



Labormessungen im Maßstab 1:1 und Modellentwicklung zur Verformung und Rauigkeit flexibler Vegetation in Fließgewässern

M. Klösch · M. Waygand · M. Buchinger · E. Busch · R. Dunst · G. Egger · H. Habersack

Angenommen: 8. Januar 2024
 © The Author(s) 2024

Zusammenfassung Die Vegetation gewinnt im Hochwasserschutz zunehmend an Bedeutung, da aktuelle Wasserbauprojekte auch ökologische Ziele verfolgen und die Vegetation integraler Bestandteil natürlicher und renaturierter Flüsse ist. Darüber hinaus werden Funktionen der Vegetation – wie jene der Beschattung und fließenden Retention – bewusst eingesetzt, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel angesichts steigender Wassertemperaturen und zunehmender Hochwasserabflüsse an Bedeutung gewinnen. Die Vegetation steht bei Hochwasserereignissen in Wechselwirkung mit der Strömung und dem Sedimenttransport und die durch die Wechselwirkung hervorgerufenen Sohlhöhenänderungen und Strömungswiderstände beeinflussen die Wasserspiegelhöhen und somit die Hochwassersicherheit. Bisher werden die Strömungswiderstände in hydrodynamisch-numerischen Modellen durch einen Rauigkeitsbeiwert berücksichtigt. Dieser wird meist als konstant

angenommen, während flexible Vegetation aber ihre Form und somit den Strömungswiderstand anpasst.

Wir stellen Entwicklungen zu einem numerischen Modell der mechanischen Verformung einer Pflanze unter Strömungsbelastung vor, welches die Pflanze als Stabmodell mithilfe der Finite-Elemente-Methode diskretisiert. Die Geometrie der untersuchten Pflanzen wurde mittels Fotogrammetrie erfasst und mit Messungen zu den Stamm- und Astdurchmessern und der Belaubung ergänzt. Parameter betreffend die Steifigkeit gegenüber Biegung und Torsion wurden in Abhängigkeit von den Durchmessern der Äste erfasst. Der im BOKU-Wasserbaulabor gegebene Durchfluss von bis zu $10\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ erlaubt Versuche im 1:1-Maßstab an einzelnen Pflanzen und ganzen Pflanzenverbänden. Messungen zur Verformung und Strömungswiderstandskraft einzelner Pflanzen sowie zu den Fließgeschwindigkeiten in Pflanzenverbänden bilden die Grundlage für die Überprüfung des Modells. Eine Umrechnung der Strömungswiderstandskraft in einen Rauigkeitsbeiwert ermöglicht die Einbindung des Modells in zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle, die eine häufige Anwendung in der Simulation von Hochwasserabflüssen finden.

Schlüsselwörter Flexible Vegetation · Strömungswiderstand · Hydraulische Rauigkeit · Hochwasserschutz

Laboratory measurements at 1:1 scale and model development on the deformation and roughness of flexible vegetation in rivers

Abstract Vegetation is becoming increasingly important in flood protection, as current hydraulic engineering projects also pursue ecological objectives and vegetation is an integral part of natural and restored rivers. In ad-

dition, vegetation functions such as shading and flow retention are deliberately utilised, which are becoming increasingly important in the context of climate change in view of rising water temperatures and increasing flood discharges. During flood events, vegetation interacts with the flow and sediment transport, and the changes in bed elevation and flow resistance caused by this interaction influence water levels and thus flood safety. Up to now, the flow resistances in hydrodynamic-numerical models have been taken into account by a roughness coefficient. This is usually assumed to be constant, whereas flexible vegetation adapts its shape and thus adjusts the hydraulic resistance.

We present developments of a numerical model of the mechanical deformation of a plant under flow loading, which discretises the plant as a rod model using the finite element method. The geometry of the analysed plants was recorded by photogrammetry and supplemented with measurements of the stem and branch diameters and the foliage. Parameters concerning the stiffness against bending and torsion were recorded as a function of the diameters of the branches. The discharge of up to $10\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ available in the BOKU River Lab allowed experiments on a 1:1 scale on individual plants and entire vegetation patches. Measurements of the deformation and drag force of individual plants, as well as the flow velocities in vegetation patches, form the basis for testing the model. A conversion of the drag force into a roughness coefficient enables the model to be integrated into two-dimensional hydrodynamic-numerical models, which are frequently used in the simulation of flood discharges.

