

Zum Fließverhalten um strauchartige Weidengewächse und dessen Auswirkungen auf den Strömungswiderstand

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Sina Wunder
aus Neustadt an der Weinstraße

Tag der mündlichen Prüfung

28.11.2014

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stoesser

Karlsruhe 2014

Kurzfassung

Bis heute stellt die Bestimmung des hydraulischen Widerstands strauchartiger flexibler Vegetation den planenden Ingenieur vor eine große Herausforderung, da praxistaugliche Bemessungsverfahren mit eindeutig bestimmbar Parametern für strauchartigen Bewuchs noch nicht zur Verfügung stehen. Bisherige Verfahren basieren auf einer starken Abstraktion der Systeme, gelten teilweise nur für sehr eingeschränkte Anwendungsfälle oder implementieren charakteristische Eigenschaften strauchartiger Vegetation, wie die verzweigte Struktur, die Belaubung und die Flexibilität der Pflanzen, mit schwer bestimmbar Parametern.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Hydraulik einer strauchartigen durchströmten Pflanze und ihrer Charakteristiken zu beschreiben und einen Ansatz zur Bemessung ihres hydraulischen Widerstands abzuleiten. Hierzu wurde die Arbeit auf drei wesentliche Untersuchungsschritte gestützt, die der Grundlagenforschung zuzuordnen sind. Auf Basis der Erkenntnisse aus den Untersuchungen sind jedoch Empfehlungen für die praktische Anwendung ableitbar.

Zunächst wird unter Verwendung einer direkten Messung der Widerstandskraft der Einfluss der typischen Pflanzeigenschaften strauchartiger Weiden auf die Widerstandskraft und den Widerstandsbeiwert untersucht und eine Gleichung zur Bemessung der lastabhängigen Kontraktion der Weiden abgeleitet. Mit der Untersuchung des Geschwindigkeitsfeldes um und innerhalb einer strömungsbelasteten strauchartigen Pflanze und der Bestimmung des Ausmaßes der Durchströmung wird anschließend die Annahme, dass strauchartige Vegetation als porös durchströmtes Medium betrachtet werden kann, bestätigt und die Auswirkungen der Durchströmung auf das Widerstandsverhalten bestimmt. Weiterhin werden die Daten zur Geschwindigkeitsverteilung genutzt, um die Möglichkeit der Berechnung des Strömungsbildes um eine solche Pflanze in einem hydrodynamisch-numerischen Modell mit Hilfe eines Porositätsansatzes zu zeigen. Zuletzt werden anhand von Laborversuchen mit Medien unterschiedlicher Porosität die Teilwiderstände resultierend aus der porösen Durchströmung lokalisiert und auf Basis einer physikalisch theoretischen Herleitung ein Ansatz zur Berechnung der resultierenden Gesamtwiderstandskraft einer durchströmten strauchartigen Pflanze aufgestellt.

Abstract

To date, the calculation of the hydraulic drag of flexible shrubby vegetation poses a great challenge to planning engineers because practical dimensioning methods with clear parameters are not yet available for shrubby vegetation. Existing methods are either based on a strong abstraction of the systems treated, or their validity is restricted to confined fields of application - or they implement characteristic features of shrubby vegetation, such as branched structure, foliation and flexibility of the plants, with parameters that are hard to determine.

It therefore is the aim of this research project to describe the hydraulics of perfused shrubby plants and their characteristics as well as to develop a calculation approach for hydraulic drag. To this end, the proceedings are based on three essential investigation steps which fall into the field of fundamental research. However, recommendations for practical application can be deduced from the test findings.

First, the influence of typical characteristics of shrubby plants on the drag force and the drag coefficient was examined by means of direct measurements of the drag force, while in addition to that an equation was developed for the dimensioning of the contraction of the willows depending on the load. The subsequent examination of the degree of perfusion and the velocity field around and within a plant loaded by flow showed that the approach of treating shrubby vegetation as a perfused porous medium is correct. Moreover, the effects the perfusion has on the drag behavior of the plants were identified. The data of the velocity distribution were then used to demonstrate that the calculation of flow signatures around such a plant in a hydrodynamic-numerical model can be executed using a porosity approach. Finally, the drag components resulting from the porous perfusion were localized in laboratory tests with media of different porosity degrees and an approach for the calculation of the resulting total drag of perfused shrubby plants was developed on the basis of a theoretical physical derivation.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie im Rahmen eines zweijährigen Schlieben-Lange-Stipendiums gefördert durch den Europäischen Sozialfonds (ESF) und das KIT.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann für die Übernahme des Hauptreferats danken. Sein mir entgegengebrachtes Vertrauen sowie die wissenschaftlichen Freiheiten während meiner Forschungsarbeit an seinem Institut haben einen wesentlichen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stoesser möchte ich mich für die Übernahme der Korreferate, ihr fachliches Interesse und die stete Unterstützung bedanken. Ihre fachliche Begleitung in zahlreichen Gesprächen haben meiner Arbeit wesentliche Impulse gegeben. Besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stoesser für die Möglichkeit, einen Teil meiner Forschungsarbeit in seiner Forschungsgruppe in Atlanta und Cardiff durchführen zu können.

Weiterhin möchte ich mich bei allen meinen Kollegen der Abteilung Wasserbau und Gewässerentwicklung, für die kollegiale Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima und den Mitarbeitern des Werkstattbereichs für ihre handwerkliche Unterstützung und das Einbringen ihres Erfahrungsschatzes im Modellbau bedanken.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts bedanke ich mich herzlich bei meinem Kollegen Dr.-Ing. Frank Seidel, Frau Dipl.-Ing. Kathrin Steiner und meiner Mutter Ulrike Blinn.

Der größte Dank gilt meinem Mann Sigmund, der mir die nötigen Freiräume zur Anfertigung meiner Dissertation gegeben hat und mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Bei meinen Kindern Maya und Lucy bedanke ich mich für ihre Geduld und ihre Akzeptanz meiner oftmaligen Abwesenheit in den letzten Monaten!

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Relevanz und Fragestellung	1
1.2. Inhalt und Aufbau	2
I. Grundlagen	5
2. Pflanzenphysiologische Grundlagen der Weidengewächse	7
2.1. Weidengewächse: Pioniervegetation an Fließgewässern	7
2.1.1. Standort Aue	7
2.1.2. Pflanzenphysiologie und Habitus von Weidengewächsen	9
2.2. Untersuchungen zur Allometrie sowie zu den mechanischen Eigenschaften von holzigen Pflanzen	11
3. Vegetationshydraulische Grundlagen	15
3.1. Fließformeln	15
3.2. Ansätze zur Implementierung des vegetativen Widerstands in die Fließformeln . .	17
3.2.1. Widerstand überströmter Vegetation und resultierende Strömungseffekte .	18
3.2.2. Widerstand durchströmter Vegetation und resultierende Strömungseffekte	21
3.3. Einfluss vegetativer Parameter auf den Widerstand durchströmter strauchförmiger Vegetation	27
3.3.1. Der Streamlining-Effekt	28
3.3.2. Die Impuls absorbierende Fläche - Auswirkung der Belaubung auf den Pflanzenwiderstand	30
3.3.3. Bestehende Ansätze zur Implementierung von Flexibilität und Struktur strauchartiger Pflanzen	32
3.4. Hydraulik innerhalb poröser Medien und ihre Anwendung auf durchströmte Vegetation	35
3.4.1. Grundlagen der turbulenten Durchströmung poröser Medien	37
3.4.2. Untersuchungen zur turbulenten Durchströmung poröser Körper	40
3.5. Zusammenfassung des Forschungsstandes und Fazit	43

II. Methodik	47
4. Aufbau und Durchführung der Untersuchungen	49
4.1. Direkte Messung der Widerstandskraft an strömungsbelasteten Weiden	49
4.1.1. Messsystem	49
4.1.2. Erfassung der Pflanzenflexibilität: Optische Auswertung der widerstands- wirksamen Fläche	53
4.1.3. Versuchsdurchführung	55
4.2. Untersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld durch und um eine strömungsbelastete strauchartige Pflanze	58
4.3. Implementierung der gewonnenen Erkenntnisse in die HN-Modellierung	61
4.3.1. Anwendung des Porositätsansatzes in SSIIM	62
4.3.2. Aufbau des numerischen Modells, Randbedingungen und Kalibrierung . .	64
4.4. Theoretische Hinterfragung zur Anwendung bestehender Formelwerke poröser Durch- strömung auf den Strömungswiderstand strauchartiger Vegetation	67
4.4.1. Anwendung des Engelund'schen Porositätsansatzes auf strauchartige Pflan- zen	68
4.4.2. Implementierung des Ansatzes in die Gleichung zur Widerstandskraft . . .	69
4.5. Versuche zur porösen Durchströmung permeabler Zylinder im Vergleich zur strauch- artigen Pflanze	70
III. Resultate und Diskussion	73
5. Direkte Messung der Widerstandskraft strömungsbelasteter Weiden und Einfluss al- lometrischer Eigenschaften auf den Widerstand	75
5.1. Das Verhalten der vegetationsbedingten Widerstandskraft mit steigender hydrau- lischer Belastung	75
5.1.1. Die Widerstandskraft belaubter Vegetation	76
5.1.2. Die Widerstandskraft unbelaubter Vegetation	78
5.2. Der resultierende Widerstandsbeiwert	79
5.2.1. Der Widerstandsbeiwert belaubter Vegetation	79
5.2.2. Der Widerstandsbeiwert unbelaubter Vegetation	81
5.3. Beurteilung der maßgeblichen Einflussfaktoren auf das vegetationsbedingte Wi- derstandsverhalten	82
5.3.1. Einfluss des Verhältnisses von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe	84
5.3.2. Einfluss der Belaubung	87
5.3.3. Einfluss der Flexibilität: Das Kontraktionsverhalten strauchartiger Vege- tation	88
5.3.4. Zusammenfassung der wesentlichen Widerstandsmerkmale und Fazit für folgende Untersuchungen	93

6. Das Geschwindigkeitsfeld um eine strömungsbelastete strauchartige Pflanze und die Möglichkeit der numerischen Simulation	95
6.1. Geschwindigkeitsmessungen	95
6.1.1. Vorversuche zum Versuchsaufbau	96
6.1.2. Resultate der Geschwindigkeitsmessungen	98
6.1.3. Die Strömungscharakteristik um eine strauchartige Pflanze	102
6.2. Numerische Untersuchungen zur Durchströmung einer strauchartigen Pflanze unter Anwendung des Porositätsansatzes	107
6.2.1. Validierung des Modells anhand der Labordaten zur Geschwindigkeitsverteilung	108
6.2.2. Widerstandsbetrachtung aus der Simulation im Vergleich zum gemessenen Widerstand	113
6.2.3. Vertiefende Analyse des Kontraktionsverhaltens auf Basis von Volumendaten	117
6.3. Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen sowie der numerischen Untersuchung zum Geschwindigkeitsfeld um eine durchströmte Pflanze	118
7. Untersuchungen zur Durchströmung poröser Medien und dessen Anwendung auf eine strauchartige Pflanze	121
7.1. Das Strömungsbild der porösen Durchströmung im Vergleich unterschiedlicher Geometrien	121
7.2. Rechnerische Erfassung der Widerstände aus der porösen Durchströmung und ihrer Effekte	129
7.3. Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur turbulenten Durchströmung poröser Körper	133
IV. Zusammenfassung und Empfehlungen	135
Zusammenfassung	142
Summary	147
A. Anhang	158
A.1. Matlab files	158
A.2. Untersuchungsergebnisse	161
A.2.1. Widerstandskraft und Widerstandsbeiwerte	161
A.2.2. Isotachendiagramme der gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen	173
A.2.3. Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilungen	178
A.2.4. Poröse Durchströmung	181

