ainsi que l'imprimante connectée. Le modèle soutient actuellement un grand nombre de cartes graphiques et imprimantes, entre autres les cartes IBM CGA, EGA et VGA, la carte Hercule ainsi que les imprimantes EPSON courantes et plusieurs d'imprimantes laser. Pour le moment on a choisi une sortie standard. Dans ce cas, on n'utilise pas toutes les possibilités de l'hardware concerné.

- **Coprocesseur mathématique**
  Un coprocesseur n'est pas nécessaire. Il est pourtant à recommander d'installer le modèle sur un ordinateur personnel avec coprocesseur. Sur un PC-AT avec coprocesseur le temps de calcul est de 15 à 30 secondes au maximum. Sur un PC-XT sans coprocesseur il faut compter avec un temps de calcul huit ou dix fois plus long.

- **Capacité de l'ordinateur**
  Le programme a besoin de 375 KB RAM[1] environ. Ce grand besoin de mémoire interne provient d'une part du grand volume de certaines bases de données, d'autre part du fait que le programme de calcul démarre à partir du programme d'introduction des données. Les deux parties du programme se trouvent en même temps dans la RAM. Cette méthode a été choisie par ce qu'elle est plus fonctionnelle et par ce qu'elle va au devant des exigences de l'utilisateur.

  Dans certains cas le volume du modèle d'alerte peut poser des problèmes pour des ordinateurs ne disposant que de 512 KB RAM. La RAM disponible peut être contrôlé à l'aide de la commande DOS <CHKDSK>; elle est déterminé par la RAM résidente nécessaire. Si celle-ci se révélait insuffissante, vous devez consulter votre conseiller en ordinateurs.

- **Config.sys**
  Pour l'entrée des données et la sortie des résultats le programme utilise un certain nombre de fichiers. Dans la version actuelle du modèle, tous les fichiers nécessaires sont ouverts en même temps. Le nombre maximum de fichiers, qui peut être ouvert en DOS simultanément, est placé dans le fichier CONFIG.SYS au moyen de l'ordre:

  <Files = n>

où n représente le nombre de fichiers (files). La valeur de n doit être égale à ou plus grand que 15.

1.2 Le programme SETUP

Le modèle est livré sur deux disquettes, à savoir:

- une disquette avec le programme SETUP ainsi que quelques programmes de commande hardware (drivers);
- une disquette avec le modèle d'alerte ainsi que quelques fichiers.

Grâce au programme SETUP il est possible de définir la carte graphique et l'imprimante. Le programme SETUP emmagasine ces données et copies les programmes de commande annexes.

[1] RAM: Random Access Memory = Mémoire à accès instantané = mémoire interne, nécessaire au déroulement du programme.

Pour installer le programme du modèle il faut opérer comme suit:

1. Déplacez-vous dans le sous-répertoire dans lequelle vous voulez installer le modèle; si nécessaire, vous devrez tout d'abord créer ce répertoire à l'aide de la commande DOS <MD>.
2. Mettre la disquette avec le programme SETUP dans l'unité de disques A et taper:
   A:SETUP <RETURN>.
3. Choisir avec les touches indiquées votre carte graphique ainsi que l'imprimante connectée. Même s'il n'y a pas d'imprimante connectée, il faut choisir.
4. Utiliser la touche <F_1> pour copier le programme de commande choisi dans la sous-répertoire destinée au modèle. Le programme SETUP se termine ici.
5. Mettre la disquette avec le programme du modèle dans l'unité de disques A et taper:
   COPY A:*.* <RETURN>.

Après avoir effectué les manipulations citées ci-dessus, vous pouvez lancer le programmme du modèle par l'ordre RHEIN <RETURN>. Le modèle ne peut être lancé qu'à partir de ce répertoire.

Si vous voulez installer ce modèle sur un nouvel ordinateur personnel, il faut effectuer les manipulations citées plus haut de nouveau. Pour le cas où le PC n'est pas changé, mais une nouvelle imprimante a été connectée, il ne faut qu'exécuter de nouveau le programme SETUP (les points 1-4).

2. GÉNÉRALITÉS À PROPOS DU PROGRAMME

2.1 Objectif et (im)possibilités du modèle

Le modèle a été établi pour pouvoir évaluer immédiatement les niveaux de concentrations et les temps d'arrivée d'une onde de pollution. Il s'agit de rejets de durée limitée, en un lieu unique. Il est également possible d'introduire une suite de concentrations arbitraires (mésurées) comme point de départ pour les calculs vers l'aval. Le modéle calcule la montée de concentration suite à un rejet causé par un accident. Les concentrations du fond continu (background) ne sont pas prise en considération.

Le modèle n'est pas approprié pour des rejets continus à long terme. Le modèle n'est pas bien adapté non plus à une charge polluante diffuse de la surface de l'eau (par ex. par dépôt aérien).

2.2 Le programme: démarrage et déroulement

Le programme peut être lancé par l'ordre:

RHEIN <Return>

Aprés le lancement du programme apparaissent sur l'écran des messages concernant la lecture des données. Ensuite, on parcourt un ou plusieurs masques d'entrée, dans lesquels les données nécessaires peuvent être entrées (paragraphe 3 et 4). Enfin, on arrive au menu principal, à partir duquel on peut soit retourner aux masques d'entrée, soit imprimer les données d'entrée ou bien commencer le calcul (paragraphe 5). A partir de ce menu principal il est également possible de terminer le programme. Pendant le calcul, certains messages sur son avancement apparaissent sur l'écran. Après la fin correcte du calcul, on se retrouve dans un menu à partir duquel les résultats de calcul peuvent être représentés (paragraphe 6). A partir de ce menu il est également possible de retourner au menu principal. Si des erreurs ont été constatées au cours du calcul, le calcul est interrompu et la cause d'interruption paraît sur l'écran sous forme d'un code d'erreur (paragraphe 6). Ensuite on retourne au menu principal.

