

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Pasche, Erik; Nasermoaddeli, Mohammad Hassan; Plöger, W.; Kräßig, S.; Lippert, K.; Rath, S.

Wie viel Physik braucht die Strömungsberechnung in der Ingenieurpraxis?

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/20.500.11970/103824>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pasche, Erik; Nasermoaddeli, Mohammad Hassan; Plöger, W.; Kräßig, S.; Lippert, K.; Rath, S. (2006): Wie viel Physik braucht die Strömungsberechnung in der Ingenieurpraxis?. 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. 237-260.

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.



Wie viel Physik braucht die Strömungsberechnung in der Ingenieurpraxis?

E. Pasche,

S. Kräbig, K. Lippert, H. Nasermoaddeli, W. Plöger, S. Rath

Die in Spiegellinienmodellen und 2-dimensionalen tiefengemittelten Strömungsmodellen enthaltenen halb-empirischen Ansätze zur Abschätzung der Rauheit und Wirbelviskosität werden auf ihre physikalische Begründbarkeit hin überprüft und die auf dieser Grundlage erzielbare Genauigkeit der Berechnung mit Hilfe von reproduzierten Strömungssituationen in zahlreichen Fließgewässern Deutschlands nachgewiesen. Die Abschätzung des Fließwiderstandes wird alternativ auf Basis des Fließgesetzes von Gauckler-Manning-Strickler und von Darcy-Weisbach überprüft. Für die 2-dimensionale Strömungsberechnung wird zur Abschätzung der Wirbelviskosität die Annahme eines konstanten Wertes mit verschiedenen Ansätzen verglichen, die zu einer räumlich und vom Wasserstand abhängigen Wirbelviskosität führen. Die untersuchten Gewässer stellen einen repräsentativen Schnitt der in Deutschland vorkommenden Fließgewässer dar. Die an ihnen ermittelten Rauheitsparameter werden nach Größe des Gewässers und Gewässerzone katalogisiert und charakterisiert, so dass sie auf andere Gewässer mit ähnlichen Eigenschaften übertragen werden können. Sowohl für das Fließgesetz von Gauckler-Manning-Strickler als auch für den Ansatz konstanter Wirbelviskosität wird nachgewiesen, dass bei Verbau der Böschungen und Vorländer mit gehölzartigem Bewuchs und Abflusszuständen, die vom Kalibrierungszustand abweichen, erhebliche Fehler bei der Berechnung des Wasserspiegels auftreten können. Physikalisch gut begründet sind die empirischen Parameter des Darcy-Weisbach-Ansatzes und des variablen Viskositätsansatzes. Sie führen zu substantiell besseren Berechnungsergebnissen und verbessern die Übertragbarkeit auf andere Abflusszustände. Deren Anwendung wird daher für die Ingenieurpraxis nicht nur empfohlen, sondern sogar für notwendig erachtet.

1 Einleitung

Die Forschungsanstrengungen der 80er-Jahre haben auf wissenschaftlicher Ebene unser Verständnis über die dominierenden Strömungsprozesse in naturnahen Fließgewässern entscheidend verbessert und zu einer Reihe neuer mathematischer Methoden geführt, mit denen der in naturnahen Fließgewässern maßgebliche Fließverlust von Vegetation und Querschnittsgliederung zuverlässig abgeschätzt werden kann (Pasche 1984, Rouvé 1987). Sie fanden auch in zwei Re-

gelwerken der deutschen Wasserwirtschaft ihren Niederschlag (DVWK, Merkblatt 220 und BWK, Merkblatt 1/1999). Von Seiten der Ingenieurpraxis wurden die Komplexität der Methoden sowie das Abrücken von vertrauten hydraulischen Grundlagen, wie z. B. dem Fließgesetz Gauckler-Manning-Strickler wiederholt kritisiert. Dieser Zurückhaltung glaubte man durch Entwicklung von Computermodellen erfolgreich begegnen zu können, indem der Anwender durch eine komfortable Benutzerführung mit der Komplexität der Verfahren nicht mehr konfrontiert wird, so dass lediglich die Abschätzung der neuen hydraulischen Parameter verbleibt. Tatsächlich existieren eine Reihe entsprechender kommerziell verfügbarer Computerprogramme, die diesem Anspruch gerecht werden (z. B. WspWin©, Jabron©). Dennoch will die Forderung aus der Ingenieurpraxis nicht verstummen, an der vertrauten Gauckler-Manning-Strickler-Formel festzuhalten, wobei als Argument angeführt wird, dass die auf diesem Fließgesetz basierenden 1-dimensionalen und 2-dimensionalen Strömungsmodelle ausreichende Genauigkeiten erzielen und dieses bei wesentlich geringerem Aufwand in der Abschätzung der hydraulischen Parameter. Unbelegt ist jedoch, inwieweit dieser Ansatz die physikalischen Prozesse richtig beschreibt und auch bei Abflusszuständen, die von der Kalibrierung abweichen, zu korrekten Ergebnissen führt.

Es ist daher das Ziel dieses Beitrages, die Frage nach der Erforderlichkeit eines physikalisch basierten hydraulischen Modells für die Ingenieurpraxis aufzugreifen und anhand einiger vergleichender Betrachtungen die Abweichungen zu den einfachen Verfahren zu quantifizieren (Analyse), deren Ursachen aufzuzeigen (Kausalitätsnachweis) und in Hinblick auf die in der Ingenieurpraxis relevanten Aufgabenstellungen zu bewerten (Relevanznachweis). Auf dieser Grundlage werden schließlich Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen für die aus hydraulischer Sicht notwendige Vorgehensweise bei der Bestimmung von Überschwemmungsgebieten, bei der Einschätzung der hydraulischen Wirkung des Bewuchses und bei der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen beschrieben.

2 Mathematische Ansätze zur Hydraulischen Modellierung von Fließgewässern

Die derzeit am weitesten reichenden Forderungen nach hydraulischen Berechnungen von Fließgewässern werden durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und den Hochwasserschutz gestellt. Letzterer ist durch die Häufung extremer Hochwasser in den letzten Jahren von größter Dringlichkeit. In beiden Fällen werden integrative, holistische Lösungsansätze gefordert, die der Komplexität der Wirkungszusammenhänge Rechnung tragen. Daher sind unter die-

sen Voraussetzungen hydraulische Nachweise nicht mehr isoliert für einzelne Gewässerquerschnitte zu führen (Abflussberechnung für stationär-gleichförmigen Strömungszustand), sondern sie müssen zusammenhängende Gewässerabschnitte abdecken, so dass Rückstau-, Retentions- und Stofftransportprozesse in ihrem vollem Umfang nachvollzogen werden können. Die hydraulischen Nachweise sind daher mindestens für stationär-ungleichförmige bis hin zu instationären Abflusszuständen zu führen. Somit sollten heute generell nur noch Spiegellinienmodelle, basierend auf der Arbeitsgleichung bzw. dem Energieerhaltungssatz oder HN-Modelle, basierend auf dem Impulserhaltungssatz eingesetzt werden.

Über die dabei heranzuziehenden Strömungsgleichungen herrscht weitgehend Einigkeit in der Fachwelt. BWK 1/1999 wird häufig für die Arbeitsgleichung referenziert,

$$\frac{1}{2g} \left(\alpha'_{i+1} \frac{Q_{i+1}^2}{A_{i+1}^2} - \alpha'_i \frac{Q_i^2}{A_i^2} \right) + \cos \Theta (z_{\text{WSP},i+1} - z_{\text{WSP},i}) + \int_{x_i}^{x_{i+1}} I_R dx + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(\frac{2\alpha'Q}{A} - \cos \varphi v_e \right) \frac{q_e}{gA} dx = 0 \quad (1)$$

mit Q = Gesamtdurchfluss [m^3/s], A = Durchflussquerschnitt [m^2], q_e = seitl. Zufluss [m^3/sm], z_{WSP} = Wasserspiegelhöhe ü. NN [m], I_R = Reibungsgefälle [-], α' = Energiestrombeiwert [-], Θ = longitudinaler Neigungswinkel der Gewässer-
sohle [$^\circ$], φ = Zuströmwinkel des seitl. Zuflusses [$^\circ$], $i, i+1$ = Unterwasser, Oberwasserprofil [-], x = Stationierung in Fließrichtung [m]

Pasche et al, 2005 enthält die anerkannte Form der Saint Venant Gleichung (1-dimensionales HN-Modell)

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial (\alpha' Q^2 / A)}{\partial x} + \cos \Theta \frac{\partial z_{\text{WSP}}}{\partial x} + I_R - \cos \varphi \frac{v_e q_e}{gA} = 0 \quad (2)$$

und die anerkannte Form der Flachwassergleichungen (2-dimensionales HN-Modell), wobei die Beschleunigungskräfte und die Fließwiderstände durch Windreibung vernachlässigt wurden, da sie bei den meisten Anwendungen in Fließgewässern unbedeutend sind.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (u_i h)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial}{\partial x_i} (z_{\text{WSP}}) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[h \left(\frac{1}{\rho} \tau_{L,ij} + \frac{1}{\rho} \tau_{t,ij} - \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} \right) \right] - \frac{1}{h} \frac{\tau_{\text{so},i}}{\rho}$$

mit u = lokale Geschwindigkeitskomponente [m/s], h = lokale Wassertiefe [m], τ_L = laminare Schubspannungskomponente [N/m^2], τ_t = turbulente Schubspannungskomponente [N/m^2], $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$ = Dispersionsterme [m^2/s^2], τ_{so} = Sohlschub-

spannungskomponente $[N/m^2]$, ρ = Rohdichte Wasser $[kg/m^3]$, $i, j = 1, 2$ (x-, y-Komponente und Laufindex der Einsteinschen Summenkonvention)

Alle drei Ansätze benötigen empirische Parameter zur Schließung des Gleichungssystems. Die wesentliche empirische Größe für das Spiegellinienmodell und das 1-dimensionale HN-Modell ist das Reibungsgefälle I_R bzw. der Fließwiderstand, dargestellt über die Sohlschubspannung τ_{so} . Beim 2-dimensionalen Modell kommen noch die turbulente Schubspannung und die durch Sekundärströmungen ausgelöste Dispersion hinzu.