Keywords Flexible vegetation · Flow resistance · Hydraulic roughness · Flood protection

DI Dr. M. Klösch (✉) ·
 Mag. DI M. Waygand ·
 DI M. Buchinger ·
 DI E. Busch · DI R. Dunst ·
 Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. H. Habersack
 Department für
 Wasser-Atmosphäre-Umwelt,
 Institut für Wasserbau, Hydraulik
 und Fließgewässerforschung,
 Universität für Bodenkultur Wien, Am
 Brigittenauser Sporn 3, 1200 Wien,
 Österreich
 mario.kloesch@boku.ac.at

apl. Prof. Dr. G. Egger
 Naturraumplanung Egger e.U.,
 Bahnhofstraße 39b, 9020 Klagenfurt,
 Österreich
 gregory.egger@naturraumplanung.at

Institut für Geographie und
 Geoökologie, Abteilung Aueninstitut,
 Karlsruher Institut für Technologie,
 Karlsruhe, Deutschland



Abb. 1 **a** Farbige Markierung der Äste einer Grau-Erle (*Alnus incana*) zur erleichterten Identifizierung der Äste in der fotogrammetrischen Auswertung sowie Vermessung von Targets zur Orientierung im übergeordneten Koordinatensystem und für ein korrektes Größenverhältnis, **b** anhand der Software Photomodeler erhaltene, dreidimensionale Pflanzenstruktur und Geländeoberfläche

1 Einleitung

Mit steigendem Nutzungsdruck und Herausforderungen durch Klimawandel und Biodiversitätsverlust steigt neben den Anforderungen an die Funktionen von Renaturierungsprojekten auch die Notwendigkeit zuverlässiger Planungen. In Renaturierungsprojekten, die zur Einhaltung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) vermehrt umgesetzt werden, spielt die Auenvegetation und deren Sukzession von der Pionierbesiedelung bis zum Auwald eine immer größere Rolle. Die Auenvegetation ist über die Beeinflussung morphodynamischer Prozesse ein wesentlicher Bestandteil bei der Erhaltung oder Wiederherstellung natürlicher Flussmorphologien und ganzer Flusslandschaften (Egger et al. 2023; Formann et al. 2013). Besonders angesichts der durch den Klimawandel in Europa steigenden Spitzenabflüsse (Blöschl et al. 2020) bekommt auch die Vegetation des Vorlands über die fließende Retention von Hochwasserabflusswellen eine wichtige Bedeutung (Habersack et al. 2010, 2015). Angesichts steigender Wassertemperaturen (Niedrist 2023) steigt auch die Bedeutung der Vegetation für die Beschattung der Wasserflächen. Aufgrund der Position der Vegetation im oder in der Nähe des Fließgewässers interagiert sie mehr oder weniger häufig mit der

Strömung und dem Sedimenttransport. Die Vegetation beeinflusst durch Strömungswiderstände direkt oder durch hervorgerufene Anlandungen indirekt die Wasserspiegellhöhen, den Abfluss von Hochwasserwellen und morphodynamische Prozesse, und ist somit auch für gesellschaftspolitische Themen wie den Hochwasserschutz von Bedeutung.

Bisher wurde die von der Vegetation verursachte Rauigkeit in der hydrodynamisch-numerischen Modellierung anhand konstanter Werte berücksichtigt (e.g. Chow 1959; Barnes 1967; Arcement and Schneider 1989). Flexible Vegetation passt ihre Form dem Strömungsangriff an, und verändert damit auch den auf die Strömung ausgeübten Widerstand. Bisher wurde die Verformung flexibler Vegetation in der Strömung auf der Grundlage von Parametern modelliert, die empirisch aus Laborstudien abgeleitet wurden (z.B. Järvelä 2004; Kouwen und Fathi-Moghadam 2000; Oplatka 1998; Schoneboom und Aberle 2009; Wilson et al. 2010). So wurde z.B. der „Vogel exponent“ eingeführt, um die Potenz des quadratischen Widerstandsgesetzes zu reduzieren und eine erhöhte Verformung mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Darüber hinaus vereinfachten die meisten Studien die Pflanzengeometrien, die oft durch gleichmäßig verteilte Zylinder dargestellt werden (verfügbare Model-

le zusammengestellt von Vargas-Luna et al. 2015). Ein Ziel dieser Arbeit war es, die mechanischen Eigenschaften und die Geometrie einer Anlage vollständig zu berücksichtigen und gleichzeitig ein neues Verformungsmodell aufzustellen, das weniger auf empirisch abgeleitete Daten angewiesen ist, dafür aber eine verstärkte Parametrisierung der mechanischen Eigenschaften der Pflanze und eine detaillierte Bewertung der Pflanzengeometrie vorsieht (Klösch et al. 2018; Waygand et al. 2017). Messungen der Interaktion zwischen flexibler Vegetation und der Strömung, die bei Verwendung echter Vegetation den Maßstab 1:1 erfordern, sollen eine Datenbasis zur Überprüfung des Modells liefern.