3. ENTRÉE DES DONNÉES: LES MASQUES D'ENTRÉE

3.1 Généralités

L'introduction des données nécessaires à un calcul se fait à l'aide de masques sur l'écran qui sont divisés en une partie encadrée où les données doivent être inscrites et une partie commentaire dans laquelle l'information à inscrire est expliquée. Lire donc ces explications tout d'abord!

Dans une »bande« (signes noires sur fond blanc) il est indiqué où l'on se trouve. A l'aide des touches curseurs on peut changer la position de la bande. Les touches curseurs admises sont indiquées dans le bord inférieur du display. Chaque entrée doit être validée par un < Return >. Quand toutes les données d'un écran ont été introduites, on peut entrer dans le masque suivant en tapant $< F_1 >$.

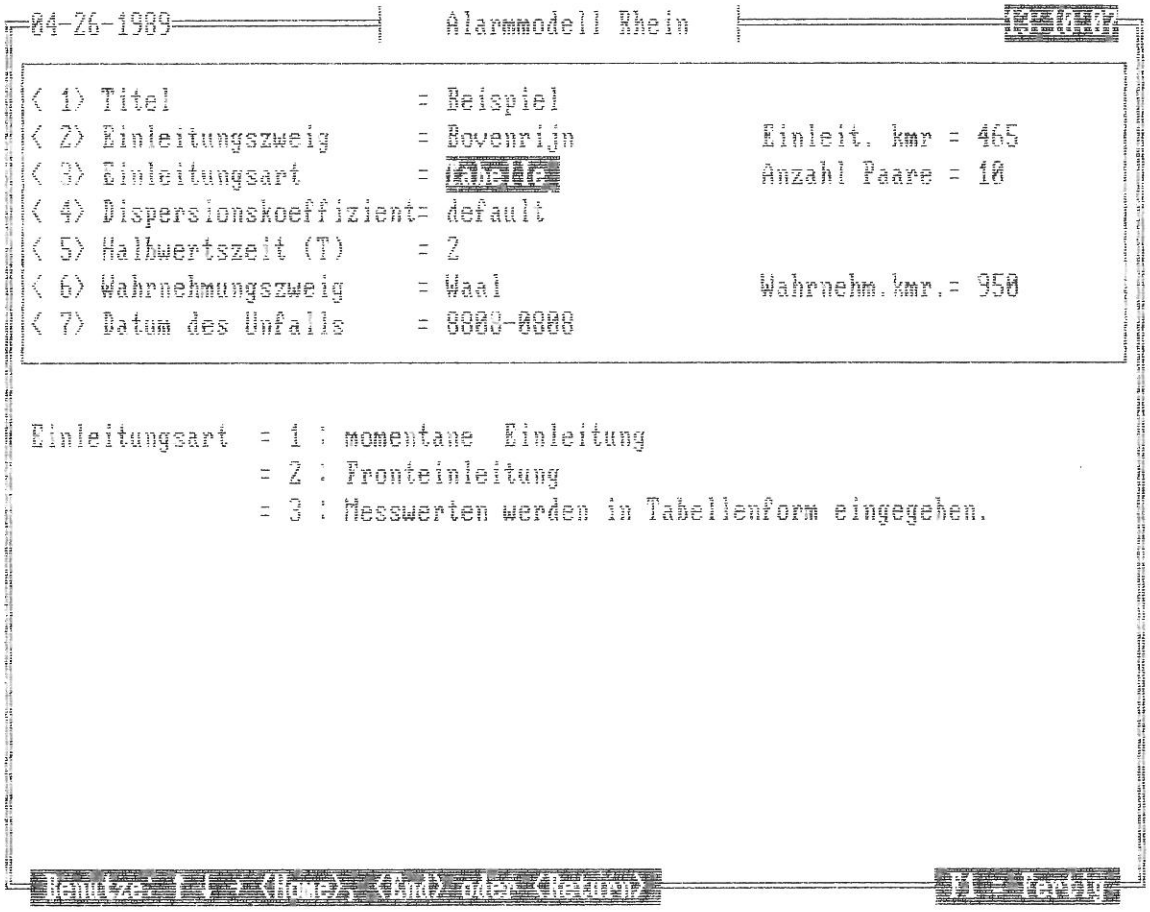
3.2 Messages d'erreur à l'entrée

Les erreurs de frappe peuvent être rectifiées lors de l'introduction des données à l'aide de la touche »Backspace«. Le programme contrôle la plausibilité des données introduites. Si une invraisemblance est détectée, l'utilisateur est averti par un »BEEP«. Simultanément apparaît à l'écran un message d'erreur encadré indiquant quelle valeur est ou n'est pas autorisée. Par la pression d'une touche quelconque le message d'erreur disparaît et il est demandé d'introduire une nouvelle donnée.

