

**Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes**

**Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin**

**ANALYSE und EVALUIERUNG der 2-D-MODULE  
zur Berechnung des Stofftransportes in der Windows-Version des  
RHEINALARMMODELLS in Theorie und Praxis**

**Projektleitung:** A. van Mazijk  
J. A. G. van Gils  
V. Weitbrecht

**Projektbearbeitung:** S. Vollstedt



**ANALYSE und EVALUIERUNG der 2-D-MODULE  
zur Berechnung des Stofftransportes in der Windows-Version des  
RHEINALARMMODELLS in Theorie und Praxis**

**Projektleitung:** A. van Mazijk – TU Delft  
J. A. G. van Gils – WL | Delft Hydraulics  
V. Weitbrecht – Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe

**Projektbearbeitung** S. Vollstedt - Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe

**Auftraggeber** Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)



Bericht Nr. II-16 der KHR  
Rapport no. II-16 de la CHR

©2000, CHR/KHR  
ISBN 90-36953-55-3

**Analyse et évaluation du module à deux dimensions pour calculer le transport des sédiments dans la version de Windows du modèle d'alerte pour le Rhin en théorie et en pratique**

Parties françaises:

Préface: p. III

Quelques informations sur la CHR: p. 84

**Analyse en evaluatie van de 2-D-modulen ter bepaling van het stoftransport in de Windows-versie van het Rijnalarmmodel in theorie en praktijk**

Nederlandstalige gedeelten:

Enige informatie over de CHR: blz. 85

**Analysis and evaluation of the 2-D-modules for the computation of the spill transport in the Windows-Version of the Rhine-Alarm-Model in theory and practice**

English texts:

Abstract: p. VII

Information on the CHR: p. 86

### *Vorwort*

Im Jahre 1988 haben die Minister der Rheinanliegerstaaten die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigungen und die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes mit der Entwicklung von Methoden und Modellen für die Vorhersage des Schadstofftransportes im Rhein beauftragt. Hierzu wurde das Rheinalarmmodell entwickelt. In der Berichtenreihe der KHR wurde hierüber publiziert:

KHR Bericht Nr. I-12, Spreafico, M.; Mazijk, A. van (Red.) (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein.

KHR Bericht Nr. II-4, Mazijk, A. van; Verwoerd, P.; Mierlo, J. van; Bremicker, M.; Wiesner, H. (1991): Rheinalarmmodell Version 2.0 - Kalibrierung und Verifikation.

Die KHR ist verantwortlich für die Verwaltung und die Weitergabe des Rheinalarmmodells, sowie die erforderlichen Erweiterungen. So erfolgte 1995 eine Verbesserung der Zuverlässigkeit des Modells bezüglich der Aare und der Mosel mit der Kalibrierung dieser zwei Nebenflüsse des Rheins: KHR Bericht II-14, Mazijk, A. van; Leibundgut, Ch.; Neff, H.-P. (1999): Rhein-Alarm-Modell Version 2.1, Erweiterung um die Kalibrierung von Aare und Mosel

1998-1999 wurde eine dritte, erweiterte Windows-Version des Rheinalarmmodells von WL | Delft Hydraulics erstellt. Dabei wurden die Errungenschaften des Donau-Alarmmodells benutzt, das unter Windows nach dem Konzept der Version 2.0 des Rheinalarmmodells entwickelt wurde. Eine dieser Errungenschaften bildeten die zwei-dimensionalen Module, die zusätzlich den Stofftransport über die Flussbreite berechnen.

Im allgemeinen liefert eine eindimensionale Berechnung des Stofftransportes mit dem Rheinalarmmodell eine genügend genaue Information im Katastrophenfall.

Wenn die Einleitung einer Verschmutzung jedoch verhältnismäßig unweit stromaufwärts einer Abzweigung liegt, kann die Prognose erheblich von den tatsächlichen Verhältnissen abweichen.

### *Préface*

En 1988, les ministres des pays riverains du Rhin ont chargé la Commission Internationale de Protection du Rhin contre les Pollutions et la Commission Internationale de l'Hydrologie du Bassin Versant du Rhin de développer des méthodes et des modèles permettant de prévoir le transport des substances nocives dans le Rhin. C'est ainsi que le modèle d'alarme pour le Rhin a vu le jour. Il a été l'objet de plusieurs publications dans les cahiers spécialisés de la CHR :

Rapport CHR No. I-12, Spreafico, M.; Mazijk, A. van (Red.) (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein.

Rapport CHR No. II-4, Mazijk, A. van; Verwoerd, P.; Mierlo, J. van; Bremicker, M.; Wiesner, H. (1991): Rheinalarmmodell Version 2.0 - Kalibrierung und Verifikation.

La CHR est responsable de la gestion du modèle et des extensions nécessaires, ainsi que de sa transmission aux utilisateurs. Ainsi, la fiabilité du modèle a été améliorée en 1995 en ce qui concerne l'Aare et la Moselle par l'intégration de l'étalonnage de ces deux affluents du Rhin : Rapport CHR II-14, Mazijk, A. van; Leibundgut, Ch.; Neff, H.-P. (1999): Rhein-Alarm-Modell Version 2.1, Erweiterung um die Kalibrierung von Aare und Mosel.

En 1998 et 1999, une troisième version Windows améliorée du modèle d'alarme pour le Rhin a été élaborée par WL | Delft Hydraulics. Cette version exploite les réalisations du modèle d'alarme pour le Danube développées sous Windows selon le concept de la version 2.0 du modèle d'alarme pour le Rhin, intégrant notamment les modules bidimensionnels qui permettent de calculer le transport de matière en largeur de rivière.

D'une manière générale, un calcul à une dimension du transport de matière à l'aide du modèle d'alarme pour le Rhin fournit une information suffisamment exacte en cas de calamité.

Cependant, si la décharge polluante a lieu en amont, à une distance relativement courte d'un défluent, les pronostics fournis par le modèle peuvent diverger considérablement des conditions réelles.

## Vorwort

---

Deshalb galt es abzuklären, inwiefern es erwünscht wäre mit dem Rheinalarmmodell auch zweidimensional rechnen zu können und was diese Möglichkeit zu einer weiteren Optimierung der Vorhersage des Stofftransportes beitragen könnte. Von Frau Silke Vollstedt wurde diese Frage im Rahmen ihrer Diplomarbeit als Cand. Ing. der Universität Karlsruhe an der Technischen Universität Delft sowohl im theoretischen als im praktischen Sinne analysiert und evaluiert.

Diese Arbeit erfolgte in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Hydrologie und Ökologie der Technischen Universität Delft und WL | Delft Hydraulics.

Die Resultate dieser Analyse und Evaluierung führten Ende 2000 zu den KHR-Beschlüssen, den diesbezüglichen Schlussbericht in der KHR Schriftenreihe Zwei herauszugeben und WL | Delft Hydraulics zu beauftragen, die zweidimensionalen Module als zu wählende Rechenmöglichkeit im Rheinalarmmodell nach den vorgeschlagenen Empfehlungen zu aktivieren.

Allen Beteiligten, Frau S. Vollstedt, ihren Betreuern Dr. Ir. A. van Mazijk, Ir. J.A.G. van Gils und Dipl.-Ing. V. Weitbrecht sei an dieser Stelle der Dank für die geleisteten Dienste ausgesprochen.

Der Präsident der KHR  
Prof. Dr. M. Spreafico

Il fallait donc définir dans quelle mesure il serait souhaitable de pouvoir effectuer aussi des calculs bidimensionnels avec le modèle d'alarme pour le Rhin, et comment cette possibilité pourrait contribuer à optimiser les prévisions concernant le transport de matière. Ces aspects ont été analysés et évalués, aussi bien sur un plan théorique que pratique, par Mme Silke Vollstedt dans le cadre de son travail de diplôme à l'Université Technique de Delft en tant que candidate-ingénieure de l'université de Karlsruhe.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Institut d'Hydrologie et d'Ecologie de l'Université Technique de Delft et WL | Delft Hydraulics.

Les résultats de ces analyses et évaluations sont à la source des décisions prises fin 2000 par la CHR et qui figurent dans le rapport final en découlant publié dans la série de cahiers Deux de la CHR. C'est ainsi que WL|Delft Hydraulics a été chargé d'activer les modules bidimensionnels comme option de calcul possible dans le modèle d'alarme pour le Rhin conformément aux recommandations formulées.

Nous tenons à remercier toutes les personnes concernées, Mme S. Vollstedt, ses mentors, le dr.ing. A. van Mazijk, et les ingénieurs J.A.G. van Gils et V. Weitbrecht pour leur très utile contribution.

Le président de la CHR  
Prof. Dr. M. Spreafico

# Inhaltsverzeichnis

<b><i>Vorwort/Préface</i></b>	<b>III</b>
<b><i>Abstract</i></b>	<b>VII</b>
<b><i>Zusammenfassung</i></b>	<b>IX</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 TRANSPORT GELÖSTER STOFFE IN FLÜSSEN</b>	<b>5</b>
2.1 Eindimensionales Modell	5
2.2 Zweidimensionales Modell	8
<b>3 UMSETZUNG DER TRANSPORTVORGÄNGE IM RECHENMODELL</b>	<b>13</b>
3.1 Aufteilung des Rheins in Abschnitte	13
3.2 Unverzweigte Fließstrecke	15
3.2.1 Arbeitsweise der 2-D-Module auf unverzweigter Fließstrecke	15
3.2.2 Vergleich Theorie – Programm	16
3.3 Parallelstrecken	18
3.3.1 Massenverteilung bei Verzweigungen	18
3.3.2 Bisherige Berechnung der lateralen Konzentrationsverteilung	20
3.3.3 Bewertung und Veränderung der 2-D-Module	25
3.4 Weitere Verbesserungen des Programms	30
3.5 Hinweise zur Anwendung	32
3.5.1 .SPI-File	32
3.5.2 .LOC-File	32
3.5.3 Ungenauigkeiten durch zeitliche Verschiebung	33
3.6 Rechenzeit	34
3.6.1 Möglichkeiten zur Beschleunigung der Rechenzeit	34
3.6.2 Vergleich von Rechenzeiten	35

<b>4</b>	<b>ANALYSE UND BEWERTUNG DER NEUEN 2-D-MODULE</b>	<b>39</b>
4.1	Unverzweigte Fließstrecke: BASF-Störfall 1990	39
4.2	Testdurchlauf im Bereich von Parallelstrecken	41
4.3	Massenverteilung auf die niederländischen Rheinarme	47
4.4	Tracerversuch Juni 91 bei Mainz	54
4.5	Tracerversuch Juli 89 bei Albrück	56
4.6	Parallelstrecken der Aare	59
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN</b>	<b>65</b>
	<b>SYMBOLVERZEICHNIS</b>	<b>69</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>71</b>
	<b>ANHANG</b>	
A.	Schematische Darstellung des Rheins	75
B.	Umformung der 2-D-Gleichung	77
C.	Herleitung der Grenzwerte $y_{min}$ und $y_{max}$	79
D.	Wasserstands – Abflussbeziehung in Kehl-Kronenhof	81
	<b>INFORMATIONEN</b>	
	Einige Informationen über die KHR (deutsch, französisch, niederländisch und englisch)	83

## Abstract

The Rhein-Alarm-Model is used to predict the transport of a polluting substance, which is accidentally discharged into the river Rhine. With this model it is possible to calculate the travel time, distribution, and concentration height of the “cloud” of such a substance. The model is essentially one-dimensional: the distribution of the concentration can be calculated in the direction of the mean flow. An additional two-dimensional module, which is already available but has not yet been activated, would allow the calculation of the concentration distribution over the river width. It was the objective of this thesis to examine the 2-d-module, to improve it if necessary and to validate it afterwards with field data.

The analysis of the 2-d-module showed that its functioning could indeed be improved with respect to its treatment of confluences and bifurcations. The overall goal of these improvements was to provide a good simulation of the lateral mass distribution of a substance at bifurcations. Consequently, the calculation of the concentration distribution over confluences and bifurcations was optimized. After that, the 2-d-module was analyzed by doing some tests and comparing their results with measurements from a tracer test and from an accident. The results of these investigations are:

- The mass distribution over the branches of the Rhine in the Netherlands can be improved if the spill position is closer than 100 km upstream of the bifurcation between Waal and Pannerdensch Kanaal.
- The results of the concentration distribution after a confluence are similar to the measurements. However, if one branch of the confluence carries a small amount of discharge (<10% of the total discharge), the 2-d-module does not provide better results.
- In a region with several bifurcations and confluences after each other (channels between Basel and Kehl) the 2-d-module results in significant improvements in the predictions of the arrival time, if the distribution of the discharges is not extremely unequal (see above). The longer the parallel branches are the bigger is the improvement.
- In a part of the river without confluences or bifurcations, the travel time prediction is not improved by the 2-d-module. However, the concentration distribution over the width can be calculated more accurately over a short distance downstream from the spill.
- The integration of the parallel branches in the river Aare is not recommended as long as there are no dangerous industries along the river. Instead the calculation of the travel time is done by always using the shortest travel time of two parallel



branches. This method also should be introduced at the parallel branches at Albrück in the river Rhine instead of calculating the average value of the travel time of the two branches.

Besides the results and recommendations above, additional proposals to improve the Rhein-Alarm-Model are listed below:

- The value of  $\gamma$  (constant for the calculation of the lateral distribution) should be changed to  $\gamma = 0,6$  before activating the 2-d-modules.
- The distribution of the width of the river into small pieces for the calculation of the lateral concentration distribution should be increased from 40 to 200 spatial steps to gain more accurate results.
- The limit of paths in the model has to be removed to provide more exact results.
- It is recommended to introduce a possibility for the user to choose a downstream limit for the calculations. Due to this limit the time of the calculation will be lowered. Moreover there will be less input in the hydrological data asked of the user.
- The possibility of “mixed spill” (no initial lateral concentration gradients) should be maintained. It is missing in the user interface until now.
- An additional output option should be created: the concentration at a certain station at a certain lateral position should be presented as a function of time.
- The automatic calculation of the hydrological values at Kehl-Kronenhof should be introduced in the Windows-Version of the Rhein-Alarm-Model as it is in Version 2.1.
- An integration of changing  $\beta$ -values due to the operation of the hydroelectric power plants between Rheinfelden and Kehl-Kronenhof is recommended. This will lead to better downstream results for the calculation of the travel time of a cloud.

After all it can be said that the 2-d-module stands the tests in the course of this work, which some considerations listed above. The calculation time of the model will increase due to the integration of the 2-d-module. Therefore, the option to carry out one-dimensional simulations, which will not take a much longer time than before, has to be maintained. The results of this work support the activation of the 2-d-modules in the Rhein-Alarm-Model because the two-dimensionality can improve the predictions of the model in a significant and convenient way.

# Zusammenfassung

Mit dem Rhein-Alarmmodell in der Windows-Version lässt sich bisher die Konzentrationsverteilung allein in Flusslängsrichtung berechnen. Der Einsatz von zur Zeit deaktivierten 2-D-Modulen würde zusätzlich eine Berechnung über die Flussbreite ermöglichen. Daher war es Ziel dieser Arbeit, die 2-D-Module zu analysieren, gegebenenfalls auszubessern und anschließend anhand von mehreren Simulationen ihre Zuverlässigkeit zu überprüfen.

Bei der Analyse der deaktivierten 2-D-Module zeigte sich, dass ihre Arbeitsweise im Bereich von Verzweigungen und Zusammenflüssen zu verbessern war. Die durchgeführten programmtechnischen Änderungen zielten vor allem darauf ab, die Massenverteilung eines Stoffes bei Verzweigungen gut zu simulieren, wozu die Berechnung der lateralen Konzentrationsverteilung nach Zusammenflüssen und Verzweigungen optimiert wurde. Anschließend erfolgte eine Analyse der 2-D-Module mit Hilfe von Testrechnungen und Messdaten aus Tracerversuchen sowie einem Störfall. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind:

- Die Massenverteilung auf die niederländischen Rheinarme wird bei Uferinspeisung bis zu ca. 100 km vor der Verzweigung von Waal und Pannerdensch Kanaal besser simuliert.
- Nach der Mündung eines anderen Flusses in den Rhein zeigt die berechnete laterale Konzentrationsverteilung gute Übereinstimmung mit Messergebnissen. Die Verbesserungen gegenüber dem eindimensionalen Modell werden allerdings bei unterschiedlicher Abflussverteilung ( $Q_{\text{eintründender Fluss}} < 10\% Q_{\text{Rhein}}$ ) vernachlässigbar.
- Die Einführung der Zweidimensionalität kann bei vielen Verzweigungen und Zusammenflüssen (Bereich Rheinseitenkanal und Schlingenlösung) zu um mehrere Stunden verbesserten Vorhersagen bezüglich der Ankunftszeit einer Schadstoffwolke führen. Je länger die Parallelstrecken, desto größer ist dabei im Allgemeinen der Unterschied. Bei unterschiedlicher Abflussverteilung (s.o.) bringen die 2-D-Module jedoch keine entscheidende Verbesserung.
- Auf gerader Fließstrecke ergeben sich hinsichtlich der Transportzeit keine Verbesserungen, jedoch kann die Konzentration auf kurzer Distanz an verschiedenen Punkten im Querschnitt genauer berechnet werden.
- Für die Parallelstrecken beim Kraftwerk Albbruck (Hochrhein) wird vorgeschlagen, mit der kürzesten Fließzeit von beiden Zweigen zu rechnen, anstatt den Mittelwert aus beiden Fließzeiten beizubehalten, um eine höhere Genauigkeit in der Berechnung der Transportzeiten zu erzielen.

## Zusammenfassung

---

- Ein Einbau der Aareparallelstrecken in das Rhein-Alarmmodell wird nicht empfohlen, insofern sich dort keine potentiellen Gefahrenquellen befinden. Daher sollte die Aare auf die Lage solcher Gefahrenquellen untersucht werden.

Neben den oben aufgeführten Ergebnissen und Empfehlungen werden folgende Veränderungen im Rhein-Alarmmodell vorgeschlagen:

- Der Wert der Proportionalitätskonstante  $\gamma$  für die laterale Dispersion muss vor Einsatz der 2-D-Module auf  $\gamma = 0,6$  erhöht werden.
- Die Unterteilung der Flussbreite in Abschnitte zur Berechnung der lateralen Konzentrationsverteilung sollte von 40 auf 200 Abschnitte erhöht werden, um genauere Ergebnisse zu erlangen.
- Eine Berücksichtigung sämtlicher Fließwege im Modell wird empfohlen, wozu eine im Modell vorhandene Beschränkung der Anzahl selbiger entfernt werden muss.
- Die Option der Angabe einer Berechnungsgrenze sollte dem Anwender ermöglicht werden, um die Rechenzeit zu beschleunigen und die aufwendige Eingabe der hydrologischen Daten zu begrenzen.
- Die Beibehaltung einer eindimensionalen Einspeisungsmöglichkeit ist empfehlenswert und fehlt bisher in der Anwenderoberfläche.
- Als zusätzliche Ausgabemöglichkeit sollte die Konzentrationsverteilung an jedem Punkt bezüglich der Flussbreite in Abhängigkeit von der Zeit eingeführt werden.
- In der Windows-Version des Rhein-Alarmmodells sollte eine automatische Berechnung der Abfluss- und Wasserstandswerte bei Kehl-Kronenhof in Bezug auf den Abfluss bei Rheinfeldern eingebaut werden (wie in der Version 2.1 des Rhein-Alarmmodells), weil von dieser Messstelle die Wasserstände nicht automatisch verfügbar sind.
- Ein Einbau veränderlicher  $\beta$ -Werte auf Grund des Schwellbetriebes der Kraftwerke zwischen Rheinfeldern und Kehl-Kronenhof wird empfohlen, da hierdurch stromabwärts eine wesentliche Verbesserung in der Simulation der Ankunftszeit einer Verunreinigungswelle erreicht werden kann.

Die neuen 2-D-Module haben sich im Laufe der durchgeführten Analysen bewährt. Ihr Einbau erfordert jedoch mehrere oben erwähnte Maßnahmen und wird außerdem die Rechenzeit des Modells verlängern. Jedoch besteht weiterhin die Möglichkeit, eindimensional zu rechnen, wobei die Rechenzeit kaum ansteigt. Die Ergebnisse sprechen somit für den Einbau der 2-D-Module in das Rhein-Alarmmodell, da die

## **Zusammenfassung**

---

Zweidimensionalität in mehreren Fällen zu signifikanten Verbesserungen in den Berechnungsergebnissen beitragen kann.



# 1 Einleitung

In Mitteleuropa wird neben dem Grundwasser das Wasser der Flüsse in großem Umfang zur Trinkwasserversorgung genutzt. Die Flüsse zählen mit ihren Altarmen und Auenlandschaften zu den artenreichsten Lebensräumen und stellen somit sehr wertvolle Ökosysteme dar. Eine der meistbefahrensten Wasserstraßen der Welt ist der Rhein, an dem sich viele Industrien angesiedelt haben. Hieraus erwächst ein großes Gefahrenpotential hinsichtlich durch Störfälle hervorgerufener Kontamination. Dies zeigte sich in drastischem Ausmaß beim „Sandoz-Unfall“ im Herbst 1986. Infolge eines Großbrandes bei der Firma Sandoz in Schweizerhalle (bei Basel) gelangten mit dem Löschwasser über mehrere Stunden große Mengen an hochtoxischen Chemikalien in den Rhein. Es kam zu einem Massenfischsterben und schweren Schädigungen des Ökosystems. Bei diesem Unglück wurden erhebliche Mängel bezüglich der Organisation, des Informationsaustausches und der Vorhersage des Stofftransportes deutlich. Als Konsequenz erfolgten mehrere Untersuchungen über Vorhersagemodelle für Warn- und Alarmpläne bis 1988 schließlich die Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung (IKSR) und die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) mit der Entwicklung eines Alarmsystems für den Rhein beauftragt wurden (SCHMID, 1996). Ziel des Projektes war es, eine zuverlässige Vorhersage von Fließzeiten und Konzentrationsverläufen von Schadstoffen im Rhein zu ermöglichen.

Das entstandene Alarmmodell wurde im Laufe der Jahre immer weiter entwickelt und verbessert und wird im Falle von Störfällen an mehreren Stationen entlang des Rheins zur Vorhersage benutzt. In Abbildung 1-1 sind die acht Hauptwarnzentralen zu sehen, die sich in den Rheinanliegerstaaten Frankreich, Schweiz, Niederlande, Luxemburg und Deutschland befinden.

Von diesen Stationen werden die Informationen an lokale und landesinterne Warndienste weitergeleitet. So werden z.B. Trinkwasserentnahmestellen rechtzeitig darüber in Kenntnis gesetzt, zu welchem Zeitpunkt eine Stoffwolke bei ihnen ankommen wird, wann mit der maximalen Konzentration zu rechnen ist und wie hoch diese voraussichtlich sein wird.

In den Jahren 1988 bis 1993 wurde das Rhein-Alarmmodell in der Version 2.1 entwickelt. Das Modell arbeitet unter DOS und basiert im Wesentlichen auf einer eindimensionalen analytischen Lösung der advektiv-diffusiven Transportgleichung, wobei die Berechnung abschnittsweise in Fließrichtung mit veränderlichen Parametern geschieht.

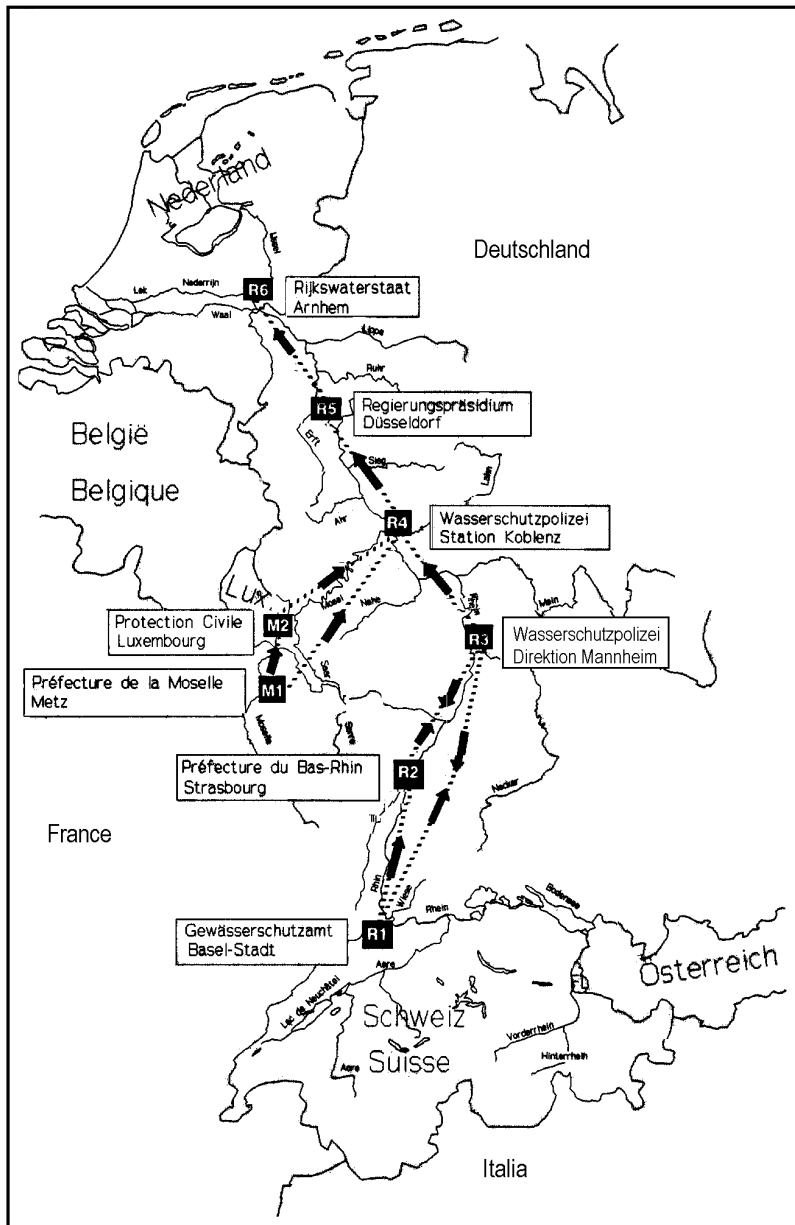


Abbildung 1-1 Internationales Alarmsystem im Rhein bei Störfällen (SPREAFICO, 1993)

Wenig später wurde auch für die Donau ein ähnliches Alarmmodell entwickelt. Dieses bei Delft Hydraulics in Auftrag gegebene Projekt verwendet das Rhein-Alarmmodell als Grundlage. Im Gegenzug für diese Nutzung entstand vor kurzem eine neue Version des Rhein-Alarmmodells, die Version 3, unter Windows, in welcher sich mehrere Verbesserungen, wie z.B. eine genauere Eingabemöglichkeit der Morphologie und Hydrologie finden. Außerdem wurden in dieser Version 3 zweidimensionale Module entwickelt, die eine Berechnung der Konzentrationsverteilung über den Flussquerschnitt ermöglichen. Da die 2-D-Module jedoch bisher nicht überprüft wurden, sind sie in der Windows-Version des Rhein-Alarmmodells deaktiviert, so dass die Berechnung nach wie vor eindimensional geschieht. Vor allem im Bereich von Verzweigungen verspricht

## 1 Einleitung

---

die Verwendung von 2-D-Modulen signifikante Verbesserungen, da sie hier die Massenverteilung eines Schadstoffes auf die Flusszweige beeinflussen. Deshalb besteht von Seiten der KHR Interesse, die 2-D-Module nach einer ausführlichen Überprüfung zu aktivieren.

In dieser Diplomarbeit werden die 2-D-Module analysiert, optimiert und eine Abschätzung hinsichtlich erreichbarer Verbesserungen abgegeben. Im zweiten Kapitel, „Transport gelöster Stoffe in Flüssen“, erfolgt zunächst eine Einweisung in die theoretischen Hintergründe des Stofftransports in Fließgewässern. Im dritten Kapitel, „Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell“, wird auf die Übertragung der Theorie auf das Rechenmodell eingegangen einschließlich einer Analyse hinsichtlich der Arbeitsweise der 2-D-Module im Allgemeinen und im Bereich von Verzweigungen und Zusammenflüssen, woraufhin Korrekturen vorgenommen werden.

In Kapitel 4, „Analyse und Evaluierung der 2-D-Module“, werden die verbesserten 2-D-Module anhand von Testrechnungen, Messdaten aus Tracerversuchen und einem Störfall untersucht. Es wird dargestellt, welche Veränderungen im Ergebnis zu erwarten sind und in welchen Fällen sich große Unterschiede zum eindimensionalen Modell ergeben. Des Weiteren wird abgeschätzt, ob der Einbau von Parallelstrecken in der Aare zu empfehlen ist, da sich dort mehrere Ausleitungen zu Kraftwerkskanälen befinden. Bisher sind diese nicht im Modell integriert, weswegen in der Aare mit einem einzigen Flusslauf ohne Verzweigungen gerechnet wird. So kann nur ein möglicher Fließweg in der Aare berücksichtigt werden, obwohl ein Schadstoff in Wirklichkeit verschiedene Wege durchwandern kann.

In Kapitel 5 sind die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Untersuchungen zu finden.





# 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

In diesem Kapitel werden die mathematischen Grundlagen zum Stofftransport in Flüssen dargestellt.

Wird ein Stoff punktuell in einen Fluss eingeleitet, so breitet er sich auf Grund von Advektion, molekularer und turbulenter Diffusion sowie Dispersion aus. Die Stoffwolke wird daher mit der Zeit immer größer, während ihre maximale Konzentration sinkt. Falls es sich um einen abbaubaren Stoff handelt, nimmt die absolute Stoffmenge wegen der stattfindenden Abbauprozesse im Laufe der Zeit ab.

Für die mathematische Darstellung der stattfindenden Transport- und Ausbreitungsvorgänge der Stoffwolke sind zunächst folgende Überlegungen von Interesse: Der Bereich direkt nach der Einleitung des Stoffes wird als Nahfeld bezeichnet. Hier breitet sich der Stoff in alle Richtungen aus, weswegen der Stofftransport nur in einem dreidimensionalen Modell korrekt wiedergegeben werden kann. Da das Breite/Tiefe-Verhältnis bei den meisten Flüssen sehr groß ist und zusätzlich die turbulente Diffusion in vertikaler Richtung stärker stattfindet als in horizontaler Richtung, wird sich die Substanz relativ schnell gleichmäßig über die Flusstiefe vermischen. Ab hier wird das Mittelfeld definiert, für dessen mathematische Darstellung ein zweidimensionales Modell am geeignetsten ist. Erst wenn der Stoff gleichmäßig über den gesamten Querschnitt verteilt ist, beginnt das Fernfeld, für welches die zunächst folgende eindimensionale Betrachtung gültig ist (vgl. LEHMANN, 1999).

