Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 106 (1988)
Heft: 6

Artikel: Sicherheit gegen Schadstoffeinleitungen in Flüsse
Autor: Plate, Erich J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85637

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Table 1. Computed Suspended-Load Concentrations C_s, and Measured Total-Load Concentrations, $\bar{C}$, for Experiments of Vanoni and Brooks [6]

Run No.	d	U	S	D_{50}	$\frac{y_b}{D_{50}}$	C_b a)	K_s b)	n c)	z_k d)	C_s (comp'd)	$\bar{C}$ (meas'd)
	cm	cm/s		mm		g/l				g/l	g/l
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	8.7	37.5	0.0025	0.091	6.31	6.97	1.07	3.28	0.76	1.13	3.64
3	7.4	61.6	0.0020	0.091	4.92	48.2	0.77	5.31	1.33	1.93	4.60
5	7.4	68.9	0.0021	0.091	5.38	72.4	0.66	5.06	1.53	2.40	6.92
7	7.7	69.5	0.0026	0.148	4.89	107.2	0.80	5.35	2.14	2.51	3.61

a) Computed from (17)
b) Computed from (11)
c) Computed from (10), using K_s from col. 8
d) Computed from (9) using K_s from col. 8, n from col. 9, and $\beta_n = 1$

Summary

The algebraic simplicity of the power-law velocity profile, and the accuracy with which it predicts velocity and concentration distributions [5] and suspended-sediment discharge would appear to make it an attractive alternative to the river-flow formulations based on the logarithmic velocity distribution.

Author's address: *John F. Kennedy*, Hunter Rouse Professor and Director, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242, USA.

Sicherheit gegen Schadstoff-einleitungen in Flüsse

Einleitung

Eine moderne Industriegesellschaft muss Industriebetriebe zulassen, in denen gefährliche Stoffe gelagert und verarbeitet werden. Auch wenn die Handhabung solcher Stoffe mit grösster Sorgfalt geschieht, lässt sich ein Unfall, durch den solche gefährliche Stoffe in die Vorfluter gelangen können, nicht mit absoluter Sicherheit vermeiden.

VON ERICH J. PLATE, KARLSRUHE

Eine verantwortliche Firmenleitung wird daher mit den Aufsichtsbehörden zusammenarbeiten und gemeinsam Vorkehrungen treffen, um gegebenenfalls auftretende Schäden zu begrenzen. Hierfür müssen Szenarien erstellt werden, in denen der Unfall als eingetroffen angenommen wird. Aus der Analyse der Folgen eines solchen gedachten Unfalls können dann Bereiche identifiziert werden, in denen die Konsequenzen eines Schadens besonders hoch sind, und für solche Punkte können dann Vorsorgemassnahmen gegen einen allfälligen Unfall getroffen werden.

Es erscheint aber wenig sinnvoll, bei Vorsorgemassnahmen von einer gedachten allerungünstigsten Schadenssituation auszugehen, insbesondere wenn eine solche Betrachtung zu sehr hohen Investitionen führen würde. Statt dessen sollte die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten möglicher Kausalketten bei der Betrachtung der Konsequenzen berücksichtigt werden. Dadurch können solche Situationen, deren (bedingte) Auftretenswahrscheinlichkeit bei gegebenem Unfall sehr klein ist, ausgeschlossen werden. Eine solche Betrachtung erfordert eine gemischt deterministisch-statistische Analyse der Kausalkette der Unfallfolgen. Eine solche Analyse soll an einem Beispiel durchgeführt werden.

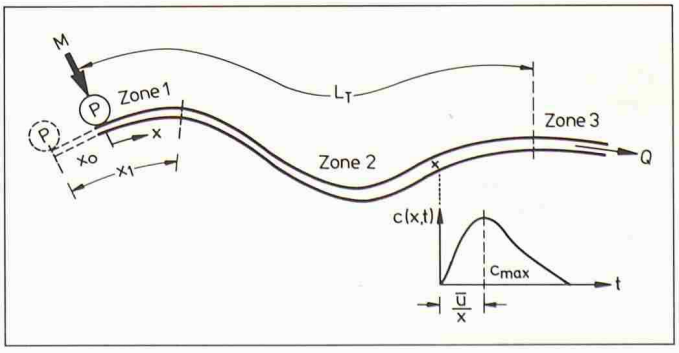
Ausgangspunkt ist die Lage eines Betriebes an einem Punkt A eines Flusses, analog zu der in Bild 1 gezeigten Lage. In diesem Betrieb werden bis zu 500 kg eines toxischen Stoffes in wässriger Lösung gelagert und für einen wichtigen Herstellungsprozess des Betriebes derart verwendet, dass immer, wenn der Stoff aufgebraucht ist, eine neue Menge von 500 kg hergestellt und langsam abgearbeitet wird. Ein Unfall könnte also mit gleicher Wahrscheinlichkeit bei irgendeinem der Füllungszustände zwischen $M = 0$ und $M_{max} = 500$ kg auftreten, d. h. die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Vorhandensein des Stoffes ist:

$$(1) \qquad f_M(M) = \frac{1}{M_{max}} \qquad 0 \leq M \leq M_{max}$$

Bei einem Betriebsunfall muss damit gerechnet werden, dass ein Teil oder die ganze gelagerte Menge in den Vorfluter gelangt. Dadurch können Anrainer geschädigt werden, solange die Konzentration des Stoffes eine vorgegebene Toxidizitätsgrenze von $c_{zul} = 0{,}1$ g/m³ überschreitet. Entlang der gefährdeten Strecke des Flusses sollen vorsorgliche Massnahmen getroffen werden, um die Anrainer vor den Unfallfolgen zu schützen. Im Sinne der in der Einleitung formulierten Sicherheitsbetrachtung soll festgestellt werden, wie gross die bedingte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer über der Toxidizitätsgrenze liegenden Konzentration ist.

Der Vorfluter sei ein Fluss mit Rechteckquerschnitt und kon-

Bild 1. Lageskizze und Definitionen



stanter Breite $b = 150$ m und mit einer Wasserführung Q, deren Auftretenswahrscheinlichkeit durch eine Weibullverteilung, d. h. durch eine Funktion:

$$(2) \qquad F(Q) = 1 - e^{-rQ^s}$$

beschrieben werden kann. Diese Funktion ist vollständig festgelegt durch Mittelwert $Q = 540\ m^3/s$ und Varianz $\sigma_q^2 = (300)^2 m^6/s^2$, mit deren Hilfe die Parameter r und s sich nach bekannten Methoden zu $7{,}53.10^{-6}$ und 1,839 berechnen lassen. Zur Vereinfachung der Aufgabe nehmen wir an, dass die Wasserführung nach dem Unfall für die ganze Dauer der Auswirkung über die Zeit und im Raum konstant bleibt, dass der hydraulische Radius gleich der Wassertiefe h ist und dass ferner k_{st} konstant und gleich 25 ist.

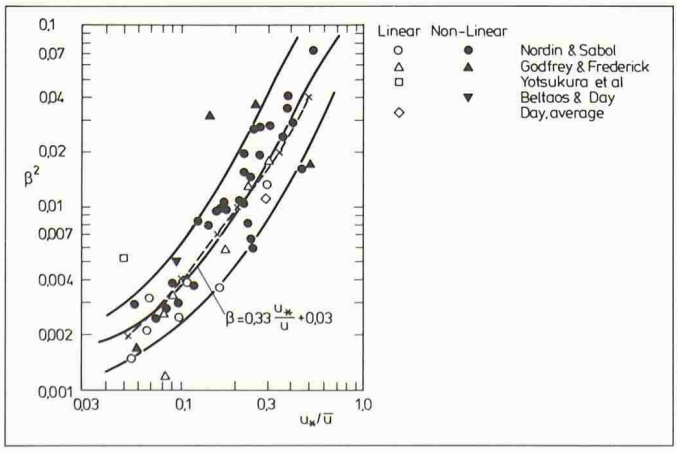
Im Fluss wird M mit Q vermischt zur Konzentration $c(x,t)$. Diese wird durch die Transportgeschwindigkeit v_t (die ungefähr gleich der mittleren Geschwindigkeit u ist) flussabwärts geführt, und durch die Längsdiffusivität über eine immer zunehmende Strecke des Flusses verteilt. Gesucht ist zunächst im deterministischen Teil der Fragestellung der Punkt x, bei dem die maximale Konzentration gerade bis auf einen Wert c_{zul} abgesunken ist, und im stochastischen Teil die dazugehörige Wahrscheinlichkeit $P_u(c_{zul})$.

Das physikalische Modell

Die Ausbreitung von Schadstoffen in einem Vorfluter infolge einer als momentan zu denkenden Einleitungsmenge M erfolgt als Prozess einer Kombination aus Diffusion und Dispersion nach verschiedenen Gesetzmässigkeiten in drei verschiedenen Zonen. Als erste Zone ist der Bereich in der Nähe der Einleitungsstelle zu sehen, in welchem die Geometrie und Strömungsmechanik der Einleitung das Ausbreitungsverhalten massgebend bestimmt [6]. Die Länge x_1 dieser Anfangsstrecke müsste genaugenommen als Zufallsvariable betrachtet werden, wird hier aber als eine Konstante mit Wert 0 behandelt.

