

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Schnauder, Ingo; Rüter, Nils

3D numerische Modellierung verkrauteter Flussabschnitte

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/20.500.11970/103459>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schnauder, Ingo; Rüter, Nils (2014): 3D numerische Modellierung verkrauteter Flussabschnitte. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 383-392.

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.



3D numerische Modellierung verkrauteter Flussabschnitte

Ingo Schnauder
Nils Rüter

Wenn Makrophyten in der Vegetationsperiode in Flüssen aufkommen, verändern sie Strömung und Morphologie oft erheblich. Ein solcher Fall liegt beim hier untersuchten Mäanderabschnitt vor, bei dem sich Effekte durch den Bewuchs und die Krümmung überlagern und ein komplexes dreidimensionales Strömungsmuster entstehen lassen. Auf Grundlage von Feldmessungen der Strömung und Pflanzenverteilung konnte ein dreidimensionales k-epsilon Modell angewendet, und die Leistungsfähigkeit unter den schwierigen Randbedingungen getestet werden. Trotz einer komfortablen Datengrundlage mussten etliche Annahmen zur Vegetationsdichte und -verteilung getroffen werden, um die Pflanzen im Rechengitter zu implementieren. Grundsätzlich stieg die Qualität der Berechnungen mit dem Detail, mit dem die Heterogenität in den Bestandsmustern abgebildet wird. Im vorliegenden Fall war dies vor allem im flachen Bereich der Furt wichtig, der die Strömung entlang der gesamten Krümmung stark beeinflusst.

Stichworte: Strömungssimulation, SSIIM, Makrophyten, Verkrautung, Strömung in Krümmungen, Sekundärströmung.

1 Einführung

Die Berechnung von Strömungen in verkrauteten Flussabschnitten stellt Ingenieure in Forschung und Praxis vor erhebliche Schwierigkeiten. Die Fließgesetze für offene Gerinneströmungen oder poröse Medien sind nicht ohne weiteres übertragbar und Rauheitskonzepte für aquatischen Bewuchs fehlen weitestgehend. Tabellenwerte aus der Literatur, z.B. Strickler-Beiwerte, liegen kaum vor, und die wenigen Ausnahmen sind nicht über die Pflanzenart, Biomasse oder ähnliche Parameter standardisiert. Damit ist eine Anwendung auf andere Flüsse oder Flussabschnitte mit großen Unsicherheiten verbunden. Hinzu kommt die enorme morphologische Vielfalt, die Makrophyten über eine Wachstumsperiode aufweisen können, sei es innerhalb derselben Art, z.B. submerse und emergente Blatt- und Blütenbildung, oder in gemischten Beständen durch eine entsprechende Sukzessionsfolge.

Windungsgrad $W = 2,0$. Es treten zwei Kolke auf, einer am Beginn als Mittenkolk, der zweite am Außenufer in der zweiten Hälfte der Krümmung als Krümmungskolk (Abbildung 2a). In der Vegetationsperiode kommt es zu starkem Makrophytenwachstum mit einem Maximum an Biomasse gegen Ende August. Die drei aquatischen Hauptarten sind: *sagittaria sagittifolia* (Pfeilkraut), *potamogeton perfoliatus* (durchwachsenes Laichkraut) und *nuphar lutea* (gelbe Teichrose, siehe Abbildung 2b). Die Ufer sind von einem dichten Schilfgürtel (*phalaris arundinacea*) gesäumt.

Die Bestandsmuster im untersuchten Flussabschnitt waren mosaikhaf und stark von den Lichtbedingungen abhängig. Die limitierende Wassertiefe für Makrophytenwachstum lag bei 1,6 m, tiefere Bereiche, z.B. beide Kolke, blieben vegetationsfrei. Durch den hohen Schilfsaum wurden die Ufer beschattet und das Makrophytenwachstum in Ufernähe gehemmt. Dies führte am südlichen Ufer zu lichterem Beständen, wie in der Außenkrümmung der ersten Mäanderhälfte.