## 2.1 Eindimensionales Modell

Der Transport von gelösten Stoffen im Fernfeld wird durch die eindimensionale Advektions-Diffusions-Gleichung (2-1) beschrieben, deren mathematische Grundlage von Taylor entwickelt wurde.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u_s \frac{\partial \varphi}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k \cdot \varphi = 0 \quad (2-1)$$

$\varphi$  über den Querschnitt gemittelte Konzentration [g/m<sup>3</sup>]

$x$  Fließstrecke in Hauptströmungsrichtung [m]

$t$  Zeit [s]

$u_s$  mittlere Fließgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung [m/s]

## 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

---

$D_x$  longitudinaler Dispersionskoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$k$  Abbaukoeffizient [ $1/\text{s}$ ]

Es wird vorausgesetzt, dass der Fließquerschnitt zeitlich und räumlich konstant und die Turbulenz zeitlich gemittelt stationär ist. Der Term für den Abbau  $k \cdot \varphi$  entfällt bei konservativen (d.h. nicht abbaubaren) Stoffen.

Die Lösung von Gleichung (2-1) kann für eine momentane punktförmige Einleitung durch Integration gefunden werden. Sie ergibt sich im Falle eines konservativen Stoffes zu

$$\varphi(x,t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4\pi \cdot D_x t / u_s^2}} \exp\left[-\frac{(x - u_s t)^2}{4D_x t}\right] \quad (2-2)$$

$M$  freigesetzte Stoffmasse [g]

$A$  Querschnittsfläche [ $\text{m}^2$ ]

Für den Dispersionskoeffizienten  $D_x$  wird die folgende semi-empirische Formel von FISCHER et al. (1997) verwendet

$$D_x = \alpha \cdot \frac{u_s^2 B^2}{a \cdot u_*} \quad (2-3)$$

$\alpha$  Proportionalitätskonstante, wird durch Kalibrierung festgelegt [-]

$B$  Flussbreite [m]

$a$  mittlere Wassertiefe [m]

$u_*$  Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]

mit

$$u_* = \frac{u_s \sqrt{g}}{C} \quad (2-4)$$

$g$  Erdbeschleunigung [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

## 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

---

$C$  Chézy-Koeffizient mit  $C = 25 \cdot (a/k_n)^{1/6}$  [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ]

$k_n$  Konstante von Nikuradse (für den Rhein  $k_n \cong 0,35$  m)

In Wirklichkeit wandert eine Stoffwolke jedoch nicht mit der Geschwindigkeit  $u_s = x/t$ , weswegen aus der mittleren Fließgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung  $u_s$  und einem Totzonenparameter  $\beta$  (van MAZIJK, 1996) die sogenannte gewichtete mittlere Fließgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung  $c$  (auch als Stofftransportgeschwindigkeit bezeichnet) berechnet wird.

$$c = \frac{u_s}{1 + \beta} \quad (2-5)$$

$\beta$  Totzonenparameter [-]

$c$  mittlere Fließgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung [ $\text{m}/\text{s}$ ]

Totzonen sind Bereiche des Flussquerschnitts, in denen das Wasser nahezu steht. Da sie in Verbindung mit dem durchflossenen Teil stehen, gelangt, wenn eine Schadstoffwolke eine solche Totzone passiert, ein Teil des Schadstoffes in die Totzone und wird nach einiger Zeit zurück in das fließende Gewässer gegeben. Dadurch verlangsamt sich die Transportgeschwindigkeit der Schadstoffwolke, die maximale Konzentration nimmt ab und die Wolke bekommt eine asymmetrische Form, eine sogenannte Schiefe.

Der Totzonenparameter berechnet sich deshalb aus dem Flächenverhältnis der Totzonen, meistens gebildet von Bühnenfeldern, und der Hauptströmung

$$\beta = \frac{A_b}{A_s} \quad (2-6)$$

$A_b$  Querschnitt der Bühnenfelder

$A_s$  Querschnitt der Hauptströmung

Durch den Totzonenparameter wird somit die Verlangsamung der Transportgeschwindigkeit berücksichtigt. Die vorgestellte Berechnungsweise dieses Parameters stellt allerdings nur die Theorie dar. In der Praxis wird dieser im Rhein-Alarmmodell durch Kalibrierung bestimmt. Dadurch können gleichzeitig Ungenauigkeiten in den hydrologischen Eingangsdaten abgedeckt werden.

Um auch die Schiefe mit einzubeziehen, wird Gleichung (2-2) folgendermaßen erweitert (vgl. van MAZIJK, 1996)

## 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

---

$$\varphi(x,t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4\pi \cdot D_x t / c^2}} \exp\left[-\frac{(x-ct)^2}{4D_x t}\right] \cdot \left[1 + \frac{G_t}{6} H_3(z)\right] \quad (2-7)$$

mit

$H_3(z)$  Hermites Polynom dritten Grades ( $= z^3 - 3z$ ) [-]

$$\text{wobei } z = \frac{x-ct}{\sqrt{2D_x t}}$$

$G_t$  Schiefekoeffizient [-]

$\cong 1$  für den Rhein

### 2.2 Zweidimensionales Modell

Analog zur eindimensionalen Darstellung ergibt sich für die zweidimensionale Betrachtung im Bereich des Mittelfeldes folgende Differentialgleichung, wobei die gewichtete mittlere Fließgeschwindigkeit eingesetzt wird.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + c \frac{\partial \varphi}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + k \cdot \varphi = 0 \quad (2-8)$$

$y$  laterale Koordinate [m]

$D_y$  lateraler Dispersionskoeffizient [m<sup>2</sup>/s]

Es spielen also sowohl Längs- als auch Querdispersion eine Rolle, d.h. es wird die Ausbreitung der Schadstoffwolke in longitudinaler und lateraler Richtung berücksichtigt. Als Lösung für eine momentane Punktquelle ergibt sich Gleichung (2-9) (van MAZIJK et al., 1999) unter der Voraussetzung eines unendlich breiten Flusses

$$\varphi(x,y,t) = \frac{M}{4\pi \cdot a \cdot \sqrt{D_x D_y} \cdot t} \cdot \exp\left(-\frac{(x-ct)^2 + \frac{D_x}{D_y} y^2}{4D_x \frac{x}{c}}\right) \quad (2-9)$$

## 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

Die Lösung für einen Fluss der Breite  $B$  erhält man durch Spiegelung der Quelle an den Ufern (s. Abb. 2-1).

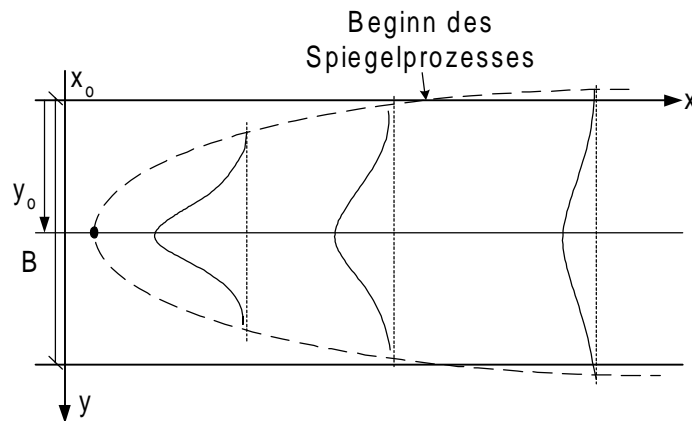


Abbildung 2-1 Ausbreitung einer Substanz über die Flussbreite

Die Spiegelquellen sind fiktive Quellen mit der gleichen Masseneinleitung wie die der tatsächliche Quelle. Das Ergebnis erhält man durch Überlagerung der einzelnen Quellen. Gleichung (2-10) ergibt sich daher durch Summation von unendlich vielen Quellen

$$\varphi(x, y, t) = \frac{M}{4\pi \cdot a \sqrt{D_x D_y} \cdot t} \exp\left[-\frac{(x - ct)^2}{4D_x t}\right] \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left( \exp\left[-\frac{(y - 2nB - y_0)^2}{4D_y t}\right] + \exp\left[-\frac{(y - 2nB + y_0)^2}{4D_y t}\right] \right) \quad (2-10)$$

$y_0$  Abstand der Einleitung vom linken Ufer [m]

$n$  Nummer der Spiegelquelle [-]

Je größer der Abstand zur Einleitung ist, desto mehr Spiegelquellen beeinflussen folglich das Ergebnis.

Um das 2-D-Modell in Abhängigkeit vom 1-D-Modell (Gleichung (2-2)) darzustellen, wurden mehrere Umformungen durchgeführt (siehe Anhang B), die zu folgender Gleichung führen

## 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

---

$$\varphi(x, y, t) = \frac{\varphi(x, t)}{\sqrt{4\pi \cdot D_y t / B^2}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left( \exp \left[ -\frac{\left( \frac{y}{B} - 2n - \frac{y_o}{B} \right)^2}{4D_y t / B^2} \right] + \exp \left[ -\frac{\left( \frac{y}{B} - 2n + \frac{y_o}{B} \right)^2}{4D_y t / B^2} \right] \right) \quad (2-11)$$

Es lässt sich eine sogenannte Mischlänge berechnen (siehe Gleichung (2-12); vgl. FISCHER et al., 1979), innerhalb derer die Anwendung des zweidimensionalen Modells sinnvoll ist. Die Mischlänge  $L_m$  gibt an, nach welcher Strecke sich die Substanz zu 95 % gleichmäßig über den Querschnitt verteilt hat. Nach dieser Distanz kann der Einfluss der Zweidimensionalität vernachlässigt werden.

$$L_m \approx 0,4 \cdot \frac{u_s \cdot b^2}{D_y} \quad (2-12)$$

$b$  gibt die Entfernung von der Lage der Einspeisung zum am weitesten entfernten Ufer an. So entspricht  $b$  z.B. bei Uferinspeisung der Flussbreite  $B$  und bei Einspeisung in Flussmitte der halben Flussbreite  $B/2$ .

Für den lateralen Dispersionskoeffizienten wird die folgende Näherung nach RUTHERFORD (1994) verwendet

$$D_y = \gamma a \cdot u_* \quad (2-13)$$

$\gamma$  Proportionalitätskonstante [-]

Bezogen auf den Rhein lässt sich die Mischlänge bei Uferinspeisung mit folgenden mittleren Werten ungefähr auf 50 bis 150 km abschätzen.

$$\begin{aligned} a &= 5 \text{ m} \\ u_s &= 1 \text{ m/s} \\ B &= 150 \text{ bis } 250 \text{ m} \\ C &= 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s} \\ \gamma &= 0,6 \end{aligned}$$

## 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

---

Der Wert der Proportionalitätskonstante  $\gamma$  ist für verschiedene Flüsse unterschiedlich. Angaben für  $\gamma$  aus Naturmessungen in verschiedenen Flüssen sind in RUTHERFORD (1994) und FISCHER et al. (1979) zu finden. FISCHER vermutet, dass der Wert stark von sekundären Strömungen beeinflusst wird. Speziell für den Rhein gibt van MAZIJK (1996) Werte von ca.  $\gamma = 0,6$  an.



## 2 Transport gelöster Stoffe in Flüssen

---

## 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Zweidimensionalität im Rechnerprogramm des Rheinalarmmodells umgesetzt wurde einschließlich eines Vergleichs der Ergebnisse des Rechnermodells und der mathematischen Theorie anhand einer Testrechnung. Anschließend wird genauer auf die Vorgehensweise im Bereich von Verzweigungen und Zusammenflüssen eingegangen, woraufhin die 2-D-Modulen ausgebessert werden. Am Ende finden sich weitere Verbesserungen des Programms und Hinweise zur Anwendung.

### 3.1 Aufteilung des Rheins in Abschnitte

Bei den in der Theorie angegebenen Lösungen wurde angenommen, dass die Koeffizienten in den Gleichungen räumlich und zeitlich unveränderlich sind. Da dies nicht der Wirklichkeit entspricht, wurde der Rhein einschließlich seiner wichtigsten Verzweigungen und Nebenflüsse für das Rechnermodell in Abschnitte und Teilabschnitte in Flusslängsrichtung unterteilt. Für die Abschnitte wurde jeweils der Abfluss  $Q$  als konstant definiert. Innerhalb jedes Abschnittes liegt eine Wasserstandsmessstelle und an den Abschnittsgrenzen kann sich der Abfluss z.B. auf Grund der Einmündung eines Nebenflusses schlagartig ändern. Außerdem ändert sich der Abfluss in Wirklichkeit innerhalb eines Abschnittes allmählich. Diese langsame Zu- oder Abnahme wird als sprunghafte Änderung an die Abschnittsgrenzen übertragen. Die Abschnitte sind wiederum in Teilabschnitte unterteilt, in denen zusätzlich die Fließgeschwindigkeit  $u$  in Längsrichtung als konstant definiert wird. Sie wird bestimmt aus  $u_i = Q_i/A_i$ , wobei  $A_i$  der für den Teilabschnitt maßgebende Querschnitt ist. Über die Länge eines Teilabschnittes lässt sich nun die Fließzeit berechnen mit  $T_i = L_i/u_i$ .

Um die Fließzeit von der Einleitungsstelle  $x_0$  bis zu einem beliebigen Beobachtungspunkt  $x$  zu bestimmen, werden die Fließzeiten aller Teilabschnitte in diesem Bereich summiert (DELFT HYDRAULICS, 1996).

$$T(x) = \int_{x_0}^x \frac{dx}{c(x)} \quad (3-1)$$

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

Auch der Dispersionskoeffizient in der zusammengesetzten Form  $D_x \cdot t / c^2$  ist nicht konstant und muss daher über alle Teilabschnitte summiert werden (DELFT HYDRAULICS, 1996)

$$\bar{D}_x(T) = \int_0^{T(x)} \frac{D_x}{c^2} dt = \int_{x_0}^{x_c(t)} \frac{D_x}{c^3} dx \quad (3-2)$$

$x_c(t)$  ist die Ortskoordinate, die dem Schwerpunkt des Konzentrationsverlaufs in Flusslängsrichtung zum Zeitpunkt  $t$  entspricht (NEFF, 1996).

$$x_c(t) = x_0 + \int_0^t c[x_c(\tau)] d\tau \quad (3-3)$$

Analog wird mit dem Dispersionskoeffizienten für die laterale Dispersion  $D_y \cdot t / B^2$  verfahren

$$\bar{D}_y(T) = \int_0^{T(x)} \frac{D_y}{B^2} dt = \int_{x_0}^{x_c(t)} \frac{D_y}{c \cdot B^2} dx \quad (3-4)$$

Eingesetzt in Gleichung (2-11) ergibt dies schließlich

$$\varphi(x, y, t) = \frac{\varphi(x, t)}{\sqrt{4\pi \cdot \bar{D}_y(T)}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left( \exp \left[ -\frac{\left( \frac{y}{B} - 2n - \frac{y_0}{B} \right)^2}{4\bar{D}_y(T)} \right] + \exp \left[ -\frac{\left( \frac{y}{B} - 2n + \frac{y_0}{B} \right)^2}{4\bar{D}_y(T)} \right] \right) \quad (3-5)$$

## 3.2 Unverzweigte Fließstrecke

Hier soll zunächst erläutert werden, wie die 2-D-Module auf einer unverzweigten Fließstrecke rechnen. Dieses Vorgehen wird im Anschluss anhand eines Vergleiches mit den Gleichungen aus der Theorie untermauert.

### 3.2.1 Arbeitsweise der 2-D-Module auf unverzweigter Fließstrecke

Bevor die zweidimensionalen Module des Rheinalarmmodells angewendet werden können, ist es zunächst wichtig, zu überprüfen, ob die mathematischen Grundlagen der Zweidimensionalität richtig im Programm umgesetzt wurden. Das Rechenprogramm wurde in der Programmiersprache Fortran geschrieben. Im Folgenden wird beschrieben, wie das Programm bezogen auf die 2-D-Module arbeitet.

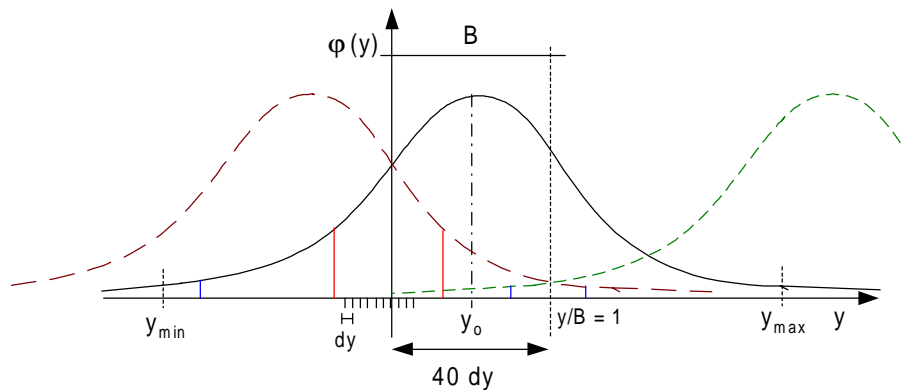


Abbildung 3-1 Umsetzung des Spiegelprinzips im Rechenmodell

In Abbildung 3-1 ist das Prinzip der Rechnung dargestellt. Zu sehen ist eine Draufsicht auf einen Fluss der Breite  $B$ . Die Gaußsche Verteilungsfunktion (schwarzer Graph) gibt die Verteilung der Substanz wieder, die sich einstellen würde, falls der Fluss unendlich breit wäre (d.h. ohne Spiegelungen). Im dargestellten Fall befand sich die Einleitungsquelle in Flussmitte ein paar Kilometer flussaufwärts.  $y_{min}$  und  $y_{max}$  begrenzen die Verteilungsfunktion jeweils an einem Punkt, an dem die Konzentration vernachlässigbar klein ist und somit außerhalb dieses Bereichs zu Null definiert wird. Die Flussbreite wird nun in 40 gleich große Teilabschnitte der Breite  $dy$  zerlegt (die Anzahl der Teilabschnitte kann beliebig verändert werden, wobei gilt: Je mehr Teilabschnitte, desto genauer ist die Rechnung. Aus diesem Grunde wurde die Anzahl später auf 200 erhöht (s. Kap. 3.4)). Die Zerlegung in Teilabschnitte der Breite  $dy$  wird fortgesetzt bis zu den Grenzen  $y_{min}$  und  $y_{max}$ , wobei  $y_{min}$  und  $y_{max}$  so berechnet wurden, dass sie genau in der Mitte eines Teilabschnitts liegen. Das Programm beginnt die Rechnung mit  $y_{min}$  als Startwert. Dieser wird solange am jeweils nächstliegenden Ufer

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

hin- und hergespiegelt, bis er sich im Bereich des Flusses befindet. Genauso wird mit allen folgenden Punkten, die rechts von  $y_{min}$  in Teilabschnittsmitte liegen, der Reihe nach verfahren bis zu  $y_{max}$ . Durch Summierung der Konzentrationen aller Punkte, die nach dem Spiegelverfahren jeweils an der gleichen Stelle im Fluss liegen, ergibt sich schließlich die Konzentrationsverteilung. Dieses Verfahren wird mit Hilfe von Spiegelquellen anschaulicher: In Abbildung 3-1 sind eine braune und eine grüne fiktive Spiegelquelle eingezeichnet. Betrachtet man den roten Wert der schwarzen ursprünglichen Verteilung, so sieht man, dass er nach einmaliger Spiegelung am linken Ufer bereits im Flussbereich liegt. Diese erste Spiegelung aller Werte im linken Bereich außerhalb des Flusses wird durch die braune Spiegelquelle repräsentiert. Der blau markierte Wert liegt nach erster Spiegelung noch nicht im Fluss. Daher wird er ein zweites Mal (diesmal am rechten Ufer) gespiegelt und gelangt dadurch in den Flussbereich. Die zweite Spiegelung aller Werte, die sich ursprünglich links des Flusses befanden, kennzeichnet der grüne Graph. Dieses Verfahren setzt sich mit immer weiter entfernt liegenden Spiegelquellen fort, bis alle Werte im Flussbereich liegen. Die Konzentrationsverteilung im Fluss ergibt sich letztlich durch Summation des ursprünglichen und aller gespiegelten Graphen in diesem Bereich.

Für die Grenzen  $y_{min}$  und  $y_{max}$  werden folgende Werte festgelegt:

$$y_{\min, \max} / B = \pm \sqrt{40 \cdot D_y t / B^2} + y_0 / B \quad (3-6)$$

Wie in Anhang C gezeigt wird, liegen diese Grenzwerte bei einer Konzentration von 0,0045% von  $\varphi_{max}$ .

#### 3.2.2 Vergleich Theorie – Programm

Um die Richtigkeit der Arbeitsweise der 2-D-Module hinsichtlich des Spiegelverfahrens zu beweisen, wird die Gleichung aus der mathematischen Theorie (Gleichung 2-11, im Folgenden "Theorie" genannt) mit der digitalen Simulation (im Folgenden „Programm“ genannt) anhand einer Testrechnung verglichen. Dazu wird eine Teilstrecke des Rheins ausgewählt, in der Profilgeometrie, Durchfluss und Fließgeschwindigkeit als konstant festgelegt sind.

Daten des Teilabschnitts:

Rhein, Teilabschnittsnummer 1301 (siehe Anhang A)

Einleitungspunkt: km 274,2

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

Beobachtungspunkt: km 280,9

Länge: 8,8 km

Flussbreite 170 km

Einleitungsmasse: 0,142 t

Stoßeinleitung in Flussmitte

$D_x$ : 100 m<sup>2</sup>/s

Hydrologie:

	Wasserstand [cm]	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]
Rheinfelden	229,0	814,3
Plittersdorf	376,4	932,9

Zuerst wird die normale eindimensionale Programmrechnung des Rheinalarmmodells durchgeführt, bei der sich eine maximale durchschnittliche Konzentration von  $\varphi(x,t) = 25,359 \mu\text{g/l}$  ergibt. Diese Konzentration wird danach sowohl in die zweidimensionale Programmrechnung als auch in die Berechnung mit Gleichung 2-11 eingesetzt. Das Programm berechnet für den Term  $D_y t / B^2$  den Wert 0,0137, welcher in die theoretische Rechnung übernommen wird.

Die in Abbildung 3-2 dargestellten Ergebnisse beider Berechnungsverfahren sind identisch, womit die Richtigkeit der Programmrechnung bestätigt ist.

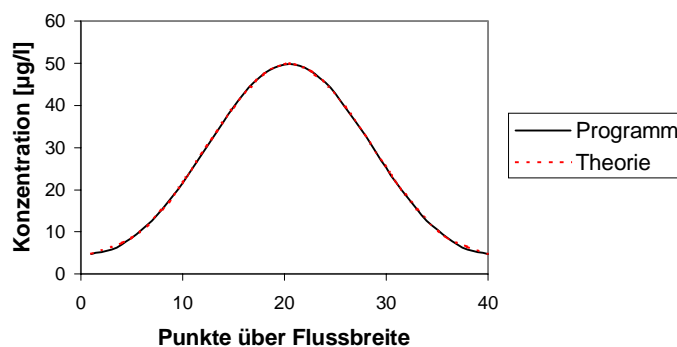


Abbildung 3-2 Vergleich der Berechnungsmethoden

### 3.3 Parallelstrecken

Im Rhein gibt es eine Vielzahl von seitlichen Zuflüssen und Verzweigungen. Allein auf der Strecke zwischen Basel und Kehl existieren, beginnend mit dem Grand Canal d'Alsace (Rheinseitenkanal) und der darauffolgenden Schlingenlösung, fünf Parallelstrecken, in denen ein Großteil des Wassers erst aus dem Rhein hinaus den Kraftwerken zugeleitet und danach wieder in das natürliche Flussbett eingespeist wird. Da der Durchfluss und die Fließgeschwindigkeit in Kraftwerkskanälen meistens wesentlich größer sind als im parallel verlaufenden natürlichen Flussbett, wird die Schadstoffwolke im Kanal schneller flussabwärts wandern, als im sogenannten Rest-Rhein. Dadurch wird die Transportgeschwindigkeit der Schadstoffwolke von der Verteilung auf die parallelen Strecken beeinflusst. Im Rahmen des Rheinalarmmodells liegt das Hauptinteresse somit darin, die Massenverteilung auf die einzelnen Zweige im Bereich von Verzweigungen des Flusslaufes richtig wiederzugeben, um die Transportgeschwindigkeit genauer ermitteln zu können. Die zweidimensionale Schadstoffverteilung innerhalb der Verzweigungen ist zweitrangig und nur in bestimmten Situationen von Interesse. Im Folgenden wird zunächst dargestellt, wie das Computermodell bisher im Bereich von Verzweigungen und Zusammenflüssen arbeitet, wenn die 2-D-Module aktiviert sind. Anschließend werden Verbesserungsvorschläge aufgezeigt und deren Auswirkungen untersucht.

Grundsätzlich sollte zum Vorgehen des Programms erklärt werden, dass die Massen in allen möglichen Fließwegen, die der Schadstoff durchwandern kann, einzeln berechnet werden. So ergeben sich bei einer Verzweigung 2 verschiedene Fließwege und bei  $n$  Verzweigungen  $2^n$  Möglichkeiten für den Weg, den der Stoff nehmen kann. Anschließend werden die Ergebnisse aller Fließwege, die den gleichen Ast enthalten, für diesen summiert und es ergibt sich für jede Teilstrecke der Massenanteil, der sie durchfließt.

#### 3.3.1 Massenverteilung bei Verzweigungen

Sobald eine Schadstoffwolke eine Verzweigung passiert, berechnet das Computermodell die Massenverteilung des Stoffes auf die verschiedenen Zweige (siehe Abbildung 3-3). Hierbei wird angenommen, dass die Lage des Verzweigungspunktes  $y_b$  in Bezug auf die Flussbreite proportional zur Abflussverteilung auf die zwei Zweige unterstrom ist.

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

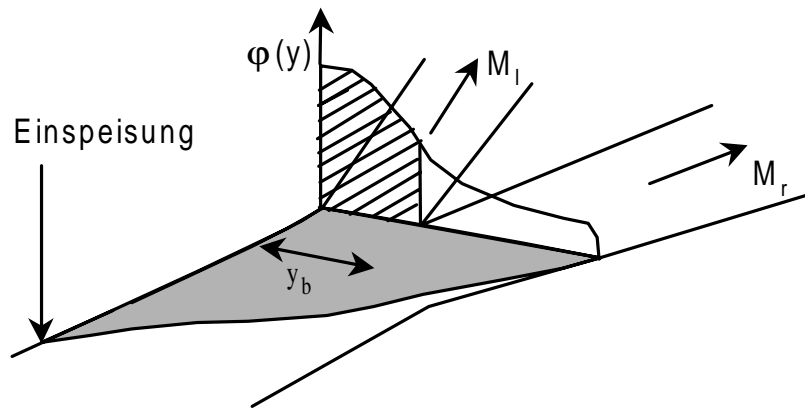


Abbildung 3-3 Massenverteilung an einer Flussverzweigung (LORENZ, 1997)

Diese Definition wird nur zur Berechnung der Massenverteilung getroffen;  $y_b$  gibt also nicht die wirkliche Lage des Verzweigungspunktes über die Flussbreite wieder, sondern berechnet sich wie folgt (van GILS, 1999):

$$y_b = B \cdot \frac{Q_l}{Q_l + Q_r} \quad (3-7)$$

$y$  laterale Koordinate mit Wert 0 am linken Ufer [m]

$y_b$  Verzweigungspunkt bezüglich der Abflussverteilung [m]

$B$  Flussbreite [m]

$Q_l$  Abfluss im linken Flusszweig [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$Q_r$  Abfluss im rechten Flusszweig [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Nun kann die Massenverteilung auf die Flusszweige berechnet werden, indem über die Konzentrationsverteilung oberstrom in lateraler Richtung bis zum Verzweigungspunkt integriert wird (van GILS, 1999).

$$M_l = \frac{M}{\int_0^B \varphi(x, y, t) dy} \int_0^{y_b} \varphi(x, y, t) dy \quad (3-8)$$



### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

$$M_r = \frac{M}{\int_0^B \varphi(x, y, t) dy} \int_0^{y_b} \varphi(x, y, t) dy \quad (3-9)$$

$M$  gesamte Stoffmasse oberstrom der Verzweigung [g]

$M_l$  Stoffmasse im linken Flusszweig [g]

$M_r$  Stoffmasse im rechten Flusszweig [g]

$x$  Lage der Verzweigung [km]

$t$  entspricht  $T(x)$  aus Gleichung (3-1) [s]

#### 3.3.2 Bisherige Berechnung der lateralen Konzentrationsverteilung

Nachdem die Massenverteilung berechnet wurde, bleibt zu klären, wie die Konzentrationsverteilung über den Querschnitt der einzelnen Zweige dargestellt werden kann. Die laterale Konzentrationsverteilung wird durch zwei Parameter beeinflusst: Die dimensionslose laterale Lage der Einleitung  $y_0/B$  und den integrierten Wert des dimensionslosen transversalen Dispersionskoeffizienten  $\int (D_y t / B^2) dt$  (Gleichung 3-4). Diese beiden Parameter werden entlang jedes Fließweges berechnet. Im Bereich von Verzweigungen und Zuflüssen werden sie teilweise manipuliert, um bestimmte Ziele zu erreichen. Dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

Die Verteilung über die Flussbreite kann im Computermodell immer nur als Gaußsche Verteilung wiedergegeben werden, obwohl in der Natur überwiegend andere Verteilungen auftreten. Aus diesem Grunde kann die wirkliche Verteilung nicht exakt wiedergegeben werden und muss durch eine Normalverteilung simuliert werden, was in den meisten Fällen eine gute Annäherung an die natürlichen Verhältnisse ermöglicht, teilweise aber auch zu Schwierigkeiten führen kann, wie sich im Folgenden zeigen wird.

In diesem Kapitel wird erklärt, wie die bereits vorhandenen 2-D-Module im Bereich von Verzweigungen und Zusammenflüssen arbeiten.

#### Zusammenflüsse

In Abbildung 3-4 ist die Arbeitsweise der bisherigen 2-D-Module im Bereich von Zusammenflüssen dargestellt. Eine Verschmutzung nur im linken Flusszweig wird angenommen. Des Weiteren wird unterschieden, ob die Einleitungsquelle im linken Flusszweig an einem der Ufer, in Flussmitte oder eindimensional ist. Eindimensional bedeutet, dass die Substanz von Anfang an völlig vermischt eingespeist wird. Die verschiedenen Fälle werden anhand des Zusammenflusses von Aare und Rhein erläutert. Hierbei wird die Substanz auf die vier verschiedenen Arten (rechts, links, Mitte, 1-D) in

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

die Aare eingespeist und jeweils knapp oberstrom und unterstrom des Zusammenflusses mit dem Rhein die entstehende Konzentrationsverteilung über den Flussquerschnitt untersucht. Da eine eindimensionale Einleitung im zweidimensionalen Modell nicht vorgesehen ist, wird soweit oberstrom eingespeist, dass sich die Konzentration vor Erreichen des Zusammenflusses gleichmäßig über den ganzen Querschnitt verteilt hat.

