

Innovative Methoden zur Modellierung von Vorlandrauheiten

Frederik Folke und Martin Hämmerle

Zusammenfassung

Bei Hochwasserereignissen kann Vegetation auf den Vorländern das Strömungsgeschehen maßgeblich beeinflussen. Dieser Einfluss reicht von kleinräumigen Wirbelstrukturen im Nachlaufbereich einzelner Vegetationselemente über Veränderungen der Abflussverteilung über den gesamten Fließquerschnitt bis hin zu einem sich nach oberstrom auswirkenden Erhöhung der Wasserspiegellagen. Lokal verändert sich das vertikale Geschwindigkeitsprofil und es resultieren verringerte tiefen-gemittelte Geschwindigkeiten im Bereich der Vegetation.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden eine Vielzahl neuer Ansätze zur Beschreibung des Widerstandsverhaltens von durch- und überströmter Vegetation entwickelt. Im Vergleich zu klassischen Rauheitsparametern berücksichtigen diese Ansätze grundlegende physikalische Mechanismen des hydraulischen Widerstandsverhaltens von Vegetation. Trotz ihrer Vorteile werden die bestehenden Vegetationsansätze bisher nur wenig in ingenieurtechnischen Untersuchungen eingesetzt. Eine der größten Herausforderungen ist dabei die großräumige Erfassung bzw. Ableitung der benötigten Vegetationsparameter als Eingangsdaten für diese Ansätze. Ein großes Potenzial zur Ableitung von Vegetationsparametern bieten Laserscandaten. Diese Daten werden bisher hauptsächlich zur Erstellung von digitalen Geländemodellen (DGM) verwendet. Sie enthalten jedoch auch Daten zur Vegetation und sind für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland nahezu flächendeckend verfügbar.

Anhand eines Praxisbeispiels wird gezeigt, dass Vegetationsparameter in ausreichender Qualität für die Verwendung in zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen (2D-HN) Modellen effizient aus Airborne-Laserscanning (ALS)-Daten für große Gebiete abgeleitet werden können. Grundlage stellt hierbei ein ALS-Datensatz dar, der originär zur Erstellung eines DGMs erzeugt wurde. Durch die Kombination mehrerer Verfahren wird eine Klassifizierung der Vegetation durchgeführt, und es werden die Vegetationsparameter Vegetationshöhe, hydrodynamische Dichte und Blattflächenindex (*leaf area index, LAI*) abgeleitet. Diese Parameter ermöglichen die Verwendung verschiedener Vegetationsansätze zur Modellierung der Rauheitswirkung.

Das entwickelte Verfahren stellt einen deutlichen Mehrwert bei der Abbildung von Vorlandrauheiten in 2D-HN-Modellen unter Verwendung innovativer Methoden dar. Die Verwendung von Vegetationsansätzen und die Ableitung von Vegetationsparametern aus ALS-Daten ermöglichen eine detaillierte, objektive und reproduzierbare Abschätzung des Einflusses der Vegetation auf die hydrodynamischen Verhältnisse bei überströmten Vorländern.

1 Einleitung

Natürliche Flussläufe sind meist von strukturreicher Vegetation begleitet. Die Ufer- und Vorlandvegetation stellt einen wichtigen Lebensraum für weitere Organismen dar und erbringt eine Vielzahl von Ökosystemdienstleistungen. Im Falle von Durch- und Überströmung führt die Vegetation insbesondere bei Hochwasserereignissen aber auch zu einer Erhöhung des hydraulischen Widerstandes, was zu einer signifikanten Beeinflussung der Strömung auf den Vorländern und im Hauptstrom führen kann. Der hydraulische Einfluss der Vegetation wird in 2D-HN-Modellen derzeit überwiegend unter Verwendung empirischer Widerstandsbeiwerte abgebildet, die über

Tabellenwerke aus der einschlägigen Literatur ermittelt werden können (u.a. Chow, 1959; LfU, 2003). Diese Vorgehensweise ist jedoch von einer gewissen Subjektivität geprägt und berücksichtigt zudem grundlegende physikalische Mechanismen des hydraulischen Widerstandsverhaltens von Vegetation nicht. Da der Fließwiderstand stark von den Eigenschaften der Vegetation, wie z.B. Dichte und Höhe, aber auch von der mittleren Fließgeschwindigkeit und dem Wasserstand abhängt, wird in DWA (2020) die Verwendung von Vegetationsansätzen zur Modellierung der Rauheitswirkung von durch- und überströmter Vegetation empfohlen.

Als Eingangsdaten für die Vegetationsansätze ist die Erfassung relevanter Vegetationsparameter erforderlich. Für großräumige Anwendungen sind daher einfache und effiziente Methoden zur Erfassung von Vegetationsparametern unerlässlich. Ein sehr großes Potential bieten hier flächendeckende ALS-Daten, die zur Erstellung von DGMs erhoben werden und bereits für viele Gebiete vorliegen.