Abbildungsverzeichnis

1.1. Übersicht zum Aufbau der Arbeit.	3
2.1. Laterale Zonierung einer Aue nach den Sukzessionsabfolgen in Abhängigkeit der vom Abflussregime geprägten charakteristischen Wasserstände. (verändert nach Ellenberg (1996))	8
2.2. Klassisch entwickelte Pionierfläche auf einem kiesigen Rohboden. Foto: Ardèche, Frankreich.	9
2.3. Wuchsformen der ausgewählten Weidenarten als Strukturgrafik und fotografische Aufnahme von der Alb bei Karlsruhe. Oben: Silberweide (<i>Salix alba</i>), unten links: Korbweide (<i>Salix viminalis</i>), unten rechts: Purpurweide (<i>Salix purpurea</i>). (verändert nach Schiechtl (1990))	10
2.4. Funktionsprinzip der Zugdreiecke nach Mattheck am Beispiel einer Astgabel. Beginnend mit einem rechtwinkligen Dreieck (1) wird die Kathete des folgenden Dreiecks (2) in der Länge einer halben Hypothenuse angeschlossen und nach diesem Prinzip das System fortgesetzt (3). (verändert nach Mattheck (2010))	13
3.1. Darstellung des Verhältnisses zwischen Wuchshöhe und Wassertiefe: Überströmt: Kleinbewuchs (a), durchströmt: Mittelbewuchs (b), umströmt: Großbewuchs (c). (Verändert nach DVWK (1991))	18
3.2. Strömungskraft auf ein Festkörperelement.	23
3.3. Anströmung einer Platte quer (links) und längs (rechts) zur Strömungsrichtung. .	24
3.4. Kontrollvolumen einer homogenen Kugelpackung	38
3.5. Kräftebilanzierung einer Luftströmung durch eine poröse Scheibe, verändert nach Betz (1926)	40
3.6. Geschwindigkeitsverlauf entlang der mittleren Längsachse durch einen Zylinderbesatz, verändert nach Chen u. a. (2012)	42
4.1. Aufbau des Messrahmens in der Laborrinne in der Draufsicht.	50
4.2. Systemskizze des verwendeten Spitzenlagers mit keilförmig eingefräster Achse aus der Seitenansicht.	51
4.3. Am Kraftaufnahmesystem eingebaute Kraftmesssonde KD40s in der Seitenansicht.	52
4.4. Funktionsprinzip des Kraftaufnahmesystems in der Seitenansicht.	53

4.5. Vergleich der wirksamen Angriffsfläche zwischen dem klassischen Zylinderaufbau und realen belaubten Weidensträuchern im Labor.	54
4.6. Verarbeitung der fotografischen Flächenaufnahmen zu Schwarz-Weiß-Grafiken, die zur Auswertung der wirksamen Fläche sowie des resultierenden Kraftangriffs weiterverwendet werden.	55
4.7. Darstellung der Versuchspflanzen.	56
4.8. Durchströmte Pflanze in der Laborrinne in der Frontansicht (a), Seitenansicht (b) und Draufsicht (c).	58
4.9. Messraster normiert nach der Fließtiefe bzw. Rinnenbreite in der Draufsicht. . . .	60
4.10. Diskretisierung der Pflanze für die numerische Modellierung aus den innerhalb der Versuche aufgenommenen Flächen der jeweils belasteten Pflanze sowie Implementierung der Pflanzenporosität in das Berechnungsgitter.	63
4.11. Aufbau des Berechnungsgitters für die numerische Simulation.	64
4.12. Gerechnete Geschwindigkeitsprofile in der Mitte der simulierten Rinne für drei Gitterauflösungen mit drei Strickler-Beiwerten ($k_{st} = 60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, $k_{st} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und $k_{st} = 60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ im Vergleich zu gemessenen Profilen in der Mitte der Laborrinne. . .	65
4.13. Strömungscharakteristik an einem Zylinder: (a) als umströmter Festkörper, (b) als durchströmter poröser Körper.	67
4.14. Übertragung der Geometrie von der klassischen Kugelpackung auf die Situation einer belaubten Pflanze bestehend aus Astwerk und Laub.	68
4.15. Zusammenfassung der verwendeten Versuchsaufbauten mit den abgestuft gewählten Porenmaterialien sowie eine Übersicht der maßgeblichen Parameter.	71
4.16. Messraster der Porositätsversuche normiert nach der Fließtiefe bzw. Rinnenbreite in der Draufsicht.	71
5.1. Verlauf der Widerstandskraft belaubter Weidenzweige auf die im unbelasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).	76
5.2. Verlauf der Widerstandskraft belaubter Weidenzweige auf die jeweils im belasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).	77
5.3. Verlauf der Widerstandskraft unbelaubter Weidenzweige auf die im unbelasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).	78
5.4. Verlauf der Widerstandskraft unbelaubter Weidenzweige auf die im belasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).	79
5.5. Der Widerstandsbeiwert belaubter Weidenzweige berechnet mit der im unbelasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).	80

5.6.	Der Widerstandsbeiwert belaubter Weidenzweige berechnet mit der im belasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts). . .	80
5.7.	Der Widerstandsbeiwert unbelaubter Weidenzweige berechnet mit der im unbelasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).	81
5.8.	Der Widerstandsbeiwert unbelaubter Weidenzweige berechnet mit der im belasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).	82
5.9.	Übersicht der belaubten Versuchszweige im unbelasteten Zustand sowie in der Seitenansicht unter Belastung für <i>Salix viminalis</i> (links), <i>Salix alba</i> (Mitte) und <i>Salix purpurea</i> (rechts).	87
5.10.	Anteil der Widerstandskraft der Belaubung der Versuchspflanzen an der Gesamtwiderstandskraft mit steigender Strömungsbelastung der verwendeten Pflanzenspezies im überströmten und durchströmten Zustand.	88
5.11.	Anwendung des Prinzips der Zugdreiecke nach Mattheck (2010) auf die belasteten Versuchspflanzen <i>Salix viminalis</i> , <i>Salix alba</i> und <i>Salix purpurea</i> (von links nach rechts) in der Seitenansicht der belasteten Pflanzenproben in der Laborrinne. . .	89
5.12.	Ermittlung der Gradienten der Regressionsgerade aus dem jeweiligen Auftrag zwischen $\log(F_d/v^2)$ und $\log v$ für die Pflanzenspezies <i>Salix viminalis</i> , <i>Salix alba</i> und <i>Salix purpurea</i> aus den in den Laborversuchen gemessenen Widerstandskräften. .	90
5.13.	Darstellung des Kontraktionsverhaltens der untersuchten Spezies im Vergleich zu weiteren Untersuchungen von Schneider (2010) und Oplatka (1998) als normierte Vegetationsfläche unter Strömungsbelastung.	93
6.1.	Vergleich des Widerstands der für die Geschwindigkeitsuntersuchungen verwendeten <i>Ficus natalensis</i> Pflanze mit den Widerstandsuntersuchungen der belaubten Weidenarten. Links: Vergleich des Kraftverlaufs auf die angeströmte Vegetationsfläche mit steigender Belastung, rechts: Vergleich des Widerstandsbeiwertes c_d mit steigender Belastung.	97
6.2.	Übersicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung im ersten und letzten Querprofil des Untersuchungsabschnittes in der unbesetzten Strömungsrinne bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ (linke Spalte) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (rechte Spalte).	97
6.3.	Übersicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung als Querprofile für die unbelaubte (1. und 3. Spalte) und belaubte (2. und 4. Spalte) Pflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ (1. und 2. Spalte) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (3. und 4. Spalte).	99

6.4.	Dreidimensionale Ansicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung um die strömungsbelastete Pflanze bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ (obere Reihe) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (untere Reihe) im unbelaubten (linke Spalte) und belaubten (rechte Spalte) Zustand. . .	101
6.5.	Systemskizze der Strömungscharakteristik an einem Zylinder: (a) als umströmter Festkörper, (b) als durchströmter poröser Körper.	102
6.6.	Vergleich der normierten vertikalen Geschwindigkeit und ihrer Schwankungsgrößen entlang der Längsachse zentral durch die durchströmte Pflanze ($y/B = 0,0$) für den unbelaubten (obere Reihe) und belaubten (untere Reihe) Fall bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	103
6.7.	Vergleich der normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofile zentral durch die durchströmte Pflanze bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) mit den normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofilen entlang des Randbereiches der strömungsbelasteten Pflanze bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	105
6.8.	Vergleich der normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofile zentral durch die durchströmte Pflanze bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ (obere Reihe) mit den normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofilen zentral durch die durchströmte Pflanze bei $v = 0,6 \text{ m/s}$ (untere Reihe).	106
6.9.	Vergleich der im Labor gemessenen Querprofile der Fließgeschwindigkeit (obere sechs Isotachendiagramme) mit den in der numerischen Simulation berechneten Geschwindigkeitsprofilen an den selben Positionen bezogen auf die belastete Pflanze (untere sechs Isotachendiagramme) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	109
6.10.	Vergleich der im Labor gemessenen Querprofile der Fließgeschwindigkeit (obere sechs Isotachendiagramme) mit den in der numerischen Simulation berechneten Querprofilen an den selben Positionen bezogen auf die belastete Pflanze (untere sechs Isotachendiagramme) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$	110
6.11.	Vergleich der gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofile (blaue Datenpunkte) mit den simulierten Geschwindigkeitsprofilen (schwarze Linie) zentral durch die durchströmte Pflanze bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) und entlang des Randbereiches der strömungsbelasteten Pflanze bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	111
6.12.	Vergleich der gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofile (blaue Datenpunkte) mit den simulierten Geschwindigkeitsprofilen (schwarze Linie) zentral durch die durchströmte Pflanze bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) und entlang des Randbereiches der strömungsbelasteten Pflanze bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$	112
6.13.	Dreidimensionale Ansicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung aus der Strömungsberechnung bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ (oben) und $v = 0,75 \text{ m/s}$ (unten).	113

6.14. Normalisierte Schubspannungsverteilung im Nahbereich der Pflanze für die fünf simulierten mittleren Fließgeschwindigkeiten. Die Sohlschubspannung wurde mit dem Integral der Schubspannung ($\tau = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E$) der unbesetzten Rinne normalisiert.	115
6.15. Auswertung der charakteristischen Widerstandsdaten der simulierten Pflanze im Vergleich zu den Messdaten der Laborversuche. Links: Kraft auf die angeströmte Fläche als Funktion der Fließgeschwindigkeit, rechts Widerstandsbeiwert c_d als Funktion der quadrierten Fließgeschwindigkeit.	116
6.16. Zusätzliche Auswertung des Volumenverhaltens mit steigender Belastung auf Basis der dreidimensionalen Aufnahme der lastabhängigen Pflanzegeometrie.	117
7.1. Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung in Strömungsrichtung um und durch Zylinder und strauchartige Pflanzen mit steigender Porosität von links nach rechts bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	122
7.2. Isotachendiagramme und Vekordiagramme der Geschwindigkeitsverteilung in und quer zur Strömungsrichtung um und durch Zylinder und strauchartige Pflanzen mit steigender Porosität von links nach rechts.	124
7.3. Visualisierung der Strömungsverhältnisse einer durchströmten strauchartigen Pflanze im Vergleich zu einem umströmten Festkörperzylinder. Links: Tracerbild eines umströmten Festkörperzylinders. Mitte und rechts: Tracerbild einer durchströmten Pflanze im zeitlichen Versatz.	125
7.4. Detailausschnitt aus der Visualisierung im Bereich des Geschwindigkeitsgradienten zwischen langsamem Nachlauf und schnellerer Umströmung mit der charakteristischen Ausbildung von Scherschichtwirbeln.	126
7.5. Querprofile der Geschwindigkeitsdaten des Festkörperzylinders, des Zylinders mit Kugeln $d = 0,04 \text{ m}$ und der durchströmten sowie überströmten Pflanze knapp vor dem Element, im direkten Nachlauf, im weiteren Nachlauf sowie am unterstromigen Aufnahmeende.	127
7.6. Längsprofil der Geschwindigkeitsdaten des Festkörperzylinders, des Zylinders mit Kugeln $d = 0,4 \text{ m}$ und der durchströmten sowie überströmten Pflanze.	128
7.7. Grafische Zusammenfassung der wesentlichen Strömungscharakteristiken einer porösen Durchströmung von Einzelelementen im Vergleich zur Festkörperumströmung.	130
7.8. Aufnahmen der resultierenden Ablagerungsbilder im Nachlaufbereich von strauchartigen Vegetationsgruppen. Links und Mitte: Untersuchung im Labor, rechts: Foto einer Ablagerungszone im Nachlauf eines Weidengebüschriegels nach einem Hochwasserereignis an der Enz (Quelle: Lehmann 2005).	131
7.9. Kräftebilanzierung der aus einem durchströmten porösen Körper resultierenden Widerstände (Hydrostatische Kräfte und Impulskräfte heben sich auf).	132
7.10. Betrachtung der zu bestimmenden Parameter der Gleichung zur Berechnung der resultierenden Gesamtwiderstandskraft.	141

7.11. Overview of the parameters to be determined of the equation to calculate the resulting total resistance.	147
A.1. Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung der unbesetzten Rinne bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	173
A.2. Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung der unbesetzten Rinne bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$	173
A.3. Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine unbelaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	174
A.4. Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine unbelaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$	175
A.5. Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	176
A.6. Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$	177
A.7. Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,15 \text{ m/s}$	178
A.8. Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$	178
A.9. Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,45 \text{ m/s}$	179
A.10. Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$	179
A.11. Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75 \text{ m/s}$	180
A.12. Querprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten poröser Durchströmung für den Festkörperzylinder, den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01m$) und den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01m$)	181
A.13. Querprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten poröser Durchströmung für den Zylinder mit Filtermaterial, die durchströmte Pflanze und die überströmte Pflanze	182
A.14. Längsprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten für den Festkörperzylinder, den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01m$), den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01m$), den Zylinder mit Filtermaterial, die durchströmte Pflanze und die überströmte Pflanze	183