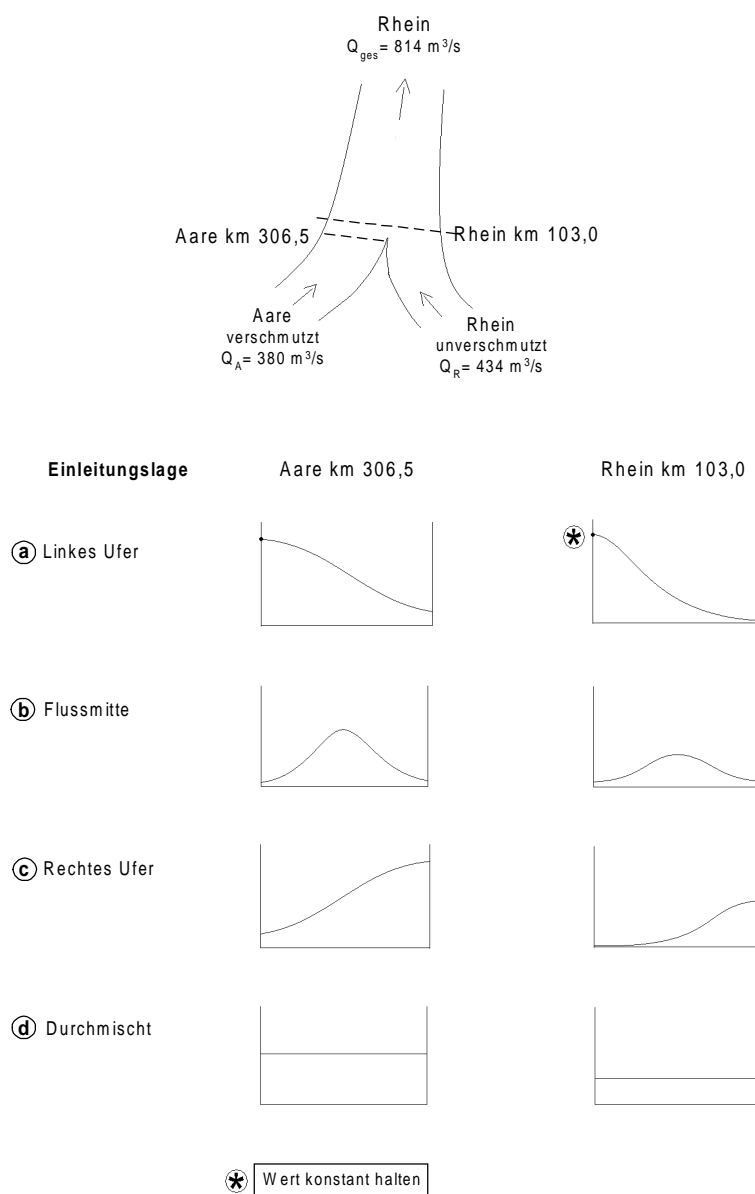


Abbildung 3-4 Bisherige Arbeitsweise der 2-D-Module bei Zusammenflüssen

Wird die Substanz eindimensional eingespeist, erfolgt nach dem Zusammenfluss die Berechnung sofort so, als wäre sie gleichmäßig über den Querschnitt verteilt (s. Abb. 3-4d). Die Konzentrationshöhe wird wegen der Verdünnung mit dem unverschmutzten

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

Rheinwasser proportional zu den Durchflüssen herabgesetzt, die Masse der Substanz bleibt dadurch erhalten. Die zwei Variablen  $y_0/B$  und  $\int (D_y/B^2)dt$  bleiben somit unveränderlich.

Erfolgt die Einspeisung in Flussmitte, wird die maximale Konzentration nach dem Zusammenfluss ebenfalls in Flussmitte projiziert (s. Abb. 3-4b). Die Lage der Einleitung  $y_0/B$  bleibt also unverändert. Auch der Wert des Integrals über die laterale Dispersion wird übernommen, so dass sich der Wert der maximalen Konzentration ändern muss, da die Masse wiederum konstant gehalten wird. Das Integral über den Dispersionskoeffizienten  $\int (D_y/B^2)dt$  wird nach dem Zusammenfluss in Flusslängsrichtung langsamer zunehmen, weil die Flussbreite schlagartig zunimmt.

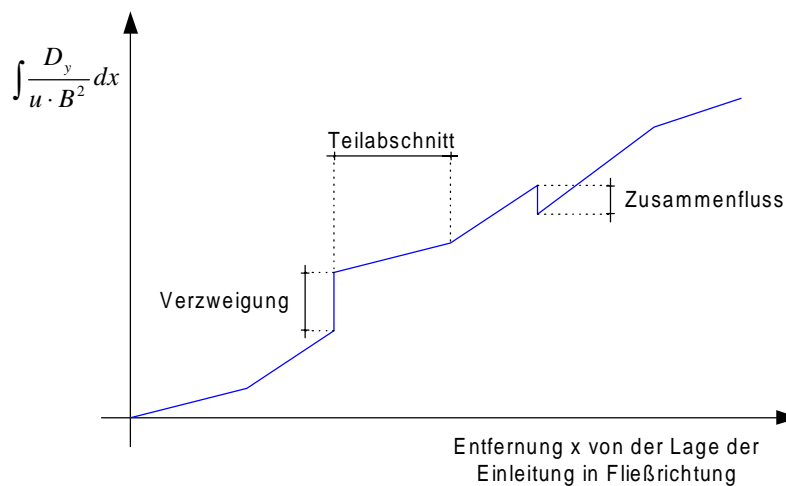


Abbildung 3-5 Möglicher Verlauf des Dispersionskoeffizienten in Fließrichtung

Bei Einspeisung am linken Ufer, also am Außenufer, wird die Lage der Einleitungsquelle  $y_0/B$  übernommen (s. Abb. 3-4a). Allerdings wird versucht, den Wert der maximalen Konzentration (am linken Ufer) konstant zu halten. Um dies zu erreichen, wird das Integral über den Dispersionskoeffizienten  $\int (D_y/B^2)dt$  verändert. Nur so können die maximale Konzentration und die gesamte Masse konstant gehalten werden. Ein möglicher Verlauf des Dispersionskoeffizienten ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Mündet in den verschmutzten Flusszweig ein anderer Fluss, so kommt dies einer Entmischung gleich, da die Substanz nach dem Zusammenfluss ungleichmäßiger verteilt ist. Aus diesem Grund wird das Integral über den Dispersionskoeffizienten herabgesetzt. Analog entspricht eine Verzweigung einer stärkeren Vermischung und das Integral über den Dispersionskoeffizienten steigt schlagartig an. In den einzelnen Teilabschnitten ist der Dispersionskoeffizient  $D_y/B^2$  konstant, so dass der Wert des Integrals  $\int (D_y/u \cdot B^2)dx$  (auf der y-Achse in Abbildung 3-5) stetig ansteigt, wobei er

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

zwischen den Teilabschnitten auf Grund unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten und Flussbreiten variieren kann.

Zunächst gab es trotzdem Abweichungen zwischen dem Wert der Konzentration am linken Ufer vor und nach dem Zusammenfluss. Auf die Gründe hierfür wird in Kapitel 3.4 eingegangen.

Befindet sich die Einleitungsquelle auf der rechten Uferseite, also am Innenufer, wird ebenfalls die Lage der Einleitungsquelle  $y_0/B$  übernommen (s. Abb. 3-4c). Nach dem Zusammenfluss befindet sie sich also wiederum am rechten Ufer. Das Integral über den Dispersionskoeffizienten  $\int(D_y t/B^2)dt$  verändert sich nicht, wodurch die maximale Konzentration einen anderen Wert annimmt.

#### Verzweigungen

In Abbildung 3-6 ist eine Verzweigung in einem Fluss zu sehen. Der ankommende Abfluss der Menge  $Q_{ges}$  verteilt sich auf die zwei Zweige mit den Abflüssen  $Q_K$  und  $Q_{RR}$ . Zur Analyse der Konzentrationsverteilung wird die Abzweigung des Rheinseitenkanals betrachtet. Der Durchfluss im Kanal ( $Q_K = 814 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ist im Beispiel und auch allgemein meistens wesentlich größer als im Rest-Rhein ( $Q_{RR} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Eingespeist wird wiederum auf die vier verschiedenen Arten (1-D, Mitte, links und rechts), wobei das Konzentrationsprofil knapp oberstrom und knapp unterstrom der Verzweigung von Interesse ist. Ist die Konzentration über den Querschnitt bereits gleichmäßig verteilt, wenn die Schadstoffwolke die Verzweigung passiert, wird sie in beiden Zweigen ebenfalls gleichmäßig durchmischt berechnet (s. Abb. 3-6a). Die Konzentration in beiden Zweigen ist identisch, kann allerdings geringfügig von der Konzentration oberstrom abweichen, falls sich der gesamte Durchfluss ändert. Weil bei Verzweigungen immer ein neuer Abschnitt beginnt (s. Kapitel 3.1), kann sich dort der Durchfluss im Modell schlagartig verändern. Bei steigendem Durchfluss sinkt also die Konzentration ab und umgekehrt.

Erfolgt die Einspeisung in Flussmitte, wird die maximale Konzentration in beiden Flusszweigen ebenfalls in Flussmitte berechnet (s. Abb. 3-6b). Die beiden Variablen  $y_0/B$  und  $\int(D_y t/B^2)dt$  ändern sich nicht.

Bei Einspeisung am linken Ufer wird die Lage der Einleitungsquelle  $y_0/B$  jeweils übernommen (s. Abb. 3-6d). Im linken Flusszweig soll allerdings die maximale Konzentration am linken Ufer konstant bleiben. Hierzu muss das Integral über den Dispersionskoeffizienten  $\int(D_y t/B^2)dt$  manipuliert werden. Die Konzentration im rechten Flusszweig ist im untersuchten Beispiel deshalb so gering, weil der Durchfluss des Rest-Rheins sehr klein ist.

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

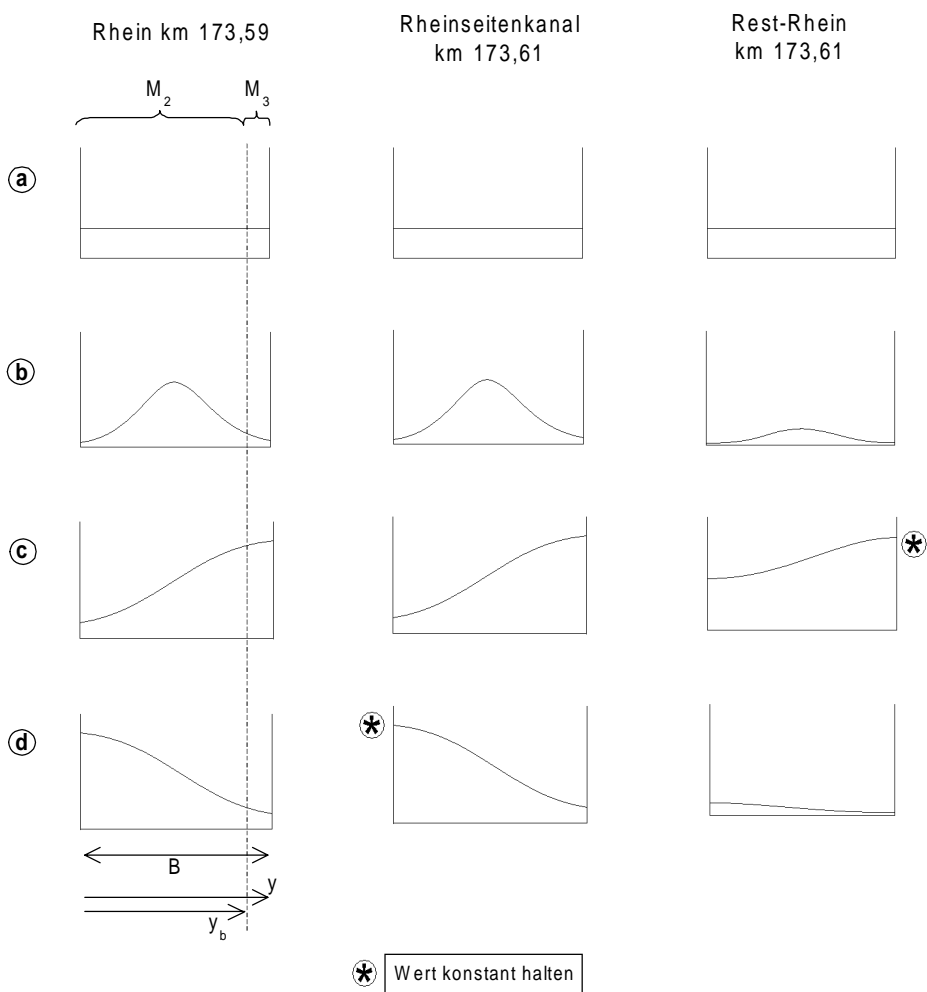
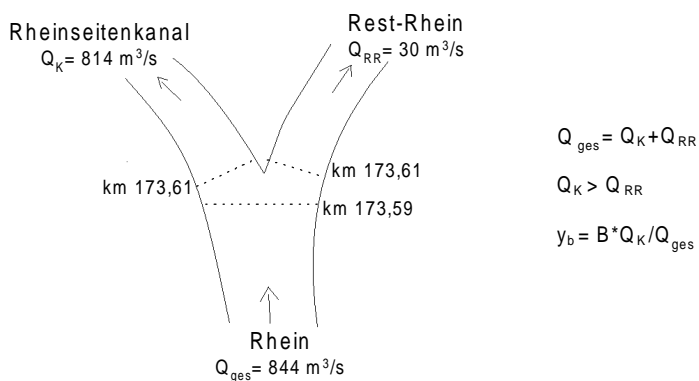


Abbildung 3-6 Bisherige Arbeitsweise der 2-D-Module bei Verzweigungen

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

Wird am rechten Ufer eingespeist, ist das Prinzip das gleiche wie bei Einspeisung am linken Ufer (s. Abb. 3-6c). Auf Grund der extremen Abflussverteilung ist die Konzentration am rechten Kanalufer noch sehr hoch.

#### 3.3.3 Bewertung und Veränderung der 2-D-Module

In diesem Abschnitt werden Vor- und Nachteile der bisherigen 2-D-Module aufgezeigt und die Veränderungen dieser Module präsentiert. Oberstes Prinzip bei der Entwicklung der neuen 2-D-Module ist es, die Massenverteilung auf Parallelstrecken so einfach und gut wie möglich zu simulieren. Alle späteren Berechnungen werden mit den neuen, hier erklärten Modulen durchgeführt.

Generell wird bei Zusammenflüssen und Verzweigungen ein Grenzwert eingeführt, ab dem die Verteilung über den Flussquerschnitt als komplett durchmischt behandelt wird. Dieser Wert wird auf

$$\frac{\varphi_{1-D}}{\varphi_{\max}} \geq 0,95 \quad (3-10)$$

festgelegt, mit

$\varphi_{1-D}$  über die Flussbreite gemittelte Konzentration

$\varphi_{\max}$  maximale Konzentration über der Flussbreite

Grund dafür ist, dass eine genauere Berechnung nicht mehr sinnvoll erscheint, wenn die Konzentration bereits fast gleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist.

#### Zusammenflüsse

Die untersuchte Situation und die neu entwickelten 2-D-Module sind schematisch in Abbildung 3-7 zu sehen. Ihr Prinzip wird im Folgenden erläutert.

Eindimensionale Einspeisung (s. Abb. 3-7d):

Nach einem Zusammenfluss verteilt sich die Konzentration in Wirklichkeit nicht sofort gleichmäßig über den Querschnitt, wie dies in der Berechnung mit den bisherigen 2-D-Modulen geschieht. Befindet sich kurz nach einem Zusammenfluss wieder eine Verzweigung, wird, durch die ungenaue Wiedergabe der lateralen Konzentrationsverteilung auf der Strecke zwischen Zusammenfluss und Verzweigung, die Massenverteilung bei der Verzweigung relativ schlecht wiedergegeben. Da im Modell nur eine Normalverteilung verwendet werden kann, wird zur Verbesserung der

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

Berechnung bei einem Zusammenfluss der durchschnittliche Konzentrationswert von oberstrom an der Uferseite des verschmutzten Flusszweiges konstant gehalten. Die Position der Einleitung wird somit im Beispiel an das linke Ufer gelegt und das Integral über den Dispersionswert  $\int(D\sqrt{B^2})dt$  herabgesetzt.

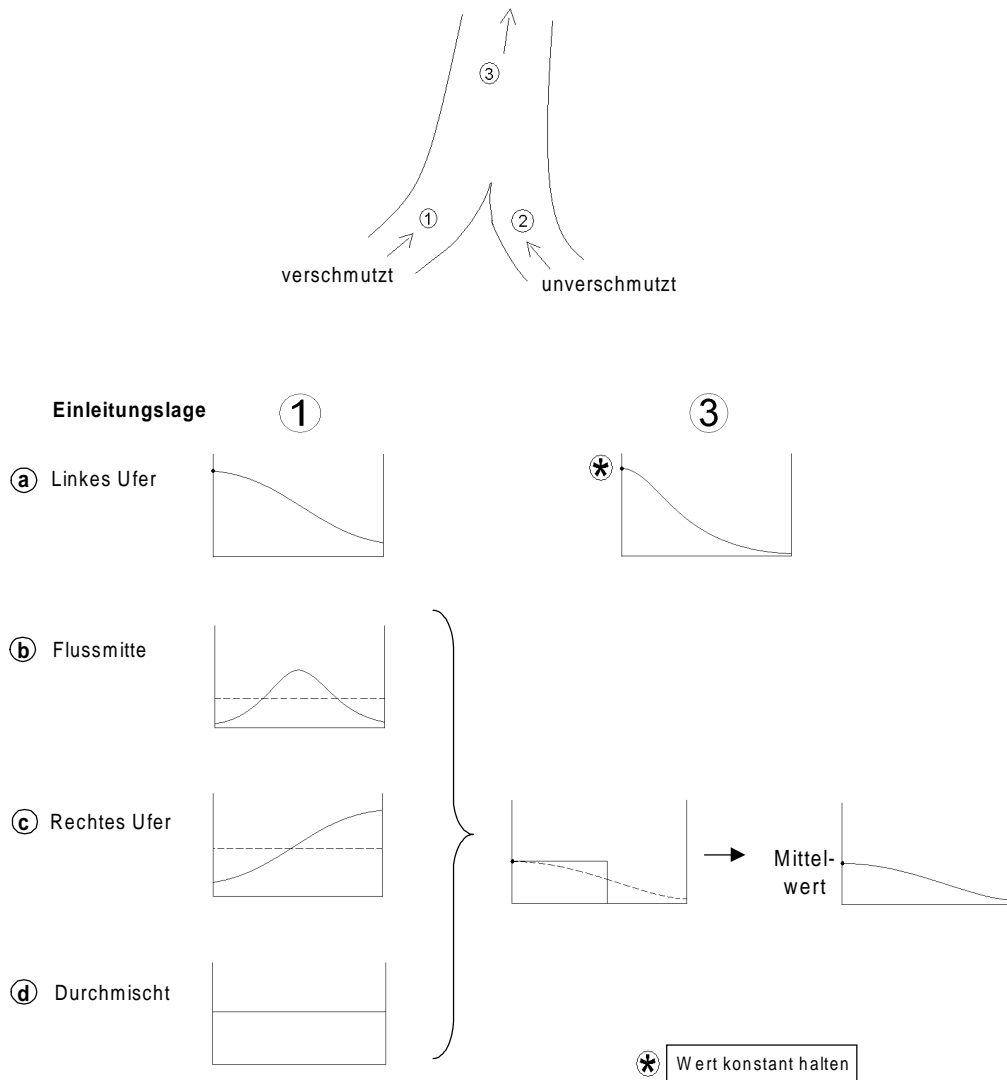


Abbildung 3-7 Neue Arbeitsweise der 2-D-Module bei Zusammenflüssen

Einspeisung in Flussmitte (s. Abb. 3-7b):

In Wirklichkeit wird sich die maximale Konzentration nach einem Zusammenfluss nicht wieder in der Flussmitte befinden. Ihre Lage hängt von den Durchflüssen der zwei Flusszweige ab. Eine genaue Wiedergabe der Verhältnisse erscheint in diesem Fall sehr komplex, da sie in Abhängigkeit des Abflussregimes erfolgen müsste. Des Weiteren wären bei späteren Verzweigungen und Zusammenflüssen nicht mehr nur die vier

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

Einleitungssituationen 1-D, Mitte, rechts und links möglich, sondern die maximale Konzentration könnte sich überall im Flussquerschnitt befinden. Von der praktischen Seite aus betrachtet erscheint eine solch aufwendige Berechnung nicht sinnvoll und würde zudem die Rechenzeit des Modells verlängern. Daher wird diese Situation auf einfache, sinnvolle Weise entsprechend der eindimensionalen Lösung verbessert, indem zunächst die durchschnittliche Konzentration im verschmutzten Flussarm bestimmt wird. Die Verteilung wird also als komplett durchmischt angenähert. Der durchschnittliche Wert wird dann nach dem Zusammenfluss als maximale Konzentration an die Uferseite übertragen, an der der verschmutzte Flusszweig einmündet. Die Lage der Einleitungsquelle  $y_0/B$  wird somit von der Flussmitte ( $= 0,5$ ) an eines der Ufer (0 oder 1) verschoben.

Einspeisung am Innenufer (s. Abb. 3-7c):

Im dargestellten Beispiel ist das Innenufer das rechte Ufer des verschmutzten Flusszweiges. Bisher wird die maximale Konzentration nach der Verzweigung an die Uferseite des unverschmutzten Flusses projiziert (im Beispiel das rechte Ufer). Bei dieser Berechnungsart wird daher die maximale Konzentration an einen Punkt übertragen, an dem die Konzentration in Wirklichkeit gleich Null ist. Eine Verbesserung der Module ist somit nötig, wobei es schwierig ist, diesen Fall sinnvoll und zugleich einfach zu simulieren. Die Lösung sieht die gleiche Handhabung wie bei eindimensionaler und zentraler Einspeisung vor. Zuerst wird wieder angenommen, dass die Konzentration im verschmutzten Flusszweig bereits konstant ist, und dann wird der Wert der durchschnittlichen Konzentration als Maximum an das im Beispiel linke Ufer nach dem Zusammenfluss gesetzt. Auf diese Weise wird die Massenverteilung über den Querschnitt relativ gut wiedergegeben. Haben die Abflüsse der beiden Flusszweige eine vergleichbare Größe oder ist der Abfluss des verschmutzten Zweiges verhältnismäßig klein, so arbeiten die Module zuverlässig. Nur wenn der Durchfluss des unverschmutzten Zweiges wesentlich kleiner ist, als der des verschmutzten, und die Einleitung erst kurz vor dem Zusammenfluss erfolgte (d.h. die Konzentrationsverteilung noch sehr steil ist), kann es zu vergleichsweise großen Ungenauigkeiten kommen. Trotzdem wird diese Art der Simulation gewählt, weil eine bessere Berechnung in dem oben erwähnten Ausnahmefall nur durch eine Unterteilung in mehrere verschiedene Fälle zu erreichen wäre, was dem Ziel, das Programm möglichst einfach zu gestalten, entgegenwirken würde. Eine genauere und somit aufwendigere Berechnung für einen selten auftretenden Fall einzuführen, ist daher nicht zu rechtfertigen. Gegen eine Berechnung der genauen Lage des Konzentrationsmaximums sprechen die bereits im vorigen Abschnitt (Einspeisung in Flussmitte) genannten Gründe.



### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

Einspeisung am Außenufer (s. Abb. 3-7a):

Das Außenufer entspricht im Beispiel dem linken Ufer des verschmutzten Flusses. In diesem Fall werden die 2-D-Module nicht verändert, da sie gute Ergebnisse liefern. Der Wert der maximalen Konzentration am Außenufer wird also konstant gehalten, wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert.

#### **Verzweigungen**

In diesem Abschnitt werden die Ideen der neu entwickelten 2-D-Module im Bereich von Verzweigungen erklärt. Ihre Funktionsweise ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

Eindimensionale Einspeisung (s. Abb. 3-8a):

In diesem Fall werden die bisherigen 2-D-Module übernommen, da sie richtig arbeiten.

Einspeisung in Flussmitte (s. Abb. 3-8b):

Je nach Abflussverteilung verschiebt sich die Lage des Konzentrationsmaximums innerhalb der beiden Flusszweige. Es liegt nicht, wie bisher berechnet, jeweils in Flussmitte. Eine genaue Wiedergabe würde einer komplizierten Vorgehensweise bedürfen, die aus Sicht der Praxis nicht gerechtfertigt ist. Als einfache Lösung wird daher die Konzentrationsverteilung in beiden Flusszweigen als konstant vorgegeben, wobei die Massenverteilung zuvor (wie in Kapitel 3.3.1 erläutert) korrekt berechnet wird. Auch bei darauffolgenden Zusammenflüssen und erneuten Verzweigungen gewährleistet dieses System eine gute Wiedergabe der Massenverteilung, wenn man es im Zusammenhang mit der Vorgehensweise bei Zusammenflüssen sieht. Dort wird die Konzentrationsverteilung in den meisten Fällen ebenfalls zunächst in den einzelnen Ästen als konstant angenähert. Eine genauere Wiedergabe bei vorhergehenden Verzweigungen würde deshalb keine sinnvolle Verbesserung bewirken.

Einspeisung am linken Ufer (s. Abb. 3-8d):

Liegt das Konzentrationsmaximum vor der Verzweigung am linken Ufer, so wird dieser Wert bisher im linken Flusszweig konstant gehalten. Das ist allerdings nicht sinnvoll, wenn sich die Lage der Einspeisungsquelle ursprünglich nicht am linken Ufer befand. Dieser Fall kann durch das Vorgehen im Bereich von Zusammenflüssen auftreten. Liegt nämlich oberstrom der Verzweigung ein Zusammenfluss, an dem die Einspeisung am Innenufer stattfand, so wird die Einleitungsposition von einem Ufer an das andere verlegt und es ist nicht sinnvoll, diesen Wert konstant halten zu wollen. Daher ist in den neuen Modulen eine Unterteilung in zwei Fälle vorgesehen:

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

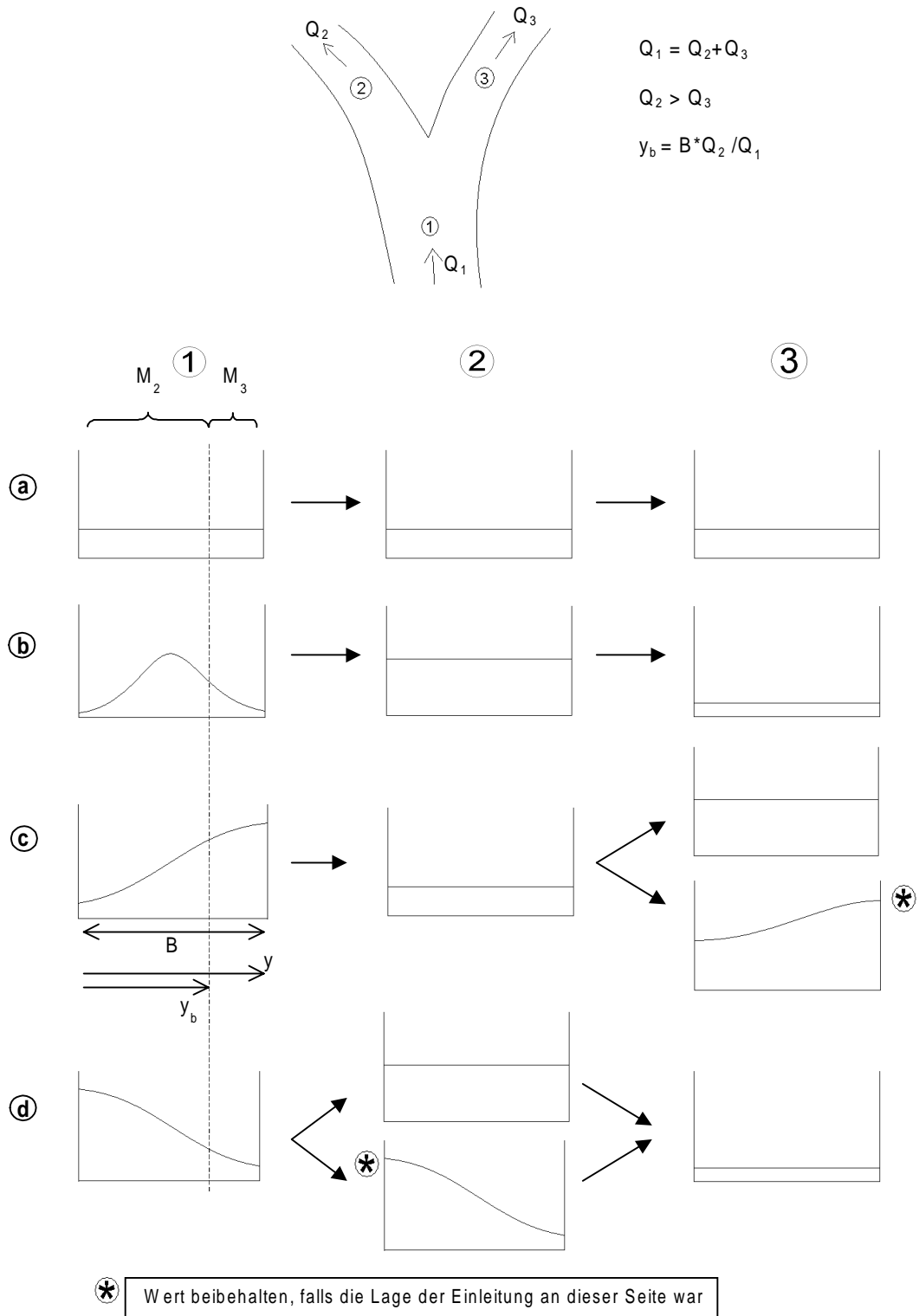


Abbildung 3-8 Arbeitsweise der neuen 2-D-Module bei Verzweigungen

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

Befand sich die Einleitungsquelle tatsächlich am linken Ufer, so wird der maximale Konzentrationswert nach der Verzweigung konstant gehalten. Im rechten Flusszweig wird die Konzentration als komplett durchmischt wiedergegeben, um dem oben erläuterten Prinzip (s.o., Einspeisung in Flussmitte) gerecht zu werden. Gesah die Einleitung nicht am linken Ufer, so wird in beiden Flusszweigen eine komplett durchmischte Situation simuliert. Die Massenverteilung wird nach wie vor zuerst richtig berechnet.

Einspeisung am rechten Ufer (s. Abb. 3-8c):

In diesem Fall wird analog zur Einspeisung am linken Ufer verfahren.