Die einfachsten Modelle benutzen nur einen empirischen Parameter zur Quantifizierung des Reibungsgefälles bzw. der Sohlschubspannung. Er fasst sämtliche Fließverluste zusammen und drückt die entlang des benetzten Umfangs im Allgemeinen variierende Rauheit durch eine mittlere Rauheit aus. Dabei wird entweder das Fließgesetz von Gauckler-Manning-Strickler (Gln. 6 und 7) oder das Darcy-Weisbach-Gesetz (Gln. 4 und 5) zugrunde gelegt:

$$I_R = \frac{1}{8g} \frac{\lambda}{r_{hy}} \frac{Q^2}{A^2} \quad (4)$$

$$I_R = \frac{1}{k_{St}^2 r_{hy}^{4/3}} \frac{Q^2}{A^2} \quad (6)$$

$$\tau_{so,i} = \frac{\lambda}{8} \rho u_i \sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad (5)$$

$$\tau_{so,i} = \frac{\rho g}{k_{St}^2 h^{1/3}} u_i \sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad (7)$$

mit λ = Darcy-Weisbach-Koeffizient [-], k_{St} = Strickler-Beiwert $[m^{1/3}/s]$ und g = Erdbeschleunigung $[m/s^2]$.

Nur die Darcy-Weisbach-Formeln können über einen physikalisch-begründeten Ansatz hergeleitet werden. Dementsprechend ist der eingeführte Widerstandsbeiwert λ dimensionslos. Für ihn lassen sich durch Rückgriff auf die Grenzschichttheorie und die Theorie der Strömung um gedrängte Körper physikalisch basierte Gleichungen entwickeln, die den Fließwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von direkt in der Natur bestimmbareren Strömungsparametern oder äquivalenten Größen darstellen. Pasche et al. und BWK 1/1999 konnten darlegen, dass sich auf dieser Grundlage nahezu alle relevanten Fließwiderstände darstellen lassen. Dies gilt vor allem für die in naturnahen Fließgewässern relevanten Fließwiderstände, hervorgerufen durch Bewuchs und Querschnittsgliederung. Beispielfhaft seien die Widerstandsformeln für umströmten Bewuchs und für die Trennfläche zwischen Fluss und dem mit durchströmten Gehölzen verbauten Gewässerquerschnitt angegeben.

$$\lambda_P = \frac{4 \cdot h_P \cdot d_P}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} \cdot \cos(\alpha_{lat}) \quad (8)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \cdot \log \left[0,07 \cdot \left(\frac{c \cdot b_m}{b_{III}} \right)^{1,07} \cdot \Omega \right] \quad (9)$$

$$\Omega = \left[0,07 \cdot \frac{a_{NL}}{a_x} \right]^{3,3} + \left[\frac{a_{NB}}{a_y} \right]^{0,95} \quad (10)$$

mit a_x, a_y = Abstand der Gehölze in und quer zur Fließrichtung [m]; h_P = Anströmhöhe der Gehölze [m]; d_P = Durchmesser Gehölz [m]; α_{lat} = lateraler Böschungswinkel [°]; c_{WR} = Formwiderstandsbeiwert der Gehölze [-] gemäß Pasche, 1984; a_{NL}, a_{NB} = Nachlaufänge, -breite [m] gemäß BWK 1/1999, c = Beiwert für Querschnittsform [-], b_m, b_{III} = mitwirkende Bewuchsbreite bzw. Flussbreite [m] gemäß BWK 1/1999.

Die Bewuchssparameter sowie die mitwirkende Bewuchsbreite stehen für die real am Fließwiderstand beteiligten Strukturgrößen und stellen somit keine abstrakten Größen dar. Im Vergleich dazu verwendet die GMS-Formel einen Widerstandsbeiwert, der nicht dimensionsrein ist und nur indirekt über Tabellenwerke, aus eigener Erfahrung oder über eine Kalibrierung gewonnen werden kann. Chow, 1988 aber auch neuere Arbeiten versuchen die Parameterschätzung über photographische Verfahren auf bessere physikalische Basis zu stellen, indem sie einen Katalog an Referenzgewässern mit zugehörigem Strickler- bzw. Manings-Beiwert bereitstellen.

Man erkennt leicht, dass die Parameterschätzung bei der GMS-Formel weniger aufwendig ist als bei der DW-Formel. Dafür verfügt sie kaum über Möglichkeiten, die strukturellen Abhängigkeiten des Fließwiderstandes in ihrer Differenziertheit richtig zu erfassen.

Jedoch werden diese Qualitäten überhaupt in der Ingenieurpraxis gebraucht? Kann man nicht vollständig auf eine Modellierung des Trennflächenwiderstandes verzichten und die Wirkung des Impulsaustausches zwischen Vorland und Flussschlauch durch Eingrenzung des durchströmten Querschnitts oder durch Einführen von Encroachment-Parametern analog HEC-RAS erfassen?

Bei der Modellierung der turbulenten Schubspannung τ_t in 2-dimensionalen HN-Modellen werden in der Ingenieurpraxis ausschließlich Modelle eingesetzt, die auf den Wirbelviskositätsansatz von Boussinesq zurückgreifen:

$$\tau_{t,ij} = \rho \left(\nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad (11)$$

mit k = turbulente kinetische Energie [m^2/s^2], ν_T = turbulente Viskosität [m^2/s], δ_{ij} = Kronecker Delta [-].

Die einfachsten Modelle gehen wiederum davon aus, dass die Wirbelviskosität ν_T durch einen konstanten Parameter darstellbar ist (Konstant-Eddy-Viscosity-Ansatz). In der Tat konnte gezeigt werden, dass sich mit dieser Annahme die Strömung in Fließgewässern sehr gut wiedergeben lässt. Jedoch variiert die Wirbelviskosität von Strömungssituation zu Strömungssituation, so dass dieser Parameter nur durch eine Kalibrierung zuverlässig bestimmt werden kann. Da sich die Wirbelviskosität sowohl auf den Wasserstand als auch auf die Fließgeschwindigkeit auswirkt, kann bei einer Kalibrierung auf Basis von gemessenen Wasserständen nicht ausgeschlossen werden, dass trotz falsch geschätzter Wirbelviskosität und Fließwiderstandsbeiwert die Wasserstände richtig wiedergegeben werden, wenn sich die Fehler gegenseitig aufheben. Bei anderen Abflusszuständen kann sich dieser Effekt nicht mehr einstellen und das Berechnungsergebnis wird falsch.

Zur Überwindung dieser Schwäche in der Parameterschätzung von 2-dimensionalen HN-Modellen wurden analytische Gleichungen aufgestellt, mit denen die Abhängigkeit der Wirbelviskosität vom Strömungszustand und der Geometrie erfasst wird. In Lippert, 2005 wurden gute Erfahrungen mit einer Kombination aus Prandtlschen Mischungswegansatz und Sohlschubspannungsansatz gemacht.

$$\nu_{t,ij} = l_m^2 \left[2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_j}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial u_j}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} + e^* \sigma_t h \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad (12)$$

mit $e^* \sigma_t = 0,15$

Die Mischungswegbreite l_m kann unter der Annahme einer freien Scherschicht gemäß Rodi, 1984 zu

$$l_m = 0,09 b_s \quad (13)$$

abgeschätzt werden, wobei b_s die mittlere Breite der freien Scherschicht darstellt (Free-Shear-Layer-Approach). In einem Ansatz von Smagorinsky, 1963 wird die Mischungswegbreite in Abhängigkeit zur Netzgeometrie gesetzt.

$$l_m = 0,197 \Delta \quad (14)$$

mit Δ = äquivalente Seitenlänge des Diskretisierungselementes. Damit trägt dieser Ansatz dem Einfluss der Netzgeometrie auf die Größe der turbulenten Schubspannung Rechnung, welche gemäß Malcherek, 2001 auf numerische Diffusion zurückzuführen ist.

Noch weitergehende Turbulenzmodelle wie 1- und 2-Gleichungsmodelle (k-ε-Modell) haben in der Ingenieurpraxis noch keine Relevanz, da ihr numerischer Aufwand immer noch als zu hoch gilt und wie Untersuchungen von Pasche, 1984, zeigen, auch zu keinen nennenswerten Verbesserungen in der Modellierung führen.

Da 2-dimensionale HN-Modelle dreidimensionale Effekte nicht direkt erfassen, müssen sie über empirische Ansätze integriert werden. Entweder werden sie durch einen Zuschlag in der Wirbelviskosität oder durch Formulierung einer analytischen Beziehung für die Dispersionsterme $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$ berücksichtigt. Lippert, 2005 empfiehlt für mäandrierende Flüsse den Ansatz von Lien et al, 1999:

$$\begin{aligned} \overline{\tilde{u}_1 \tilde{u}_1} &= -\rho u_1^2 h \left(\frac{\sqrt{\lambda}}{\kappa \sqrt{8}} \right)^2 \\ \overline{\tilde{u}_1 \tilde{u}_2} = \overline{\tilde{u}_2 \tilde{u}_1} &= -\rho \left[u_1 u_2 h \left(\frac{\sqrt{\lambda}}{\kappa \sqrt{8}} \right)^2 + \frac{u_1^2 h^2}{\kappa^2 R_K} \frac{\sqrt{\lambda}}{\kappa \sqrt{8}} \cdot \text{FF1} \right] \\ \overline{\tilde{u}_2 \tilde{u}_2} &= -\rho \left[u_2^2 h \left(\frac{\sqrt{\lambda}}{\kappa \sqrt{8}} \right)^2 + \frac{2 u_1 u_2 h^2}{\kappa^2 R_K} \frac{\sqrt{\lambda}}{\kappa \sqrt{8}} \cdot \text{FF1} + \frac{u_1^2 h^3}{\kappa^4 R_K^2} \cdot \text{FF2} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

mit κ = von Karman Konstante, R_K = Krümmungsradius der Mäanderschleife und FF1, FF2 gemäß Pasche et al., 2005.