Tabellenverzeichnis

4.1. Überblick der maßgeblichen Parameter des Versuchsprogramms zur direkten Messung der Widerstandskraft der Weidenpflanzen	57
4.2. Überblick der maßgeblichen Parameter der zusätzlichen Versuche zur direkten Messung der Widerstandskraft der <i>Ficus natascha</i> Pflanze	59
4.3. Überblick der maßgeblichen Parameter des Versuchsprogramms zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung durch und um eine durchströmte strauchartige Pflanze	61
4.4. Zusammenfassung der abschnittswisen Porositätsmittlung aus der Pflanzengeometrie.	64
4.5. Überblick der modellierten Strömungszustände in SSIIM	66
4.6. Überblick der maßgeblichen Parameter des Versuchsprogramms zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung um poröse Zylinder im Vergleich zu einer durchströmten Pflanze	72
5.1. Zusammenfassung der resultierenden mittleren Widerstandsbeiwerte \bar{c}_d der Pflanzenspezies sowie der jeweiligen Standardabweichung s'_{cd} aus den Messdaten für den unbelaubten Fall.	84
5.2. Zusammenfassung der resultierenden mittleren Widerstandsbeiwerte \bar{c}_d der Pflanzenspezies sowie der jeweiligen Standardabweichung s'_{cd} aus den Messdaten für den belaubten Fall.	86
5.3. Überblick der Vogel-Exponenten aus den vorliegenden Untersuchungen im Vergleich zur theoretischen Herleitung (de Langre u. a. (2012)) sowie Untersuchungsdaten der Studien von de Langre (2012) und Boller (2006)	91
A.1. Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten durchströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	161
A.2. Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten überströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	162
A.3. Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten durchströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	163

A.4. Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten überströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	164
A.5. Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten durchströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	165
A.6. Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten überströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	166
A.7. Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten durchströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	167
A.8. Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten überströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	168
A.9. Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten durchströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	169
A.10. Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten überströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	170
A.11. Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten durchströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	171
A.12. Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten überströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)	172

Symbolverzeichnis

Arabische Zeichen

A	durchflossene Fläche	[m ²]
A_B	einseitige Blattfläche eines Pflanzenblattes	[m ²]
A_b	projizierte Grundfläche einer Pflanze	[m ²]
A_f	einseitige Blattfläche	[m ²]
A_g	Grundfläche	[m]
A_n	normalisierte Vegetationsfläche	[m ²]
A_p	projizierte Vegetationsfläche im belasteten Zustand	[m ²]
A_s	projizierte Fläche der unbelaubten Pflanze	[m ²]
A_0	projizierte Vegetationsfläche im unbelasteten Zustand	[m ²]
A_∞	Endgröße der projizierten Vegetationsfläche im belasteten Zustand	[m ²]
a	Skalierungsfaktor der allometrischen Skalenbeziehung	[-]
a_s	Formfaktor der Rauheitselemente	[-]
a_r	Maß für die Flächenreduktion	[-]
a_x, a_y	Abstand der Vegetationselemente in und quer zur Hauptfließrichtung	[m]
b	funktionsbestimmender Exponent der allometrischen Skalenbeziehung	[-]
b_v	Streamlining-Faktor	[-]
C_s	Speziesespezifische Konstante	[-]
C_y	Cauchy-Zahl	[-]
c_d	Widerstandskoeffizient	[-]
$c_{d\chi}$	artspezifischer Widerstandsbeiwert nach Järvelä	[-]
c_n	normalisierter Widerstandsbeiwert	[-]
c_r	Maß für die Reduktion des Widerstandsbeiwertes	[-]
c_{wr}	Widerstandskoeffizient eines in der Gruppe stehenden Zylinders	[-]
$c_{w\infty}$	Widerstandskoeffizient eines einzelnen Zylinders	[-]
c_∞	Endgröße des Widerstandsbeiwertes im belasteten Zustand	[-]
d	Rohrdurchmesser	[m]
dA	Einheitsfläche	[m]
dp	Differenzdruck	[Pa]
d_B	Blattdicke eines Pflanzenblattes	[m]
d_k	charakteristischer Korndurchmesser	[m]
d_s	mittlerer Stammdurchmesser	[m]
d_v	Durchmesser eines Zylinders	[m]
d_{veg}	Pflanzendurchmesser im unbelasteten Zustand	[m]
$d_{veg,r}$	resultierender Pflanzendurchmesser	[m]

Arabische Zeichen

d_{84}	Korndurchmesser bei 34% Massendurchgang	[m]
E	E-Modul	[N/m ²]
F_G	Gewichtskraft	[N]
F_d	Widerstandskraft eines umströmten Festkörpers	[N]
F_l	Widerstandskraft der belaubten Pflanzen	[N]
F_s	Widerstandskraft der unbelaubten Pflanzen	[N]
Fr	Froudezahl	[-]
F_ϕ	Widerstandskraft infolge poröser Durchströmung	[N]
f	Wirbelablösefrequenz	[Hz]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
H	Wassertiefe	[m]
h	ungebogene Pflanzenhöhe	[m]
h_v	Energieverlusthöhe	[m]
I_E	Energieliniengefälle	[m/m]
I	hydraulischer Gradient	[-]
K	Permeabilitätskoeffizient	[m ²]
k	gebogene Pflanzenhöhe	[m]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
k_{st}	Strickler Beiwert	[m ^{1/3} /s]
L	Einheitslänge des Kontrollvolumens	[m]
LAI	Leave Area Index	[-]
L_p	maximalen Querschnittslänge eines Probekörpers	[m]
L_s	Längenmaßstab der Wirbelgröße über einem überströmten Vegetationsfeld	[m]
L_u	benetzter Umfang	[m]
l_p	minimalen Querschnittslänge eines Probekörpers	[m]
MAA	Impuls absorbierende Fläche (engl. momentum absorbing area)	[m ²]
MEI	Biegesteifigkeit der Einheitsfläche	[Nm ²]
N	Stammanzahl einer Einheitsfläche	[-]
O	Oberfläche einer Einheitskugel	[m ²]
O_B	Gesamtoberfläche der Blätter einer Pflanze	[m ²]
O_Z	Gesamtoberfläche der Zweige einer Pflanze	[m ²]
p_i	Druck an der Stelle i	[Pa]
Q	Abfluss	[m ³ /s]
r_{hy}	hydraulischer Radius	[m]
Re	Reynoldszahl	[-]
Re_s	Stamm-Reynoldszahl	[-]
Sr	Strouhal-Zahl	[-]
s	Anzahl von Körnern innerhalb eines Kontrollvolumens	[-]
s_b	Anzahl Blätter	[-]
s'_{cd}	Standardabweichung der Widerstandsbeiwerte einer Messreihe	[-]
s_z	Anzahl Zweige	[-]
U	Gesamtoberfläche eines porösen Mediums	[m/s]

Arabische Zeichen

U_h	Fließgeschwindigkeit im Bereich der Pflanzenhöhe	[m/s]
U'_h	Fluktuation der Fließgeschwindigkeit im Bereich der Pflanzenhöhe	[s ⁻¹]
V	Pflanzenvolumen	[m ³]
V_B	Gesamtvolumen der Blätter einer Pflanze	[m ³]
V_{fest}	Feststoffvolumen eines porösen Mediums	[m ³]
V_{ges}	Gesamtvolumen eines porösen Mediums	[m ³]
V_b	mittleres Volumen eines Blattes einer Pflanze	[m ³]
V_z	mittleres Volumen eines Zweiges einer Pflanze	[m ³]
V_Z	Gesamtvolumen der Zweige einer Pflanze	[m ³]
v	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
v_i	Fließgeschwindigkeit an der Stelle i	[m/s]
v_v	Fließgeschwindigkeit innerhalb einer Zylindergruppe	[m/s]
X	morphologische Variable	[-]
x	Koordinate in Fließrichtung	[-]
Y	morphologische Variable	[-]
y	Koordinate lateral zur Fließrichtung	[-]
z	Koordinate in vertikaler Richtung	[-]
z_i	Sohlhöhe über einem Bezugsniveau an der Stelle i	[m]

Griechische Zeichen

α	Deformationsparameter nach Järvelä	[–]
β	Koeffizient zur Berücksichtigung der Kornform und Porosität	[–]
β_a	Koeffizient zur Beschreibung der Steilheit des exponentiellen Abstiegs der Fläche	[–]
β_c	Koeffizient zur Beschreibung der Steilheit des exponentiellen Abstiegs der Widerstandsbeiwertes	[m/s]
β_0	Koeffizient zur Berücksichtigung der Kornform	[–]
Δc_w	Widerstandskoeffizient eines Zylinders infolge Verbauung und Schwerewellen	[–]
Δp	Druckdifferenz zwischen	[Pa]
Δx	Einheitsstrecke in x-Richtung	[m]
η	dynamische Viskosität	[Ns/m ²]
ε	Vogel-Exponent	[–]
Λ	horizontaler Wirbelabstand der Wirbel über einem überströmten Vegetationsfeld	[m]
λ	Widerstandsbeiwert	[–]
λ_I	Widerstandsbeiwert für Interaktionswiderstände	[–]
λ_O	Widerstandsbeiwert für Oberflächenwiderstände	[–]
λ_{veg}	Widerstandsbeiwert für Vegetationswiderstände	[–]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ξ	Deformationsparameter nach Kouwen	[–]
ρ	Dichte von Wasser	[kg/m ³]
ρ_v	Pflanzendichte	[m ³ /m ³]
τ_0	Wandschubspannung	[N/m ²]
ϕ	Porosität	[–]
φ	Winkel senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	[°]
χ	Vegetationsparameter nach Järvelä	[–]

1. Einleitung

1.1. Relevanz und Fragestellung

Bis zum Ende des zwanzigsten Jahrhunderts setzten wasserbauliche Maßnahmen an Fließgewässern auf eine zunehmende urbane Flächennutzung des direkten Fließgewässerumsfelds und damit auf eine zunehmende Kontrollierung des Gewässers in Form von Kanalisierung und Freilegung des Gewässerquerschnitts. Die Verbindung zwischen Fließgewässer und Aue wurde zu großen Teilen unterbrochen, Auegebiete besiedelt und Vegetation auf Vorländern auf ein Mindestmaß reduziert, wenn nicht vollständig entfernt. Diese Einengung der Fließgewässer einhergehend mit einer zunehmenden Urbanisierung der Fließgewässergebiete mit einer zunehmenden Flächenversiegelung und Reduzierung der Retentionsräume führt zu zunehmenden Abflussmengen und damit zu einer steigenden Hochwasserproblematik mit einer Beschleunigung der Abflusswellen und einer Erhöhung der Abflussspitzen. Das Ökosystem Aue eines Fließgewässers bietet einerseits Retentionsraum für diese Hochwasserereignisse, ist aber auch in zahlreichen weiteren Funktionen dem Menschen dienlich. Andererseits stellt es für Flora und Fauna einen unersetzlichen Lebensraum dar, der innerhalb Deutschlands nur noch in 10 – 20 % der ursprünglichen Ausdehnung vorhanden ist (BMU u. BfN (2009)). Aus diesem Grund wird der Fokus wasserbaulicher Maßnahmen seit den vergangenen 30 Jahren mehr und mehr auf die Revitalisierung der Auegebiete und Fließgewässer mit ihren Vorländern gesetzt. Die zunehmende Bevölkerungsdichte lässt es jedoch nicht zu, dem Gewässer seinen natürlichen Freiraum vollständig wieder zur Verfügung zu stellen, vielmehr gilt es an dieser Stelle möglichst weite Auegebiete zwischen den Besiedlungsflächen wieder zuzulassen und innerhalb der urbanen Gebiete weitestmöglich das Ökosystem der Vorlandflächen und des Gewässers selbst funktionell und strukturell wiederherzustellen.