#### **Bemerkungen zu den neuen 2-D-Modulen**

Es wurde während dieser Arbeit eine Option entwickelt, mit der auch nach Aktivierung der 2-D-Module im Rheinalarmmodell eindimensional eingespeist werden kann. Handelt es sich um einen Fluss ohne Verzweigungen oder ohne Zusammenflüsse (höchstens eins von beidem darf vorhanden sein), liefert das Modell mit und ohne 2-D-Module die gleichen Ergebnisse. Sind allerdings Zusammenflüsse und Verzweigungen vorhanden, können sich geringfügige Unterschiede ergeben, denn die 2-D-Module stellen die Konzentrationsverteilung nach Zusammenflüssen nicht sofort als konstant dar, wodurch die Massenverteilung bei einer darauffolgenden Verzweigung anders und genauer als bisher berechnet wird.

Die 2-D-Module wurden im vorherigen Kapitel weiterentwickelt und verändert. Mit ihrem Einsatz sind gute Ergebnisse im Bereich von Zusammenflüssen und Verzweigungen zu erwarten. Allerdings erscheint ihre Verwendung nur an solchen Stellen sinnvoll, an denen die Abflussverteilung auf zwei Flusszweige nicht zu extrem ist (bis ca.  $Q_{min} > 10\% Q_{max}$ ). Ist der Durchfluss durch einen Zweig sehr gering, kann in diesem trotzdem die Konzentration hoch sein, sobald er sich aber (wieder) mit dem wesentlich größeren Durchfluss des anderen Zweiges vermischt, wird die Konzentration um ein Vielfaches vermindert und ist wahrscheinlich kaum noch festzustellen.

#### **3.4 Weitere Verbesserungen des Programms**

Bei Anwendung der bisherigen 2-D-Module ergeben sich teilweise andere Resultate, als nach dem zu Grunde gelegten Prinzip zu erwarten ist. In einigen Fällen soll, wie oben erwähnt, die maximale laterale Konzentration vor und nach Verzweigungen bzw. Zusammenflüssen konstant gehalten werden. Im Modell ergeben sich allerdings manchmal erhebliche Abweichungen. Die Gründe und Verbesserungen werden im Folgenden erläutert:

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

In der Windows-Version des Rheinalarmmodells findet sich für  $\gamma$  ein Eingangswert von  $\gamma = 0,16$ , obwohl er nach van MAZIJK (1996) für den Rhein bei ca.  $\gamma = 0,6$  liegt. Grund dafür ist wahrscheinlich, dass dieser Wert ungefähr vom Donaumodell übernommen wurde, da Somlyody (vgl. RUTHERFORD, 1994) für die Donau Werte von 0,13 bis 0,25 angibt. Im Donaumodell findet sich daher  $\gamma = 0,2$  als Standardwert, wobei er in einigen Abschnitten auf 0,15 abgeändert ist. Mit diesem kleinen Wert für  $\gamma$  wird der laterale Durchmischungsvorgang im Rhein viel zu langsam simuliert, so dass die 2-D-Module falsche Ergebnisse liefern. Der  $\gamma$ -Wert wird für die in dieser Arbeit präsentierten Berechnungen auf 0,6 erhöht. Einsetzen des zu niedrigen, falschen  $\gamma$ -Wertes von 0,16 in Gleichung (2-12) zeigt, dass die Mischlänge und somit der Einfluss der lateralen Dispersion von 50 bis 150 km (für  $\gamma = 0,6$ ) auf 150 bis 500 km wächst. Daraus wird die Wichtigkeit einer möglichst genauen Eingabe dieses Wertes ersichtlich. Die Erhöhung des  $\gamma$ -Wertes wird daher dringend vor einer Aktivierung der 2-D-Module empfohlen.

Wie in Kapitel 3.2.1 erwähnt, wird der Flussquerschnitt zur Berechnung der Konzentrationsverteilung in 40 gleich große Abschnitte zerlegt. Da sich die Flussbreite bei Verzweigungen und Zusammenflüssen ändert, nehmen auch diese Abschnitte eine andere Breite an. Ist nun eine Einspeisung z.B. 50 m stromaufwärts vor einer Verzweigung am linken Ufer erfolgt, wird sich an der Verzweigungsstelle eine sehr steile Konzentrationsverteilung über den Flussquerschnitt mit Maximum am linken Ufer ergeben. Als Beispiel sollen die Flussbreiten bei der Verzweigung des Rheinseitenkanals herangezogen werden. Die Breite des Rheins vor der Verzweigung beträgt 180 m. Somit ist ein Teilabschnitt  $180/40 = 4,5$  m breit. Im Falle des Rheinseitenkanals nach der Verzweigung des Rheins ergibt sich die Abschnittsbreite zu  $136/40 = 3,4$  m. Auf diesen unterschiedlichen Abschnittsbreiten wird jeweils die Konzentration gemittelt, wodurch sich die Abweichung der ermittelten Konzentrationsmaxima erklären lässt. Wird außerdem z.B. berechnet, dass 3,55% der Masse in den Rest-Rhein wandern, so muss die Intervallunterteilung gefunden werden, die am nächsten liegt. Je feiner die Unterteilung ist, desto besser wird daher auch die Massenverteilung umgesetzt. Die Anzahl der Abschnitte über den Flussquerschnitt wird deswegen auf 200 erhöht und damit eine höhere Genauigkeit erzielt.

Bei den Berechnungen ist teilweise ein Verlust an der ursprünglich eingespeisten Masse festzustellen. Dieser Effekt verstärkt sich mit der Anzahl der Verzweigungen auf der Strecke, die eine Erhöhung der Anzahl der möglichen Fließwege bewirkt. Der Grund dafür ist in der separaten Berechnung jedes einzelnen Fließweges zu finden (siehe Kap. 3.3). Im Rechenmodell wird ein unterer Grenzwert (prozentual zur gesamten eingespeisten Masse) vorgegeben, ab dem ein Fließweg vernachlässigt wird. Durch einen Großteil der Fließwege wandert jedoch tatsächlich nur ein ganz geringer Prozentsatz der eingespeisten Substanz, so dass deren Vernachlässigung in der Summe zu Fehlern führt. Diese Einstellung wird daher herausgenommen, wodurch nun jeder Fließweg im Modell Berücksichtigung findet. Jedoch ist im Modell noch eine Grenze hinsichtlich der Anzahl der Fließwege vorgesehen. Ab einer zu großen Anzahl bringt

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

das Programm die Fehlermeldung „too many paths“ (zu viele Fließwege). Diese Beschränkung sollte deswegen entfernt werden.

Die Werte für Abfluss und Wasserstand bei der Station Kehl-Kronenhof können aus den Daten von Rheinfeldern berechnet werden. Dies geschieht in der Version 2.1 des Rheinalarmmodells automatisch, wurde in der Windows-Version jedoch weggelassen. Um die Berechnungen dort ebenfalls richtig vornehmen zu können, müssen daher die Werte per Hand eingegeben werden, wozu dem Anwender die Abfluss-Wasserstandsbeziehung zu Rheinfeldern bekannt sein muss. Diese Beziehung ist in Anhang D in einer Tabelle dargestellt. Außerdem befindet sich die Eingabe für Kehl-Kronenhof in der Windows-Version am Ende der Eingabetabelle für die Hydrologie, wo sie leicht übersehen werden kann. Die automatische Berechnung sollte deshalb auch in die Windows-Version übernommen werden.

## 3.5 Hinweise zur Anwendung

In diesem Kapitel werden neue Eingabemöglichkeiten in zwei verschiedenen Files erklärt, die bei der Weiterentwicklung des Rechenmodells entstanden sind. Anschließend wird auf kleine Unstimmigkeiten in den Ergebnissen hingewiesen, die bei Anwendung des Programms auffallen.

### 3.5.1 .SPI-File

Für die Lage der Einleitung können verschiedene Positionen eingegeben werden. Dies geschieht im .SPI-File unter der Bezeichnung BankType. Folgende Eingaben sind möglich:

- L Left Bank (linkes Ufer)
- R Right Bank (rechtes Ufer)
- C Central (Flussmitte)

Neben diesen bisherigen Möglichkeiten wird die eindimensionale Einleitung ermöglicht mit der Bezeichnung

- M Mixed (eindimensional)

### 3.5.2 .LOC-File

Im .LOC-File wird angegeben, an welchen Stellen im Fluss die Konzentrationsverteilung in Abhängigkeit von der Zeit berechnet werden soll. Bisher war nur die Angabe des Stromkilometers gefordert und die Konzentration wurde als

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

Mittelwert über den Querschnitt berechnet. Erweitert wird dies nun um die Lage der Ausgabestelle bezüglich des Querschnitts. Die Eingabe der Position erfolgt dimensionslos, indem durch die Flussbreite geteilt wird, wobei die Werte 0 am linken Ufer und 1 am rechten Ufer liegen. Alle übrigen Punkte befinden sich somit zwischen 0 und 1. Soll die Berechnung eindimensional erfolgen, d.h. ist der Mittelwert gefragt, ist die Zahl  $-1$  einzugeben.

#### 3.5.3 Ungenauigkeiten durch zeitliche Verschiebung

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, verläuft die Konzentrationsverteilung einer Schadstoffwolke in Fließrichtung nicht normalverteilt, sondern es stellt sich eine Schiefe ein. Dies ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

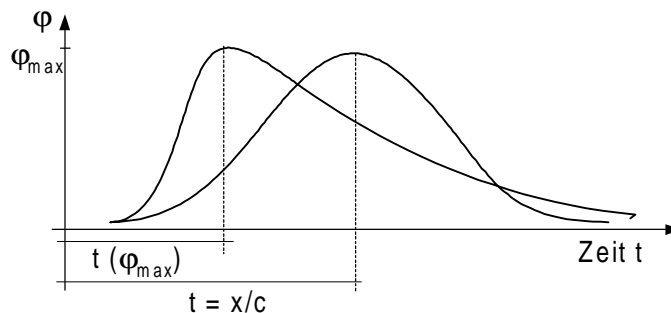


Abbildung 3-9 Zeitlicher Versatz der maximalen Konzentration durch Schiefe

Dadurch entsteht ein zeitlicher Versatz in der Ankunft der maximalen Konzentration. Bei einem normalverteilten Graph tritt der maximale Wert zum Zeitpunkt  $t = x/c$  auf, in Wirklichkeit etwas früher. Im Computermodell wird die Konzentrationsverteilung über den Flussquerschnitt zum Zeitpunkt des maximalen Konzentrationsdurchganges der Schadstoffwolke berechnet. Geschieht allerdings im Zuge einer Verzweigung oder eines Zusammenflusses eine Korrektur des Integrals über den Dispersionskoeffizienten (siehe Kapitel 3.3.2), wird diese Korrektur zum Zeitpunkt  $t = x/c$  vorgenommen. Es entsteht bei solchen Übergängen eine leichte Ungenauigkeit in der Wiedergabe des Dispersionskoeffizienten. Um auszuschließen, dass diese Ungenauigkeit auf anderen möglichen Fehlern im Programm beruht, wurde eine spezielle Programmversion entwickelt, in der die Konzentrationsverteilung über die Flussbreite zum Zeitpunkt  $t = x/c$  berechnet wird. Damit erfolgt die Korrektur des Dispersionskoeffizienten anhand des gleichen Wertes. Es zeigt sich, dass das Integral nun tatsächlich vor und nach einer Verzweigung bzw. eines Zusammenflusses exakt konstant bleibt, falls dies gefordert ist. Die alte Version wird trotzdem beibehalten, da die entstehenden Ungenauigkeiten gering sind und eine Wiedergabe der Konzentrationsverteilung über den Querschnitt zur

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

Zeit des maximalen Durchgangs der Schadstoffwolke aus Sicht des Anwenders plausibler erscheint.

## 3.6 Rechenzeit

In diesem Abschnitt werden Möglichkeiten zur Beschleunigung der Rechenzeit aufgezeigt, wobei auf damit verbundene Probleme eingegangen wird. Außerdem soll untersucht werden, inwieweit die Zweidimensionalität das Rechenprogramm verlangsamt. Dazu werden am Ende beispielhaft einige Rechenzeiten verglichen.

### 3.6.1 Möglichkeiten zur Beschleunigung der Rechenzeit

#### Einführung einer Berechnungsgrenze

Um die Schnelligkeit des Programms zu erhöhen, ist es möglich, im .OSP-File eine Grenze einzuführen, bis zu der die Berechnungen durchgeführt werden sollen. Diese Grenze muss an einer Stelle des Rheins liegen, an der es keine Parallelstrecken gibt. Das bedeutet z.B., dass unterhalb der Verzweigung von Waal und Pannerdensch Kanaal keine Grenze mehr eingeführt werden kann. Der Abstand zwischen dem letzten interessierenden Messpunkt und der vorgegebenen Grenze darf jedoch nicht zu klein werden. Grund dafür ist, dass die Berechnungen für die gesamte Schadstoffwolke mit dem Dispersionswert an der Stelle durchgeführt werden, an der sich der Schwerpunkt des Konzentrationsverlaufs in Hauptfließrichtung befindet (s. Gleichungen 3-2, 3-3 und 3-4). Wandert dieser Punkt nun über die Berechnungsgrenze hinaus weiter flussabwärts, bleiben die Integrale über den lateralen und longitudinalen Dispersionskoeffizienten konstant und nehmen nicht weiter zu. Somit breitet sich die Wolke nicht weiter aus, sondern wandert genau in der Verteilung stromabwärts, die sie beim Schwerpunktdurchgang an der Berechnungsgrenze hat. Diese Verhältnisse sind in Abbildung 3-10 dargestellt. Der blau gestrichelte Graph ergibt sich aus der Rechnung mit genau der gleichen Form wie beim Passieren des Schwerpunktes an der Berechnungsgrenze (blauer durchgezogener Graph). Die Wirklichkeit zeigt der rote Graph. Befindet sich noch ein Teil der Wolke in einem Bereich, in dem die Konzentrationsverteilung bestimmt werden soll (in Abb. 3-10 als Messstelle bezeichnet), ergeben sich hier falsche Ergebnisse (grüne Linie). Die Berechnungsgrenze muss deshalb dahin stromabwärts gelegt werden, wo sie die Ergebnisse nicht mehr beeinflussen kann. Für diesen Abstand lässt sich kein genereller Wert angeben, da er jeweils von der bereits erfolgten Ausbreitung der Schadstoffwolke abhängig ist. Allerdings kann z.B. davon ausgegangen werden, dass eine Grenze bei Lobith die Ergebnisse in der Aare oder im Bereich der Schlingenlösung nicht mehr beeinflusst. Als weiteres Beispiel kann hier noch der BASF-Störfall 1990 dienen (s. Kap. 4.1), bei dem

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

Auswertungen von Berechnungen bei Düsseldorf (Rhein km 744,2) Differenzen mit und ohne Berechnungsgrenze bei Lobith (Rhein km 862,2) zeigten.

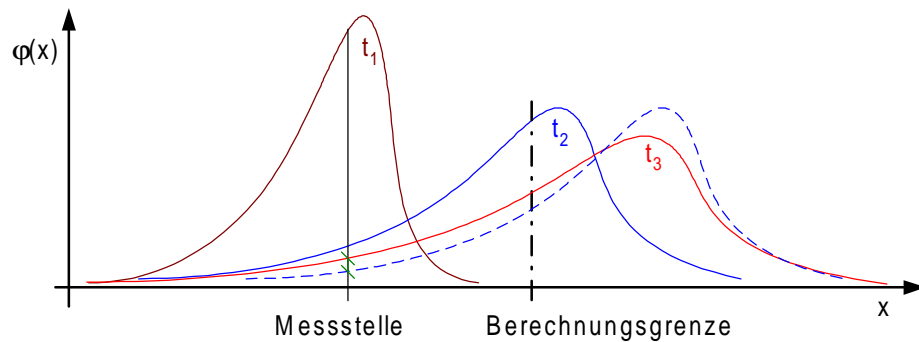


Abbildung 3-10 Beeinflussung der Ergebnisse infolge einer Berechnungsgrenze

Die Möglichkeit der Angabe einer Berechnungsgrenze ist bereits für die nächste Version des Donau-Alarmmodells vorgesehen. Hier kann man dann einen Bereich eingeben, in dem die Berechnungen durchgeführt werden sollen, wodurch die hydrologischen Daten auch nur für dieses ausgewählte Gebiet eingegeben werden müssen, was die Anwendung vereinfacht.

#### Genauigkeit der Kartenausgabe

In Rhein-Alarmmodell befindet sich eine Landkarte des Rheingebiets, auf der nach einer Berechnung die Wanderung einer Schadstoffwolke durch den Rhein visualisiert werden kann. Es besteht die Möglichkeit für jeden Punkt im Flusslauf die Ausgabe der Konzentrationsverteilung zu bekommen. Die Genauigkeit dieser Ausgabe hängt von einer Eingabe im .OSP-file ab. Dort ist unter „Type A“ der Zeitschritt einzugeben, mit dem die Berechnungen durchgeführt werden sollen. Je kleiner diese Zeiteinheit ist, desto genauer sind die Ergebnisse und desto länger dauert die Berechnung. Ist man nur an der Ausgabe für bestimmte Stationen interessiert, so können diese im .LOC-File eingegeben werden, woraufhin die Konzentrationen dort unbeeinflusst von der oben erwähnten Angabe berechnet werden. In diesem Fall kann die Zeiteinheit daher groß gewählt werden, was die Berechnungen beschleunigt.

#### 3.6.2 Vergleich von Rechenzeiten

In Tabelle 3-1 sind die Rechenzeiten für unterschiedliche Situationen zu sehen. Zunächst sollen die verschiedenen Spalten erläutert werden:

Modell                    „alt“: Bisheriges Rhein-Alarmmodell  
                              „neu“: Unter Verwendung der 2-D-Module



### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

Einsp.-art	Einspeisungsart	„1-D“:	Durchmischt
		„2-D“:	Ufereinspeisung
Einsp.-km	Einspeisungskilometer, d.h. Lage der Einspeisung (longitudinal)		
Messung	„1-D“:	Messung des Mittelwertes über den Querschnitt	
	„2-D“:	Messung an best. Punkt im Querschnitt	
Anzahl der Stationen	Anzahle der im .LOC-File eingetragenen Stationen		
Zeitschritt im .OSP-File	Unter Type A eingegebener Zeitschritt (s. Kap. 3.6.1)		
Rechengrenze	Lage einer möglichen Berechnungsgrenze (s. Kap. 3.6.1)		
Rechenzeit	Zeit, die das Modell zur Berechnung braucht		

**Tabelle 3-1 Rechenzeiten**

	Modell	Einsp.-art	Einsp.-km	Messung	Anzahl der Stationen	Zeitschritt im .OSP-File [h]	Rechengrenze	Rechenzeit
A	alt	1-D	245	1-D	8	1,0	keine	1min 5s
B	alt	1-D	245	1-D	17	1,0	keine	1min 10s
C	alt	1-D	245	1-D	17	24,0	keine	0min 23s
D	neu	1-D	245	1-D	17	1,0	keine	1min 35s
E	neu	1-D	245	2-D	17	1,0	keine	8min 5s
F	neu	1-D	245	2-D	17	24,0	keine	1min 35s
G	neu	1-D	245	2-D	17	1,0	km 862	0min 5s
H	alt	1-D	59	1-D	28	1,0	km 862	0min 13s
I	neu	1-D	59	1-D	28	1,0	km 862	0min 15s
J	neu	1-D	59	2-D	28	1,0	km 862	3min 50s
K	neu	2-D	59	2-D	28	1,0	km 862	3min 50s
L	neu	1-D	59	1-D 2-D	25 3	1,0	km 862	0min 30s

Es ist zu sehen, dass die Rechenzeiten des Modells relativ kurz sind. Sie bewegen sich bei den angegebenen Beispielen in einem Bereich von 5 Sekunden (G) bis ungefähr 8 Minuten (E). Wird die Berechnung mit den neuen 2-D-Modulen eindimensional durchgeführt, verlängert sich die benötigte Zeit kaum (vgl. B/D, H/I). Findet allerdings

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

eine zweidimensionale Berechnung statt, steigt die Rechenzeit deutlich an, wobei es keinen Unterschied macht, ob nur die Lage der Messstellen oder zusätzlich die Einleitungsposition zweidimensional berechnet werden soll (I-K). In der eindimensionalen Berechnung hat die Anzahl der Stationen kaum Einfluss auf die Rechenzeit (A/B). Hingegen ist die Anzahl der Stationen, an denen die Berechnung zweidimensional erfolgt, entscheidend (vgl. I, J, L). Eine Vergrößerung des Zeitschritts im .OSP-File bringt sowohl bei ein- als auch bei zweidimensionaler Berechnung eine Beschleunigung des Vorgangs, wobei der Einfluss bei zweidimensionaler Rechnung größer ist (B/C, E/F). Durch Einführung einer Berechnungsgrenze lässt sich die Simulation ebenfalls erheblich beschleunigen (E/G).

Bei Einspeisung bei km 59 ist es nicht möglich, eine Berechnung bis zum Ende (d.h. inklusive der niederländischen Rheinzweige) durchzuführen. Es erscheint die Fehlermeldung „too many paths“, was bedeutet, dass die Anzahl der Fließwege zu groß ist. Deshalb wurde eine Rechengrenze bei Lobith (Rhein km 862) eingefügt. Eine Berechnung ohne Berechnungsgrenze ist erst ungefähr bei Einspeisung bei km 245 möglich. Grund für dieses Problem ist, dass in der neuen Version sämtliche Fließwege berücksichtigt werden, es allerdings ein Limit für die Anzahl der Fließwege gibt, welches entfernt werden sollte (s. Kap. 3.4).

### 3 Umsetzung der Transportvorgänge im Rechenmodell

---

# 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

Nach der Untersuchung und Verbesserung der 2-D-Module sollen diese nun mit Hilfe von Testdurchläufen, Daten von Tracerversuchen und Störfällen überprüft und analysiert werden. Ferner wird abgeschätzt, in welchem Maße ein Einbau von Parallelstrecken zur Aare die Ergebnisse des Rheinalarmmodells verbessert. In Anhang A ist eine schematische Darstellung des Rheins und aller seiner Nebenflüsse, die im Rheinalarmmodell integriert sind, einschließlich Kilometrierungen zu sehen.

## 4.1 Unverzweigte Fließstrecke: BASF-Störfall 1990

Zunächst wird ein erster Test der 2-D-Module auf gerader Fließstrecke ohne Verzweigungen durchgeführt. Allerdings wird das Ergebnis von einem Zufluss beeinträchtigt:

Am 10.09.1990 fand um 4:00 Uhr bei BASF in Ludwigshafen (Rhein km 433) ein Störfall statt, bei dem 3000 kg Nitrobenzol innerhalb von 32 Stunden am linken Ufer in den Rhein gelangten. Es existieren Daten von Mischproben in Mainz (Rhein km 498) mit Entnahmen am linken Ufer und in Bad Honnef (Rhein km 640) am rechten Ufer. In Abbildung 4-1 ist eine Prinzipskizze des Vorfalls dargestellt.

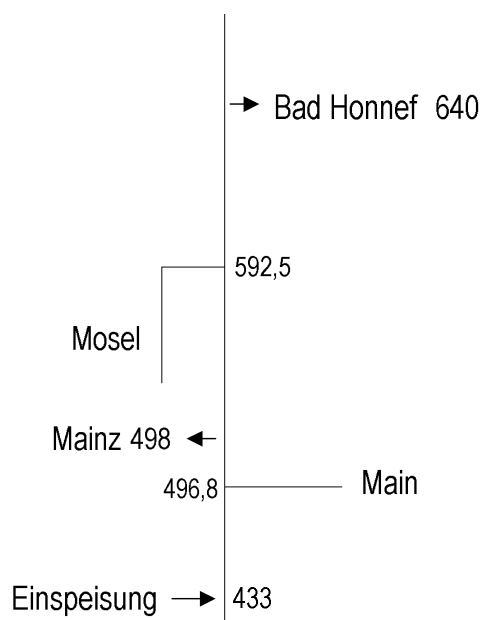


Abbildung 4-1

Schematische Darstellung des BASF-Störfalls

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

Der Störfall wird nun jeweils mit der bisherigen Windows-Version und unter Einsatz der 2-D-Module simuliert. Bei Verwendung der 2-D-Module wird sowohl die Lage der Einspeisung als auch die Lage der Messstelle bezüglich des Flussquerschnitts besser wiedergegeben. Dazu war die Entwicklung einer neuen Ausgabemöglichkeit im Modell nötig, mit der der Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit an jedem beliebigen Punkt im Fluss (d.h. für jeden beliebigen y-Wert) dargestellt werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-2 und 4-3 zu sehen.

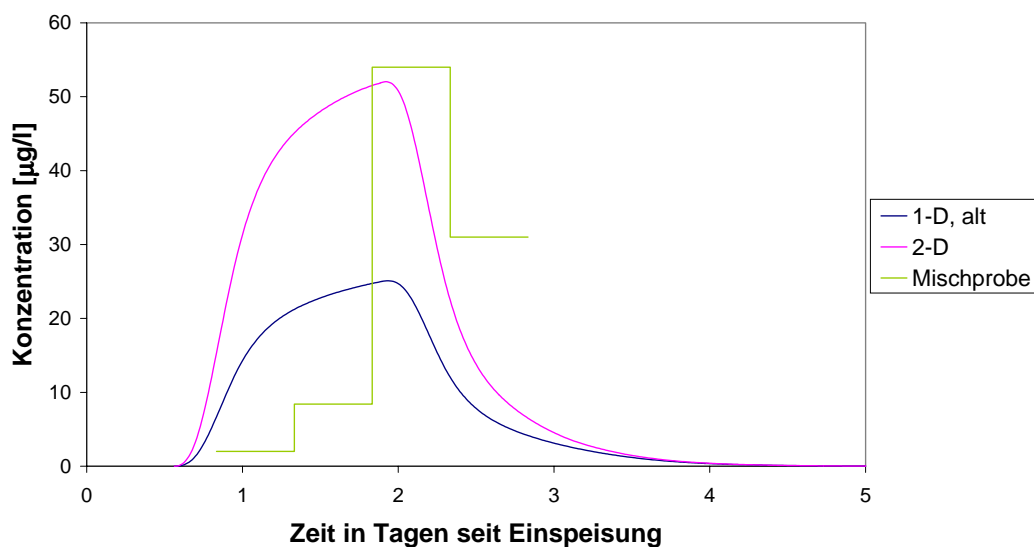


Abbildung 4-2 Konzentrationsverläufe bei Mainz (Rhein km 498)

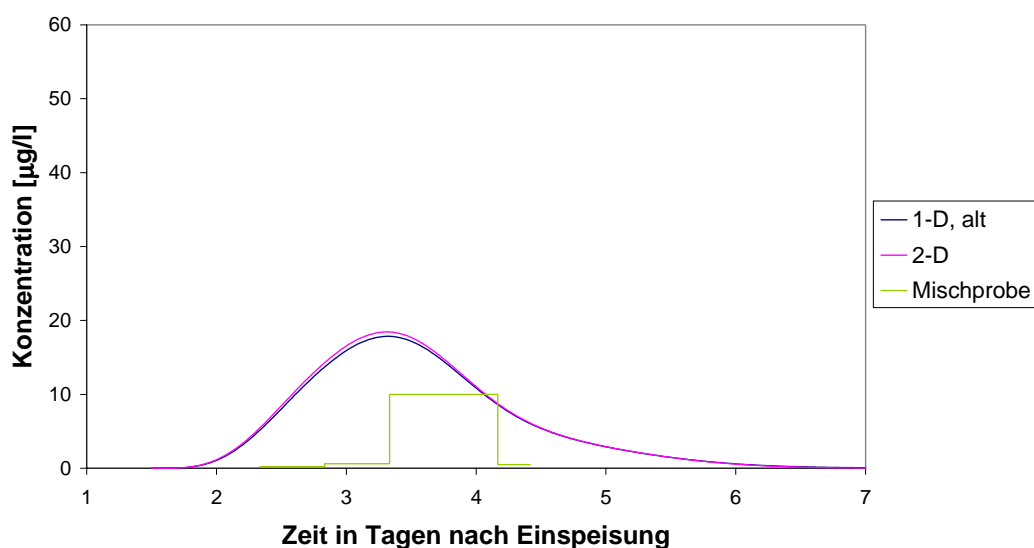


Abbildung 4-3 Konzentrationsverläufe bei Bad Honnef (Rhein km 640)

## 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---

In Mainz ergibt sich unter Verwendung der Zweidimensionalität eine bessere Berechnung der Konzentrationshöhe. An der Stelle der Mainmündung wird im Modell nach Abbildung 3-7a die maximale Konzentration am linken Ufer durch die 2-D-Module konstant gehalten. Es zeigt sich, dass dieses Vorgehen der Module gute Ergebnisse hinsichtlich des Konzentrationsverlaufs über die Flussbreite liefert. Die Transportzeit bleibt unverändert, da das Geschwindigkeitsprofil im Computermodell über den Querschnitt konstant ist, und nicht, wie in der Natur, zu den Ufern hin abnimmt.

In Bad Honnef ist der Unterschied zwischen eindimensionaler und zweidimensionaler Berechnung kaum noch erkennbar, weil sich die Substanz hier bereits fast gleichmäßig über den Querschnitt verteilt hat. Dort bringen die 2-D-Module daher keine Verbesserungen mehr. Der Vergleich mit Messdaten noch weiter stromabwärts kann entfallen (es existieren Daten bei Düsseldorf, Rhein km 744,2), da sich zum einen die Substanz bereits bei Bad Honnef fast völlig durchmischt hat und zum anderen keine seitlichen Einmündungen von Nebenflüssen folgen.

Auf gerader Strecke bringt der Einsatz der 2-D-Module also so lange Verbesserungen, bis sich die Konzentration gleichmäßig über den Querschnitt verteilt hat. Zur Berechnung dieser Mischlänge (im Rhein liegt sie zwischen 50 und 150 km, was obige Ergebnisse bestätigt) wird auf Kapitel 2.2 verwiesen.

