

DWA-Regelwerk

Merkblatt DWA-M 540

Mehrdimensionale morphodynamisch-numerische Modelle für Fließgewässer

Juli 2021

VORSCHAU

VORSCHAU

DWA-Regelwerk

Merkblatt DWA-M 540

Mehrdimensionale morphodynamisch-numerische Modelle für Fließgewässer

Juli 2021

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

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

© DWA, 1. Auflage, Hennef 2021

Satz:

Christiane Krieg, DWA

Druck:

druckhaus köthen GmbH & Co KG

ISBN:

978-3-96862-123-4 (Print)

978-3-96862-124-1 (E-Book)

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

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

Bilder und Tabellen, die keine Quellenangaben aufweisen, sind im Rahmen der Merkblätterstellung als Gemeinschaftsergebnis des DWA-Fachgremiums zustande gekommen. Die Nutzungsrechte obliegen der DWA.

Vorwort

Bei der etwas langen Bezeichnung „mehrdimensionale morphodynamisch-numerische Modelle“ im Titel dieses Merkblatts handelt es sich um Computermodelle, die die Entwicklung der Sohle eines Fließgewässers berechnen können. Dies tun sie für eine gegebene Geometrie des Fließgewässers und für bestimmte Abflüsse aufgrund von Bilanzgleichungen und insbesondere aufgrund der empirischen Gleichungen für die Transportraten von Feststoffen über der Sohle. Bereits seit vielen Jahren sind diese Modelle für den Einsatz in der Ingenieurpraxis verfügbar. Grundlegende Qualitätsanforderungen an die Entwicklung der Modelle, wie Stabilität, korrekte Kopplung von Strömung und Feststofftransport sowie die exakte Erhaltung der Feststoffmasse im Modell, sind heute vollständig erfüllt. Die Validierungen, wie in 5.6 und in den Beispielen in Abschnitt 6 beschrieben, zeigen gute Ergebnisse. Damit steht der Ingenieurpraxis ein neues Werkzeug zur Verfügung. Vom Fachausschuss WW-2 „Morphodynamik und Sedimentmanagement“ wurde daher eine Arbeitsgruppe WW-2.4 „Feststofftransportmodelle (numerisch, physikalisch, hybrid)“ zur Anfertigung dieses Merkblatts eingerichtet.

Gegenüber gegenständlichen, also maßstäblich verkleinerten physikalischen Modellen stellen die in diesem Merkblatt besprochenen mehrdimensionalen morphodynamisch-numerischen Modelle inzwischen eine sinnvolle Alternative dar. Die in den gegenständlichen Modellen aufgrund des Modellmaßstabs stets auftretende Frage der Ähnlichkeit ist in den numerischen Modellen kein Problem. Der gemeinsame Transport der verschiedenen Fraktionen wird realistisch reproduziert. Trotzdem bleiben Laborversuche weiterhin unverzichtbar um das Verhalten der Feststoffe unter kontrollierten Bedingungen genau zu untersuchen. Im Arbeitsbericht „Feststofftransportmodelle für Fließgewässer“ aus dem Jahr 2003 sind beide Modellklassen sowie eindimensionale morphodynamisch-numerische Modelle ausführlich dargelegt. Der Arbeitsbericht gibt das damals vorhandene Fachwissen in einer deutlich größeren Breite wieder und stellt damit eine sinnvolle Ergänzung zu diesem Merkblatt dar.

Der breite Anwendungsbereich der Modelle ist in Abschnitt 1 angesprochen. Er reicht von Maßnahmen zur Verbesserung der Ökologie an Fließgewässern über flussbauliche Planungen bis zum Feststoffhaushalt und Stauhaltungen. Leider setzen die Einschränkungen in der räumlichen Ausdehnung und den simulierten Zeiträumen der Modelle, wie in 5.2 dargelegt, den Anwendungen noch immer enge Grenzen. Es folgt die kurze Erläuterung der Begriffe und der Abkürzungen in Abschnitt 2.

