

# **Sedimenttransportuntersuchungen zur ökologischen Verbesserung der Gewässermorphologie der Lippe**

Monika Donner  
Georg Johann  
Christian Pohl

Um die morphologische Eigendynamik der Lippe nachzuvollziehen, wurde eine Mäanderumgestaltungsmaßnahme mit einem zweidimensionalen Sedimenttransportmodell (gekoppelter Hydrodynamik-Sedimenttransport Ansatz) für einen Zeitraum von 1,6 Jahre untersucht. Mit dem numerischen Modell konnten die gemessenen morphologischen Veränderungen gut nachgebildet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden auf eine flussabwärts liegende Gewässerumgestaltungsmaßnahme übertragen. Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine Mäanderumgestaltung inkl. Sohlhebung, die vor der Umsetzung auf der Maßnahme mittels numerischer Simulationen auf morphologische Stabilität analysiert werden soll. Auf Basis der morphologischen Untersuchung konnten die dort in einem ersten Entwurf geplanten gewässerstrukturellen Maßnahmen optimiert werden.

Stichworte: Sedimenttransport, Morphologie, Lippe, Mäander

## **1 Anlass und Fragestellung**

Die Lippe ist ein gewundener Flachlandfluss im nordwestdeutschen Tiefland und fließt durch eine landwirtschaftlich geprägte Auenlandschaft von Osten her bei Wesel in den Rhein. Vor allem die seit der Industrialisierung durchgeführten Laufverkürzungen und Uferbefestigungen der Lippe sorgen bis heute für eine Tiefenerosion. Folglich finden Ausuferungen in die Aue an vielen Gewässerabschnitten erst ab einem HQ<sub>2</sub> oder gar HQ<sub>5</sub> statt.

Die im Rahmen der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie durchgeführten Untersuchungen an der Lippe erkennen diese hydromorphologischen Defizite als einen Hauptgrund für den unzureichenden Status der biologischen Lebensgemeinschaften. Die gegensteuernden Maßnahmen zielen auf eine Stärkung der Fluss-Aue-Interaktion ab. Zur Wiederherstellung der Wiedervernässung der Aue werden durch den Lippeverband in der Regel die Sohle angehoben und die Ufer entfesselt bzw. aufgeweitet. Diese Maßnahmen verändern die hydrodynamischen und sedimentologischen Prozesse des jeweiligen Fluss-

abschnitts tief greifend. Eine wesentliche Grundlage für die Maßnahmen ist das Wissen über das heutige sedimentologische Verhalten der Lippe.

Um diesen Fragen nachzugehen, wurde im Rahmen des EU-Projektes Life ein umgestalteter Abschnitt mit einer neuen Mäanderschleife und einer aufgehöhten Lippesohle im Bereich Dolberg messtechnisch und numerisch untersucht. Die messtechnische Erfassung der Maßnahme erfolgte über hoch aufgelöste terrestrisch gemessene Laserscandaten und Echolotvermessungen der Sohle sowohl kurz nach Herstellung des verflachten Mäanders, als auch nach rd. 18 Monaten. Um die morphologische Eigendynamik der Lippe nachzuvollziehen, wurde die Entwicklung der Maßnahme mit einem zweidimensionalen Sedimenttransportmodell untersucht.

## 2 Methodik zur Erfassung des Sedimenttransportes

Die morphologische Entwicklung des neu angeschlossenen Mäanders Dolberg wurde über Messungen im Mai 2009 kurz nach Herstellung und im Dezember 2010 mittels Echolotpeilungen erfasst. Um die morphologische Entwicklung des Mäanders beurteilen zu können, wurde der Sedimenttransport in einem 2D-Modell nachgerechnet.

### 2.1 Numerischer Ansatz

Als Simulationssoftware wurde ein finiter Volumenansatz (MIKE 21 FM) auf Basis eines unstrukturierten Gitters verwendet. Für die numerische Simulation wurde ein bestehendes hydrodynamisches 2D-Modell zur Lippe um den Sandtransport und die morphologische Veränderung erweitert. Hierbei handelt es sich um einen gekoppelten Ansatz zur Hydrodynamik und zum Sedimenttransport über den die morphologischen Änderungen (Sohlveränderung mit Rückwirkung auf die Hydrodynamik je Zeitschritt) miterfasst werden.