Auegebiete tragen als Retentionsraum zwar zur Reduktion des Hochwasserrisikos bei, vegetationsbestandene Vorländer können jedoch im direkten Vergleich mit relativ unbewachsenen Vorländern je nach Vegetationsdichte die hydraulische Kapazität des Gewässerquerschnitts deutlich reduzieren, da die Pflanzen der Strömung hydraulischen Widerstand bieten und damit oberstrom der vegetationsbestandenen Gebiete ein Rückstau und damit eine Erhöhung des Hochwasserrisikos verursacht werden kann. Aufgabe der planenden Wasserbauingenieure ist es also einerseits Vegetation am Fließgewässer soweit wie möglich zuzulassen und andererseits die Hochwassersicherheit der Ober-, An- und Unterlieger zu gewährleisten. Um dies leisten zu können, ist es notwendig praktikable Berechnungsverfahren zur Verfügung zu stellen, die mit einfach zu erfassenden Parametern eine gute Prognostizierbarkeit des hydraulischen Widerstands ermöglichen. Für flächenartige Kleinvegetation, die deutlich überströmt wird, sowie baumartige Großvegetation, die als umströmte Zylinder angenommen werden können, stehen bereits praktikable und belastbare Berechnungsverfahren zur Verfügung. Schwierigkeiten bereitet die Prognose des hydraulischen Widerstands von strauchartiger Vegetation, da diese eine komplexe verzweigte Struktur mit jahreszeitlich abhängigem Belaubungsgrad aufweisen und infolge ihrer Flexibilität auf hydraulische Belastung mit

stromlinienförmiger Ausrichtung reagieren und damit keine klare geometrisch erfassbare Form aufweisen. Für diese Vegetationsart, die in Form von Strauchweiden zumeist auf den Pionierflächen und in der Weichholzaue und damit auf den hydraulisch relevanten Gebieten vorkommen, stehen bis heute noch keine zuverlässigen, physikalisch belastbaren Berechnungsverfahren zur Verfügung.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, aufbauend auf die bisherigen Ansätze und Verfahren zur Berechnung des hydraulischen Widerstands von Pflanzen, die Hydraulik an strauchartigen flexiblen Weidenarten zu untersuchen und aus den Untersuchungsergebnissen einen physikalisch belastbaren Ansatz zur Quantifizierung des hydraulischen Widerstands strauchartiger Vegetation abzuleiten.

1.2. Inhalt und Aufbau

Zur Erarbeitung eines physikalisch belastbaren Ansatzes zur Quantifizierung des hydraulischen Widerstands strauchartiger Vegetation werden zunächst basierend auf den bestehenden Ansätzen zur Berechnung des vegetationsbedingten Widerstands über eine direkte Messung der Widerstandskraft die Auswirkungen und Größenordnungen der charakteristischen Pflanzeigenschaften strauchartiger Weiden auf die Widerstandskraft und den Widerstandsbeiwert untersucht. Aufbauend auf der Annahme, dass strauchartige Vegetation als porös durchströmtes Medium zu betrachten ist, wird dann das Geschwindigkeitsfeld um eine durchströmte strauchartige Pflanze analysiert und aus dem hydraulischen Bild das Maß der Durchströmung und die Wirksamkeit auf das Widerstandsverhalten bestimmt. Anschließend wird eine hydrodynamisch-numerische Simulation dieser Geschwindigkeitsverteilung vorgestellt, in der die Pflanze mittels Porositätsparametern direkt in das Berechnungsgitter implementiert wird. Mit einer weiterführenden Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung um Störkörper unterschiedlicher Porosität und der Lokalisierung der einzelnen Widerstandsquellen, sowie einer theoretischen Analyse zur Anpassung bestehender Formelwerke zur porösen Durchströmung auf die Situation einer durchströmten strauchartigen Pflanze wird dann ein Bemessungsansatz zur Berechnung der resultierenden Widerstandskraft einer durchströmten strauchartigen Pflanze entwickelt.

Abbildung 1.1 gibt eine Übersicht zum Aufbau der Arbeit, die grundsätzlich in vier Teile gegliedert ist: Der erste Teil umfasst die Ermittlung aller relevanten Grundlagen zur Pflanzenphysiologie und zur Widerstandshydraulik im Allgemeinen und vegetationsbedingten Widerstandshydraulik im Speziellen (Kapitel 2 und 3), im zweiten Teil wird die Vorgehensweise und die Versuchsaufbauten zu den einzelnen Untersuchungsschritten beschrieben (Kapitel 4), der dritte Teil stellt die Untersuchungsergebnisse sowie die Diskussion derselben dar (Kapitel 5, 6 und 7), im letzten Teil werden die wesentlichen Inhalte der Arbeit zusammengefasst.

Kapitel 2 gibt eine Übersicht über den relevanten Lebensraum innerhalb des Auesystems und die Merkmale der für die Laborversuche ausgewählten Pflanzenspezies. Darauf aufbauend werden die Erkenntnisse bestehender Arbeiten hinsichtlich der relevanten pflanzenphysiologischen und allometrischen Eigenschaften, wie Morphologie, Bestandsdichte und Biegeverhalten holziger Pflanzenarten ausgearbeitet und zusammengestellt.

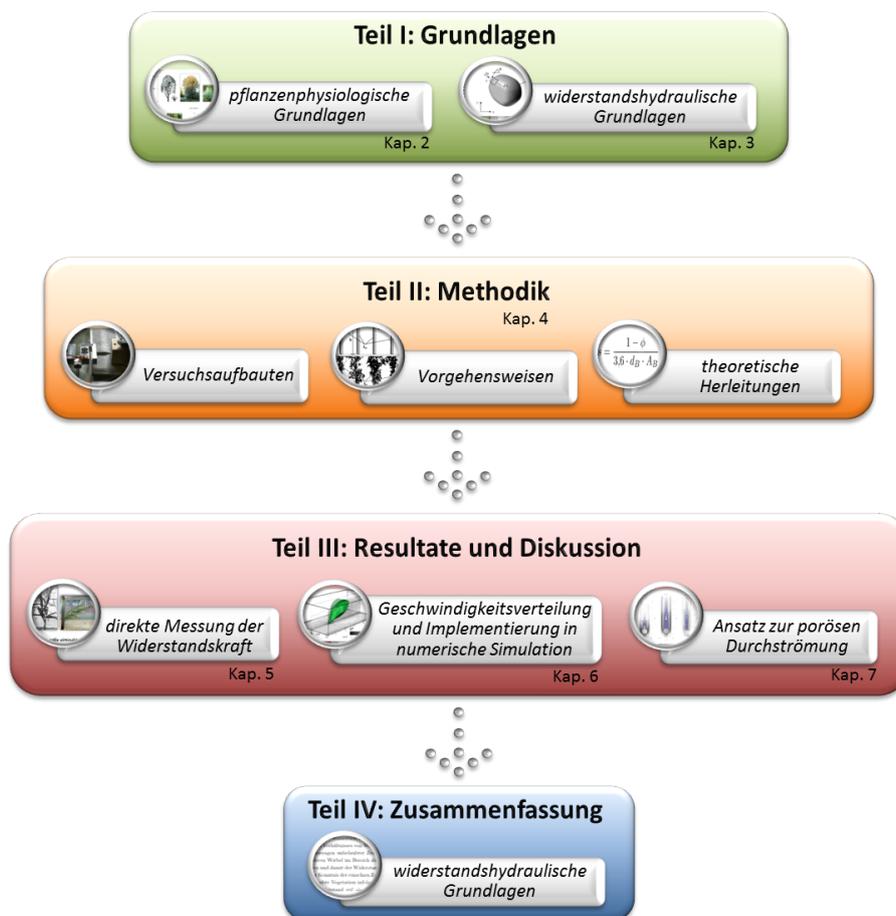


Abbildung 1.1.: Übersicht zum Aufbau der Arbeit.

In Kapitel 3 werden zunächst die Grundlagen des vegetationsbedingten Widerstands sowie dessen Implementierung in die gängigen Fließformeln zusammengefasst. Beginnend mit einem Überblick der Untersuchungen zur allgemeinen Beschreibung des hydraulischen Widerstands überströmter und durchströmter Vegetation wird die Anwendung des Festkörperwiderstands auf strauchartige Vegetation hinterfragt und bestehende Ansätze hierzu vorgestellt. Anschließend wird der Fokus auf die Eigenschaften strauchartiger flexibler Vegetation gelegt und Arbeiten, die diese Eigenschaften und ihre mathematische Erfassung behandeln, vorgestellt. Mit Blick auf den hydraulischen Zustand strauchartiger Vegetation als durchströmtes Medium werden die Grundlagen zur Strömung innerhalb poröser Medien, sowie Arbeiten, die sich mit der Anwendung auf Vegetation befassen, zusammengefasst.

In Kapitel 4 werden detaillierte Informationen zu den Versuchsaufbauten und den Vorgehensweisen, sowie Übersichten zum jeweiligen Untersuchungsprogramm der einzelnen Laborversuche gegeben. Weiterhin wird der Aufbau des numerischen Modells, mit Informationen zur Pflanzendiskretisierung und Modellkalibrierung, beschrieben. Desweiteren befasst sich dieses Kapitel mit einer theoretischen Analyse bestehender Formelwerke zur porösen Durchströmung in Anwendung auf durchströmte strauchartige Pflanzen.

Kapitel 5 zeigt die Versuchsergebnisse der direkten Messung der Widerstandskraft strömungsbelasteter Weidenzweige. Die Resultate werden ausgewertet mit Fokus auf die Effekte der Flexibilität, der Belaubung, aber auch des Überströmungsgrades der Versuchspflanzen auf den resultierenden Widerstand. Aus den Ergebnissen werden die maßgeblichen Einflussfaktoren der Pflanzen auf den hydraulischen Widerstand bestimmt und im Besonderen das Kontraktionsverhalten der Pflanzen detailliert analysiert. Aus den Resultaten werden damit speziesabhängige Widerstandsbeiwerte definiert und eine Gleichung zur Quantifizierung der belasteten Vegetationsfläche aufgestellt.

Kapitel 6 umfasst zwei wesentliche Untersuchungsbausteine. Zunächst werden die Resultate der Laborversuche zur Geschwindigkeitsverteilung um und innerhalb einer strömungsbelasteten strauchartigen Pflanze vorgestellt und die wesentlichen Effekte der Pflanzendurchströmung auf das hydraulische Bild zusammengefasst. Die Ergebnisse werden anschließend mit den Berechnungen derselben Versuchssysteme in einem hydrodynamisch-numerischen Modell verglichen, das die durchströmbare Pflanze explizit innerhalb des Berechnungsgitters in Form von Porositätswerten implementiert. Auf Basis der vergleichenden Untersuchungen wird die Frage beantwortet, ob die Verwendung eines Porositätsansatzes für strauchartige Pflanzen innerhalb einer numerischen Modellierung grundsätzlich möglich ist. Weiterhin werden mit den im Labor aufgezeichneten Daten zu Anströmfläche und Volumen der strömungsbelasteten Pflanzen die Untersuchungen zum Kontraktionsverhalten der Pflanzen aus Kapitel 5 um weitere Daten ergänzt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 6 zeigt Kapitel 7 Untersuchungen zur hydraulischen Signatur bei einer Durchströmung von Störkörpern mit unterschiedlichem Porositätsgrad. Aufbauend auf den Resultaten der Versuche werden die maßgebenden Widerstandsquellen der porösen Durchströmung identifiziert und basierend auf der theoretischen Herleitung aus Kapitel 4 eine Gleichung aufgestellt, die alle Teilwiderstände des Systems der durchströmten strauchartigen Pflanze erfasst.

In Teil IV werden die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und Empfehlungen für die konkrete Anwendung der Erkenntnisse in der Praxis sowie einen kurzen Ausblick für weitere Forschungsmöglichkeiten abgegeben.

Teil I.
Grundlagen

2. Pflanzenphysiologische Grundlagen der Weidengewächse

Das folgende Kapitel befasst sich mit den für Wasserbauingenieure relevanten Vegetationsbereichen der Aue und den darin vorkommenden Pflanzenspezies. Nach einer allgemeinen Erläuterung der vegetativen¹ Gegebenheiten der Weichholzaue wird im Detail auf die Gattung Weide, ihre Relevanz für die Fließgewässerhydraulik sowie die physiologischen und allometrischen Eigenschaften der in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung gekommenen Weidenarten eingegangen.

2.1. Weidengewächse: Pioniervegetation an Fließgewässern

2.1.1. Standort Aue

Die Aue wird definiert als die vom schwankenden Wasserspiegel eines Fließgewässers geprägte Landfläche. Infolge der vom Abfluss abhängigen Grundwasserspiegellage unterliegt das Ökosystem der Aue je nach lateralem Abstand zum Gewässerbett einer starken Dynamisierung des Systems. Ellenberg (1996) definiert die laterale Einteilung der Aue in Abhängigkeit des Abflussregimes ihres Fließgewässers wie folgt (vgl. Abbildung 2.1):

- Den Bereich zwischen Niedrig- und Mittelwasserlinie definiert Ellenberg als gehölzfreie Aue. Das System ist von sehr häufigen Überschwemmungen und Umlagerungsprozessen geprägt und damit vegetativ sehr kurzlebig. Eine Ausbildung holziger Vegetation ist infolge der kurzen Wachstumsperioden nicht möglich, womit sich in diesem Bereich zumeist schnell wachsende Kräuter, Gräser und Röhrichte entwickeln.
- Die anschließende Weichholzaue erstreckt sich über den Bereich oberhalb der Mittelwasserlinie. Die hier vorkommenden Arten, auch Pioniervegetation genannt, sind durch ihre hohe Anpassungsfähigkeit an die periodisch wiederkehrenden Überflutungen und damit auch an den durch Überflutungsdauer, hydraulische Belastung und Sedimentumlagerung hervorgerufenen Stress gekennzeichnet. Im unteren Bereich der mitteleuropäischen Weichholzaue entwickelt sich vornehmlich Weidengebüsch aus sehr flexiblen strauchigen Weidenarten (*Salix pupurea*, *Salix triandra*, *Salix viminalis*). Oberhalb schließt sich der Weichholzauwald an, der abhängig von der Höhenregion des Gewässers

¹**Vegetativ** (gemäß Duden): 1. Pflanzen und insbesondere deren Wachstum betreffend, 2. Wachstum, Ernährung, asexuelle Vermehrung.

von baumartigen Weidenarten, wie *Salix alba* oder *Salix fragilis*, oder Pappel- und Erlenarten, wie *Alnus incana* und *Populus nigra*, besiedelt wird.

