

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Bleninger, Tobias; Jirka, Gerhard H.; Marena, Dagmar

Durchmischungsprognose für die Einleitung von Abwasser in den Rhein

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103822>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bleninger, Tobias; Jirka, Gerhard H.; Marena, Dagmar (2006): Durchmischungsprognose für die Einleitung von Abwasser in den Rhein. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 219-228.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Durchmischungsprognose für die Einleitung von Abwasser in den Rhein

Tobias Bleninger, Dagmar Marena, Gerhard H. Jirka

Für eine größere industrielle Abwassereinleitung in den Rhein wurden Durchmischungsrechnungen mit dem strömungsmechanischen Programmpaket CORMIX durchgeführt und mit Feldmessungen verglichen. Resultierende Optimierungspotentiale für den Gewässerschutz sind neben der konventionellen Erweiterung von Kläranlagen optimierte immissionsorientierte Einleitungstechnologien. Diese können die Belastung für das Gewässer signifikant reduzieren und somit einen Beitrag zum ganzheitlichen Gewässerschutz leisten.

Mixing calculation for waste water discharge into Rhein river. A major industrial wastewater discharge into the Rhein river was modeled with CORMIX and compared with field studies. Immission oriented discharge technologies show significant reduction of pollutant concentrations and may therefore be used in addition to emission based treatment technologies for integrated water quality control.

1 Einleitung

Weltweit werden Oberflächengewässer zur Kühlwasserentnahme und -einleitung, zur Ableitung und zum Abbau von behandeltem Abwasser aus Kläranlagen, Industriebetrieben oder auch Tagebaugruben und Entsalzungsanlagen genutzt. Entgegen der weitläufigen Meinung, dass der ingenieurtechnische Gewässerschutz am Kläranlagenablauf endet, können hydraulisch optimierte Einleitungsbauwerke Schadstoffbelastungen im Gewässer um ein Vielfaches verringern. Statt einfacher Kanäle oder Rohrleitungen werden immer häufiger getauchte Diffusor-Bauwerke mit zahlreichen Öffnungen verwendet, um einerseits die lokalen Belastungen zu reduzieren und andererseits die natürlichen Mischprozesse im aufnehmenden Gewässer zu unterstützen (Jirka et al., 2004).

Die Bauwerksbemessung ist somit stark gewässerabhängig. Hierfür sind die detaillierte Kenntnis des Gewässers und eine Analyse der Interaktion mit dem eingeleiteten Fluid notwendig. Neben Feldmessungen sind computerbasierte Misch- und Transportmodelle für die Bemessung unverzichtbar geworden.

2 Klassifizierung von Mischprozessen infolge von Einleitungen

Das Mischungsverhalten einer punktförmigen Abwassereinleitung in einen Fluss wird durch das Zusammenwirken der Strömungsbedingungen im Fluss und der Charakteristik der Einleitung selbst gesteuert. Die hierfür schematisierten Bau-

werks- und Gewässergeometrien sind in Abb. 1 dargestellt. Der Fluss ist durch die mittlere Wassertiefe H_a , der Breite BS , der mittleren Geschwindigkeit u_a und der Dichte ρ_a angenähert. Der Einleitungskanal hat die Breite b_o , die Tiefe h_o , die Querschnittsfläche $a_o = b_o h_o$, den Winkel σ_o relativ zur Flussachse, die Einleitungsgeschwindigkeit U_o und, den Dichteunterschied $\Delta\rho_o = \rho_a - \rho_o$. Die Dynamik dieser mit Auftriebstrahl bezeichneten Strömung ist bei Freispiegeleinleitungen von der aktiven bauwerksinduzierten Durchmischung im Nahfeld und der passiven flussströmungsinduzierten Durchmischung im Fernfeld abhängig. Letztere ist oft um Größenordnungen kleiner als erstere.