Die Hydrodynamik basiert dabei auf einem 2D tiefenintegrierten Ansatz, welcher für die Betrachtung von reinen Strömungsprozessen (ohne Wind und Wassertemperatur) in Flüssen mit großem Breiten/Tiefen-Verhältnis gut geeignet ist. Dieser basiert auf den inkompressiblen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen unter Berücksichtigung der Annahmen von *Boussinesq* (1877) und unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung. Gelöst werden hierbei die tiefenintegrierte 2D-Kontinuitätsgleichung sowie die zwei Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen für die x- und y-Komponenten. Für die Beschreibung des Fließwiderstandes an der Sohle wird der empirische Ansatz nach Manning-Strickler Rauheit  $k_{st}$  gewählt. Die Wirbelviskosität  $\nu_t$  wird als

zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten nach *Smagorinsky* (1963) angegeben.

Aufgrund der mittelsandigen, nicht kohäsiven Sedimente wurde das Sedimenttransportmodell nach *Engelund & Hansen* (1967) verwendet, welches den Geschiebe- und Schwebstofftransport sandiger Fraktionen berücksichtigt. Der Sedimenttransport der maßgebenden Korngröße ( $d_{50}$ ) wird ohne Fraktionierung berechnet und kann jedoch mit Berücksichtigung der räumlichen Variabilität der Korngröße betrachtet werden. Für die in dem Lippeabschnitt vorherrschenden Fein- und Mittelsande wurde der Geschiebe- und Schwebstofftransport als Gesamttransport erfasst. Die Formulierung nach *Engelund und Hansen* setzt voraus, dass die dimensionslose Sohlschubspannung wesentlich größer als der kritische Shieldsparameter zu Beginn des Transportes ist und betrachtet den Initiierungsprozess nicht näher. Gleiches gilt für die Abstufung des Kornmaterials, da die Formulierung auf dem mittleren Korndurchmesser basiert.

In Mäandern tritt eine Sekundärströmung auf, die zusätzlich (trotz 2D-Ansatz) zu berücksichtigen ist, da die Sekundärströmung Einfluss auf die Sedimenttransportrichtung und folglich die morphologische Änderung nimmt. Im Sedimenttransport wurden die Aspekte der Böschungserosion infolge Sekundärströmung in den Gewässerkrümmungen nach *De Vriend* (1981) und *Rozovskii* (1957) miterfasst. Die Formulierung zur Sekundärströmung für 2D-Ansätze geht auf *De Vriend* (1981) zurück. Die Intensität ist proportional zur Fließtiefe und umgekehrt proportional zum Radius der Hauptstromlinien. Sie basiert auf der Hauptströmungskomponente  $u$  und dessen Richtungstransformation, die einen Einfluss auf die Orientierung der Sohlschubspannung hat. Die Richtung der Sohlschubspannung wird durch den Ansatz nach *Rozovski* (1957) ermittelt zu:

$$\tan \delta_s = -\beta \cdot \frac{h}{R_s} \quad \text{mit} \quad \beta = \alpha \cdot \frac{2}{\kappa^2} \left( 1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \quad (1)$$

wobei  $h$  die Wassertiefe,  $R_s$  der Krümmungsradius der Stromlinien,  $\delta_s$  der Winkel zwischen Sohlschubspannung und tiefengemittelter Strömung,  $\kappa$  die Karman Konstante mit 0.4,  $g$  die die Erdbeschleunigung und  $\alpha$  ein Kalibrierungsparameter. Dabei nimmt  $\beta$  in etwa Werte um 10 an.