2 Methoden / Vegetationsansätze und deren Parameter

In der Literatur sind zahlreiche Vegetationsansätze zu finden. Baptist et al. (2007) haben einen 2-Schicht-Ansatz formuliert, bei dem die Strömung anhand der Bewuchshöhe in eine Vegetationsschicht und eine darüberliegende freie Oberflächenschicht aufgeteilt wird. Innerhalb der Vegetationsschicht wird ein konstantes Geschwindigkeitsprofil angenommen, und der Widerstandskoeffizient nach Darcy-Weißbach ergibt sich im durchströmten Fall zu

$$\lambda'' = 4 \cdot C_W \cdot mD \cdot h \quad , \quad [1]$$

mit dem Widerstandsbeiwert C_W , der hydrodynamischen Vegetationsdichte mD und der Fließtiefe h . Die hydrodynamische Vegetationsdichte ist definiert als die angeströmte Fläche pro durchströmtem Volumen. In der freien Oberflächenschicht nehmen Baptist et al. (2007) an, dass sich ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil ausbildet.

Järvelä (2004) argumentiert, dass bei belaubter Vegetation der Widerstand maßgeblich von der Blattfläche abhängt. Zur Beschreibung der Vegetationsdichte wird der Blattflächenindex LAI verwendet, der definiert ist als das Verhältnis der einseitigen Blattfläche zur bedeckten Bodenfläche. Unter Annahme einer linearen Verteilung des Blattflächenindex über die Höhe gibt Järvelä (2004) folgende Beziehung für den Widerstandskoeffizienten an

$$\lambda'' = 4 \cdot C_{W\chi} \cdot LAI \cdot \left(\frac{u_m}{u_\chi}\right)^\chi \cdot \frac{h}{h_p} \quad , \quad [2]$$

mit dem artspezifischen Formwiderstandsbeiwert $C_{W\chi}$, dem artspezifischen Vogel-Parameter χ , der Referenzgeschwindigkeit u_χ sowie der mittleren Anströmgeschwindigkeit u_m und der Bewuchshöhe h_p . Der Ansatz von Järvelä (2004) ist allerdings nur für durch- und gerade überströmte Vegetation gültig. Folke et al. (2021) haben den Ansatz für überströmte Vegetation erweitert, wobei sie analog zu Baptist et al. (2007) von einer Ausbildung eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils in der freien Oberschicht ausgehen. Für den überströmten Fall ergibt sich der Gesamtwiderstand λ zu

$$\lambda = \left[\left(\lambda' + 4 \cdot C_{W\chi} \cdot LAI \cdot \left(\frac{u_m}{u_\chi}\right)^\chi \cdot \frac{h}{h_p} \right)^{-0.5} + \frac{4}{\sqrt{2}\kappa} \ln \frac{h}{h_p} \right]^{-2} \quad , \quad [3]$$

mit der Sohlrauheit λ' .

3 Ableitung von Vegetationsparametern aus ALS-Daten

In HN-Modellen ist neben den Rauheiten die Topographie adäquat abzubilden. Zur Erstellung der hierfür erforderlichen DGMs werden die Daten für die Ufer- und Vorlandbereiche häufig mittels ALS erhoben. ALS ist ein aktives Messverfahren, bei dem gepulste Laserstrahlen ausgesendet werden, die von der Geländeoberfläche und den darauf befindlichen Objekten zurückgestreut werden. Aus der Laufzeitdifferenz wird die Entfernung zwischen dem Sensor und dem erfassten Punkt ermittelt. Über die Position und Lage des Flugzeugs, die Fluggeschwindigkeit sowie Richtung und Winkel des Laserstrahls kann die Position von Punkten entlang des Laserstrahl-Laufwegs lokalisiert werden (Buddenbaum, 2010). Das Ergebnis einer ALS-Messung ist eine 3D-Punktwolke aus xyz-Koordinaten und weiteren, z. B. radiometrischen Messgrößen, aus denen neben der räumlichen Verortung der Bodenpunkte auch Informationen über Vegetation und andere Objekte abgeleitet werden können. Man spricht hierbei auch von einem inklusiven Messverfahren, da jedes von einer beliebigen Oberfläche ausreichend stark rückgestreute Messsignal erfasst wird.

In den letzten Jahren hat sich die Qualität und Auflösung der ALS-Daten deutlich verbessert. Auflösungen von mehr als 10 Punkten pro m^2 sind bei aktuellen Kampagnen keine Seltenheit, so dass qualitativ hochwertige dreidimensionale Datensätze zur Verfügung stehen (Mewis, 2021). Moderne ALS-Daten bieten ein bisher weitgehend ungenutztes Potenzial der Gewinnung von Informationen über Vegetation, um sie in der HN-Modellierung einzusetzen. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze zur Klassifizierung von Vegetation und Ableitung von Vegetationsparametern aus ALS-Daten als Grundlage für die 2D-HN-Modellierung vorgestellt. Aus den rein geometrischen Informationen der ALS-Punktwolken können allerdings nicht alle relevanten Vegetationsparameter abgeleitet werden. Hinsichtlich der Vegetationsansätze von Baptist et al. (2007) und Järvelä (2004) sind dies der Widerstandsbeiwert und die artspezifischen Vegetationsparameter. Hier kann auf entsprechende Tabellenwerke in der Literatur zurückgegriffen werden (u.a. DWA, 2020; Folke, 2023).

