

Unsicherheiten bei der Abbildung von 3D-Effekten in der Hochwasserabschätzung mit 2D- tiefengemittelten Berechnungsverfahren

Thomas Wenka & P. Michael Schröder

In der Beurteilung von Flussregelungsmaßnahmen kommen hydrodynamisch-numerische Verfahren zum Einsatz, denen grundsätzlich vereinfachende Annahmen, wie z.B. Tiefenmittelung oder Turbulenzmodellierung, zu Grunde liegen. Der vorliegende Beitrag geht der Frage nach, welche Unsicherheiten diese Vereinfachungen in der Hochwasserabschätzung bewirken und mit welchen Mitteln dennoch Aussagen für eine zuverlässige Risikoabschätzung getroffen werden können.

Flussregelung, Hochwassersimulation, Tiefenmittelung, Turbulenzmodellierung

1 Einleitung

Um dem steigenden Verkehrsaufkommen an Mittel- und Niederrhein zu begegnen, wurde die Vertiefung der Fahrrinne auf 2,50 m unter GIW zwischen Koblenz und Duisburg bzw. auf 2,80 m unter GIW von Duisburg bis zur deutsch-niederländischen Grenze beschlossen. Für die davon betroffenen Stromabschnitte werden Regelungskonzepte erarbeitet, die der kontinuierlichen Abminderung der Baggermengen dienen. Das primäre Ziel aus Sicht des Verkehrswasserbaus ist hierbei, durch den Neubau bzw. die Erweiterung von Buhnen und Leitwerken sowie eine gezielte Geschiebemanagement entlang des frei fließenden Rheins ein neues dynamisches Sohlgleichgewicht zu schaffen.

Aus Sicht der Anlieger sind Flussregelungsmaßnahmen tolerabel, wenn das Risiko eines Hochwasserschadens durch die Maßnahme nicht zunimmt. Die Hochwasserneutralität der Baumaßnahmen muss daher im Rahmen der Untersuchungen zuverlässig nachgewiesen werden. Aus modelltechnischer Sicht müssen zum Nachweis der Hochwasserneutralität bzw. zur Bestimmung der Gefährdung die Unsicherheiten bei der Abbildung der natürlichen Prozesse in ihrer Wirkungskette quantitativ erfasst und analysiert werden.

2 Theoretische Betrachtungen

Die Bewertung und Optimierung von Regelungsmaßnahmen erfolgt in der BAW mit mesoskaligen Modellen, die am Rhein eine Länge von 10 – 30 Flusskilometer aufweisen. Einzelne Bauwerke, wie Buhnen oder Parallelwerke, werden geometrisch genau nachgebildet. Allein diese Anforderung an die Geometrie führt zum Teil auf Modellgrößen von über 500.000 Stützpunkten in der Fläche. Eine effiziente hydrodynamisch-numerische Berechnung ist dann nur noch mit vereinfachten Modellgleichungen zu bewältigen, so dass üblicherweise zweidimensional-tiefengemittelte Berechnungsverfahren eingesetzt werden.

Sofern der Gültigkeitsbereich der Gleichungen durch die Vereinfachungen eingeschränkt wird, erfolgt eine Parametrisierung der nicht berücksichtigten physikalischen Prozesse entweder durch vereinfachende Modelle mit zusätzlichen Modellparametern oder durch Anpassung vorhandener Parameter. Die Prognosegenauigkeit der Simulation wird hierdurch u.U. erheblich vermindert (*Schröder, 1997 & 2003*):

Turbulenzmodellierung

Die zeitliche und räumliche Auflösung von Turbulenz durch „Direkte Numerische Simulation“ erfordert einen für praktische Fragestellungen ungeeignet hohen Rechenaufwand. Es kommt daher im Allgemeinen der Einsatz von Turbulenzmodellen in Betracht. Algebraische Turbulenzmodelle, wie das von *Elder (1959)*, berücksichtigen nicht den Transport von Turbulenz mit der Strömung. Der Einfluss von Scherschichten wird nur unzureichend erfasst. Das Elder-Modell beruht auf messtechnischen Untersuchungen zur Stoffausbreitung und verwendet für die Mischung in Strömungsrichtung einen um den Faktor 10 höheren Koeffizienten als in lateraler Richtung. In beschränktem Umfang werden hierdurch Dispersionseffekte besser approximiert als in aufwändigeren Turbulenzmodellen.