Der Krümmungsradius der Stromlinien  $R_s$  wird über eine Koordinatentransformation und in Abhängig der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten  $u$  und  $v$  ermittelt über:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{u^2 \frac{\partial v}{\partial x} + uv \left( \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - v^2 \frac{\partial u}{\partial y}}{(u^2 + v^2)^{1.5}} \quad (2)$$

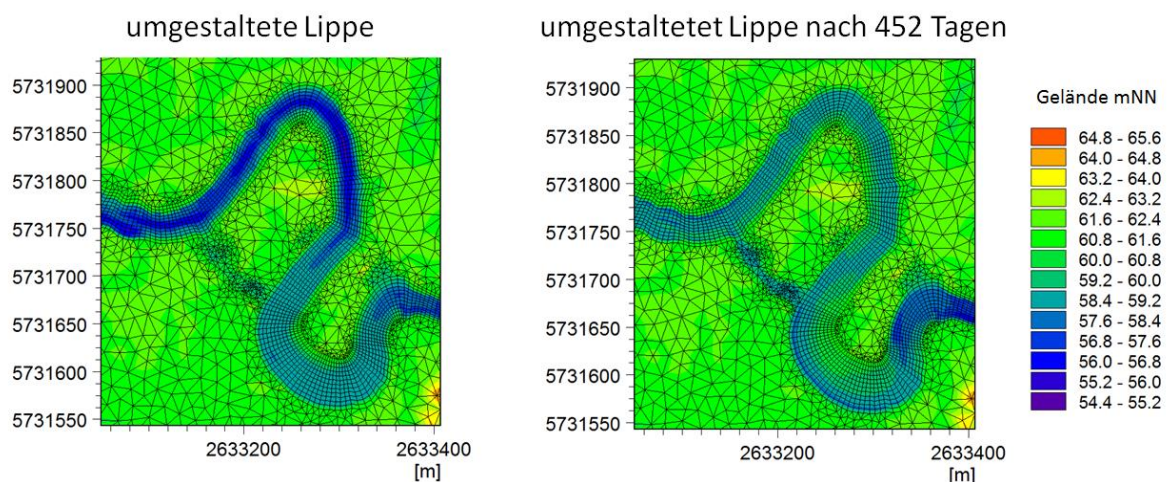
wobei  $R_s$  der Krümmungsradius,  $u$  die Strömung in x-Richtung und  $v$  die Strömung in y-Richtung ist.

Die morphologischen Änderungen der Sohle und deren Rückwirkungen auf die Hydrodynamik werden in einem gekoppelten Ansatz mittels einer integrierten Aktualisierung des digitalen Geländemodells (DGM) für jeden Zeitschritt berücksichtigt, gleiches gilt für die aktive Sedimentschichtdicke. Die Simulation des Sedimenttransportes und der Morphodynamik erfolgte ohne eine morphologische Beschleunigung der Sohländerungen, sodass die Rückwirkung der morphologischen Änderungen im nächsten Zeitschritt direkt in der Hydrodynamik berücksichtigt wird.

## 2.2 Modellaufbau und -annahmen für die Langzeitmorphologie

Zur Erfassung der Morphodynamik wurde ein feinaufgelöstes, finites Volumenmodell (bis 5 m Kantenlänge) aufgebaut (Abbildung 1), das sich in etwa über eine Flusslänge von ca. 1 km erstreckt (Lippe-km 135,5 bis 134,5). Die Vorländer wurden für die im Laufe der 18 Monate ablaufenden Hochwasserereignisse mitberücksichtigt, jedoch als morphologisch inaktiv (keine Erosion möglich) definiert, das diese mit einer geschlossenen Vegetationsdecke bewachsen sind.

Am oberen Modellrand wird eine Zuflusszeitreihe (Pegel Kessler) ins Modell eingegeben, am unteren Modellrand wird eine W-Q-Beziehung berücksichtigt. Der Sedimenttransport wird gekoppelt zur Hydrodynamik und Berücksichtigung von Geschiebe- und Schwebstofftransport als Gesamttransport und der Sekundärströmung wie in 2.1 beschrieben erfasst. Beide Modellränder werden mit einer Gleichgewichtsbedingung für den Sedimentein- und -austrag angesetzt. Das Sohlsubstrat ist mittel- bis feinsandig.