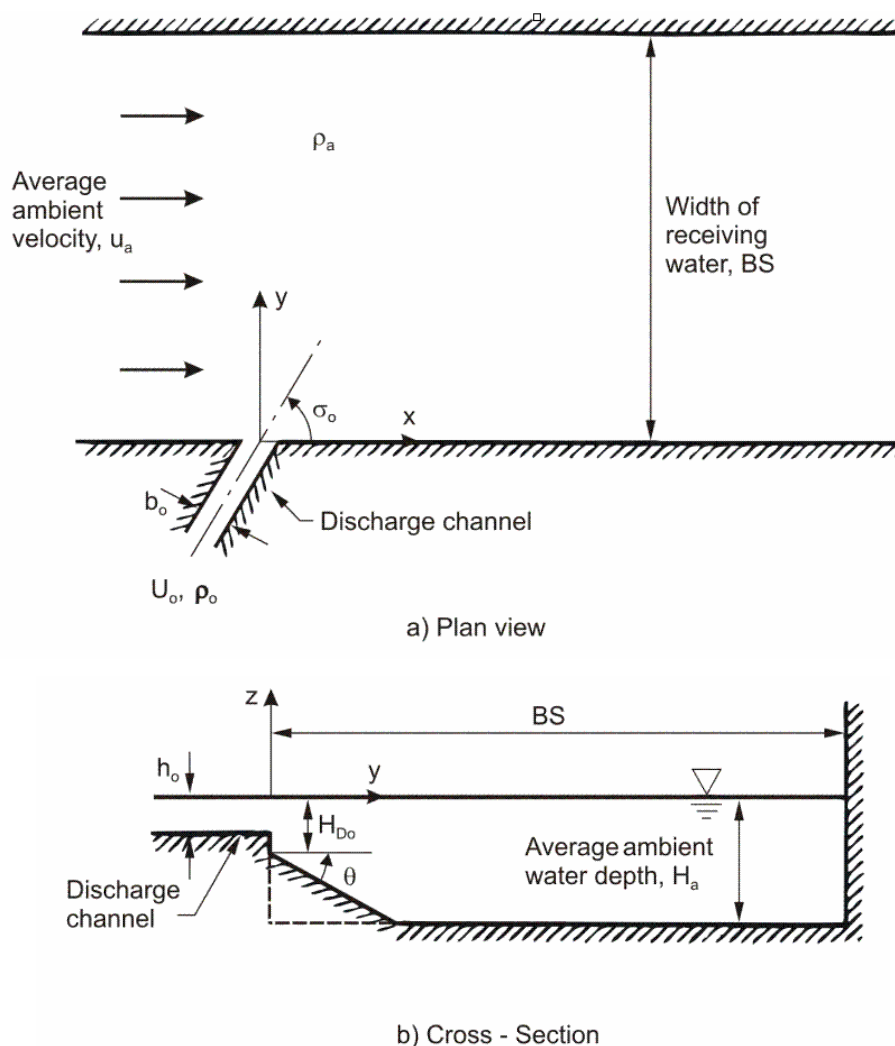


Abbildung 1 Schematisierung der Bauwerks- und Flussgeometrie (Jones et al., 2005)

2.1 Nahfelddurchmischungsprozesse

Nahfeldprozesse sind durch den Volumenfluss Q_o , den Impulsfluss M_o , und den Auftriebsfluss J_o mit der reduzierten Erdbeschleunigung $g'_o = (\Delta\rho_o / \rho_a)g$ charakterisiert (Fischer et al., 1979):

$$Q_o = U_o a_o, \quad M_o = Q_o U_o, \quad Q_o = Q_o g_o' \quad (1)$$

Mit Hilfe der Fließgeschwindigkeit u_a können daraus dynamische Längenskalen definiert werden (Jones et al., 2005):

$$\begin{aligned} L_Q &= Q_o / M_o^{1/2} = \text{discharge length scale} \\ L_M &= M_o^{3/4} / J_o^{1/2} = \text{jet-to-plume length scale} \\ L_m &= M_o^{1/2} / u_a = \text{jet-to-crossflow length scale} \\ L_b &= J_o / u_a^3 = \text{plume-to-crossflow length scale} \end{aligned} \quad (2)$$

Alternativ können auch dimensionslose Parameter zur Charakterisierung der Strömung herangezogen werden: die Quellen Froude Zahl Fr_o und der Fließgeschwindigkeits-Parameter R

$$Fr_o = U_o / (g_o' a_o^{1/2})^{1/2}, \quad R = U_o / u_a \quad (3)$$

mit dem Zusammenhang $Fr_o = L_M / L_Q$ und $R = L_m / L_Q$.