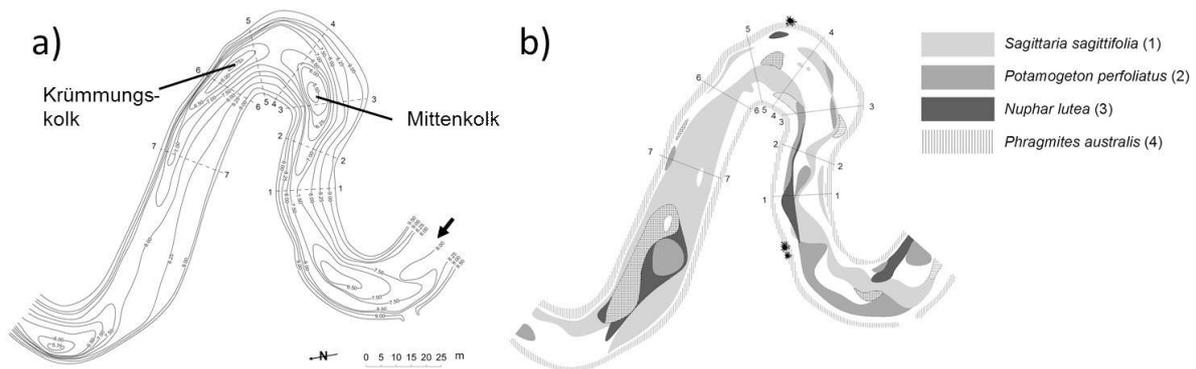


Abbildung 2: (a) Tiefenlinien mit Kolken und (b) Kartierung der Makrophytenbestände getrennt nach den vier Hauptarten (Schnauder & Sukhodolov, 2012).

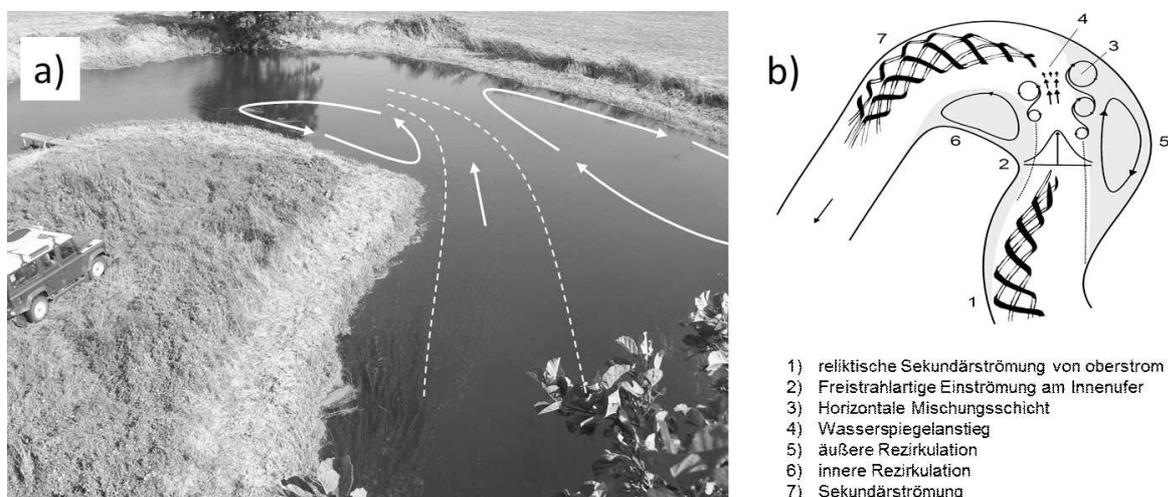


Abbildung 3: (a) Foto vom Zustand bei den Messungen, September 2009; (b) schematische Darstellung der Strömung (Schnauder & Sukhodolov, 2012).

3 Feldmessungen

Die enge Krümmung, die Sohlenstruktur mit zwei Kolken, und die Bestandsmuster bestimmen das Strömungsbild. Aus detaillierten Feldmessungen Anfang September 2009 mit ADVs (Acoustic Doppler Velocimeter, Typ Nortek Vectrino+) konnte ein klares Bild der Strömungsstruktur abgeleitet werden (Abbildung 3). Besonderheiten sind der Freistrahllartige Einlauf in die Krümmung, die beiden großen Rezirkulationszonen am Innen- und Außenufer und die erst in der zweiten Hälfte der Krümmung aufkommende Sekundärströmung (Abbildung 3b). Details der Feldmessungen und Analysen der Strömung und ihrer Auswirkung auf die Morphologie finden sich in *Schnauder & Sukhodolov (2012)*.

