

# DWA-Regelwerk

## **Merkblatt DWA-M 544-1**

**Ausbreitungsprobleme von Einleitungen – Prozesse, Methoden  
und Modelle – Teil 1: Anwendungsgrundlagen, Schätzformeln und  
eindimensionale Modelle**

Juli 2016

VORSCHAU



VORSCHAU

# DWA-Regelwerk

## **Merkblatt DWA-M 544-1**

Ausbreitungsprobleme von Einleitungen – Prozesse, Methoden und Modelle – Teil 1: Anwendungsgrundlagen, Schätzformeln und eindimensionale Modelle

Juli 2016

VORSCHAU

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) setzt sich intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasser- und Abfallwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz.

In Europa ist die DWA die mitgliederstärkste Vereinigung auf diesem Gebiet und nimmt durch ihre fachliche Kompetenz bezüglich Regelsetzung, Bildung und Information sowohl der Fachleute als auch der Öffentlichkeit eine besondere Stellung ein. Die rund 14 000 Mitglieder repräsentieren die Fachleute und Führungskräfte aus Kommunen, Hochschulen, Ingenieurbüros, Behörden und Unternehmen.

## Impressum

### Herausgeber und Vertrieb:

DWA Deutsche Vereinigung für  
Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.  
Theodor-Heuss-Allee 17  
53773 Hennef, Deutschland  
Tel.: +49 2242 872-333  
Fax: +49 2242 872-100  
E-Mail: [info@dwa.de](mailto:info@dwa.de)  
Internet: [www.dwa.de](http://www.dwa.de)

### Satz:

DWA

### Druck:

Siebengebirgsdruck, Bad Honnef

### ISBN:

978-3-88721-280-3 (Print)  
978-3-88721-336-7 (E-Book)

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

© DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2016

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Merkblattes darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Digitalisierung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen werden.

## Vorwort

Einleitungen von Stoffen und/oder Wärme haben – mitunter gravierende – Konsequenzen für die Qualität des im Gewässer herrschenden chemischen und ökologischen Zustands. Für die Planung von Einleitungen oder auch die Beurteilung unplanmäßiger, etwa unfallbedingter Gewässerverunreinigungen ist ein Verständnis der maßgebenden, den Transport und die Ausbreitung bestimmenden Prozesse sowie, darauf aufbauend, die Anwendung geeigneter Methoden und Modelle erforderlich. Um diesen Themenkomplex zu behandeln und fachlich fundierte Hilfestellung für praktische Aufgabenstellungen anzubieten, hat der DWA-Fachausschuss WW-3 „Hydraulik“ die Arbeitsgruppe WW-3.4 „Ausbreitungsprobleme von Einleitungen“ zunächst unter der Leitung des dann leider viel zu früh verstorbenen Professors Gerhard H. Jirka eingerichtet. Nach einem in der KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 2009 veröffentlichten Aufruf zur Mitarbeit wurden die Arbeiten an dem nunmehr fertiggestellten Merkblatt begonnen, das in zwei Teilen veröffentlicht wird.

„Ausbreitungsvorgänge“ bzw. „Ausbreitungsprobleme“ umfassen in ihrer vollen Allgemeinheit deutlich mehr als in dem vorliegenden Merkblatt DWA-M 544 beim besten Bemühen der Verfasser abgedeckt werden konnte, sodass an dieser Stelle eine Präzisierung geboten erscheint. Gegenstand beider Teile des Merkblattes ist die Behandlung der Ausbreitungs- und Transportvorgänge von gelösten Stoffen und Wärme, nicht aber von Feststoffen (Geschiebe, Schweb- und Schwimmstoffen), Gasbläschen („*bubble plumes*“) oder Öl.