**Abbildung 1:** Modellgitter und Geländehöhen für den Anfangszustand (links) und nach 452 Tagen (rechts)

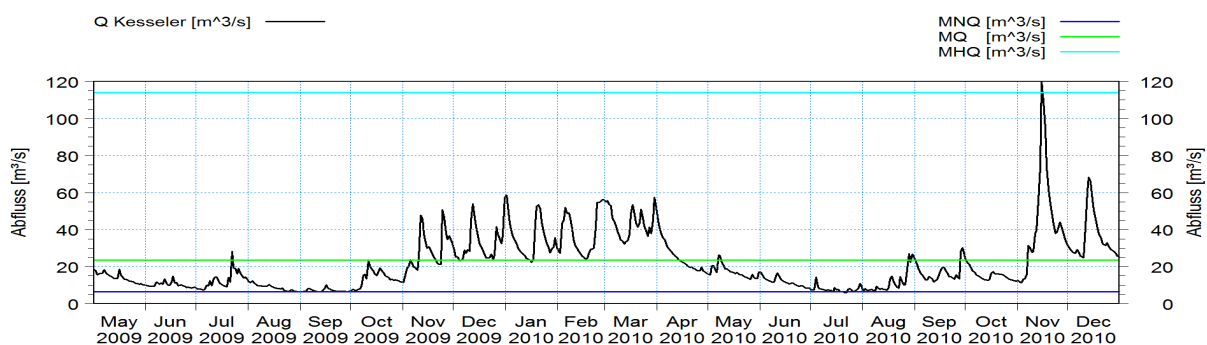
### 2.3 Maßnahme und Analyse der Messdaten

Die initiale Mäanderschleife weist durch die Sohlanhebung (Einbringung von Material im Gestaltungsprozess) zunächst geringere Wassertiefen (bordvolle Wassertiefe ca. 2,9 bis 2,7 m) auf, wobei der Übergang zum alten Flussbett mit einer Sohlrampe ausgeführt wurde. Der Zustand nach 18 Monaten zeigt, dass sich die Wassertiefen im Mäander erhöhen und sich ein neues Längsgefälle mit einer Erosion am Anfang des Mäanders und einer Sedimentation am Ende des Mäanders einstellt. Tendenziell ist, wie erwartet, in den Prallhängen eine Erosion und in den Gleithängen eine Sedimentation zu erkennen (Abbildung 5). Das Überdargebot an Sediment in der Mäanderschleife aufgrund der zunächst höheren Sohlage, führt zu einem Austrag des Sedimentes in das Unterwasser. Die Bereiche ober- und unterhalb des Mäanders konnten nicht berücksichtigt werden, da dort nur Vermessungsdaten für den Zustand Dezember 2010 vorlagen.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

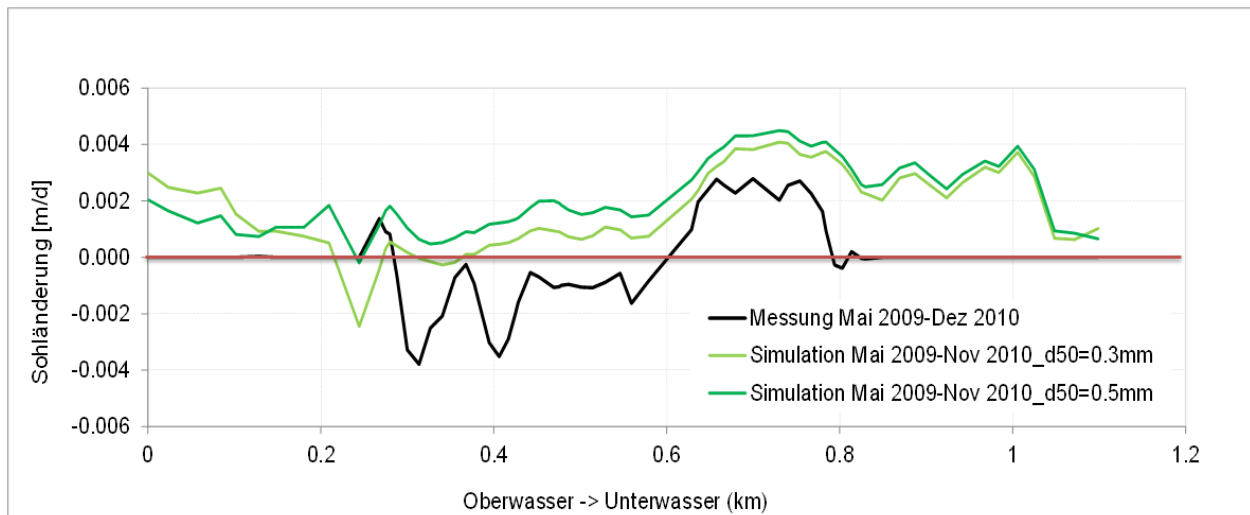
Die numerische Erfassung des Sedimenttransportes erfolgt für den gesamten Zeitraum von Mai 2009 (Anfangszustand) bis Dezember 2010 (Endzustand). Die Kalibrierung des Sedimenttransportes erfolgt im Abgleich gemessener und simulierter Sohländerungen über rd. 18 Monate.