3.1 Klassifizierung der Vegetation

Ein Verfahren zur regelbasierten Vegetationsklassifikation auf Basis von ALS-Daten wurde von Vetter et al. (2011) vorgestellt. Anhand der abgeleiteten Vegetationshöhe und der vertikalen Struktur der ALS-Punktwolken werden insgesamt 6 Klassen gebildet – Gras niedrig, Gras hoch, Busch niedrig, Busch hoch, Baum niedrig und Baum hoch. Die gesamte ALS-Punktwolke wird auf einem Raster in Volumeneinheiten mit einer Grundfläche von $1 \times 1 m^2$ unterteilt, wobei die vertikale Ausdehnung des Volumens über einer Rasterzelle der jeweiligen Vegetationshöhe entspricht, die aus dem DGM und dem höchsten ALS-Punkt innerhalb des zugehörigen Volumens ermittelt wird. Die Volumeneinheiten (*Cells*) werden in vertikaler Richtung in sogenannte Voxel mit konstanter Höhe unterteilt. Benachbarte Voxel, die mindestens einen ALS-Punkt enthalten, werden zu *connections* zusammengefasst. Vetter et al. (2011) verwenden eine Voxel-Höhe von 0,5 m und als Kriterium für benachbarte Voxel einen vertikalen Abstand von 1,1 m. Zur Klassifizierung werden anschließend die abgeleitete Vegetationshöhe und die gebildeten *connections* auf jeder Raster-Zelle betrachtet. Bei Büschen wird davon ausgegangen, dass über die gesamte Vegetationshöhe eine Vegetationsstruktur vorhanden ist, sich dementsprechend auch die ALS-Punkte über das gesamte Volumen kontinuierlich verteilen und somit maximal eine *connection* pro Rasterzelle abgeleitet wird. Bei Bäumen wird angenommen, dass sich im Bereich zwischen der Unterseite der Baumkrone und der Geländeoberkante keine ALS-Punkte befinden und daher mindestens zwei *connections* gebildet werden. In Abb. 1 sind schematisch für zwei betrachtete Rasterzellen die resultierenden *connections* jeweils für einen klassifizierten Busch und einen klassifizierten Baum dargestellt.

Die Klassifizierung nach Busch und Baum mit jeweils unterschiedlichen Bewuchshöhen ermöglicht die Abbildung der Vegetation im Modell anhand der in DWA (2020) vorgeschlagenen hydraulischen Charakterisierung, bei der zwischen durch- und überströmt sowie starrer und flexibler Vegetation unterschieden wird.

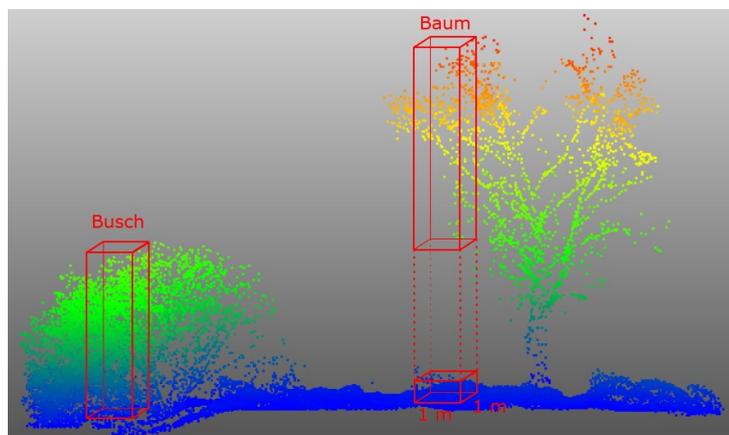


Abb. 1 Prinzipskizze zur regelbasierten Vegetationsklassifikation (links Busch, rechts Baum) von ALS-Daten nach Vetter et al. (2011). Die durchgezogenen roten Linien skizzieren die zur Klassifikation verwendeten *connections* zusammenhängender ALS-Punkte.

3.2 Bewuchshöhe

Meist wird die Bewuchshöhe direkt aus der Differenz zwischen digitalem Oberflächenmodell (DOM) und DGM abgeleitet (Buddenbaum, 2010). In dieser Studie wird die Bewuchshöhe analog zu Vetter et al. (2011) auf einem $1 \times 1 \text{ m}^2$ Raster über die Differenzbildung aus dem jeweils höchsten und niedrigsten ALS-Punkt innerhalb jeder Rasterzelle ermittelt. Als Eingangsdaten für das 2D-HN-Modell werden die Informationen zur Bewuchshöhe im Hinblick auf die Auflösung des Berechnungsgitters mittels des Medians der $1 \times 1 \text{ m}^2$ Rasterzellen auf ein $5 \times 5 \text{ m}^2$ Raster vergrößert. Diese Auflösung wurde basierend auf dem im Folgenden vorgestellten Verfahren von Straatsma (2007) gewählt.

