

## **Abschätzung der morphodynamischen Entwicklung von Umgestaltungsmaßnahmen mittels eines 3D hydromorphologischen Modells - Beispiel: Neuenburg am Oberrhein -**

Annette Schulte-Rentrop  
Andreas Dittrich  
Volker Späth

Die Stadt Neuenburg plant am Oberrhein im Rahmen ihres Entwicklungskonzeptes „eine Stadt geht zum Rhein“ umfangreiche Umgestaltungsmaßnahmen. Zur Abschätzung der Entwicklung der geplanten Maßnahmen und damit ihrer Nachhaltigkeit wurde für diesen Rheinabschnitt u. a. ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell erstellt. Die Erfassung des turbulenten Strömungsfeldes erfolgte mittels der Kombination aus einem 1D und 3D hydrodynamisch-numerischen Modell. Wichtige Eingangsgrößen für diese Modelle stellten die auf physikalisch basierten Ansätzen ermittelten Rauheiten des Rheinbettes und der Parameter für das Widerstandsverhalten der Pflanzen auf den Vorländern dar. Die Abschätzung der Stabilität des Rheinkieses und der Pflanzen wurde mit Ansätzen vorgenommen, welche die systemrelevanten Prozesse des vorliegenden Rheinabschnittes berücksichtigen.

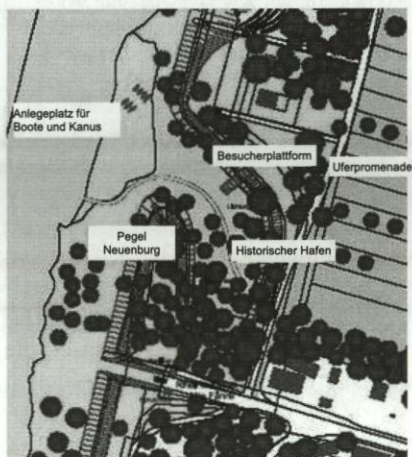
### **1 Einleitung**

Aus morphologischer und hydraulischer Sicht befinden sich im Bereich der von der Stadt Neuenburg geplanten Umgestaltungsmaßnahmen zwei markante Stellen; und zwar bei Rhein-km 199,20 ein alter verlandeter und zugewachsener Hafen und zwischen Rhein-km 199,33 und 199,75 eine bewachsene Kiesinsel, die im Wesentlichen nach dem Hochwasser von 1999 entstanden ist. Beide Stellen sind auf Abbildung 1 zu erkennen.

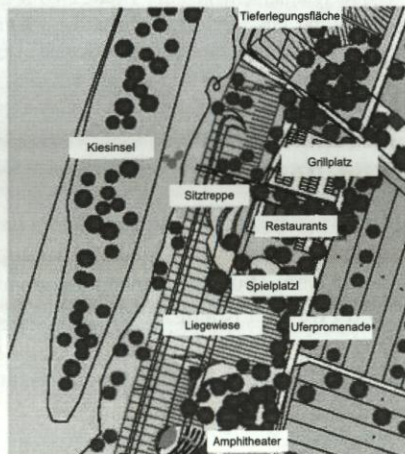


**Abbildung 1:** Rheinbarer Bereich der Stadt Neuenburg mit Kiesinsel und zugewachsenem Hafen

Im Rahmen des Entwicklungskonzeptes „eine Stadt geht zum Rhein“ beabsichtigt Neuenburg, den alten Hafen wieder freizulegen und als Anlegestelle für Kanus und kleine Boote herzurichten sowie die so genannten „Rheingärten“ anzulegen. Beide Bereiche sind mit den entsprechenden Bauwerken auf den Abbildungen 1 und 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Umgestaltungsvorschlag für den historischen Hafen



**Abbildung 3:** Umgestaltungsvorschlag für die „Rheingärten“

Bezüglich der Nachhaltigkeit der geplanten Maßnahmen ergaben sich folgende Fragen:

- Wie stabil sind die Rheinsohle, die bewachsene Kiesinsel und der Nebenarm zwischen Insel und Vorland sowie die Ufer der Rheingärten bei Belastung durch unterschiedliche Abflüsse?
- Lagern sich die bei Hochwasser mitgeführten feinen Sedimente im Nebenarm und im freigelegten Hafen ab? Der Geschiebetransport kann bei diesen Betrachtungen als vernachlässigbar, gering angenommen werden.