Auf Einleitung, Anwendungsbereich und Symbolverzeichnis zum hier vorliegenden Teil 1 des Merkblattes folgt die Beschreibung der wichtigsten bei der Ausbreitung von gelösten Stoffen und Wärme ablaufenden Prozesse und Mechanismen. Daran schließt ein Methodenüberblick an, der es dem Leser/der Leserin erlauben soll, für die in Aussicht genommene Anwendung eine Zuordnung zu den in weiterer Folge behandelten Methodengruppen vorzunehmen. Im ersten Teil des Merkblattes wird vertiefend auf den Bereich Schätzformeln, Grobscreening und eindimensionale Modelle eingegangen. Der zweite Teil (Merkblatt DWA-M 544-2) befasst sich mit der Gruppe der Längenmaßstabsmodelle sowie den Modellen der Hydroinformatik bis hin zu prozessorientierten experimentellen oder numerischen Detailuntersuchungen. Die Verfasser waren bemüht, Vor- und Nachteile der Methoden darzustellen und – auch anhand von Anwendungsbeispielen – Anhaltspunkte zu einer zweckmäßigen Verfahrensabgrenzung zu bieten.

Besonderer Dank gilt Herrn Markus Urbanek vom Bundesamt für Wasserwirtschaft in Wien für seine Unterstützung im Rahmen der Manuskripterstellung.

Wien, im Mai 2016

Bernhard H. Schmid

In diesem Merkblatt wird im Hinblick auf einen gut verständlichen und lesefreundlichen Text für personenbezogene Berufs- und Funktionsbezeichnungen verallgemeinernd die männliche Form verwendet. Alle Informationen beziehen sich in gleicher Weise auf beide Geschlechter.

### Frühere Ausgaben

Kein Vorgängerdokument

## Verfasser

Das Merkblatt wurde von der DWA-Arbeitsgruppe WW-3.4 „Ausbreitungsprobleme von Einleitungen“ im DWA-Fachausschuss WW-3 „Hydraulik“ erstellt, der folgende Mitglieder angehören:

BLENINGER, Tobias	Prof. Dr.-Ing., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasilien
BRENDA, Marian	Dr.-Ing., Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
BUNG, Daniel B.	Prof. Dr.-Ing., FH Aachen, Aachen
HENGL, Michael	Dipl.-Ing. Dr. techn., Bundesamt für Wasserwirtschaft, Wien
SCHMID, Bernhard H.	Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn., Technische Universität Wien, Wien (Sprecher)
SCHNEIDER, Eugenia	Dr.-Ing., Ingenieurbüro für Wasserbau Schneider GmbH, Leonberg
SONNENBURG, Alexander	Dr.-Ing., Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
STOSCHEK, Oliver	Dr.-Ing., DHI-WASY GmbH, Syke

Als Gäste haben mitgewirkt:

ROESCH, Josef	Dr.-Ing., RWE Power AG, Biblis
ZÖLLER, Alexander	Dipl.-Ing., Ingenieurbüro für Wasserbau Schneider GmbH, Leonberg

Projektbetreuer in der DWA-Bundesgeschäftsstelle:

SCHRENK, Georg	Dipl.-Geogr., Hennef Abteilung Wasser- und Abfallwirtschaft
----------------	--

# Inhalt

Vorwort .....	3
Verfasser .....	4
Bilderverzeichnis .....	6
Benutzerhinweis .....	8
Einleitung .....	8
<b>1 Anwendungsbereich .....</b>	<b>9</b>
<b>2 Symbole und Abkürzungen .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Mischungs- und Transportprozesse .....</b>	<b>11</b>
3.1 Einleitungscharakteristika .....	11
3.1.1 Vorbemerkungen .....	11
3.1.2 Einzelstrahleinleitung .....	12
3.1.3 Diffusoreinleitung .....	13
3.1.4 Freispiegeleinleitung .....	15
3.2 Vorflutcharakteristika .....	16
3.3 Prozessbeschreibungen .....	17
3.3.1 Mischungs- und Transportbereiche .....	17
3.3.2 Durchmischung .....	20
3.3.3 Mischungs- und Transportgleichung .....	21
3.3.4 Strahldurchmischung .....	23
3.3.5 Vorflutmischung und Transport .....	26
3.4 Transformations- und Abbauprozesse .....	28
3.5 Zusammenfassung und Empfehlungen .....	28
<b>4 Methodenüberblick .....</b>	<b>29</b>
4.1 Der Stufenaufbau .....	29
4.2 Stufe 0: Einleitungen ohne Schadstoffe in bedenklicher Konzentration .....	29
4.3 Stufe 1: Grobscreening, Schätzformeln und eindimensionale Modelle .....	30
4.4 Stufe 2: Strahlintegral- und Längenmaßstabsmodelle .....	31
4.5 Stufe 3: Methoden der Hydroinformatik .....	33
4.6 Stufe 4: Prozessorientierte Detailuntersuchungen .....	34
<b>5 Grobscreening, Schätzformeln und eindimensionale Modelle .....</b>	<b>35</b>
5.1 Vorbemerkung .....	35
5.2 Schätzformeln und einfache Algorithmen für die Durchmischung in Fließgewässern .....	35
5.2.1 Allgemeines .....	35
5.2.2 Grobscreening .....	36
5.2.3 Voraussetzungen und Anwendungsgrenzen der Schätzformeln .....	36
5.2.4 Vertikale und longitudinale Durchmischung .....	37
5.2.5 Laterale Durchmischung .....	42
5.2.6 Schätzung von Diffusionskoeffizienten – Beispiele .....	44