Der dreidimensionale Einleitungsstrahl entwickelt sich aus zumeist gleichförmigen Geschwindigkeitsprofilen im Einleitungskanal infolge starker Scherung zu ungleichförmigen Strahlprofilen. Die Scherung verursacht hierbei eine starke Einmischung von Flusswasser in den Abwasserstrahl. Die Einleitungslängenskala, $L_Q = a_o^{1/2}$, kennzeichnet hierbei den Strömungsbereich der von der Bauwerksgeometrie und somit den Ingenieureingriffen dominiert ist.

Der Auftriebseinfluss ist in diesem Bereich noch sehr schwach. Der Übergangsbereich von Impuls- zu Auftriebsstrahlencharakteristika wird durch die „jet-to-plume“ Längenskala definiert. Impulsdiffusion schwächt den Strahl ab und Auftriebseffekte nehmen zu, wobei dann die vertikale Einmischung reduziert wird und die Fahne sich horizontal ausbreitet. Die „plume-to-crossflow“ Längenskala ist dabei ein Maß zur Bestimmung der Dichteströmung entgegen der Fließgeschwindigkeit, wie sie insbesondere bei Kühlwassereinleitungen in staugeregelten Flüssen zu beobachten ist. Der Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf den Strahl wird durch die „jet-to-crossflow“ Längenskala beschrieben.

Mit dem Vergleich der dynamischen Längenskalen der Gleichungen (2) mit der Flusstiefe H , erhält man das dimensionslose Mehrparameter-Problem (3), welches keinen eindeutigen Lösungsansatz besitzt und eine Vielzahl von Strömungsregime zulässt (Jones et al., 2005).

$$\text{Jet property} = f\left(\frac{L_M}{H}, \frac{L_Q}{H}, \frac{L_b}{H}, \frac{L_m}{H}, A, \sigma_o, \theta, \frac{y_o}{a_o^{1/2}}, \frac{BS}{H}\right) \quad (3)$$

Eine schrittweise Strömungsklassifizierung ermöglicht jedoch für vorherrschende Zustände den dominierenden Fall (eine Strömungsklasse) zu bestimmen,

welcher dann eindeutig gelöst werden kann. Das vollständige Klassifizierungsschemata ist in Jones et al. (2005) zusammengefasst und in Abb. 2 dargestellt.