- Die Hartholzaue bildet den äußersten Bereich der Aue. Sie wird nur bei sehr extremen Hochwasserereignissen überflutet, so dass sich hier dauerhafte Baumarten, wie die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*) und die Schwarzpappel (*Populus nigra*) ansiedeln.

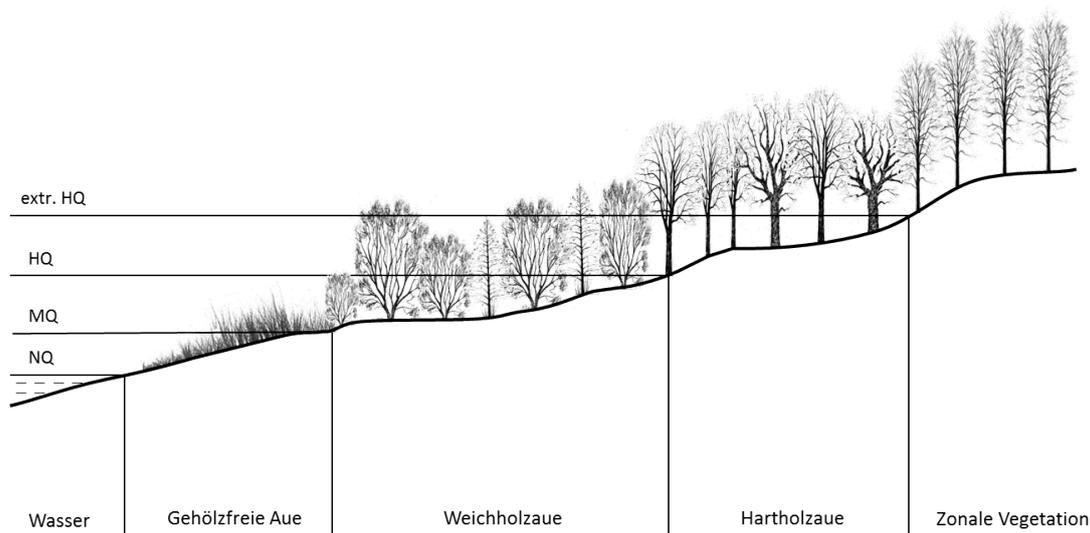


Abbildung 2.1.: Laterale Zonierung einer Aue nach den Sukzessionsabfolgen in Abhängigkeit der vom Abflussregime geprägten charakteristischen Wasserstände. (verändert nach Ellenberg (1996))

Wie in Kapitel 3 näher erläutert wird, liegt das derzeitige Forschungsinteresse hinsichtlich des vegetativen Widerstands innerhalb der Aue bzw. auf den Vorländern maßgeblich auf der strukturell komplexen, flexiblen Strauchvegetation des unteren Weichholzaubereiches. Die hier vorkommenden Pflanzen entwickeln sich sehr rasch auf neu abgelagerten oder frei gespülten Kiesbänken und Rohböden innerhalb weniger Jahre zu Sträuchern von einer Höhe zwischen 2m und 10m (Schiechl (1990)). Damit sind die Weiden in ihrer Fortpflanzung von regelmäßigen Zerstörungen der vegetativen Flur in Folge saisonaler Hochwässer abhängig. Ihre Nähe zum Gewässerbett führt aber auch zu regelmäßigen Überflutungen der Pflanzen selbst schon bei kleineren Hochwässern. Durch ihren Strömungswiderstand üben die Pflanzen einen signifikanten Einfluss auf die oberstromigen Wasserstände des Fließgewässers aus. Abbildung 2.2 zeigt die klassische Besiedelung von kiesigen Pionierflächen am Beispiel der Ardèche in Frankreich. Die hier angesiedelten Sträucher werden bereits bei kleineren Hochwässern überströmt.

Grundlage einer Analyse des vegetativen Widerstandsverhaltens sowie der daraus resultierenden Strömungsstrukturen ist die Kenntnis der für die Hydraulik maßgebenden mechanischen aber auch physiologischen Eigenschaften der vorwiegend in diesem Bereich anzutreffenden Vegetation. Für die Auswahl der Pflanzenspezies für die in den folgenden Kapiteln dargestellten Untersuchungen wurde darauf geachtet, einerseits möglichst die am häufigsten vorkommenden Arten zu verwenden, aber auch die vorkommenden Strukturen der klassischen Weichholzaubvegetation breit gefächert abzudecken. Die Wahl fiel auf drei

Vertreter der Gattung *Salix*, *Salix alba* (Silberweide), *Salix viminalis* (Korbweide) und *Salix purpurea* (Purpurweide), deren Eigenschaften im folgenden Kapitel näher dargestellt werden.



Abbildung 2.2.: Klassisch entwickelte Pionierfläche auf einem kiesigen Rohboden. Foto: Ardèche, Frankreich.

2.1.2. Pflanzenphysiologie und Habitus von Weidengewächsen

Weiden sind sommergrüne Pflanzen der Gattung *Salix*, die mit der Gattung der Pappeln (*Populus*) zur Familie der Weidengewächse (*Salicaceae*) gehören (Philippi, 1990). Das Wachstumsspektrum der etwa 500 Arten reicht von wenigen Zentimetern bis zu 35 m hohen Bäumen und ist abhängig von der Art sowie von den Standortbedingungen, wie Nährstoffversorgung, Licht- und Sauerstoffverhältnisse und Konkurrenz. Die feuchten Pionierflächen der Weichholzaue bieten mit guten Lichtverhältnissen und guter Nährstoffversorgung somit optimale Standortbedingungen, während sich die Weiden durch ihre hohe Flexibilität, den starken Wurzelwiderstand (Oplatka, 1998) und die Fähigkeit der Sauerstoffspeicherung in den Interzellularräumen der Wurzeln (Dister, 1983) optimal an die periodisch überströmte Umgebung angepasst haben (Ellenberg, 1996).

Abbildung 2.3 zeigt die für die Untersuchungen dieser Arbeit ausgewählte Silberweide, Korbweide und Purpurweide in grafischem Strukturaufbau basierend auf den Klassifizierungen nach Schiechl (1990) sowie als fotografische Aufnahme an der Alb bei Karlsruhe. Aus der Übersicht wird deutlich, dass über diese drei klassisch in der Weichholzaue vorkommenden Weidenarten ein großes Spektrum der verschiedenen im Nahbereich der Fließgewässer vorkommenden Arten abgedeckt werden konnte: Die Silberweide als Pioniergebüsch im juvenilen Alter, das sich bei Bestehen der Wachstumsfläche im adulten Stadium zu einem Baum der hinteren Weichholzaue ausbildet, die Korbweide und die Purpurweide als klassische Strauchweiden mit Wuchshöhen unter 10m, die direkt auf den Pionierflächen eines Fließgewässers anzutreffen sind.

Im Folgenden werden die einzelnen für die Untersuchungen ausgewählten Arten im Detail beschrieben:

Die **Silberweide** (*Salix alba*) (vgl. Abbildung 2.3 oben) ist als Hauptart der Silberweidenwälder (*Salicetum albaea*) die in Mitteleuropa am häufigsten vorkommende Weidenart. Durch ihre Fähigkeit der vegetativen Vermehrung aus abgebrochenen Zweigen sowie des raschen Wachstums von bis zu 2 m pro Jahr wird die Silberweide häufig zur Böschungssicherung an den Ufern in Form von Stecklingen etc. angepflanzt. Aus diesem Grund geht ihre Verbreitung inzwischen weit über das natürliche Vorkommen hinaus. Die im juvenilen Stadium strauchartige, hoch flexible Pflanze bildet sich in der adulten Form als baumartige Pflanze mit festem Stamm, dicht verzweigter, schmaler Krone und spitzwinkelig abstehenden Ästen aus. Sie besiedelt wechselfeuchte bis nasse, nährstoff- und basenreiche, locker sandig bis kiesige Rohböden. Ihre wechselseitig angeordneten, gezahnten Blätter sind schmal lanzettlich ausgebildet und weisen an der Unterseite eine silbrig wirkende Behaarung auf, die der Weide ihre charakteristisch silbrige Erscheinung geben (Philippi, 1990).

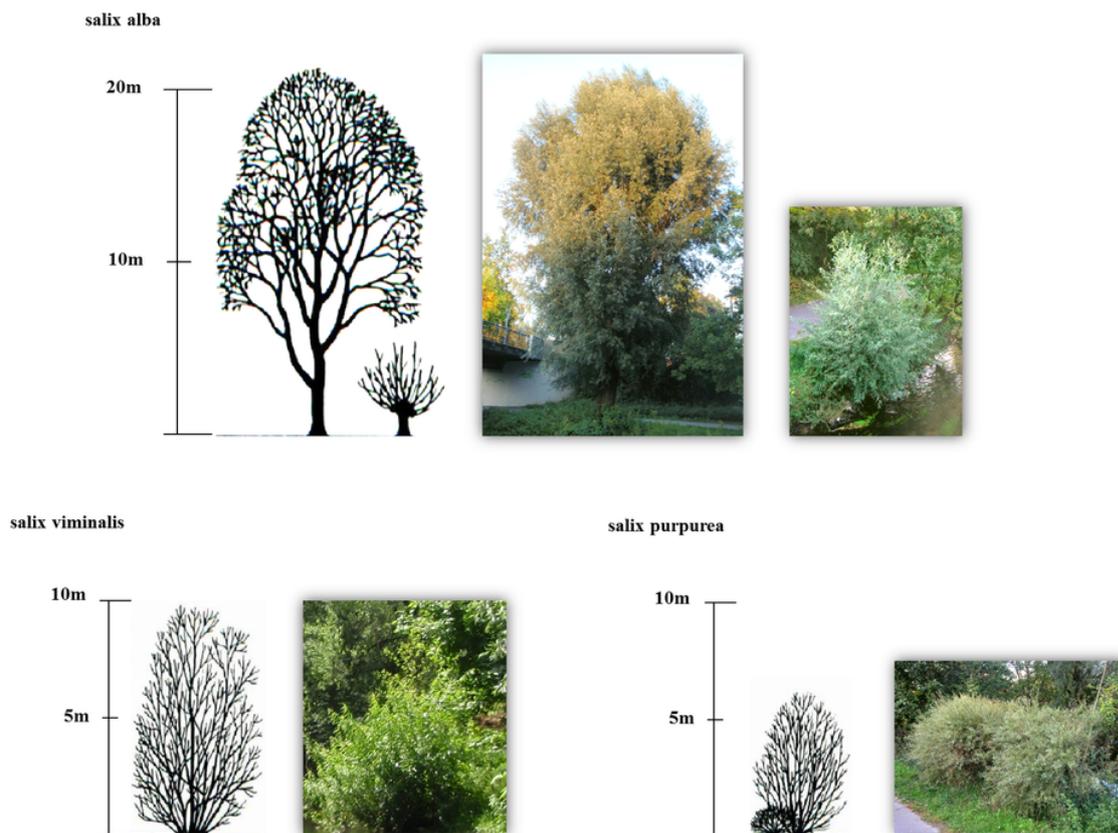


Abbildung 2.3.: Wuchsformen der ausgewählten Weidenarten als Strukturgrafik und fotografische Aufnahme von der Alb bei Karlsruhe. Oben: Silberweide (*Salix alba*), unten links: Korbweide (*Salix viminalis*), unten rechts: Purpurweide (*Salix purpurea*). (verändert nach Schiechtl (1990))

Die **Korbweide** (*Salix viminalis*) (vgl. Abbildung 2.3 links unten), oft kultiviert zu Kopfweiden oder für den Lebendverbau von Uferbefestigungsmaßnahmen verwendet, geht in natürlicher Weise eine Pflanzengesellschaft mit der Mandelweide ein. Sie siedelt vorzugsweise auf kalkigen, sandig schlickigen, nährstoffreichen Rohböden und bildet durch die rutenartig aufrechten Äste eine buschartige Krone mit einer Wuchshöhe bis zu 10 m. Charakteristisch sind die beidseitig grünen, glänzenden Blätter, die schmal lanzettlich und ganzrandig ausgebildet sind (Philippi, 1990).