5.2.7	Schätzformeln für den Stofftransport in Längsrichtung .....	47
5.2.8	Einfache Algorithmen .....	47
5.3	Schätzformeln für die Durchmischung in Küstengewässern .....	49
5.3.1	Grundlagen und Anwendungsgrenzen .....	49
5.3.2	Küstengewässer .....	49
5.4	Eindimensionale Modelle für den longitudinalen Stofftransport in Fließgewässern mit Totzonenaustausch .....	50
5.4.1	Begriffe und Mechanismen .....	50
5.4.2	Modellkonzeptionen .....	51
5.4.3	Lösungsmethodik für die Totzonengleichungen .....	53
5.4.4	Aspekte der Parameterwahl.....	54
<b>Quellen und Literaturhinweise .....</b>		<b>56</b>

## Bilderverzeichnis

Bild 1:	Schematische Darstellung einer Einleitung mithilfe eines Einzelstrahls .....	12
Bild 2:	Schematische Darstellung einer Einleitung über mehrere Düsen. Fotografie des Diffusors für die Kühlwassereinleitung des Kraftwerks Donaustadt in die Donau .....	14
Bild 3:	Schematische Darstellung von verschiedenen Freispiegeleinleitungen und deren vereinfachte Schematisierung.....	15
Bild 4:	Kühlwassereinleitung des Kraftwerks Philippsburg in den Rhein .....	16
Bild 5:	Schemadarstellung von typischen vertikalen Dichteverteilungen .....	17
Bild 6:	Illustration unterschiedlicher Mischungs- und Transportprozesse .....	18
Bild 7:	Illustration der verschiedenen Mischungs- und Transportbereiche .....	18
Bild 8:	Beispiel für Zeit- und Längenskalen der unterschiedlichen Mischungs- und Transportbereiche .....	19
Bild 9:	Momentaufnahme eines Impulsstrahls sowie die Langzeitbelichtung eines Laborexperiments .....	24
Bild 10:	Illustration unterschiedlicher Strahlverläufe, abhängig von a) Vorfluterdichte, b) Vorflutergeschwindigkeit, c) Dichteschichtung im Vorfluter .....	24
Bild 11:	Schematische Darstellung von Diffusoreinleitungen im Laborexperiment .....	24
Bild 12:	Schematische Darstellung von Diffusoreinleitungen .....	25
Bild 13:	Illustration der natürlichen Durchmischung für eine Einleitung von warmem Abwasser über ein Diffusorrohr in einen gefrorenen Fluss.....	27
Bild 14:	Stufenaufbau der Ausbreitungsmodelle .....	29
Bild 15:	Schematische Darstellung der Durchmischung .....	35
Bild 16:	Vergleich der Durchmischungsdefinitionen.....	39
Bild 17:	Vertikale Durchmischung im Längsprofil (dimensionslose Darstellung) .....	40
Bild 18:	Gültigkeitsbereich für die Abschätzung der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit über die mittlere Fließgeschwindigkeit.....	41
Bild 19:	Diffusivität $e_z$ für die vertikale Durchmischung als Funktion von Wassertiefe und Gefälle.....	41
Bild 20:	Konzentrationsverteilung über die Breite bei Einleitung an der Wasseroberfläche in den Querprofilen mit 95 % und 99 % Durchmischung .....	43
Bild 21:	Isolinien für den Mischweg in km bei Einleitung am Ufer als Funktion von Breite und Fließtiefe für 95 % horizontale Durchmischung – Faktor 70 in Gl. (51).....	44