Die Erfahrung zeigt, dass die Gewässersohle unter der Einwirkung der Strömung immer wieder ganz bestimmte Formen herausbildet. Die Anwender sollten diese Formen, die zur Morphodynamik von Fließgewässern gehören, kennen, um sie in den Modellergebnissen wiederzufinden und auf dieser Basis eine fundierte Interpretation abzugeben. Zu diesem Zweck sind die typischen Formen der Fließgewässersohle in Abschnitt 3 zusammengestellt. Weitergehende Informationen sind im Merkblatt DWA-M 526 zu finden.

Die Arbeitsgruppe hat es sich von Beginn an zum Ziel gemacht, eine einheitliche und systematische Darlegung der wesentlichen Rechengrundlagen abzugeben. Diese Grundlagen sind in den in Abschnitt 4 zusammengestellten Gleichungen für die physikalischen Zusammenhänge gegeben.

Ohne Vereinfachungen und empirische Beziehungen kann der Transport der unzähligen Feststoffpartikel in Gewässerabschnitten jedoch leider nicht berechnet werden. Das Vorgehen bei der erforderlichen Kalibrierung und bei eventuell vorzunehmenden Sensitivitätsuntersuchungen wird in Abschnitt 5 mitgeteilt. Darüber hinaus sind Hilfestellungen zum Vorgehen beim Aufbau von Modellanwendungen sowie die Anforderungen an die Ausgangsdaten in Abschnitt 5 eingefügt.

Die Modelltechnik ist so weit entwickelt, dass sie den planenden Ingenieur mit zuverlässigen Aussagen zur Sohlenlagenentwicklung unterstützen kann. Dies wird im Merkblatt anhand verschiedener lehrreicher Beispiele in Abschnitt 6 demonstriert. Von den zwölf Beispielen stammen sieben aus Laborversuchen. Besonders erfreulich ist, dass drei Beispiele auf Naturmessungen basieren. Die Arbeitsgruppe ist der Auffassung, dass die beschriebenen Modelle heute ein Standardwerkzeug zur Unterstützung der Planung an Fließgewässern darstellen.

Meinen herzlichen Dank muss ich allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe aussprechen, die trotz Widerständen die Arbeit am Merkblatt aufrechterhalten haben. Hierbei möchte ich Frau Dr. Kopmann besonders hervorheben. Ohne ihre Unterstützung wäre das Merkblatt wohl nicht entstanden.

Darmstadt, im Juni 2021

Peter Mewis

In diesem Merkblatt werden, soweit wie möglich, geschlechtsneutrale Bezeichnungen für personenbezogene Berufs- und Funktionsbezeichnungen verwendet. Sofern dies nicht möglich ist, wird die weibliche und die männliche Form verwendet. Ist dies aus Gründen der Verständlichkeit nicht möglich, wird nur eine von beiden Formen verwendet. Alle Informationen beziehen sich aber in gleicher Weise auf alle Geschlechter.

Frühere Ausgaben

Kein Vorgängerdokument

VORSCHAU

Verfasser

Dieses Merkblatt wurde von der DWA-Arbeitsgruppe WW-2.4 „Feststofftransportmodelle (numerisch, physikalisch, hybrid)“ im Auftrag des DWA-Hauptausschusses „Wasserbau und Wasserkraft“ (HA WW) im DWA-Fachausschuss WW-2 „Morphodynamik und Sedimentmanagement“ erarbeitet.

An der Erstellung des Merkblatts waren folgende Personen beteiligt:

MEWIS, Peter	PD Dr.-Ing. habil., TU Darmstadt, Darmstadt (Sprecher)
KOPMANN, Rebekka	Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
NUJIC, Marinko	Dr.-Ing., Ingenieurbüro Dr. Nujic, Samobor, Kroatien
RUETHER, Nils	Assoc. Prof. Dr., Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Trondheim
SIVIGLIA, Annunziato	Assoc. Prof. Dr., Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering, University of Trento, Trento
SÖHNGEN, Bernhard	Prof. Dr.-Ing., Bad Schönborn (vormals Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)), Karlsruhe
VETSCH, David F.	Dr., Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich

Die Arbeitsgruppe ist dem DWA-Fachausschuss WW-2 „Morphodynamik und Sedimentmanagement“ zugeordnet, dem die folgenden Mitglieder angehören:

PFEFFERKORN, Christel	Dipl.-Ing., Geschäftsführerin, PICON GmbH, Dresden (Obfrau)
HUBER, Nils	Dr.-Ing., Referatsleiter Flussbau (W2), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe (Stellvertretender Obmann)
ARNOLD, Jens	Dipl.-Ing., bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven
DETERING, Michael	Dr.-Ing., Detering & Partner, Werne
ETTMER, Bernd	Prof. Dr.-Ing., Hochschule Magdeburg-Stendal, FB Wasser- und Kreislaufwirtschaft, Magdeburg
HAHN, Jens	Dr. Dipl.-Geogr., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat G2, Koblenz
HILDEBRANDT, Ina	Dr. rer. nat., BGD ECOSAX GmbH, FB Gewässerbewirtschaftung / Limnologie, Dresden
HILMER, Uwe	Dipl.-Ing., Technischer Leiter Umwelttechnik, Detlef Hegemann Umwelttechnik GmbH, Bremen
JAHNS, Christin	Dr., Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft, Referat 44, Dresden
JANSON, Johannes von	Wolter Hoppenberg, Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, Hamm
JENTSCH, Stefan	Dipl.-Ing., Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Pirna
KÜHNE, Elke	Dipl.-Ing., Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Dresden, Projektgruppe GKE, Dresden
MEWIS, Peter	PD Dr.-Ing. habil., TU Darmstadt, Darmstadt
SEIDEL, Björn	Bauass. Dipl.-Ing., HPA Hamburg Port Authority AöR, Hamburg
SÖHNGEN, Bernhard	Prof. Dr.-Ing., Bad Schönborn (vormals Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe)

WIEPRECHT, Silke	Prof. Dr.-Ing., Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umeltsystemmodellierung, Stuttgart
WOYWOD, Christoph	Dipl.-Ing. (FH), Hülskens Wasserbau GmbH & Co. KG, Bodenmanagement, Wesel
WURPTS, Andreas	Dr.-Ing., NLWKN-Bst. Norden-Norderney, Forschungsstelle Küste, Norderney

Projektbetreuer in der DWA-Bundesgeschäftsstelle:

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

VORSCHAU

Inhalt

Vorwort	3
Verfasser	5
Bilderverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	11
Hinweis für die Benutzung	13
Einleitung	13
1 Anwendungsbereich	15
2 Begriffe	16
2.1 Definitionen.....	16
2.2 Abkürzungen.....	17
2.3 Formelzeichen	17
3 Die zu modellierende Flussmorphologie	21
3.1 Allgemeines	21
3.2 Bettformen und Effekte der Flussmorphologie.....	21
3.2.1 Laufformen	21
3.2.2 Uferformen	22
3.2.3 Querprofilform.....	22
3.2.4 Kolke	23
3.2.5 Bettformen.....	23
3.2.6 Effekte aus gradiertem Transport.....	26
3.3 Modellierbarkeit	26
3.4 Schwierigkeitsgrade der morphodynamischen Modellierung.....	27
3.5 Menschliche Eingriffe	28
4 Physikalische Grundlagen, Modellgleichungen	28
4.1 Strömung	28
4.1.1 Strömungsmodelle	28
4.1.2 Definition der Sohlenschubspannung	28
4.1.3 Fließgesetze.....	28
4.1.4 Sohlenrauheit	30
4.1.4.1 Äquivalente Sandrauheit.....	30
4.1.4.2 Aufteilung der Rauheiten der Fließgewässersohle.....	30
4.1.4.3 Kornrauheit.....	32
4.1.4.4 Formrauheit.....	33
4.1.4.5 Sohlenformenschätzer (engl. <i>roughness predictor</i>)	33
4.1.4.6 Riffelfaktor	35
4.1.5 Sekundärströmungen.....	36
4.1.6 Implementierung der Reibungsbeiwerte bei unterschiedlichem Wandabstand	38
4.2 Geschiebetransport / Feststofftransportkapazität (Einkorn).....	39
4.2.1 Vorbemerkung	39