Die **Purpurweide** (*Salix purpurea*) (vgl. Abbildung 2.3 rechts unten) ist vor allem durch anthropogene Eingriffe an den Mittelgebirgsflüssen weit verbreitet, natürlicherweise jedoch vor allem im Alpenvorland zu finden. Die durch die bräunlich roten Triebe sowie die purpurroten Staubbeutel charakterisierte Pflanze erreicht in ihrer strauchartigen Form eine Wuchshöhe von bis zu 6 m. Ihre Besiedlungsgebiete sind vorzugsweise nasse bis wechsellückene, schluffige bis schottrige, mäßig nährstoffreiche Böden. Sie ist aber auch häufig in Kiesgruben oder auf schottrigen Pionierflächen zu finden (Philippi, 1990).

Im Folgenden wird näher auf Arbeiten eingegangen, die sich mit der Beschreibung struktureller und mechanischer Eigenschaften von holzigen Pflanzen im Allgemeinen aber auch Weiden im Speziellen befasst haben.

2.2. Untersuchungen zur Allometrie sowie zu den mechanischen Eigenschaften von holzigen Pflanzen

Die Allometrie beschäftigt sich mit der Definition von Skalengesetzen holziger Vegetation hinsichtlich ihrer geometrischen Proportionen aber auch ihrer mechanischen Eigenschaften. Untersuchungen zur Allometrie von holzigen Pflanzen finden sich vorwiegend im Bereich der Forstwissenschaften. Erste Untersuchungen zur Allometrie finden sich in Reineke (1933). Er analysierte die Bestandsdichte eines Waldes unterschiedlicher Baumarten in Abhängigkeit des Wuchsalters der Bäume. Reineke erkannte, dass die Anzahl der Bäume pro Flächeneinheit mit steigendem Bestandsalter abnimmt. Dieser Effekt wird in der Biologie als „*selfthinning*“ bezeichnet. Aufbauend auf seinen Analysen entwickelte Reineke das folgende Skalengesetz zur Bestimmung der Baumanzahl in Abhängigkeit des mittleren Stammdurchmessers des Bestands:

$$\log N = -1,605 \cdot \log d_s + C_s \quad (2.1)$$

mit

N	Stammanzahl einer Einheitsfläche	[-]
d_s	mittlerer Stammdurchmesser	[m]
C_s	Spezies-spezifische Konstante	[-]

Schneider (2010) untersuchte die Besatzdichte von Baumweiden und Pappeln sowie von Strauchweiden und weiteren Straucharten auf Basis der nach Petryk u. Bosmajian (1975) definierten Abstandsparameter,

wie sie in Kapitel 3 näher erläutert werden. Sie konnte zeigen, dass innerhalb eines Baumweidenbestandes der Abstand mit zunehmendem Stammdurchmesser ab einem Grenzwert von $d_s = 0,05\text{ m}$ exponentiell zunimmt. Hier ist also das Bestandsdichtegesetz nach Reineke übertragbar. Für strauchartige Arten und juvenile Baumweiden mit einem Stammdurchmesser $d_s < 0,05\text{ m}$ konnte Schneider diese Gesetzmäßigkeit nicht nachweisen. Nach ihren Untersuchungen bleiben die Abstandsparameter hier nahezu konstant.

Bertram (1989) setzte sich zum Ziel, ein Modell zur Beschreibung der Pflanzenproportionen holziger Vegetation auf Basis von Astgeometrie und Biegemechanik zu entwickeln. Zunächst analysierte er das Skalengesetz der Allometrie allgemein. So beschreibt die Allometrie nach Bertram die biologisch physikalische Skalenbeziehung zwischen vegetativen Eigenschaften, wie Strukturdichte in Abhängigkeit des Alters oder Biegeverhalten in Abhängigkeit der Form, wie folgt:

$$Y = a \cdot X^b \tag{2.2}$$

mit

X	morphologische Variable	[-]
Y	morphologische Variable	[-]
a	Skalierungsfaktor der allometrischen Skalenbeziehung	[-]
b	funktionsbestimmender Exponent der allometrischen Skalenbeziehung	[-]

Auflösen nach $\log Y$ ergibt:

$$\log Y = \log a + b \cdot \log X \tag{2.3}$$

Der funktionsbestimmende Exponent b als Maß der Steigung im log-log-Profil gibt damit die Größenordnung der Proportionalität der beiden anzusetzenden morphologischen Variablen an. Mit seinem Modell untersuchte Bertram den funktionsbestimmenden Exponenten unterschiedlicher Pflanzenspezies hinsichtlich der Geometrie und Elastizität bzw. der Biegesteifigkeit. Am Beispiel des Silberahorn konnte er zeigen, dass das Bestandsdichtegesetz von Reineke für alle geometrischen und mechanischen Eigenschaften holziger Pflanzen anwendbar ist und dass sowohl die Pflanzenart als auch ihre Größe die maßgebende Rolle zur Definition der mechanischen Eigenschaften der Gesamtstruktur spielt. Nur wenn die Geometrie der Pflanzenstruktur den Regeln der Allometrie entspricht, kann die Pflanze ihre maximale Biegesteifigkeit und ihren maximalen Lastwiderstand erreichen.

Pretzsch (2000) verglich die Resultate Reinekes mit den Untersuchungen von Yoda u. a. (1963). Dieser hatte aus der Analyse von Baumbeständen das Gesetz des „ $-3/2$ -thinning“ definiert. So reduziert sich nach Yoda das spezifische Gewicht der Einzelpflanze proportional mit zunehmender Besatzdichte um den Faktor $N^{-3/2}$. Auf der Grundlage des allometrischen Prinzips, wie es von Reineke und Yoda auf Pflanzen angewendet wurde, zeigte Pretzsch, dass die $-3/2$ -thinning-Regel auf die Skalierung einer Kugelpackung direkt übertragbar ist.

Enquist u. Niklas (2002) analysierten die Skalenbeziehung der Einzelbiomassen von Stamm, Ästen und Blättern unterschiedlicher Blütenpflanzen und Koniferen in Abhängigkeit des Stammdurchmessers und konnten zeigen, dass die Blattbiomasse stets um den Faktor $M^{3/4}$ proportional abhängig von der Stamm- oder Astbiomasse ist. Sie zeigten, dass einerseits die Blattbiomasse mit steigendem Stammdurchmesser oder steigender Stammbiomasse steigt, andererseits aber die Pflanzenbiomasse mit steigender Besatzdichte sinkt.

Später untersuchten auch Pretzsch u. Mette (2008) die Anwendbarkeit des allometrischen Prinzips auf die Blattbiomasse von Pflanzen und bestätigten, dass die Biomasse des Blattbesatzes eines Baumes in Anlehnung an Reineke proportional zum Baumdurchmesser beschrieben werden kann. Während der Leaf-Area-Index, kurz LAI, der das Verhältnis von Blattoberfläche zur vertikal projizierten Fläche der Krone angibt, mit zunehmendem Pflanzenalter konstant bleibt, nimmt das Verhältnis von Blattfläche zu Blattmasse mit zunehmendem Alter der Pflanze ab.

Unabhängig von den Gesetzen der Allometrie untersuchte Mattheck (2002, 2010) die Auswirkungen der Geometrie von holzigen Pflanzen auf ihre mechanischen Eigenschaften unter der Berücksichtigung der Spannungsverteilung innerhalb der Aststrukturen. Er zeigte, dass die Ausbildung der Astgabel immer dem selben Gesetz der Fortsetzung der sogenannten Zugdreiecke folgt, deren Name Mattheck aus ihrer Eigenschaft, die Zugbelastung auf das Material zu reduzieren, ableitet. In Abbildung 2.4 ist das Prinzip der Zugdreiecke dargestellt. Die optimale Geometrie lässt sich konstruieren, indem man mit einem rechtwinkligen Dreieck in der Ecke beginnt und ein gleichschenkliges Dreieck an die Hälfte der Hypotenuse des vorherigen Dreiecks ansetzt.

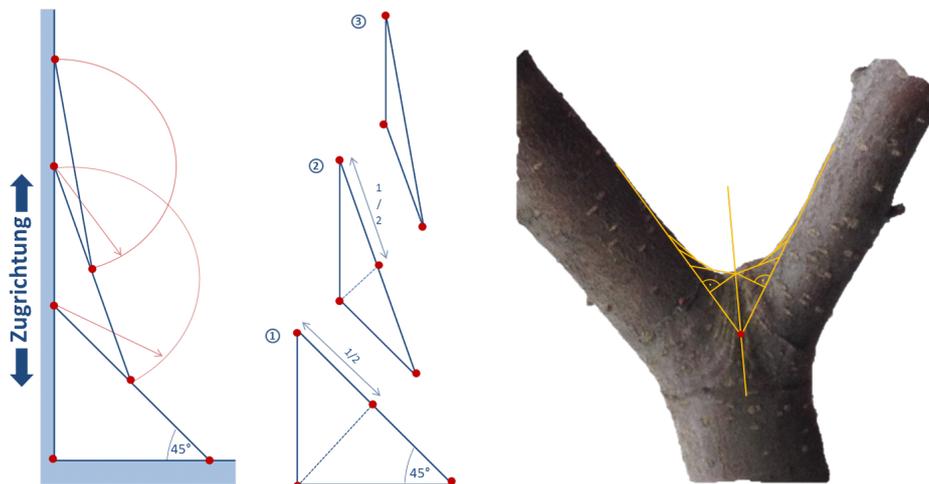


Abbildung 2.4.: Funktionsprinzip der Zugdreiecke nach Mattheck am Beispiel einer Astgabel. Beginnend mit einem rechtwinkligen Dreieck (1) wird die Kathete des folgenden Dreiecks (2) in der Länge einer halben Hypotenuse angeschlossen und nach diesem Prinzip das System fortgesetzt (3). (verändert nach Mattheck (2010))

Dieses Prinzip wird fortgesetzt, bis eine optimal ausgerundete Form entsteht. Auf diese Weise wird die Last, ob durch Eigengewicht oder durch Fremdeinwirkung verursacht, gleichmäßig über die Struktur verteilt und abgeleitet, so dass die Pflanze damit den aus ihrer Geometrie und Material maximal möglichen Lastwiderstand erreicht. Das selbe Prinzip kann nach Mattheck auch auf die resultierende Form einer durch Wind belasteten Pflanze übertragen werden. Die Pflanze wird in Richtung der Windlast auf Zug beansprucht. Bildet sie sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung eine nach den Gesetzen der Zugdreiecke ausgerichtete Form aus, kann die Windlast über die gesamte Struktur optimal abgetragen werden und die Pflanze widersteht der Belastung, ohne zu brechen. Voraussetzung ist eine geringe Biegesteifigkeit, aber hohe Festigkeit der Grundstruktur, wie im Fall der Einzelruten von Strauchweiden. In Kapitel 5.3.3 wird dieses Prinzip nochmals detailliert betrachtet.

Oplatka (1998) untersuchte die Wurzelfestigkeit und das Biegeverhalten unterschiedlicher Weidenarten unter Strömungsbelastung. In seiner Arbeit fasste er aus unterschiedlicher Literatur den E-Modul verschiedener Strauchweidenarten zusammen. Die Werte schwanken je nach Art zwischen $E = 3,4 \text{ kN/mm}^2$ und $E = 12,4 \text{ kN/mm}^2$, während die Silberweide eher im unteren Bereich und die Purpurweide mehr im oberen Bereich anzusiedeln ist.

3. Vegetationshydraulische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird der derzeitige Forschungsstand zur Implementierung des vegetativen Widerstands an Fließgewässern in Fließformeln betrachtet. Aufbauend auf den grundlegenden hydraulischen Widerstandsgesetzen wird zunächst auf die Einteilung der Vegetation nach Größenverhältnissen mit den unterschiedlichen Auswirkungen auf die Hydraulik eingegangen. Mit Blick auf die in dieser Arbeit fokussierte Situation durchströmter Vegetation, wird folgend der Einsatz gängiger Formeln zur Widerstandsermittlung von Festkörpern für den Anwendungsfall strukturreicher flexibler Vegetationselemente aufgezeigt und hinterfragt, sowie konkret auf die Wirkung der pflanzenspezifischen Eigenschaften eingegangen. Mit Blick auf die Vegetation als durchströmtes Element wird abschließend die Hydraulik durch poröse Medien aufgegriffen und bislang vorliegende Untersuchungen zur Anwendung auf durchströmte Pflanzen dargestellt.