Bild 22:	Isolinien für den Mischweg in km bei Einleitung am Ufer als Funktion von Breite und Fließtiefe für 95 % horizontale Durchmischung und große Sohlrauheit – Faktor 7 in Gl. (54).....	46
Bild 23:	Beispiel für die Ausbreitung einer impulsförmigen Einleitung .....	49
Bild 24:	Relativer Fehler in der Vorhersage der Scheitelkonzentration bei Abweichung des Simulationsdurchflusses vom Durchfluss bei der Modellkalibrierung .....	55

VORSCHAU

## Benutzerhinweis

Dieses Merkblatt ist das Ergebnis ehrenamtlicher, technisch-wissenschaftlicher/wirtschaftlicher Gemeinschaftsarbeit, das nach den hierfür geltenden Grundsätzen (Satzung, Geschäftsordnung der DWA und dem Arbeitsblatt DWA-A 400) zustande gekommen ist. Für dieses besteht nach der Rechtsprechung eine tatsächliche Vermutung, dass es inhaltlich und fachlich richtig ist.

Jedermann steht die Anwendung des Merkblattes frei. Eine Pflicht zur Anwendung kann sich aber aus Rechts- oder Verwaltungsvorschriften, Vertrag oder sonstigem Rechtsgrund ergeben.

Dieses Merkblatt ist eine wichtige, jedoch nicht die einzige Erkenntnisquelle für fachgerechte Lösungen. Durch seine Anwendung entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln oder für die richtige Anwendung im konkreten Fall; dies gilt insbesondere für den sachgerechten Umgang mit den im Merkblatt aufgezeigten Spielräumen.

## Einleitung

Stoff-, Wärme- und Impulseinträge durch punktförmige Einleitungen vorwiegend aus der Industrie und kommunalen Kläranlagen, Mischwasserentlastungen und Kraftwerken stellen trotz großer Investitionen in Behandlungstechnologien auch in Deutschland immer noch beträchtliche Einwirkungen auf Binnen- und Küstengewässer dar. Der sachgerechte Umgang mit Punktquellen spielt daher eine wesentliche Rolle für die Verbesserung der Gewässerqualität.

Traditionell wurden Punktquellen zunächst allein durch die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten bemessen und kontrolliert, was bereits zu einer erheblichen Reduktion der Einträge und zu einer merklichen Verbesserung der Wasserqualität in vielen europäischen Ländern führte. Weitergehende Maßnahmen, auch zur effizienten und zielgerichteten Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (2000), benötigen jedoch zusätzlich die Berücksichtigung der Auswirkungen der Einleitungen auf das Gewässer.

Entgegen der Meinung, dass der ingenieurtechnische Gewässerschutz am Kläranlagenablauf endet, können hydraulisch optimierte Einleitungsbauwerke die maximalen Schadstoffkonzentrationen im Gewässer um ein Vielfaches verringern und damit die ökologischen Bedingungen erheblich verbessern. Statt einfacher Kanäle oder Rohrleitungen werden immer häufiger Diffusor-Bauwerke mit zahlreichen Öffnungen verwendet, um einerseits die lokalen Belastungen zu reduzieren und andererseits die natürlichen Mischungsprozesse im Vorfluter zu unterstützen. Die sachgerechte Bemessung der Einleitungsbauwerke ist somit stark gewässerabhängig und erfordert neben der detaillierten Kenntnis des Gewässers auch eine – je nach Ausgangssituation und Aufgabenstellung unterschiedlich komplexe – Analyse der Interaktion mit dem eingeleiteten Fluid. Ausgehend von der prozessorientierten Beschreibung dieser Interaktion wird in den beiden Teilen des Merkblattes versucht, nach einem einführenden Methodenüberblick eine Darstellung zeitgemäßer Methoden und Modelle zur Behandlung praktischer Ausbreitungsprobleme von planmäßigen wie unplanmäßigen (z. B. unfallbedingten) Einleitungen zu geben. Der Schwerpunkt des vorliegenden ersten Teiles liegt dabei auf der Erläuterung der physikalischen Prozesse und auf einem Methodenüberblick sowie auf Verfahren für Abschätzung, Grobscreening und eindimensional-instationäre Modellierung.