3.3 Hydrodynamische Vegetationsdichte

Straatsma (2007) hat ein Verfahren zur Ableitung der hydrodynamischen Dichte aus ALS-Daten entwickelt, das auf dem angenommenen Zusammenhang zwischen dem Percentage Index und der hydrodynamischen Dichte basiert. Der Percentage Index ist ein Maß der Transmissivität der Vegetation und wird über das Verhältnis der Anzahl von ALS-Messpunkten innerhalb der Vegetation in einem definierten Volumen zur Gesamtanzahl der Messpunkte einschließlich der Bodenpunkte in der jeweiligen Rasterzelle ermittelt. Für den Zusammenhang zwischen dem Percentage Index und der hydrodynamischen Vegetationsdichte geben Straatsma (2007) empirisch abgeleitete Gleichungen an. Bei dem gesamten Verfahren ist zwischen busch- und baumartiger Vegetation zu unterscheiden.

Die Ermittlung der hydrodynamischen Vegetationsdichte erfolgte auf einem $5 \times 5 \text{ m}^2$ Raster. Als Grundlage diente die Klassifikation nach Vetter et al. (2011), wobei die Vegetationsklassen Busch niedrig und Busch hoch zu Busch, sowie Baum niedrig und Baum hoch zu Baum zusammengefasst wurden. Die Vergrößerung des vorliegenden $1 \times 1 \text{ m}^2$ Rasters erfolgte mittels eines Mehrheitsverfahrens.

3.4 Blattflächenindex

Einen generellen Überblick über unterschiedliche Methoden zur Ableitung des Blattflächenindex geben Wang und Fang (2020). Die gängigste Methode ist die Ermittlung des LAI auf der Grundlage der Korrelation des durchgelassenen Lichts unter Verwendung des Lambert-Beer'schen Gesetzes (Solberg et al., 2006; Wang und Fang, 2020)

$$LAI = -\frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_{L,0}}\right) \quad [4]$$

mit der Lichtintensität unterhalb der Baumkronen I_L , der Lichtintensität oberhalb der Baumkronen $I_{L,0}$ und dem Extinktionskoeffizienten k . Das Verhältnis $I_L/I_{L,0}$ entspricht dem Anteil des durch die Baumkronen durchgelassenen Lichts und wird als Lückenanteil (*gap fraction*) bezeichnet. Dieser Parameter kann, vergleichbar mit der o.g. hydrodynamischen Vegetationsdichte, aus dem Verhältnis der Anzahl der Bodenpunkte zur Gesamtanzahl der Punkte abgeschätzt werden (Solberg et al., 2006; Wang und Fang, 2020).

4 Praxisbeispiel – Wieblinger Altarm, Unterer Neckar

4.1 Modellgebiet

Bei der Modellstrecke handelt es sich um einen staugeregelten Abschnitt des Unteren Neckars bei Heidelberg von Neckar-km 26,0 bis 17,1. Der Abschnitt umfasst die gesamte Stauhaltung Wieblingen, sowie einen Abschnitt der Stauhaltung Ladenburg bis kurz unterstrom der Schleuse Schwabenheim (Abb. 2). Die Strecke beinhaltet die Wehre Wieblingen und Helmreich, die Schleuse Schwabenheim sowie die Kraftwerke Wieblingen, Helmreich und Schwabenheim. Der Wehrrarm Wieblingen verläuft im Flussbett des Altneckars und erstreckt sich von Neckar-km 22,4 bis 17,5. Bei Hochwasser wird das Wehr Wieblingen (Neckar-km 22,4) vollständig gezogen und wird ohne Überfall frei unterströmt. Die gesamten Ufer- und Vorlandbereiche des Altneckars sind stark von Vegetation geprägt. Die Vegetation setzt sich aus Auwaldbeständen (v.a. aus Weiden, Pappeln und Ahorn), Büschen (v.a. Brombeere, Staudenknöterich, Holunder, Uferweiden) und unterhaltenen Grünlandbereichen zusammen.



Abb. 2 Ausschnitt des Modellgebiets (links: gesamter Altneckar, recht: Detailansicht), Hintergrund Luftbild DOP20 © BKG/2023

4.2 ALS-Daten

Zur Erfassung der Geländehöhen im Ufer- und Vorlandbereich wurde im Februar 2017 eine Befliegung des Modellgebietes von Neckar-km 17 bis 23 mit einem Airborne Laserscanner des Typs RIEGL LMS-Q680i durchgeführt. Die resultierende ALS-Punktwolke wurde in Boden- und Nichtbodenpunkte klassifiziert. Die flächendeckende Auflösung beträgt mindestens 16 Punkte pro m². Bei den Daten konnte eine maximale Abweichung der Lage von 0,18 m und der Höhe deutlich unter 0,05 m nachgewiesen werden (Milan Geoservice GmbH, 2017). Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde unter Verwendung der ALS-Daten ein DGM mit einer Auflösung von 1x1 m² erstellt, welches die Grundlage für das hier verwendete 2D-HN-Modell darstellt. Bei der Modellierung des DGMs mussten in Bereichen mit flächigem Brombeerbewuchs die als Boden klassifizierten Punkte teilweise korrigiert werden. Hintergrund ist, dass Brombeeren meist ganzjährig belaubt sind und in der Regel eine sehr hohe Vegetationsdichte aufweisen. Dies hat zur Folge, dass in diesen Bereichen ALS-Punkte nur auf Vegetationsoberflächen erfasst werden und die Signale nicht bis auf die tatsächlichen Bodenoberfläche vordringen können. Dies deckt sich mit den Erfahrungen von Mewis (2021).