3.1. Fließformeln

Zur Berechnung der Abflusskapazität eines Fließgewässers kommen derzeit vor allem zwei maßgebliche Fließformeln zum Einsatz: Die empirische Fließformel nach Gaukler-Manning-Strickler und die physikalisch begründete Fließformel nach Darcy-Weisbach. Grundlage dieser Fließformeln bildet die Herleitung des funktionellen Zusammenhangs zwischen dem Abfluss Q und der Wassertiefe H nach Brahms und de Chézy aus einer Kräftebilanzierung der haltenden und treibenden Kräfte unter der Annahme eines sehr kleinen Energiegefälles:

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot r_{hy}^{1/2} \cdot I_E^{1/2} \tag{3.1}$$

mit

v	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
λ	Widerstandsbeiwert	[-]
r_{hy}	hydraulischer Radius	[m]
I_E	Energieliniengefälle	[m/m]

Der hydraulische Radius ist hierbei ein Relationswert des Quotienten aus durchflossener Fläche und benetztem Umfang A/L_u . Zur Vereinfachung ersetzen Brahms und de Chezy den dimensionsbehafteten Faktor $\sqrt{8g/\lambda}$ mit dem Geschwindigkeitsbeiwert C der Dimension [m^{1/2}/s]. Gaukler, Manning und Strickler stellten einen Ansatz auf, der dem Ingenieur eine einfache, anwendbare Definition dieses Beiwerts liefern sollte und entwickelten damit die Fließformel weiter zu:

$$v = k_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2} \quad (3.2)$$

mit

k_{st} Strickler Beiwert $[m^{1/3}/s]$

Heute ist die Gaukler-Manning-Strickler-Fließformel die in der Ingenieurspraxis meist verwendete Fließformel. Der dimensionsbehaftete Strickler-Beiwert k_{st} vereint als empirischer Beiwert alle der Strömung entgegenstehenden Widerstände. Er ist jedoch wassertiefenabhängig und kann messtechnisch nicht erfasst werden, sondern muss vom Anwender abgeschätzt werden. Zahlreiche empirisch ermittelte Tabellenwerke geben Anhaltspunkte über die situationsspezifisch anzusetzende Größenordnung des k_{st} -Wertes. Cowan entwickelte sogar ein Verfahren, das es dem Ingenieur ermöglicht, den Beiwert aus Anteilen der Einzelwiderstände zu ermitteln. Eine physikalisch basierte Definition der einzusetzenden Größenordnung unabhängig von der Strömungssituation ist damit dennoch nicht möglich, vielmehr ist die Genauigkeit der Abschätzung des k_{st} -Wertes von der Erfahrung des anwendenden Ingenieurs abhängig.

Darcy und Weisbach leiteten ihre Fließformel über den Ansatz einer Energiebilanzierung nach Bernoulli (3.3) gleichgesetzt mit dem Ansatz des Druckverlustes innerhalb einer turbulenten Rohrströmung aus der Rohrhydraulik (3.45) her:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_v \quad (3.3)$$

mit:

z_i	Sohlhöhe über einem Bezugsniveau an der Stelle i	[m]
p_i	Druck an der Stelle i	[Pa]
v_i	Fließgeschwindigkeit an der Stelle i	[m/s]
h_v	Energieverlusthöhe	[m]

gleichgesetzt mit:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{2} v^2 \cdot \rho \quad (3.4)$$

mit:

Δp	Druckdifferenz	[Pa]
d	Rohrdurchmesser	[m]
L	Einheitslänge des Kontrollvolumens	[m]
ρ	Dichte von Wasser	[kg/m ³]

aus der Rohrhydraulik und $d = 4r_{hy}$ (aus dem hydraulischen Radius eines Rohrquerschnitts) ergibt die Beziehung des Druckhöhenverlustes:

$$h_v = \frac{\lambda \cdot L \cdot v^2}{8 \cdot r_{hy} \cdot g} \quad (3.5)$$

Das Energieliniengefälle ist gleich der Energieverlusthöhe über die Einheitslänge $I_E = h_v/L$. Die Darcy-Weisbach-Fließformel folgt damit zu:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8g} \cdot \sqrt{r_{hy} \cdot I_E} \quad (3.6)$$

Der Gesamtwiderstand eines Fließgewässers setzt sich aus den Einzelwiderständen Profilierung, Uferbeschaffenheit, Linienführung, Vegetation, heterogene Gerinnegeometrie sowie abschnittsweise Rauheitsänderung zusammen (Lehmann, 2005). Bei der Berücksichtigung dieser Widerstände liegt der maßgebliche Unterschied und damit auch wesentliche Vorteil der Darcy-Weisbach-Fließformel gegenüber der Gaukler-Manning-Strickler-Fließformel. Der Widerstandsbeiwert λ der Darcy-Weisbach-Fließformel ist im Gegensatz zum k_{st} -Wert der Gaukler-Manning-Strickler-Fließformel dimensionsrein. Dies ermöglicht die separate Erfassung und anschließende additive Überlagerung der Einzelwiderstände zu einem Gesamtwiderstand (Einstein, 1934):

$$\lambda_{ges} = \lambda_O + \lambda_{veg} + \lambda_I \quad (3.7)$$

mit

λ_O	Widerstandsbeiwert für Oberflächenwiderstände	[-]
λ_{veg}	Widerstandsbeiwert für Vegetationswiderstände	[-]
λ_I	Widerstandsbeiwert für Interaktionswiderstände	[-]

Im Folgenden werden die aktuell zur Verfügung stehenden Ansätze zur rechnerischen Ermittlung des vegetativen Widerstandsbeiwertes λ_{veg} dargestellt und hinterfragt.

3.2. Ansätze zur Implementierung des vegetativen Widerstands in die Fließformeln

Grundlage zur Bestimmung des Widerstandsverhaltens von Vegetation ist zunächst die Kenntnis über die äußere Erscheinungsform, den Habitus, der zu betrachtenden Spezies, sowie ihr Größenverhältnis im Vergleich zur vorherrschenden Wassertiefe. In Kapitel 2.2 wurde auf die strukturellen und mechanischen Eigenschaften auf das hydraulische Widerstandsverhalten eingegangen. Aus rein hydraulischer Sicht wird die Vegetation eines Fließgewässers generell in drei Größengruppen im Verhältnis zur Wassertiefe eingeteilt:

- Kleinbewuchs, der deutlich überströmt wird (Gräser, Wasserpflanzen),
- Mittelbewuchs, dessen Wuchshöhe etwa der Wassertiefe entspricht (Sträucher, Röhrichte) und
- Großbewuchs, dessen Wuchshöhe die Wassertiefe deutlich übersteigt (Bäume).

Aus dem Verhältnis von Wassertiefe zu Pflanzenwuchshöhe lassen sich damit aus hydraulischer Sicht zwei grundlegende vegetative Widerstandsarten definieren (Lehmann, 2005):

- Überströmte Vegetation, die einer Veränderung des Oberflächen- /Sohlwiderstands und damit eine Änderung des Strömungsprofils mit der Fließtiefe erzeugt.
- Durch- bzw. umströmte Vegetation, die als Formwiderstand der Strömung entgegensteht und damit Sekundärströmungen erzeugt.

Abbildung 3.1 veranschaulicht diese Definition:

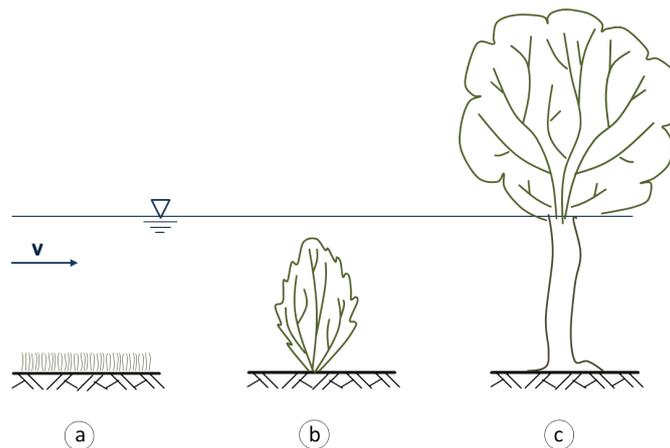


Abbildung 3.1.: Darstellung des Verhältnisses zwischen Wuchshöhe und Wassertiefe: Überströmt: Kleinbewuchs (a), durchströmt: Mittelbewuchs (b), umströmt: Großbewuchs (c). (Verändert nach DVWK (1991))

3.2.1. Widerstand überströmter Vegetation und resultierende Strömungseffekte

Überströmte Vegetation ist charakterisiert durch einen flächenartigen Besatz, dessen Wuchshöhe deutlich geringer ist, als das Maß der Wassertiefe. Untersuchungen zum Widerstand überströmter Vegetation sind daher sowohl in der Fließgewässerhydraulik als auch in der Grenzschichtmeteorologie zu finden. Erste Ansätze zur formalen Erfassung des Strömungswiderstands überströmter Vegetation behandeln das Vegetationsfeld als Oberflächenrauheit der Sohle. So entwickelte Darby (1999) aus den Ansätzen der relativen Rauheitshöhe eine Formelstruktur zur Ermittlung des Strömungswiderstands. Er nutzte den

Ansatz von Hey (1979) zur Berechnung des Strömungswiderstands einer mit Kies bedeckten Sohle, der auf der Formel nach Colebrook u. White (1937) aufbaut (vgl. Gleichung 3.8):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,03 \cdot \log \left(\frac{a_s \cdot r_{hy}}{3,5 \cdot d_{84}} \right) \quad (3.8)$$

mit:

a_s	Formfaktor der Rauheitselemente	[-]
d_{84}	Korndurchmesser bei 34% Massendurchgang	[m]

Darby ersetzte den Faktor der mittleren Rauheitshöhe $3,5 \cdot d_{84}$ durch die gebogene Pflanzenhöhe k nach Kouwen (1988), der anhand einer Dimensionsanalyse und Untersuchungen mit überströmten Plastikstreifen eine Definition der gebogenen Pflanzen abhängig von Materialeigenschaften und Geometrie entwickelte:

$$k = 0,14h \left[\frac{\left[\frac{MEI}{\tau_0} \right]^{0,25}}{h} \right]^{1,59} \quad (3.9)$$

mit:

k	gebogene Pflanzenhöhe	[m]
MEI	Biegesteifigkeit der Einheitsfläche	[Nm^2]
τ_0	Wandschubspannung	[N/m^2]
h	ungebogene Pflanzenhöhe	[m]

Dieser Ansatz geht davon aus, dass die Strömung innerhalb des Vegetationsbereichs vernachlässigbar klein ist, so dass das Strömungsfeld oberhalb der Vegetation einer versetzten Grenzschichtströmung entspricht. Untersuchungen zum Strömungsgeschehen im Grenzbereich zwischen Vegetationsfeld und freier Strömung führten zunächst auch zu diesem Ergebnis.

Meroney (1968) untersuchte den Widerstand und die Strömungscharakteristik entlang eines Vegetationsbesatzes im Windkanal. Seine Resultate hinsichtlich Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzverhalten zeigten eine verstärkte turbulente Intensität im Grenzbereich zwischen Vegetationsfeld und freier Strömung, während das Geschwindigkeitsprofil innerhalb der Vegetation einen stabilen und oberhalb der Vegetation einen klassisch logarithmischen Verlauf annahm. Meroney deutete dies als Ausbildung einer Grenzschicht mit verstärkter turbulenter Intensität im Grenzbereich zwischen Vegetationsfeld und freier Strömung.

El-Hakim u. Salama (1992) untersuchten das Geschwindigkeitsfeld überströmter Kunststoffstreifen. Unter der Annahme der grenzschichtähnlichen Strömungscharakteristik, wie Meroney sie beschrieb, und auf Basis des von Kouwen u. a. (1981) theoretisch hergeleiteten funktionellen Zusammenhangs von Strömungsgeschwindigkeit und Schubspannung oberhalb eines Vegetationsfeldes, entwickelten sie Gleichungen zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit innerhalb sowie oberhalb des überströmten Vegetationsfeldes.

Durch verbesserte Messmethodik erkannten zahlreiche Autoren Ende des 20. Jahrhunderts die Analogie der Wirbelbildung oberhalb eines überströmten Vegetationsfeldes mit der Scherschichtwirbelbildung nach Kelvin-Helmholtz. Ikeda u. Kanazawa (1996) führten LDV¹- und PIV²-Messungen an überströmten Kunststoffstreifen durch und identifizierten elliptische nach unterstrom wandernde Wirbel, deren Zentrum knapp oberhalb der Vegetation positioniert sind. Damit konnten Ikeda und Kanazawa bereits die wellenförmige Bewegung der Pflanzendecke erklären. Zudem stellten sie fest, dass das Geschwindigkeitsfeld im Grenzbereich zwischen Vegetation und freier Strömung einen Knick aufweist, während die turbulente Intensität - wie auch von den o.g. Autoren erkannt - in diesem Bereich ein Maximum erfährt.