VORSCHAU

Einleitungen von Stoffen und/oder Wärme haben – mitunter gravierende – Konsequenzen für die Qualität des im Gewässer herrschenden chemischen und ökologischen Zustands. Für die Planung von Einleitungen oder auch die Beurteilung unplanmäßiger, etwa unfallbedingter Gewässerverunreinigungen ist ein Verständnis der maßgebenden, den Transport und die Ausbreitung bestimmenden Prozesse sowie, darauf aufbauend, die Anwendung geeigneter Methoden und Modelle erforderlich.

„Ausbreitungsvorgänge“ bzw. „Ausbreitungsprobleme“ umfassen in ihrer vollen Allgemeinheit deutlich mehr als in dem vorliegenden Merkblatt, das in zwei Teilen erscheint, abgedeckt werden konnte. Gegenstand beider Teile des Merkblattes ist die Behandlung der Ausbreitungs- und Transportvorgänge von gelösten Stoffen und Wärme, nicht aber von Feststoffen (Geschiebe, Schweb- und Schwimmstoffen), Gasbläschen („bubble plumes“) oder Öl.

Entgegen der Meinung, dass der ingenieurtechnische Gewässerschutz am Kläranlagenablauf endet, können hydraulisch optimierte Einleitungsbauwerke die maximalen Schadstoffkonzentrationen im Gewässer um ein Vielfaches verringern und damit die ökologischen Bedingungen erheblich verbessern. Statt einfacher Kanäle oder Rohrleitungen werden immer häufiger Diffusor-Bauwerke mit zahlreichen Öffnungen verwendet, um einerseits die lokalen Belastungen zu reduzieren und andererseits die natürlichen Mischungsprozesse im Vorfluter zu unterstützen. Die sachgerechte Bemessung der Einleitungsbauwerke ist somit stark gewässerabhängig und erfordert neben der detaillierten Kenntnis des Gewässers auch eine – je nach Ausgangssituation und Aufgabenstellung unterschiedlich komplexe – Analyse der Interaktion mit dem eingeleiteten Fluid.

Ausgehend von der prozessorientierten Beschreibung dieser Interaktion wird in den beiden Teilen des Merkblattes versucht, nach einem einführenden Methodenüberblick eine Darstellung zeitgemäßer Methoden und Modelle zur Behandlung praktischer Ausbreitungsprobleme von planmäßigen wie unplanmäßigen (z. B. unfallbedingten) Einleitungen zu geben.

Der Schwerpunkt des hier vorliegenden ersten Teiles (Merkblatt DWA-M 544-1) liegt dabei auf der Erläuterung der physikalischen Prozesse und auf einem Methodenüberblick sowie auf Verfahren für Abschätzung, Grobscreening und eindimensional-instationäre Modellierung.

Strahlintegral- und Längenmaßstabsmodelle, Methoden der Hydroinformatik und prozessorientierte Detailuntersuchungen bilden den Gegenstand des zweiten Teiles (Merkblatt DWA-M 544-2).

Zusammen verfolgen beide Teile des Merkblattes das Ziel, Anwendern eine fachlich fundierte Hilfestellung für die Behandlung von Ausbreitungsproblemen zu geben.

Das Merkblatt richtet sich an Fachleute in Behörden, Ingenieurbüros, Firmen und Verbänden, die mit der Lösung von Ausbreitungsproblemen bei Einleitungen betraut sind. Vor diesem Anwendungshintergrund soll das Merkblatt als Informationsquelle für praxisnahe Ansätze dienen.

ISBN: 978-3-88721-280-3 (Print)  
978-3-88721-336-7 (E-Book)

**Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)**

Theodor-Heuss-Allee 17 · 53773 Hennef  
Telefon: +49 2242 872-333 · Fax: +49 2242 872-100  
info@dwa.de · www.dwa.de