2 Mechanisch basiertes Pflanzenverformungsmodell

Blamauer et al. (2011) entwickelten ein einfaches mechanikbasiertes Pflanzenverformungsmodell auf der Grundlage von Van De Wiel (2003), das die von Freeman et al. (2000) gewonnenen Biegedaten berücksichtigte, und integrierten es in das zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modell Rsim-2D (Tritthart 2005), um die Grundlage für ein Modell der Vegetationsukzession unter verschiedenen Szenarien der Auswirkungen des Klimawandels zu schaffen (Politti et al. 2014). Die Verfügbarkeit des Freispiegeldurchflusses von bis zu $10\text{ m}^3/\text{s}$ beim Wasserbaulabor in Wien am Brigittenuaer Sporn/Nussdorf ermöglichte die Messung der auf die Pflanzen wirkenden Widerstandskraft und die Untersuchung ihrer Verformung (Klösch et al. 2018) als Grundlage für die Validierung eines mechanisch basierten Pflanzenverformungsmodells, das die grundlegenden mechanischen Parameter (einschließlich Elastizitätsmodul und Schubmodul; Klösch et al. 2018; Waygand et al. 2017) berücksichtigte.

Im Zuge dieser Entwicklungen drängte sich schlussendlich die Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) auf (Waygand 2020). Diese Methode erlaubt eine detailgetreue Nachbildung der Geometrie anhand kurzer, miteinander kraftschlüssig verbundener gerader Ast- und Stämmelemente. Dadurch konnten die an den Versuchspflanzen und im Feld aufgenommenen Geometrien in derselben Detailtreue nachgebildet werden wie sie gemessen wurden.

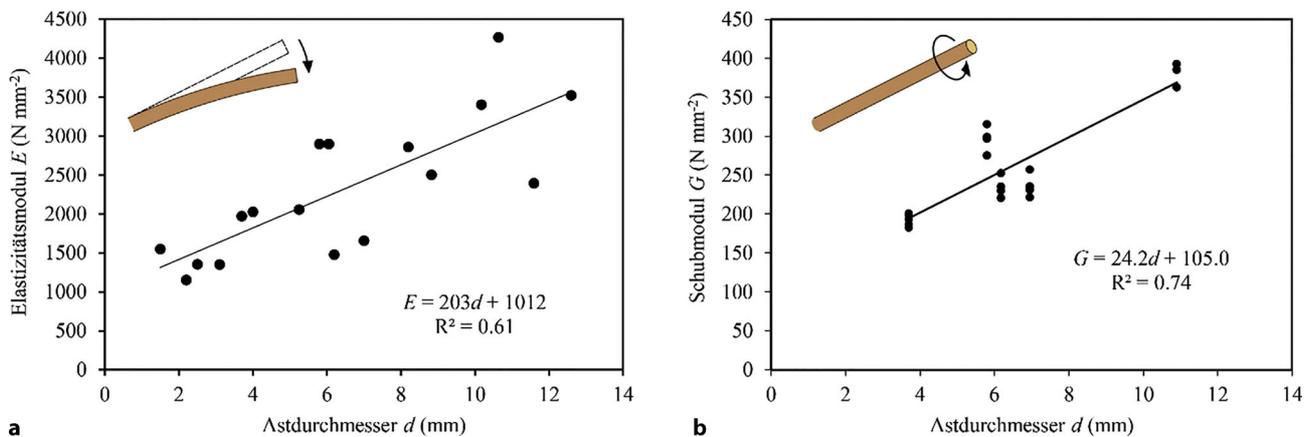


Abb. 2 Ermittelte Beziehung zwischen **a** Astdurchmesser und Elastizitätsmodul (beinhaltet Daten aus Klösch et al. 2018) und **b** Astdurchmesser und Schubmodul für die untersuchten Korbweiden (*Salix viminalis*)

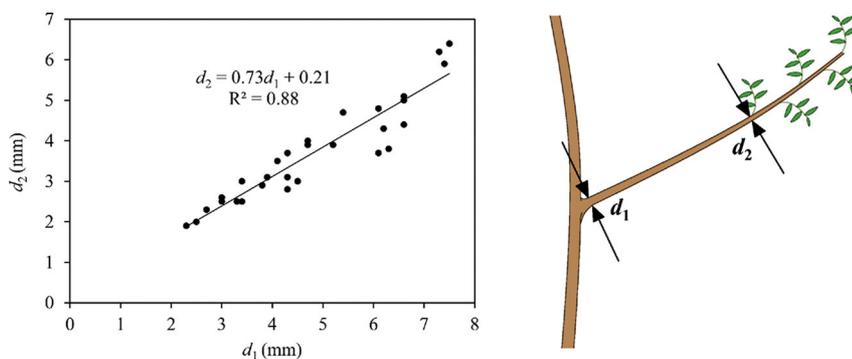


Abb. 3 Gefundener Zusammenhang zwischen dem Astdurchmesser an der Astbasis und dem Astdurchmesser, ab welchem die Äste belaubt, sind für untersuchte Silberweiden (*Salix alba*)