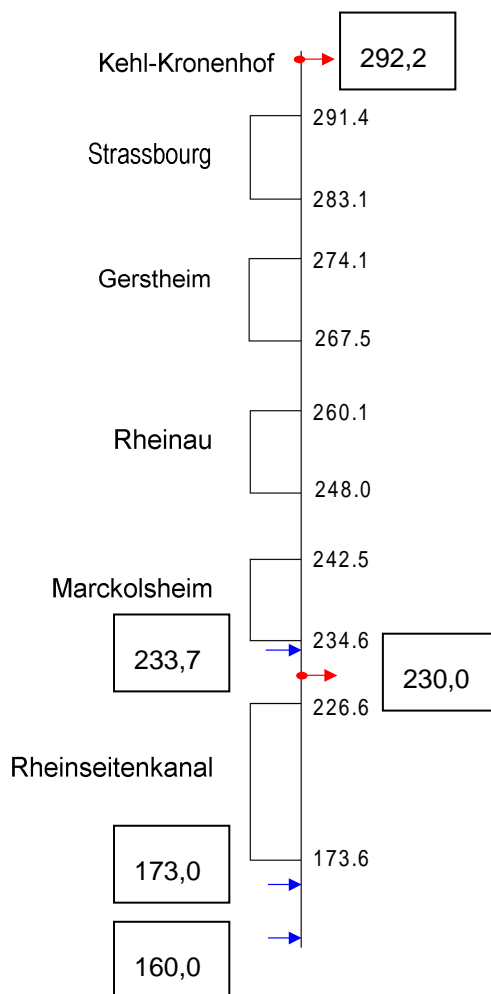
### 4.2 Testdurchlauf im Bereich von Parallelstrecken

Es ist zu erwarten, dass der Einsatz der 2-D-Module vor allem im Bereich von Parallelstrecken zu Verbesserungen führt, da hier die Fließzeit davon abhängt, welchen Weg der größte Teil der Substanz nimmt. In den Kraftwerkskanälen zwischen Basel und Kehl ist die Fließgeschwindigkeit meistens erheblich höher als im Rest-Rhein. Deshalb werden mehrere Simulationen in diesem Bereich durchgeführt, wo sich der Rheinseitenkanal gefolgt von vielen kürzeren Parallelstrecken (Schlingenlösung) befindet. Bei den Tests werden die Lage der Einleitung sowohl über den Querschnitt als auch in Hauptfließrichtung und der Durchfluss variiert. Eingespeist wird jeweils eine Menge von 1000 kg. Die über den Querschnitt gemittelte Konzentration wird berechnet und in Abhängigkeit von der Zeit, die seit der Einspeisung vergangen ist, in Graphiken dargestellt. Abbildung 4-4 zeigt den schematischen Verlauf des Rheins in dem untersuchten Bereich.

Die Kraftwerke werden gemäß eines Abkommens zwischen Frankreich und Deutschland nach folgender Richtlinie betrieben: Im Rest-Rhein muss sich immer ein Mindestabfluss von  $Q_{RR} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$  befinden. Der Rest des Abflusses geht bis zu einer Menge von  $1400 \text{ m}^3/\text{s}$  durch die Kraftwerkskanäle. Bei höheren Abflüssen wird alles weitere Wasser dem Rest-Rhein zugeleitet. Diese Werte sind in allen Kraftwerkskanälen gleich.

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---



**Abbildung 4-4** Schematische Darstellung des Rheins zwischen Basel und Kehl; die Einleituings sind bei Rhein km 160, 173 und 233,7, die Messstellen sind bei Rhein km 230 und 292,2

Zunächst werden die Auswirkungen bei einem Abfluss bei Rheinfeldern von  $Q_R = 1722 \text{ m}^3/\text{s}$  gezeigt (siehe Abbildungen 4-5 bis 4-7). Eingespeist wird im neuen (mit 2-D-Modulen) und alten (ohne 2-D-Module) Modell eindimensional sowie im neuen Modell an den beiden Ufern und in Flussmitte. Die Einspeisungen werden bei Rhein km 160,0, 173,0 und 233,7 vorgenommen, die Ausgabe erfolgt immer bei Kehl-Kronenhof, Rhein km 292,2. Für den Fall einer Einleituings bei km 160,0, d.h. 13,6 km vor der Abzweigung des Rheinseitenkanals, zeigen die Graphen noch keine großen Abweichungen voneinander. Der erste Peak gibt den Anteil der Substanz wieder, der durch den Rheinseitenkanal wandert, die restlichen Maxima sind nicht mehr eindeutig voneinander zu unterscheiden, da sie sich gegenseitig überlagern.

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

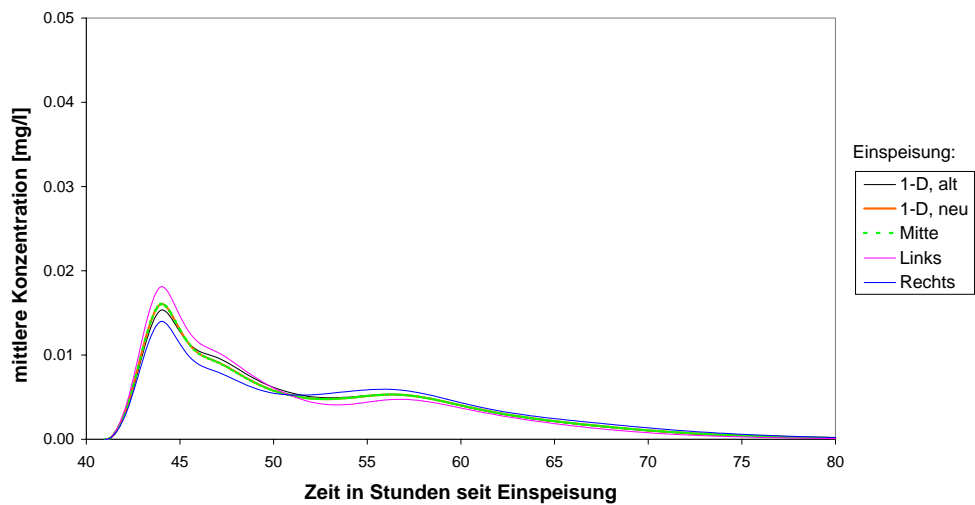


Abbildung 4-5                      Einspeisung km 160, Messung km 292,2; Q (Rheinfelden) = 1722 m<sup>3</sup>/s

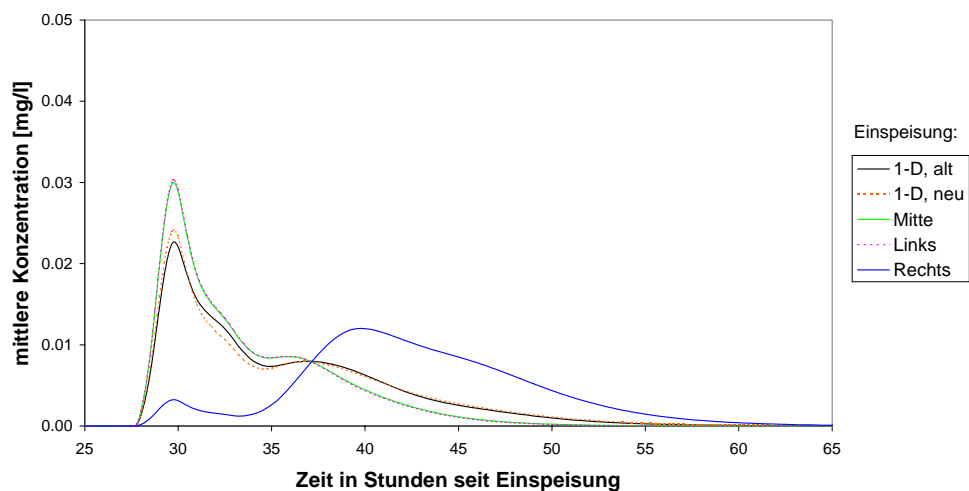


Abbildung 4-6                      Einspeisung km 173, Messung km 292,2; Q (Rheinfelden) = 1722 m<sup>3</sup>/s

Geschieht die Einspeisung bei km 173,0, d.h. 600 m vor dem Rheinseitenkanal, so sind deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Einleitungspositionen zu erkennen. Die Ergebnisse bei eindimensionaler Einspeisung in dem alten und neuen Modell unterscheiden sich kaum. Erfolgt die Einspeisung am linken Ufer, so geht ein noch größerer Teil durch den Rheinseitenkanal, so dass der erste Peak höher wird. Bei Einspeisung am rechten Ufer hingegen wandert der überwiegende Teil durch den Rest-Rhein. Es kann daher ein deutlicher Unterschied in der Ankunftszeit der maximalen Konzentration je nach Lage der Einspeisung entstehen.



#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

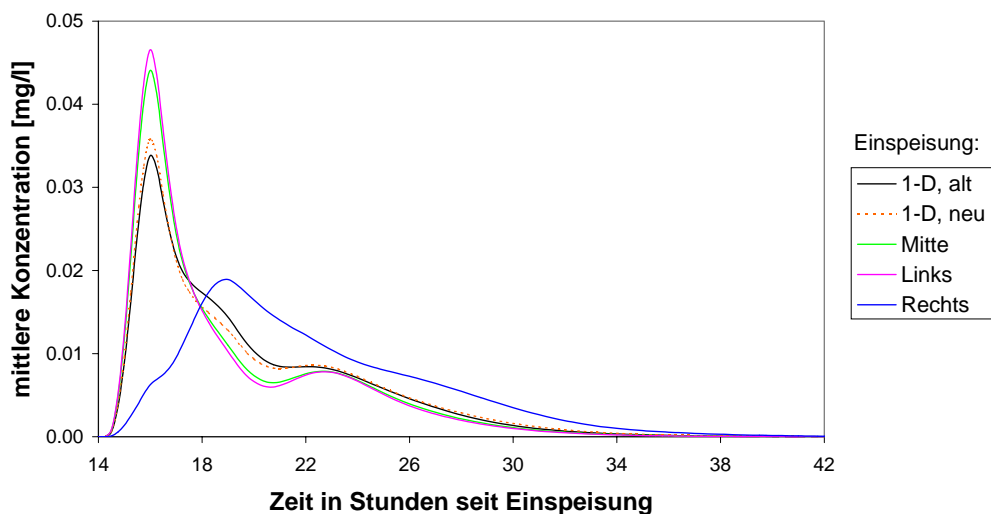


Abbildung 4-7      Einspeisung km 233,7, Messung km 292,2; Q (Rheinfelden) = 1722 m<sup>3</sup>/s

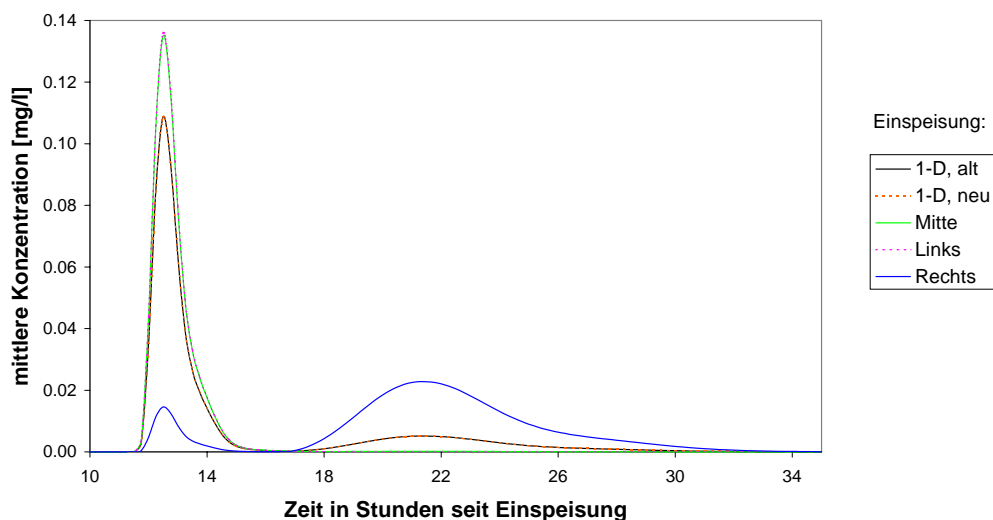


Abbildung 4-8      Einspeisung km 173, Messung km 230, Q (Rheinfelden) = 1722 m<sup>3</sup>/s

Erfolgt die Einspeisung bei km 233,7, d.h. 600 m vor dem Kanal bei Marckolsheim, sind ähnliche Auswirkungen erkennbar. Allerdings ist die Fließzeitendifferenz geringer. Die Abweichung zwischen den maximalen Konzentrationen je nach Einspeisungslage beträgt hier ca. 3 Stunden, während sie bei Einspeisung vor dem Rheinseitenkanal bei ca. 10 Stunden liegt. Dies ist auf die wesentlich größere Länge des Rheinseitenkanals gegenüber dem Marckolsheimer Kanal zurückzuführen.

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---

Wird bei Einspeisung an km 173,0 bereits bei km 230,0 gemessen, also kurz nach dem Zusammenfluss von Rheinseitenkanal und Rest-Rhein, so ergibt sich eine Abweichung der Peaks je nach Einspeisungsart von ca. 9 Stunden (siehe Abbildung 4-8). Der Unterschied zur Messung bei Kehl-Kronenhof (dort 10 Stunden Differenz) ist auf eine Überlagerung aller Transportwege bis Kehl zurückzuführen. Bei km 230,0 sind wirklich nur die 2 Peaks zu sehen, die durch die Substanzen entstehen, die entweder durch den Rheinseitenkanal oder den Rest-Rhein wandern. Bei Kehl hingegen ist ein Großteil der Substanz entweder durch den Rheinseitenkanal und danach durch alle weiteren Kanalstrecken gewandert (schnellst möglicher Weg, erster Peak) oder zuerst durch den Rest-Rhein und danach durch alle Kanäle. Dieser zweite Peak wird jedoch durch die weiteren Maxima überlagert, die zuerst durch den Rest-Rhein, dann nochmals durch den Rest-Rhein und erst danach durch die Kanäle gewandert sind usw.. Daher wird die Lage des zweiten Peaks bei Kehl-Kronenhof nicht nur durch die Substanz beeinflusst, die nach dem ersten Rest-Rheinabschnitt durch alle Kanäle fließt. Es ergibt sich bei Einspeisung rechts auch ein längerer Nachlauf, da sich die Substanz nach dem ersten Zusammenfluss auf der rechten Seite des Rheins befindet und daher bei der nächsten Verzweigung wieder ein vergleichsweise großer Teil in den Rest-Rhein gelangt.

Als nächstes folgt ein Vergleich derselben Situation bei verschiedenen Durchflüssen. Die Einspeisung geschieht bei km 173,0, die Messung bei Kehl-Kronenhof (km 292,2).

Außer dem bereits gezeigten Durchfluss bei Rheinfeldern ( $Q = 1722 \text{ m}^3/\text{s}$ ), wird die Situation bei den Abflüssen  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$  untersucht. Die Fließzeitdifferenz bei  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$  ist am größten, da dort der Abfluss im Rheinseitenkanal maximal und der im Rest-Rhein minimal wird. Wie in Abbildung 4-9 zu sehen ist, verschwindet allerdings der zweite Peak sogar bei Einspeisung am rechten Ufer komplett. Die Ursache liegt am geringen Abfluss im Rest-Rhein, wodurch der überwiegende Massenanteil in den Rheinseitenkanal gelangt. Die Konzentration im Rest-Rhein selbst ist sehr hoch, aber sobald sich dieser wieder mit dem Rheinseitenkanal vermischt, ist sie wegen der extremen Abflussunterschiede kaum noch zu sehen. Dies bestätigt die Überlegungen in Kapitel 3.3.3, wonach sich der Einsatz der 2-D-Module nur lohnt, wenn die Abflussverteilung auf zwei Flusszweige nicht zu unterschiedlich ist. Bei einem Abfluss von  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  bei Rheinfeldern gewinnt der Rest-Rhein im Verhältnis zum Rheinseitenkanal wieder etwas mehr an Bedeutung (siehe Abbildung 4-10). Allerdings wird dabei die Fließgeschwindigkeit im Rest-Rhein sogar größer als im Kanal. Die maximale Konzentration wird auch bei Einspeisung rechts durch den Teil der Substanz erzeugt, die durch den Kanal wandert.

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

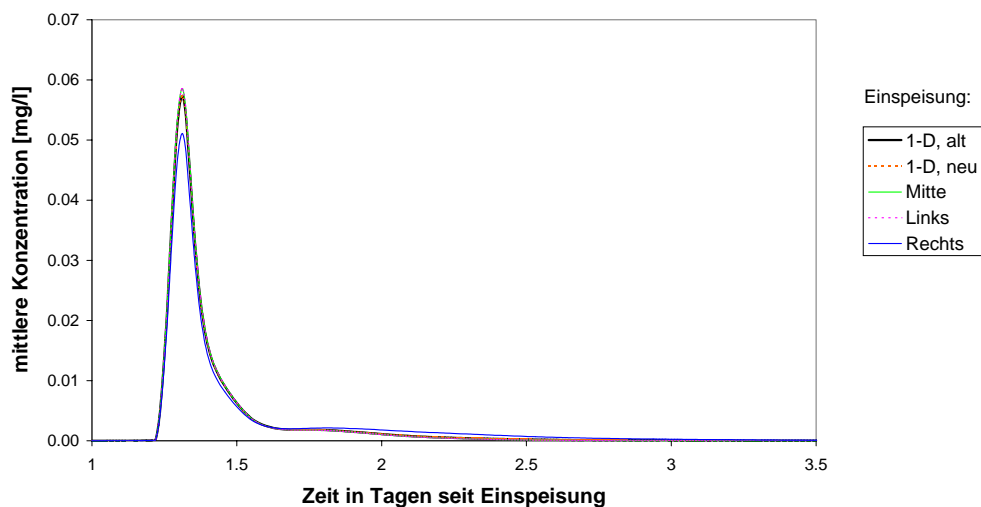


Abbildung 4-9 Einspeisung km 173, Messung km 292,2; Q (Rheinfelden) = 1400 m<sup>3</sup>/s

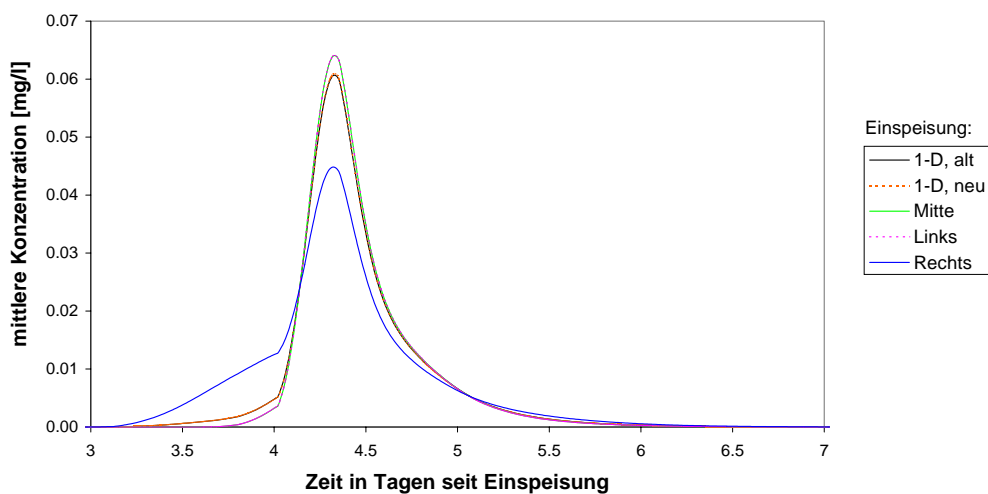


Abbildung 4-10 Einspeisung km 173, Messung km 292,2; Q (Rheinfelden) = 400 m<sup>3</sup>/s

Zusammengefasst ergibt die Untersuchung im Bereich von vielen Parallelstrecken zum einen, dass die 2-D-Module wichtiger werden, je näher sich die Einleitungsquelle vor einer Verzweigung befindet. Zum anderen ist eine starke Abhängigkeit von den Abflussverhältnissen festzustellen. Je weniger sich die Abflüsse in zwei Verzweigungsarmen unterscheiden, desto größer ist die Verbesserung durch den Einsatz der 2-D-Module. Hingegen wird der Transportzeitunterschied zwischen Einspeisung links und rechts größer, je unterschiedlicher die Abflüsse sind. Außerdem

wächst der Einfluss der 2-D-Module mit der Länge der Parallelstrecken, da hierdurch die Unterschiede in der Transportzeit ansteigen.

### 4.3 Massenverteilung auf die niederländischen Rheinarme

In den Niederlanden verzweigt sich der Rhein in mehrere Flussarme, die an unterschiedlichen Stellen ins Meer münden (s. Abb. 4-11 ). In diesem Kapitel wird gezeigt, inwieweit die Lage der Einspeisungsquelle Einfluss auf die Verteilung der Substanz auf die einzelnen Rheinarme hat.

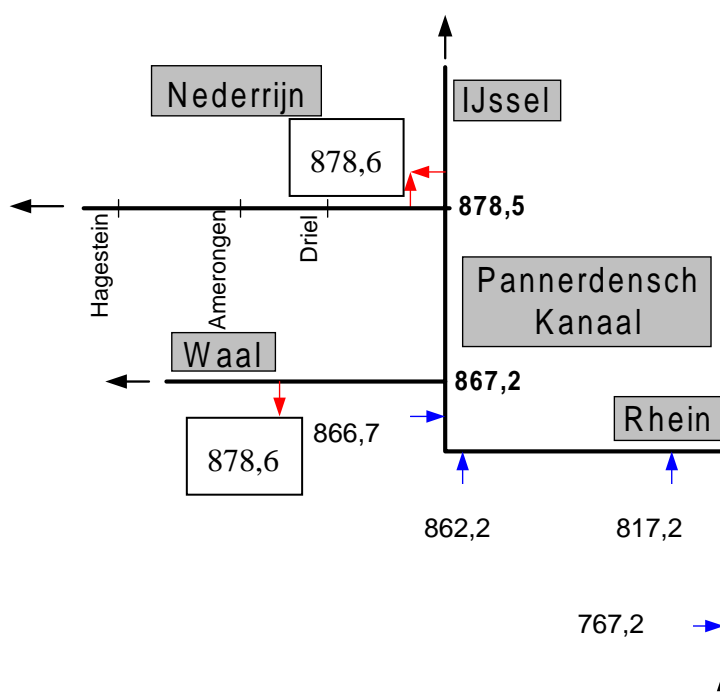


Abbildung 4-11 Schematische Darstellung der niederländischen Rheinarme; die Einleitungen sind bei Rhein km 767,2, 817,2, 862,2 und 866,7, die Messstellen sind bei Rhein km 878,6 (Waal), Rhein km 878,6 (IJssel) und Rhein km 878,6 (Nederriijn)

Der Rhein teilt sich kurz nach der niederländisch-deutschen Grenze bei Rhein km 867,2 in Waal und Pannerdensch Kanaal. Wenige Kilometer später verzweigt sich der Pannerdensch Kanaal bei Stromkilometer 878,5 noch einmal in Nederriijn und IJssel, wobei der Nederriijn später in den Lek übergeht. Der Durchfluss in den Zweigen wird in Abhängigkeit vom Abfluss bei Lobith an der niederländisch-deutschen Grenze reguliert. Die Steuerung des Abflusses geschieht durch drei Wehre im Nederriijn bei Driel, Amerongen und Hagestein. Zweck dieses Kontrollsystems ist es, einen Mindestabfluss in der IJssel zu gewährleisten, während der Abfluss im Nederriijn auf ungefähr  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  gehalten wird. Der Mindestabfluss ist zum einen für die Schifffahrt nötig, zum anderen

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

soll damit eine Versalzung des IJsselmeeres verhindert werden. Zur Regelung der Wehre ist von Rijkswaterstaat das Stauprogramm S285 festgelegt. Es besagt, dass die Wehre im Nederrijn so lange geschlossen bleiben, bis in der IJssel ein Abfluss von  $285 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht ist. Danach werden die Wehre langsam geöffnet bis sich das Wasser frei auf IJssel und Nederrijn verteilen kann. Dieses Stauprogramm ist im Rheinalarmmodell integriert. Es werden nur die Abflüsse bei Lobith und den Wehren verlangt und eine Angabe, ob das Stauprogramm angewendet wird oder es sich um einen offenen Fluss handelt. Die restlichen Abflussdaten berechnen sich automatisch. Ab einem Abfluss von ca.  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  bei Lobith kann die Option „offener Fluss“ gewählt werden, so dass die Abflüsse nicht mehr künstlich reguliert werden.

Um die Auswirkungen der 2-D-Module zu untersuchen, werden verschiedene Simulationen durchgeführt. Die Variablen sind hierbei die Lage der Einspeisung bezüglich der Flussbreite (1-D, Flussmitte, linkes und rechtes Ufer) und des Abstandes stromaufwärts von der ersten Verzweigung zwischen Waal und Pannerdensch Kanaal (500 m, 5 km, 20 km, 50 km und 100 km). Außerdem wird der Abfluss bei Lobith variiert ( $882$ ,  $1698$  und  $2525 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Die Abflussverteilungen auf die Flusszweige stammen aus Angaben von LORENZ (1997) und van MAZIJK et al. (1992). Die Ergebnisse der Berechnungen werden für die Waal (km 878,6), den Nederrijn (km 878,6) und die IJssel (km 878,6) dargestellt. Es werden die Massenverteilungen auf die Zweige und die maximalen Konzentrationen untersucht.

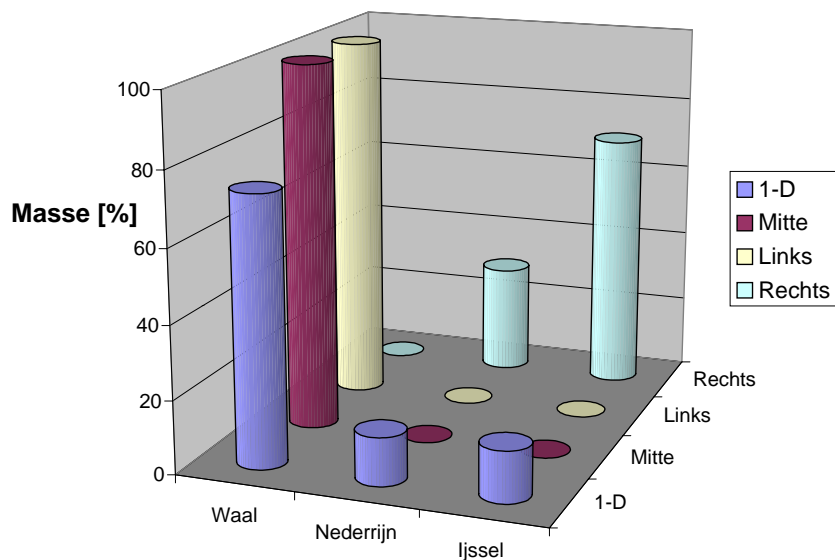


Abbildung 4-12 Massenverteilung; Einspeisung km 866,7, Q (Lobith) =  $1698 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

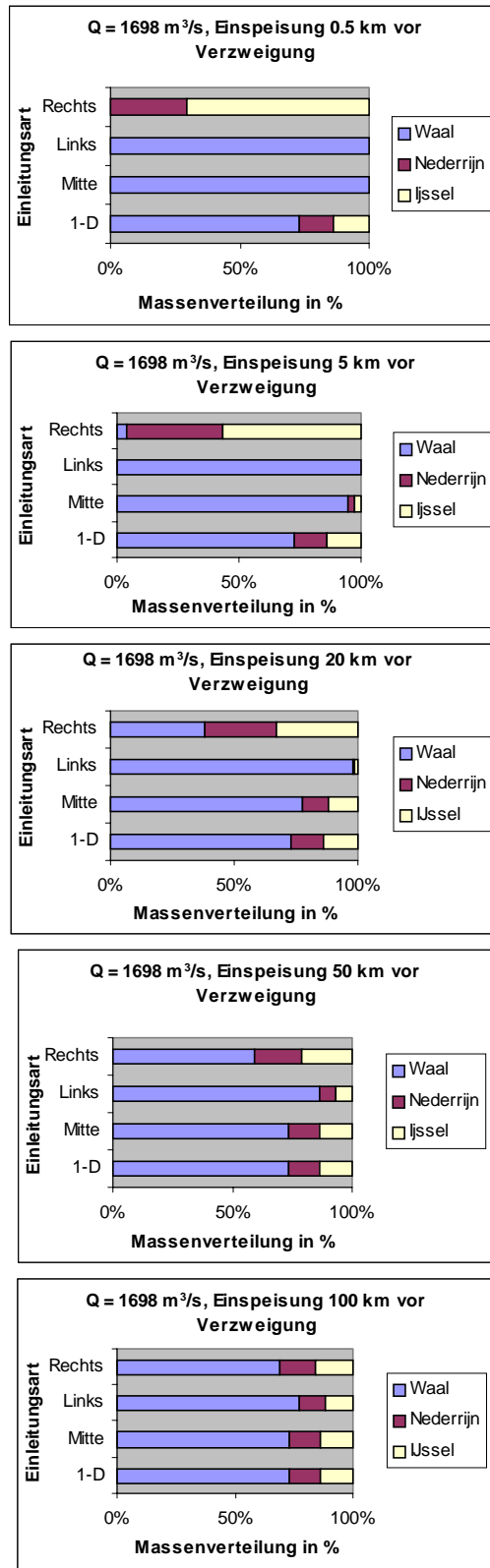


Abbildung 4-13 Massenverteilung auf die niederländischen Rheinarme

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

In Abbildung 4-12 ist die Massenverteilung bei Einspeisung 500 m vor der Verzweigung, d.h. bei Rhein km 866,7, für die drei Flusszweige dargestellt ( $Q$  (Lobith) =  $1698 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Die Massenverteilung bei eindimensionaler Einspeisung stellt sich ein, wenn die Konzentration bei der Verzweigung in allen Ästen gleich groß ist. In die Waal gelangt der größte Massenanteil, da hier der Durchfluss am größten ist. Die Massenverteilung im eindimensionalen Fall spiegelt also die Abflussverteilung auf die Zweige wieder. Erfolgt die Einspeisung am linken Ufer oder in Flussmitte, so gelangt die gesamte Masse in die Waal. Dies ist bei mittiger Einspeisung deshalb der Fall, weil der Abfluss in der Waal verhältnismäßig groß ist. Bei Einspeisung am rechten Ufer wandert alles in den Pannerdensch Kanaal (die Masse in der Waal ist Null) und davon der Hauptteil durch die IJssel. Die dreidimensionale Darstellung in Abbildung 4-12 wird nun zum besseren Vergleich in ein Balkendiagramm (s. Abb. 4-13) überführt. Achtung, hier beziehen sich die Farben nicht auf die Einspeisungsart sondern auf die Flusszweige.