## 2 Theoretische Grundlagen und verwendete Daten

Die Erfassung der komplexen topographischen Situation erforderte die Erstellung eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells. Das gewählte Modell beinhaltete insgesamt 918.000 Zellen mit einer Auflösung von 3,2 m in Fließrichtung, 1,5 m quer zur Fließrichtung und 1 m über die Tiefe.

Die hochaufgelöste Erfassung des turbulenten Strömungsfeldes erfolgte mittels der Kombination aus einem 1D und einem 3D hydrodynamisch-numerischen Modell. Das 1D Modell (HEC-RAS 3.1.3, *USACE (2005)*) wurde ausschließlich zur Randwert-Generierung der Wasserspiegellagen verwendet. Zur möglichst genauen Abschätzung insbesondere der aus der turbulenten Strömung resultierenden, lokalen Schubspannungen fand das 3D hydrodynamisch-numerische Modell SSIIM 2.0 Anwendung. Die mathematische Beschreibung der Turbulenz erfolgt in SSIIM 2.0 über das  $k$ - $\epsilon$ -Modell, die Beschreibung der Fließwiderstände von vegetativen Rauheitselementen über den von *Petryk and Bosmajian (1975)* empfohlenen Volumenkraftansatz (*Olsen, 2008*).

Die Festlegung der für die Strömungsberechnung notwendigen Rauheitsparameter für die Flusssohle im Rhein und im Nebenarm erfolgte auf der Grundlage der äquivalenten Sandrauheit  $k_s$ . Hierzu wurden Sohlenproben aus dem Rheinbett entnommen und die  $k_s$ -Werte anhand eines charakteristischen Korndurchmessers und Eichrechnungen bestimmt (*Dittrich et al., 2005*). Die Bestimmung der für das Widerstandsverhalten der Vegetation maßgebenden Parameter erfolgte nach dem DVWK-Merkblatt 220 (*DVWK, 1991*), aus Eichrechnungen sowie anhand von Geschwindigkeitsmessungen. Zur Abschätzung der Stabilität der durch eine ausgeprägte Deckschicht bestehenden Flusssohlen von Rheinbett und Nebenarm wurden die aus Ober- und Unterschicht entnommenen Proben verwendet und die



kritische Schubspannung  $\tau_{\text{krit}}$  nach dem Ansatz von Günter (1971) berechnet. Die Abschätzung der Stabilität der vorhandenen Vegetation wurde mittels Daten aus der Literatur (Dittrich, 1995) vorgenommen.

Zur Ermittlung des Erosions/Sedimentationsverhaltens der mit dem Hochwasser transportierten Feinsedimente fand das Rouse-Kriterium (Wang and Dittrich, 1992) Anwendung. Das Kriterium besagt, dass für  $0,1 < z < 3$  ( $z$  = Rouse-Zahl) das Sediment in Suspension gehalten und nahezu ohne Kontakt mit der Gewässersohle durch das Gerinne transportiert wird. Für  $z < 0,06$  wird das Sediment ohne Kontakt mit dem Gewässerbett quasi aus dem Gerinne herausgespült („wash load“). Für die Rouse-Zahl gilt:  $z = v_s / (\kappa \cdot u_*')$  mit  $v_s$  = Sinkgeschwindigkeit der Sedimentpartikel,  $\kappa$  = von Kármán-Konstante = 0,4 und  $u_*'$  = Sohlschubspannungsgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit  $u_*'$  wird direkt aus der 3D Berechnung erhalten. Für die Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit wurden Bühnenfelder, in denen sich das feine Sediment abgelagert hatte, beprobt. Aus dem charakteristischen Durchmesser des beprobten Materials und einem repräsentativen Ansatz zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit (Dittrich et al., 2007) ergab sich für  $v_s = 0,014 \text{ m/s}$ .