Die Zuflussganglinie von Mai 2009 bis Dezember 2010 (Abbildung 2) ist geprägt von wenigen Hochwasserereignissen und zeichnet sich durch gemäßigte jahreszeitliche Schwankung aus: In den Sommermonaten sind niedrige Abflüsse nahe dem MNQ zu verzeichnen, die selten von Ereignissen bis ca. MQ ( $24 \text{ m}^3/\text{s}$ ) unterbrochen werden. Die Winterperiode 2009/10 ist geprägt durch mehrere aufeinanderfolgende Hochwasserereignisse mit vergleichbaren Scheitelwerten und Dauern (ca.  $50$  bis  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , 10 Tage). Das Hochwasserereignis im November 2010 erreicht mit ca.  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  die Größenordnung eines MHQ und hat ein Überströmen des Vorlandes zur Folge.



**Abbildung 2:** Abflussganglinie am Pegel Kesslerer von Mai 2009 bis Dezember 2010

Für die Untersuchung werden zwei Korngrößen ( $d_{50} = 0,5$  und  $0,3$  mm) als 5 m dicke Sedimentschicht an der Flusssohle angesetzt. Für die beiden Korngrößen ergeben sich Sinkgeschwindigkeiten zwischen  $0,2$  m/s ( $d_{50} = 0,5$  mm) und  $0,08$  m/s ( $d_{50} = 0,3$  mm). Die Bewegung des Sediments stellt sich bei ca.  $0,25$  N/m<sup>2</sup> bzw.  $0,18$  N/m<sup>2</sup> ein.