Auch bei den 2-dimensionalen HN-Modellen ist unklar, welche Bedeutung den turbulenten Schubspannungen und den durch Sekundärströmung hervorgerufenen Dispersionseffekten zukommt. Kann durch eine Kalibrierung an beobachteten Wasserständen ihr Einfluss ausreichend berücksichtigt werden? Wann muss auf eine verfeinerte Turbulenzmodellierung zurückgegriffen werden und welches Turbulenzmodell ist in der Ingenieurpraxis hierfür geeignet?

3 Analyse

Zur Bewertung der oben aufgeworfenen Fragestellungen wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Fließgewässer mit verschiedenen Ansätzen zur Rauheitsmodellierung und Turbulenzmodellierung untersucht (Tab. 1). Dabei wurden verschiedene kleine, mittlere und große Gewässer im Flachland und in Mittelgebirgsbereich von Deutschland sowie Fließgewässer im städtischen und ländlichen Raum betrachtet. Die Auswahl der Gewässer sollte einen möglichst reprä-

sentativen Querschnitt der in Deutschland vorherrschenden Fließgewässer liefern.

Die 3 kleinen Gewässer (Ohlau, Kollau, Weißeritz und Weiße Elster) stellen kompakte Fließgewässer dar, die erst bei extremen Hochwassern ausufernd, dann aber zum Teil größere Vorlandbereiche überfluten. Sie wurden mit einem 1-d Modell (WSPWin mit KALYPSO-1d Rechenkern) gerechnet. Sowohl die mittleren als auch die großen Gewässer werden bei Hochwasser von 2-dimensionalen Strömungsvorgängen dominiert, so dass die Abflussverhältnisse mit einem 2-dimensionalen Strömungsmodell (KALYPSO-2d) simuliert wurden. Dieses löst die Flachwassergleichungen (Gln. 3) mit Hilfe der Finite-Elemente Technik und ist aus dem international bekannten Modell RMA2 hervorgegangen.

Gewässername	Bundesland	Typologisierung	Modelltyp	Empirische Modellansätze	Szenarien
Laborgerinne	Pasche (1984)	Physikalisches Modell, gegliedert	FWG (2-dimensional)	KEW Smagorinsky FSL	BHW Grobnetz Feinnetz
Ohlau	Schleswig-Holstein	Kleines Flachlandgewässer, ländlich	AG (1-dimensional)	GMS BWK	HQ100 HQ50, HQ30, HQ 10, NQ
Kollau	Hamburg	Kleines Flachlandgewässer, städtisch	AG (1-dimensional)	GMS BWK	HQ20, HQ10, HQ5, NQ
Weiße Elster	Thüringen	Mittelgebirgsbach, ländlich/städtisch	AG (1-dimensional)	BWK GML	HQ100, HW 1995, HW 2002
Weißeritz	Sachsen	Mittelgebirgsbach, städtisch	AG (1-dimensional)	BWK	HQ200, HW 2002, HQ5
Stör	Schleswig-Holstein	Mittleres Flachlandgewässer, tidenabhängig	FWG (2-dimensional) AG (1-dimensional)	KEW FSL Smagorinsky GMS BWK	HW 1998, HW 1992, HQ100, HQ5
Lippe	NRW	Mittleres Flachlandgewässer, ländlich	FWG (2-dimensional)	KEW FSL Smagorinsky	HW Febr. 2002
Niederrhein	NRW	Großes Flachlandgewässer, ländlich	FWG (2-dimensional)	KEW FSL Smagorinsky Dispersion	Normalabfluss 2002
Donau	Bayern	Großes Mittelgebirgs-gewässer, ländlich	FWG (2-dimensional)	GMS BWK KEW FSL Smagorinsky	HW 1999, HW 1992, HW 1991,

AG = Arbeitsgleichung (Gln. 1), FWG = Flachwassergleichung (Gln. 3),

BWK = Rauigkeitsmodellierung gemäß BWK (Gln. 4-5, 8-9),

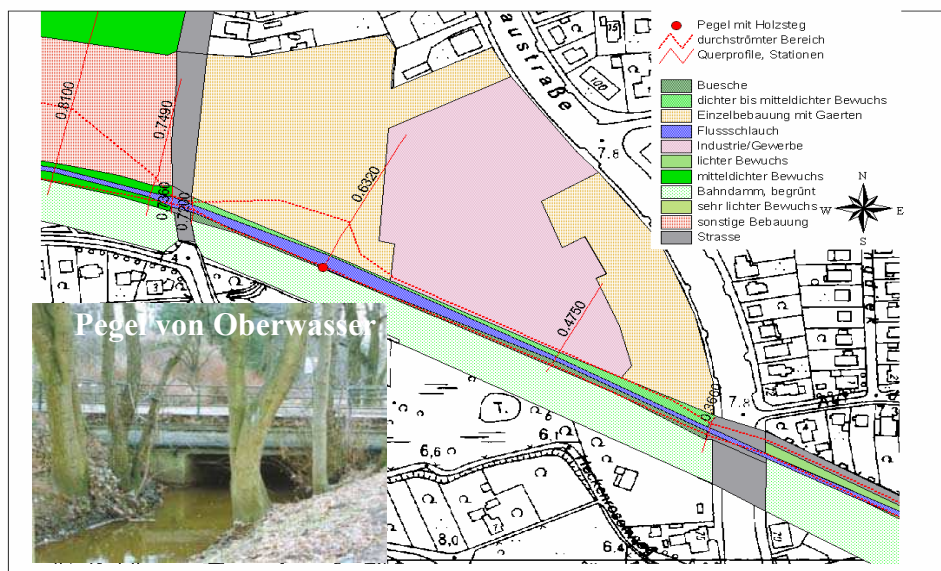
GMS= Gauckler-Manning-Strickler-Formel (Gln. 6-7), Dispersion = Gln. 15,

KEW= Konstant Eddy Viscosity-Ansatz, FSL = Free-Shear-Layer (Gln. 13), Smagorinsky = Gln. 14 ,

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Gewässer

Das Gewässer Ohlau zeigt eine deutlich anthropogen geprägte Morphologie, die durch Begradigungen des Flusslaufs in weiten Abschnitten und sieben Absturzbauwerke gekennzeichnet ist. Die Sohle ist überwiegend sandig bis kiesig. Dabei wird die Sohlrauheit an mehreren Stellen durch eine ganzjährige Verkrautung im Gewässer und auf den Böschungen erhöht. Auf der Böschung und den Vorlandflächen ist nur wenig gehölzartiger Bewuchs vorhanden, da angrenzende Acker- und Weideflächen direkt an den gemähten Ufersaum reichen. Im Stadtgebiet von Bad Bramstedt sichert eine Steinschüttung die Böschung.

In der Kollau herrscht eine sandige Sohle vor. Die Böschungen sind bis MW mit Rasengittersteinen oder Faschinen gesichert. Kolke und Uferabbrüche führen zu einem sehr unregelmäßigen Gewässerprofil. Ab der Mittelwasserlinie stehen Gehölze an, deren Dichte stark variieren. In diesen Abschnitten wurde die Trennfläche zwischen Fluss und Vorland bzw. Gehölze auf die MW-Linie gesetzt. Obwohl die Kollau durch das Stadtgebiet von Hamburg fließt, konnten in einigen Teilabschnitten die natürlichen Vorländer von Bebauung freigehalten werden. Sie sind meistens von Wiesen geprägt. In einzelnen Abschnitten setzt sich der gehölzartige Ufersaum auch im Vorlandbereich fort und bildet einen zusammenhängenden Auenwald. Das Gewässer ist tief eingeschnitten, so dass die Ausuferung erst ab einem 10-jährlichen Hochwasser einsetzt.

**Abb. 1:** Lageplan-Ausschnitt der modellierten Kollau

Gewässerbett bis zur MW-Linie dar. Er ging aus einer Kalibrierung des Modells bei Normalabfluss hervor und beinhaltet in Anlehnung an BWK, 1999 neben der Sohlrauheit Fließverluste infolge longitudinaler Ungleichförmigkeit des Gewässerbettes und Mäandrierung. Die Rauheitsparameter für die BWK-Formeln wur-

In der Tabelle 2 sind die an den kleinen Fließgewässern hervorgegangenen Rauheitsparameter sortiert nach Gewässerzonen dokumentiert. Der Rauheitsparameter im Fluss stellt einen gemittelten Rauheitswert für das

den zunächst auf Basis BWK, 1999 geschätzt und anschließend an einem jährlichen Hochwasser überprüft und ggf. angepasst. Die Parameter für die GMS-Formel wurden direkt über eine Kalibrierung gefunden.

Die Gewässer sind sowohl im ländlichen wie städtischen Bereich von zahlreichen Brücken überspannt, die zum Teil einen erheblichen Einfluss auf den Hochwasserstand ausüben. Sie wurden in ihrer Abfluss begrenzenden Kontur berücksichtigt und die Parameter in Anlehnung an BWK, 1999 angesetzt.

Das Gewässerbett der Lippe ist durch ein sehr regelmäßiges Trapezprofil gekennzeichnet. Seine Sohle besteht aus Feinsand ohne ausgeprägte Transportkörper. Der k_s -Wert der sandigen Sohle wurde aus einem, mit ADCP gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofil abgeleitet, indem das logarithmische Wandgesetz an die Messwerte approximiert wurde (Lippert, 2005). Am Rhein wurde der k_s -Wert des Gewässerbettes über eine Kalibrierung am Normalabfluss gefunden. Er ist deutlich höher als an der Lippe, was auf gröberes Sohlmaterial und die Ausbildung von z.T. beträchtlichen Transportkörpern (Dünen) zurückzuführen ist. Für das Gewässerbett der Donau wurde nahezu der gleiche Wert gefunden, was auf ähnliche Sohlverhältnisse schließen lässt.

