

Aspekte zur Berechnungsgenauigkeit von Hochwassersimulationen mit mehrdimensionalen Strömungsmodellen

Jens Wyrwa

Für die Simulation von Hochwasserströmungen mit 2- und 3-dimensionalen Modellen müssen Sohlreibungsbeiwerte nicht nur der Gewässersohle, sondern auch den Vorlandflächen mittels Kalibrierung zugeordnet werden. Anhand eines ersten praktischen Beispiels wird erläutert, welche Auswirkungen 10 cm Messfehler bei einer zur Kalibrierung verwendeten Hochwassermarke haben können. In einem zweiten Projektbeispiel konnte eine Validierung durchgeführt werden, die über die erzielbare Genauigkeit Aufschluss gibt. Als dritter Aspekt wird die Untersuchung von Erosion suspendierbarer Feinsedimente mittels eines 3D-Modells und erweiterter Turbulenzmodellierung angeführt. Hierbei zeigt sich eine starke Rückwirkung des Erosionsvorgangs auf die Sohlschubspannung.

Berechnungsgenauigkeit, Sohlreibungsbeiwerte, Kalibrierung, Validierung, 2D- und 3D-Modelle

1 Einleitung

Wenn Fließvorgängen in flachen Gewässern mit freier Oberfläche mittels der tiefengemittelten Impulsbilanz beschrieben werden, dann stellen die Terme der Sohlreibung und des Wasserspiegelgefälles in aller Regel die größten Anteile dar. Der Ermittlung der Sohlreibung kommt also bei der Bemessung von Fließgewässern eine zentrale Rolle zu. Zur Verknüpfung von Fließgeschwindigkeit und Sohlschubspannung auf rauhen Sohlen sind verschiedene empirische Beziehungen vorgeschlagen worden, die alle Parameter enthalten, welche der Kalibrierung bedürfen. Ohne eine abschnittsspezifische Kalibrierung, die für das Hochwasser die überströmten Vorlandflächen mit einschließen muss, sind 2D- und 3D-Modelle kaum sinnvoll einsetzbar.

Dieser Beitrag gliedert sich in drei Abschnitte (Aspekte). Im ersten Aspekt, Abschnitt 2, geht es um die Auswirkung eines Messfehlers bei der Kalibrierung.

Im zweiten Aspekt, Abschnitt 3, wird die erzielbare Genauigkeit anhand der Validierung eines 2D numerischen Modells beleuchtet. Den Abschluss bildet in Abschnitt 4 die Untersuchung der Sohlreibungsabnahme infolge Erosion feiner suspendierbarer Sedimente.

2 Auswirkung eines Messfehlers bei der Kalibrierung

2.1 Projektzusammenhang

Im Verlauf der hydraulischen Untersuchung des geplanten Hochwasserschutzes Oberbillig an der Mosel mittels eines 2D-Modells durch das Ingenieurbüro Björnson kam es im Januar 1995 zu einem Hochwasser.

Es handelte sich dabei um das vierthöchste Moselhochwasser, das seit dem Moselausbau beobachtet werden konnte mit einem Summenabfluss von 2190 m³/s. Das Bemessungsabfluss für ein Hochwasser mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit einmal alle 100 Jahre beträgt 2860 m³/s.

Das Hochwasser am 23. Januar 1995 wurde vom Berechnungsteam vor Ort beobachtet. Unmittelbar nach Durchgang der Hochwasserspitze wurden die dabei aufgetretenen Wasserstände anhand von Geschwemmsellinien markiert. Daher war für die Kalibrierung des Modells eine außergewöhnlich gute Grundlage vorhanden.

2.2 Ergebnis der Kalibrierung

Nach der Modellaufstellung wurde mittels Kalibrierberechnungen die geeignete äquivalente Sandrauheit der Flusssohle angepasst. Da das Modell nicht sehr sensitiv auf Änderungen der Vorlandrauheiten reagierte, sind die dort angesetzten Werte stärker erfahrungsgestützt. Da die Wasserspiegellage in dieser Situation auf Änderungen der Wirbelviskosität ähnlich reagiert wie auf Änderungen der Sohlrauheit, musste auch bei der Bestimmung der Wirbelviskosität Erfahrungswissen einfließen.

Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt des Berechnungsgebiets im Lageplan. In diesem wurden die Kalibrierpunkte eingetragen. Dort sind jeweils die berechnete und die beobachtete Wasserspiegellage eingetragen. Der Ausschnitt zeigt nur die Sauermündung und den oberstrom liegenden Teil der Mosel. Das gesamte Modellgebiet ist größer. Das Hochwasser vom Januar 1995 war ein

sogenanntes Sauer-dominiertes. D.h. die kleinere Sauer lieferte mit $1130 \text{ m}^3/\text{s}$ mehr Abfluss als die obere Mosel mit $1060 \text{ m}^3/\text{s}$. Dadurch wird die Strömung in diesem Teil der Mosel etwas zurückgestaut. Der beobachtete Wasserspiegel in der oberen Mosel war ruhig, während der Abfluss in der Sauer gewellt und geräuschhaft vonstatten ging.

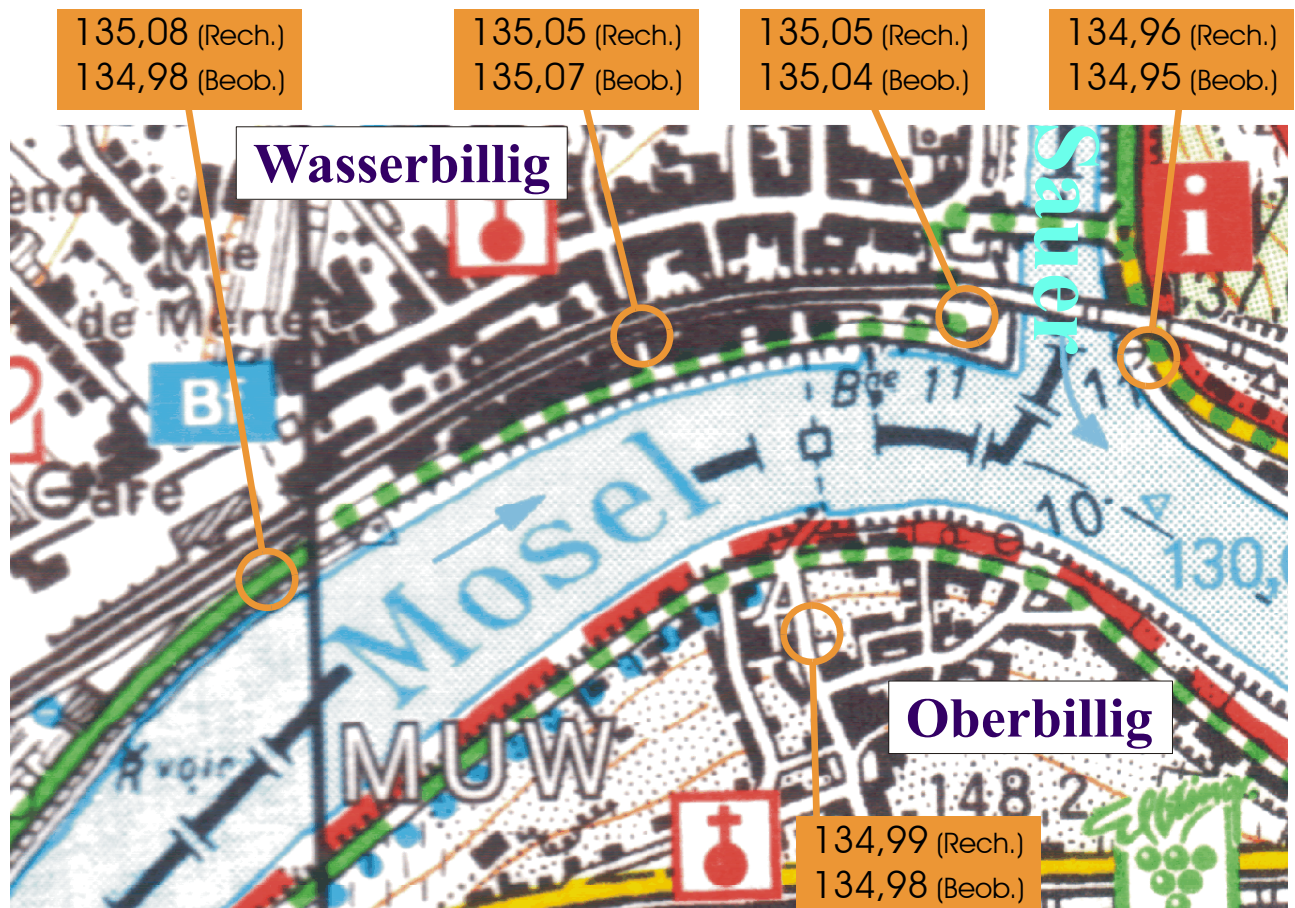


Abbildung 1: Eichpunkte im Lageplan

2.3 Unstimmigkeit bei der beobachteten Wasserspiegellage

Die Eichpunkte in diesem Ausschnitt weisen bis auf den westlichsten Punkt 1-2 cm Abweichung zwischen Beobachtung und Berechnung auf und sind insgesamt physikalisch plausibel. Am westlichsten Punkt dieses Ausschnitts unterschreitet die beobachtete Wasserspiegellage allerdings den berechneten Wert um 10 cm. Dies ist an dieser Stelle so bemerkenswert, dass dazu weitere Überlegungen angestellt wurden. Hier soll dieses Beispiel dazu dienen, um zu erläutern, welche Konsequenzen ein Fehler von 10 cm bei der Vermessung der Wasserspiegellage haben kann.