4.2.2	Bewegungsbeginn	39
4.2.3	Bewegungsbeginn auf geneigter Sohle.....	41
4.2.4	Formeln der Transportkapazitäten	42
4.2.5	Einfluss der Sohlenneigung auf die Richtung des Geschiebetransports	46
4.2.6	Bodenevolutionsgleichung	48
4.2.7	Ungleichgewicht im Einkorn-Feststofftransport	48
4.2.8	Anpassungslänge im Geschiebetransport	49
4.2.9	Verfügbarkeit von Sedimenten in der Gewässersohle	50
4.3	Schwebstofftransport / Schwebstofftransportmodellierung	51
4.3.1	Sinkgeschwindigkeit von nicht kohäsivem Sediment	51
4.3.2	Beginn der Suspension.....	52
4.3.3	Suspensionskonzentration	52
4.3.3.1	Konzentrationsprofil im Gleichgewicht nach Rouse und Referenz- höhe „a“	52
4.3.3.2	Gleichgewichtskonzentration	54
4.3.3.3	Aufwirbelung von Sohlenmaterial	54
4.3.3.4	Einfluss von Transportkörpern an der Sohle	55
4.3.3.5	Die Schmidt-Zahl	55
4.3.4	Schwebstofftransportraten von Einkorn-Sediment	56
4.3.4.1	Gleichgewichtstransport	56
4.3.4.2	Auftreten von Ungleichgewichtstransport	56
4.3.4.3	Ungleichgewichtstransport in zweidimensionalen Modellen	57
4.3.5	Aufwirbelung von kohäsivem Sediment	58
4.3.6	Sedimentation von kohäsivem Sediment	59
4.4	Fraktionierter Transport	60
4.4.1	Beschreibung als Sohlenmaterial	60
4.4.2	„Equal Mobility“-Ansatz.....	61
4.4.3	„Hiding and Exposure“ – Korrektur in Transportformeln	61
4.4.4	Ungleichgewicht in Mehrkornsimulationen	64
4.5	Sohlenmodelle.....	64
4.5.1	Mehrkornsimulation.....	64
4.5.2	Mischungsschichtkonzept, Einschichtmodelle	65
4.5.3	Zweischichtmodell.....	66
4.5.4	Dreidimensionale Sohle	67
5	Modellaufbau und Betrieb	68
5.1	Von der Fragestellung zum Modell	68
5.2	Anforderungen und Auswahl des numerischen Verfahrens.....	68
5.3	Modellierungsstrategien	71
5.4	Diskretisierung, Anfangs- und Randbedingungen (Numerik)	73
5.5	Kalibrierung.....	77
5.6	Validierung.....	80
5.7	Szenarienrechnungen.....	80
5.8	Interpretation der Ergebnisse	81
5.9	Zuverlässigkeitsanalyse und Sensitivitätsuntersuchungen.....	81

6	Beispiele für morphodynamische Modellierungen	83
6.1	Allgemeines	83
6.2	Analytische Lösungen.....	83
6.2.1	Vorbemerkungen	83
6.2.2	Verlagerung einer Düne bei stationärem Abfluss.....	83
6.2.3	Entwicklung einer kegelförmigen Düne.....	85
6.3	Plausibilitätstest, nicht erodierbare Flächen.....	87
6.4	Vergleich mit Laborversuchen	90
6.4.1	Vorbemerkungen	90
6.4.2	Anfangskolk	90
6.4.3	Kurvenkolk, 180°-Krümmer.....	92
6.4.4	Dammbruch in einem Kanal mit plötzlicher Aufweitung und beweglicher Sohle.....	95
6.4.5	Eigendynamische Aufweitung.....	98
6.4.6	Sedimentation infolge Geschiebezugabe	100
6.4.7	Entwicklung einer Deckschicht durch selektive Erosion.....	102
6.4.8	Rinnenversuch mit alternierenden Bänken	105
6.5	Vergleich mit morphologischen Veränderungen in der Natur.....	107
6.5.1	Vorbemerkungen	107
6.5.2	Donau unterhalb Wiens	108
6.5.3	3D-Morphodynamische Simulation eines sandigen Abschnitts der Donau.....	110
6.5.4	Modellierung des Abtrags der Schüttwälle in der Mittleren Isar unterhalb des Oberförhringer Wehrs	111
	Quellen und Literaturhinweise	119