Gewässerzone	Art der Rauheit	Gewässer	Rauheit gemäß BWK			Strickler-Beiwert
			K_s	a_x, a_y	d_p	
Fluss	sandig	Ohlau	0,05-0,10 m			35
	sandig bis kiesig	Ohlau	0,10-0,15 m			35
	verkrautet, mäßig	Ohlau	0,30 m			35
	verkrautet, stark	Ohlau	0,70 m			35
	sandig,,	Kollau	0,15 m			35
	Grobies, steinig	Weißer Elster	0,25 m			29
	geröllig	Weißeritz	0,20 m			
	Steinsatz, verfugt	Weißeritz	0,05 m			
Böschung	Krautiger Bewuchs	Kollau	0,35 m			
	Gras, einzelne Büsche	Weißer Elster	0,40 m			25
Vorland	Grünland	Ohlau/Kollau	0,25-0,30 m			12
	Acker, Gärten	Ohlau/Kollau	0,30-0,40 m			12
	Schilf/Röhricht	Ohlau	0,10 m	0,03 m	0,01 m	12
	Büsche, dicht	Kollau		0,1 m	0,02 m	15
	Gehölz, sehr dicht	Kollau		2,0 m	0,40 m	15
	Gehölz, dicht	Kollau		4,0 m	0,40 m	15
	Gehölz, licht	Kollau		7,0 m	0,40 m	15
	Wald, geschlossen	Ohlau	0,10 m	0,15 m	0,03 m	12

Tabelle 2: ermittelte Rauheitsparameter für die kleinen Gewässer

In dem untersuchten Abschnitt der Lippe befindet sich auf der Böschungsoberkante des Flussbettes ein einreihiger, sehr lockerer Weidenbewuchs. Daran schließt sich ein schmales Vorland an, das durch Hochwasserdeiche begrenzt wird (Lippert, 2005). Erhebliche Gehölze befinden sich auf den Vorländern des untersuchten Gewässerabschnittes der Donau. Sie bilden zum Teil größere geschlossene Auenwälder und Ufersäume (Abb. 2). Nahezu ohne Gehölze ist der Rheinabschnitt und der Unterlauf der Stör.

Der untersuchte Rheinabschnitt bei Mündelheim (Fluss-Kilometer 763-767) durchfließt eine ausgeprägte Rechtskrümmung mit einem Krümmungsradius von ca. 1.100 m und einer Richtungsänderung von 180° (Lippert, 2005). Auf der Innenseite befinden sich zahlreiche Buhnen zur Begrenzung des Fahrwassers. Sie wurden in dem 2-dimensionalen Modell durch ein feines Finite-Elemente-Netz aus Drei- und Vierecken abgebildet, so dass mit dem Modell sehr realistische Umströmungen der Buhnenköpfe erreicht wurden.

Das 2-dimensionale Strömungsmodell der Stör wurde in die zwei Gewässerabschnitte Unterlauf und Mittellauf untergliedert. Das erste Modell erstreckt sich von der Mündung in die Elbe bis zum Pegel Willenscharen (zwischen Kellinghusen und Neumünster). Es deckt eine Flusslänge von ca. 59,0 km ab. Daran schließt unmittelbar der Mittellauf ab. Er erstreckt sich bis zum Pegel Padenstedt und umfasst eine Flusslänge von ca. 10 km. Im Mittellauf der Stör sind bis auf einen Gewässerabschnitt mit parallel zum Fluss verlaufender Flutmulde die Überflutungsbereiche sehr gleichförmig und von geringer seitlicher Ausdehnung, so dass dieser Gewässerlauf den Grenzbereich für eine 2-dimensionale Strömungsberechnung markiert. Er wurde daher zu Vergleichs-

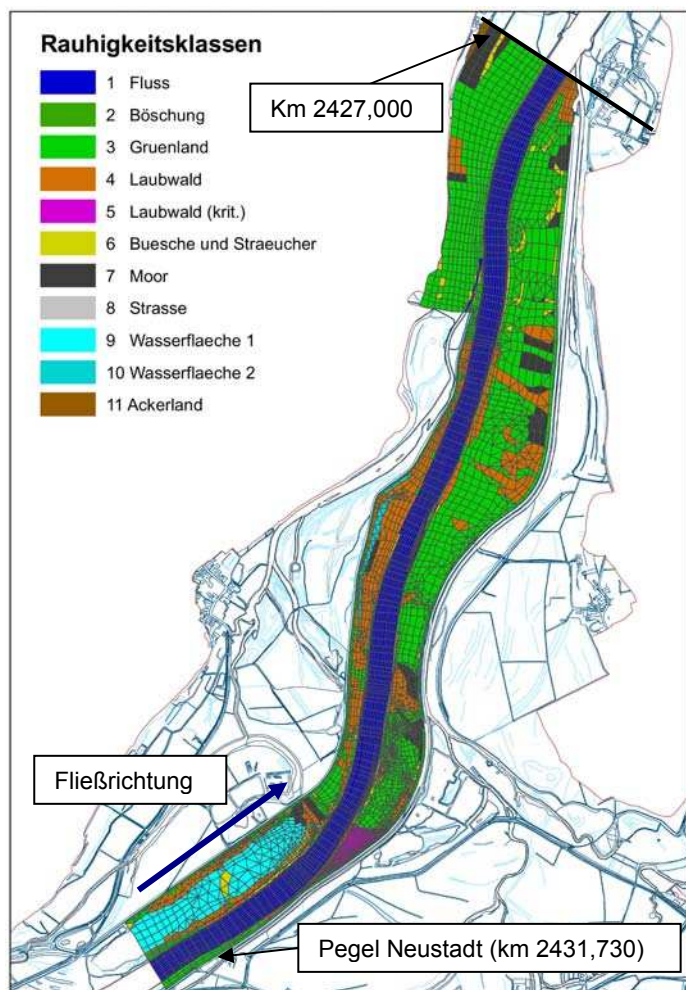


Abb. 2: Modellierter Donauabschnitt bei Neustadt

Er wurde daher zu Vergleichs-

zwecken sowohl 1-dimensional (WspWin mit Rechenkern KALYPSO-1d) als auch 2-dimensional (KALYPSO-2d) gerechnet. Im Unterlauf-Modell wurden die Rauheitsverhältnisse für einen Teilabschnitt neben einer Feldkartierung auch aus hochauflösenden Bildern einer Satellitenaufnahme (QuickBird) und einer anschließenden wissensbasierten Bildanalyse gewonnen (Rath, 2006). Sie führte zu einer sehr variablen räumlichen Rauheitsverteilung (Abb. 3). Im Vergleich zur Feldaufnahme erhöhen sich ganz wesentlich die Feuchtbiotope/Röhrichtzonen zu Lasten der Grasflächen (kurz).

Die an den mittleren und größeren Flüssen angesetzten Rauheitsparameter sind in Tabelle 3 dokumentiert. Sie wurden mindestens an einem Abflussereignis bei Normalabfluss und Hochwasser verifiziert. Für den Mittellauf der Stör ergab die Kalibrierung des 2-dimensionalen Modells nahezu die gleichen Rauheitsparameter wie im 1-dimensionalen Modell, was auf sehr regelmäßige geometrische Verhältnisse schließen lässt, da in diesem Fall der Rauheitsparameter kaum von Formeinflüssen beeinflusst ist. Auch die Rauheitsparameter für das Fließgesetz von Gauckler-Manning-Strickler wurden auf adäquate Weise gefunden, wobei in der Regel das Abflussereignis bei Hochwasser für die Kalibrierung herangezogen wurde.

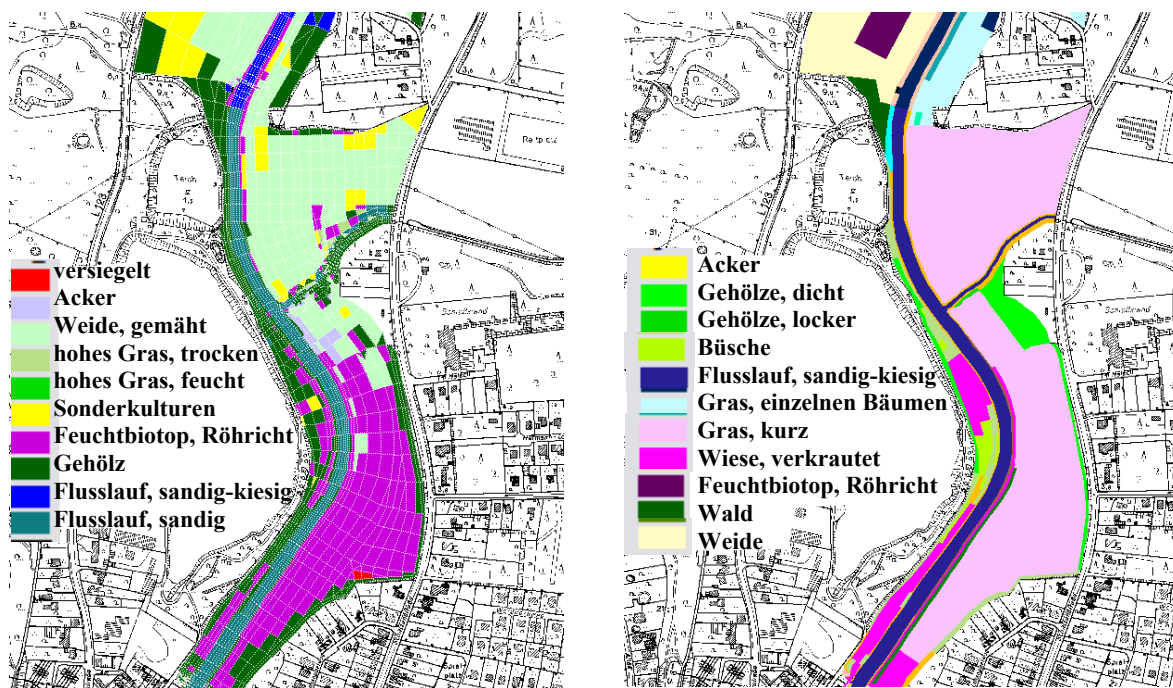


Abb. 3a: Rauheitsverteilung der Bildanalyse einer QuickBird-Satellitenaufnahme **Abb. 3b:** Rauheitsverteilung der Feldaufnahme

Bei Verwendung der Fließformel von BWK, 1999 konnten sowohl für die 1-dimensionale wie 2-dimensionale Berechnung sämtliche beobachteten Hochwasser eines Gewässers durch einen Parametersatz mit dem Modell reproduziert wer-

den. Die Abweichungen zwischen beobachteten und gemessenen Wasserständen betragen für das 1-dimensionale Modell im Mittel ca. 5 cm.