2.3.1 Reibungsgesetze

Zur Übersicht seien die bekannten Reibungsgesetze hier kurz angeschrieben (*Heinemann, Press*):

Die Sohlschubspannung τ_b lässt sich auch als Reibungsgefälle I_r darstellen:

$$(1) \quad \tau_b = \rho \cdot g \cdot h \cdot I_r$$

Dieses Reibungs- oder Impulsverlust-Gefälle entspricht exakt dem Wasserspiegelgefälle nur bei gleichförmiger Strömung in geraden, sehr breiten Rechteckgerinnen mit konstanter Wassertiefe h . In den recht gleichförmigen Strömungen von hochwasserführenden Flüssen, die zu sehr breiten Fließquerschnitten ausufern, ist die Sohlreibung für einen wesentlichen Anteil des Impulsverlustes zuständig.

Alle Reibungsgesetze dienen dem Zweck, die Sohlschubspannung mit der Fließgeschwindigkeit zu verknüpfen. Zusammenfassend lässt sich die Sohlschubspannung als Reibungsbeiwert mal Staudruck anschreiben:

$$(2) \quad \tau_b = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\rho}{2} v^2$$

Die bekannten Reibungsgesetze lassen sich damit als Berechnungsverfahren für den Reibungsbeiwertes $\lambda/4$ darstellen (das $1/4$ stammt aus dem Verhältnis von hydraulischem Durchmesser zu hydraulischem Radius). Dazu werden unterschiedliche Rauheitsparameter (Stricklerbeiwert K_{St} , äquivalente Sandrauheit k) verwendet. Die entscheidenden Differenzen bestehen aber bei der funktionalen Abhängigkeit von der Wassertiefe h :

$$(3) \quad \frac{\lambda}{4} = 2 \cdot K_{St}^{-2} \cdot g \cdot h^{-\frac{1}{3}} \quad \text{Manning-Strickler}$$

$$(4) \quad \frac{\lambda}{4} = -\frac{1}{16} \left[\log \left(\frac{k}{h \cdot 14,84} \right) \right]^{-2} \quad \text{Colebrook-White (voll rauh)}$$

2.3.2 Unstimmigkeit in der Ermittlung des Gefälles

Zuerst sei hier der Standardfall besprochen, in der ein Messfehler in der Wasserspiegellage ein fehlerhaftes Gefälle ergibt, das in der Kalibrierung zu einem fehlerhaften Rauheitsparameter führt.

Als einfaches Zahlenbeispiel sei angenommen, dass Wasserspiegel-Messungen nur im Abstand von je einem km vorliegen. Des Weiteren werde angenommen, dass eine Hochwasserströmung bei 1,5 m/s Fließgeschwindigkeit und 6 m Wassertiefe ein reales Gefälle von 20cm/km besitzt und dass sich dieses aufgrund eines Messfehlers auf 10cm/km reduziert oder auf 30cm/km erhöht. Mit Hilfe der Gln. (1) bis (4) lassen sich nun die Rauheitsparameter bestimmen: Für das reale Gefälle beträgt die äquivalente Sandrauheit $k=0,32$ m und der Stricklerbeiwert $K_{St} = 32 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Das fehlerhaft zu kleine Gefälle führt zu: $k=0,03$ m und $K_{St} = 45 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Das fehlerhaft zu große Gefälle ergibt: $k=0,90$ m und $K_{St} = 26 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Allein anhand dieser Zahlen ist ersichtlich, dass das Einbringen von Erfahrungswissen in den Kalibriervorgang das Resultat verbessern kann.