Hydrostatische Druckannahme

Bei der Tiefenmittelung wird die vertikale Impulsgleichung zu einer hydrostatischen Druckgleichung vereinfacht. Der Einfluss vertikaler Beschleunigungen auf die Strömung, wie sie beispielsweise an angeströmten, über- und umströmten Bauwerken oder bei steilen Wellen auftreten, wird daher nicht korrekt abgebildet. Anhaltswerte für die Gültigkeit der hydrostatischen Druckannahme findet man u.a. in der Angabe, dass das maximale Sohlgefälle in Fließrichtung einen Wert von 1 : 10 nicht überschreiten sollte.

Vernachlässigung von Dispersionstermen (aus der Tiefenmittelung)

Die mathematisch exakte Integration in vertikaler Richtung führt auf tiefengemittelte Gleichungen, die zusätzliche Dispersionsterme beinhalten. Diese Terme sind nur dort vernachlässigbar klein, wo sehr gleichförmige vertikale Geschwindigkeitsprofile vorliegen. Insbesondere Sekundärströmungen und vertikale Rezirkulationszonen hinter über- oder auch umströmten Bauwerken können in ihrer Wirkung auf die Strömung nur unzureichend abgeschätzt werden (*Rouvé & Schröder, 1994*). Der u.U. erhebliche Einfluss auf die Strömung, ist insbesondere ein Problem bei der Bewertung von Baumaßnahmen, selbst wenn nur Differenzbetrachtungen zwischen einem Ausgangszustand und einer Bauwerksvariante durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 4.1).

Ein Verzicht auf die direkte Modellierung der Dispersionsterme bedingt deren Berücksichtigung in den Diffusionstermen. Eine übliche Strategie ist die entsprechende Erhöhung der Wirbelviskosität ν_t . Bei Verwendung des tiefengemittelten k - ϵ Turbulenzmodells (*Rodi, 1993*) lässt sich dies über die Wirbelviskosität z.B. durch die Kalibrierung der im sekundären Produktionsterm enthaltenen dimensionslosen Diffusivität e^* tun. Auf empirischem Wege wurde für Laborgerinne typischerweise ein Wert von $e^* = 0,15$ und für Flüsse von 0,6 ermittelt. Zahlreiche Veröffentlichungen weisen jedoch darauf hin, dass durch Einbauten und Krümmungen Sekundärströmungen induziert werden, welche die Dispersion erheblich intensivieren. Durch die Proportionalität zwischen ν_t und e^* ist es angebracht, Bereiche intensiver Sekundärströmung mit einer Erhöhung der Diffusivität zu kalibrieren. *Rouvé & Schröder (1994)* zeigen am Beispiel des Aachener Mäanders, wie stark e^* in solch extremen Fällen variieren kann. Die Werte variieren von $e^* = 0,5$ auf den Vorländern bis $e^* = 25$ im Hauptgerinne.

3 Datenqualität und Prognosefähigkeit

3.1 Qualität der Eingabedaten

Im numerischen Modell wird das reale System, das sich immer auf einen räumlichen Ausschnitt aus der Natur bezieht, durch geometrische und stoffliche Parameter beschrieben, wobei nur die für den jeweiligen Anwendungsfall bedeutsamen Gegenstand des Modells sein müssen. Das System, das mit der Umgebung in Wechselwirkung steht, wird durch die über die Systemgrenzen wirkenden Ein- und Ausgangsgrößen gesteuert (*Wenka, 2003*). Diese Naturdaten, die über die Rand- und Anfangsbedingungen die Qualität des Modells maßgeblich beeinflussen, unterliegen teilweise beträchtlichen Streubreiten.