Anfang September 2009 wurden Kartierungen der Bestände vom Boot ausgeführt und dabei die Überströmungshöhen eingemessen, d.h. die Pflanzen im Zustand der Rekonfiguration durch die Strömung. In Taucheinsätzen wurden zudem Pflanzen auf einer Grundfläche von 0,5 – 1,0 m² abgeerntet und im Labor ihr Trockengewicht ermittelt (Anfang September 2009 / 2010).

4 Numerisches Modell

4.1 Grundlagen

Aufgrund des dreidimensionalen Strömungsmusters wurde ein dreidimensionales k-epsilon Modell für die Berechnung verwendet (SSIIM, *Olsen, 2006*). SSIIM ist ein nichtkommerzieller Code, der überwiegend in der Forschung Einsatz findet und dahingehend weiterentwickelt wird. Dazu gehört eine sinnvolle Option, Vegetation im Rechengitter über einen Schleppkraftansatz zu implementieren (*Zinke et al., 2008*). In jeder Zelle, in der sich Vegetation befindet, wird dabei eine entsprechende Widerstandskraft als Verlustterm über das Quadrat der Fließgeschwindigkeit angesetzt:

$$F_w = c_w \rho A \frac{u^2}{2} = c_w' \rho V \frac{u^2}{2} \quad (1a)$$

$$c_w' = c_w \frac{A}{V} \quad (1b)$$

mit der Schleppkraft F_w (N); dem Widerstandsbeiwert c_w (-); der Dichte von Wasser ρ (kg/m³); der lokalen Fließgeschwindigkeit u (m/s), und angeströmten Referenzfläche A (m²). In SSIIM wird ein „Vegetationsparameter“ c_w' (1/m) verwendet, der als Produkt aus Widerstandsbeiwert und Referenzfläche A (m²)

verwendet, der pro Volumen des umgebenden Wasserkörpers, bzw. der Gitterzelle, V (m^3), definiert ist. Die Hauptschwierigkeit bei der Modellierung verkrauteter Abschnitte ist hierbei also, die Bestände über eine angeströmte Referenzfläche und den dazugehörigen Widerstandsbeiwert zu charakterisieren.

4.2 Vegetationsparameter

Die Kombination aus Widerstandsbeiwert und Referenzfläche ist ad hoc nur für einfache Pflanzenmorphologien möglich, da hier Analogien zu geometrischen Körpern angewendet werden können und Tabellenwerte aus der Literatur bekannt sind. Bei den in der Tollense vorhandenen Hauptarten trifft dies nur auf *sagittaria* zu, die im Untersuchungszeitraum submerse Blätter aufwies, die sich über Länge (im Mittel 120 cm), Breite (1,4 cm) und Anzahl Blätter pro Grundfläche (72 für dichte Bestände) ausreichend charakterisieren ließ (siehe *Sukhodolova, 2008; Zinke et al., 2008*). Die frontal angeströmte Fläche beträgt demnach auf die Grundfläche bezogen $1,2 m^2/m^2$ (bzw. $1,0 m^2/m^3$ auf das Volumen des umgebenden Wasserkörpers bezogen, der den Bestand enthält). Da die Fließgeschwindigkeit in den Beständen unter $0,1 m/s$ lag, waren die Pflanzen relativ aufrecht und ein Widerstandsbeiwert $c_w = 1,0$ wurde angenommen. Der resultierende Vegetationsparameter liegt damit bei $c_w' = 1,0 / m$ für dichte Bestände und stellt aufgrund der getroffenen Annahmen einen Maximalwert dar.

Die Vegetationsparameter für *potamogeton* und *nuphar* lassen sich nicht auf gleiche Weise bestimmen, da sich die Pflanzen aus Stengeln und Blättern zusammensetzen und damit keine einfache Geometrie mehr aufweisen. Im September 2010 erfolgte eine vergleichende Biomasse-Bestimmung der drei Arten, die für monospezifische Bestände zwischen $109 - 135 g/m^2$ ergab. Dabei wies *sagittaria* die größte Biomasse pro Grundfläche auf, *nuphar* und *potamogeton* lagen etwa 75% darunter. Da andere Ansätze bisher fehlen, wurde für die Modellierung angenommen, dass eine ähnliche Biomasse auch eine ähnliche Widerstandswirkung ausübt. Der maximale Vegetationsparameter für *nuphar* und *potamogeton* wurde damit auf $c_w' = 0,75 / m$ reduziert.