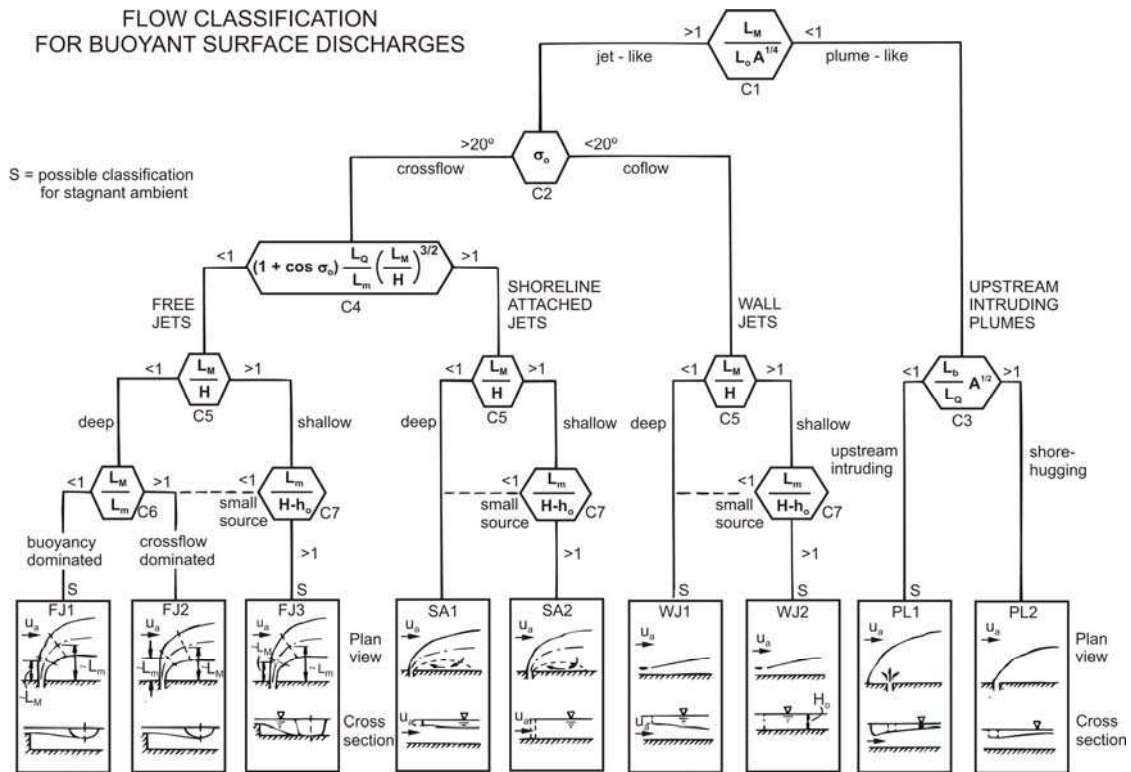


Abbildung 2 Detailliertes Klassifizierungsschema für auftriebsbehaftete Ufereinleitungen mit freier Wasseroberfläche (Jones et al., 2005)

Zur Bestimmung von Strahltrajektorien und Konzentrationsverteilungen werden im Nahfeld oft Strahlintegralmodellansätze verwendet (Schatzmann, 1978). Dafür werden die reynoldsgemittelten Bewegungsgleichungen über die selbstähnlichen Verteilungsfunktionen für Geschwindigkeit und Konzentration (meist gauss-förmig angenommen) über die Strahlquerschnitte integriert (Jirka, 2005). Mit der Annahme, dass turbulente Druckschwankungen im Strahl vernachlässigbar sind, Beschleunigungen durch die Strahlkrümmung klein sind und turbulenter Impuls und Massenfluss proportional zu mittleren Strömungswerten sind, können diese Gleichungen entlang der Strahlachse in diskreten Schritten gelöst werden (Jirka, 2005). Zur Lösung weiterer Strömungsklassen, können neben den dreidimensionalen freien Strahlen auch die zweidimensionalen Formulierungen, z.B. bei an die Bodenberandung anliegenden Strahlen, mit dem Strahlintegralansatz durch Anwendung von Massenerhaltungssätzen und angepassten Verteilungsfunktionen und Anwendung von Spiegelquellen benutzt werden.

2.2 Fernfeldmischprozesse

Nach Ablauf der Nahfeldprozesse oder bei passiven Quellen und in Fällen in denen Auftriebseffekte (Dichteunterschiede) eine untergeordnete Rolle spielen (wie für Abwassereinleitungen oft typische Freispiegelkanäle, die am Ufer in

den Fluss münden) wird die Mischung nur durch die advektiven und diffusen Eigenschaften der Flussströmung getrieben (Jirka et al. 2004). Das Ausbreitungsverhalten von Stoffen im Fernfeld ist durch die Fließgewässerturbulenz gesteuert und kann in Analogie zur molekularen Mischung durch eine effektive turbulente Diffusivität E als Produkt der Wirbelgeschwindigkeit u' und Größe ℓ der dominanten Wirbel $E \sim u'\ell$ bzw. $E \sim u_*H_a$ mit der Reibungsgeschwindigkeit $u_* = \sqrt{gH_aI}$ und Sohlgefälle I dargestellt werden. Die Reibungsgeschwindigkeit steht mit der mittleren Geschwindigkeit durch die Reibungseigenschaften (Rauheit) der Sohle in Verbindung und ist typischerweise 5 bis 10% von U_a , mit höheren Werten für stark raue Sohlen. Die großen Wirbel, die der Wassertiefe entsprechen, $\ell \sim H_a$, sind am effektivsten für Mischprozesse. Darüber hinaus zeigt die Wirbelstruktur eine gewisse Anisotropie im Raum, die Wirbelausdehnung in der vertikalen Richtung z ist stärker limitiert als in der horizontalen Richtung y transversal zur Fließrichtung x . Daraus ergeben sich folgende Ansätze für turbulente Diffusivitäten (Rutherford, 1994): Die vertikale Diffusivität E_z