3.3 Les masques d'entrée

Il y a au maximum 3 masques d'entrée:

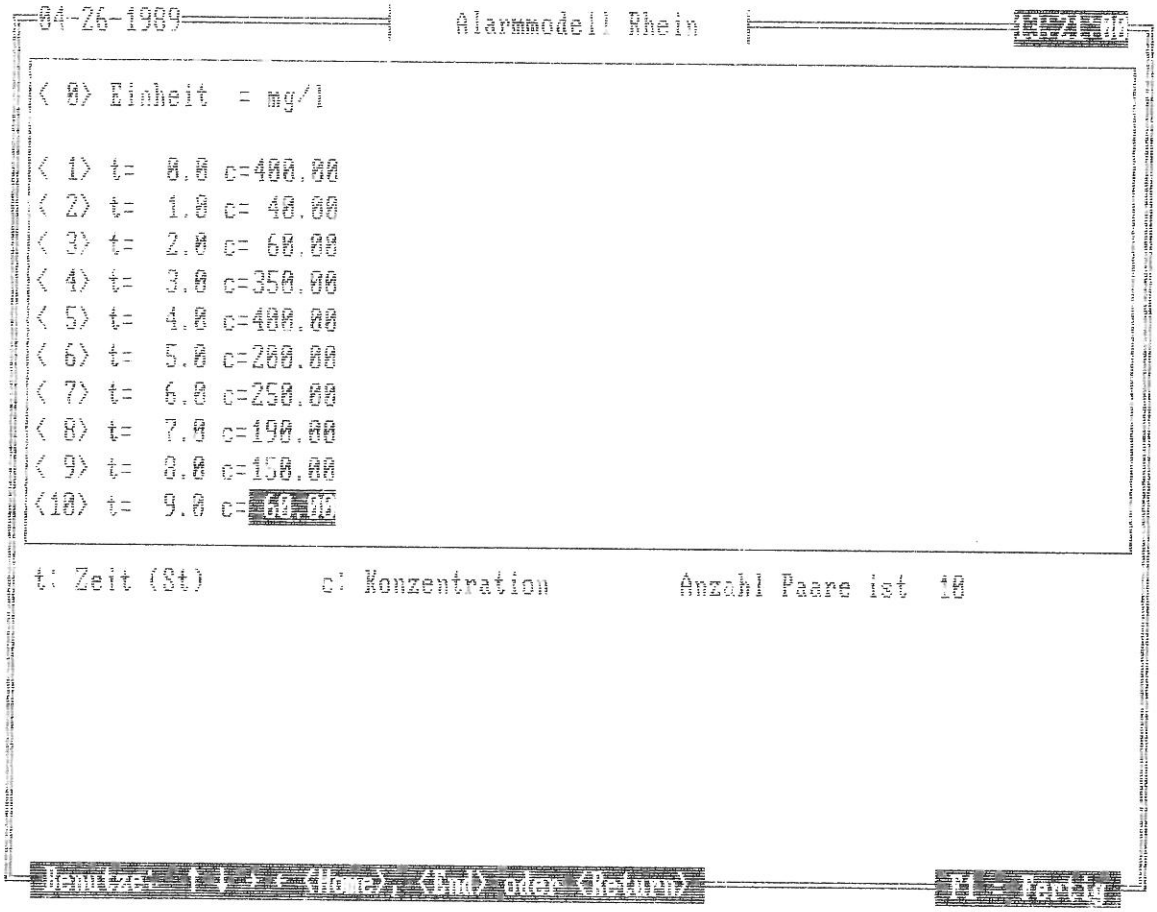
– MASQUE 1:



pour l'introduction des données générales concernant le lieu de l'accident, la quantité de produit déversé, les caractéristiques physico-chimiques du produit, le lieu d'observation, etc...

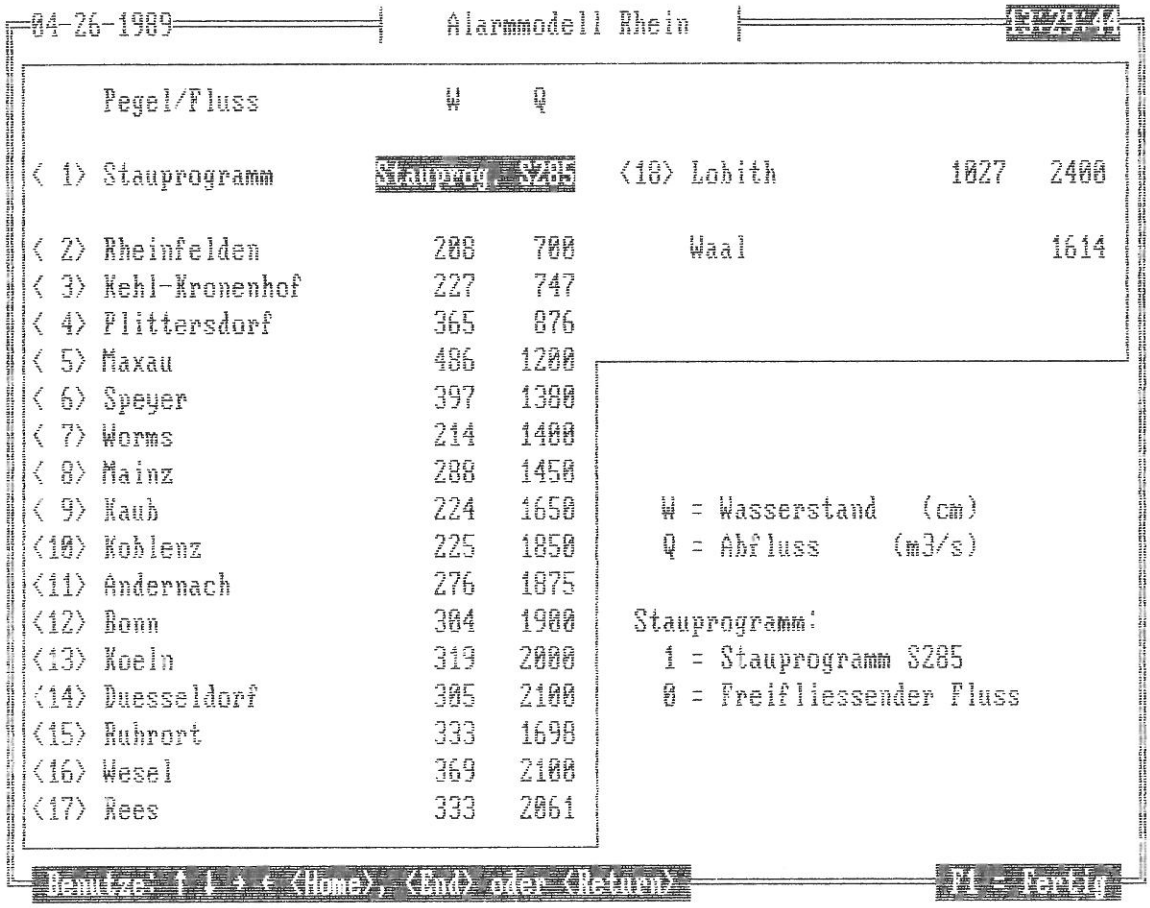
Les données doivent être entrées à l'aide de questions numérotées. Le type d'information qui doit être fourni est indiqué par un mot unique. Une courte explication pour certaines des questions est donnée dans l'annexe B.