Die zweite und dritte Zone haben beide die Eigenschaft, dass die Konzentration praktisch konstant über den Querschnitt ist, so dass nur noch eine Längsdiffusion von Bedeutung ist. Theoretische Modelle für die Längsdiffusivität [4] können jedoch nur in grober Annäherung die wirklichen Verhältnisse wiedergeben. Feldmessungen (z. B. [5]) ergaben Diffusivitäten, die bis zu Faktoren von 1000 von theoretisch vorhergesagten abwichen. Daher muss die Längsdiffusion auf halbempirischer Basis ermittelt werden. Die bisher ausführlichste

Bild 2. Beziehungen zwischen und u_*/u für natürliche Flüsse nach [2]. Die Namen bezeichnen die Quellen der von Beltaos verwendeten Daten



Analyse von Diffusionsdaten für natürliche Flüsse wurde von Beltaos [2] durchgeführt, und an seinen Ergebnissen orientiert sich die vorliegende Untersuchung.

Nach Beltaos unterscheiden sich Zone 2 und 3 durch die funktionale Form der Längsdiffusivität, die etwa denen der Diffusionstheorie für homogene Turbulenz nach Taylor [7] entsprechen. Zone 3 gilt für sehr lange Zeiten und hat eine Diffusivität proportional zur Wurzel aus t und führt nach der klassischen Fickschen Theorie zu einem durch die Gausssche Glockenkurve beschriebenen Konzentrationsprofil. Dieser Bereich beginnt aber erst in einem sehr grossen Abstand von der Quelle, der für die vorgegebene Aufgabenstellung ohne Bedeutung ist.

Massgeblich ist vielmehr der 2. (lineare) Bereich. Für diesen erhält Beltaos für die Konzentrationsverteilung in Längsrichtung folgende Formel für $c(x,t)$:

$$(3) \qquad c(x,t) = \frac{M}{A \cdot x \cdot \beta \cdot \sqrt{2\pi}} \left[\frac{ut}{x} \exp\left[-\left(1 - \frac{ut}{x} \right) \right] \right]^{1/\beta^2}$$

mit Maximalkonzentration c_{max}, für die man aus Gl. (3) erhält:

$$(4) \qquad c_{max}(x) = \frac{M}{A \cdot x \cdot \beta \cdot \sqrt{2\pi}}$$

Bezeichnen wir mit x^* die kritische Entfernung für das Auftreten der Bedingung $c_{max} = c_{zul}$, so ist für $x < x^*$ der Wert c_{zul} überschritten. Für die kritische Entfernung gilt:

$$(5) \qquad x^* = \frac{M}{A \cdot \beta \cdot \sqrt{2\pi}\, C_{zul}}$$

Der Koeffizient β enthält alle Variabilität der Messungen in natürlichen Flüssen, nach Bild 2 ist er dargestellt als Funktion von u_*/u. (Hier wurde β als Wurzel des von Beltaos verwendeten Faktors definiert, wodurch sich Vereinfachungen in der Handhabung dieses Parameters ergaben). Die von Beltaos durch die Daten gelegte Kurve kann durch folgende analytische Form angenähert werden:

$$(6) \qquad \beta = 0{,}33\ \frac{u^*}{u} + 0{,}03$$

wobei $u = Q/b \cdot h$ die querschnittsgemittelte Geschwindigkeit im Fluss, $u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I}$ die Schubspannungsgeschwindigkeit, h = Wassertiefe und I = Gefälle ist. Wird dieser Ausdruck über die Manning-Strickler-Gleichung $Q = k_{st} \cdot h^{5/3} \cdot I^{1/2}$ in Q umgewandelt, so erhält man nach einiger Umformung für die Grenzbedingung:

$$(7) \qquad \frac{M}{c_{zul} \cdot x} \leq \frac{2{,}59\ b^{1/2}}{k_{st}^{3/2} J^{1/4}}\ Q^{1/2} + \frac{0{,}075\ b^{2/5}}{k_{st}^{3/5} J^{3/10}}\ Q^{3/5}$$