So kann z.B. bei Wasserspiegelfixierungen an schiffbaren Flüssen für Niedrig- bis Mittelwasser cm-Genauigkeit erreicht werden. Ungünstige Auswirkungen auf die Messungen hat der durch Wind und Schifffahrt verursachte Wellenschlag, der bei Hochwasser lediglich dm-Genauigkeit zulässt. Bei der möglichst zeitgleichen Geschwindigkeits- und Abflussmessung mittels ADCP ist eine Genauigkeit von ca. 95% erreichbar.

3.2 Prognosefähigkeit

Für die Genauigkeit eines Modells wird oft der Vergleich mit der Natur als der entscheidende Maßstab genannt. Von dieser datenorientierten Seite bietet sich daher der Vergleich mit Messdaten an. Diese weithin gebräuchliche Methode ist zwar sehr nützlich aber unscharf, da eine mathematisch exakte Fehlerbetrachtung nicht vorgenommen werden kann (*Wenka, 1999*).

Bei einem 2D-tiefengemittelten Modell eines Flussabschnittes, in dem nahezu stationäre Ereignisse simuliert werden, kann für den Fehler bezüglich des Wasserstands angenommen werden: Unter der Voraussetzung, dass der Modellfehler deutlich kleiner als der Messfehler ist, können die Wasserstände absolut in der Größenordnung der Eingangsdaten angegeben werden. Die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Modellvarianten können in der Größenordnung des Modellfehlers angegeben werden. Absolute Wasserspiegelhöhen können somit bei Flussmodellen zuverlässig in dm-Genauigkeit berechnet werden. Prognosen der Wasserstandsdifferenzen hingegen besitzen cm-Genauigkeit, sofern sie auf Basis desselben Modells ermittelt werden, in dem durch die variantenspezifischen Änderungen gegenüber dem kalibrierten und validierten Ausgangszustand die Modellannahmen nicht verletzt wurden.

4 Beispiele

4.1 Buhengruppe am Godorfer Hafen

Zwischen Bonn und Köln befindet sich im Bereich des Godorfer Hafens eine wechselseitige Fehlstelle, die die ausgewiesene Fahrrinnenbreite von 150 m einschränkt und insbesondere bei Niedrigwasser ein Hindernis für die Schifffahrt darstellt (Abbildung 1). Daher ist der Neubau von Buhnen bzw. Parallelwerken unterhalb des Hafens geplant. Die Optimierung und Bewertung der Regelungsvarianten wird mit einem 2D-tiefengemittelten Verfahren durchgeführt.