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der verwendeten  $k_s$ -Werte für das Rheinbett, den Nebenarm, die Ufer sowie für die Rheingärten. Tabelle 2 beinhaltet die Vegetationsparameter zur Bestimmung des Widerstandsverhaltens, der unterschiedlich bewachsenen Flächen und Tabelle 3 die kritischen Schubspannungen für die Kiessohlen sowie für den vorhandenen und vorgesehenen Pflanzenbewuchs (Schulte-Rentrop, 2010).

Um die Bandbreite der morphologischen Entwicklungen und die damit bedingte Nachhaltigkeit der geplanten Maßnahmen abschätzen zu können, wurden vier morphologisch relevante Abflüsse, für die Messdaten bzw. Berechnungsergebnisse vorlagen, festgelegt:  $Q_1 = 671 \text{ m}^3/\text{s}$  vom 2.11.1998 (Überschreitungswahrscheinlichkeit ca. 9 Tage/Jahr),  $Q_2 = 1587 \text{ m}^3/\text{s}$  vom 4.11.1998 (Auftrittswahrscheinlichkeit ca. 1 Tag/Jahr),  $Q_3 = 3040 \text{ m}^3/\text{s}$  vom 29.05.1994 und  $Q_4 = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$  (Bemessungsabfluss  $\hat{=}$  200jährliches Ereignis). Der Abfluss  $Q_3$  wurde deshalb ausgewählt, da er dem extremen Hochwasserereignis vom 9.08.2007, für das der Wasserspiegelverlauf nicht aufgenommen wurde, am nächsten kommt und Wasserspiegelfixierungen vorliegen. Weiterhin existieren Beobachtungen über morphologische Veränderungen nach diesem Ereignis, so dass dieser Abfluss sich gut für Plausibilitätsbetrachtungen über das Einwirken von Extremereignissen auf die Morphologie eignet.

**Tabelle 1:** Äquivalente Sandrauheiten des simulierten Rheinabschnittes

Bereich	äquivalente Sandrauheiten $k_s$ [m]
Rheinbett Nebenarm rechtes und linkes Ufer	0,32
Rheingärten	0,06

**Tabelle 2:** Vegetationsparameter für die unterschiedlichen Pflanzentypen

Bereich	Pflanzentyp	vertikale Anordnung	$a_x$ [m]	$a_y$ [m]	$d_p$ [m]	$c_w$ [m]
rechtes Ufer	Durchforsteter Pappel-Hartholzwald mit Büschen	sohlennah	3,0	3,0	1,0	1,5
		sonst	6,0	6,0	0,5	1,0
Hafen	Durchforsteter Pappel-Hartholzwald	Konst. über die Tiefe	6,0	6,0	0,5	1,0
linkes Ufer	Natürlicher Weiden-Pappelwald (Altholzphase)	sohlennah	3,0	3,0	1,0	1,5
		sonst	6,0	10,0	1,0	1,0
Kiesinsel	Natürlicher Weiden-Pappelwald	Konst. über die Tiefe	6,0	10,0	1,0	1,0
abgeflachtes rechtes Ufer	geringe Pflanzendichte		10,0	10,0	1,0	1,0
Bereich Uferpromenade	hohe Pflanzendichte		4,0	5,0	0,7	1,0
Liegewiese	wenig Bäume		20,0	20,0	1,0	1,0

**Tabelle 3:** Kritische Schubspannungen für die Kiessohlen sowie für den vorhandenen und vorgesehenen Pflanzenbewuchs.

kritische Schubspannungen	Sohle von Rhein und Nebenarm (Deckschicht)	Rheingärten (Gras)	Insel und Uferbewuchs (Weiden u. Erlen)
$\tau_{krit}$ [N/m <sup>2</sup> ]	64 - 75	15 - 30	60 - 140