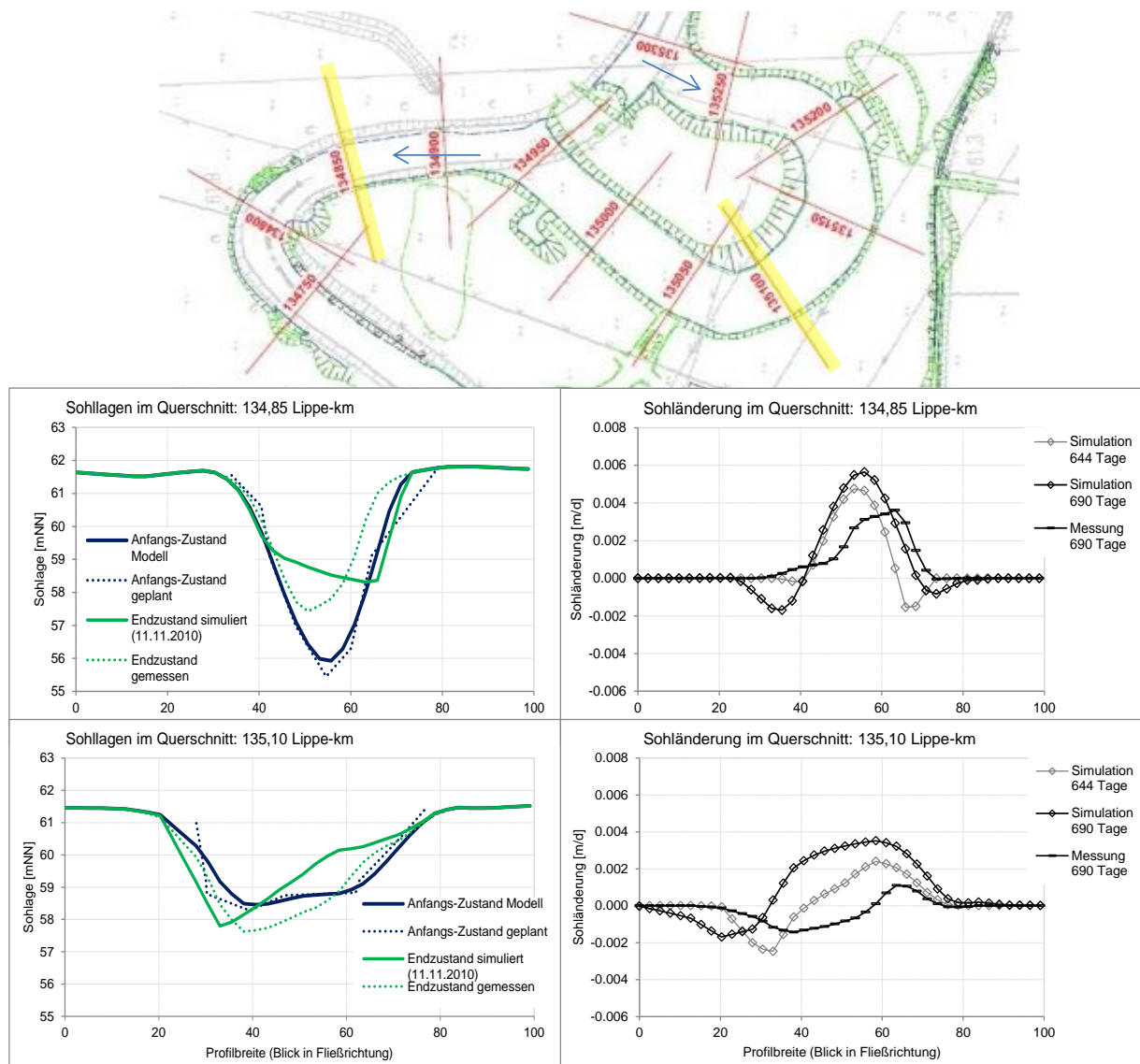
**Abbildung 3:** Längsschnitt zur gemessenen und simulierten morphologischen Änderung unter Berücksichtigung verschiedener Korngrößen

Die Abbildung 3 zeigt die Änderungsraten im Lippelängsprofil von Anfangs- bis Endzustand, sowohl aus der Vermessung als auch aus der Simulation. Ein tendenzieller Verlauf mit Erosion im Oberwasser und Sedimentation im Unterwasser des Mäanders kann durch die Simulation nachvollzogen werden.

Die simulierten und gemessenen Sohländerungen werden anhand von Querprofilen ausgewertet und weisen im Mäanderabschnitt gute Übereinstimmungen auf: Im mittleren Mäanderabschnitt (Lippe-km 135,0 bis 135,2) spiegeln die Simulationsergebnisse sowohl die Sohlform als auch die Tiefe des gemessenen Endzustandes gut wieder.

Auch die Intensität der Änderungsrate weisen gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation auf, wobei die genaue Lage der maximalen Eintiefung oder Sedimentation im Querprofil abweicht.