Bilderverzeichnis

Bild 1:	Laufformen von Fließgewässern.....	21
Bild 2:	Alternierende Bänke in einem geraden Abschnitt der Oder oberhalb von Hohenwutzen.....	24
Bild 3:	Sohlenformen	25
Bild 4:	Widerstandsbeiwerte nach Darcy-Weisbach eines Laborgerinnes nach Messdaten von SIMONS & RICHARDSON (1961) als Funktion der Froude-Zahl des Kornes.....	31
Bild 5:	Äquivalente Sandrauheit k_s in Abhängigkeit von mittlerer Korngröße d_{50} und Schubspannungsgeschwindigkeit unter der Annahme Fließtiefe $h = 1$ m nach YALIN & DA SILVA (2001) mit dem Programm „Rfactor“ berechnet	35
Bild 6:	Beginn der Bewegung nach van Rijn im Shields-Diagramm für typisches Sediment in Wasser.....	40
Bild 7:	Richtung der Einzelkräfte, Strömung parallel zum Ufer	41
Bild 8:	Verlauf der dimensionslosen Transportkapazität ϕ über die dimensionslose Sohlenschubspannung Fr^* für fünf Formeln und Daten von Gilbert.....	46
Bild 9:	Sinkgeschwindigkeiten natürlicher Sedimente	51
Bild 10:	Beginn der Suspension und Beginn der Bewegung für Sand der Dichte 2,65 kg/l.....	52
Bild 11:	Suspensionskonzentrationsverteilung nach ROUSE (1937).....	53
Bild 12:	Definition des Referenzniveaus über einem mittleren Sohlenniveau nach VAN RIJN ...	54