4.3 Vertikale Vegetationsmodelle

Mit der Festlegung des Vegetationsparameters kann im nächsten Schritt die dreidimensionale Verteilung der Pflanzen im Rechengitter erfolgen. Dabei wurden zwei Vegetationsmodelle getestet, die sich im Aufwand der erforderlichen Datenerhebungen unterscheiden:

- Modell 1 basiert auf den Kartierungen der Bestände im Grundriss, Zuordnung der Hauptart und Angabe der mittleren Überdeckung / Überströmhöhe. *Sagittaria* und *nuphar* waren im untersuchten submersen Stadium 20-40% überströmt, *potamogeton* und *phalaris* waren emergent, d.h.

sie wurden im Rechengitter vertikal von der Sohle bis zur Wasseroberfläche angesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Biomasseverteilung über die Tiefe wurde der maximale Vegetationsparameter vegetationsabhängig angepasst (Abbildung 4).

- Modell 2 beruht auf der Annahme einer direkten Tiefenabhängigkeit der Makrophytenausbreitung. Auf Grundlage der Tiefenkarte wurden Bereiche unterhalb der 1.6 m-Tiefenlinie als vegetationsfrei angenommen. Da submersen Wuchsformen stark dominierten, wurde das Modell weiter vereinfacht und pauschal für alle Vegetationsbereiche 40% Überströmung angesetzt sowie ein einheitlicher Vegetationsparameter von 0,5 /m angenommen.

Ansonsten wurden beide Fälle im gleichen Rechengitter und unter denselben Randbedingungen gerechnet (Wasserspiegel, Grundrauheit, Durchfluss). Das Rechengitter war rechteckig strukturiert und maß 25 cm x 25 cm horizontal und 20-40 cm vertikal, damit ergaben sich in den 3,5 m tiefen Kolken bis zu 9 Tiefenzellen. Insgesamt ergaben sich 195000 Gitterzellen. Die Berechnungen wurden stationär durchgeführt, aufgrund der großen Rezirkulationszonen dauerte es bis zum Erreichen des Konvergenzkriteriums mehrere Tage auf einem PC.

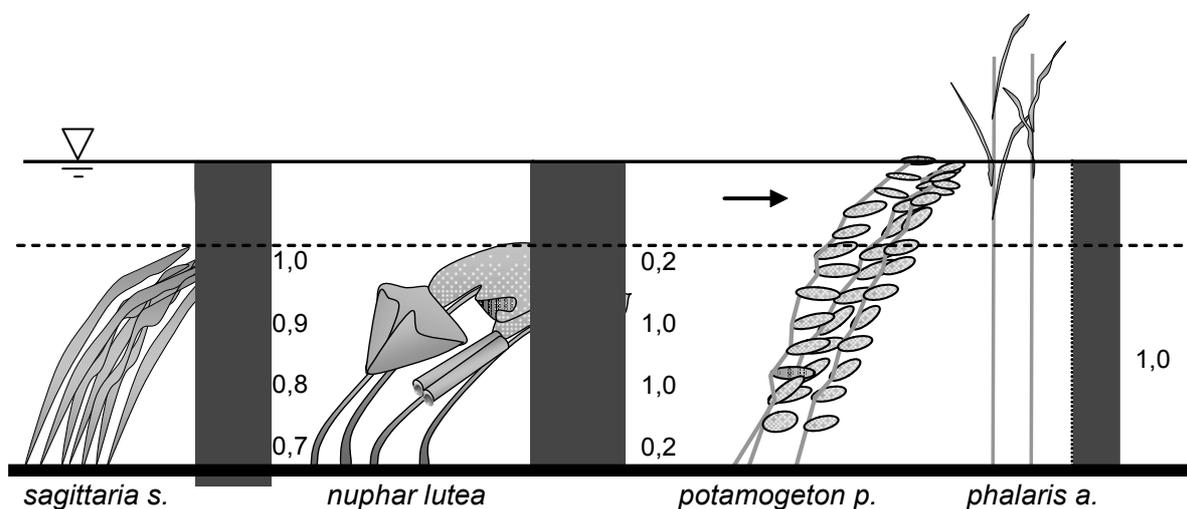


Abbildung 4: Tiefen- und Artenabhängigkeit der vertikalen Biomasseverteilung und des Vegetationsparameters in Modell 1 (Abminderungsfaktoren für c_w' als Zahlenwerte angegeben).