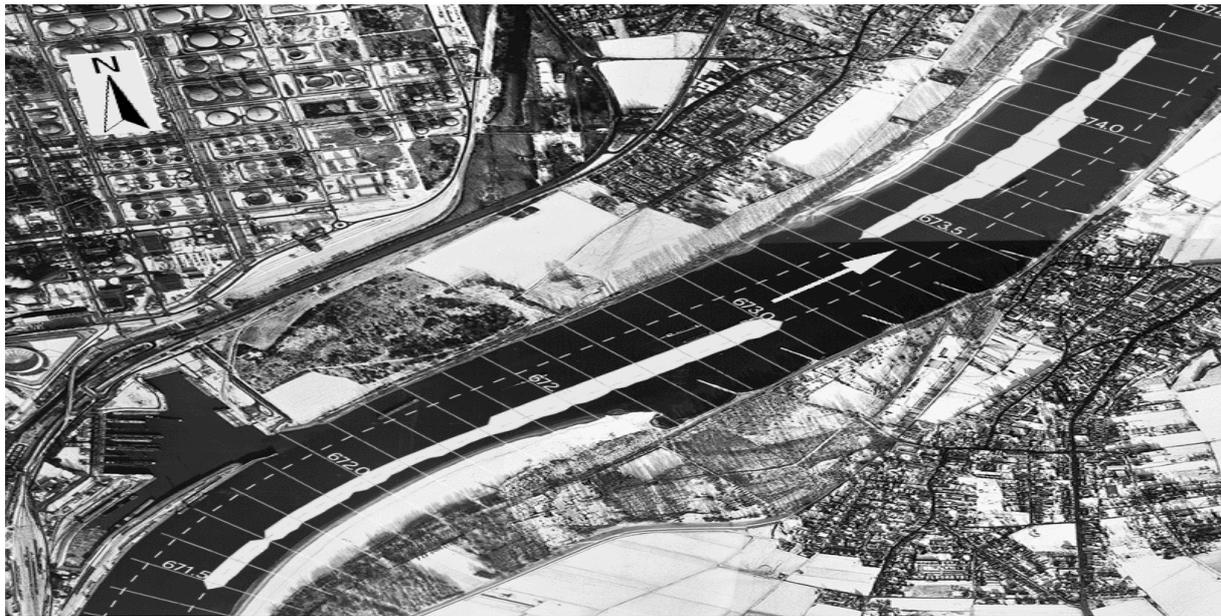


Abbildung 1 Blick auf den Rheinabschnitt „Godorfer Hafen“
mit wechselseitiger Fehlstelle

Für den Stromabschnitt stand bis zum Jahr 2000 ein zweifach überhöhtes hydraulisches Labormodell zur Verfügung. Hierdurch ergab sich die Möglichkeit, insbesondere eine aus 11 Buhnen bestehende Regelungsmaßnahme parallel im HN-Modell und im Labormodell zu untersuchen. Von Interesse war vor allem ein Vergleich hinsichtlich der Prognose regelungsbedingter Wasserspiegeländerungen für Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüsse. Während beide Modellarten für den Fall nicht überströmter Buhnen, also bei Niedrig- und Mittelwasser, eine gute Übereinstimmung in den prognostizierten Wasserspiegeländerungen zeigten, war bei Hochwasser eine nicht tolerierbare Diskrepanz in den Ergebnissen festzustellen.

Gemäß Abschnitt 2 sind aufgrund der steilen Sohlgradienten an Buhnen bei Überströmung die tiefengemittelten Gleichungen physikalisch nicht mehr gültig; weder die Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung noch die Vernachlässigung von Dispersionstermen ist statthaft. Dennoch werden auch für die tiefengemittelte Berechnung verlässliche Ergebnisse benötigt, da i.A. nicht immer kostenintensive Labormodelle zur Verfügung stehen und aufgrund der Modellgröße eine vollständige 3D-Simulation zu aufwändig wäre. Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie sollte daher durch Parametervariation eine möglichst allgemeingültige Lösung für überströmte Buhnen gefunden werden.

Im Wesentlichen kommen in den tiefengemittelten Gleichungen zwei Verlustparameter für eine Variation in Betracht: Sohl Schubspannungen und turbulente Spannungen. Prinzipiell wäre eine pauschale Erhöhung der Sohlrauheit im

Bereich der Buhnen denkbar. Da auch die Wirbelviskosität eine Rolle spielt, hat diese Vorgehensweise den Nachteil, dass weder der Betrag noch der Bereich für die Erhöhung allgemeingültig und eindeutig festgelegt werden kann. Die Übertragung der Parametrisierung auf andere Flussabschnitte ist dann nahezu ausgeschlossen. Daher wird hier global für das gesamte Modell eine gemischte Parametrisierung von Sohlschubspannungen und turbulenten Spannungen gewählt.

Tabelle 1 Parameterkombinationen zur Berechnung der Buhnengruppe

Variation	Skalierung		Wirbelviskosität	
	Länge / Höhe	Rauheit	Labormaßstab	Naturmaßstab
0	100 / 50	8	0.0009	0.6
A		8	0.004	2.8
B		10	0.008	5.6
C		15	0.012	8.5
Elder-Modell		8	-	-