Bild 13:	Messungen eines Konzentrationsprofils im Rhein	55
Bild 14:	Definitionsskizze der vertikalen Sedimentflüsse in einem 2D-Modell.....	57
Bild 15:	Verlauf der Funktion C_m/C_a aus Integration.....	58
Bild 16:	Abhängigkeit der kritischen Schubspannung für die Erosion kohäsiver Sedimente von der Dichte der Sedimente.....	59
Bild 17:	Vergleich der Mehrkornansätze	63
Bild 18:	Sohlenschichtung und Strömungsangriff auf die Mischsohle	65
Bild 19:	Dreidimensionale Sohle mit Mischungsschicht, die sich durch die festen Sohlenschichten bewegt.....	67
Bild 20:	Modellkomplexität in Anhängigkeit der Zeit- und Raumdiskretisierung	69
Bild 21:	Grundlagendaten und Netzerstellung.....	74
Bild 22:	Ausschnitt aus dem Gitternetz im Bereich eines Bühnenfelds	75
Bild 23:	Beispiel aus dem Gitternetz im Bereich des Brückenbauwerks	76
Bild 24:	Anfangs- und Endzustand der Düne mit stationärem Geschwindigkeitsfeld.....	84
Bild 25:	Anfangszustand für die Sohlenlage der kegelförmigen Düne als Draufsicht	86
Bild 26:	Resultierende Sohlenlage (Draufsicht) nach einer Simulationszeit von 100 Stunden; deutlich ist die sternförmige Form der Düne zu erkennen	87
Bild 27:	Anfangszustand mit nicht erodierbarem Sohlenbereich.....	88
Bild 28:	Zeitliche Entwicklung der Sohlenlagen ausgehend von einer nicht geneigten Sohle bis zum Erreichen der Gleichgewichtssohle parallel zur Wasserspiegellage unter Berücksichtigung eines nicht erodierbaren Horizonts	89
Bild 29:	Sohlenlage im Anfangszustand und Lage des nicht erodierbaren Horizonts	91
Bild 30:	Ergebnis der numerischen Simulation für den Rinnenversuch mit Kolkbildung.....	92
Bild 31:	Versuchsaufbau 180°-Krümmer	93
Bild 32:	Sohlenänderungen an den Querschnitten (a) 45°, (b) 90°, (c) 135°, und (d) 180° mit Transportformel von van Rijn, mit der Transportformel von van Rijn modifiziert mit <i>hiding</i> und <i>exposure</i> und WU et al. (2000) im Vergleich zu Messungen.....	94
Bild 33:	Mittlere Korngrößen am Querschnitt 90° mit Transportformel von VAN RIJN et al. und von WU et al. im Vergleich zu Messungen	95
Bild 34:	Kanal mit plötzlicher Aufweitung und Anfangszustand als Draufsicht	96
Bild 35:	Verlauf der Wasserspiegellage an den Punkten P1 bis P6 im Experiment und in der numerischen Simulation	97
Bild 36:	Verlauf der Sohlenlage bei den Querprofilen CS1 ($x = 4,1$ m) und CS2 ($x = 4,4$ m, siehe Bild 34) im Experiment und in der numerischen Simulation.....	97
Bild 37:	Versuchshalle mit Versuchsgerinne und abschließendem Kunststoffprofil, Ansicht von unterstrom.....	98
Bild 38:	Geometrische Kenngrößen des dargestellten Versuchs	99
Bild 39:	Entwicklung der Sohlenlage und der Gerinnebreite bei einem konstanten Abfluss von 43 l/s.....	99
Bild 40:	Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen	100
Bild 41:	Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen, Querprofil bei $x = 35$ m....	100
Bild 42:	Vergleich der gemessenen (dicke Linie) und berechneten Sohlenänderung zum Zeitpunkt $t = 7.200$ s, für MPM-Vorfaktor 4 und MPM-Vorfaktor 6; die Sohlenänderung wurde auf die Referenzhöhe $h = 0,223$ m bezogen	101
Bild 43:	Versuchsaufbau	102
Bild 44:	Ergebnis der Kalibrierung und der Validierung des Sohlengefälles	104
Bild 45:	Ergebnis der Kalibrierung und der Validierung der Kornzusammensetzung der Deckschicht	105

Bild 46:	Gemessene Längsprofile der Sohle am Ende des Versuchs. Differenz der gemessenen Sohlenlage auf der rechten und auf der linken Gerinneseite	106
Bild 47:	Zeitliche Änderung der Gerinnesohle (Längenmaßstab mit 0,5 skaliert)	107
Bild 48:	Sohlenänderung nach 10 Stunden	107
Bild 49:	Ganglinie 2002 am Pegel Wildungsmauer (Donau km 1894.7); magenta: Simulationszeitraum	108
Bild 50:	Gemessene Wassertiefen vor (02-1) und nach (02-2) dem Hochwasserereignis 2002 sowie die gemessenen (meas) und berechneten (calc) Sohlenänderungen	109
Bild 51:	Sieblinie des suspendierten Materials und des Sohlenmaterials	110
Bild 52:	Gemessene (links) und simulierte (rechts) Sohlenänderungen während eines Hochwassers mit $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$	111
Bild 53:	Schematische Skizze der Geschiebeumsetzung in das Unterwasser des Oberföhringer Wehrs (1995/96)	112
Bild 54:	Schüttwälle in der Isar bei Oberföhring: am 2. Mai 1996 und am 15. Mai 1996 .	112
Bild 55:	Schüttwälle in der Isar bei Oberföhring: am 6. Mai 1996 und am 15. Mai 1996 .	113
Bild 56:	Isarbett bei Oberföhring: am 9. August 1996	114
Bild 57:	Modellabschnitt	114
Bild 58:	Querprofil aus dem Modellierungsabschnitt mit beiden Schüttwällen	115
Bild 59:	Abflussganglinie für die 2D-Modellierung	116
Bild 60:	Zwei berechnete Querprofile P1 und P4 der Isar nach a) 1,8 Tagen; b) 5 Tagen und c) 6 Tagen	117
Bild 61:	Berechnete (oben) und gemessene (unten) mittlere Sohlenhöhen der Isar unterhalb des Oberföhringer Wehrs	118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abgrenzung natürlicher morphologischer Formen	25
Tabelle 2:	Modellierbarkeit morphologischer Erscheinungen	26
Tabelle 3:	Umrechnung verschiedener Reibungsbeiwerte	29
Tabelle 4:	Typische Sinkgeschwindigkeiten	51
Tabelle 5:	Verwendete Kombinationen von Sedimenttransportformeln zur Berücksichtigung von fraktioniertem Transport	62
Tabelle 6:	Parameter des Strömungsmodells	78
Tabelle 7:	Parameter des morphodynamischen Modells	79
Tabelle 8:	Anfangs- und Randbedingungen für die Dünenverlagerung	83
Tabelle 9:	Gewählte morphodynamische Parameter für die Dünenverlagerung	85
Tabelle 10:	Anfangs- und Randbedingungen für die Dünenverlagerung	85
Tabelle 11:	Gewählte morpho- und hydrodynamische Parameter für die sternförmige Dünenausbreitung	86
Tabelle 12:	Anfangs- und Randbedingungen für den Plausibilitätstest für nicht erodierbare Flächen	88
Tabelle 13:	Gewählte morphodynamische Parameter für den Plausibilitätstest für nicht erodierbare Flächen	89
Tabelle 14:	Anfangs- und Randbedingungen für den Rinnenversuch Kolkbildung	90
Tabelle 15:	Gewählte morphodynamische Parameter für den Rinnenversuch Kolkbildung	91