Im Fall der Nachbildung einer Pflanze mit der FEM repräsentieren „Elemente“ kurze Stamm- oder Aststücke, die an deren Endpunkten („Knotenpunkte“) mit den nächstgelegenen Elementen kraftschlüssig verbunden sind. In jedem Knoten sind Verschiebungen in die Richtungen der drei Achsen, und Verdrehungen um die drei Achsen möglich. Die Kräfte, die auf diese Knoten aufgebracht werden, ergeben sich durch die Strömungskraft auf die Länge der Elemente, wo die Komponenten normal auf das Element und parallel zum Element berechnet werden. Die Verformung der Pflanze errechnet sich dann mit dem linearen Gleichungssystem des Weggrößenverfahrens anhand einer Steifigkeitsmatrix, die den Elastizitätsmodul und den Schubmodul zur Beschreibung der Festigkeiten berücksichtigt.

Den im Vergleich zum eigentlichen Anwendungsbereich der FEM mit linearem Gleichungssystem relativ großen

Verformungen musste mit einer Iterationsschleife Rechnung getragen werden. Mit der Verformung ändert sich nämlich die Anströmung und die daraus resultierende Strömungskraft, da (a) die Elemente anders ausgerichtet werden und sich andere Strömungskräfte auf die einzelnen Elemente ergeben, und (b) die Elemente nach einer Verformung in andere Wassertiefen gelangen, wo andere Fließgeschwindigkeiten vorherrschen können (z. B. bei der Definition einer logarithmischen Fließgeschwindigkeitsverteilung). Die Iteration endet, wenn die Kräfte, welche auf ein Wiederaufrichten der Pflanze abzielen, mit dem Strömungsangriff im Gleichgewicht stehen.

3 Diskretisierung der Pflanzengeometrie

Fotogrammetrische Methoden erlauben eine detaillierte Aufnahme der Wuchsform repräsentativer Pflanzen

im Labor wie auch im Feld (Abb. 1), sodass diese als Eingangsdaten für das Pflanzenverformungsmodell verwendet werden konnten. Die Geometrien der Stamm- und Astachsen aus der Fotogrammetrie wurden mit manuellen Messungen der Stamm- und Astdicken ergänzt.

4 Parametrisierung der Festigkeit der Pflanzenteile

Zur Berücksichtigung der Festigkeit gegenüber Biegung wurde der Elastizitätsmodul, und zur Beschreibung der Festigkeit gegenüber Torsion der Schubmodul gemessen. Abb. 2a zeigt beispielhaft Ergebnisse von Biegemessungen an Ästen der Korbweide (*Salix viminalis*), wonach der Elastizitätsmodul mit dem Astdurchmesser zunimmt. Mit einem eigens gebauten Apparat wurden auch Messungen des Schubmoduls durchgeführt; auch dieser zeigt eine Abhängigkeit vom Astdurchmesser (Abb. 2b).

5 Parametrisierung zur Belaubung

Die Belaubung kann im Modell berücksichtigt werden, indem den belaubten Ästen erhöhte Werte für die Strömungswiderstandskoeffizienten c_f und c_w zugewiesen wurden. Da die Pflanzen aufgrund der besseren Lichtbedingungen vermehrt in den äußeren Pflanzenteilen die Blätter austreiben lassen, sind die Äste nicht entlang der gesamten Länge belaubt. Hier fehlte es an einem Werkzeug, mit welchem die Belaubung naturgetreu an unterschiedlichen Pflanzengeometrien nachgebildet werden kann, ohne für jedes Szenario



Abb. 4 a In die Kraftaufnehmerbox eingebaute Korbweide (*Salix viminalis*), b Messung der Strömungskraft bei Anströmung



Abb. 5 Kreisförmig angeordneter Verband mit Silberweiden (*Salix alba*) im Forschungsgerinne des BOKU-Wasserbaulabors

einer Pflanzengeometrie eine individuelle Messung machen zu müssen. Zwischen den Astdicken an der Astbasis und den Astdicken beim Ansatz der Belaubung konnte ein diesbezüglich sehr hilfreicher Zusammenhang gefunden werden, der gut durch eine lineare Funktion beschrieben werden kann (Abb. 3).

6 Messungen zur Kalibrierung und Validierung

Einzelne Pflanzen wurden in eine Kraftaufnehmerbox eingesetzt, die über einen Horizontalschlitten die auf die Pflanze wirkende Strömungskraft auf eine Wägezelle überträgt. Unter Strö-

mungsbelastung (Abb. 4) wird diese somit messbar.

Durch Einstellen eines stationären Durchflusses konnten im Gerinne punktweise mit einem Acoustic Doppler Velocimeter die Fließgeschwindigkeiten in einem kreisförmigen Pflanzenverband gemessen werden (Abb. 5), bevor die Daten in den Messquerschnitten und im Längenschnitt interpoliert wurden und ein umfassendes Bild des Einflusses der Vegetation auf die Fließgeschwindigkeitsverteilung lieferten (Abb. 6).