Der Sinn dieses Zahlenbeispiels besteht nun darin aufzuzeigen, welchen Einfluss der Kalibrierfehler im Prognosefall hat, wenn der Wasserstand zumeist höher als beim Kalibrierereignis ist. Als Beispiel werden hier 8 m Wassertiefe angenommen. Dann tritt bei gleichem realem Gefälle eine Fließgeschwindigkeit von 1,8 m/s auf. Mit den fehlerhaften Sandrauheiten ergibt sich für die Gefälle 10,3 und 29,4 cm/km. Mit den fehlerhaften Strickler-Beiwerten ergeben sich 10,0 und 30,0 cm/km. D. h. der durch einen Messfehler bei der Kalibrierung in ein Modell eingebrachte Fehler bleibt in seiner Größe nahezu konstant.

Im konkreten Projekt war eine aussergewöhnliche Dichte von Messpunkten vorhanden. Das Auftreten eines negativen Reibungsgefälles ist unplausibel und wurde nicht in Betracht gezogen.

2.3.3 Unstimmigkeit in der Ermittlung des Abfluss

Als weitere Möglichkeit könnte in Betracht gezogen werden, dass der in der Kalibrierberechnung verwendete Abfluss Fehler aufweist. Auch im konkreten Projekt waren zur Abflussermittlung mehrere Pegel herangezogen worden und Annahmen über Wellenlaufzeiten verwendet. Durch umformen von Gl. (1) und (2) lässt sich der breitenspezifische Abfluss $q = h \cdot v$ isolieren:

$$(5) \quad q = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot I}{\lambda}} \cdot (h)^{3/2}$$

Gleichung (6) besagt nun, dass sich der Abfluss aus dem Wasserstand ermitteln lässt, wenn Gefälle und Reibungsbeiwert bekannt sind. Andererseits bedeutet es

aber auch, dass ohne Kenntnis des Abflusses ein numerisches Modell nicht kalibrierbar ist.

Der Wurzelterm auf der rechten Seite von Gl. (6) ist das was am Pegel als Pegelkurve und beim numerischen Modell in der Kalibrierung bestimmt werden muss. Ist der Zusammenhang bekannt, führt ein Fehler von z. B. 10 cm bei der Bestimmung der Wasserspiegellage (Wassertiefe h) bei Hochwasser ($h = 6 \dots 10$ m) zu einem Fehler von 2,5 ... 1,5 % beim Abfluss q .

Die Veränderung des Abflusses, hat großflächige Veränderungen des Wasserstandes zur Folge. Eine so singuläre Abweichung wie im konkreten Projektbeispiel ist damit nicht erklärbar.

2.3.4 Unstimmigkeit in der Ermittlung der überströmten Topographie

Im konkreten Projekt wurde in Betracht gezogen, dass das alte, inzwischen überstaute, Bühnenfeld, das sich in diesem Bereich befindet, durch die Querprofile, die der geometrischen Modellierung des Flussschlauchs zugrunde lagen, nicht genau genug erfaßt wurde. Abbildung 2 zeigt den Blick von Wasserbillig nach Oberbillig an der fraglichen Stelle bei Mittelwasserabfluss. Die Lage des Bühnenfeldes ist anhand der roten Boje erkennbar.



Abbildung 2: Blick von Wasserbillig nach Oberbillig über die Mosel

Es wäre also möglich, dass der Abflussquerschnitt an dieser Stelle stärker als angenommen eingeschnürt wird.

Im verlustlosen 1D-Fall ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der Wasserspiegellhöhe z und der Geschwindigkeit v :

$$(6) \quad z + \frac{v^2}{2g} = \text{const.}$$

Die berechnete Geschwindigkeit in Flussmitte für die Hochwassersituation beträgt 1,3 m/s. Um gemäß der Gl. (7) eine Geschwindigkeitserhöhung zu verursachen, die 10 cm Wasserspiegelabsenkung entspricht, müsste der Querschnitt um 32% eingengt werden. Dies ist in etwa der Anteil des Mittelwasserquerschnitts am Hochwasserquerschnitt. Die Buhnen müssten den kompletten Mittelwasserquerschnitt versperren, was sie offensichtlich nicht tun. Eine Wasserspiegelabsenkung von 10 cm infolge Einschnürung ist an dieser Stelle physikalisch nicht plausibel.

2.4 Ergebnis ?

Nachdem eine hydraulische Ursache für diese erstaunliche Abweichung eines Messwertes ausgeschlossen werden konnten, bleibt neben einem Fehler der Geodäsie als letzte mögliche Erklärung nur das Fahrzeug der Kommune Wasserbillig was an besagter Stelle während des Hochwassers abgestellt war. Es ist möglich, dass bereits kurz nach dem Durchgang des Hochwasserscheitels mit der Straßenreinigung begonnen wurde. Eine sinnvolle und übliche Tätigkeit der Gewässeranlieger.