4.3 2D-HN-Modell

Die numerische Simulation wurde mit der Open Source Simulationssoftware TELEMAC-MASCARET durchgeführt. Grundlage des 2D-HN-Modells bildet ein unstrukturiertes Dreiecksgitter mit einer mittleren Kantenlänge von 5,4 m. Das Rechengitter besteht aus insgesamt 91.489 Knoten und 177.152 Dreieckselementen. Das 2D-HN Modell ist für die Simulation von Hochwasserabflüssen ausgelegt. Dementsprechend wird die Geometrie des Wehres Wieblingen mit gezogenen Wehrklappen im Rechengitter abgebildet. Das Wehr Helmreich wird ebenfalls rein geometrisch abgebildet.

Die Rauheitsmodellierung der Sohlrauheit erfolgte nach Nikuradse mit Hilfe zonaler äquivalenter Sandrauheiten. Zur Abbildung der Rauheitswirkung busch- und baumartiger Vegetation wurden Vegetationsansätze (siehe Kapitel 2) verwendet. Die Gesamtrauheit λ wird über das Prinzip der Superposition der Sohlrauheit λ' und des vegetationsinduzierten Widerstands λ'' ermittelt.

Die Definition der Rauheitszonen der Vegetation erfolgt anhand der aus den ALS-Daten abgeleiteten Informationen (siehe Kapitel 3). Dabei werden zwei unterschiedliche räumliche Aggregationen gewählt – eine im 5x5 m² Raster hochaufgelöste Variante mit individuellen Vegetationsparametern und eine klassenbasierte Zonierung. Bei der klassenbasierten Variante werden Zonen gleicher Vegetationsklasse zusammengefasst und diesen Klassen entsprechende Vegetationsparameter zugewiesen. Hierzu werden für jede Klasse repräsentative statistische Werte (Mittelwert und Median) der hochaufgelösten Vegetationsparameter verwendet.

4.4 Ergebnisse

In Abb. 3 sind exemplarisch die aus den ALS-Daten abgeleiteten Rauheitszonen zur Abbildung der Vegetation im 2D-HN-Modell dargestellt. Für die hochauflösende Variante ergaben sich insgesamt 17.531 Zonen, für welche die Vegetationsparameter Höhe, hydrodynamische Vegetationsdichte und Blattflächenindex individuell ermittelt wurden.

Für busch- und baumartige Vegetation sind in Tab. 1 die Verteilungen der abgeleiteten Vegetationsparameter unter Angabe von Mittelwert μ , Standardabweichung σ und Median zusammengefasst. Die buschartige Vegetation weist eine höhere Dichte als baumartige Vegetation auf. Für

die klassenbasierte Rauheitszonierung werden sowohl die jeweiligen Mittelwerte als auch die Mediane verwendet.

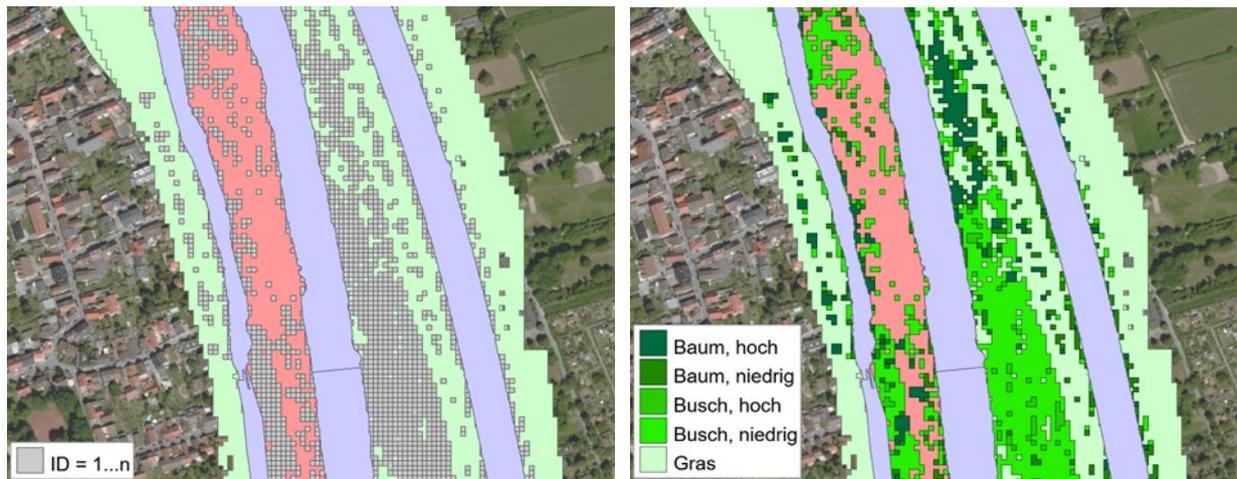


Abb. 3 Rauheitszonen individuell (links) und klassenbasiert (rechts), Hintergrund Luftbild DOP20 © BKG/2023