5 Ergebnisse

5.1 Strömungsstruktur

Die Vegetation hat einen entscheidenden Einfluss auf die Strömungsstruktur im untersuchten Flussabschnitt. Daher spiegeln sich auch Unterschiede in den beiden Vegetationsmodellen deutlich in den Berechnungsergebnissen wieder. Hierbei zeigte sich, dass die Strömungsstruktur der gesamten Krümmung entscheidend von dem Bewuchs im flachen Bereich der Furt („Einlaufbereich“) abhängt.

In Abbildung 5 sind die tiefengemittelten Geschwindigkeitsverteilungen dargestellt. Das detailliertere Modell 1 bildet präferenzielle Fließwege in den Bestandslücken im Einlaufbereich gut ab. Modell 2 ist nur tiefenabhängig, vergleichbar mit einer Anhebung der Sohlenlage, eine lückenhafte Verteilung der Bestände im Querschnitt wird daher nicht berücksichtigt. Die Geschwindigkeitsverteilung ist insgesamt gleichmäßiger über den Querschnitt verteilt, Heterogenität im Bewuchs und präferenzielle Fließwege werden nicht abgebildet. Das Geschwindigkeitsmaximum im Einlauf wird überschätzt und die Freistrahlarartige Einströmung ist ausgeprägter und stärker am Innenufer konzentriert als bei Modell 1.

Die Einströmbedingung beeinflussen weiterhin die Strömungsablösungen an den Ufern und damit die Größe der Rezirkulationszonen. Modell 1 liefert auch hier ein besseres Ergebnis, da bei Modell 2 durch die stärkere Konzentration am Innenufer beide Rezirkulationszonen in ihrer Größe und der Zirkulationsgeschwindigkeit überschätzt werden.

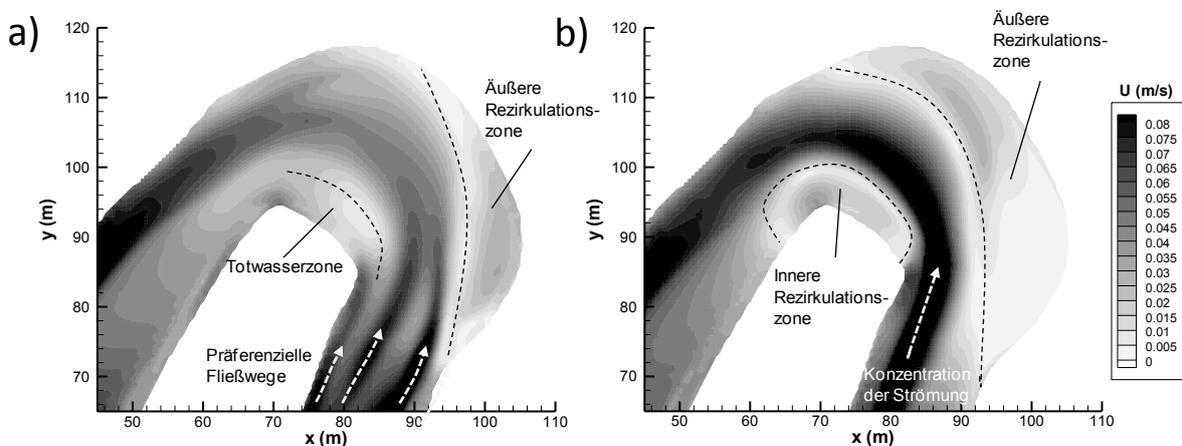


Abbildung 5: Berechnete tiefengemittelte Geschwindigkeit, (a) Modell 1, (b) Modell 2.

Durch die Einströmung wird im weiteren Verlauf der Krümmung auch die Entwicklung einer Sekundärströmung verzögert. Erst in der zweiten Hälfte der Krümmung entsteht die krümmungstypische Spiralströmung aus der Überlagerung der Haupt- mit der Querströmung (Schnauder & Sukhodolov, 2012). Diese wird im Modell 1 gut abgebildet, im Modell 2 fällt sie zu gering aus und kaum eine Änderung der Querströmungsrichtung über die Fließtiefe tritt ein (Abbildung 6).