Dieses Beispiel soll einen Anhaltswert dafür liefern, wie weit der Aufwand der Anpassung des Modells an die Messungen bei der Kalibrierung sinnvollerweise getrieben werden sollte. Ausserdem mag dieses Beispiel den Eifer bei der Jagd nach genauen Messwerten anspornen. Es zeigt des Weiteren dem Berechnungs-Ingenieur wie empfindlich die Güte seines Modells von den für die Kalibrierung verwendeten Daten abhängt.

3 Validierung eines 2D numerischen Modells

3.1 Projektzusammenhang

Die Eisenbahnlinie zwischen Bad-Hersfeld und Bebra quert kurz vor der Einfahrt in den Bahnhof Bebra die Aue der Fulda. Ausser dem Durchlass am Mittelwasserbett verfügt der Bahndamm noch über eine Flutmuldenöffnung, die nur der Hochwasserentlastung dient. In der Flutmuldenöffnung überquert ein Schienenstrang einen anderen, so dass zwei Brücken übereinander angeordnet sind. (siehe Abbildung 3)



Abbildung 3: Flutmuldenbrücken

Für einen Umbau der unteren Brücke wurde eine hydraulische Untersuchung des Hochwasserabflusses erforderlich, mit der das Ingenieurbüro Björnsen, BCE, beauftragt wurde.

3.2 Kalibrierung

Zur Kalibrierung wurde eine Hochwassersituation vom 14.1.1993 verwendet, in der 118 m³/s abflossen. Die Fulda war ausgefüllt und durchströmte die Flutmuldenöffnung. Die Aue war aber nicht vollständig geflutet, die Wassertiefe

auf den Vorländern betrug wenige Dezimeter. Das obige Photo, Abbildung 3, wurde kurz danach aufgenommen und zeigt die Fließrichtung noch anhand der Ausrichtung der liegenden Gräser. Das folgende Photo, Abbildung 4, zeigt die Fulda in diesem Abschnitt mit ihrem Ufersaum und der landwirtschaftlich genutzten Aue.



Abbildung 4: Fulda mit Ufersaum und Aue

Das Maximum der Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Wasserspiegellagen lag nach der Kalibrierung bei 5 cm.

3.3 Validierung

Nach Projektabschluss trat am 22. 12. 1993 ein weiteres Hochwasser auf, das ebenfalls vom Ingenieurbüro Björnsen markiert und vermessen wurde. In der erfassten Situation flossen nun $320 \text{ m}^3/\text{s}$, der Wasserstand ist im Vergleich zum Januar 0,5 - 0,8 m höherer. Die Aue ist bei diesem Abfluss vollständig überflutet. Zum Zwecke der Validierung wurde eine stationäre Berechnung dieses Ereignisses mit den gleichen Parametern ausgeführt. Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisdarstellung. Links im Bild der Flußschlauch der Fulda, rechts oben die Flutmuldenöffnung. Die Diskretisierung in der Flutmuldenöffnung ist sehr fein, daher „ballen“ sich die Geschwindigkeitspfeile an dieser Stelle.