– MASQUE 2 (facultatif):



pour l'entrée des concentrations (mesurées) servant de base aux calculs en aval. Ce masque n'est affiché que si un profil de concentration a été annoncé dans le masque 1. Il est demandé l'unité dans laquelle sont exprimées les concentrations (mesurées) et ensuite les temps et les valeurs des mesures, cela dans un ordre chronologique. Les temps sont à donner en heures comptées à partir de la 1ère mesure. Le temps de la première mesure est donc toujours zéro. Pour le cas où la substance se trouve naturellement dans les eaux superficielles (background), il est nécessaire d'opérer une correction. Le programme interpole linéairement entre les valeurs introduites. Un exemple figure dans l'annexe C.

– MASQUE 3:



pour l'introduction des données hydrologiques nécessaires dans le bassin du Rhin, comme par exemple les niveaux d'eau sur le Rhin supérieur et les règles de retenues dans la partie néerlandaise. Le débit est calculé à partir du niveau d'eau à l'aide de courbes H/Q.

La répartition des débits sur la partie néerlandaise du Rhin est calculée en s'appuyant sur le niveau d'eau à l'échelle de Lobith et des règles de retenues.

4. UTILISATION DES DONNÉES DES RAPPORTS JOURNALIERS

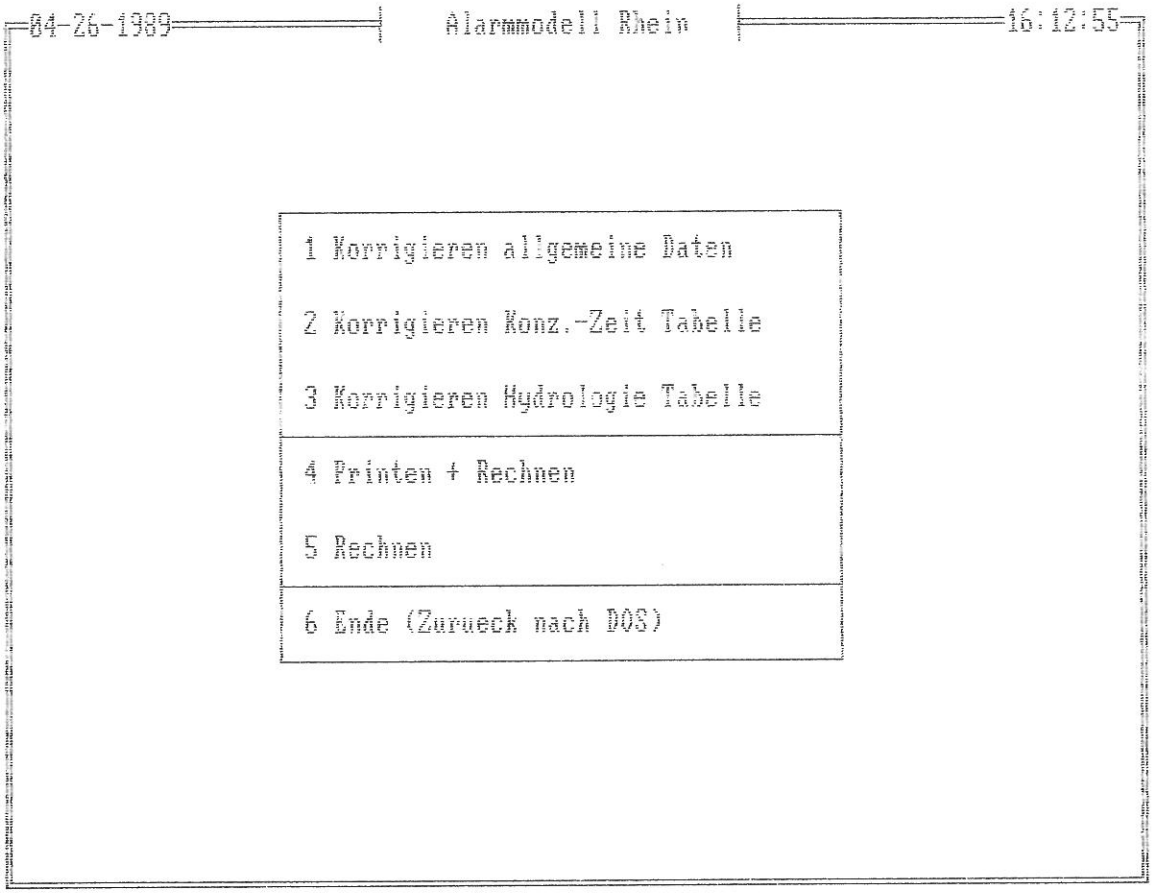
La conception du modèle est basée sur l'utilisation des données actuelles généralement disponibles concernant les niveaux d'eau et les débits. L'annexe D donne une liste des échelles équipées d'un répondeur téléphonique, utilisées par le modèle d'alerte ainsi que leurs numéros de téléphone. Comme les stations de mesure Kehl-Kronenhof et Plittersdorf ne sont pas encore équipées de répondeurs automatiques, le niveau d'eau de ces stations est dérivé provisoirement au moyen des courbes de relations entre niveaux d'eau à l'échelle de Rheinfelden.