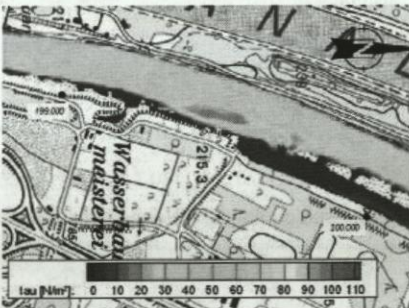
### 3 Ergebnisse

Die Abschätzung der morphologischen Entwicklung des Rheinabschnittes bei Neuenburg gelingt durch die Gegenüberstellung der aus der Strömung resultierenden Schubspannungen und der kritischen Schubspannungen für die Sedimente im Rhein und den Pflanzenbewuchs auf den Vorländern. Dieses soll nachfol-

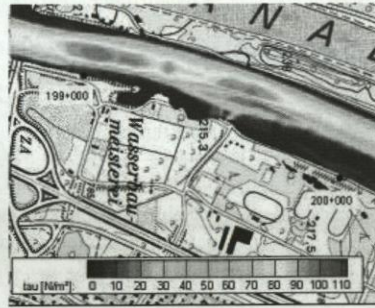


gend beispielhaft anhand einzelner Elemente aus dem Untersuchungsgebiet aufgezeigt werden.

Zur Abschätzung der morphologischen Verhältnisse des Rheinbettes im Planungszustand sind in den Abbildungen 3 und 4 exemplarisch für die Abflüsse  $Q_1$  und  $Q_4$  die aus der numerischen Berechnung resultierenden Sohlenschubspannung aufgetragen. Den Abbildungen kann entnommen werden, dass die Sohlenschubspannungen im stromaufwärts gelegenen Abschnitt des Rheins und im Bereich der Kiesinsel am größten sind und im Bereich der Gerinneaufweitungen (geplante Tieferlegungsfläche) signifikant abnehmen. Der Vergleich der Schubspannungen  $\tau$  für den kleineren Abfluss  $Q_1$  mit den kritischen Schubspannungen ( $\tau_{krit} = 64 - 75 \text{ N/m}^2$ ) verdeutlicht, dass die Rheinsohle weitgehend stabil bleibt. Im Fall des Abflusses  $Q_4$  ist dagegen in weiten Bereichen des Rheins mit Erosion zu rechnen. Besonders hohe Sohlenschubspannungen treten oberstrom des Hafens und zwischen der Kiesinsel und dem linken Ufer auf. Die Kiesinsel führt zur Einengung des Fließquerschnittes und bewirkt damit diese hohen Schubspannungen.



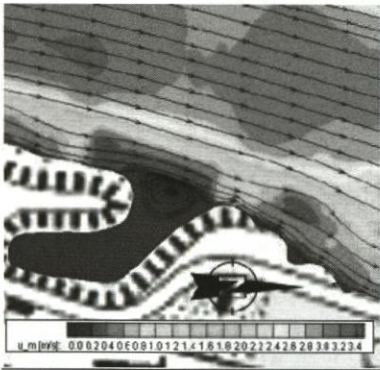
**Abbildung 4:**  
Berechnete Sohlenschubspannungen für  
 $Q_1 = 617 \text{ m}^3/\text{s}$



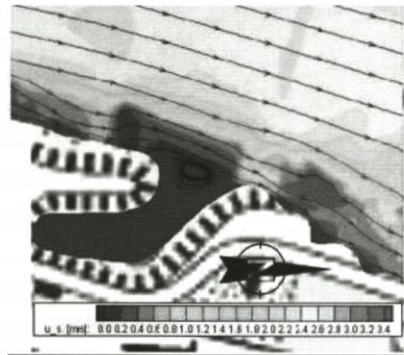
**Abbildung 5:**  
Berechnete Sohlenschubspannungen für  
 $Q_4 = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$