Auch für das 2-dimensionale Strömungsmodell konnte mit gleicher Güte die Wasserspiegellage reproduziert werden und dass für wesentlich komplexere Strömungsverhältnisse. Der zu Vergleichszwecken sowohl mit einem 2-dimensionalen als auch 1-dimensionalen Strömungsmodell gerechnete Mittellauf der Stör von ca. 10 km Länge lieferte in beiden Modellen nahezu die gleichen Berechnungsergebnisse. Dabei wurden in beiden Modellen nahezu die gleichen Rauheitsparameter im Gewässerbett und auf dem Vorland angesetzt (Tab. 3). Lediglich im Bereich einer Flutmulde, wo sich die Strömung in zwei von einander getrennte Bereiche aufteilt, liegen die berechneten Wasserspiegellagen zwischen den Modellen um mehr als 10 cm auseinander.

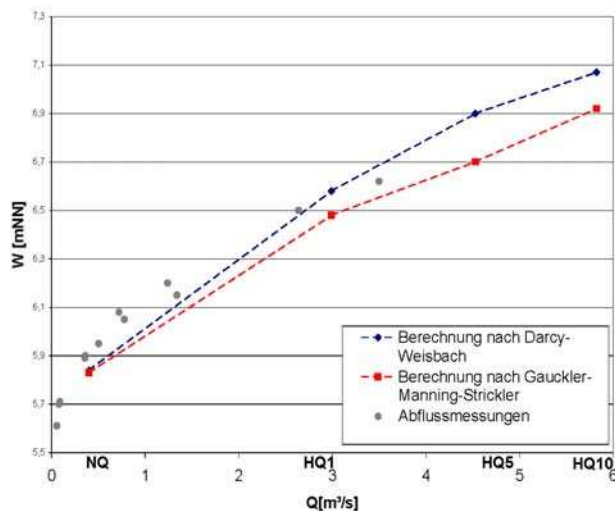


Abb. 4: berechnete WQ-Beziehungen an der Kollau

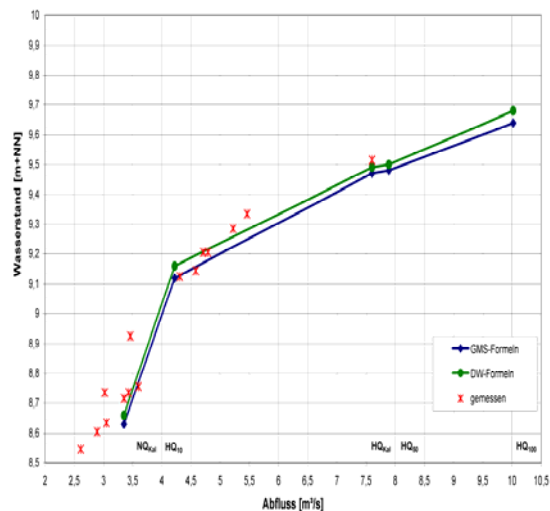


Abb. 5: berechnete WQ-Beziehungen an der Ohlau

Für das Fließgesetz von Gaukler-Manning-Strickler war es für Gewässerabschnitte mit abflusswirksamen Gehölzen nicht möglich, die gleiche Modellgüte mit einem Parameterdatensatz zu erhalten. Generell beobachtet man in diesen Gewässern, dass die an kleinen Hochwassern kalibrierten Parameter mit zunehmendem Abfluss von der Berechnung mit der BWK-Formel abweichen. Die Wasserspiegellage liegt durchgehend niedriger (Abb. 4 und 5).

Die Abweichungen sind zum Teil beträchtlich und betragen am Beispiel der Kollau für ein 10-jährliches Hochwasser mehr als 20 cm. An den übrigen mit dem 1-dimensionalen Modell untersuchten Gewässern treten zum Teil deutlich geringere Abweichungen auf (Ohlau und Stör max. 5 cm, und Weiße Elster ca. 3 cm). An diesen Gewässern fällt der Anteil an durchströmten Gehölzbereichen sehr gering aus. Die Ufer sind bei diesen Gewässern nahezu gehölzfrei. An der

Weißer Elster findet eine Ausuferung zudem kaum statt. Demnach liegt eine enge Korrelation zwischen dem Grad an Verbau mit Gehölzen und der Höhe der Abweichung zwischen GMS- und BWK-Formel vor. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch mit dem 2-dimensionalen Strömungsmodell gewonnen. So weichen in dem mit dem 2-dimensionalen Strömungsmodell untersuchten Mittellauf der Stör die Wasserspiegellagen zwischen der GMS-Formel und der BWK-Formel im Mittel nur um 5 cm ab. Demgegenüber stellt man bei extremen Hochwassern erhebliche Abweichungen für den stark von Gehölzen beeinflussten Gewässerabschnitt der Donau fest. Sie betragen beim Hochwasser Pfingsten 1999 mehr als 40 cm (Abb. 6).

Gewässerzone	Art der Rauheit	Gewässer	Rauheit gemäß BWK			Strickler-Beiwert
			k_s	a_x, a_y	d_p	
Gewässerbett	Fluss, sandig	Stör	0,05 m			30,0
	Fluss, kiesig	Stör	0,12 m			
	Flusssohle mit Steinschüttung	Stör	0,20 m			
	Fluss sehr regelmäßig, sandig	Lippe	0,01 m			-
	Fluss, kiesig mit Transportkörpern	Nieder-rhein	0,10 m			-
	Fluss, kiesig	Donau	0,09 m			37,0
Böschung	Steinschüttung, Böschung	Stör	0,35 m			
	Krautiger Bewuchs auf Böschung	Stör, Donau	0,30 m			29,0
	Grünland	Stör	0,30–0,35 m			12,0
	Röhricht auf Vorland	Stör	0,40 m			
	Gras	Rhein	0,15 m			-
Freies Vorland	Grünland	Stör, Lippe	0,10 m			-
	Grünland	Donau	0,20 m			31,0
	Ackerfläche	Donau	0,25 m			30,0
	Moor	Donau	0,30 m			29,0
	Straße	Donau	0,05 m			40,0
	Wasserfläche	Donau	0,03 m			45,0
Gehölze	Weidenbüsche, vereinzelt	Lippe	0,10 m	4,0 m	0,15 m	-
	Ufersaum/Wald	Donau	0,20 m	4,00 m	0,20 m	21,0
	Büsche/ Sträucher	Donau	0,20 m	0,30 m	0,03 m	14,0

Tab. 3: ermittelte Rauheitsparameter für die mittleren und großen Gewässer

Neben den Rauheitsparametern wird die Strömung in 2-dimensionalen Modellen in erheblichem Maße auch durch die angesetzte Wirbelviskosität beeinflusst. Diese wirkt sich nicht nur auf die räumliche Fließgeschwindigkeit, sondern auch auf den berechneten Wasserstand aus. An dem Donauabschnitt wurden in einer Sensitivitätsanalyse die Wasserspiegellagen für ein Hochwasser mit unterschiedlichen Wirbelviskositäten berechnet. Ausgehend von dem gleichen Wasserstand am unterwasserseitigen Modellrand stellt sich bei Verdopplung der Wirbelviskosität ein um ca. 40 cm höherer Wasserstand nach 5 km im Oberwasser ein (Abb. 7). Für die drei detailliert untersuchten Hochwasser konnten die Wasserspiegellagen mit einer konstanten und für alle drei Abflussereignisse einheitlichen Wirbelviskosität nicht reproduziert werden. Demgegenüber wurde mit dem Ansatz von Smagorinsky (Gln. 14) für fast alle Abflussereignisse eine sehr zufrieden stellende Approximation gefunden (Abb. 7). Lediglich beim bordvollen Abfluss kommt es zu einer Überschätzung. Ähnlich gute Ergebnisse konnten auch mit dem