$$E_z = \alpha_z u_* h \quad (4)$$

wobei $\alpha_z = 0,07 \pm 50\%$ und die horizontale Diffusivität E_y

$$E_y = \alpha_y u_* h \quad (5)$$

wobei $\alpha_y = 0,5 \pm 50\%$ für Flüsse mit moderater Variabilität, also ohne starke Krümmungen und ohne seitliche Totwasserzonen. Für bekannte Trajektorien als Resultat der Nahfeldrechnungen kann die weitere Durchmischung in vertikaler und horizontaler Richtung bestimmt werden. Eine Auswertung und Gegenüberstellung der Fließwege bis zum Ort vertikaler und horizontaler Durchmischung zeigt, dass erstere immer relativ kurze Distanzen (maximal ein paar dutzend Wassertiefen) einnimmt, verglichen mit der horizontalen Durchmischung, welche sich für typische Flussmorphologien ($B/h = 10$ bis 100) über 100 bis 1000 Flussbreiten hinzieht (Jirka et al. 2004).

3 Fallstudie einer industriellen Einleitung in den Rhein

Betrachtet wird eine größere industrielle Einleitung bei Ludwigshafen. Das Abwasser mit dem Volumenstrom von $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$ wird in einer der größten Kläranlagen Europas mit modernsten Verfahren gereinigt und in den Rhein entwässert (Rhein-km 433,2, linkes Ufer).

Durch die für Fließgewässer typischen, sehr flachen Strömungsverhältnisse des Rheins (Breite ca. 300 m , Tiefe $3,0 \text{ m}$, Abfluss $Q_{\text{Rhein}} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, $U_a = 1,3 \text{ m/s}$), kommt es über lange Strecken zu keiner vollständigen Vermischung der Emission mit dem Wasserkörper. An der Gewässerüberwachungsstation in Worms, ca. 10 km unterstrom (Rhein-km 443,3) sind die Einflüsse der Emission, als ausge-

prägte Fahne zu registrieren. Die Gewässerüberwachungsstation Worms, welche von den Ländern Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz seit 1994 betrieben wird, trägt den Abwasserfahnen mit einer außergewöhnlichen, kontinuierlichen Wasserentnahme über den gesamten Flussquerschnitt Rechnung. Die Ergebnisse eines Tracerversuchs sind in Abb. 3 dargestellt.

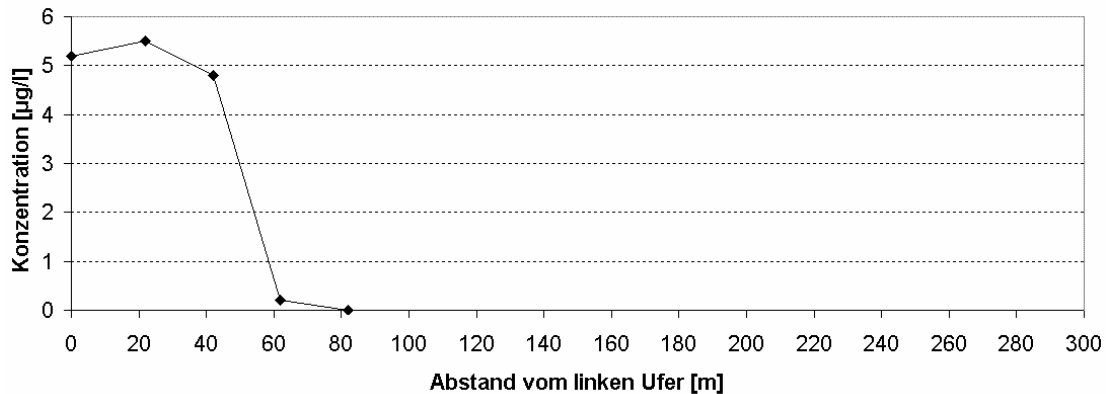


Abbildung 3 Ergebnis einer Tracermessung in Worms. Die Fahne ist 10 km Unterstrom der Einleitung bei einer Flussbreite von ca. 300 m ca. 55 m breit.

4 Mischungsrechnung mit CORMIX

Das von der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA kommissionierte Mischzonenmodell CORMIX (Jirka et al. 1996, sowie Jirka et al. 1999) arbeitet mit der in Kapitel 2 beschriebenen Strömungsklassifizierung und löst die unterschiedlichen Prozesse mit dem integrierten Strahlintegralmodell CorSurf (Jirka, 2005) und einer Vielzahl von Zusatzmodulen um Randeinflüsse (Sohle / Ufer / Wasseroberfläche) und passive Fernfelddurchmischung insbesondere auch bei dichtestratifizierten Gewässern und dichtebeeinflussten Einleitungen (z.B. leichtes Kühlwasser oder schwere Sole) zu berücksichtigen.