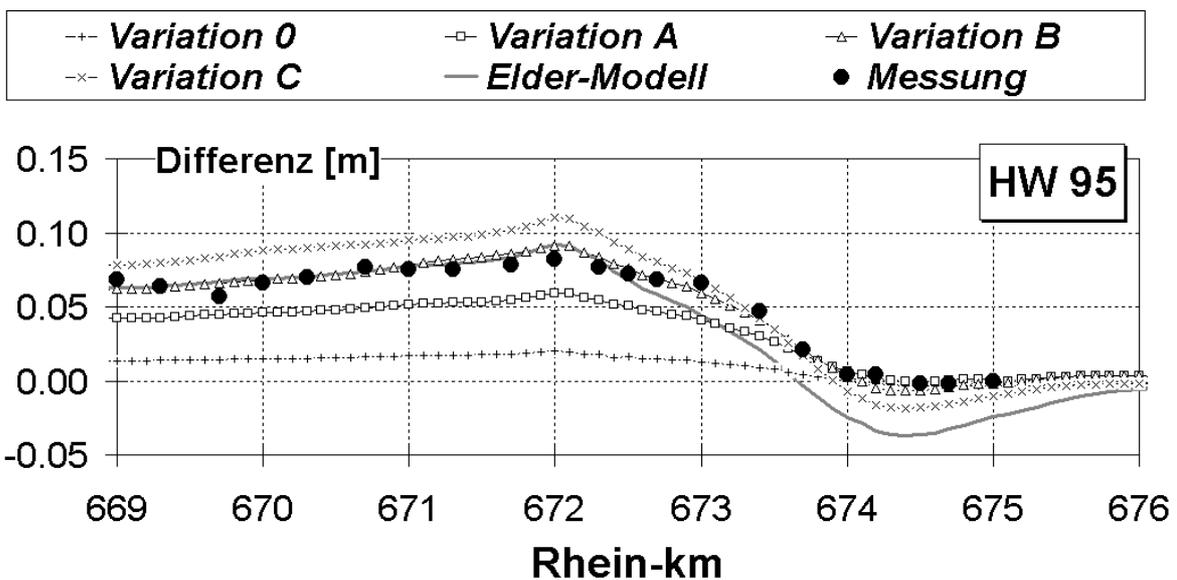


Abbildung 2 Wasserspiegeländerung im Längsschnitt infolge einer Buhnengruppe bei unterschiedlichen Parameterkombinationen

Tabelle 1 zeigt die jeweils variierten Parameter. Die berechneten Wasserspiegeländerungen sind in Abbildung 2 für einen Längsschnitt durch die Fahrrinnenmitte bei unterschiedlichen Parameterkombinationen dargestellt. Es sei hier angemerkt, dass die mathematische Berechnung für den Labormaßstab ausgeführt wurde, um eine größtmögliche Vergleichbarkeit von Simulation und Messung zu gewährleisten. Zunächst erfolgte die Berechnung für den Ausgangszustand ohne Buhnen. Die Wirbelviskosität wurde dabei in Stufen variiert und

die Skalierung der Rauheitshöhe so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Naturdaten bestand. Anschließend erfolgte mit der jeweiligen Parametervariation eine Simulation der Buhnenvariante.

Unmittelbar lässt sich eine Tendenz aus den Berechnungen ableiten: Mit einer Erhöhung der Wirbelviskosität nimmt die vom HN-Modell prognostizierte Erhöhung der Wasserspiegellagen zu. Das Elder-Modell mit den Parametern $v_{t,l\ddot{a}ngs} = 6,0 \text{ h } U_{\tau}$ und $v_{t,quer} = 0,6 \text{ h } U_{\tau}$ liefert oberhalb der Regelungsstrecke ähnliche Ergebnisse wie die Parametervariation B, während unterhalb eine stärkere Absenkung des Wasserspiegels vorhergesagt wird.

Hier zeigt sich, dass die durchgeführte Sensitivitätsstudie für das tiefengemittelte Modellverfahren eine Variation in den prognostizierten Wasserspiegeländerungen bewirkt, die die im Labormodell gemessenen Daten vollständig einschließt. Aus diesen Ergebnissen sollte nicht leichtfertig gefolgert werden, dass nun für die Beurteilung von Buhnenvarianten immer die Variation B mit $v_{t,const.} = 5,6 \text{ m}^2/\text{s}$ oder das Elder-Modell zu verwenden ist. Vielmehr zeigt sich hier die Nützlichkeit einer Sensitivitätsstudie, um das Spektrum möglicher Modellergebnisse kennenzulernen und damit eine Aussage über die Modellgenauigkeit zu erhalten.