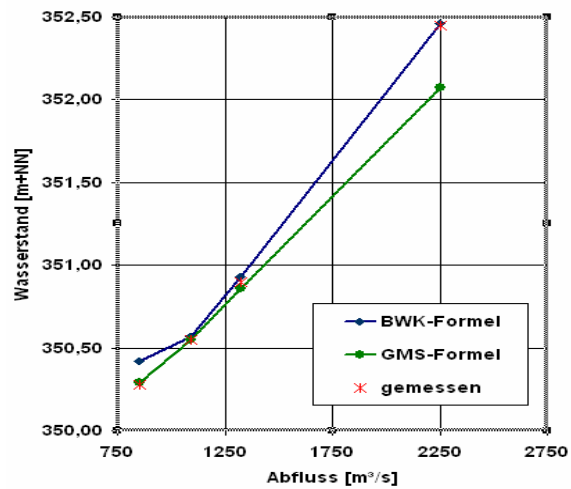


Abb. 6: WQ-Werte am Pegel Neustadt

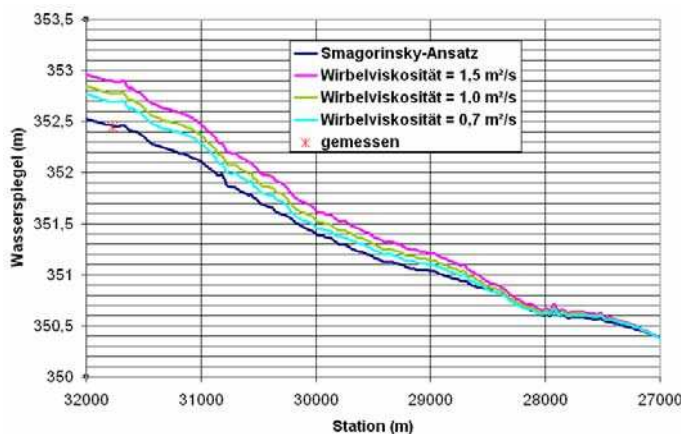


Abb 7a: gerechneter Längsschnitt des Wasserspiegels, Hochwasser 1999

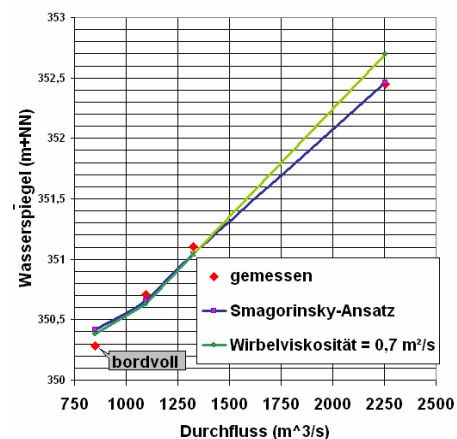


Abb 7b: gerechnete Hochwasserstände am Pegel Neustadt a. d. Donau

Free-Shear-Layer-Ansatz an der Lippe und Stör erzielt werden (Abb. 8 u. 9). Neben der Wasserspiegellage konnte hier auch die tiefengemittelte Geschwindigkeitsverteilung im Fluss und Vorland sehr realitätsnah reproduziert werden.

Dabei wurden in der Lippe für die Scherschichtbreite b_s ein Wert von 23 m und in der Stör von 7-10 m gefunden (Abb. 8). Beide Werte wurden zunächst aus der Messung abgeleitet, konnten aber dann durch die berechnete Geschwindigkeitsverteilung bestätigt werden. Am Unterlauf der Stör führte der Smagorinsky-Ansatz zunächst zu keiner guten Approximationen. Auf Höhe des Pegels Rensing (Abb. 9) wurde der Wasserspiegel mit den in Tab. 3 aufgeführten Rauheitsparametern deutlich unterschätzt. Durch Verfeinerung der Rauheitsverteilung mittels Fernerkundung (Abb. 5a) konnte zwar die Abweichung reduziert werden. Aber erst durch Definition der mit langem Gras bewachsenen Flächen als durchströmter Bewuchs wurde ein befriedigendes Ergebnis erzielt. Im Mittellaufmodell führte der Ansatz von Smagorinsky zu einer deutlichen Überschätzung. Erst durch Reduktion des Smagorinsky-Parameters von 0,197 auf 0,100 wurden die beobachteten Wasserspiegel mit gleicher Güte wie beim Free-Shear-Layer-Ansatz reproduziert. Zur vollständigen Verifikation des Wirbelviskosi-

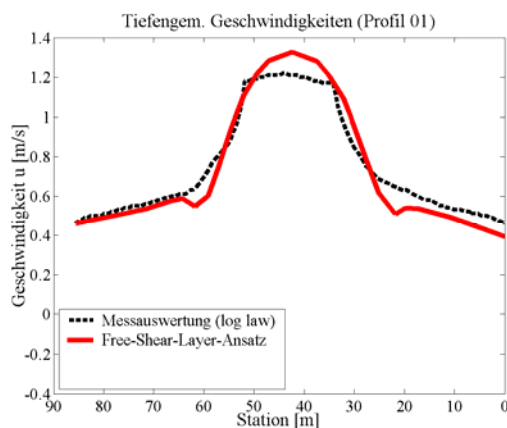


Abb. 8: Fließgeschwindigkeit der Lippe bei Hochwasser

tätsansatzes werden Messungen der Geschwindigkeitsverteilung über den Gewässerquerschnitt benötigt. Derartige Daten lagen nur in begrenztem Umfang für die Naturgewässer vor. Daher wurden für die weitere Analyse auch experimentelle Ergebnisse aus Laboruntersuchungen herangezogen. So wurde anhand der Messungen von Pasche, 1984 der Strömungszustand in der freien Scherschicht eines gegliederten Profils sowohl mit als auch ohne durchströmten Bewuchs auf dem Vorland (Abb. 10) analysiert. Diskretisiert wurde

das gleichförmige Modellgewässer mit verschiedenen Netzauflösungen, wobei auf einem Verfeinerungsalgorithmus von Rath, 2006 zurückgegriffen wurde, der zu unstrukturierten Netzen führt. Gemäß Abb. 10b besteht eine hohe

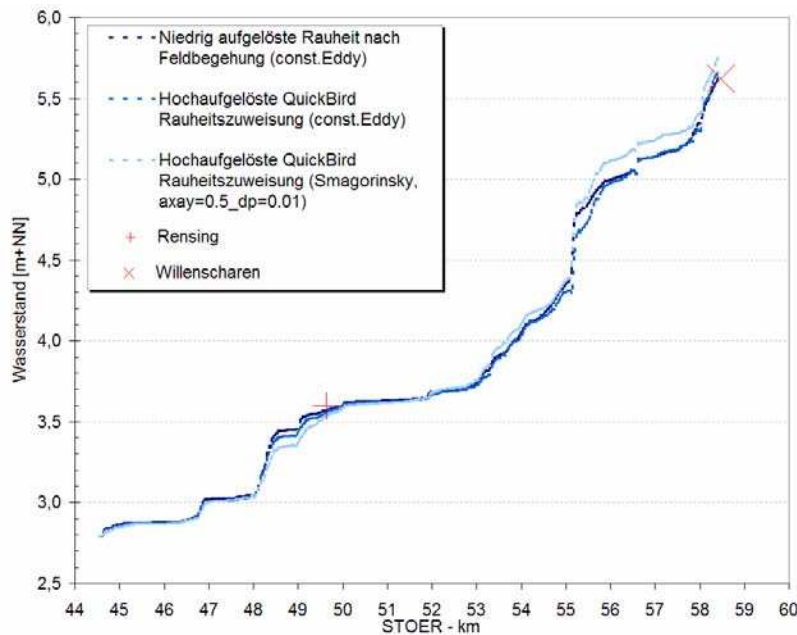


Abb. 9: Längsprofil des Stör-Hochwassers von 1998 für das Mittellaufmodell

Sensitivität zwischen Netzauflösung und der tiefengemittelten Geschwindigkeitsverteilung. Erst ab einem Verhältnis $ds/b_s = 0,15$ mit $ds =$ Seitenlänge entlang der maßgeblichen Geschwindigkeitsgradienten ist kein Einfluss der Netzauflösung auf die Geschwindigkeitsverteilung festzustellen. Bezieht man dieses Verhältnis auf den mittleren Geschwindigkeitsgradienten

dv in der Scherschicht und normiert über die maximale Fließgeschwindigkeit v_{max} in der Scherschicht, so resultiert hieraus eine dimensionslose Kenngröße, die den Verfeinerungsgrad in der Scherschicht in Abhängigkeit von den Geschwindigkeitsverhältnissen und der Breite der Scherschicht beschreibt.

$$c = ds / b_s (dv / v_{max}) \tag{16}$$

Für das untersuchte Laborgerinne wurde für diese Kennziffer ein Wert von $c = 0,07$ gefunden. Er stellt eine erste Orientierung für eine Netzverfeinerung in freien Scherschichten dar. Das Ergebnis muss jedoch noch durch weitere Untersuchungen an Gewässern in der Natur überprüft werden.

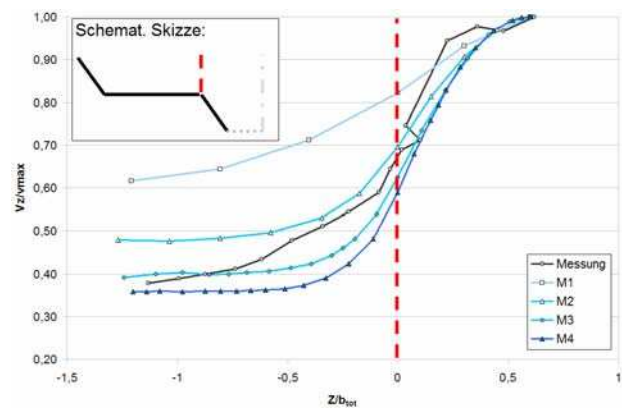
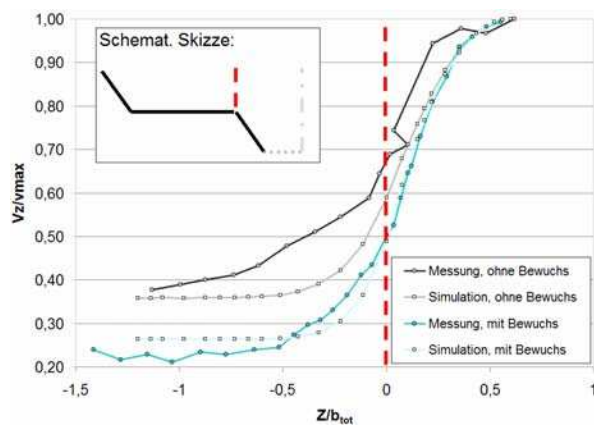