Bei Durchströmung dieses Pflanzenverbands beginnt die vertikale Fließgeschwindigkeitsverteilung in Richtung flussab zunehmend von einer logarithmischen Verteilung abzuweichen.

Dies entspricht Erkenntnissen in der Literatur (z.B. Baptist et al. 2007). Im vorgestellten Pflanzenverformungsmodell bleibt die vertikale Fließgeschwindigkeitsverteilung aber unbeeinflusst von den Widerständen der Pflanze auf die Strömung. Weitere Modellentwicklungen könnten sich der Interaktion zwischen den Strömungswiderständen und der vertikalen Fließgeschwindigkeitsverteilung widmen.

7 Modellanwendung

Im Pflanzenverformungsmodell wurde eine freistehende Pflanze einer Strömung mit logarithmischer Fließgeschwindigkeitsverteilung ausgesetzt. Die im Forschungsgerinne des BOKU-Wasserbaulabors gemessenen Verformungen dienen zur Kalibrierung und Überprüfung des Modells. Der angepasste Widerstandsbeiwert c_w (1,2) lag in dem in der Literatur angenommenen Bereich, während der angepasste Elastizitätsmodul unter dem zuvor gemessenen Wert, aber dennoch in einem plausiblen Bereich lag (Faktor 0,2) (Waygand 2020). Da die Ergebnisse aus einer begrenzten Anzahl von Messungen abgeleitet wurden, sollte das Modell durch weitere Messungen überprüft werden, die größere Datensätze liefern würden. Die Modellanwendung auf eine ca. 2 m hohe Korbweide (*Salix viminalis*) zeigt starke Verformungen (Abb. 7). In den Iterationen zeigte sich jedoch der Bedarf, weitere Entwicklungen vorzunehmen.

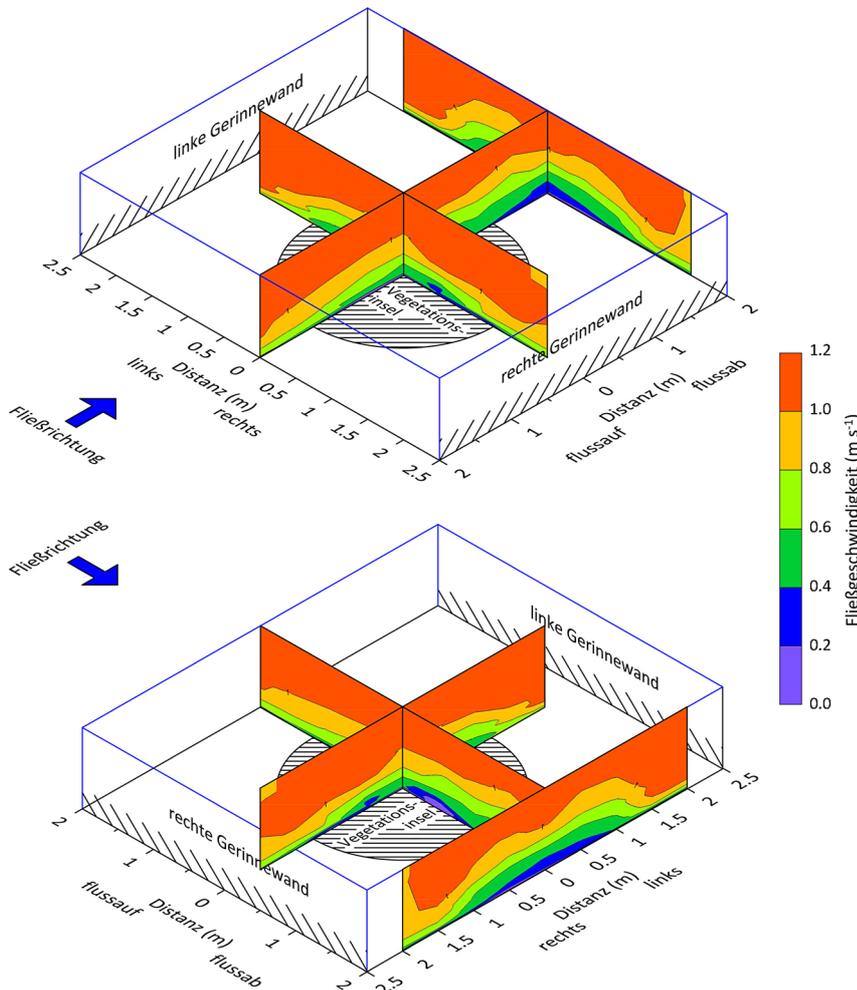


Abb. 6 Beispiel einer mit ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) gemessenen Fließgeschwindigkeitsverteilung in zwei Querprofilen und einem Längsprofil (*Salix alba*, belaubt, Durchfluss $4,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, Wassertiefe 1 m), dargestellt in zwei Ansichten (Busch 2023)