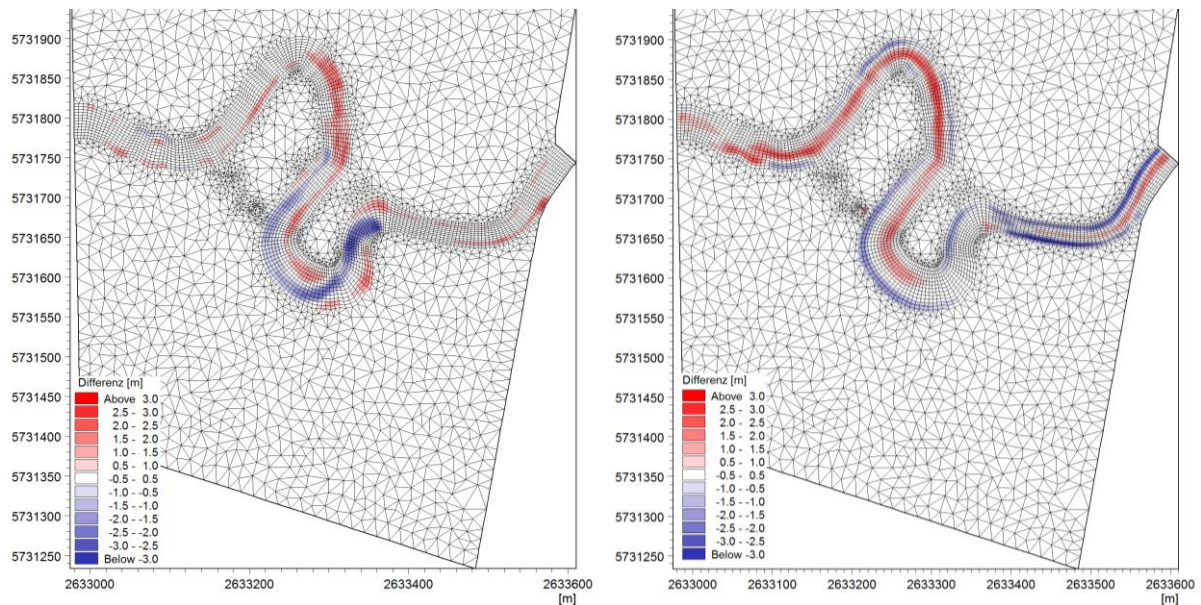
Eine nähere Betrachtung der Querprofile (Abbildung 4) zeigt sowohl in den Messungen, als auch der Simulation, den Einfluss der Sekundärströmungen, welche eine Seitenerosion bewirkt.



**Abbildung 4:** Sohllagen (unten und Mitte, links), Änderungsraten (unten und Mitte, rechts) und Untersuchungsraum (Quelle: ELGV, oben)

Der Vergleich der Differenzenplots für die gemessenen und die simulierte Änderungen (Abbildung 5) zeigen, dass das Modell die Ausbildung von Erosions- und Sedimentationsbereichen, sowie dem Prall- und Gleithang tendenziell treffen. Die Ausprägung ist in ihrer Größenordnung allerdings nicht vergleichbar. Besonders die zu geringe Tiefenerosion im Übergang vom alten Flussschlauch zum neu angeschlossenen Mäander und die starke Sedimentation im unteren Flusslauf führen zu abweichenden Geländehöhen in der Simulation.

Ursächlich hierfür ist die nicht bekannte Sohllage im Ober- und Unterwasser des Mäanders für den Initialzustand kurz nach Herstellung. Durch diese fehlende Information wurde für das numerische Modell im Ober- und Unterwasser der Maßnahme die Sohllage für den Endzustand angesetzt.



**Abbildung 5:** Differenzenplot zwischen Endzustand Dezember 2010 und Ausgangszustand Mai 2009 (links: gemessen, rechts: simuliert)

Diese Annahme beeinflusst jedoch die Sohlentwicklung im Mäander. Vermutlich war die Sohlage im tatsächlichen Initialzustand (nach Herstellung der Mäanderschleife) tiefer, als im Modell angenommen. Bessere Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung liegen im Kernbereich des Mäanders vor.

## 4 Schlussfolgerungen

Die Vergleiche der Simulationsergebnisse mit den Naturmessungen zeigen, dass das numerische Modell in der Lage ist, die tendenzielle Entwicklung, insbesondere die Sohländerungen für geringe, mittlere und hohe Abflüsse gut abzubilden. Dies betrifft nicht die absoluten Sohlhöhen, da es zu einer etwas anderen örtlichen Ausbildung der Sedimentation und Erosion in den Querschnitten kommt (vgl. Abschnitt 3.2). Gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Simulation sind im Mäanderkernbereich zu erkennen. Im Randbereich des Mäanders sind Abweichungen zwischen Natur und Simulation zu sehen. Ursächlich hierfür, ist die nicht bekannte Sohlage im Ober- und im Unterwasser der Maßnahme für den Initialzustand.