Unterschiede in der berechneten Strömungsstruktur, also letztlich in den Vegetationsmodellen, spiegeln sich auch in der Verteilung der Sohlenschubspannung wieder. Bei Modell 1 treten die größten Schubspannungen entlang der

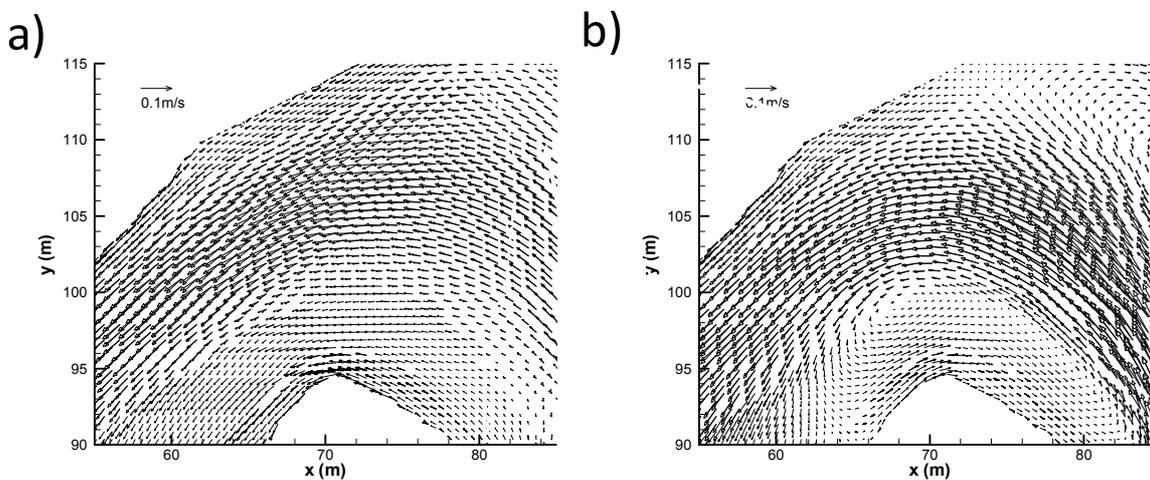


Abbildung 6: Geschwindigkeitsvektoren an Sohle und Wasserspiegeloberfläche zur Verdeutlichung der Sekundärströmung, (a) Modell 1, (b) Modell 2 (Daten nur für jeden zweiten Gitterpunkt abgebildet).

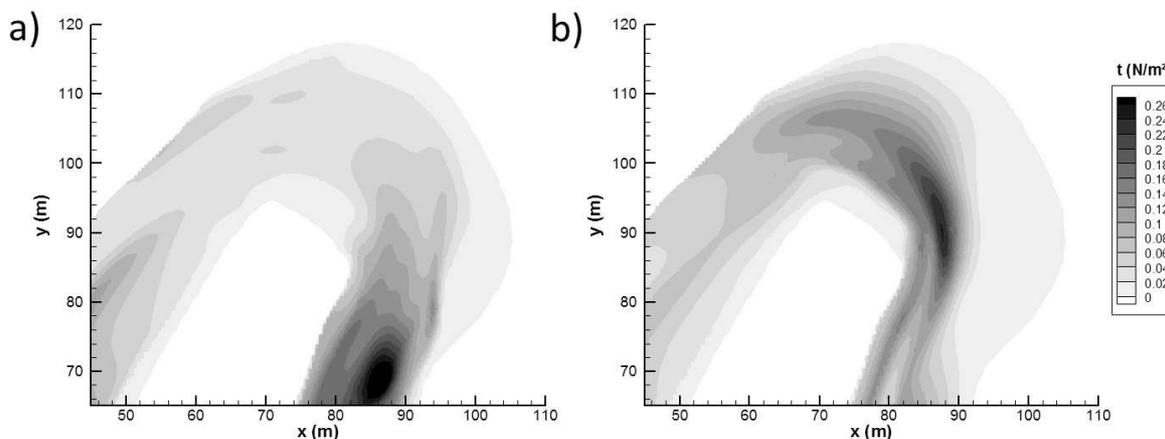


Abbildung 7: Berechnete Sohlenschubspannung, (a) Modell 1, (b) Modell 2.

präferenziellen Fließwege im Bereich der Furt auf. Hier ist die Wassertiefe am geringsten und damit die Fließgeschwindigkeit besonders in den Lücken zwischen den Beständen hoch. Modell 1 gibt also gut die Tendenz zur Erosion in diesen Bereichen wieder (Wolfert et al., 2001). Über den Kolken ist die Wassertiefe am größten und die Strömung wird langsamer, womit sich auch die Schubspannungen verringern. Bei Modell 2 treten dagegen die größten Schubspannungen weiter unterstrom im Bereich des Mittenkolkes auf, was mit der Struktur der freistrahmartigen Einlaufströmung zu erklären ist.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde ein dreidimensionales k-epsilon Strömungsmodells auf eine verkrautete Flusskrümmung angewendet. Trotz einer komfortablen Datengrundlage aus Feldmessungen waren zusätzliche Annahmen bezüglich der Vegetationsdichte und -verteilung erforderlich, um gute Berechnungsergebnisse zu erreichen.