Ein weiterer interessanter Aspekt für die zukünftigen Planungen besteht in der Abschätzung der morphodynamischen Entwicklungen im alten Hafen. Dieser befindet sich oberstrom der Rheingärten und soll nach Freilegung als Anlegestelle kleiner Boote genutzt werden. Da der Hafen heute stark verlandet und bewachsen ist, erhebt sich die Frage, ob auch in Zukunft mit derartigen Prozessen zu rechnen ist. Dieses soll anhand der Abbildungen 5 und 6 verdeutlicht werden. Beiden Abbildungen ist zu entnehmen, dass sich im Zufahrtsbereich des Hafens eine ausgeprägte Sekundärströmung ausbildet und die Fließgeschwindigkeiten

im Hafen auf Null zurückgehen. Ein ähnlicher Strömungsverlauf ergibt sich auch für die anderen berechneten Abflüsse. Dieser Sachverhalt lässt die Schlussfolgerung zu, dass die mit dem Wasser transportierten Sedimente sich im geplanten Hafen ablagern und dieser wieder verlanden wird; falls nicht mit entsprechenden Unterhaltungs- oder Umgestaltungsmaßnahmen diesem Prozess entgegengesteuert wird.



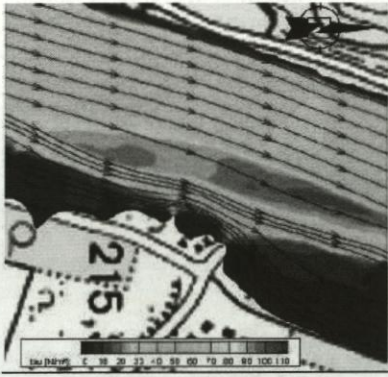
**Abbildung 6:**  
Tiefengemittelte Geschwindigkeiten im Bereich des alten Hafens für  $Q_2 = 1587 \text{ m}^3/\text{s}$



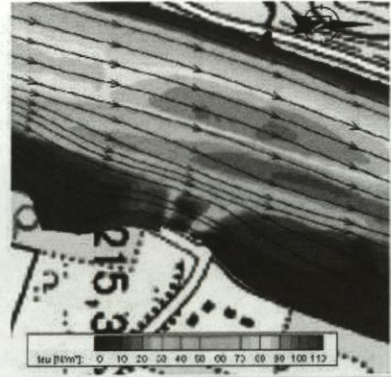
**Abbildung 7:**  
Sohlennahe Geschwindigkeiten im Bereich des alten Hafens für  $Q_2 = 1587 \text{ m}^3/\text{s}$

Im Bereich der Kiesinsel soll insbesondere der Frage nachgegangen werden, ob die bei Hochwasser auftretenden Schubspannungen zur Erosion der Insel, des Nebenarms und der Ufer entlang der Rheingärten führen. Hierzu sind in den Abbildungen 7 und 8 die Schubspannungen  $\tau_0$  aus den 3D-Berechnungen für die Abflüsse  $Q_2$  und  $Q_4$  aufgetragen. Es stellt sich heraus, dass unabhängig vom Durchfluss die Schubspannungen auf der Kiesinsel und den Ufern der Rheingärten relativ gering sind und die Strömung mit entsprechend hohen  $\tau_0$ -Werten sich auf die Rheinsohle und das Flussbett des Nebenarms konzentriert. Auf der Insel betragen die Schubspannungen 10 - 20  $\text{N}/\text{m}^2$ , im Nebenarm 50 - 60  $\text{N}/\text{m}^2$  und auf den flach abgeöschten Ufern der Rheingärten überwiegend 10  $\text{N}/\text{m}^2$ . Für  $Q_4$  werden dort stellenweise auch Werte bis 30  $\text{N}/\text{m}^2$  erreicht. Stellt man den aus der Strömung resultierenden Werten für  $\tau_0$  die  $\tau_{\text{krit}}$ -Werte für das Sohlenmaterial und die Pflanzen (s. Tabelle 3) gegenüber, ergibt sich folgender Sachverhalt: 1) Insel und Nebenarm sind nicht erosionsgefährdet, 2) entlang der Ufer der Rheingärten besteht nur bei dem Extremereignis von  $Q_4 = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$  ganz vereinzelt Erosionsgefahr und bedingt damit in großen Zeitabständen geringen Unterhaltungsaufwand.