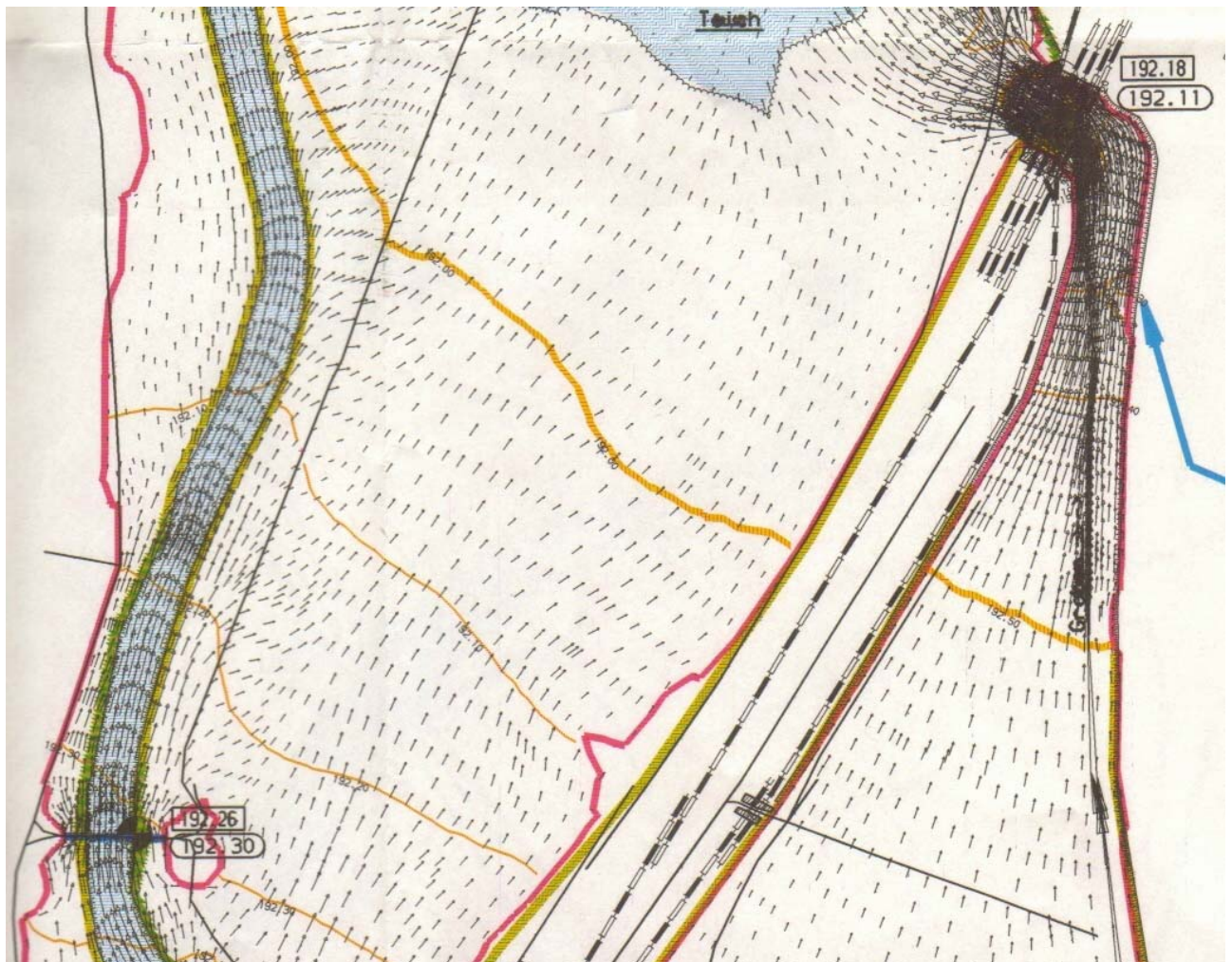


Abbildung 5: Validierung Dez. 1993, 2D Strömungsberechnung
Geschwindigkeiten - schwarze Pfeile, Wasserspiegel – gelbe Isolinien.

An dem Brückenkopf links unten in Abbildung 5 und in der Flutmuldenöffnung konnten Markierungen angebracht werden, deren Werte in den eckigen Kästchen eingetragen sind. Der berechnete Wert steht in dem runden Kästchen jeweils darunter. Die maximale Abweichung ergab sich in der Flutmuldenöffnung mit 7 cm.

Daraus ist erkennbar, welche Genauigkeit mit 2D-Strömungsberechnungen erzielt werden kann.

Das gute Ergebnis ist hier vor allem auf den großen Prognose-Radius der im DVWK-Merkblatt 220 empfohlenen Ansätze nach Colebrook-White und Pasche für die Reibungsverluste infolge Sohlrauheit und Gehölzbewuchs zurückzuführen.

4 Sohlreibungsabnahme infolge Erosion

In diesem letzten Aspekt wird nun auf eine Testrechnung mit dem 3D-Modell „casu“ Wyrwa (2003) zurückgegriffen. Diese Berechnung diente zur Untersuchung von Erosionsvorgängen von suspendierbaren Feinsedimenten, wie sie in Tideströmungen von Ästuaren (Flussmündungen) auftreten.

Es wurde für diesen Testfall eine gerade Rechteckrinne von 2000 m Länge ohne Seitenwandreibung diskretisiert. Die Wassertiefe beträgt 10 m. Bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,9 m/s stellt sich infolge der Sohlrauheit $k=2,66$ mm eine Sohlschubspannung von $1,73 \text{ N/m}^2$ ein, was einem Gefälle von $1,75 \text{ cm/km}$ entspricht (Fall 1 in Abbildung 6). Zur Simulation von Erosion wurde nun im Modell auf der gesamten Sohle eine Quelle von Suspensionskonzentration mit der Stärke $0,96 \text{ g/(s m}^2)$ angebracht. Es handelt sich hierbei um Verhältnisse, wie sie typischerweise in der voll ausgeprägten Flutströmung dort auftreten, wo Schlick an der Sohle liegt.