Pour l'instant seul le centre de transmission des crues du DBW/RIZA est équipé d'une liaison avec les bases de données du rapport journalier. Cela signifie que les données nécessaires sont automatiquement sélectées et représentées sur le masque d'écran correspondant. Si nécessaire il est possible à tout moment d'apporter des modifications arbitraires.

Si le calcul est lancé ou relancé un ou plusieurs jours après l'accident, le programme interpole automatiquement entre les niveaux d'eau déjà disponibles. Les niveaux d'eaux ainsi obtenus figurent en gros sur le masque 3; cela pour bien les distinguer des niveaux d'eau qui ne sont pas obtenus par extrapolation et sont par conséquent des prévisions. Là encore, des modifications arbitraires sont toujours possibles.

5. LE MENU PRINCIPAL

Quand toutes les données ont été introduites, on entre dans le menu principal. A partir de ce menu on peut retourner aux masques d'entrée pour modifier les données. En principe on retourne après au menu principal. Pour le cas où ces modifications envisagées risquent d'influer un des autres masques d'entrée, il faut d'abord le parcourir, avant de retourner au menu principal.



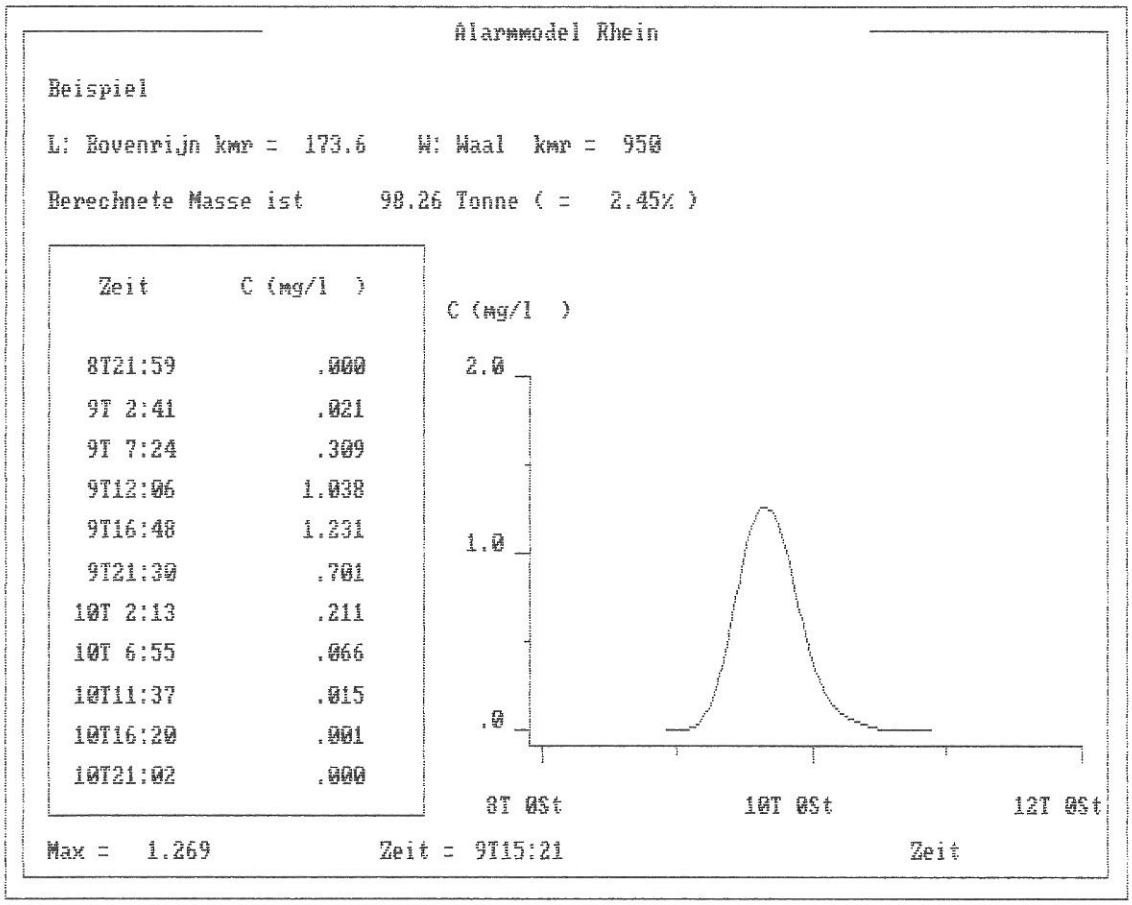
A partir de ce menu principal on peut faire imprimer les données introduites et lancer le calcul. Après avoir fait le calcul on retourne à ce menu.