**Abbildung 8:**  
Sohlenschubspannungen im Bereich der Insel für  $Q_2 = 1587 \text{ m}^3/\text{s}$



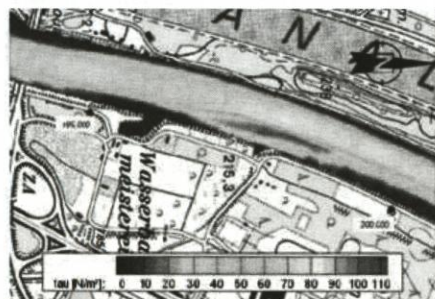
**Abbildung 9:**  
Sohlenschubspannungen im Bereich der Insel für  $Q_4 = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$

Zur Überprüfung der Güte der getroffenen Aussagen sollen, wie bereits erwähnt, der Abfluss  $Q_3$ , der nahezu dem des Hochwasserereignisses vom 09.08.2007 entspricht, sowie das Rouse-Kriterium herangezogen werden. Nach dem Hochwasser 2007 wurde beobachtet, dass die bewachsene Kiesinsel nach wie vor existiert, aber der Nebenarm bei der Restwassermenge von  $Q = 30 - 40 \text{ m}^3/\text{s}$  trocken gefallen ist. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Nebenarm nicht verlandet ist, sondern die stabile Deckschicht nach wie vor die Sohlenoberfläche bildet. Mögliche Gründe für diesen Sachverhalt liefert das eingeschlagene Konzept der Gegenüberstellung von strömungsinduzierten Schubspannungen und kritischen Schubspannungen. Aus diesem Grund sind für die Situation „Vergleichshochwasser 2007“ die aus der Strömungsberechnung resultierenden Sohlenschubspannungen in den Abbildungen 9 und 10 aufgetragen. Die Berechnung liefert für den Rhein zwischen Insel und linkem Ufer  $\tau_0$ -Werte von  $70 - 85 \text{ N/m}^2$ , im Bereich der Insel  $\tau_0$ -Werte von  $10 - 30 \text{ N/m}^2$  und im Nebenarm  $\tau_0$ -Werte von  $30 - 45 \text{ N/m}^2$ . Die Gegenüberstellung mit den  $\tau_{\text{krit}}$ -Werten aus Tabelle 3 liefert die Aussage, dass vermutlich die Sohle des Rheins erodiert wurde und dadurch der Nebenarm trocken gefallen ist.

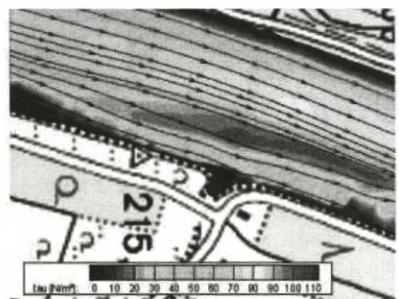
Zur Abschätzung des Sedimentationsverhaltens des feinen Sediments im Nebenarm wird die Rouse-Zahl  $z$  herangezogen. Mit den Schubspannungen von  $30 - 45 \text{ N/m}^2$  (Abbn. 7 - 10) und der Sinkgeschwindigkeit  $v_s = 0,014 \text{ m/s}$  ergeben sich Rouse-Zahlen von  $z = 0,17 - 0,20$ . Das heißt, die Sedimentpartikel werden in Schwebelage gehalten und lagern sich auch bei geringen Abflüssen nicht ab. Die-



se Abschätzung untermauert obige Aussage, dass vermutlich die Rheinsohle erodiert wurde und sich leicht eingetieft hat. Zurzeit laufende Neuvermessungen können möglicherweise diesen Sachverhalt bestätigen.