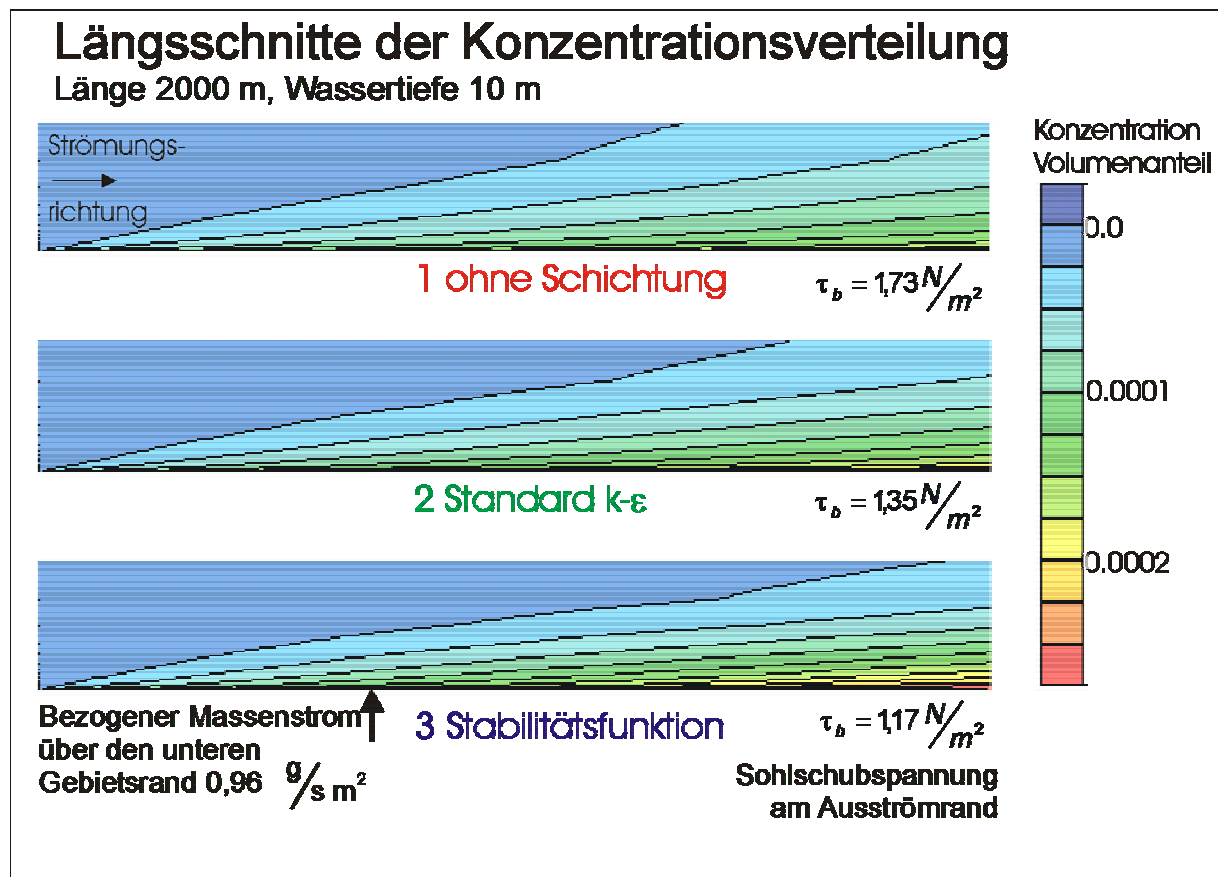


Abbildung 6: Konzentrationsverteilung bei Erosion

Abbildung 6 zeigt Längsschnitte der Konzentrationsverteilung für 3 verschiedene Berechnungsvarianten.

In der Variante 1 wurde angenommen, dass die Dichte des Fluides von der Sedimentkonzentration unbeeinflusst ist. D. h. das suspendierte Sediment sich wie ein inerter Tracer verhält und keine Rückwirkung auf die Hydraulik stattfindet.

In der Variante 2 wird berücksichtigt, dass sich die Dichte des Fluides in Folge der Suspensionskonzentration verändert. An der Sohle, dem Ursprung der aufgewirbelten Sedimente vergrößert sich die Dichte. Bei der turbulenten Einmischung in höhere Wasserschichten muss turbulente kinetische Energie in potentielle Energie des Sediments überführt werden und geht damit dem Turbulenzprozess verloren. Die Turbulenz wird gedämpft. Die Sohlschubspannung geht zurück und die Einmischung der Konzentration in höhergelegene Wasserschichten benötigt mehr Zeit. In der Simulation von Variante 2 wurde ein Standard k - ϵ Turbulenzmodell (*Rodi 1980*) verwendet.