Umfangreiche Feld- und Laborversuche (Jones et al., 1996) haben gezeigt, dass CORMIX Prognosen der Stoffkonzentrationen und die damit assoziierten Fahnengeometrien für die meisten Fälle verlässlich sind. Die Auswertung der Abweichung zwischen den prognostizierten Werten und den einzelnen gemessenen Werten an verschiedenen Einleitungsbauwerken ergab eine mittlere Abweichung von +/- 50 %. Das Modell hat sich beim Einsatz unter verschiedensten Regularien zum Wassergütemanagement weltweit bewährt.

4.1 Ergebnisse und Vergleich der Mischungsrechnungen

Für die in Kapitel 3 genannten Einleitungs- und Flussbedingungen wurden CORMIX Rechnungen durchgeführt. Dichteeffekte wurden nicht berücksichtigt, da die Einleitung zwar wärmer, durch einen gewissen Salzgehalt jedoch im Ver-

gleich zum Rheinwasser dichteneutral war. Der Einleitungswinkel betrug 30° zur Fließrichtung des Rheins, das Bauwerk ist ca. 11 m breit und 1.4 m tief. Daraus ergibt sich eine Einleitungsgeschwindigkeit von $U_0 = 0.4$ m/s.

Die Strömungsklassifizierung ergibt Klasse SA1 (s. Abb. 2). Die Rezirkulationszone ist ca. 5 m nach Unterstrom ausgedehnt, bevor sich die Fahne wieder an das Ufer anlegt. Am Ende dieses Nahfeldbereichs fand bereits eine Durchmischung mit dem Faktor 2 statt (maximale Konzentration ist halb so groß, wie die Emissionskonzentration). Nach ca. 200 m ist die Fahne über die Vertikale durchmischt. Die Durchmischung beträgt Faktor 4 und die Fahnenbreite ca. 11 m. Bis zu dieser Stelle ist ein Großteil der intensiven Mischprozesse abgelaufen und die weitere Durchmischung ist nur noch sehr langsam. Nach 9900 m, an der Stelle der Messstation Worms wird von CORMIX eine Durchmischung mit dem Faktor 27 berechnet und eine Fahnenbreite von ca. 53 m vom Ufer (s. Abb. 4). Ein vollständige Durchmischung, wäre bei gleichförmigen Fließbedingungen erst ab ca. 200 km Fließstrecke zu erwarten.