6. SORTIE DES RÉSULTATS DU CALCUL

Après la fin des calculs l'utilisateur peut, à l'aide d'un menu, appeler les rèsultats à l'écran et les faire imprimer ensuite. Les résultats sont réunis dans un tableau indiquant l'évolution des concentrations (en tapant **1**) et dans un tableau indiquant les temps de parcours (en tapant **2**). On retourne au menu principal en tapant **0** (paragraphe 5).

6.1 Sortie de l'évolution des concentrations

Cet écran montre le graphique de l'évolution de la concentration en fonction du temps au point de surveillance. Le temps est donné en partant du moment de l'introduction de la pollution ou du début du front de pollution ou du moment de la première mesure (tableau mesure/temps). Le temps est donné en jours et heures. De plus, un tableau indique les principaux résultats numériques et certaines informations complémentaires (quantité de la pollution qui est passée, valeur et date de la concentration maximale).



Cet écran sera imprimé en tapant **1**. N'utilisez pas la touche »Print screen«!

En tapant **3** on retourne au menu pour la sortie des résultats des calculs.

Avec la touche **2**, l'utilisateur peut indiquer lui-même l'échelle des temps du graphique et du tableau. Pour cela il doit indiquer le début, la fin et l'intervalle en jour et heure.

Si l'on tape < **Return** > pour le début ou la fin, les valeurs initiales sont prises. Si l'on tape < **Return** > pour l'intervalle alors le programme choisit lui-même le pas de temps. Cette solution est à recommander.

L'axe de concentrations n'est pas muni d'une échelle. Il est possible que le programme s'écarte des valeurs de début et de fin. C'est le cas si ces points se trouvent à une date »indésirable« le long de l'axe.

6.2 Sortie du tableau des temps de parcours

Cet écran indique pour certains points géographiques (lieux, stations hydrologiques, etc.) les temps de parcours de la pollution jusqu'à ce point. Par temps de parcours il faut entendre dans le cas d'une pollution instantanée, le moment de passage de la concentration maximale. Ce tableau donne ainsi une idée de l'endroit entre le lieu d'introduction et le lieu d'observation où se trouve la pollution à un moment déterminé.

Le tableau des temps de parcours peut comporter plusieurs écrans. C'est le cas lorsque la pollution peut imprunter plusieurs chemins entre le lieu d'introduction et le lieu d'observation. Au début de chaque cheminement est indiqué en bordure supérieure de l'écran le pourcentage de la pollution introduite qui a suivi ce cheminement. En outre les données sur le coefficient de dispersion (moyen) au cours de ce cheminement sont fournies.

```
                    Alarmmodel Rhein

Pfad:  2  Masse Fraktion:  .025  Mitl. Disp.koeff.(m2/s):   105.

          Stelle                    Km.        Fliesszeit
                                                (Tagen)

          Einleitung               175.00        0T 0:00
          Rheinseitenkanal         200.10        0T 9:25
          Markolsheim-K            238.40        1T 4:41
          Rheinau-R                254.00       1T14:43
          Gerstheim-K              271.00        2T 3:08
          Strassburg-K             287.20       2T12:29
          Kehl-Kronenhof           292.20       2T14:42
          Plittersdorf             340.20       3T18:03
          Maxau                    362.30       3T22:45
          Speyer                   400.60        4T 6:07
          Worms                    443.40       4T15:11
          Mainz                    498.30        5T 5:05

                                   -- Fortsetzung folgt --

type: 1= Fortsetzung, 2= Zurueck, 3= Print, 4= Ende :
```

En tapant **1** ou **2** vous pouvez passer à la page suivante ou précédente.

En tapant **3** vous imprimez l'écran. Vous n'avez pas à utiliser la touche »print screen«!

En tapant **4** on retourne au menu pour la sortie des résultats du calcul.

7. MESSAGES D'ERREURS ET INTERRUPTION DU PROGRAMME

Bien que les données soient contrôlées sur la base des impossibilités, toutes les erreurs ne peuvent pas être détectées pendant cette phase. Il est alors possible qu'une impossibilité ait lieu pendant le calcul, il est alors interrompu. La cause de cette interruption est indiquée à l'utilisateur au moyen d'un code d'erreur. Le tableau suivant indique les messages d'erreurs possibles, leur cause et la solution.