Tab. 1 Statistische Verteilung der aus ALS-Daten abgeleiteten Vegetationsparameter für den klassenbasierten Ansatz unter Angabe von Mittelwert μ , Standardabweichung σ und Median

		Busch niedrig	Busch hoch	Baum niedrig	Baum hoch
h_p [m]	μ (σ)	0,91 (0,50)	2,95 (0,79)	6,30 (2,21)	14,16 (3,29)
	Median	0,81	2,72	6,40	13,59
mD [m ⁻¹]	μ (σ)	0,359 (0,301)	0,217 (0,112)	0,069 (0,058)	0,051 (0,049)
	Median	0,254	0,199	0,047	0,032
LAI [-]	μ (σ)	1,882 (1,456)	2,390 (1,433)	1,019 (1,143)	1,143 (1,156)
	Median	1,395	2,142	0,568	0,695

Die unterschiedlichen Auflösungen der Vegetation im numerischen Modell und die unterschiedlichen Vegetationsansätze werden anhand der Hochwasserszenarien HQ10, HQ50 und HQ200 miteinander verglichen. Bei den betrachteten Ereignissen tritt der Neckar über die Ufer und die Vorländer werden überströmt. In Abb. 4 sind die resultierenden Wasserspiegellagen für die individuell aufgelöste Vegetation (5x5 m² Raster) und für die klassenbasierte Rauheitszonierung (Mittelwert und Median) unter Verwendung des Ansatzes von Baptist et al. (2007) dargestellt. Zusätzlich zeigen die Boxplot-Diagramme die statistische Verteilung der Differenzen der Wasserspiegellagen zwischen den klassenbasierten Modellen und dem Modell mit den individuellen Vegetationsparametern. Die jeweiligen Wasserspiegellagen wurden entlang der Flussachse des Altneckars bzw. des Neckars (in den unterstromigen und oberstromigen Abschnitten) zwischen Neckar-km 17,1 und 25,0 extrahiert. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der drei Rauheitsmodelle (individuell, klassenbasiert Mittelwert und klassenbasiert Median) ein sehr ähnliches Verhalten, wobei das Modell mit klassenbasierter Zonierung tendenziell die höchsten Wasserstände mit dem Mittelwert und die niedrigsten Wasserstände mit dem Median der Vegetationsparameter mD und h_p prognostiziert. Die Wasserspiegellagen des Modells mit individuell-aufgelösten Vegetationsparametern liegen nahezu über den gesamten Bereich innerhalb der Werte der beiden klassenbasierten Modelle. In Bezug zum Modell mit individuell aufgelösten Vegetationsparame-

tern führt die Verwendung des Medians zu geringeren Abweichungen im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert. Dies könnte auf die größere Robustheit des Medians gegenüber Ausreißern zurückzuführen sein. Bei beiden klassenbasierten Modellen nehmen mit zunehmendem Abfluss die mittleren Abweichungen zum Modell mit aufgelöster Vegetation zu. Insgesamt liegen die Abweichungen innerhalb einer Toleranz von ca. 0,20 m, bzw. ca. 0,10 m bei Betrachtung der Mediane.

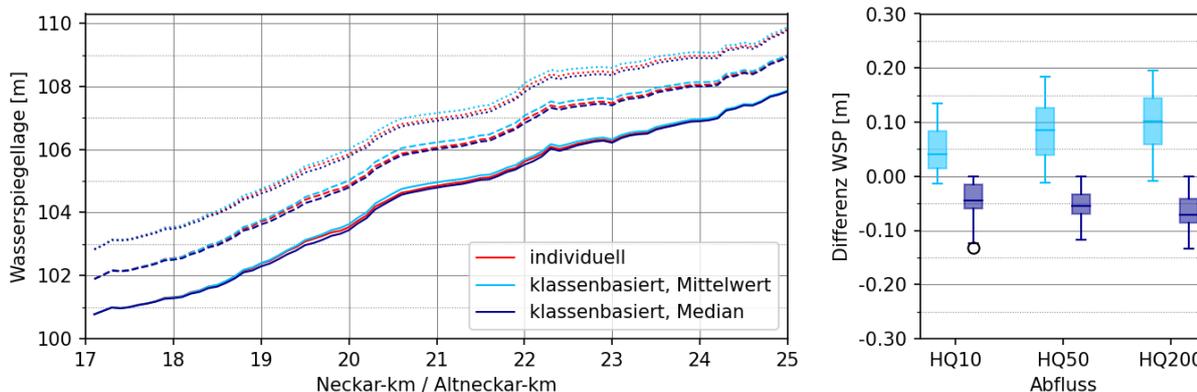


Abb. 4 Wasserspiegellagen bei HQ10 (durchgezogen), HQ50 (gestrichelt) und HQ200 (gepunktet) verschiedener räumlicher Aggregierungen (links) und die statistische Verteilung der Differenzen der klassenbasierten zur aufgelösten Zonierung unter Verwendung des Ansatzes von Baptist et al. (2007)