Abb. 10a: tiefengemittelte Geschwindigkeiten mit Smagorinsky-Ansatz

Abb. 10b: tiefengemittelte Geschwindigkeitsprofile für verschiedene Netzauflösungen

Weiterhin erwies sich ein unstrukturiertes Netz numerisch stabiler als ein regelmäßiges, an der Strömung ausgerichtetes. Für das unstrukturierte Netz mit optimaler Auflösung wurde die Sensitivität der Geschwindigkeitsverteilung gegenüber der angesetzten Wirbelviskosität analysiert. Zunächst wurde die Beobachtung an den Naturmessungen bestätigt, dass in freien Scherschichten die Wirbelviskosität einen großen Einfluss auf die Güte des Berechnungsergebnisses ausübt. Zu hohe Wirbelviskositäten überschätzen die turbulenten Schubspannungen und führen zu abgeflachten Geschwindigkeitsgradienten in der freien Scherschicht. Bei Verwendung der Ansätze mit variabler Wirbelviskosität ergeben sich Wirbelviskositäten, die zu realistischen Geschwindigkeitsgradienten führen, wobei der Ansatz von Smagorinsky noch geringfügig besser ausfällt als der Free-Shear-Layer-Ansatz. Während der Geschwindigkeitsverlauf beim Zustand mit durchströmtem Bewuchs nahezu exakt getroffen wird, verbleiben beim Zustand ohne Bewuchs noch deutliche Differenzen in der freien Scherschicht. Alle Ansätze führen zu einer Überschätzung des Geschwindigkeitsgradienten. Auch Versuche mit geänderter Scherschichtbreite b_s oder variiertes Smagorinsky-Konstante führten zu keiner Verbesserung des Gesamtergebnisses. Zwar konnte der Gradient in der Scherschicht bei veränderten Konstanten besser approximiert werden, aber die Fließgeschwindigkeiten außerhalb der Scherschicht wurden über- bzw. unterschätzt.

An dem stark mäandrierenden Flussabschnitt des Rheins wurde schließlich der Dispersionsansatz von Lien et al., 1999 überprüft. Hier wurden mittels ADCP die Fließgeschwindigkeiten entlang mehrerer charakteristischer Querprofile in der Krümmung gemessen. Bei Ansatz eines gemessenen Krümmungsradius von 1.100 m ließen sich diese gemessenen Fließgeschwindigkeiten mit dem Dispersionsansatz von Lien et al., 1999 sehr gut reproduzieren (Abb. 11). Damit ergaben sich durch diesen Ansatz substantielle Verbesserung an der Modellierung der Geschwindigkeitsverteilung in Flusskrümmungen gegenüber einer Vernachlässigung der Dispersion. Allerdings wirkte sich der Dispersionsansatz nur in sehr geringem Maße auf den Wasserspiegelgradient in longitudinaler Richtung aus.

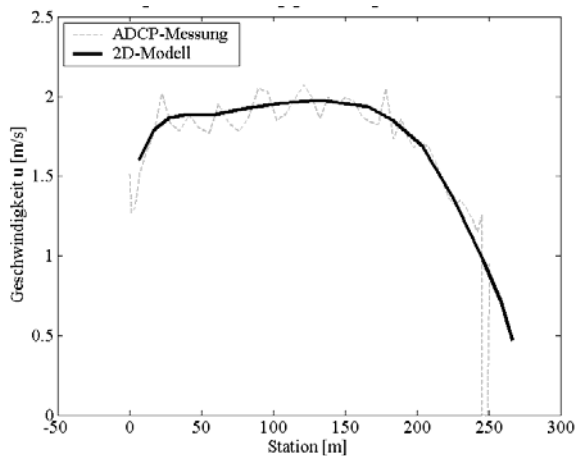


Abb. 11a: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile an Rhein-Km 766,5

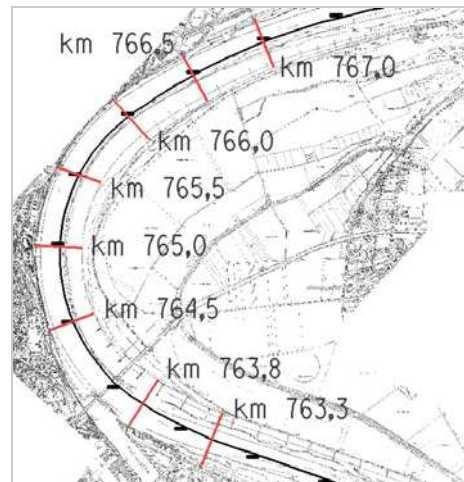


Abb. 11b: Untersuchte Flussschleife des Niederrheins

4 Synthese

Die auf der Basis der BWK-Formel berechneten Hochwasserstände liegen bei extremen Hochwasserereignissen immer über den Werten der GMS-Formel. Sie nehmen mit dem Grad an Verbau durch Gehölze zu. Die Ursache ist in einer falschen Wiedergabe des Widerstandsverhaltens von Bewuchs durch die GMS-Formel zu sehen. Beobachtungen von Pasche, 1984 aber auch die Naturmessungen in Kapitel 3 belegen, dass bei gehölzartigem Bewuchs die Fließgeschwindigkeit in der Bewuchszone, aber auch in der Interaktionszone zwischen Vorland und Fluss trotz Zunahme der Fliesstiefe nahezu konstant bleibt. Die GMS-Formel führt aber mit einem konstanten Strickler-Beiwert zu einer Zunahme der Fließgeschwindigkeit, wenn sich der Wasserstand infolge einer Abflusszunahme erhöht. Demgegenüber verändern sich beim Darcy-Weisbach-Ansatz die Fließgeschwindigkeiten trotz konstanter Bewuchsparameter nicht, da in Gln. 8 der Fließwiderstand linear mit der Anströmhöhe des Bewuchses zunimmt. Ebenso erhöht sich linear mit der Wassertiefe der Fließwiderstand in der Trennfläche, was bei großen Trennflächenwiderständen zu konstanten Fließgeschwindigkeiten im Fluss führt. Damit ist nachgewiesen, dass die Strickler-Beiwerte nur für das kalibrierte Abflussereignis Gültigkeit besitzen. Je mehr das Gewässer und die überfluteten Vorländer von gehölzartigem Bewuchs geprägt sind, desto fehlerhafter wird der berechnete Wasserstand. Bei Extrapolation auf höhere Abflussereignisse kann es wie die Analyse in Kapitel 3 darlegt, zu einer erheblichen Unterschätzung kommen. Selbst für die Ohlau, mit einer nur sehr geringen Unterschätzung von 5 cm, hat diese Ungenauigkeit eine Unterschätzung der Überschwemmungsgebiete um ca. 9 % zur Folge. Gerade vor dem Hintergrund

des erst im Mai von der Bundesregierung verabschiedeten Gesetzes zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes kommt dieser Unzulänglichkeit der GMS-Formel in der Ingenieurpraxis eine hohe Relevanz zu. Aber auch eine sichere Bemessung von Hochwasserschutzanlagen oder gesicherte Aussagen über die Wirkung von Gehölzen auf den Hochwasserstand ist auf dieser Grundlage nicht möglich.

Ein weiterer für die Ingenieurpraxis wichtiger Nachteil der GMS-Formel ist die schlechte Nachvollziehbarkeit des Strickler-Beiwertes. So erkennt man in den Tabellen 2 und 3 häufig keinen direkten Zusammenhang zwischen Strickler-Beiwert und der Rauheitssituation. Zwar ist im Flussschlauch der Beiwert immer deutlich größer als auf dem Vorland. Doch ist nicht erkennbar, warum der Strickler-Beiwert im Gewässerbett nahezu konstant ist, während die Oberflächenrauheit deutlich variiert. Demgegenüber spiegelt die äquivalente Sandrauheit des Darcy-Weisbach-Ansatzes diese Varianz sehr gut wider. Auf dieser Grundlage ist selbst für den wenig erfahrenen Anwender eine bessere Einschätzung der Modellparameter möglich als bei der GMS-Formel. Die Rauheitsparameter stellen kaum noch eine Kalibriergröße, sondern direkt in der Natur bestimmbare und damit physikalisch basierte Größen dar.

Gerade die Modellberechnungen am Unterlauf der Stör zeigen die Grenzen des Widerstandsgesetzes von Colebrook-White auf, den Fließwiderstand von Gras in allen Abflusssituationen zuverlässig zu berechnen. Bei geringen Wasserständen auf dem Vorland wird das Gras mehr durch- als überströmt. In diesem Zustand ruft das Gras einen Formwiderstand hervor, der entweder auf Basis der Gln. 8 oder mit dem im BWK-Merkblatt empfohlenen Verfahren von Kouwen berechnet werden sollte. Auch wenn das BWK-Merkblatt seit 1999 eingeführt ist, greift man bisher in der Ingenieurpraxis auf diese Methode kaum zurück und schätzt die Rauheit des Grases weiterhin als äquivalente Sandrauheit ab.

In Bezug auf die Wirbelviskosität hat die Analyse in Kapitel 3 nachgewiesen, dass

- mit einer konstanten Wirbelviskosität i.d.R. nur ein Hochwasserereignis gut simuliert werden kann,
- ähnlich wie für den Strickler-Beiwert von Gehölzen dieser Parameter bei unterschiedlichen Wassertiefen neu kalibriert werden muss.

Der Grund für diese Abhängigkeit vom Wasserstand ist zu einem wesentlichen Teil in der durch Sohlschubspannung induzierten Turbulenz zu suchen. Bereits Prandtl hat mit seinem Mischungswegansatz nachgewiesen, dass die Kohärenz makroturbulenter Wirbelballen und damit auch der Mischungsweg mit dem Wandabstand zunimmt. In den 2-dimensionalen Flachwassergleichungen (Gln.