Interessanterweise zeigen die Ergebnisse einer Sensitivitätsbetrachtung für Parallelwerksvarianten eine wesentlich geringere Variabilität, woraus im Einklang mit der Theorie (Abschnitt 2) der Schluss zu ziehen ist, dass die Prognosegenauigkeit bei tiefengemittelten Modellen für Längsstrukturen sehr hoch ist (*Roßbach & Schröder, 2001*).

4.2 Flutmulde Rees / Niederrhein

Durch eine Flutmulde auf dem linken Rheinvorland gegenüber der Stadt Rees (Abbildung 3) wird eine wirksame Abnahme der Erosion der Flusssohle bei gleichzeitiger Verminderung der Hochwassergefahr erzielt. Bei mittlerem bis extremem Hochwasser kann ca. 15 bis 18 % des Abflusses über die Flutmulde abgeführt werden. In Abbildung 3 ist lediglich der Bereich der Linkskrümmung abgebildet; das gesamte Modell umfasst die nach oberstrom anschließende Rechtskrümmung und ist somit phänomenologisch der in *Wenka (1992) und Schröder (1997)* beschriebenen Mäanderströmung zuzuordnen.

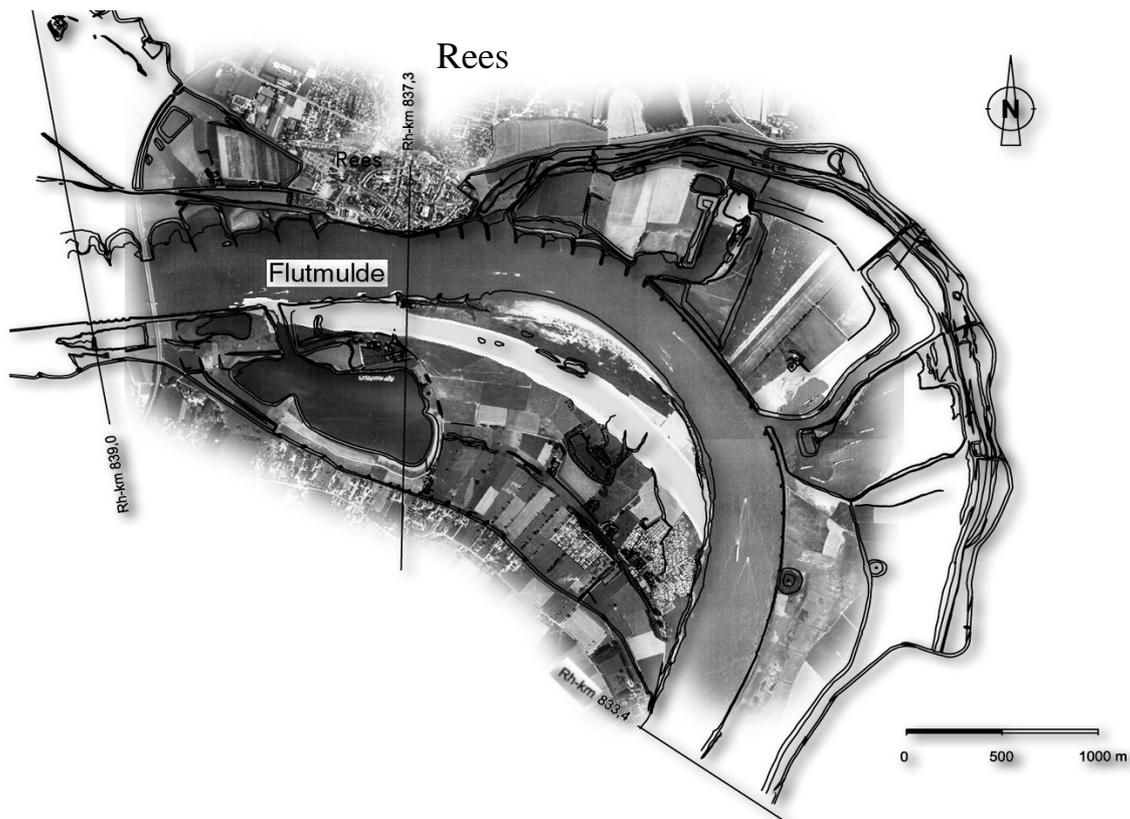


Abbildung 3 Flutmulde gegenüber der Stadt Rees im Luftbild

Infolge der großräumigen Überströmung des mäandrierenden Hauptgerinnes bestehen starke Ungleichförmigkeiten der vertikalen Geschwindigkeitsprofile, die den dispersiven Termen eine signifikante Größenordnung verleihen. *Wenka (1992)* kommt