Der Umstand, dass eine vertikale Dichteschichtung die vertikalen Fluktuationen stärker dämpft als die horizontalen, hat zur Folge, dass isotrope 2-Gleichungsmodelle wie das Standard k - ϵ Turbulenzmodell die Turbulenzdämpfung unterschätzt. Als Abhilfe wurden in der Meteorologie und Ozeanografie sogenannte Stabilitätsfunktionen entwickelt (*Burchard*), die es ermöglichen, diesen für den Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre so wichtigen Prozess zutreffend zu quantifizieren. In Variante 3 wurde die Stabilitätsfunktion nach *Galperin* verwendet.

Beachtlich an diesem Vorgang ist die Rückwirkung der Sedimentdynamik auf die Hydraulik. Infolge der Erosion von Feinsedimenten kommt es zu einer Verringerung von Sohlschubspannung und Reibungsgefälle um 33%.

5 Bewertung

Ausgehend von der Vermutung, dass eine zur Kalibrierung verwendete Wasserspiegel-Messung einen Fehler von 10 cm aufweist, konnte in Abschnitt 2 gezeigt werden:

- a) Die Vorhersage von Wasserspiegellagen mit numerischen Modellen können nicht genauer sein, als die zur Kalibrierung verwendeten Wasserspiegel-Messungen. Sie sind aber auch nicht ungenauer.

- b) Für die Kalibrierung von hydraulischen numerischen Modellen muss der Abfluss bekannt sein. 10 cm Ungenauigkeit bei der Wasserspiegellage korrelieren mit 2 bis 3% Fehler beim Abfluss im Hochwasserfall.
- c) Überaus heikel gestaltet sich der Versuch aus Wasserspiegel-Messungen auf die überströmte Geländetopographie zurückzuschließen.

Die bei der Validierung in Abschnitt 3 ermittelte maximale Abweichung von 7 cm zwischen Messung und Berechnung bedeutet:

- a) Wenn gute Kalibriermessungen vorliegen und ein 2D-Modell sorgfältig aufgestellt wurde, ist eine Genauigkeit von **1 Dezimeter** erreichbar.
- b) Der Autor geht davon aus, dass sich eine Genauigkeit in der hydraulischen Simulation von $\frac{1}{2}$ **Dezimeter** nur unterschreiten lässt, wenn 1. hochgenaue Kalibriermessungen vorliegen, 2. ein 3D-Modell eingesetzt wird, 3. der Vegetationszustand berücksichtigt wird und 4. die Morphodynamik miterfasst wird.

Aus der in Abschnitt 4 geschilderten Untersuchung läßt sich folgern: Die Erosion von suspendierbaren Sedimenten setzt die Sohlschubspannung und damit das Gefälle im betrachteten Fall um 33% herab. Dieser Effekt vergrößert die Pegelhysterese und muss nicht nur in der Transportsimulation sondern auch bei Wasserspiegellagen-Berechnungen in gegebenem Fall berücksichtigt werden.

6 Literatur

- Burchard, H. Petersen, O. (1999) Models of turbulence in the marine environment - a comparative study of two-equation models. Journ. Marine Syst. vol. 21, (1999), pp. 29-53
- DVWK Merkblatt 220 (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1991
- Galperin, B. et al. (1988) A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. J. Atmos. Sci. 45, pp. 55-62
- Heinemann, E. Feldhaus, R. (2003) Hydraulik für Bauingenieure. 2. Aufl. B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2003
- Press, H. Schröder, R. (1966) Hydromechanik im Wasserbau. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin München 1966
- Rodi, W. (1980) Turbulence Models and Their Application in Hydraulics: A state-of-the-art review. IAHR Monograph, Balkema Rotterdam 1980
- Schlichting, K. (1982) Grenzschicht-Theorie. Verlag G. Braun Karlsruhe 8. Auflage 1982
- Wyrwa, J. (2003) Turbulenzmodellierung für stabil dichtegeschichtete Strömungen bei der Simulation des Transports von kohäsiven Sedimenten in Ästuaren. Dissertation TU Berlin, März 2003
- Wyrwa, J. (1998) Qualitätssicherung beim praktischen Einsatz von zweidimensionalen Strömungsmodellen. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen Aug. 1998

Autor:

Dr.-Ing. Jens Wyrwa
Dortelweiler Straße 4
60389 Frankfurt a.M.

Tel.: ++49 – 69 – 4693158
Email: wyrwa@debitel.net
Web: <http://www.wyrwa.de>