Code	Cause et solution
061	Le point de l'introduction n'est pas trouvé. Cause: Le point de l'introduction se trouve exactement à la limite entre deux tronçons. Des arrondis internes peuvent causer des problèmes. Solution: déplacer le point de l'introduction par ex. de 100 m.
062	Le point d'arrivée n'est pas trouvé. Cause et solution : voir 061
071	La durée d'une introduction de front ou d'un tableau de concentration est trop longue comparée au temps d'écoulement. Solution: – choisir une plus grande distance entre le point de rejet et le point d'arrivée; – raccourcir la durée de l'introduction de front ou du tableau de concentration.
114	Le point de l'introduction n'est pas trouvé. Cause et solution: voir 061
115	Le point d'arrivée n'est pas trouvé. Cause et solution: voir 062

Après l'interruption du calcul il est naturellement nécessaire de modifier les données avant de le lancer à nouveau!

BIBLIOGRAPHIE

BfG: Fließzeiten im Rhein aus Flügelmessungen, BfG-0392, Coblence, avril 1987

BfG: Fließzeiten im Rhein aus Wasserspiegellagenberechnungen, BfG-0429, Coblence, février 1988

DVWK: Eignung und Anwendung von Vorhersagemodellen für einen »Warn- und Alarmplan Rhein«, DVWK-Arbeitskreis, Coblence, julliet 1987

Fischer, H.B.: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, New York, 1979

Gelhar, L.W. & Collins, M.A.: General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, Water Resour. Res., 1971

WL: Kalamiteitenmodelering Rijn en Maas, Waterloopkundig Laboratorium Delft, T380, octobre 1988

ANNEXE A

Désignations des lieux
Kilométrages

Cours d'eau	Lieu	P.K.
Rhin Supérieur	Rheinfelden	148,3
Rhin Supérieur	Bâle	170
Rhin Supérieur	Kehl-Kronenhof	292,2
Rhin Supérieur	Strasbourg	293,5
Rhin Supérieur	Confluent de la Kinzig	298,2
Rhin Supérieur	Confluent de l'Ill	311,3
Rhin Supérieur	Seltz	334
Rhin Supérieur	Plittersdorf	340,2
Rhin Supérieur	Maxau	362,3
Rhin Supérieur	Spire	400,6
Rhin Supérieur	Mannheim	425
Rhin Supérieur	Confluent du Neckar	428,5
Neckar	Plochingen	203
Neckar	Gundelsheim	100
Neckar	Heidelberg	26
Rhin Supérieur	Worms	443,4
Rhin Supérieur	Confluent du Main	496,8
Rhin Supérieur	Mainz	498,3
Main	Steinbach	200
Main	Obernau	92
Main	Francfort sur le Main	37
Rhin Supérieur	Confluent de la Nahe	529,1
Rhin Supérieur	Caub	546,2
Rhin Supérieur	Confluent de la Lahn	585,7
Rhin Supérieur	Coblence	591,5
Rhin Supérieur	Confluent de la Moselle	592,5
Moselle	Metz	300
Moselle	Trèves	95
Moselle	Cochem	52
Rhin Supérieur	Andernach	613,8
Rhin Supérieur	Bonn	654,5
Rhin Supérieur	Confluent de la Sieg	659,3
Rhin Supérieur	Cologne	688
Rhin Supérieur	Düsseldorf	744,2
Rhin Supérieur	Confluent de la Ruhr	780
Rhin Supérieur	Ruhrort	780
Rhin Supérieur	Wesel	814
Rhin Supérieur	Confluent de la Lippe	814,4
Rhin Supérieur	Rees	837,4
Bovenrijn	Lobith	862,2
Bovenrijn	Pannerdense Kop	867,2
Waal	Nimègue	884,9
Waal	Dodewaard	901,4
Waal	Tiel	913,2
Waal	Vuren	951,8
IJssel	IJsselkop	878,5
IJssel	Deventer	945
IJssel	Kampen	994,5
Nederrijn – Lek	Arnhem	884
Nederrijn – Lek	Amerongen	922
Nederrijn – Lek	Hagestein	946,6

<2> Tronçon d'introduction (Einleitungszweig)

Action:
Donner le numéro du tronçon où a eu lieu l'accident (voir la partie commentaire).

Remarque:
Dans le cas où vous voulez donner un profil de concentration, vous devez donner le numéro de tronçon où ont été faites les mesures.

<2> PK d'introduction (Einleit.kmr.)

Action:
Donner le PK du lieu de l'accident. Voir le tableau dans l'annexe A et remarque.

Remarque:
Dans le cas où vous voulez donner un profil de concentration, vous devez bien entendu introduire le PK de l'endroit où ont été faites les mesures.

N.B.
Le kilométrage d'introduction étant donné, il est possible que le modèle demande si l'accident a eu lieu sur la partie canalisée ou sur le Vieux Rhin, à cause de la section parallèle entre Kembs et Plittersdorf (voir Annexe A). La section concernée peut être indiquée en tapant **K** ou **P**.

<3> Type d'introduction (Einleitungsart)

Action:
Taper »**1**« s'il s'agit d'une introduction instantanée,
»**2**« s'il s'agit d'une pollution en »front« et
»**3**« s'il s'agit d'une courbe de concentrations mesurées.

Introduction instantanée = la masse totale est introduite dans l'eau de surface en une seule fois.
Pollution en front = la masse totale est introduite régulièrement dans l'eau de surface en un nombre donné d'heures.
Tableau = il est introduit une courbe de concentrations mesurées.

<4> Coefficient de dispersion (Dispersionskoeffizient)

Action:
Donner la valeur du coefficient de dispersion (en m^2/s) ou taper sur <**Return**>, dans le cas où la valeur par défaut sera utilisée.

Remarque:
Dans le cas où une valeur est donnée ici, celle-ci sera prise pour tout le secteur concerné.