bei Auswertung der Fehlerintegrale zu dem Schluss, dass trotz der hohen Dreidimensionalität der für Naturverhältnisse stark idealisierten Strömung im 2D-tiefengemittelten Modell die Strömungsgeschwindigkeiten mit max. 10%-igem, die Wasserspiegellage mit max. 5%-igem Fehler prognostiziert werden können. Unter diesen Voraussetzungen liegt die Prognosegenauigkeit bei Absolutwerten im Unschärfbereich der Naturdaten. Die Genauigkeit der im HN-Modell berechneten Wasserstandsänderungen relativ zum Ausgangszustand ist daher im cm-Bereich anzusiedeln (vgl. Abschnitt 3).

Im Vergleich zum bestehenden Zustand verändert die geplante Flutmulde die Hochwasserhydraulik dahingehend, dass durch die Erhöhung des Vorlandabflusses die Fließgeschwindigkeiten im Hauptstrom um bis zu 0,33 m/s reduziert werden. Bis auf eine geringfügige Anhebung des Wasserstands um rechnerisch 3 cm im Einleitungsbereich der Flutmulde bei Rhein-km 838,2 (Abbildung 4) zeichnet sich diese Variante durch eine Absenkung des Wasserstands um rechnerisch bis zu 11 cm oberhalb Rees aus, was auch oberhalb des Projektgebiets zu einer Entlastung der Hochwasserstände führt.

Differenz[m]

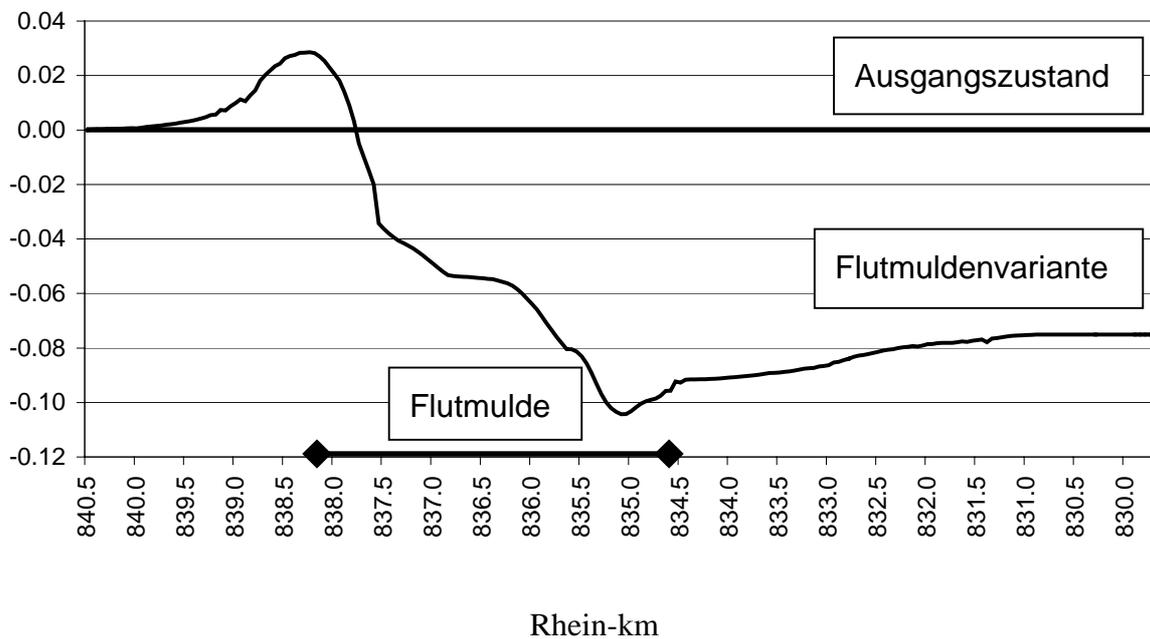


Abbildung 4 Wasserstands­differenz der Flutmuldenvariante gegenüber Ausgangszustand bei HHQ26