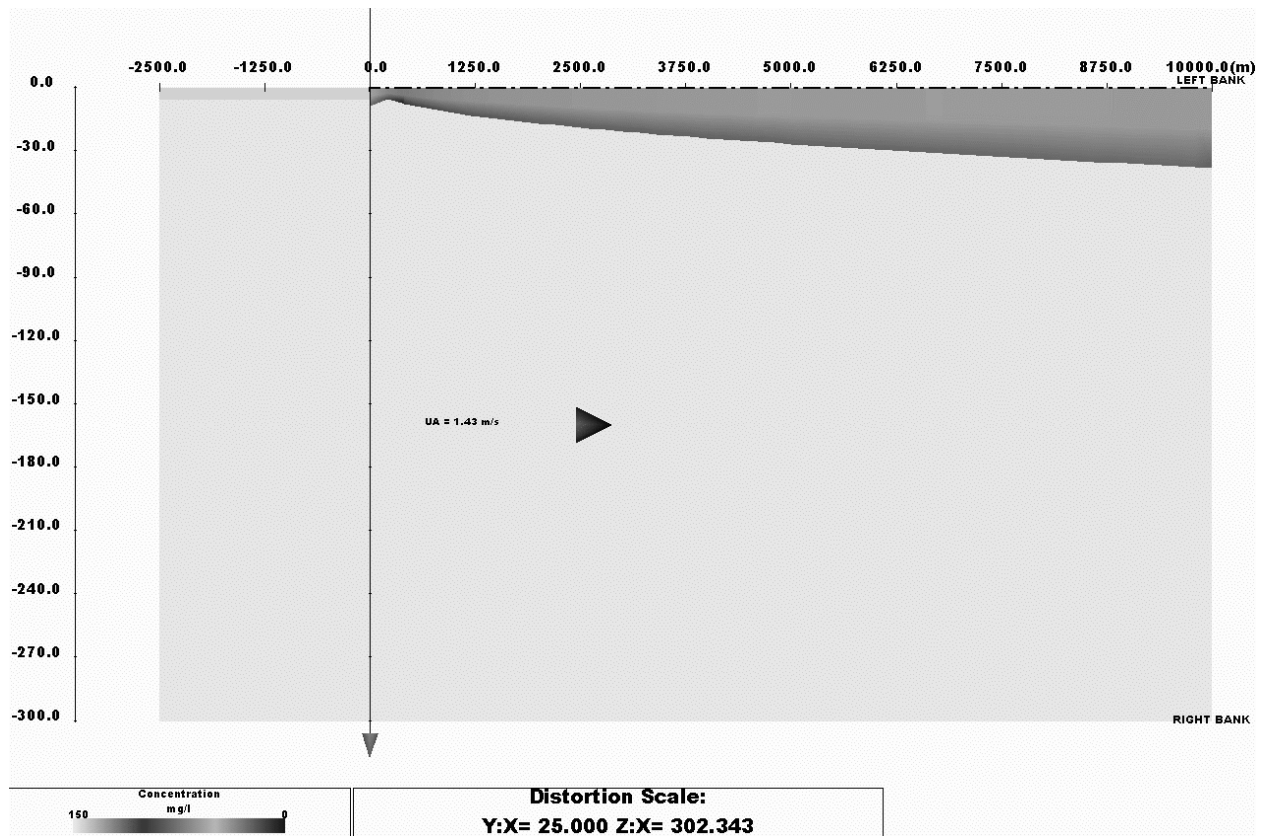


Abbildung 4 CORMIX Ergebnisdarstellung: schematisierter Fahnenverlauf über 10 km Fließstrecke bis zur Rheingütestation in Worms.

Tabelle 1 stellt die Rechnungsergebnisse denjenigen der Messungen in Worms gegenüber. Zu unterscheiden sind hierbei die Ergebnisse der Tracermessungen (stoßförmige Tracerzugabe), die durch zusätzliche Sonden auf der linksrheini-

schen Seite detaillierte Informationen zur Fahnengeometrie liefern und die kontinuierlichen Messergebnisse (kontinuierliche Quelle), die die absoluten Konzentrationswerte der Fahne (betrachtete Stoffe: Cu, NH₄-N, Cl) ohne die Einflüsse longitudinaler Dispersion wiedergeben.

Tabelle 1 CORMIX im Vergleich mit Feldmessungen bei Mittelwasser (1200 m³/s). Werte in Klammern sind für Niedrigwasser im Rhein (600 m³/s).

<i>Distanz von Quelle [m]</i>	<i>Durchmischung [-]</i>	<i>Vertikale Fahnenausdehnung [m]</i>	<i>Horizontale Fahnenausdehnung [m]</i>
0	1	1,4	0
5	2 (NQ: 1,5)	1,8	8 (NQ: 8)
200	4 (NQ: 2,5)	3 (komplette Tiefe)	11 (NQ: 11)
9900	27 (NQ: 12)	3 (komplette Tiefe)	53 (NQ: 45)
9900 (Tracer)	38	-	55
9900 (kontinuierlich)	32	-	40 - 80

Um die Modellempfindlichkeit bezüglich der betrachteten Situation und deren physikalischer Charakteristika abschätzen zu können und um andererseits die Sensitivität und die Optimierungspotentiale der betrachteten Einleitung auf veränderliche Parameter zu bestimmen, wurden weitere Prognoserechnungen durchgeführt. Hierbei wurden insbesondere diejenigen Parameter variiert, die in der Natur schwer zu messen sind bzw. hoher zeitlicher Variabilität unterliegen. Bei Niedrigwasser ($Q_{\text{Rhein}} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$, $H = 2 \text{ m}$, $u_a = 1 \text{ m/s}$) halbiert sich die Durchmischung (Tab. 1). Sensitivitätsstudien zeigten auch den zu vernachlässigbaren Einfluss der nur kleinen Dichteunterschiede.