Tabelle 16:	Anfangs- und Randbedingungen für den 180°-Krümmer	93
Tabelle 17:	Gewählte morphodynamische Parameter für den 180°-Krümmer	93
Tabelle 18:	Anfangs- und Randbedingungen für den Dambruch mit plötzlicher Aufweitung	95
Tabelle 19:	Gewählte morphodynamische Parameter für den Dambruch mit plötzlicher Aufweitung	96
Tabelle 20:	Anfangs- und Randbedingungen für den Großversuch „Weiches Ufer“	98
Tabelle 21:	Gewählte morphodynamische Parameter für den Großversuch „Weiches Ufer“	99
Tabelle 22:	Anfangs- und Randbedingungen für den Rinnenversuch Geschiebezugabe	100
Tabelle 23:	Gewählte morphodynamische Parameter für den Rinnenversuch Geschiebezugabe	101
Tabelle 24:	Anfangs- und Randbedingungen für den Rinnenversuch Sohlenabpflasterung	102
Tabelle 25:	Unterschiede der beiden simulierten Versuche	103
Tabelle 26:	Gewählte morphodynamische Parameter für den Rinnenversuch Sohlenabpflasterung	103
Tabelle 27:	Anfangs- und Randbedingungen für den Rinnenversuch mit alternierenden Bänken	105
Tabelle 28:	Gewählte morphodynamische Parameter für den Rinnenversuch mit alternierenden Bänken	106
Tabelle 29:	Gewählte morphodynamische Parameter für das Modell Donau unterhalb Wiens	109
Tabelle 30:	Gewählte morphodynamische Parameter für das Modell sandiger Donauabschnitt	111
Tabelle 31:	Gewählte morphodynamische Parameter für das Modell Abtrag der Schüttwälle	115

VORSCHAU

Hinweis für die Benutzung

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 ein Merkblatt besteht eine tatsächliche Vermutung, dass es inhaltlich und fachlich richtig ist.

Jeder Person steht die Anwendung des Merkblatts 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.

Normen und sonstige Bestimmungen anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder anderer Vertragsstaaten des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum stehen Regeln der DWA gleich, wenn mit ihnen dauerhaft das gleiche Schutzniveau erreicht wird.

Einleitung

Die Analyse und Prognose des Feststofftransports und damit die Morphodynamik der Fließgewässer, das heißt die Veränderung der Gestalt von Fließgewässern durch bettformende Prozesse, ist ein wichtiges Ziel flussbaulicher Untersuchungen. Hierzu werden in der heutigen Ingenieurpraxis überwiegend hydrodynamisch-numerische Strömungs- und Feststofftransportmodelle eingesetzt, wobei zu meist tiefengemittelt-zweidimensionale Modelle verwendet werden, die den Schwerpunkt des vorliegenden Merkblatts bilden.