5 Schlussfolgerungen

Die Frage, welche Unsicherheiten die Vereinfachungen in 2D-tiefengemittelten Modellverfahren bei der Hochwasserabschätzung bewirken, kann für Reg­lungsmaßnahmen an Wasserstraßen und die sie begleitenden Untersuchungen zufriedenstellend beantwortet werden. Die zu Querbauwerken durchgeführten Sensitivitätsstudien zeigen, dass die zur Rauheits- und Turbulenzmodellierung eingesetzten Methoden bzw. Parameter durch eine entsprechende Kalibrierung an das jeweilige Problem so angepasst werden können, dass der Modellfehler bei Relativaussagen deutlich geringer ist, als der den Naturdaten anhaftende Messfehler. Sensitivitätsbetrachtungen zu Parallelwerksvarianten zeigen sogar eine wesentlich geringere Variabilität; d.h. die Prognosegenauigkeit ist bei 2D-tiefengemittelten Modellen für Längsstrukturen als sehr hoch einzustufen.

Da sich die Unsicherheiten durch Modellvereinfachungen in der Hochwasserabschätzung, die oft vergleichend zu einem Ausgangszustand an­gestellt wird, in einem Fehlerspektrum bewegen, das deutlich geringer ist als die Streubreite der Naturdaten, ist darauf aufbauend auch eine zuverlässige Risikoabschätzung möglich.

6 Literatur

- Elder, J.W. (1959): The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 5, No. 4.
- Rodi, W. (1993): Turbulence Models and their Application in Hydraulics - a State of the Art Review, 3rd Edition, Balkema, 1993
- Roßbach, B. & Schröder, P.M. (2001): Numerisches Modell Niederkassel-Wesseling-Godorf – Rheinabschnitt Godorf; Gutachten zum Ausbau der Rheinstrecke von km 664,0 bis 678,0 im Rahmen der Fahrrinnenvertiefung zwischen Köln und Koblenz von 2,10 m auf 2,50 m unter GIW; Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2001
- Rouvé, G. & Schröder, P.M. (1994): Die Entwicklung eines mathematisch-numerischen Verfahrens zur Berechnung naturnaher Fließgewässer, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, DFG-Projekt Ro 365/31-6, 1994 (unveröffentlicht)
- Schröder, P.M. (1997): Zur numerischen Simulation turbulenter Freispiegelströmungen mit ausgeprägt dreidimensionaler Charakteristik, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Band 108
- Schröder, P.M. (2003): Mathematische Formulierung der physikalischen Strömungsprozesse. Forum für Hydrologie u. Wasserbewirtschaftung, Heft 03.03, München 2003
- Wenka, T. (1992): Numerische Berechnungen von Strömungsvorgängen in naturnahen Flussläufen mit einem tiefengemittelten Modell, Dissertation. Institut für Hydromechanik, TU Karlsruhe 1992
- Wenka, T. (1999): “Modellerstellung und –betrieb”. Numerische Modell von Flüssen, Seen und Küstengewässern. DVWK-Schriften, Heft 127, Bonn 1999
- Wenka, T. (2003): Einführung in Aufbau und Anwendung numerischer Simulationsmodelle. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 03.03, München 2003

Autoren:

Dr.-Ing. Thomas Wenka
Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
Kußmaulstraße 17
D 76187 Karlsruhe

Dr.-Ing. Michael Schröder
Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
Kußmaulstraße 17
D 76187 Karlsruhe

Tel.: ++49 – 0721 – 9726-3640
Fax: ++49 – 0721 – 9726-4540
E-Mail: wenka@baw.de

Tel.: ++49 – 0721 – 9726-3730
Fax: ++49 – 0721 – 9726-4540
E-Mail: schroeder@baw.de