8 Verwendung in der hydrodynamisch-numerischen Modellierung

Die Strömungskraft, die auf einen einzelnen Baum wirkt, kann über die folgende Formel in den dimensionslosen Rauigkeitskoeffizienten f von Darcy umgerechnet werden:

$$f = 8 \frac{F}{s_x s_y \rho u^2}$$

Wobei F die auf die Pflanze wirkende Strömungskraft, s_x der Pflanzenabstand in x -Richtung und s_y der Abstand in y -Richtung, ρ die Dichte des Wassers und u die Fließgeschwindigkeit ist.

In den hydrodynamisch-numerischen Modellen wird jedoch meistens auf den dimensionsbehafteten Strickler-Koeffizienten k_{st} zurückgegriffen,

der über die folgende Formel aus dem Darcy-Koeffizienten berechnet wird:

$$k_{st} = R^{-\frac{1}{6}} \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

Wobei R der hydraulische Radius, der mit der Wassertiefe h gleichgesetzt wird, und g die Erdbeschleunigung ist.

Anhand dieser Methodik können die Ergebnisse des detaillierten Pflanzenverformungsmodells in die Modellierung der Hydrodynamik eingehen.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Gegensatz zu den verfügbaren Berechnungsmethoden bietet die im entwickelten Pflanzenverformungsmodell durchgeführte Diskretisierung der Wuchsform und die mechanische Abbildung den Vorteil, dass neben physi-

kalischen Messgrößen wie dem Elastizitätsmodul und dem Schubmodul nur zwei empirisch zu ermittelnde Parameter (die Fließwiderstandsbeiwerte c_w und c_f) eingehen. Einmal erstellt, kann die Modellpflanze dann mit beliebigen Fließgeschwindigkeitsverteilungen und Wassertiefen beaufschlagt werden. Die resultierende Gesamtwiderstandskraft lässt sich für die Berücksichtigung in der hydrodynamisch-numerischen Modellierung in einen hydraulischen Rauigkeitsbeiwert umrechnen. Wird das Pflanzenmodell in die Knoten eines hydrodynamisch-numerischen Modells eingebaut, können in jedem Zeitschritt das gesamte Strömungsfeld und die dynamische Rauigkeit in den einzelnen Rechenknoten aneinander angepasst werden. Die Laboruntersuchungen im Maßstab 1:1 sind dabei für die Modellkalibrierung und -überprüfung, aber auch für die Erfassung eventuell noch nicht berücksichtigter Erscheinungen essenziell.

So zeigte sich im Labor eine deutliche Veränderung der vertikalen Fließgeschwindigkeitsverteilung im Pflanzenverband. Weiterentwicklungen könnten eine Anpassung der Fließgeschwindigkeitsverteilung adressieren, die iterativ auf die in den verschiedenen Höhen von der Pflanze ausgeübten Strömungswiderstände reagiert. Detaillierte Messungen wären notwendig, um zusätzlich den Effekt von Turbulenzen auf die Fließgeschwindigkeitsverteilung zu erfassen. Eine hydraulische Untersuchung an einzelnen Ästen mit und ohne Belaubung wäre notwendig, um die Strömungswiderstandskoeffizienten zu erfassen. Schlussendlich bedarf es eines hydrodynamisch-numerischen Modells, das eine Schnittstelle für den Einbau eines solchen Modells bietet, sodass eine Berücksichtigung in den Modellierungen der Praxis Eingang finden kann.

Danksagung Das Projekt VEGSED wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft gefördert. Das Forschungsgerinne wurde von der EU über das Projekt SEDDON und von der Stadt Wien gefördert. Ein herzlicher Dank gilt Martin Pfemeter und Christine Sindelar für die Projektvorbereitung, Christine Sindelar, Michael Tritthart und Martin Glas für wertvolle Diskussionsbeiträge, Kevin Merl für die Aushilfe bei den Messungen sowie Ferdinand Bakanic, Josef Pölzl, Petr Lichtneger und den Mitarbeitern der