Selbst wenn heute viele Fließgewässer durch anthropogene Eingriffe wie Begradigung, Uferschutz, Fluss- und Stauregelung, Bewirtschaftung der Sohlensedimente durch Baggern und Verklappen, Revitalisierungsmaßnahmen etc. stark überprägt sind, bleibt der Sedimenttransport als treibende Kraft der Morphodynamik meist aktiv und soll zum Beispiel zur ökologischen Aufwertung stark veränderter Gewässer sogar wieder verstärkt werden. Deshalb ist der Geschiebe- und Schwebstofftransport bei allen Gewässern mit konstruktiv nicht völlig unterbundenen bettbildenden Prozessen im Flussbau stets zu berücksichtigen. Dies vor allem, wenn die Nachhaltigkeit von Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen überprüft und durch angepasste Maßnahmen wie zum Beispiel örtliche Sohlenbefestigungen und Feststoffbewirtschaftungen optimiert werden soll.

Diese Modelle haben hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit, zum Beispiel zur Begrenzung des Aufwands zur Erstellung von Modellen, der Stabilität und Genauigkeit der numerischen Berechnungen bei geeigneter Diskretisierung des Rechenaufwands auf üblichen PCs und der Präsentation der Berechnungsergebnisse inzwischen eine so gute Qualität erreicht, dass Anwender die Modelle verwenden können ohne umfänglich über die zugrundeliegenden fachwissenschaftlichen Grundlagen Bescheid zu wissen. Dies ist aber für eine problemgerechte Modellierung zwingend notwendig, vor allem wenn die meist parameterbehafteten, semiempirischen Ansätze zur Quantifizierung des Feststofftransports ausgewählt und durch Parameteranpassungen kalibriert werden müssen. Dies betrifft zum Beispiel die Ansätze zur Veränderung der Kornzusammensetzung der Sohle, die Bildung von Transportkörpern und damit zusammenhängend der Rauheit der Sohle, die fraktionierte Menge des Geschiebe- und Schwebstofftransports, die Wirkung von Längs- und Querneigungen der Sohle auf den Feststofftransport oder die Interaktion des Feststofftransports mit dem Strömungsfeld wie die Berücksichtigung von Sekundärströmungen bei der Ermittlung der transportwirksamen Sohlen-

VORSCHAU

Dieses Merkblatt behandelt die fachwissenschaftlichen Grundlagen und die Anwendung von mehrdimensionalen, numerischen Feststofftransportmodellen für Fließgewässer im Binnenbereich mit Schwerpunkt auf tiefengemittelte, zweidimensionale Modelle. Einzelne auf dem Markt verfügbare Modellverfahren werden nicht präferiert. Deshalb gibt es auch keine Hinweise auf deren spezielle Eigenschaften, zum Beispiel den angebotenen semiempirischen Ansätzen zur Modellierung der Feststofftransportphänomene oder deren konkrete Handhabung. Dies bleibt den Benutzerhandbüchern der Anbieter und deren Schulungen überlassen.

Dem Entwicklungsstand und Funktionsumfang gängiger Modellverfahren gemäß, beschränkt sich das Merkblatt auf große, insbesondere breite Fließgewässer, das heißt, solche mit generell flachen Längs- und Querneigungen der Sohle, wie sie bei alluvialen Gewässern mit rolligem Sohlensubstrat vorkommen. Gewässerberandungen aus bindigem Material wie Ton, bei denen es zum Beispiel zur Ausbildung von Steilufern, gegebenenfalls sogar Unterspülungen kommt, werden nicht betrachtet. Unberücksichtigt bleiben auch Kolkbildungen, die von ausgeprägt dreidimensionalen Strömungsstrukturen wie Hufeisenwirbeln an Pfeilern hervorgerufen werden.

VORSCHAU

ISBN: 978-3-96862-123-4 (Print)
978-3-96862-124-1 (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