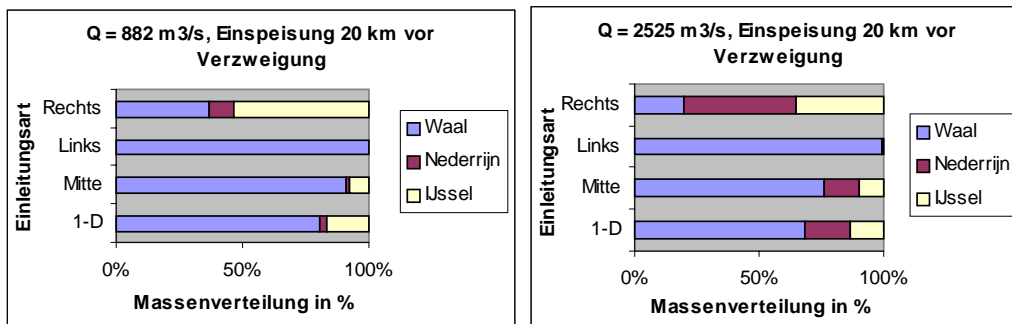


Abbildung 4-14 Massenverteilung bei verschiedenen Durchflüssen

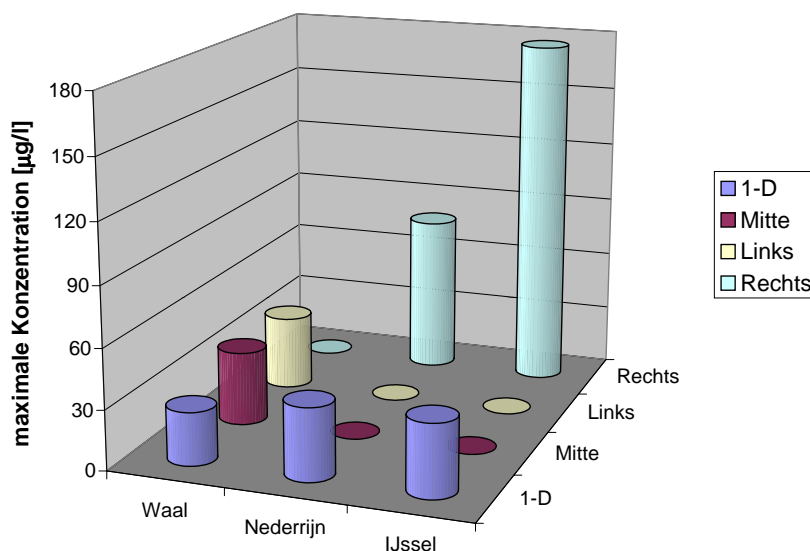


Abbildung 4-15 Konzentrationen; Einspeisung km 866,7,  $Q$  (Lobith) =  $1698 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---

Das Balkendiagramm ist als Blick in Strömungsrichtung vorstellbar. Der blaue Teil geht links in die Waal ab, während der rote und der gelbe Teil in den Pannerdensch Kanaal fließen. Davon wandert dann der rote Teil links in den Nederrijn und der gelbe nach rechts in die IJssel. Fehlt eine Farbe komplett, so gelangt in den entsprechenden Flusszweig keine Substanz. Diese Darstellung ist für immer größer werdende Entfernungen der Einspeisungsquelle von der Verzweigung zu sehen. Man erkennt, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Einspeisungsarten zur eindimensionalen Einspeisung mit wachsender Entfernung immer geringer werden, bis sie bei einer Entfernung von 100 km vernachlässigbar klein sind.

In Abbildung 4-14 sind die Veränderungen bei anderen Durchflüssen dargestellt. Man sieht, dass der Anteil in der IJssel bei geringeren Abflüssen prozentual ansteigt, da das Stauprogramm im Nederrijn den Abfluss in selbigem auf einen Minimalwert begrenzt. Bei hohen Abflüssen hingegen wächst hauptsächlich der Anteil im Nederrijn, weil die Schleusen dort geöffnet werden.

Für die gleichen Simulationen wird zusätzlich die maximale Konzentration bei einheitlicher Einspeisung von 1000 kg Substanz aufgezeigt. Zunächst wird zum besseren Verständnis wieder die dreidimensionale Darstellung gewählt (s. Abb. 4-15).

Bei eindimensionaler Einspeisung ist die Konzentration in den drei Zweigen annähernd gleich groß. Die kleinen Unterschiede ergeben sich dadurch, dass die gewählten Ausgabepunkte erst ca. 11 km hinter der ersten Verzweigung liegen, wodurch die unterschiedlichen longitudinalen Dispersionskoeffizienten und Fließgeschwindigkeiten bereits die maximale Konzentration in den jeweiligen Zweigen beeinflussen. Die Darstellung wird nun in eine andere Art des Balkendiagramms überführt (s. Abb. 4-16).

Wiederum ist zu sehen, wie sich die Konzentrationen mit steigender Entfernung der Einspeisung dem eindimensionalen Zustand annähern, bis bei 100 km Abstand von der Verzweigung kaum noch Unterschiede sichtbar sind. Interessant an dieser Auswertung ist, dass in der IJssel wesentliche höhere Konzentrationen als in den anderen zwei Zweigen erreicht werden können

Aus den obigen Ergebnissen kann nun eine teilweise dimensionslose Darstellung für jeden Flusszweig entwickelt werden (s. Abb. 4-17). Die auf der y-Achse aufgetragene dimensionslose Konzentration ist die vorhandene Konzentration dividiert durch die eindimensionale Konzentration  $\varphi/\varphi_0$ . Die Entfernung der Einspeisung von der ersten Verzweigung ist Null bei Stromkilometer 867,2, d.h. bei der Verzweigung von Waal und Pannerdensch Kanaal. Bei Einspeisung am rechten oder linken Ufer erreichen die Graphen nach ca. 100 km den Punkt  $\varphi/\varphi_0 = 1$ . Dort endet somit ungefähr der Bereich, in dem die Lage der Einspeisung Einfluss auf die Konzentration in den Verzweigungen hat. Erfolgt die Einspeisung in Flussmitte, so endet der Einflussbereich bereits nach ca. 25 km.



#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

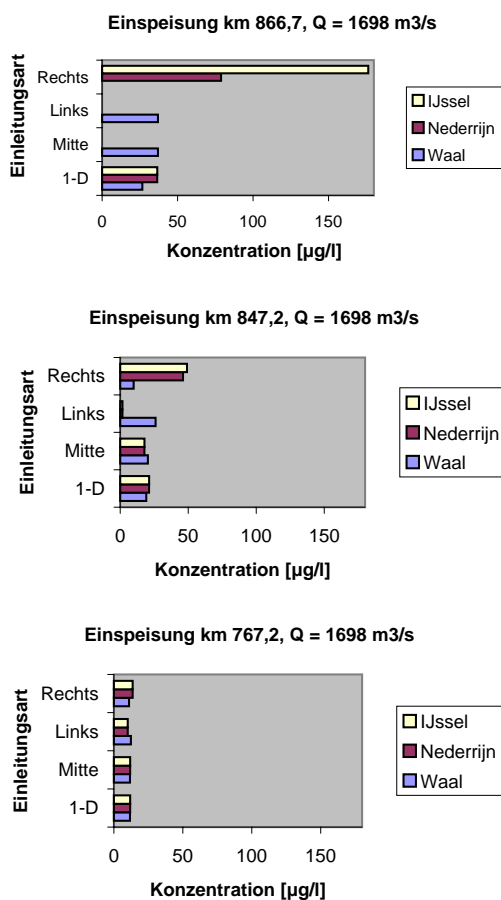


Abbildung 4-16 Konzentrationen in den niederländischen Rheinzweigen

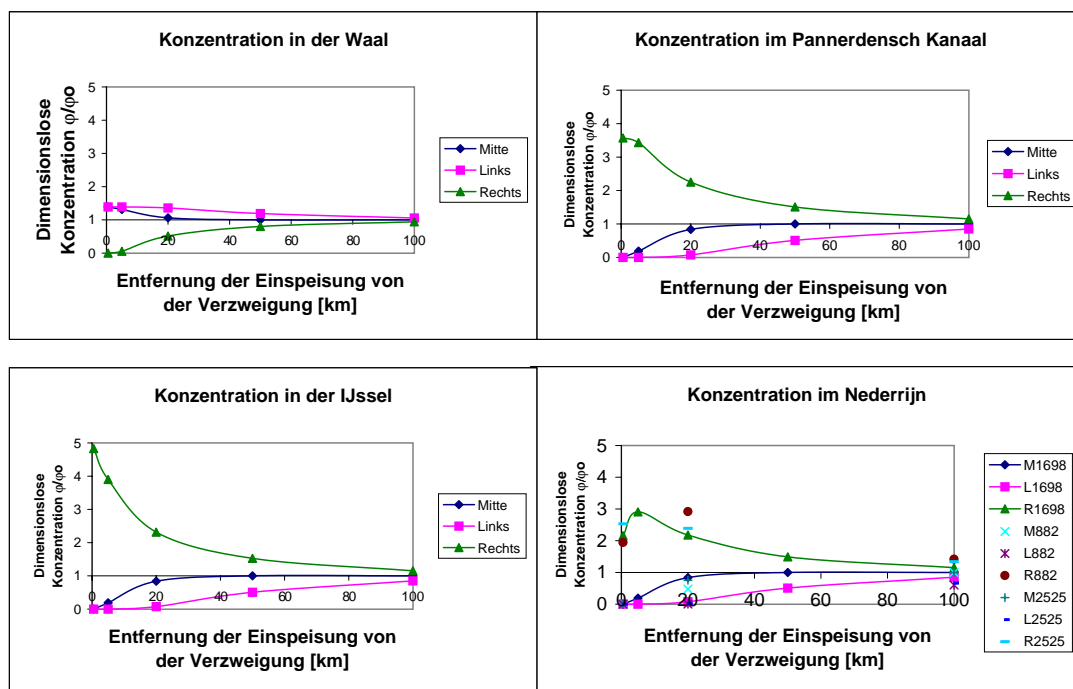


Abbildung 4-17 Konzentrationen je nach Lage der Einspeisung

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---

Diese Verhältnisse werden durch folgende Überlegung bestätigt:

Die Mischlänge errechnet sich nach Gleichung 4-1 (vgl. Gleichung 2-12)

$$L_m = 0,4 \cdot \frac{u_s \cdot b^2}{D_y} \quad (4-1)$$

Bei Einspeisung am Ufer wird für  $b$  die gesamte Flussbreite in die Formel eingesetzt. Erfolgt die Einspeisung hingegen in Flussmitte, so entspricht  $b$  nur der halben Flussbreite. Durch die Potenz 2 wird daher das Ergebnis nur  $\frac{1}{4}$  so groß wie bei der Ufer einspeisung. Dies untermauert die Ergebnisse aus Abb. 4-17 ( $100 \text{ km} \cdot \frac{1}{4} = 25 \text{ km}$ ).

Eine weitere Betrachtung der Graphiken zeigt, dass die Abbildung für den Pannerdensch Kanaal genau  $x$ -achsensymmetrisch zu der Abbildung für die Waal ist. Dies ist eine logische Konsequenz auf Grund der Verzweigung der beiden Flüsse. Die Darstellung für den Nederrijn bei rechter Ufer einspeisung zeigt eine zuerst zunehmende und dann wieder abnehmende Konzentration, was darin begründet ist, dass sich die Substanz bei sehr geringer Entfernung noch dicht am Ufer befindet und zum Großteil in die IJssel gelangt. Ist die Quelle etwas weiter entfernt, gelangt mehr in den Nederrijn und bei noch weiterer Entfernung nimmt der Einfluss der Lage der Einleitung bezüglich der Flussbreite ab.

Die Graphen in Abbildung 4-17 sind alle für den Abfluss  $Q$  (Lobith) =  $1698 \text{ m}^3/\text{s}$  berechnet. Bei anderen Abflüssen ändern sie sich etwas. In der Abbildung für den Nederrijn sind zum Vergleich Ergebnisse bei zwei anderen Abflusssituationen eingetragen. Die Abkürzungen M, L und R in der Legende stehen für die Einleitungspositionen Mitte, links und rechts. Die Zahlen dahinter geben den jeweiligen Abfluss in  $\text{m}^3/\text{s}$  an. Der Wert der Einflusslänge bleibt jedoch für alle Abflüsse bei ungefähr 100 km.

Insgesamt zeigt sich bei den Untersuchungen in den Niederländischen Rheinweisen, dass die 2-D-Module je nach Situation zu erheblich anderen Ergebnissen führen können als die bisherige eindimensionale Berechnung mit dem Rheinalarmmodell. Die Verteilung auf die Zweige kann daher im Falle einer Ufer einleitung bis zu 100 km vor der Verzweigung in Waal und Pannerdensch Kanaal besser simuliert werden.

### 4.4 Tracerversuch Juni 91 bei Mainz

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Modells mit Messungen bei einem Tracerversuch verglichen. Die Einspeisung erfolgte am 25.06.1991 um 12:00 Uhr im Rheinseitenkanal bei Stromkilometer 174,1. Es wurde eindimensional (d.h. gleichmäßig über den Querschnitt verteilt) und momentan eingespeist. Bei Rhein km 498,5 wurde an 4 Messstellen über den Querschnitt verteilt gemessen mit einer Massenrückgewinnung von 67,82 kg. Bei den Simulationen wird die rückgewonnene Masse eingespeist, womit der Abbau unberücksichtigt bleiben kann.

Messpunkte:

Tabelle 4-1 Tracerversuch 6/91, Bezeichnung der Messstellen

Bezeichnung	Lage im Flussquerschnitt
Links	Linkes Ufer
Mitte-links	Linker Drittelpunkt
Mitte-rechts	Rechter Drittelpunkt
Rechts	Rechtes Ufer

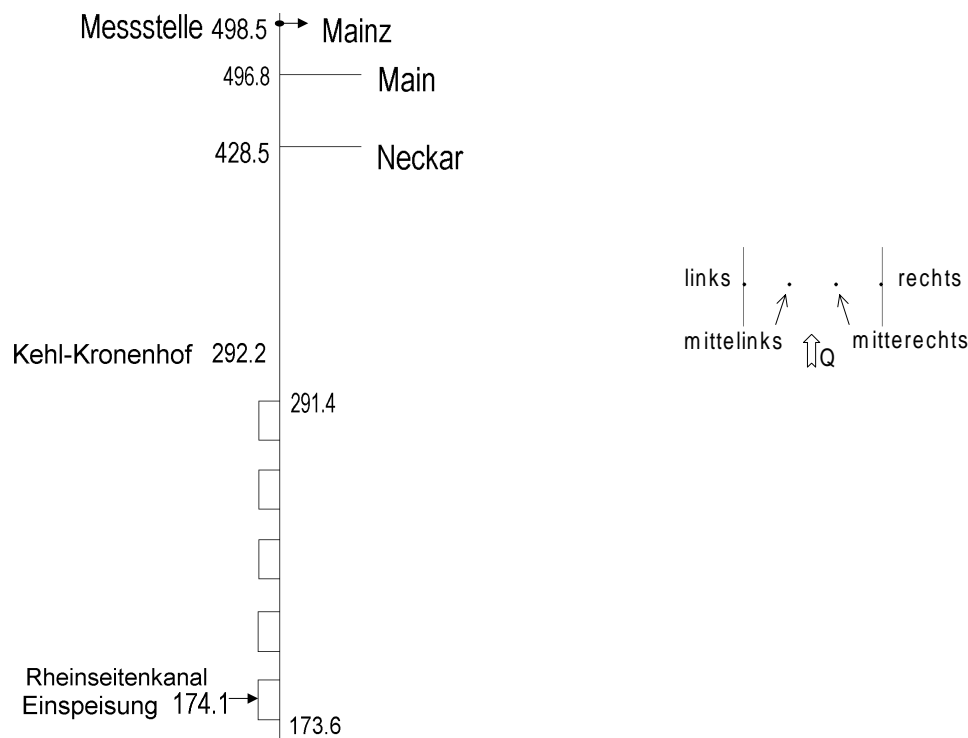


Abbildung 4-18 Schematisch Darstellung des Tracerversuches im Juni '91

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

Der Tracerversuch ist schematisch in Abbildung 4-18 dargestellt. In Abbildung 4-19 sind die Messungen des Tracerversuches (als „Probe“ bezeichnet) und die Ergebnisse des alten und neuen Computermodells dargestellt. Die leichten Konzentrationsunterschiede über den Querschnitt sind auf die Mainmündung bei Rhein km 496,8 zurückzuführen. Der Einfluss des Mains ist in diesem Fall jedoch sehr gering, da sein Abfluss im Verhältnis zum Rhein deutlich weniger als 10 % beträgt.

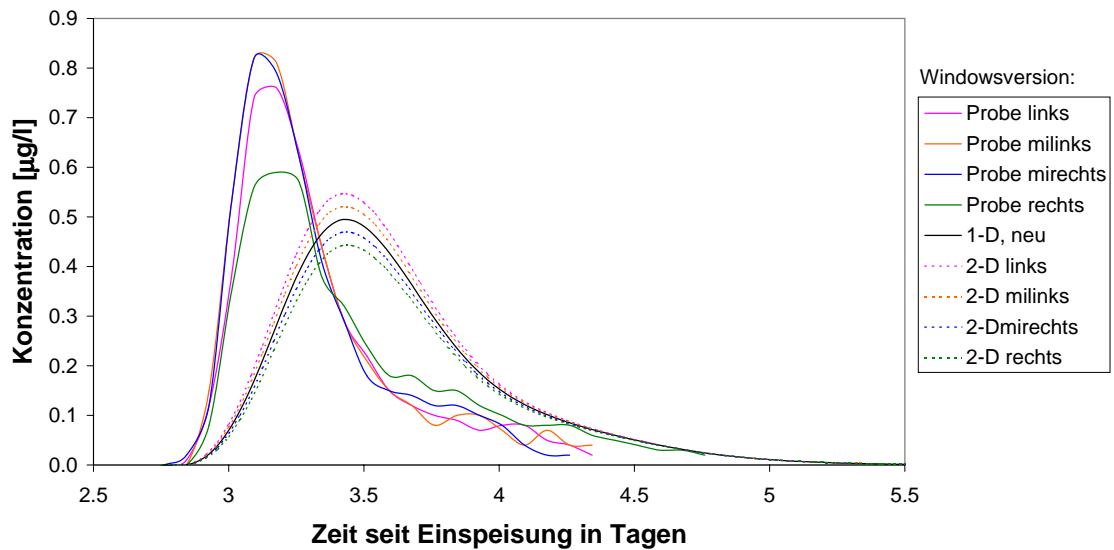


Abbildung 4-19 Tracerversuch 6/91, Messung km 498,5

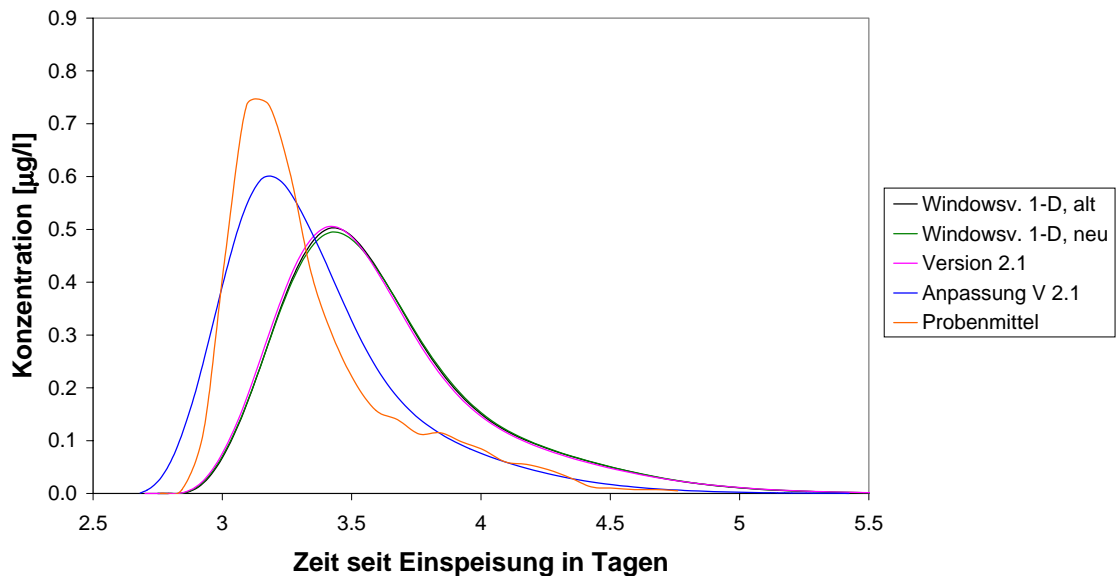


Abbildung 4-20 Tracerversuch 6/91, Vergleich der Versionen und Anpassung des  $\beta$ -Wertes

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---

Die Konzentrationsunterschiede über den Querschnitt sind vernachlässigbar klein und liegen im Rahmen von Messungenauigkeiten, so dass die 2-D-Module keine signifikanten Verbesserungen bringen. Hingegen ist eine Verbesserung in der Ankunftszeit des Peaks erstrebenswert. Die Möglichkeit dazu ist in Abbildung 4-20 zu sehen.

Bisher sind die  $\beta$ -Werte (siehe Gleichung 2-6) im Bereich der Kraftwerkskanäle zwischen Rheinfeldern und Kehl-Kronenhof konstant festgelegt. Die Kanäle werden jedoch bei Abflüssen unter  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  im Schwellbetrieb gefahren, d.h. das Wasser wird nachts gestaut und tagsüber abgelassen (van MAZIJK et al., 1991). Die Abflüsse und Laufzeiten sind daher nicht konstant, so dass die  $\beta$ -Werte eigentlich mit der Dauer der Aufstauung variieren. Es wurde in diesem Sinne bereits eine Kalibrierung der  $\beta$ -Werte in Abhängigkeit vom Abfluss vorgenommen (van MAZIJK, 1999), welche gleichzeitig Ungenauigkeiten in der Hydrologie (Fließzeittabellen, Querschnittstabellen, Abflüsse und Wasserstände) mit abdeckt. Wird nun die Berechnung mit Hilfe der kalibrierten  $\beta$ -Werte in der DOS-Version des Rheinalarmmodells vorgenommen, ergibt sich der Graph „Anpassung V 2.1“ in Abbildung 4-20. Verglichen mit dem „Probenmittel“, welches der Mittelwert aller Messproben ist, wird die Ankunftszeit sehr gut wiedergegeben und gegenüber den Verläufen ohne Anpassung wesentlich verbessert. Hierbei ist zu beachten, dass das Probenmittel nicht die eindimensionalen Konzentrationswerte wiedergibt, weil es nur aus den vier Proben gemittelt wird. Daher sind die Konzentrationshöhen nicht direkt vergleichbar.

Ein Vergleich zwischen der Windows-Version mit und ohne 2-D-Module sowie der DOS-Version des Rheinalarmmodells beweist, dass sich kaum Unterschiede ergeben. Die Windows-Version des Rheinalarmmodell ist somit richtig umgesetzt und kann auch in der neuen Version inklusive 2-D-Module genauso wie zuvor betrieben werden.

#### 4.5 Tracerversuch Juli 89 bei Albbruck

Am 18.07.1989 fand ein Tracerversuch mit momentaner eindimensionaler Einspeisung um 3:00 Uhr bei Rhein km 58,8 statt. Bei Albbruck (Rhein km 108,9) wurde eine Masse von 120 kg rückgewonnen. Dort befanden sich bei einer Flussverzweigung drei Messstellen an verschiedenen Positionen über den Querschnitt.

Messpunkte:

**Tabelle 4-2 Tracerversuch 7/89, Bezeichnung der Messstellen**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Lage im Flussquerschnitt</b>
Kanal rechts	Rechtes Kanalufer
Kanal links	Linkes Kanalufer
Wehr	Wehrmitte

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

Eine schematische Darstellung des Tracerversuches und die Lage der Messstellen sind in den Abbildungen 4-21 und 4-22 zu sehen.

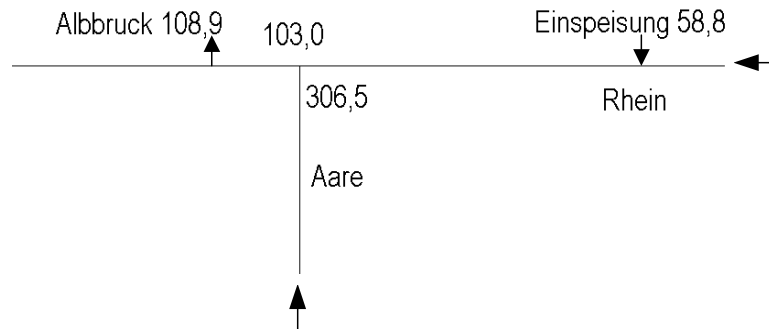


Abbildung 4-21 Schematische Darstellung des Tracerversuches im Juli '89

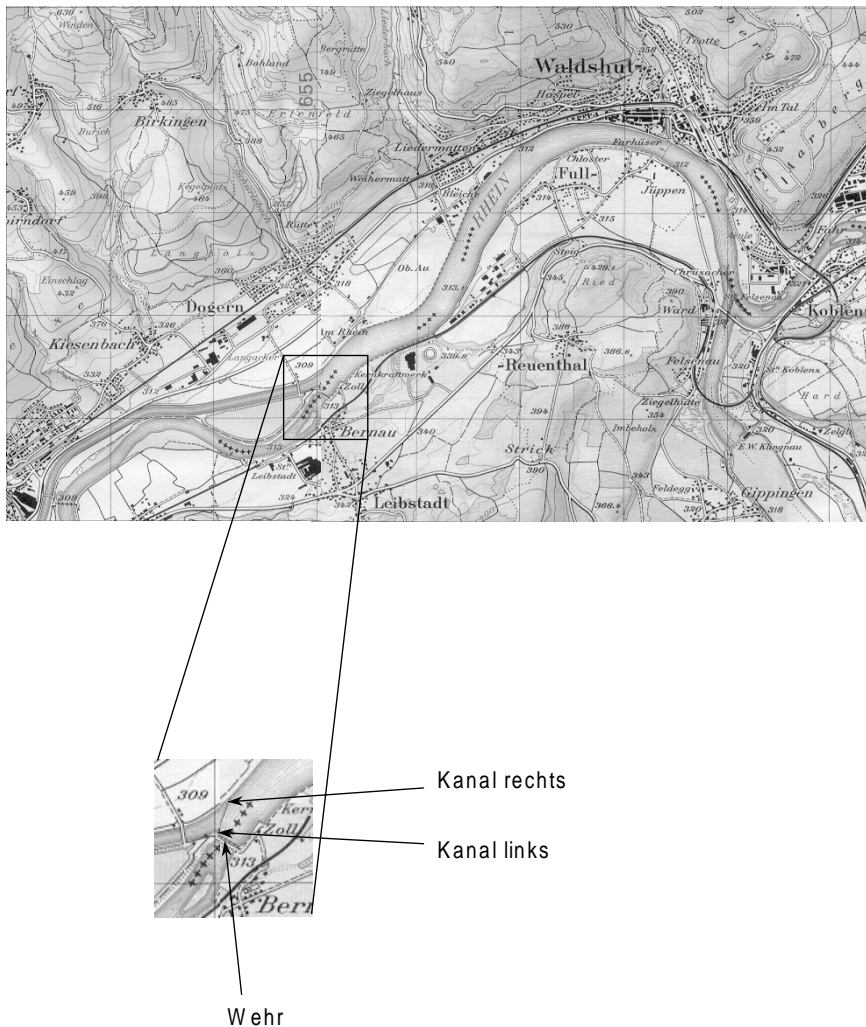


Abbildung 4-22 Tracerversuch 7/89, Lage der Messstellen

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

Im Rheinalarmmodell sind die Parallelstrecken bei Albruck nicht eingebaut. Die Berechnung erfolgt wie bei einer normalen, geraden Flussstrecke, wobei als Fließgeschwindigkeit der Mittelwert aus Kanalstrecke und Rest-Rhein verwendet wird. Da durch den Rest-Rhein jedoch meistens wesentlich weniger Wasser fließt als durch den Kanal, ist diese Annäherung relativ schlecht und verlangsamt die Transportzeit. Im Gegenzug musste deshalb ein negativer  $\beta$ -Wert eingebaut werden, durch den die Fließzeit künstlich vermindert wird.

Es existieren Angaben, dass durch den Kanal maximal  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$  geleitet werden, wobei im Rest-Rhein ein Mindestabfluss von  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  gewährleistet sein muss. Der Abfluss im Rhein bei Rekingen (oberhalb der Aaremündung) beträgt  $553,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , in der Aare bei Stilli  $508,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bei der vorgegebenen Situation fließen daher  $Q_K = 1027 \text{ m}^3/\text{s}$  durch den Kanal bei Albruck und  $Q_{RR} = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  durch den Rest-Rhein. Die Eingabe der Lage der Messstellen muss im Rechnermodell an diese Werte angepasst werden, da die Massenverteilung bei Verzweigungen in Abhängigkeit vom Abfluss geschieht. Daher wird z.B. für die dimensionslose Position des linken Kanalufers bezüglich der Flussbreite der Wert  $35/(1027+35) = 0,033$  eingegeben.

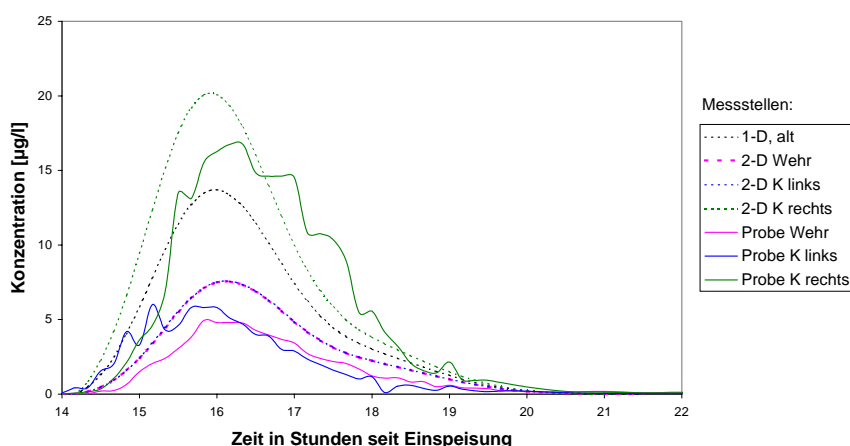


Abbildung 4-23 Tracerversuch 7/89, Vergleich Proben - Programmrechnung

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 4-23 dargestellt. Die Werte aus den Messungen sind als „Probe“ bezeichnet, die gestrichelten Kurven zeigen die Ergebnisse aus der Simulation an den jeweiligen Punkten im Querschnitt. Der mit 1-D bezeichnete schwarze Graph ergibt sich bei Berechnung der eindimensionalen Konzentration bei Albruck (sowohl mit der bisherigen Windows-Version als auch unter Einsatz der Zweidimensionalität). Die Unterschiede über den Querschnitt werden durch das Rechnermodell gut nachgebildet. Die Konzentrationsunterschiede über den Querschnitt ergeben sich trotz eindimensionaler Einspeisung auf Grund der

## 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---

Aaremündung stromaufwärts. Es zeigt sich, dass die Verhältnisse nach dem Zusammenfluss zweier vom Abfluss her ähnlicher Flüsse gut wiedergegeben werden. Das entwickelte Konzept der 2-D-Module bewährt sich also nach Zusammenflüssen, sofern beide Zuflüsse einen vergleichbar großen Abfluss haben.