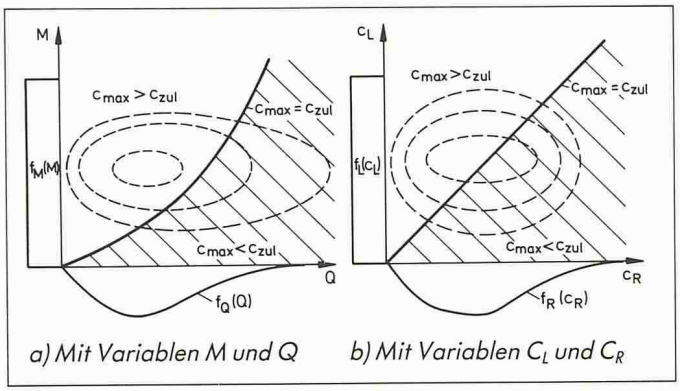
als Ergebnis des deterministischen Modells.

Setzen wir die linke Seite dieser Gleichung gleich C_L und die rechte Seite gleich C_R, so lautet diese Gleichung mit den numerischen Werten des Beispiels:

$$(8) \qquad C_L = \frac{M}{c_{zul} \cdot x} \qquad C_R = 1{,}427\ Q^{1/2} + 0{,}643\ Q^{3/5}$$

Die rechte Seite kann aus später erkennbaren Gründen noch umgewandelt werden durch Abtragen von C_R gegen Q auf doppelt logarithmischem Papier, und man erhält empirisch für das Beispiel die Beziehung:

$$(9) \qquad Q = 0{,}286\ C_R^{1{,}806}$$



a) Mit Variablen M und Q b) Mit Variablen C_L und C_R

Bild 3. Darstellung des Berechnungsganges für die Wahrscheinlichkeit $P_u(c_{zul})$

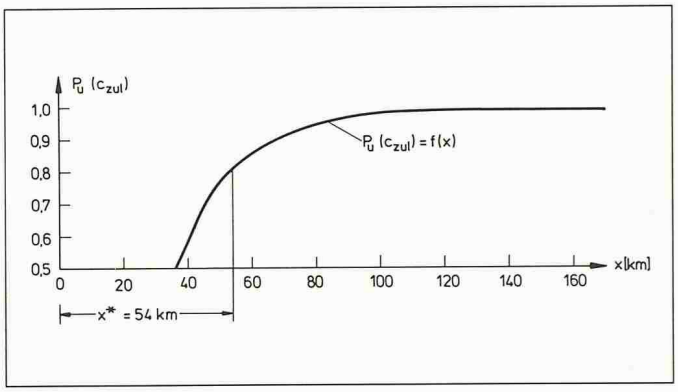


Bild 4. Verlauf der Unterschreitungswahrscheinlichkeit $P_u(c_{zul})$ für das Berechnungsbeispiel

Das stochastische Modell

Der stochastische Teil unseres Problems besteht darin, die nach Eintreten des Schadensfalles S bedingte Wahrscheinlichkeit $P_u(c_{zul}) = P(c_{max} \times c_{zul}\ S)$ zu ermitteln, die durch die Variabilität der in Gl. (7) auftretenden Parameter bestimmt ist. Wir wollen hier nun berücksichtigen, dass die Grössen Q und M durch die Wahrscheinlichkeitsdichten Gl. (1) und Gl. (2) beschrieben sind, wodurch bei jedem x eine Wahrscheinlichkeit $P_u(c_{zul})$ für das Unterschreiten der zulässigen Konzentration entsteht.

Die Wahrscheinlichkeit $P_u(c_{zul})$ wird durch Integration über die zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsdichte $f(M,Q)$ unterhalb der Grenzbedingung $c_{max} \times c_{zul}$ nach folgender Formel ermittelt:

$$(10) \quad P_u(c_{zul} = \iint\limits_{c_{max} < c_{zul}} f(M) \cdot f(Q)\, dM\, dQ$$

Wegen der statistischen Unabhängigkeit von Q und M wurde $f(M,Q)$ in Gl. (10) durch $f_M(M) \cdot f_Q(Q)$ ersetzt.