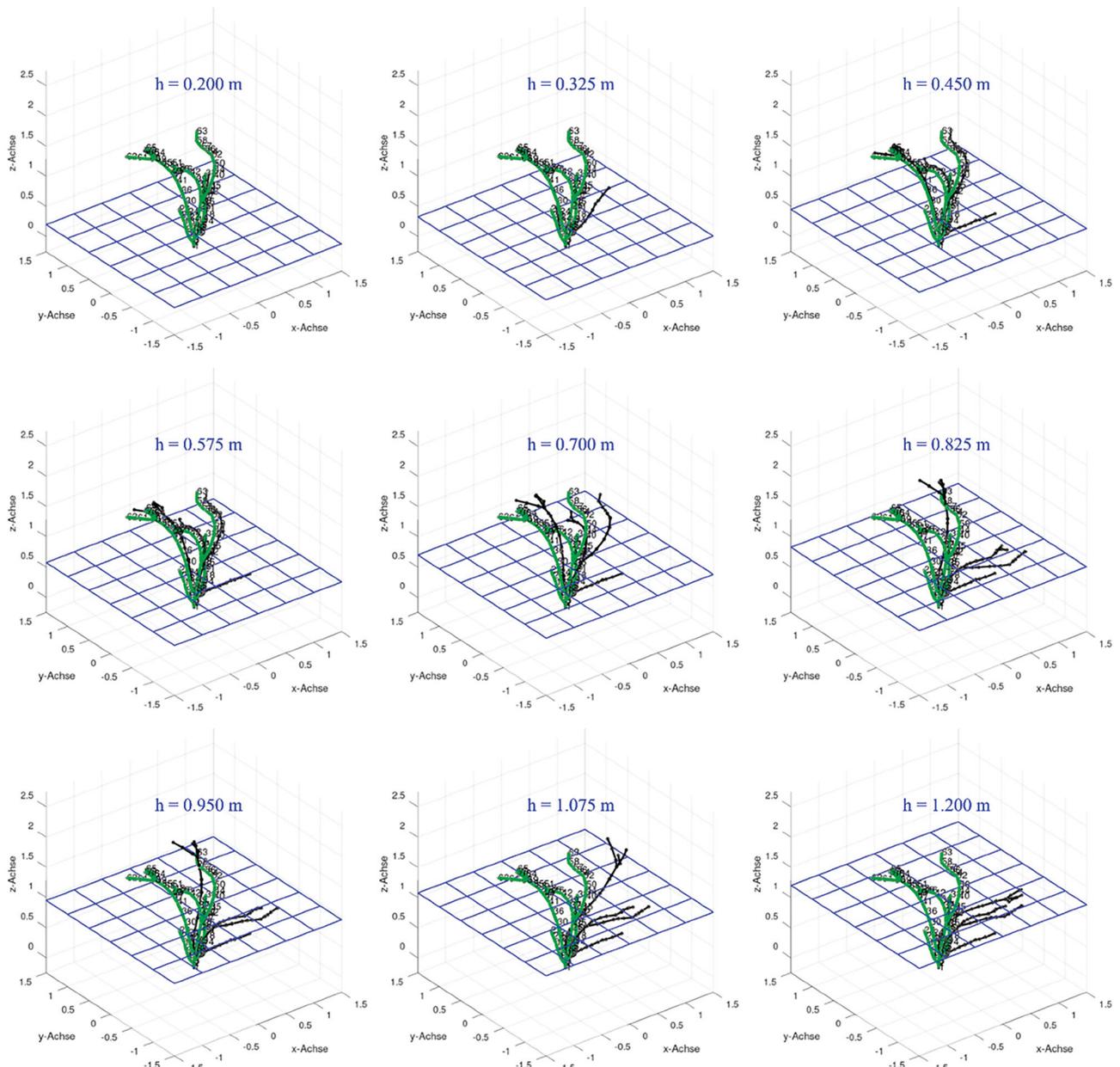


Abb. 7 Eine freistehende Pflanze der Art *Salix viminalis*, die in Modellszenarien bei einer gleichbleibenden tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} mit logarithmischer Fließgeschwindigkeitsverteilung unterschiedlichen Wassertiefen h ausgesetzt ist (grüne Pflanzengeometrie: Ausgangszustand, schwarz: Verformungszustand)

Werkstatt der Wasserbauinstitute für die technische Unterstützung.

Funding Open access funding provided by University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU).

Interessenkonflikt

M. Klösch, M. Waygand, M. Buchinger, E. Busch, R. Dunst, G. Egger und H. Habersack geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des

Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

- Arcement, G.J.J., and Schneider, V.R. (1989):** Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and floodplains. FHWA-TS-84-204, US Dept. of Transport, Federal Highway Administration.
- Baptist, M. J., Babovic, V., Rodríguez Uthurburu, J., Keijzer, M., Uittenbogaard, R. E., Mynett, A., Verwey, A. (2007):** On inducing equations for vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Research* 45(4), 435–450.
- Barnes, H.H.J. (1967):** Roughness characteristics of natural channels, USGS Water Resources Investigations, 1849, pp.213.
- Blamauer, B., Klösch, M., Tritthart, M., Habersack, H. (2011):** Refining parameterization of bar vegetation roughness based on in-situ-measurements of vegetation bending during flood events. [34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia, Jun 26–Jul 1, 2011] In: *Engineers Australia* (Ed.), *Proceedings of the 34th IAHR World Congress*, 3388–3395; ISBN: 978-0-85825-868-6
- Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A. et al. (2020):** Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583, 560–566. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>
- Busch, E. (2023):** Untersuchungen im Forschungsgerinne zum Einfluss von Vegetation auf den Sedimenttransport. Diplomarbeit / Masterarbeit – Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung (IWA), BOKU-Universität für Bodenkultur, pp 98.
- Chow, V.T. (1959):** *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill
- Egger, G., Kollmann, M., Dolamic, M., Schiebel, M., Klösch, M. (2023):** Bestandsentwicklung der Weiden-Tamariskengebüsche und Zwerg-Rohrkolbenröhrichte im Europaschutzgebiet Obere Drau – Langzeitmonitoring eines Wiederansiedlungs- und Artenschutzprojektes. *Carinthia II*, 213./133. Jahrgang, 415–444; ISSN 0374-6771
- Formann, E., Egger, G., Hauer, C., Habersack, H. (2013):** Dynamic disturbance regime approach in river restoration: concept development and application. *Landsc. Ecol. Eng.* 10, 323–337. <http://doi.org/10.1007/s11355-013-0228-5>
- Freeman, G. E., Rahmeyer, W. H., Copeland, R. R. (2000):** Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation (NoE. RDC/CHLTR-00-25) ENGINEER RESEARCH
- Habersack, H., Schober, B., Krapesch, G., Jäger, E., Muhar, S., Poppe, M., Preis, S., Weiss, M., Hauer, C., (2010):** Neue Ansätze im integrierten Hochwassermanagement: Floodplain Evaluation Matrix FEM, flussmorphologischer Raumbedarf FMRB und räumlich differenziertes Vegetationsmanagement VeMaFlood, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 62(1–2), 15–21.
- Habersack, H., Schober, B., Hauer, C. (2015):** Floodplain evaluation matrix (FEM): An interdisciplinary method for evaluating river floodplains in the context of integrated flood risk management. *Natural Hazards* 75, 5–32.
- Järvelä, J. (2004):** Determination of flow resistance caused by nonsubmerged woody vegetation. *Int. J. River Basin Management* 2(1), 61–70.
- Klösch, M., Tritthart, M., Waygand, M. et al. (2018):** Rolle der Vegetation im Hochwasserabfluss – Interaktion mit Hydrodynamik und Sedimenttransport. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70, 90–97. <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0447-3>
- Kouwen, N., Fathi-Moghadam, M. (2000):** Friction factors for coniferous trees along rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* 126(10), 732–740.
- Niedrist, G.H. (2023):** Substantial warming of Central European mountain rivers under climate change. *Reg Environ Change* 23, 43 (2023): <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02037-y>
- Oplatka, M. (1998):** Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern, Mitteilungen 156, ETH Zürich.
- Politti, E., Egger, G., Angermann, K., Rivaes, R., Blamauer, B., Klosch, M., Tritthart, M., & Habersack, H. (2014):** Evaluating climate change impacts on Alpine floodplain vegetation. *Hydrobiologia*, 737(1), pp. 225–243.
- Schoneboom, T., Aberle, J. (2009):** Influence of foliage on drag force of flexible vegetation. 33rd IAHR Congress, Vancouver, Canada.
- Tritthart, M. (2005):** Three-dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhedral finite volumes. *Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer*, 193, 1–179.
- Van De Wiel, M. J. (2003):** Numerical modelling of channel adjustment in alluvial meandering rivers with riparian vegetation. Doctoral dissertation, University of Southampton.
- Vargas-Luna, A., Crosato, A., & Uijttewaal, W. S. J. (2015):** Effects of vegetation on flow and sediment transport: Comparative analyses and validation of predicting models. *Earth Surf Process Landforms*, 40, pp. 157–176. <https://doi.org/10.1002/esp.3633>.
- Waygand, M. (2020):** Entwicklung und Validierung eines mechanischen Modells der Verformung flexibler Auenvegetation in der Strömung. Diplomarbeit / Masterarbeit – Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung (IWA), BOKU-Universität für Bodenkultur, pp 107.
- Waygand, M., Klösch, M., Buchinger, M., Tritthart, M., Baur, P., Egger, G., Pfemeter, M., Sindelar, C., & Habersack, H. (2017):** Parameterization of shrubby riparian vegetation for mechanically based modelling of plant deformation in flowing water. EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria 23–28 Apr 2017. In *European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU2017-18876
- Wilson, C. A. M.E., Xavier, P., Schoneboom, T., Aberle, J., Rauch, H.-P., Lammeranner, W., Weissteiner, C., & Thomas, H. (2010):** The hydrodynamic drag of full scale trees. In *Dittrich, A. et al. (Eds.), River flow 2010* (pp. 453–460). Braunschweig, 8–10 Sep 2010.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.