Durch den Einbau beider Flusszweige in das Rheinalarmmodell könnte der künstliche Eingriff durch einen negativen  $\beta$ -Wert vermieden werden. Allerdings arbeitet das Modell in diesem Bereich auch so bereits relativ gut, weswegen diese Erweiterung im Verhältnis zum Aufwand wenig Verbesserungen für die Anwendung bringen würde. Da die Parallelstrecken zudem nur 3-4 Kilometer lang sind, entsteht auf dieser kurzen Strecke noch kein wesentlicher Fehler in der Transportzeit. Ein sinnvoller Lösungsvorschlag könnte folgendes Vorgehen sein, wie es bereits bei den Parallelstrecken der Aare praktiziert wird: Anstelle des Mittelwertes der Fließgeschwindigkeit beider Strecken wird immer jeweils der Wert mit der kürzesten Fließzeit benutzt. Meistens ist dies der Wert aus der Kanalstrecke, da hierdurch normalerweise das meiste Wasser fließt. Da durch den Zweig mit dem größten Abfluss auch der größte Massenanteil transportiert wird, ist die Fließzeit dieses Astes tatsächlich maßgebend. Auf diese Weise könnte ein negativer  $\beta$ -Wert ohne zu großen Aufwand vermieden werden.

Der Einbau der Parallelstrecken in das Modell ist nur dann zu bevorzugen, wenn sich direkt oberstrom der Verzweigung oder in einem der beiden Äste eine dauerhafte Gefahrenquelle befindet.

### 4.6 Parallelstrecken der Aare

In der Aare befindet sich eine Vielzahl relativ kurzer Kraftwerkskanäle parallel zum natürlichen Flusslauf (s. Abb. 4-24).

Diese Strecke wird im Rheinalarmmodell wie ein einziger Flusslauf behandelt, indem immer mit der Fließgeschwindigkeit gerechnet wird, die am größten ist (also in den meisten Fällen die der Kanäle). Unter der Prämisse, dass die 2-D-Module zur praktischen Anwendung kommen, könnte ein Einbau dieser Parallelstrecken in das Modell interessant werden. Erfolgt nämlich eine Ufereinspeisung vor einer solchen Verzweigung, kann dies zu Verbesserungen bei der Berechnung der Transportzeit führen, wie in Kapitel 4.2 gezeigt wurde. Die Größenordnung dieser Verbesserung wird in diesem Kapitel abgeschätzt und eine Empfehlung bezüglich des Einbaus gegeben.



#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

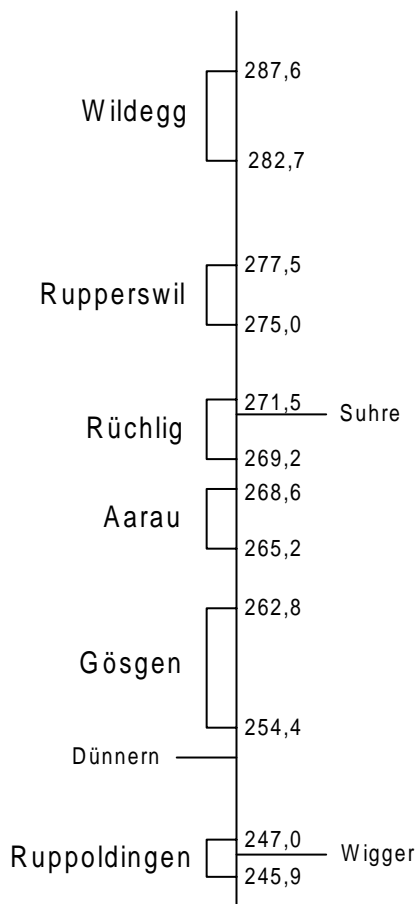


Abbildung 4-24 Schematische Darstellung der Aareparallelstrecken

Tabelle 4-3 Fließzeitdifferenzen in den Aareparallelstrecken

Murgenthal	Laufzeitdifferenzen in Stunden						Summe	Gesamtlaufzeit		Fehler
	Ruppoldingen	Gösgen	Aarau	Rüchlig	Rupperswil	Wildegg		Kanal	Rest-Aare	
Q [m <sup>3</sup> /s]	245.9-247.0	254.4-262.8	265.2-268.6	269.2-271.5	275.0-277.5	282.7-287.6	[h]			[%]
300	0.2	18.17	2.68	10.29	8.81	13.7	53.85	12.39	67.31	443.3
400	0.05	3.5	0.46	0.89	0.61	14.09	19.6	10.11	29.85	195.3
500	-0.01	0.66	0.17	0.19	0.06	0.74	1.81	9.18	11.02	20.0
600	-0.04	0.16	0.04	-0.01	-0.14	0.06	0.07	8.62	8.7	0.9
700	-0.06	-0.06	-0.04	-0.04	-0.25	-0.22	-0.67	8.24	7.49	10.0
800	-0.07	-0.17	-0.09	-0.23	-0.31	-0.38	-1.25	8	6.77	18.2
900	-0.08	-0.25	-0.14	-0.28	-0.37	-0.46	-1.58	7.85	6.27	25.2
<b>Kanallänge</b>	0.8	6	2.385	1.6	2.134	4.57	17.5			
<b>Rest-Aarelänge</b>	1.1	8.4	3.4	2.1	2.4	4.9	22.3			

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

Die nachfolgenden Werte stammen aus dem Bericht „Berechnungen von Fließzeiten in der Aare“ der ETH Zürich (1992). Die aufbereiteten Werte aus vorgenommenen Fließzeitmessungen zeigt Tabelle 4-3. Es sind zu den wichtigsten Parallelstrecken die Fließzeitdifferenzen zwischen den Kanälen und der Rest-Aare bei verschiedenen Abflüssen aufgetragen. Am Ende ist jeweils die Summe aller Fließzeitdifferenzen berechnet. Negative Werte bedeuten, dass die Laufzeit in der Rest-Aare kürzer ist als im Kanal. Sämtliche aufgeführten Parallelstrecken befinden sich in der Aare zwischen der Murgmündung (km 238,6) und Brugg (km 287,6). Für diese Strecke sind am Ende der Tabelle die Laufzeiten durch alle Rest-Aarestrecken und durch alle Kanalstrecken aufgetragen. Die prozentuale Fehlerangabe entsteht aus der Summe der Laufzeitdifferenzen bezogen auf die kleinste Gesamtlaufzeit (weil bisher immer mit der kürzesten Fließzeit gerechnet wird). Unten in der Tabelle sind die Längen der Strecken in Kilometer aufgetragen. In Tabelle 4-4 finden sich die Abflussverteilungen zu den verschiedenen Abflusssituationen in sämtlichen Parallelstrecken. In Abbildung 4-25 sind die Fließzeitunterschiede für die einzelnen Strecken sowie deren Summe über den verschiedenen bei Murgenthal gemessenen Durchflüssen aufgetragen. Die erste Parallelstrecke ist nicht dargestellt, weil die dort auftretenden Unterschiede vernachlässigbar klein sind.

Tabelle 4-4 Abflussverteilung auf die Aareparallelstrecken

Murgenthal	Q [m <sup>3</sup> /s]	300	400	500	600	700	800	900
<b>Ruppoldingen</b>	<b>Kanal</b>	210	210	210	210	210	210	210
	<b>Rest-Aare</b>	90	190	290	390	490	590	690
<b>Gösgen</b>	<b>Kanal</b>	305	380	380	380	380	380	380
	<b>Rest-Aare</b>	5	35	146	260	387	514	641
<b>Aarau</b>	<b>Kanal</b>	290	290	290	290	290	290	290
	<b>Rest-Aare</b>	20	125	236	350	477	604	731
<b>Rüchlig</b>	<b>Kanal</b>	303	340	340	340	340	340	340
	<b>Rest-Aare</b>	7	75	186	300	427	554	681
<b>Rupperswil</b>	<b>Kanal</b>	313	350	350	350	350	350	350
	<b>Rest-Aare</b>	5	75	188	305	440	575	710
<b>Wildeggen</b>	<b>Kanal</b>	308	415	420	420	420	420	420
	<b>Rest-Aare</b>	10	10	118	235	370	505	640

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

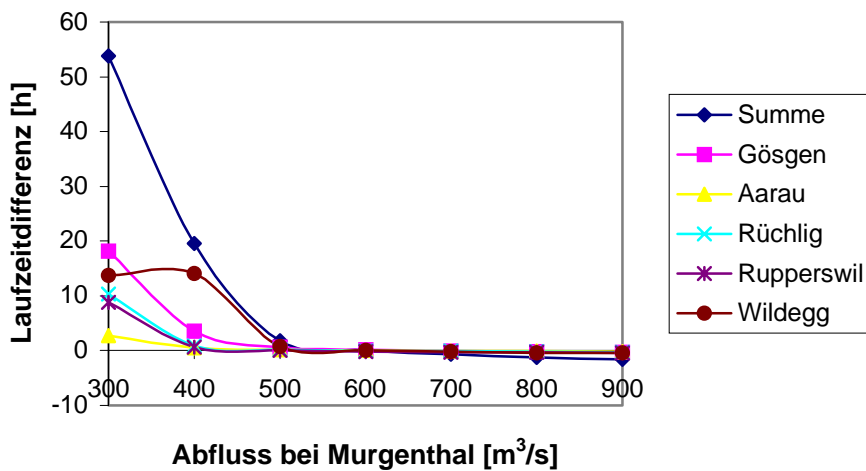


Abbildung 4-25 Fließzeitdifferenzen in den Aareparallelstrecken

Im Fall von  $Q$  (Murgenthal) = 300 m<sup>3</sup>/s ist die Abflussverteilung zwischen Kanal und Reststrecke so extrem, dass dieser Fall nicht mehr relevant ist. Der Abfluss in allen Rest-Aarestrecken ist kleiner als 10 % des Durchflusses des zugehörigen Kanals. Das gleiche Phänomen wie in Kapitel 4.2 („Testdurchlauf im Bereich von Parallelstrecken“) bei einem Durchfluss von 1400 m<sup>3</sup>/s bei Rheinfelden entsteht. Dort war die Abflussverteilung so ungleichmäßig, dass, trotz hoher Konzentration im Rest-Rhein, der Anteil an Substanz, der durch den Rest-Rhein transportiert wurde, nach dem Zusammenfluss mit dem Kanalwasser nicht mehr sichtbar war. Wenn sich nun also der geringe Abfluss der Aare mit hoher Konzentration wieder mit dem Kanalwasser vermischt, findet ebenfalls eine extreme Verdünnung statt, so dass die Konzentration nach dem Zusammenfluss verschwindend gering ist. Es geht folglich nach wie vor der Hauptteil an Substanz durch die Kanäle.

Bei einem Abfluss von 400 m<sup>3</sup>/s ist die Abflussverteilung in den Parallelstrecken Gösgen und Wildeggen immer noch zu extrem. Vernachlässigt man diese zwei Fälle, ergibt sich in der Summe aller übrigen Kanäle ein Unterschied von knapp 2 Stunden. Dieser Unterschied tritt aber nur auf, wenn der Großteil einer eingeleiteten Substanz durch sämtliche Rest-Aarestrecken wandert. Das ist jedoch unwahrscheinlich, weil sich die Substanz zwischen den Parallelstrecken weiter über den Querschnitt ausbreitet und der Abfluss durch die Kanäle immer noch überwiegt. Bei 500 m<sup>3</sup>/s ergibt sich ein ähnlicher Gesamtunterschied (Gösgen und Wildeggen eingerechnet). Die Differenz nimmt mit steigendem Abfluss ab, bis die Substanz schließlich ab einem Durchfluss von 700 m<sup>3</sup>/s in den Rest-Aarestrecken schneller transportiert wird als in den Kanälen. Betragsmäßig bleibt der Unterschied bei einem Abfluss von 400 bis 500 m<sup>3</sup>/s jedoch am größten, womit dies der zu betrachtende Extremfall („worst case“) ist. Außerdem wird der Abfluss von  $Q$  (Murgenthal) = 600 m<sup>3</sup>/s nur an 6 Tagen im Jahr überschritten (vgl. NEFF, 1996). Wo im Bereich zwischen 400 und 500 m<sup>3</sup>/s der Extremfall liegt, ist

#### 4 Analyse und Bewertung der neuen 2-D-Module

---

schwer zu beurteilen. Der Graph für Wildegg in diesem Bereich ist durch Interpolation entstanden, da weitere Messdaten fehlen. Er wird daher in Wirklichkeit nicht so geradlinig abnehmen, wie das in Abbildung 4-25 dargestellt ist, sondern anfänglich wesentlich steiler und im Anschluss flacher verlaufen. Die kürzeste Gesamtfließzeit im Bereich der Parallelstrecken bei diesem Abflussregime liegt bei 10 Stunden. Nimmt man im Extremfall eine Laufzeitdifferenz von bis zu 2 Stunden an, so sind dies 20 Prozent der Gesamtfließzeit. Nach überschlägiger Einschätzung wird die Differenz allerdings nicht mehr als 1 Stunde betragen, da die Differenzen der einzelnen relevanten Parallelstrecken alle unterhalb einer Stunde liegen und es nicht zu einer Überlagerung sämtlicher Fließstrecken kommen wird. Dies entspricht nur noch 10 Prozent der Gesamtfließzeit.

Zum Einbau der Parallelstrecken in das Modell wären zunächst weitere Abflussdaten bei den Parallelstrecken nötig. Zwischen 400 und 500 m<sup>3</sup>/s sollten alle 25 m<sup>3</sup>/s Daten über die Fließzeiten bestimmt werden. Nach dem Einbau der Strecken wäre eine Neukalibrierung erforderlich. Des Weiteren müsste die Anwenderoberfläche des Rheinalarmmodells verändert werden. Als negative Auswirkung käme es nach dem Einbau zu einer Rechenzeitverlängerung, da die Anzahl der Fließwege erheblich ansteigen würde und jeder Fließweg einzeln berechnet werden müsste.

Bei Einführung von Parallelstrecken in das Simulationsmodell ist im Normalfall eine Verbesserung der Transportzeitergebnisse von höchstens bis zu ca. einer Stunde zu erwarten. Der für diese Verbesserung erforderliche unverhältnismäßig große Aufwand kann nicht empfohlen werden. Sinnvoll wäre allerdings eine Untersuchung, ob sich im Nahbereich (bis zu 50 m) vor einer Verzweigung oder in der Rest-Aare selbst eine Gefahrenquelle befindet. Ist dies der Fall, so sollte der Einbau einzelner Parallelstrecken erwogen werden.



# 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die zweidimensionalen Module zur Berechnung des Stofftransportes wurden im Rahmen dieser Arbeit analysiert und hinsichtlich ihrer Funktionsweise im Bereich von Zusammenflüssen und Verzweigungen verbessert. Sie haben sich nach mehreren Testdurchläufen und Vergleichen mit Messergebnissen aus Tracerversuchen und einem Störfall als zuverlässig erwiesen. Deshalb wird die Aktivierung der neuen 2-D-Module in der Windows-Version des Rhein-Alarmmodells empfohlen. Durch ihren Einbau wird vor allem die Massenverteilung bei Verzweigungen und Zusammenflüssen besser berechnet, was in bestimmten Situationen eine genauere Wiedergabe der Transportzeiten bewirkt.

Die Aktivierung der 2-D-Module erfordert jedoch mehrere Eingriffe und Änderungen im Programm, auf die zunächst eingegangen werden soll. Wichtigster Punkt ist die Veränderung des Wertes der Proportionalitätskonstante für die laterale Dispersion, der auf  $\gamma = 0,6$  erhöht werden muss (s. Kap. 3.4). Des Weiteren sollte die Anzahl der Teilabschnitte, in die die Flussbreite zur Berechnung des Spiegeleffektes zerlegt wird, von 40 auf 200 erhöht werden, um eine größere Genauigkeit der Berechnungen der lateralen Konzentrationsverteilung zu erzielen (s. Kap. 3.2.1). Außerdem sollten sämtliche Fließwege bei den Berechnungen berücksichtigt werden. Dies verlangt zusätzlich, dass die Beschränkung der Anzahl der Fließwege im Modell entfernt wird (s. Kap. 3.4). Hinsichtlich der Anwenderoberfläche ist es wünschenswert, weiterhin eine eindimensionale Einspeisung zu ermöglichen (s. Kap. 3.5.1). Außerdem sollte die Konzentrationsverteilung in Abhängigkeit von der Zeit für jeden beliebigen Punkt bezüglich der Flussbreite darstellbar sein (s. Kap. 4.1). Als negativer Effekt ergibt sich eine Verlangsamung der Rechenzeit des Modells bei zweidimensionaler Berechnung. So kann die Rechendauer beispielsweise von einer auf acht Minuten ansteigen.

Im Folgenden soll genauer auf die Ergebnisse eingegangen werden, die die Analyse und Anwendung der 2-D-Module geliefert haben:

Für die Verzweigungen des Rheins in den Niederlanden können die 2-D-Module eine bessere Wiedergabe der Massenverteilung auf die einzelnen Flusszweige bewirken (s. Kap. 4.3). Bei einer Einleitung bis zu ungefähr 100 km vor der Verzweigung zwischen Waal und Pannerdenschem Kanal hat die Lage der Einspeisungsquelle bezüglich der Flussbreite noch sichtbaren Einfluss auf die Massenverteilung auf Waal, Nederrijn und IJssel. In manchen Fällen kann so gezeigt werden, dass z.B. in einen der drei Flusszweige gar keine Verunreinigung gelangen wird.

Große Verbesserungen kann der Einsatz der 2-D-Module vor allem im Bereich von Verzweigungen und Zusammenflüssen bringen, wie sich in Untersuchungen am Rheinseitenkanal und der Schlingenlösung zeigte. Grund sind die unterschiedlichen

## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

---

Fließgeschwindigkeiten in zwei parallelen Flusszweigen, wodurch eine bessere Simulation der Massenverteilung auf die Parallelstrecken bei zweidimensionaler Berechnung signifikante Auswirkungen hat. Bei Einspeisung kurz vor einer Verzweigung kann die Ankunftszeit einer Schadstoffwolke teilweise um mehrere Stunden genauer simuliert werden, wobei die Abflussverteilung auf die Parallelstrecken eine entscheidende Rolle spielt. Beträgt der Abfluss des einen Zweiges weniger als ca. 10 % des Gesamtabflusses, so bringen die 2-D-Module keine Verbesserung.

In der Aare befinden sich ebenfalls mehrere parallel geführte Kraftwerkskanäle. Jedoch wird im Rhein-Alarmmodell nur mit einem Flussbett für die gesamte Aare gerechnet, und zwar mit dem, in dem die Fließgeschwindigkeit bei der jeweiligen Abflusssituation am größten ist. Deshalb wird ein Einbau der Parallelstrecken der Aare in das Rechenmodell erwogen. Nach einer groben Abschätzung würden dabei die Verbesserungen der Berechnung der Transportzeit im Falle einer Ufereinspeisung kurz vor einer Verzweigung im Normalfall nur bei ungefähr einer Stunde liegen, weil die Parallelstrecken verglichen mit dem Rheinseitenkanal und den Strecken der Schlingenlösung sehr kurz sind. Im Extremfall kann dieser Unterschied bis zu 2 Stunden betragen, wobei die Auftretenswahrscheinlichkeit sehr gering ist. Hingegen würde der Einbau der Parallelstrecken die Rechenzeit des Modells verlängern, das Programm und die Anwenderoberfläche müssten geändert werden, genauere Abflussdaten und eine Kalibrierung wären nötig. Vergleicht man die erforderlichen Maßnahmen mit der dadurch erreichbaren Verbesserung, so kann der Einbau nicht empfohlen werden. Befinden sich allerdings Gefahrenquellen direkt vor einer Verzweigung oder in der Rest-Aare, so sollte der Einbau solcher einzelnen Parallelstrecken erwogen werden.

Das oben erwähnte Phänomen der zu unterschiedlichen Abflussverteilung auf zwei Flusszweige ( $Q_{\text{Zweig}} < 10\% Q_{\text{ges}}$ ) zeigt sich ebenfalls deutlich am Beispiel von zwei Situationen von Zusammenflüssen. So hat der Main nach der Mündung in den Rhein kaum Einfluss auf die Konzentrationsverteilung im Rhein (bei Schadstoffeinleitung in den Rhein), weil sein Abfluss verhältnismäßig gering ist ( $Q_{\text{Main}} \ll Q_{\text{Rhein}}$ ). Betrachtet man hingegen die Mündung der Aare in den Rhein (beide Abflüsse sind hier ungefähr gleich groß), zeigt sich eine gute Wiedergabe der Verhältnisse durch die 2-D-Module (s. Kap 4.5).

Bei gerader Strecke bringen die 2-D-Module hinsichtlich der Transportzeit keine Verbesserung, da das Geschwindigkeitsprofil über den Flussquerschnitt im Modell konstant ist. Hinsichtlich der Konzentrationshöhe jedoch können sie auf kurzer Distanz (ca. 100 km) zu genaueren Ergebnissen führen, weil sich mit ihrer Hilfe die Konzentrationsverteilung über die Flussbreite berechnen lässt (s. Kap. 4.1). Allerdings sind die Angaben über die eingeleitete Masse bei einem Störfall meistens so ungenau, dass eine bessere Wiedergabe der Konzentrationshöhen als zweitrangig zu betrachten ist.

## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

---

Die vorgenommenen Untersuchungen und Berechnungen führten weiterhin zu einigen programmtechnischen Verbesserungsvorschlägen, auf die noch kurz eingegangen werden soll:

Ein Einbau veränderlicher  $\beta$ -Werte bezogen auf den Schwellbetrieb im Bereich der Kraftwerkskanäle zwischen Rheinfelden und Kehl-Kronenhof führt zu guten Verbesserungen in der Transportzeit (s. Kap. 4.4). Daten hierzu existieren bereits, folglich wäre diese Erweiterung nicht besonders aufwendig.

Kurz nach dem Zusammenfluss von Aare und Rhein (in 5,9 km Abstand) befindet sich ein parallel geführter Kraftwerkskanal bei Albruck. Derzeit existiert im Modell an dieser Stelle nur eine Fließstrecke, für deren Fließgeschwindigkeit der Mittelwert aus Kraftwerkskanal und Rest-Rhein eingegeben ist. Allerdings gelangt meistens ein Großteil des Wassers durch den Kraftwerkskanal. Weil in dieser Situation die Fließgeschwindigkeit im Kanal größer ist, wird das Eintreffen der Schadstoffwolke stromab durch die Berechnung mit dem Mittelwert der Fließgeschwindigkeiten zeitlich zu spät simuliert. Als Alternative wird daher vorgeschlagen, mit der jeweils größeren Fließgeschwindigkeit aus beiden Zweigen zu rechnen, wie dies zur Zeit bei den Aareparallelstrecken geschieht. So könnte außerdem ein negativer  $\beta$ -Wert, der sich zur Korrektur der zu kleinen Fließgeschwindigkeit aus vorgenommenen Kalibrierungen ergibt, vermieden werden. Noch genauer wäre natürlich der Einbau beider Strecken in das Modell. Da die Parallelführung jedoch nur 3 bis 4 km lang ist, würde das keine wesentlichen Verbesserungen bringen. Dies ist nur vorzuziehen, wenn sich direkt vor der Verzweigung oder in einem der Äste eine Gefahrenquelle befindet.

Des Weiteren wird dringend empfohlen eine automatische Berechnung des Abflusswertes bei Kehl-Kronenhof in die Windows-Version des Rheinalarmmodells einzubauen, um größere Fehler in der Anwendung zu verhindern (in der Version 2.1 ist das bereits geschehen). Dies bedarf keines großen Aufwandes, da alle erforderliche Daten schon vorhanden sind.

Um die Rechenzeit des Modells zu verkürzen, besteht die Möglichkeit, eine Berechnungsgrenze vor Ausführung der Simulation einzugeben. Diese Option sollte in die Anwendungsoberfläche integriert werden, wie dies in der nächsten Version des Donau-Alarmmodells geschieht. Dadurch wird außerdem die Eingabe der zur Berechnung erforderlichen hydrologischen Daten vermindert. Darüber hinaus ist der Einbau einer wahlweise eindimensionalen Einspeisungsquelle in die Oberfläche wünschenswert.



## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

---

## Symbolverzeichnis

$a$	[m]	Mittlere Wassertiefe
$b$	[m]	Abstand zwischen Einspeisungsquelle und weitest entferntem Ufer
$c$	[m/s]	Gewichtete mittlere Fließgeschwindigkeit in Hauptfließrichtung
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$k$	[1/s]	Abbaukoeffizient
$k_n$	[m]	Konstante von Nikuradse
$n$	[-]	Nummer der Spiegelquelle
$t$	[s]	Zeit
$u_s$	[m/s]	Mittlere Fließgeschwindigkeit in Hauptfließrichtung
$u_*$	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit
$x$	[m]	Koordinate in Hauptfließrichtung
$x_o$	[m]	Lage der Einleitung
$x_c$	[m]	Koordinate des Schwerpunktes des Konzentrationsverlaufs
$y$	[m]	laterale Koordinate
$y_o$	[m]	Lage der Einleitung in lateraler Richtung
$y_b$	[m]	Verzweigungspunkt bezüglich der Abflussverteilung
$z$	[-]	Term des Hermiten Polynoms
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Flussquerschnittsfläche
$A_b$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche der Bühnenfelder
$A_s$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche der Hauptströmung
$B$	[m]	Flussbreite
$C$	[m <sup>1/2</sup> /s]	Chézy-Koeffizient
$D_x$	[m <sup>2</sup> /s]	Longitudinaler Dispersionskoeffizient
$\overline{D}_x$	[m <sup>2</sup> /s]	Über Teilabschnitte integrierter longitudinaler Dispersionskoeffizient
$D_y$	[m <sup>2</sup> /s]	lateraler Dispersionskoeffizient
$\overline{D}_y$	[m <sup>2</sup> /s]	Über Teilabschnitte integrierter lateraler Dispersionskoeffizient

## Symbolverzeichnis

---

$G_t$	[-]	Schiefekoeffizient
$M$	[g]	Stoffmasse
$M_l$	[g]	Stoffmasse im linken Flusszweig
$M_r$	[g]	Stoffmasse im rechten Flusszweig
$H_3$	[-]	Hermites Polynom dritten Grades
$L_m$	[km]	Mischlänge
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss
$Q_K$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss im Kanal
$Q_l$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss im linken Flusszweig
$Q_r$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss im rechten Flusszweig
$Q_R$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss im Rhein
$Q_{RR}$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss im Rest-Rhein
$T$	[s]	Über Teilabschnitte integrierte Fließzeit
$\alpha$	[-]	Proportionalitätskonstante (Maß für die Streckung der Stoffwolke)
$\beta$	[-]	Totzonenparameter
$\gamma$	[-]	Proportionalitätskonstante (beeinflusst laterale Dispersion)
$\varphi$	[g/m <sup>3</sup> ]	Konzentration
$\varphi_{l-D}$	[g/m <sup>3</sup> ]	Eindimensionale Konzentration, d.h. über Flussbreite gemittelt
$\varphi_o$	[g/m <sup>3</sup> ]	Eindimensionale Konzentration, d.h. über Flussbreite gemittelt
$\varphi_{max}$	[g/m <sup>3</sup> ]	Maximale Konzentration
$\sigma$	[-]	Standardabweichung

## Literaturverzeichnis

FISCHER, H.B., List, E.J.; Koh, R.C.Y.; Imberger, J.; Brooks, N.H., 1979: „Mixing in Inland and Coastal Waters“, Academic Press, New York

DELFT HYDRAULICS, 1996: „Environmental program for the Danube River Basin“, Danube Basin Alarm Model, Pre-study, Final report

ETH Zürich, 1992: “Berechnung von Fließzeiten in der Aare“, Vorbericht mit Teil-Ergebnissen, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie

GILS, J.A.G. van, 1999: “Rheinalarmmodell“, (auf Niederländisch), Version 3.05, Technische Handleiding, Delft Hydraulics, Delft

LEHMANN, D.C., Uijtewaal, W.S.J., Mazijk, A. van, Weitbrecht, V., 1999: “Auswirkungen von Buhnenfeldern auf den Transport gelöster Stoffe in Flüssen“, Report TU Delft, Fakultät Zivile Technik und Geowissenschaften, Fachbereiche Hydromechanik und Hydrologie & Ökologie, TH Karlsruhe, Institut für Hydromechanik (Diplomarbeit)

LORENZ, N., 1997: „Calamity modelling of the suppressed flow in the River Nederrijn-Lek“, Analysis and evaluation of the Rhine-Alarm-Model 3.0, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geoscience (Master Thesis, in Dutch)

MAZIJK, A. van, Verwoerd, P., Mierlo, J. van, 1991: “Kalibrierung des Alarmmodells für den Rhein anhand des Markierversuches 04/89 Village Neuf – Niederlande“, TU Delft, Rijkswaterstaat, Staatliches Amt für integrale Verwaltung der Binnengewässer und Abwasserreinigung RIZA, Fachgruppe Gesundheitstechnik & Gewässerbewirtschaftung, Lelystad

MAZIJK, A. van, Reitsma, H.Th., Wuijts, S., 1992: “Improvement of the determination of the travel time on the river reach Lobith – Hagestein (the Netherlands) of the River Rhine“, (in Dutch), Association of the Rhine and Meuse Water Supply Companies (RIWA) and Delft University of Technology - Faculty of Civil Engineering, Secretariat of the RIWA, P.O.Box 8169, 1005 AD Amsterdam, June 1992

MAZIJK, A. van, 1996: “One-dimensional approach of transport phenomena of dissolved matter in rivers“, Communications on hydraulic and geotechnical engineering, Report Nr. 96-3, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering

MAZIJK, A. van, Bolier, G., 1999: “Wasserqualitätsmanagement“, (auf Niederländisch) Teil I Vorlesungsskript, TU Delft, Fakultät Zivile Technik und Geowissenschaften, Fachbereich Hydrologie & Ecologie (Vorlesungsskript)

MAZIJK, A. van, 1999: “Das Rheinalarmmodell, Ein bewährtes Vorhersagemodell für den Transport von Schadstoffwellen“, Proceedings Internationale Rhein Konferenz, 27.-28. April 1999, Koblenz, Hydrologische Dynamik im Rheingebiet, Deutsches

## Literaturverzeichnis

---

IHP/OHP–Nationalkomitee, IHP/OHP-Berichte, Heft 13, Koblenz 1999, pp 179...192, ISSN 0177-9915

NEFF, H.-P., Leibundgut, C., Mazijk, A. van, 1996: “Kalibrierung des Rhein-Alarm-Modells für die Aare anhand des Markerversuchs 03/94“, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Professur für Hydrologie, TU Delft