**Abbildung 10:**  
Sohlenschubspannungen im Ist-Zustand für  
 $Q_3 = 3040 \text{ m}^3/\text{s}$



**Abbildung 11:**  
Sohlenschubspannungen und Strömungslinien bei der Kiesinsel für  $Q_3 = 3040 \text{ m}^3/\text{s}$

## 4 Zusammenfassung

Zur Abschätzung der morphodynamischen Entwicklungen im Bereich der von der Stadt Neuenburg geplanten Umgestaltungsmaßnahmen wurde ein 3D hydromorphologisches Modell entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Es basiert auf der Gegenüberstellung der aus der Strömung resultierenden Schubspannungen und der kritischen Schubspannungen für die Sedimente im Rhein und den Pflanzenbewuchs auf den Vorländern. Das Modell liefert plausible Erklärungen für die zukünftige Entwicklung des Rheinbettes, des Nebenarms und der Kiesinsel sowie über die Verlandungstendenzen im geplanten Hafen. Das Modell eignet sich im Besonderen auch für die Abschätzung morphologischer Veränderungen unter dem Einfluss von Extremereignissen.

## 5 Literatur

- Dittrich, A. (1995): Hydraulische Belastbarkeit ingenieurbioologischer Bauweisen. Statusbericht 1994/1995, WBW-Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, Heidelberg.

- Dittrich, A., Marek, M., Specht, F.-J., Dippe, D. (2005): Hydraulische Berechnungen und morphodynamische Entwicklung für den Rhein zwischen Märkt und Breisach. Bericht des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, Nr. 904, Braunschweig (unveröff.).
- Dittrich, A., Schulte-Rentrop, A., Marek, M., Späth, V. (2007): Morphological development of the retention basin „Hartheim“ – a case study. Acta Geophysica Polonica, Vol. 55, Nr. 1, pp. 33 - 45.
- DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Nr. 220, Parey, Hamburg.
- Günter, A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Dissertation, Nr. 4649, ETH Zürich.
- Olsen, N.R.B (2008): SSIIM 2.0 – Version 2008. NTNU Trondheim.
- Petryk, S., Bosmajian, G. (1975): Analysis of flow through vegetation. J. Hydraul. Div., Vol. 101; Nr. 7, pp. 871 - 884.
- Schulte-Rentrop, A. (2010): Morphodynamic hazard analysis for river restoration and flood mitigation measures. Dissertation, TU Braunschweig (im Druck).
- Wang, Z., Dittrich, A. (1992): A study on problems in suspended sediment transportation. Proc. of 2nd Intern. Conference on Hydraulic and Environmental Modelling in Coastal, Estuaring and River Waters, Vol. 2, pp. 467 - 478.
- USACE – United States Army Corps of Engineers (2005): HEC-RAS River Analysis System – User’s Manual. Version 3.1.3, Report Nr. CPC-68, Davis.

## Autoren:

Dipl. Geoökol. Annette Schulte-Rentrop	Prof. Dr.-Ing. habil Andreas Dittrich
Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg Wedeler Landstrasse 157 22559 Hamburg	Leichtweiß-Institut für Wasserbau Technische Universität Braunschweig Beethovenstr. 51 a 38106 Braunschweig
Tel.: +49 40 81908-345	Tel.: +49 531 391 3940
E-Mail: Annette.Schulte-Rentrop@BAW.DE	Fax: +49 531 391 8184
	E-Mail: a.dittrich@tu-bs.de

## Dr. Volker Späth

Institut für Landschaftsökologie und Naturschutz Bühl (ILN)  
Sandbachstr. 2  
77815 Bühl

Tel.: 07223 /9486-11  
E-Mail: volker.spaeth@ilnbuehl.de