Der Integrationsbereich für Gl. (10) ist in Bild 3a schraffiert dargestellt. Die Integration bietet insofern Schwierigkeiten, als die Grenzbedingung Gl. (5): $c_{max} = c_{zul}$ in Bild 3a als Kurve erscheint. Deshalb ist es besser, durch eine weitere Transformation zur Vereinfachung der Lösung dafür zu sorgen, dass die Grenzbedingung Gl. (5) in der Wahrscheinlichkeitsebene in eine Gerade umgewandelt wird. Dies gelingt, indem wir nicht M und Q, sondern C_L und C_R als Zufallsvariablen verwenden. In der Ebene dieser Zufallsvariablen ist Gl. (5) eine Gerade. Damit erhalten wir als Ausgangsgleichung für die Wahrscheinlichkeitsanalyse den Ausdruck:

$$(11) \quad P_u(c_{zul}) = \int_0^\infty \left\{ \int_0^{C_R} f_R(C_R) \cdot f_L(C_L)\, dC_L \right\} dC_R = 1 - \int_0^\infty f_L(C_L)\, F_R(C_L)\, dC_L$$

wobei wieder die statistische Unabhängigkeit berücksichtigt wurde. Dabei ist $f_L(.)$ die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Auftreten von C_L, $f_R(.)$ diejenige für das Auftreten des Ausdruckes C_R, und $F_R(C_L)$ ist die zugehörige, bei $C_R = C_L$ ausgewertete Verteilungsfunktion. Dies ist das Freudenthalsche Integral, das in der Theorie der Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle spielt (siehe hierzu z. B. [3]).

Setzen wir in Gl. (11) die Ausdrücke Gl. (1), Gl. (2) und Gl. (8) ein, so erhalten wir die einfache Lösung:

$$(12) \quad P_u(c_{zul}) = 1 - \frac{c_{zul} \cdot x}{M_{max}} \int_0^{c_{Lmax}} (1 - e^{-7{,}53 \cdot 10^{-7} C_L^{3{,}319}})\, dC_L$$

Da die Variable C_L von x abhängig ist, muss die Integration nach Gl. (12) für jedes x wiederholt werden, wodurch sich die gesuchte Funktion $P_u(c_{zul})$ ergibt. Die Lösung erfolgt numerisch und ist an Bild 4 gezeigt. Zum Abschluss muss noch eine Entscheidung getroffen werden (nach Kriterien, die durch das zu erwartende Risiko bestimmt sind), wie gross der zulässige Wert von $P(c_{zul})$ sein darf. Für das Beispiel wählen wir $P_u(c_{zul}) = 0{,}80$. Damit erhalten wir aus Bild 4: $x^* = 54$ km als Lösung der gestellten Aufgabe.

Eine Untersuchung der Unsicherheit dieser Aussage kann nach bekannten Verfahren [3], [1] durchgeführt werden. Hierüber wird an anderer Stelle berichtet.

Schlusswort

In den letzten Jahrzehnten haben sich Hydraulik und Hydrologie in immer stärkerem Masse auseinanderentwickelt. Die Hydraulik entwickelt sich in die Richtung immer verfeinerter Methoden zur Erfassung der strömungsmechanischen Gesetzmässigkeiten, und die Hydrologie führt zu immer detaillierteren Abflussmodellen. Es wird Zeit, dass diese Entwicklungen wieder zusammengeführt werden. Wie das geschehen kann, wurde in der vorliegenden Arbeit an Hand eines einfachen Beispiels gezeigt. Dabei ging es weniger um die Lösung des angesprochenen Problems als um das Aufzeigen eines Weges, der für viele Fragestellungen des Wasserbaus beschritten werden kann. Es ist mir eine Ehre, diesen Beitrag meinem Kollegen Dracos zu widmen, der noch zu denjenigen gehört, die gleichermassen mit der Hydraulik wie mit der Hydrologie vertraut sind.

Adresse des Verfassers: Prof. *Erich J. Plate*, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.

Literatur

[1] *A. H. S. Ang* und *W. H. Tang:* «Probability concepts in engineering planning and design: Vol. 2 – Decision, risk and reliability», J. Wiley, New York 1984

[2] *S. Beltaos:* «Longitudinal dispersion in rivers», Proc. ASCE, Bd. *106*, 1980, Journal of the Hydraulics Division, S. 151–172

[3] *L. Duckstein* und *E. Plate* (Herausgeber): «Engineering reliability and risk in water resources», M. Nijhoff Publishers, Dordrecht 1987

[4] *H. B. Fischer:* «Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open channel flow», Annual Reviews of Fluid Mechanics, Bd. *5*, 1973, S. 59–77

[5] *J. Grimm-Strele:* «Diffusion and Dispersion in Flüssen», Wasserwirtschaft, Bd. *73*, 1983, S. 380–385

[6] *E. Naudascher* und *L. Fink:* «Ausbreitung bei Einleitung in Strömungen», Wasserwirtschaft Bd. *73*, 1983, S. 369–379

[7] *G. I. Taylor:* «Diffusion by continuous movements», Proceedings of the Mathematical Society, London, England, Series 2, Bd. *20*, 1921, S. 196–212