La formule de calcul par défaut du coefficient de dispersion dans le Rhin est:

$$D = 0{,}075 \cdot u \cdot Q$$

où: u = vitesse locale du courant
Q = débit local.

Cette formule n'est pas encore calibrée à partir de mesures.

<5> Temps de demi-vie (Halbwertszeit)

Action:
Donner le chiffre en jours pendant lequel 50% de la substance dans l'eau est dégradée. Taper <**Return**> dans le cas d'une substance non dégradable.

Remarques:

1) Si le temps de demi-vie n'est pas connu, mais que l'on connait le nombre de jours (T_p) pendant lequel un certain pourcentage (p) de la substance se dégrade, le temps de demi-vie peut être calculé comme suit:

$$\text{Temps de demi-vie} = Tp \cdot \ln(2)/\ln\{100/(100-p)\}$$

Dans cette formule, Tp est le temps dans lequelle p% de la substance se dégrade.
Par exemple: Il est connu que 70% d'une substance se dégrade en 11,5 jours (Tp = 11,5 (j)). Alors le temps de demi-vie est 6,62 jours.

2) La relation entre le temps de demi-vie et le coefficient de dégradation linéaire, très utilisé, est:

$$\text{Temps de demi-vie} = 1/\{k \cdot \ln(2)\}$$

où: k = le coefficient de dégradation linéaire (dimension 1/jour)

Le coefficient linéaire de dégradation peut être calculé comme suit pour la sédimentation:

$$k = v \cdot F/h$$

où: v = vitesse de sédimentation (m/jour)
F = fraction adsorbée (–)
h = profondeur moyenne (m).

La fraction adsorbée F de la teneur totale peut être calculée comme suit:

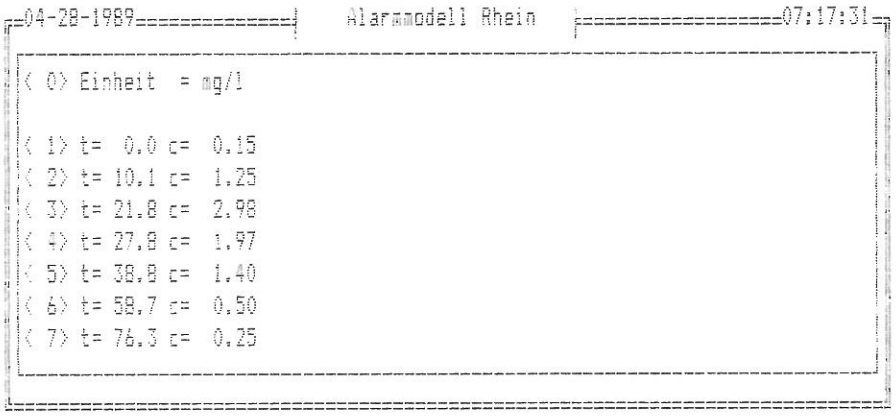
$$F = K \cdot S/(1+K \cdot S)$$

où: K = coefficient de répartition en unité de volume par unité de poids des matières en suspension
S = teneur moyenne en matières en suspension

Les données suivantes sur l'évolution de la concentration mesurée sont disponibles:

Date-heure	Concentration (mg/l)
870506-0815	0,35
870506-1820	1,45
870507-0600	3,18
870507-1200	2,17
870507-2300	1,60
870508-1855	0,70
870509-1230	0,45

D'autre part, il est connu que le »bruit de fond« en concentration est de 0,20 mg/l pour cette période. Les données entrées sont alors:



La valeur maximale en temps est 999,99 heures. La valeur maximale en concentration est 9999,99. Si nécessaire une autre unité doit être choisie au préalable.

ANNEXE D

Echelles avec répondeur automatique et leur numéro

Echelle	N° de téléphone
Rheinfelden	061–875068
Plittersdorf (1989)	07222–19722
Maxau	0721–19722
Spire	06232–19722
Worms	06241–19722
Mayence	06131–19722
Caub	06774–19722
Coblence	0261–19722
Andernach	02632–19722
Bonn	0228–19722
Cologne	0221–736263
Düsseldorf	0211–326622
Ruhrort	0203–44098
Wesel	0281–23828
Emmerich	02822–70030
Lobith	08303–1420
IJsselkop	08303–8370
Gundelsheim (Neckar)	06269–277
Cochem (Moselle)	02671–19722
Obernau (Main)	06028–6440

A présent, les niveaux d'eau des stations de mesure Kehl-Kronenhof et Plittersdorf ne sont pas encore disponibles par répondeur automatique. Le niveau d'eau de ces échelles est donc dérivé provisoirement au moyen des courbes de relations entre niveaux d'eau à l'échelle Rheinfelden. Le niveau d'eau est donné par des »bip«. Le message commence par la valeur instantanée donnée deux fois; ensuite les niveaux d'eau des 24 dernières heures sont données en reculant dans le temps d'un pas de deux heures.

Un message peut se présenter ainsi:

niveau instantané 315 cm

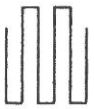
niveau instantané 315 cm

niveau 10.00 h: 312 cm

| = »bip«; 1 bip = 1 etc. jusqu'à 10 bip = 0

| = son long signifiant une séparation entre deux chiffres

. . . . . = petits bip séparant les 2 messages sur les valeurs instantanées.

 = sons différents signifiant le passage entre niveaux à différents heures.