Eine Modifikation des Einleitungsbauwerks als mehrdüsiges Diffusorrohr mit einer Länge von 34 m und 15 Öffnungen würde die Durchmischung verdoppeln und somit die Belastung (maximale Konzentration) an der Messstelle in Worms halbieren.

5 Zusammenfassung

Natürliche Mischprozesse verlaufen in Gewässern nur sehr langsam und über lange Strecken ab. Schadstoff - Konzentrationen in Emissionsfahnen verringern sich nur langsam. Im betrachteten Fall der industriellen Einleitung zeigt die Prognoserechnung mit CORMIX gute Übereinstimmung mit Feldmessungen. Prognoserechnungen für ein getauchtes, mehrdüsiges Diffusorrohr anstelle einer konventionellen Freispiegelkanaleinleitung zeigen, dass hiermit lokale Konzentrationen halbiert werden könnten. Dies ermöglicht den Einleitern, wie auch den überwachenden Behörden neben der kostspieligen Aufwertung von Kläranlagen (Emissionsreduktion) den Gewässerschutz mit modifizierten Einleitungsbauwerken immissionsorientiert und somit auf das Gewässer abgestimmt durchzuführen. Selbst neueste Klärtechnik kann bei Missachtung der Fahnenbildung im

Gewässer und den damit oft gerade in sensitiven (ufernahen) Bereichen hohen Konzentrationen zu kilometerlangen Belastungsstrecken führen, in denen lokal die Immissionsgrenzwerte nicht eingehalten werden. Leider beinhalten die Genehmigungsverfahren in Deutschland, trotz der klaren Forderung in der EU-Wasserrahmenrichtlinie, diesen Sachverhalt noch nicht. Das Fehlen einer sogenannten Mischzonenregelung (Bleninger et al., 2005) führt somit zu teilweise noch unzureichendem Gewässerschutz.

Danksagung an Dr. Peter Diehl der Rheingütestation Worms (Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz) für Daten und Erläuterung der Berücksichtigung von Emissionsfähnen bei der Messung von Gewässergütedaten.

6 Literatur

- Bleninger T., Hauschild I., Jirka G. H., Leonhard D., Schlenkhoff.,
„Immissionsorientierte Bewertung von Einleitungen in Gewässer: Mischzonen oder Opferstrecken, wo gelten die Gütekriterien?“, KA - Abwasser, Abfall, 51.Jahrgang, Nr.3, März 2004, www.cormix.de
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., 1979, „Mixing in In-land and Coastal Waters“, Academic Press, New York
- Jirka G.H., Bleninger T., Burrows R. & Larsen T., 2004, “Management of point source discharges into rivers: where do environmental quality standards in the new EC-water framework directive apply?” J. River Basin Management, Vol. 2, Issue 1, 2004, www.jrbm.net
- Jirka G.H., ”Buoyant Surface Discharges into Water Bodies. II: Jet Integral Model”, submitted to J. Hyd. Eng., 2005
- Jirka, G.H., v. Carmer, C.F. & Wenka, W., 1999, „Nahfeld von Einleitungen und Bauwerken“, Kap. 9 in Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, Schriftenreihe des DVWK, Heft 127, Bonn.
- Jones, G.M., Nash, J.D., Doneker R.L., & Jirka G.H., “Buoyant Surface Discharges into Water Bodies I: Flow Classification and Prediction Methodology”, submitted to J. Hyd. Eng., 2005
- Jones, G.R., Nash, J.D. and Jirka, G.H., 1996, "CORMIX3: An expert system for mixing zone analysis and prediction of buoyant surface discharges", U.S. Env. Protection Agency, Office of Water, Washington, DC
- Rutherford, J.C., 1994, „River Mixing“, John Wiley, Chichester
- Schatzmann, M., 1978, “The integral equations for round buoyant jets in stratified flows”, J. Applied Math. & Phys. (ZAMP), Vol. 29, 608-630.

Autoren:

Dipl.-Ing. Tobias Bleninger
Prof. Gerhard H. Jirka, Ph.D.
Inst. f. Hydromechanik, Univers. Karlsruhe
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Tel./Fax: +49-721-608-3687 /-2202
bleninger@ifh.uka.de
www.ifh.uni-karlsruhe.de

Dagmar Marena
Universität Koblenz-Landau