3) entsprechen die Fließgeschwindigkeiten und die turbulenten Schubspannungen tiefenintegrierten Größen. Dementsprechend stellt die Wirbelviskosität ebenfalls eine tiefenintegrierte Größe dar. Wie die Berechnung mit konstanter Wirbelviskosität belegen, ist diese Abhängigkeit so stark, dass bei fehlender Berücksichtigung im mathematischen Modell die Wassertiefen um so fehlerhafter werden, je mehr der Strömungszustand vom kalibrierten Zustand abweicht. Extrapolationen des kalibrierten Modells auf andere Hochwasserereignisse sind daher beim Ansatz einer konstanten Wirbelviskosität nicht zulässig. In diesem Fall ist auf den Wirbelviskositätsansatz in Gln. 12 zurückzugreifen, in dem der zweite Term diese Abhängigkeit von der Wassertiefe widerspiegelt.

Turbulente Schubspannungen werden nicht nur durch die Wandgrenzschicht, sondern auch durch freie Scherschichten, wie sie z.B. im Interaktionsbereich zwischen Vorland und Fluss auftreten, hervorgerufen. Dementsprechend ist die Wirbelviskosität von der Größe und Intensität der makroturbulenten Wirbelballen in dieser freien Scherschicht abhängig. Pasche, 1984 konnte zeigen, dass sie mit der Breite der Interaktionszone korreliert werden kann. Dieser Zusammenhang wird durch den ersten Term in dem Wirbelviskositätsansatz von Gln. 12 und Gln. 14 für den Mischungsweg berücksichtigt.

Aufgrund der Abhängigkeit der Turbulenz von der Wandgrenzschicht und von freien Scherschichten stellt der Free-Shear-Layer-Ansatz (Kombination aus Gln. 12 und 14) den physikalisch am besten begründeten Ansatz dar, was auch durch die gute Approximation der gemessenen tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten an der Lippe und im Laborgerinne bestätigt wird (Abb. 9 und 10). Allerdings belegen die Laboruntersuchungen, dass die 2-dimensionale Berechnung bei keiner ausreichend feinen Netzauflösung in Scherschichten durch numerische Diffusion verfälscht wird. Wie die Berechnungen am Laborgerinne belegen, kann dieser Effekt in begrenztem Maße durch den Ansatz von Smagorinsky (Gln. 13) kompensiert werden. Besonders gut waren die Simulationsergebnisse für Hochwasser, bei denen die Vorländer mit großen Wassertiefen überflutet wurden und damit die freie Scherschicht im Übergangsbereich zwischen Vorland und Fluss die Strömung dominiert (Donau, Lippe und Mittellauf der Stör).

Grenzen dieses Ansatzes wurden beim Mittellauf der Stör und beim bordvollen Abfluss der Donau deutlich. In beiden Fällen treten kaum noch Überflutungen des Vorlandes auf. Damit wird die Strömung nur noch von Wandgrenzschichten beeinflusst. Offensichtlich führt in diesen Fällen der Wirbelviskositätsansatz in Gln. 12 in Kombination mit dem Smagorinsky-Ansatz zu einer Überschätzung der Viskosität. Die Reduktion des Smagorinsky-Parameters auf 0,1 konnte zwar zu befriedigenden Ergebnissen führen. Allerdings besitzt diese Anpassung eher den Charakter einer Kalibrierung, so dass die Gültigkeit dieses Parameters für kompakte Gewässer nicht garantiert ist. Hierzu sind weitere systematische Un-

tersuchungen an kompakten Gewässern notwendig. Da bei Hochwasser die Strömung selten auf den Flusslauf beschränkt bleibt, besitzt diese bestehende Schwäche des Smagorinsky-Ansatzes für Hochwasseranalysen nur eine untergeordnete Bedeutung.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Auf Grund der nachgewiesenen Eigenschaften der untersuchten halbempirischen Beziehungen zur Rauheits- und Turbulenzmodellierung in 1- und 2-dimensionalen Strömungsmodellen können folgende Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen ausgesprochen werden.

Das Fließgesetz von Gauckler-Manning-Strickler sollte in der 1- und 2-dimensionalen Berechnung nur dann angewendet werden, wenn die Parameter an historischen Hochwasser kalibriert werden können und der zu untersuchende Abflusszustand zwischen zwei Kalibrierereignissen liegt. Wesentliche, für die Praxis relevante Vorteile ergeben sich durch den Darcy-Weisbach-Ansatz bei Fließgewässern, deren Böschungen und Vorländer zusammenhängende Abschnitte mit gehölzartigem Bewuchs aufweisen. Nicht nur lässt sich auf dieser Grundlage der Effekt des Bewuchses auf den Hochwasserstand sicher quantifizieren, sondern die an einem Hochwasser kalibrierten Modellparameter können in der Regel auf andere Abflusszustände unverändert übertragen werden. Das gilt auch für 2-dimensionale Strömungsberechnungen, wenn gleichzeitig die Wirbelviskosität eine Abhängigkeit von der Fließtiefe aufweist. Hierfür wird der Mischungswegansatz mit einer Kombination aus Sohlrauheit und Free-Shear-Layer induzierter Viskosität empfohlen, wobei der Mischungsweg der freien Scherschicht entweder über den Smagorinsky-Ansatz oder den Free-Shear-Layer-Ansatz berechnet werden kann. Vor allem bei groben Diskretisierungsnetzen besitzt der Smagorinsky-Ansatz Vorteile, da er die durch numerische Diffusion bedingten Fehler zu kompensieren scheint. Allerdings führt er bei Abflusssituationen, in denen die Strömung auf einen kompakten Querschnitt begrenzt bleibt, zu einer deutlichen Überschätzung des Wasserstandes. Weitere Untersuchungen werden benötigt, um in diesem Fall eine sichere Abschätzung der Wirbelviskosität vornehmen zu können.

Sehr gut kann in Flusskrümmungen die durch Sekundärströmungen induzierte Dispersion in 2-dimensionalen Strömungsmodellen mit dem Ansatz von Lien et al, 1999 erfasst werden. Die Verschiebung des Geschwindigkeitsmaximums an die Außenseite der Flusskrümmung kann mit diesem Ansatz sehr gut reproduziert werden. Allerdings wirkte sich dieser Ansatz nur unwesentlich auf den berechneten Wasserstand aus. Dies kann auf das relative große Breiten-Tiefenverhältnis der untersuchten Rheinschleife von ca. 25 zurückzuführen sein,

so dass zur weiteren Klärung der ingenieurpraktischen Relevanz der Dispersion weitere systematische Untersuchungen vor allem an kleineren Gewässern benötigt werden.

Dennoch besitzen wir heute mit dem Darcy-Weisbach-Ansatz und dem Wirbelviskositätsansatz gemäß Gln. 12 ein solides theoretisches Fundament, mit dem für die meisten Strömungssituationen die empirischen Parameter in 1- und 2-dimensionalen Strömungsmodellen sicher und physikalisch begründet direkt über in der Natur bestimmbare Größen abgeschätzt werden können. Sie führen zu nachweislich korrekteren Berechnungen der Strömungsverhältnisse als die Simulation mit einigen wenigen, durch Kalibrierung zu bestimmenden Parametern. Da das Risiko der Fehleinschätzung der Strömung mit diesem vereinfachten Ansatz sehr hoch ist und zu erheblichen Fehlern bei der Bestimmung von Überschwemmungsgebieten und bei der Einschätzung der hydraulischen Wirkung von gehölzartigem Bewuchs führen kann, sollte diese vereinfachte Vorgehensweise in der Ingenieurpraxis nicht mehr zur Anwendung kommen.

6 Literatur

- BWK (1999): Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern, Merkblatt 1/1999
- Chow, Ven te (1988): Open-Channel Hydraulics, Classical Textbook Reissue, MC Graw Hill
- DVWK (1989): Hydraulische Berechnung naturnaher Fließgewässer, Merkblatt Heft 220, Paul Parey Verlag, Bonn
- Lien, H.C.; T.Y. Hsieh; J.C. Yang (1999): Bend-Flow Simulation Using 2d Depth-Averaged Model. Journal of Hydr. Eng., 125,10, 1097-1108
- Lippert, K. (2005): Analyse von Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und ihre mathematische Formulierung für hydrodynamische Modelle, Hamburger Wasserbau-Schriften, Heft 4, Hamburg
- Malcherek, A. (2001): Hydrodynamik der Fließgewässer, Habilitation, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Bericht Nr. 61/2001
- Pasche, E. (1984): Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung, Mittlg. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, 1984

- Pasche, E.; C. Brüning; W. Plöger; U. Teschke (2005): Möglichkeiten der Wirkungsanalyse anthropogener Veränderungen in naturnahen Fließgewässern, Hamburger Wasserbau-Schriften, Heft 4, Hrsg. Erik Pasche, Technische Universität Hamburg-Harburg
- Rath, S. (2006): Model Discretisation in 2D Hydroinformatics based on High Resolution Remote Sensing Data and the Feasibility of Automated Model Parameterisation. Dissertation, Institute für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Rodi, W. (1993): Turbulence-Models and their Application in Hydraulics, IAHR-AIRH Monograph, A.A. Balkema, Rotterdam, 3rd Edition
- Rouvé, G.(1987): Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau“, VCH-Verlag, Bonn
- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations, Monthly Weather Review, Vol. 91, No. 3, pp. 99–165

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. E. Pasche,
Dipl.-Ing. W. Plöger,
MSc. H. Nasermoaddeli
Institut für Wasserbau
TU Hamburg-Harburg
Denickestr. 22
21073 Hamburg
www.tuhh.de/wb

Dr.-Ing. K. Lippert,
Björnsen Beratende Ingenieure GmbH
Maria Trost 3
56060 Koblenz
www.bjoernsen.de

Dipl.-Ing. S. Rath
Risk Management Solutions Ltd.
30 Monument Street
London EC3R 8HB, GB
www.rms.com

Dipl.-Ing. S. Kräßig
EPK-Ingenieure
Kasernenstr. 12
21073 Hamburg
www.epk2.de