Generell ist durch die Fließwegverlängerung davon auszugehen, dass sich die durch die Gewässerumgestaltungsmaßnahme initiierten Wassertiefen sich verändern und sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt. Die tiefste Sohlage stellt sich für einen bordvollen Abfluss bei einer mittleren Wassertiefe von rd. 3,5 bis 4,0 m ein.



## 5 Übertragung

Die beschriebenen sedimentologischen Kalibrierungsparameter werden auf den 10 Flusskilometer unterhalb liegenden Lippeabschnitt Schlagmersch, für den auch Planungen zur ökologischen Verbesserung vorliegen, übertragen. Anschließend wird für diesen Untersuchungsraum ein hydrologisches Jahr mit den kalibrierten Sedimenttransportparametern und beschriebenen Transportprozessen simuliert. Im Fokus steht die morphologische Entwicklung eines geplanten, verflachten Mäanders. In der Schlagmersch zeigt sich ein Angleichen des Sohlgefälles an den sich neu einstellenden Gleichgewichtszustand. Die simulierte Eintiefung entspricht den Ergebnissen aus der oben dargelegten Untersuchung Dolberg. Es handelt sich hierbei um eine Eintiefung von 2 - 2,5 m. Die ursprüngliche Wassertiefe von rd. 1,5 m bordvoller Wassertiefe (Anfangszustand) würde sich auf eine mittlere Tiefe von ca. 3,5 bis 4 m (Endzustand) einstellen. Diese erhebliche Tiefenerosion, die sowohl am Planungsabschnitt Dolberg als auch Schlagmersch auftritt, ist auch auf die kurzen Planungsabschnitte von wenigen 100 m zurückzuführen. Umgestaltungsmaßnahmen von längeren Flussabschnitten, wie es z. B. Maßnahmen an der Lippe im Bereich Klostermersch (*Staatliches Umweltamt Lippstadt*, 2002) zeigen, führen zu stabileren Sohllagen.

Eine Wiedervernässung der Aue kann in der Schlagmersch neben einer Sohlanhebung durch die Anbindung von Nebenarmen oder lokalen Vorlandabsenkungen gesteigert werden. Durch diese Maßnahmen kann auch die Stabilität der Sohlanhebung unterstützt werden.

## 6 Literatur

- Boussinesq, J. (1877): Essai sur la théorie DES eaux courantes. Stellen Memoires presentes Taucher savants `L' Acad gleich. DES Sci. Installation. National. Frankreich, XXIII, pp. 1–680, 1877
- De Vriend; H. (1981): Steady flow in shallow channel bends, comm. on Hydraulics 81-3, Dept. of Civil Eng., Delft University of Technology
- Engelund & Hansen (1967): A monograph on sediment transport in alluvial streams”, Teknisk Forlag, Danish Technological University, Copenhagen, Denmark
- Rozovskii, I.L. (1957): Flow of water in bends of open channels, English translation: Israel Progr. For Scientific Transl. Jerusalem, 1961
- Smagorinsky, J. (1963): General circulation experiments with the primitive equations. Mon. Wea. Rev., 91, 99–164
- Staatliches Umweltamt Lippstadt (2002): Lippeumgestaltung Klostermersch – Ein Fluss erobert die Aue zurück. Lippstadt

## Autoren:

Dip.-Hydr. Georg Johann

Dipl.-Ing. Monika Donner

Dipl.-Ing. Christian Pohl

Emschergenossenschaft Lippeverband  
Kronprinzenstraße 24  
45128 Essen OrtDHI-WASY GmbH  
Max-Planck-Straße 6  
28857 Syke

Tel.: +49 201 104 2249

Tel.: +49 4242 1638-16

Fax: +49 201 104 3149

Fax: +49 4242 1638-18

E-Mail: [johann.georg@eglv.de](mailto:johann.georg@eglv.de)E-Mail: [mod@dhi-wasy.de](mailto:mod@dhi-wasy.de)  
[cpo@dhi-wasy.de](mailto:cpo@dhi-wasy.de)