Im Gegensatz zu gestreckten Flussabschnitten war die Strömung im vorliegenden Fall stark dreidimensional und maßgeblich von der mosaikartigen Struktur der Pflanzenbestände geprägt. Der Bereich der Furt am Einlauf in die Krümmung ist dabei besonders wichtig und bestimmt die Strömung entlang des gesamten darauffolgenden Abschnittes. Die Ergebnisse zeigen, dass lückenhafte Bestände und präferenzielle Fließwege dabei wichtige Faktoren sind, die in der Repräsentation der Pflanzen im Rechengitter berücksichtigt werden müssen. Vereinfachende Vegetationsmodelle, wie das hier getestete tiefenabhängige Modell, sind geeignet, um die Strömungsstruktur qualitativ abzubilden und immer noch exakter als z.B. Berechnungen die den Vegetationseinfluss über eine Erhöhung der Kornrauheit berücksichtigen. Für quantifizierende Berechnungen sind sie allerdings in den meisten Bereichen bereits zu vereinfachend.

Das vorgestellte Modellkonzept zeigt das Potential von dreidimensionalen Simulationsprogrammen auf, aber auch die Grenzen, welche von den Modellrandbedingungen vorgegeben werden. Bei verkrauteten Abschnitten hängt die Berechnungsqualität vor allem vom Detail der Pflanzendarstellung im Rechengitter ab. Um ausreichend detaillierte Daten zu gewinnen, ist ein sehr hoher Aufwand an Feldmessungen nötig. Um diesen zu minimieren, sind biologische Wachstumsmodelle für Makrophyten erforderlich, besonders für die vertikale Biomasseverteilung einzelner Arten über einen Vegetationszyklus.

7 Literatur

- Olsen, N. R. B. (2006): SSIIM User's Manual. The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway (online: <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/>).
- Schnauder, I. & Sukhodolov, A. (2012): Flow in a tightly curving meander bend: effects of seasonal changes in aquatic macrophyte cover. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012.
- Sukhodolova, T. (2008): Studies of turbulent flow in vegetated river reaches with implications for transport and mixing processes. PhD thesis. Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, published 01.12.2008. (online: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:11-10093951>)
- Wolfert, H. P., Koomen, A. J. M. & Maas, G. J. (2001): Aquatic macrophyte growth and seasonal bedform pattern changes in a lowland sand-bed meandering stream. In Wolfert HP. 2001. *Geomorphological change and river rehabilitation: case studies on lowland fluvial systems in the Netherlands*. PhD thesis University Utrecht: 33-58. (online: <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/1983151/inhoud.htm>).
- Zinke, P., Olsen, N. R. B. & Sukhodolova, T. (2008): Modeling of hydraulics and morphodynamics in a vegetated river reach. *Proceedings Riverflow*, 2008.

Danksagung

Die Feldmessungen und ein Großteil der Modellierungen wurden über das DFG-Projekt SU-405/3 finanziert. Dank geht an die Arbeitsgruppe am IGB Berlin, Alex Sukhodolov und Tatiana Sukhodolova. Weiterhin Dank an die Kollegen beim Ingenieurbüro gerstgraser, für die Unterstützung und Anregungen.

Autoren:

Dr.-Ing. Ingo Schnauder

gerstgraser - Ingenieurbüro
für Renaturierung
Gaglower Straße 17/18
D-03048 Cottbus

Tel.: +49 355 48389 13
Fax: +49 355 48389 20
E-Mail: schnauder@gerstgraser.de

Dr. Nils Rüther

Norwegian University of Science and
Technology, Department of Hydraulic and
Environmental Engineering
S.P. Andersens Veg 5
7491 Trondheim

Tel.: +47 951 37746
Fax: +47 735 912 98
E-Mail: nils.ruther@ntnu.no