In Abb. 5 sind die Wasserspiegellagen für die Ansätze von Baptist et al. (2007), Järvelä (2004) und Folke (2021) sowie die statistische Auswertung der Differenzen der beiden Ansätze für flexible Vegetation zu den Ergebnissen von Baptist et al. (2007) dargestellt. In allen drei Modellen wird die Vegetation über die klassenbasierte Zonierung mit dem jeweiligen Median der Vegetationsparameter abgebildet. Bei Järvelä (2004) und Folke (2021) werden die Vegetationsklassen Gras, Busch niedrig und Busch hoch als flexibel angenommen und artspezifische Vegetationsparameter von $C_{W,\chi} = 0,45$, $u_\chi = 0,10 \text{ m/s}$ und $\chi = -0,75$ verwendet. Die drei Modelle liefern sehr ähnliche Ergebnisse. Der 2-Schicht Ansatz für starre Vegetation von Baptist et al. (2007) und der 1-Schicht-Ansatz für flexible Vegetation von Järvelä (2004) zeigen über den gesamten Bereich eine sehr große Übereinstimmung. Im Mittel betragen die Differenzen hier deutlich weniger als 0,05 m und die maximalen Abweichungen sind kleiner als 0,10 m.

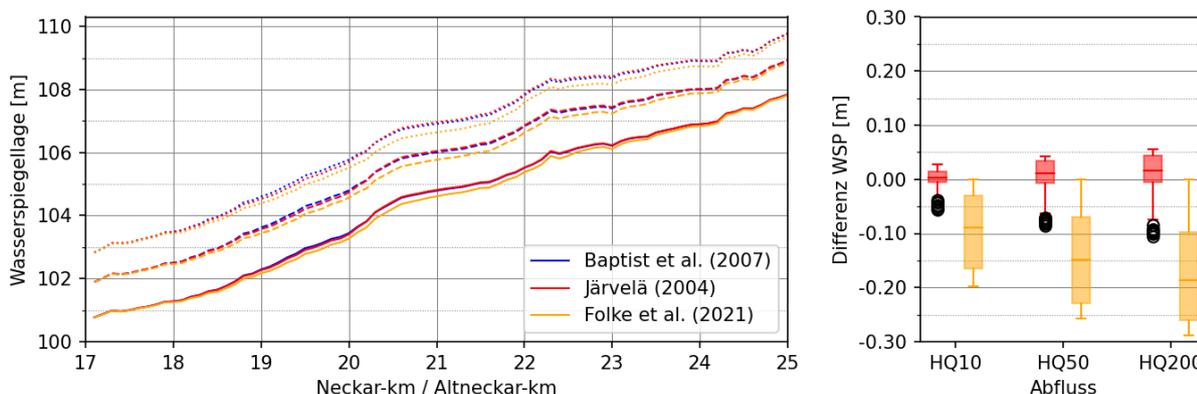


Abb. 5 Wasserspiegellagen bei HQ10 (durchgezogen), HQ50 (gestrichelt) und HQ200 (gepunktet) verschiedener Vegetationsansätze (links) und die statistische Verteilung der Differenzen der flexiblen Ansätze zum starren Ansatz von Baptist et al. (2007)

Die niedrigsten Wasserspiegellagen ergeben sich beim hybriden 2-Schicht-Ansatz von Folke et al. (2021). Dieser Ansatz berücksichtigt sowohl die widerstandsmindernde Wirkung der Flexibilität als auch die der Überströmung. Der Vergleich mit dem starren 2-Schicht-Ansatz von Baptist et al. (2007) und dem flexiblen 1-Schicht-Ansatz von Järvelä (2004), die ähnliche Wasserspiegellagen prognostizieren, weist darauf hin, dass im vorliegenden Fall beide Phänomene einen ähnlichen Einfluss auf die Rauheitswirkung der Vegetation haben.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Modellierung der hydraulischen Wirkung von Vegetation stellt eine große Herausforderung dar. In DWA (2020) wird die Verwendung von Vegetationsansätzen empfohlen, da diese die physikalischen Mechanismen deutlich besser abbilden als empirische Rauheitsparameter. Voraussetzung für die Anwendung dieser Vegetationsansätze ist die Bereitstellung entsprechender Vegetationsparameter, die als Eingangsdaten benötigt werden.