RUTHERFORD, J.C., 1994: “River Mixing”, John Wiley and Sons, Chichester, England

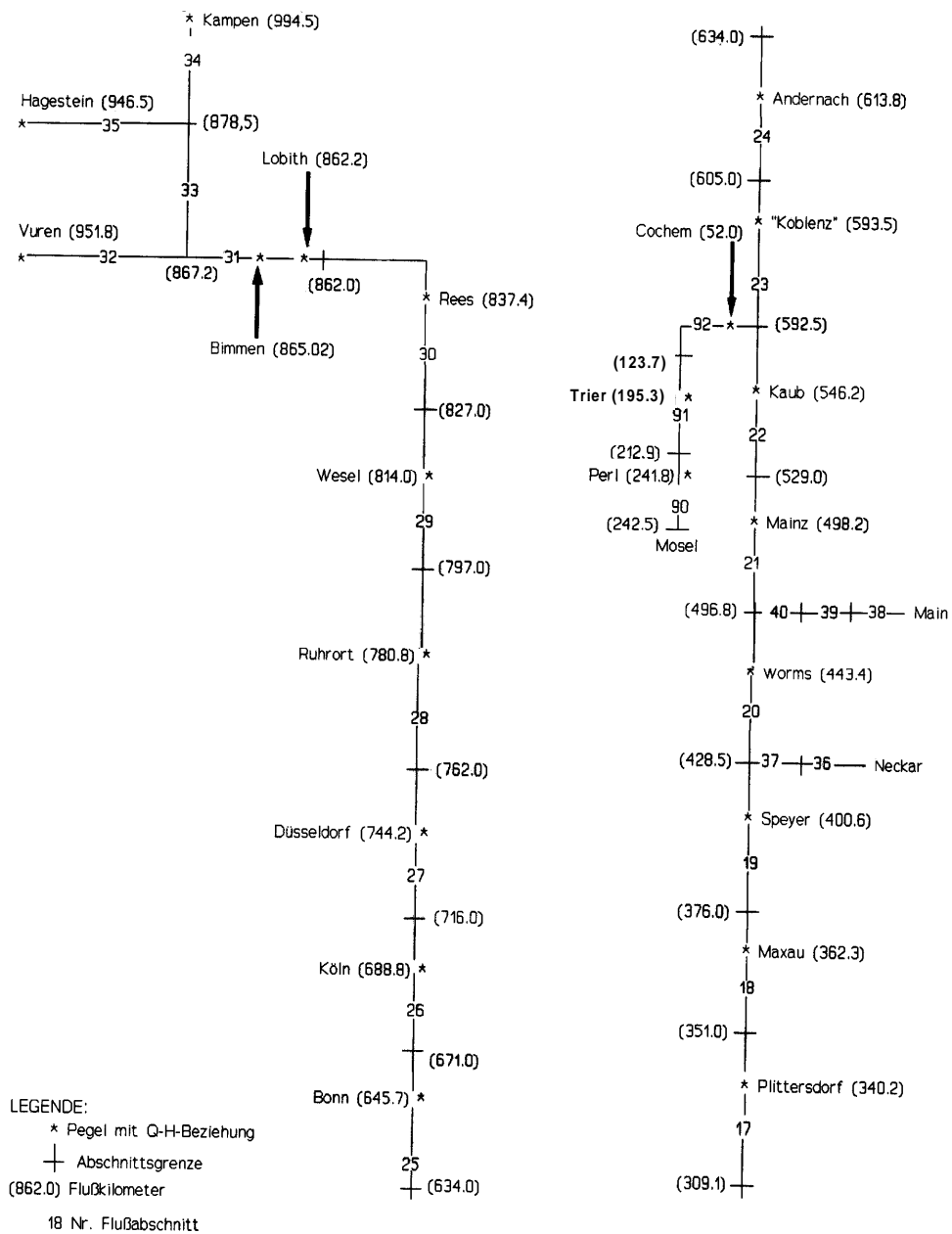
SCHMID, B.H., 1996: „Umweltalarm-Modelle für Kontaminationsfälle in Flüssen“, Vorlesungsskript (vorläufige Version), Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, TU Graz

SPREAFICO, M., Mazijk, A. van, 1993: “Alarmmodell Rhein, Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein“, IKSR/KHR Expertengruppe, Bericht Nr. I-12 der KHR, Sekretariat KHR, Lelystad

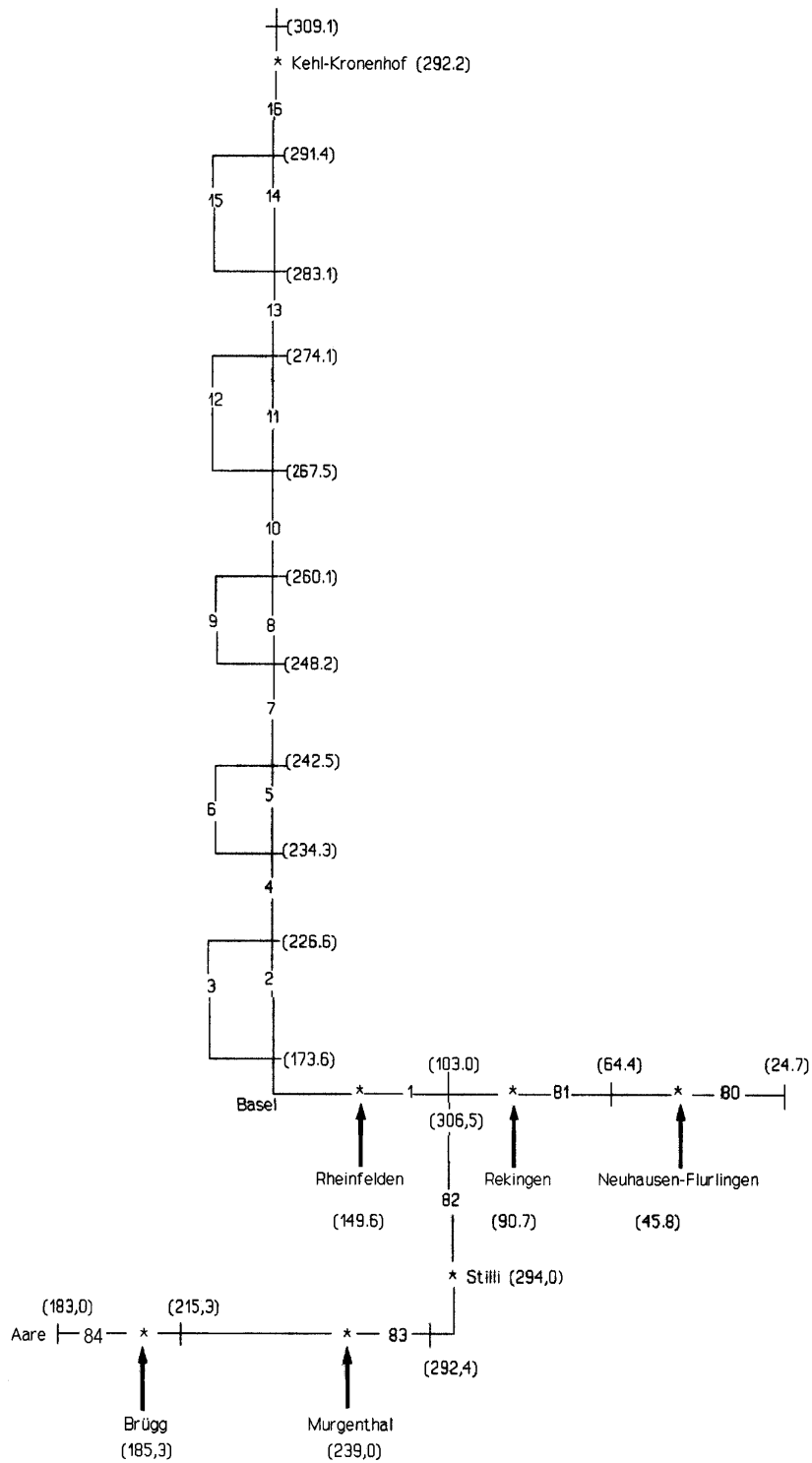
# Anhang



## A. Schematische Darstellung des Rheins







Strukturierungsschema der Flussläufe für das Rheinalarmmodell (IKSR/KHR, 1993)

## B. Umformung der 2-D-Gleichung

Hier wird die Herleitung von Gleichung 2.10 zu Gleichung 2.11 des Kapitels 2.2 gezeigt.

$$\varphi(x, y, t) = \frac{M}{4\pi \cdot a \sqrt{D_x D_y} \cdot t} \exp\left[-\frac{(x-ct)^2}{4D_x t}\right] \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left( \exp\left[-\frac{(y-2nB-y_o)^2}{4D_y t}\right] + \exp\left[-\frac{(y-2nB+y_o)^2}{4D_y t}\right] \right) \quad (2-10)$$

$y_o$  Abstand der Einleitung vom Ufer [m]

$n$  Nummer der Spiegelquelle [-]

Um das 2-D-Modell in Abhängigkeit vom 1-D-Modell (Gleichung (2.2)) darzustellen, wurden folgende Umformungen durchgeführt:

Gleichung (2-1) kann umgeschrieben werden zu

$$\varphi(x, t) = \frac{M}{2aB\sqrt{\pi} \cdot D_x t} \exp\left[-\frac{(x-ct)^2}{4D_x t}\right]$$

eingesetzt in Gleichung (2-10) ergibt dies

$$\varphi(x, y, t) = \frac{M}{2aB\sqrt{\pi} \cdot D_x t \cdot \sqrt{4\pi \cdot D_y t / B^2}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-ct)^2}{4D_x t}\right] \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left( \exp\left[-\frac{(y-2nB-y_o)^2}{4D_y t}\right] + \exp\left[-\frac{(y-2nB+y_o)^2}{4D_y t}\right] \right)$$

daraus folgt

$$\varphi(x, y, t) = \frac{\varphi(x, t)}{\sqrt{4\pi \cdot D_y t / B^2}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left( \exp\left[-\frac{(y - 2nB - y_0)^2}{4D_y t}\right] + \exp\left[-\frac{(y - 2nB + y_0)^2}{4D_y t}\right] \right)$$

dividieren von Nenner und Zähler der Summationsterme durch  $B$  ergibt schließlich Gleichung (2-11)

$$\varphi(x, y, t) = \frac{\varphi(x, t)}{\sqrt{4\pi \cdot D_y t / B^2}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \left( \exp\left[-\frac{\left(\frac{y}{B} - 2n - \frac{y_0}{B}\right)^2}{4D_y t / B^2}\right] + \exp\left[-\frac{\left(\frac{y}{B} - 2n + \frac{y_0}{B}\right)^2}{4D_y t / B^2}\right] \right)$$

(2-11)

## C. Herleitung der Grenzwerte $y_{min}$ und $y_{max}$

Hier wird beschrieben, woraus sich die in Kapitel 3.2.1 erwähnten Grenzen  $y_{min}$  und  $y_{max}$  des Rechnermodells herleiten lassen. Ihr Wert beträgt jeweils

$$y_{\min, \max} / B = \pm \sqrt{40 \cdot D_y t / B^2} + y_o / B \quad (\text{C-1})$$

Die Standardabweichung  $\sigma$  liegt bei einer Normalverteilung bei 61% von  $\varphi_{max}$  (siehe Abbildung C-1). Sie ist wie folgt definiert

$$\sigma = \sqrt{2Dt} \quad (\text{C-2})$$

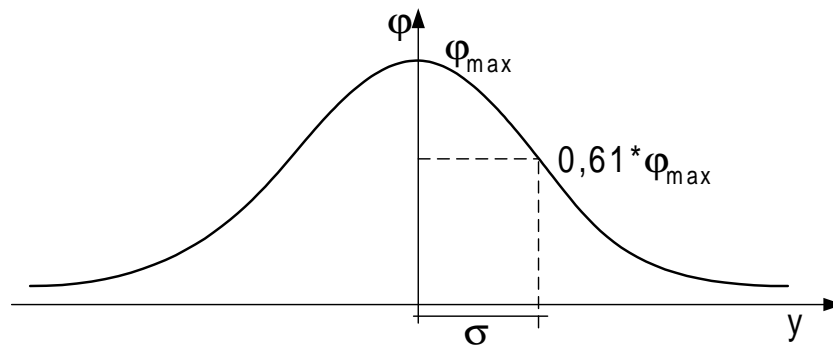


Abbildung C-1 Normalverteilung mit Definitionen

Nun lässt sich genauso bestimmen, bei wie viel Prozent von  $\varphi_{max}$  die Werte  $y_{min}$  und  $y_{max}$  liegen.

Die Gleichung für die Normalverteilung lautet

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y-y_o}{\sigma} \right)^2} \quad (\text{C-3})$$

Liegt das Konzentrationsmaximum bei  $y_o = 0$ , so vereinfacht sich obige Gleichung zu

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{C-4})$$

wobei

$$\varphi_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (\text{C-5})$$

Die Grenzwerte lassen sich umschreiben zu

$$y = \sqrt{(40 \cdot D_y t)} = \sqrt{20} \cdot \sigma \quad (\text{C-6})$$

Eingesetzt in Gleichung (C-4) ergibt sich

$$\varphi(\sqrt{20} \cdot \sigma) = \varphi_{\max} \cdot 4,54 \cdot 10^{-5} \quad (\text{C-7})$$

Somit liegen die Grenzwerte  $y_{\min}$  und  $y_{\max}$  bei 0,0045% von  $\varphi_{\max}$ . Bei der Umschreibung der Grenzwerte (Gleichung C-1 in Gleichung C-6) wird die Division durch die Flussbreite  $B$  weggelassen, da sie zur dimensionslosen Darstellung dient. Der Summationsterm  $y_0/B$  bestimmt die Lage des Konzentrationsmaximums bezüglich der Flussachse. In der Herleitung befindet sich  $\varphi_{\max}$  bei  $y_0 = 0$ , also am linken Ufer. Liegt das Konzentrationsmaximum z.B. in Flussmitte, so werden dementsprechend  $y_{\min}$  und  $y_{\max}$  durch den Summationsterm mit verschoben.

## D. Wasserstands-Abflussbeziehung in Kehl-Kronenhof

Rheinfeldern		Kehl-Kronenhof	
Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Wasserstand [m]	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Wasserstand [m]
400	158	414	197
500	177	525	207
600	195	651	218
700	211	765	229
800	227	882	239
900	241	989	249
1000	255	1096	259
1100	269	1203	269
1200	282	1302	278
1300	295	1402	287
1500	320	1604	306
1750	350	1849	328
2000	380	2105	352
2500	437	2724	408
3000	492	3021	436



## Informationen

---

Einige Informationen über die:

### **Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)**

Die KHR ist eine Organisation, in der wissenschaftliche Institutionen der Rheinanliegerstaaten gemeinsam hydrologische Grundlagen für die nachhaltige Entwicklung im Rheingebiet erarbeitet.

Mission und Aufgaben der KHR sind:

- Erweiterung der Kenntnisse über die Hydrologie des Rheingebietes durch:
  - gemeinsame Untersuchungen,
  - Austausch von Daten, Methoden und Informationen
  - Entwicklung standardisierter Verfahren
  - Veröffentlichungen in eigene Schriftenreihen.
- Beitragen zur Lösung von grenzüberschreitenden Problemen durch Herstellung, Verwaltung und Bereitstellung von:
  - Informationssystemen (KHR Rhein GIS)
  - Modelle (z. B. Wasserhaushalts Modelle und Rhein Alarmmodell)

Bei Bedarf arbeitet die KHR mit anderen (internationalen) Organisationen zusammen und/oder stellt ihnen ihre Arbeitsergebnisse zur Verfügung.

#### **Mitarbeitende Länder**

Schweiz, Österreich, Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Luxemburg und Niederlande.

#### **Beziehungen mit UNESCO und WMO**

Die KHR wurde 1970 anlässlich der UNESCO-Empfehlung, zur Förderung einer engeren Zusammenarbeit in internationalen Flussgebieten, gegründet. Seit 1975 erfolgt die Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Operationellen Hydrologischen Programms (OHP) der WMO.

### **Auswahl von laufenden KHR Arbeiten in 2000.**

#### Hochwasser

Im EU / IRMA SPONGE Rahmen wird eine Untersuchung nach der Methodenentwicklung zur Analyse der Wirksamkeit von flächenbezogenen Hochwasserreduktionsmaßnahmen im Rheineinzugsgebiet auf der Basis von Referenz Hochwasserevents durchgeführt.

Außerdem wird an einem Vergleich von angewandten Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen für mesoskaligen Einzugsgebiete gearbeitet.

#### Sediment

Eine Publikation über Feststoffmessungen zum Vergleich von Meßgeräten und Meßmethoden im Rhein ist in Vorbereitung.

Weiterhin erfolgt eine vergleichende Untersuchung nach Modellkonzepten, die zur Berechnung des Geschiebetransports im Rheineinzugsgebiet eingesetzt werden.

Das KHR-Rhein-GIS wird in vielen Untersuchungen, in denen die KHR Partner ist, eingesetzt.

Bei dem EU IRMA-SPONGE Projekt, dem IKSU/EU INTERREG Projekt LaHoR, dem Projekt Deutscher Forschungsnetz Naturkatastrophen und bei der ETH-Zürich für das Thema Forschung Klimaveränderungen und extreme Flusswassermengen.

Das KHR-Rhein-GIS wird um neuen Klimadaten erweitert und mit einer anwenderfreundlichen Benutzeroberfläche versehen.

Das Rhein Alarmmodell sagt bei Schadstoffeintritten den Verlauf der Verunreinigung vorher.

Die KHR hat das IKSU/KHR Modell in technischer Verwaltung: die Anpassung des Modells an sich ändernde Umstände und Wünsche, sowie die Weitergabe des Modells an Anwender.

Die Anwenderfreundlichkeit des Modells wird verbessert und es wird außerdem so angepaßt, daß es sich für zweidimensionale Berechnungen eignet. Über dieses letzte Thema ist eine Publikation in Vorbereitung.

**Mehr Informationen über die KHR sind ihrer Internetseite zu entnehmen: [www.CHR-KHR.org](http://www.CHR-KHR.org).**



## Informationen

---

Quelques informations sur la :

### **Commission Internationale de l'Hydrologie du Bassin du Rhin (CHR)**

La CHR est une organisation regroupant les institutions scientifiques des pays riverains du Rhin dans le but de définir en commun des principes hydrologiques de développement durable du bassin rhénan.

#### **La CHR a pour mission et tâches :**

- Développer les connaissances sur l'hydrologie du bassin du Rhin par :
  - des recherches effectuées en commun,
  - l'échange de données, méthodes et informations,
  - le développement de procédures standard,
  - des publications dans des cahiers propres.
- De contribuer à résoudre les problèmes transfrontaliers par l'élaboration, la gestion et la mise à disposition de :
  - systèmes d'informations (SIG Rhin de la CHR)
  - modèles (par ex. modèle de régime hydrologique, modèle d'alarme pour le Rhin).

Au besoin, la CHR collabore avec d'autres organisations (internationales) et/ou met à leur disposition les résultats de ses propres travaux.

#### **Pays membres de la CHR**

Allemagne, Autriche, France, Luxembourg, Pays-Bas et Suisse.

#### **Relations avec l'UNESCO et l'OMM**

La CHR a été fondée en 1970 sur recommandation de l'UNESCO, en vue de promouvoir une étroite collaboration dans les bassins versants internationaux. Depuis 1975, elle poursuit ses travaux dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO et du Programme Hydrologique Opérationnel (PHO) de l'OMM.

### **Sélection de travaux de la CHR en cours en 2000**

#### Crues

Dans le cadre du programme SPONGE/IRMA de l'UE, une recherche est conduite pour le développement de méthodes d'analyse de l'efficacité des mesures de réduction surfacique des crues dans le bassin versant du Rhin sur la base de crues de référence.

Par ailleurs, une étude en cours doit permettre d'obtenir un aperçu des procédures appliquées en matière d'évaluation des débits de crues pour bassins versants à meso-échelle.

#### Sédiments

Une publication sur les mesures des matières solides en vue de comparer les appareils et méthodes de mesure appliqués au Rhin est en cours de préparation.

Une étude comparative permettra ensuite de définir des concepts de modèles pouvant être utilisés pour le calcul du charriage dans le bassin versant du Rhin.

Le SIG-Rhin de la CHR est utilisé dans un grand nombre d'études auxquelles collabore la CHR : dans le projet SPONGE-IRMA de l'UE, le projet LaHoR-INTEREGG du IKSR/UE, le projet de réseau allemand de recherche sur les catastrophes naturelles (Deutscher Forschungsnetz Naturkatastrophen), et le projet de recherche de l'EPF de Zurich sur les changements climatiques et les débits fluviaux extrêmes.

Le SIG-Rhin de la CHR sera enrichi de nouvelles données climatiques et agrémenté d'une interface utilisateur très conviviale.

Le modèle d'alarme pour le Rhin permet de prévoir l'évolution d'une pollution lors d'un apport de substances nocives dans le Rhin.

La CHR est chargée de la gestion technique du modèle IKSR/KHR : adaptation du modèle aux nouvelles conditions et souhaits, et transmission du modèle à l'utilisateur.

La convivialité du modèle a été améliorée et il a été par ailleurs adapté de sorte à permettre les calculs bidimensionnels. Une publication sur ce thème est en cours de préparation.

**Pour de plus amples informations sur la CHR, veuillez consulter le site de la commission sur Internet à l'adresse : [www.CHR-KHR.org](http://www.CHR-KHR.org).**

## Informationen

---

Enige informatie over de:

### **Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR)**

**De CHR** is een organisatie waarin de wetenschappelijke instituten van de Rijnsoeversten gemeenschappelijke hydrologische maatregelen opstellen voor de duurzame ontwikkeling van het Rijngebied.

#### **Missie en taken van de CHR:**

- Kennis van de hydrologie van het Rijngebied uitbreiden door:
  - gemeenschappelijke onderzoeken,
  - uitwisselen van gegevens, methoden en informatie
  - ontwikkeling van gestandaardiseerde procedures
  - publicaties in eigen werken
- Bijdrage leveren aan het oplossen van grensoverschrijdende problemen door het opstellen, beheren en het beschikbaar stellen van:
  - informatiesystemen (CHR Rijn GIS)
  - modellen (bijv. modellen waterhuishouding en Rijnalarmmodel)

Indien nodig werkt de CHR samen met andere (internationale) organisaties en/of stelt resultaten ter beschikking.

#### **Samenwerkende landen**

Zwitserland, Oostenrijk, Duitsland, Frankrijk, Luxemburg en Nederland.

#### **Relatie met UNESCO en WMO**

In 1970 werd de CHR opgericht naar aanleiding van een advies van de UNESCO om een nauwere samenwerking tussen internationale stroomgebieden te bevorderen. Sinds 1975 worden de werkzaamheden voortgezet in het kader van het Internationale Hydrologische Programma (IHP) van de UNESCO en van het Operationele Hydrologische Programma (OHP) van de WMO.

### **Selectie uit lopende CHR-werkzaamheden in 2000.**

#### Hoogwater

In het kader van EU/IRMA-SPONGE wordt onderzoek verricht naar de "Ontwikkeling van methoden voor het analyseren van de effectiviteit van gebiedspecifieke hoogwaterreductiemaatregelen in het Rijnstroomgebied op basis van referentiehoogwater".

Bovendien wordt gewerkt aan een "Overzicht van toegepaste procedures voor het schatten van hoogwaterafvoeren voor mesoschalige stroomgebieden".

#### Sediment

Een publicatie over "Metingen van vaste stoffen ter vergelijking van meetapparatuur en meetmethoden in de Rijn" is in voorbereiding.

Verder volgt een vergelijkend onderzoek naar modelconcepten die worden ingezet bij het berekenen van sedimenttransporten in het Rijnstroomgebied.

Het CHR-Rijn-GIS wordt bij vele onderzoeken ingezet, waarbij de CHR partner is:

bij het project EU IRMA-SPONGE, het IKSR/EU INTERREG project LaHoR, het project Duits Onderzoeksnetwork Natuurrampen en door de ETH-Z, rich voor het Onderzoek naar klimaatveranderingen en extreme rivierwaterpeilen.

Het CHR-Rijn-GIS wordt uitgebreid met nieuwe klimaatgegevens en voorzien van een gebruiksvriendelijke user interface.

Het Rijn-Alarmmodel voorspelt het verloop van de verontreiniging bij lozingen van schadelijke stoffen.

De CHR zorgt voor het technische beheer van het IKSR/CHR-model: het aanpassen van het model aan de veranderende omstandigheden en wensen en het overhandigen van het model aan de gebruiker.

De gebruiksvriendelijkheid van het model wordt verbeterd en het model wordt zo aangepast dat het geschikt is voor tweedimensionale berekeningen. Een publicatie over dit laatste onderwerp is in voorbereiding.

**Meer informatie over de CHR kunt u vinden op de website: [www.CHR-KHR.org](http://www.CHR-KHR.org).**

## Informationen

---

Enige informatie over de:

### **Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR)**

**De CHR** is een organisatie waarin de wetenschappelijke instituten van de Rijnsoeversten gemeenschappelijke hydrologische maatregelen opstellen voor de duurzame ontwikkeling van het Rijngebied.

#### **Missie en taken van de CHR:**

- Kennis van de hydrologie van het Rijngebied uitbreiden door:
  - gemeenschappelijke onderzoeken,
  - uitwisselen van gegevens, methoden en informatie
  - ontwikkeling van gestandaardiseerde procedures
  - publicaties in eigen werken
- Bijdrage leveren aan het oplossen van grensoverschrijdende problemen door het opstellen, beheren en het beschikbaar stellen van:
  - informatiesystemen (CHR Rijn GIS)
  - modellen (bijv. modellen waterhuishouding en Rijnalarmmodel)

Indien nodig werkt de CHR samen met andere (internationale) organisaties en/of stelt resultaten ter beschikking.

#### **Samenwerkende landen**

Zwitserland, Oostenrijk, Duitsland, Frankrijk, Luxemburg en Nederland.

#### **Relatie met UNESCO en WMO**

In 1970 werd de CHR opgericht naar aanleiding van een advies van de UNESCO om een nauwere samenwerking tussen internationale stroomgebieden te bevorderen. Sinds 1975 worden de werkzaamheden voortgezet in het kader van het Internationale Hydrologische Programma (IHP) van de UNESCO en van het Operationele Hydrologische Programma (OHP) van de WMO.

### **Selectie uit lopende CHR-werkzaamheden in 2000.**

#### Hoogwater

In het kader van EU/IRMA-SPONGE wordt onderzoek verricht naar de "Ontwikkeling van methoden voor het analyseren van de effectiviteit van gebiedspecifieke hoogwaterreductiemaatregelen in het Rijnstroomgebied op basis van referentiehoogwater".

Bovendien wordt gewerkt aan een "Overzicht van toegepaste procedures voor het schatten van hoogwaterafvoeren voor mesoschalige stroomgebieden".

#### Sediment

Een publicatie over "Metingen van vaste stoffen ter vergelijking van meetapparatuur en meetmethoden in de Rijn" is in voorbereiding.

Verder volgt een vergelijkend onderzoek naar modelconcepten die worden ingezet bij het berekenen van sedimenttransporten in het Rijnstroomgebied.

Het CHR-Rijn-GIS wordt bij vele onderzoeken ingezet, waarbij de CHR partner is:

bij het project EU IRMA-SPONGE, het IKSR/EU INTERREG project LaHoR, het project Duits Onderzoeksnetwork Natuurrampen en door de ETH-Z, rich voor het Onderzoek naar klimaatveranderingen en extreme rivierwaterpeilen.

Het CHR-Rijn-GIS wordt uitgebreid met nieuwe klimaatgegevens en voorzien van een gebruiksvriendelijke user interface.

Het Rijn-Alarmmodel voorspelt het verloop van de verontreiniging bij lozingen van schadelijke stoffen.

De CHR zorgt voor het technische beheer van het IKSR/CHR-model: het aanpassen van het model aan de veranderende omstandigheden en wensen en het overhandigen van het model aan de gebruiker.

De gebruiksvriendelijkheid van het model wordt verbeterd en het model wordt zo aangepast dat het geschikt is voor tweedimensionale berekeningen. Een publicatie over dit laatste onderwerp is in voorbereiding.

**Meer informatie over de CHR kunt u vinden op de website: [www.CHR-KHR.org](http://www.CHR-KHR.org).**

## Informationen

---

Information on the:

### **International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR)**

**The CHR** is an organisation in which the scientific institutes of the Rhine riparian states formulate joint hydrological measures for sustainable development of the Rhine basin.

#### **CHR's mission and tasks:**

- Expansion of the knowledge of the hydrology in the Rhine basin through:
  - joint research,
  - exchange of data, methods and information
  - development of standardised procedures
  - publications in own works
- Making a contribution to the solution of cross-border problems through the formulation, management and provision of:
  - information systems (CHR Rhine GIS)
  - models (e.g. models for water management and a Rhine alarm model)

If necessary, the CHR co-operates with other (international) organisations and/or makes results available.

#### **Co-operating countries**

Switzerland, Austria, Germany, France, Luxembourg and the Netherlands.

#### **Relationship with UNESCO and WMO**

The CHR was founded in 1970, following advice by UNESCO to promote closer co-operation between international river basins. Since 1975, the work has been continued within the framework of the International Hydrological Programme (IHP) of the UNESCO and the Operational Hydrological Programme (OHP) of the WMO.

#### **Selection of on-going CHR activities in 2000.**

##### High waters

Within the framework of EU/IRMA-SPONGE, research is being carried out into the "Development of methods for analysing the effectiveness of area-specific flood reduction measures in the Rhine catchment area on the basis of reference high waters".

Work is also underway on a "Summary of allied processes for estimating high water discharges for meso-scale catchment areas".

##### Sediment

A publication on "Solid matter measurements for comparing measuring devices and techniques in the Rhine" is being prepared.

A comparative study of the model concepts used to calculate the bed load transport in the Rhine catchment area is to be published at a later date.

The CHR Rhine GIS is used in many studies, in which the CHR is a partner:

in the EU IRMA-SPONGE project, the IKSR/EU INTERREG LaHoR project, the German Research Network for Natural Disasters project and at Zurich Technical University for research into climate change and extreme river water levels.

New climatic data is to be added to the CHR Rhine GIS, along with a user-friendly user interface.

The Rhine Alarm model forecasts the progress of pollution following the discharge of harmful substances.

The CHR is responsible for the technical management of the IKSR/CHR model: adaptation of the model to the changing circumstances and requirements, and provision of the model to the user.

The user friendliness of the model is under improvement and the model is to be adapted to make it suitable for two-dimensional calculations. A publication is being prepared on the latter topic.

**For more information on the CHR, refer to the web site: [www.CHR-KHR.org](http://www.CHR-KHR.org).**

**KOLOPHON**

**Publikation der CHR/KHR**

Sekretariat, Postfach 17

8200 AA Lelystad

Niederlande

Email: [info@chr-khr.org](mailto:info@chr-khr.org)

Website: [www.chr-khr.org](http://www.chr-khr.org)

**Übersetzungen:** Password Translations, Heino

**Drucker:** Veenman drukkers, Ede

**ISBN :** 90-36953-55-3



Secretariaat CHR/KHR  
Zuiderwagenplein 2

Postbus 17  
8200 AA Lelystad  
Niederlande/Pays-Bas