In dieser Studie konnte das Potential von ALS-Daten, die ursprünglich zur Erstellung von DGMs aufgenommen wurden, für die großflächige Ableitung relevanter Vegetationsparameter anhand eines Praxisbeispiels demonstriert werden. Durch den kombinierten Einsatz bestehender Verfahren wurde eine Klassifizierung der Vegetation durchgeführt sowie die Vegetationsparameter Höhe, hydrodynamische Vegetationsdichte und Blattflächenindex flächig aus den ALS-Daten abgeleitet.

Um den Einfluss der räumlichen Aggregation von Vegetationsparametern zu untersuchen, wurden ein Modell mit flächig aufgelöster Vegetation und zwei Modelle mit klassenbasierter Zonierung unter Verwendung repräsentativer Vegetationsparameter miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass beide Verfahren prinzipiell ähnliche Ergebnisse liefern und somit unterschiedliche Methoden zur Auflösung und räumlichen Repräsentation der Vegetation zielführend sein können. Insbesondere bei der Wahl der Vegetationsklassen ist darauf zu achten, dass diese die unterschiedlichen Mechanismen (z. B. Durch- und Überströmung) im Modell adäquat abbilden. Für die klassenbasierte Zonierung erscheint die Verwendung des Medians als repräsentativer Vegetationsparameter besser geeignet zu sein als der arithmetische Mittelwert. Der Median ist im Gegensatz zum Mittelwert robuster gegenüber Ausreißern. Beide Methoden zur Integration der Vegetationsparameter in das 2D-HN-Modell sind für großflächige Anwendungen gut geeignet.

Die Qualität und Auflösung von ALS-Daten hat in den letzten Jahren stark zugenommen, so dass hier ein großes Potenzial zur Ableitung von Vegetationsparametern – ohne zusätzlichen Erhebungsaufwand – besteht. Die vorgestellten Methoden bieten die Möglichkeit, Vegetationsparameter für großflächige Gebiete effizient und ressourcenschonend abzuleiten. Mit Hilfe der Vegetationsansätze und der abgeleiteten Vegetationsparameter kann eine detaillierte, objektive und reproduzierbare Abschätzung des Einflusses von Vegetation auf die hydrodynamischen Verhältnisse auf überströmten Vorländern erfolgen.

Literatur

- Baptist, M. J., Babovic, V., Rodríguez Uthurburu, J., Keijzer, M., Uittenbogaard, R. E., Mynett, A. und Verwey, A. (2007). On inducing equations for vegetation resistance. In: *Journal of Hydraulic Research* 45.4, S. 435–450. doi: 10.1080/00221686.2007.9521778.
- Buddenbaum, H. (2010). Charakterisierung von Forstbeständen mit Hilfe von Laserscanning und Reflexionsmodellierung. Dissertation. Trier: Universität Trier.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill classic textbook reissue series. Caldwell, NJ: McGraw-Hill und McGraw-Hill Publ. Company. ISBN: 07-010776-9.
- DWA (2020). Merkblatt DWA-M 524: Hydraulische Berechnung von Fließgewässern mit Vegetation. 1. Auflage. DWA-Regelwerk. M, Merkblatt. DWA. ISBN: 3887219783.
- Folke, F. (2023). Abbildung der Rauheitswirkung von Vorlandvegetation in der ingenieurtechnischen Anwendung, Dissertation, TU Braunschweig. (eingereicht)
- Folke, F., Niewerth, S. und Aberle, J. (2021). Modelling of just-submerged and submerged flexible vegetation. In: *Abstract Book*, S. 263–264. ISBN: 978-83-66847-01-9.
- Järvelä, J. (2004). Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation. In: *International Journal of River Basin Management* 2.1, S. 61–70. doi: 10.1080/15715124.2004.9635222.
- LfU (2003). *Hydraulik naturnaher Fließgewässer: Teil 3 - Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg*. Hrsg. von Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe
- Mewis, P. (2021). Estimation of Vegetation-Induced Flow Resistance for Hydraulic Computations Using Airborne Laser Scanning Data. In: *Water* 13.13, S. 1864. doi: 10.3390/w13131864.
- Milan Geoservice GmbH (2017). *DGM-W Wehranlage Wieblingen 2017: Abschlussbericht ALS Datenerfassung*.
- Solberg, S., Næsset, E., Hanssen, K. H. und Christiansen, E. (2006). Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. In: *Remote Sensing of Environment* 102.3-4, S. 364–376. doi: 10.1016/j.rse.2006.03.001.
- Vetter, M., Höfle, B., Hollaus, M., Gschöpf, C., Mandlbürger, G., Pfeifer, N. und Wagner, W. (2011). Vertical vegetation structure analysis and hydraulic roughness determination using dense ALS point cloud data - A voxel based approach. In: *ISPRS, XXXVIII-5/W12*, S. 265–270. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-265-2011.
- Wang, Y. und Fang, H. (2020). Estimation of LAI with the LiDAR Technology: A Review. In: *Remote Sensing* 12.20, S. 3457. doi: 10.3390/rs12203457.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Frederik Folke
 Bundesanstalt für Wasserbau
 Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
 frederik.folke@baw.de

Dr. rer. nat. Martin Hämmerle
 Bundesanstalt für Wasserbau
 Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
 martin.haemmerle@baw.de