Raupach u. a. (1996) analysierten Turbulenz- und Geschwindigkeitsdaten verschiedener Autoren aus Versuchen mit unterschiedlichen überströmten Pflanzenarten und wiesen über eine analytische Betrachtung der Daten die Analogie des Strömungsfeldes über einem überströmten Vegetationsbesatz zur Strömungscharakteristik einer Scherströmung nach. Sie definierten den vertikalen Längenmaßstab der Wirbelgröße über einem Vegetationsbesatz zu:

$$L_s = \frac{U_h}{U'_h} \quad (3.10)$$

mit:

L_s	Längenmaßstab der Wirbelgröße über einem überströmten Vegetationsfeld	[-]
U_h	Fließgeschwindigkeit im Bereich der Pflanzenhöhe	[m/s]
U'_h	Fluktuation der Fließgeschwindigkeit im Bereich der Pflanzenhöhe	[s ⁻¹]

und unterteilten die Wirbelfraktionen in drei charakteristische Größengruppen in Abhängigkeit des Längenmaßstabs. Wirbel die deutlich größer als L_s sind, tragen nicht zum aktiven Impulsaustausch zwischen Vegetationsbesatz und Strömung bei, regen jedoch die Periodizität der kleineren Wirbel der Größenordnung L_s an. Diese entstehen durch Instabilitäten der Art, wie sie in Scherschichten zu finden sind, resultierend aus einem Knick im Geschwindigkeitsprofil, der aus dem Widerstand des Vegetationsbesatzes entsteht. Den horizontalen Wirbelabstand ermittelten Raupach u.a. aus den ihnen zur Verfügung stehenden Daten zu $\Lambda = 8,1 \cdot L_s$. Sehr kleine Wirbel, deutlich kleiner als L_s , tragen ihnen zu folge nicht mehr zum aktiven Impulsaustausch bei.

Ghisalberti und Nepf (2000; 2002; 2008) bestätigen in ihren Untersuchungen an steifen und flexiblen Zylindern sowie Modellseegras aus Kunststoffstreifen die Ergebnisse einer sich ausbildenden Scherschicht über durchströmtem Vegetationsbesatz von Raupach u.a.. Nach ihren Ergebnissen erreichen die Wirbel eine von der Besatzdichte, von der Vegetationsstruktur und von der Reynoldszahl abhängige Eindringtiefe der Wirbelstrukturen. Diese ist proportional zum Widerstand und unterteilt das Vegetationsfeld hydraulisch in zwei maßgebliche Bereiche:

¹LDV: Laser-Doppler-Anemometry

²PIV: Particle-Image-Velocimetry

- Der obere Bereich wird durch die kohärenten Wirbelstrukturen und den damit einhergehenden vertikalen Impuls- und Massenaustausch geprägt. Die lokal hohen Wirbelgeschwindigkeiten verursachen eine Beugung der Pflanzendecke, womit die nach der Frequenz der fortschreitenden Wirbel fortlaufende Wellenbewegung der Pflanzendecke entsteht, wie sie Ikeda u. Kanazawa (1996) bereits beschrieben haben. Dieser Bereich des Vegetationsbesatzes wird damit deutlich durchströmt.
- Im unteren Bereich wird die Turbulenz maßgeblich von der Geometrie der Pflanzenanordnung begrenzt. Die Durchströmung findet deutlich langsamer statt.

Wilson u. a. (2003) untersuchten den Einfluss von Belaubung auf die Strömungstextur und den Widerstand überströmter Vegetation. Sie ermittelten Widerstandskräfte, Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzwerte an einem Besatzfeld flexibler Stäbe mit und ohne Farnblatt und konnten zeigen, dass die Pflanzenstruktur ausschlaggebend für Fließgeschwindigkeit und Widerstandsverhalten des Vegetationsbesatzes ist. Das hinzufügen von Blättern erzeugte einerseits einen erhöhten Widerstand und reduzierte Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Besatzes, andererseits treten durch die zusätzliche Oberfläche der Blätter geringere turbulente Schubspannungen auf. Reynoldsspannungen werden nach oben verlagert wodurch der Impulsaustausch ebenfalls einen Versatz nach oben erfährt und innerhalb des Besatzes reduziert wird. Die Eindringtiefe hängt damit vom Maß der Angriffsfläche ab.

Im Gesamten kann aus den Untersuchungsergebnissen geschlossen werden, dass der hydraulische Widerstand überströmter Vegetation folgende funktionale Abhängigkeit aufweist:

$$\lambda_{veg} = f \left(\frac{k}{h}; EI; \frac{H}{h}; Re; a_s; \rho_v \right) \quad (3.11)$$

mit:

ρ_v	Besatzdichte	[m ³ /m ³]
EI	Biegesteifigkeit	[N · m ²]
Re	Reynoldszahl	[-]

Er setzt sich zusammen aus dem Widerstand infolge der Wirbelbildung im Grenzbereich zwischen Pflanzenbesatz und freier Strömung und lokalen Widerständen innerhalb des Pflanzenbesatzes.

3.2.2. Widerstand durchströmter Vegetation und resultierende Strömungseffekte

Durchströmte Vegetation wird hydraulisch zunächst unabhängig ihres Habitus (baumartige oder strauchartige Gewächse, Flexibilität, Belaubung etc.) als Formwiderstand betrachtet, womit der Strömungswiderstand durchströmter Vegetationselemente mittels einer Bilanzierung von Strömungskraft (actio) und Widerstandskraft (reactio) bestimmt werden kann. Zur Substitution der Widerstandskraft eines Formwiderstandes als Widerstandsbeiwert λ sind in der Literatur zwei grundlegende Ansätze bekannt:

Substitution zur Schubspannung

Petryk und Bosmajian (1975) betrachteten den Widerstand eines Vegetationselementes, idealisiert durch einen in der Strömung stehenden Zylinder, als Schubkraft, die auf eine zugeordnete „bewuchsbestandene Grundfläche“ A_g wirkt. Mit der Verwendung der Schubspannungsgleichung aus der Rohrhydraulik:

$$\tau = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3.12)$$

und der Definition, dass die Schubspannung einer Kraft pro Fläche gleichzusetzen ist, wird die Widerstandskraft so zu einer Schubspannung substituiert:

$$\frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{F_d}{A_g} \quad (3.13)$$

Mit Einsetzen der Widerstandskraft eines Festkörpers in der Strömung:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_d \quad (3.14)$$

und Auflösung nach λ ergibt sich der Widerstand nach Petryk u. Bosmajian (1975) zu:

$$\lambda_{veg} = \frac{4 \cdot A_p}{A_g} \cdot c_d \quad (3.15)$$

mit

A_g	Grundfläche	[m ²]
A_p	projizierte angeströmte Fläche	[m ²]
F_d	Widerstandskraft eines umströmten Festkörpers	[N]
c_d	Widerstandsbeiwert	[-]

Kräftebilanzierung

Einige Autoren (Järvelä u. Helmiö, 2004; Schoneboom, 2011) setzen ein Kräftegleichgewicht der haltenden und treibenden Kräfte innerhalb eines Kontrollvolumens, im Folgenden K.V. genannt, an. Unter der vereinfachenden Annahme, dass der Anteil der Wandungsrauheit auf den Gesamtwiderstand vernachlässigbar klein ist und sich der hydrostatische Druck auf beiden Seiten des K.V. ausgleicht, erhält man ein Gleichgewicht zwischen der sohlparallelen Komponente der Gewichtskraft des bewegten Wasservolumens im K.V. und der Widerstandskraft des im K.V. befindlichen Festkörpers:

$$F_G \cdot \cos\phi = F_d \quad (3.16)$$

$$\rho \cdot g \cdot A_g \cdot H \cdot I_E = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A_p \cdot c_d \quad (3.17)$$

mit

$$v^2 = \frac{8}{\lambda} \cdot g \cdot H \cdot I_E \quad (3.18)$$

und Auflösung nach λ ergibt sich:

$$\lambda_{veg} = \frac{4 \cdot A_p}{A_g} \cdot c_d \quad (3.19)$$

mit

F_G Gewichtskraft des Wasservolumens [N]
 H Wassertiefe [m]

Somit führen beide Ansätze zu einem vegetativen Widerstandsbeiwert λ_{veg} der im wesentlichen vom Flächenverhältnis A_p/A_g und dem Formwiderstandsbeiwert c_d abhängt. Grundlage beider Ansätze ist die Formel der Widerstandskraft eines umströmten Festkörpers. Der Ursprung dieser Formel wird im Folgenden näher beleuchtet.

Basis des vegetativen Widerstands: Berechnung der Widerstandskraft eines Festkörpers in der Strömung

In Abbildung 3.2 ist ein der Strömung ausgesetzter Festkörper beliebiger Form dargestellt.

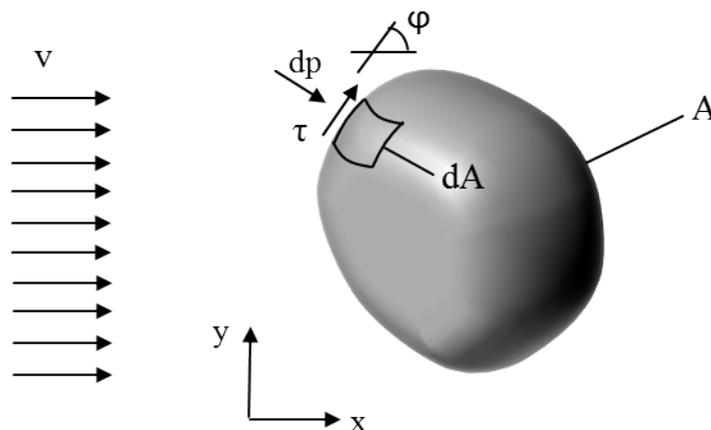


Abbildung 3.2.: Strömungskraft auf ein Festkörperelement.

Die Strömungskraft, die von einem Fluid auf einen Festkörper ausgeübt wird, resultiert aus der Summe des am Körper entstehenden Strömungsdrucks und der Reibung tangential zur Festkörperoberfläche. Gemäß dem dritten Newton'schen Axiom „*actio = reactio*“ entspricht die Widerstandskraft des Körpers der vom Fluid ausgeübten Strömungskraft. Die aus der Strömung resultierende Druckkraft F_p auf eine Einheitsfläche des Körpers der Größe dA ergibt sich aus dem Integral des vektoriellen Druckanteils über die Fläche:

$$F_p = \int p \, dA \cdot \sin \varphi \quad (3.20)$$

Die aus der Strömung resultierende Reibungskraft F_τ auf eine Einheitsfläche des Körpers der Größe dA ergibt sich aus dem Integral des vektoriellen Schubspannungsanteils über die Fläche:

$$F_\tau = \int \tau \, dA \cdot \cos \varphi \quad (3.21)$$

Der Strömungsdruck auf einen Festkörper wirkt auf den senkrecht zur Strömungsrichtung ausgerichteten Oberflächenanteil A des Körpers. Damit ist das System geometrisch abstrahierbar durch eine senkrecht zur Strömung ausgerichtete Platte, deren Fläche der projizierten Fläche des Festkörpers entspricht. In Abbildung 3.3 links ist das so abstrahierte System dargestellt:

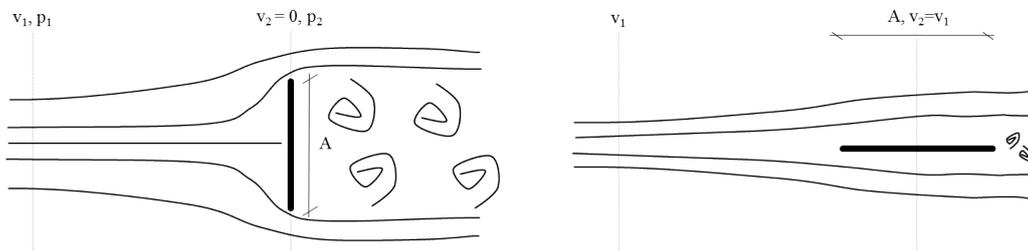


Abbildung 3.3.: Anströmung einer Platte quer (links) und längs (rechts) zur Strömungsrichtung.

Mit der Annahme, dass die Strömungsgeschwindigkeit direkt vor der Platte gleich Null ist, ergibt sich der Staudruck aus dem Differenzdruck zwischen Anströmquerschnitt (1) und Platte (2) zu:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot c_p \quad (3.22)$$

Der Druckbeiwert c_p berücksichtigt die von der Körperform abhängige Druckverteilung am Festkörper und ist abhängig von der Reynoldszahl. Eingesetzt in Gleichung 3.20 und mit $\sin \varphi$ bei $\varphi = 0^\circ$ über die Fläche A integriert kann die Widerstandskraft infolge Druckverteilung am Körper geschrieben werden zu:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_p \quad (3.23)$$

Die aus der Schubspannung an der Oberfläche resultierende Widerstandskraft wirkt auf den Oberflächenanteil des Körpers parallel zur Strömung, womit eine geometrische Abstraktion in Form einer in Strömungsrichtung ausgerichteten Platte möglich ist, wie sie in Abbildung 3.3 rechts dargestellt ist. Mit Einsetzen des Reibungsbeiwertes $c_r = 0,5 \lambda$ als Funktion der Oberflächenbeschaffenheit und Reynoldszahl in die Gleichung der Schubspannung (vgl. Gleichung 3.13) kann die Widerstandskraft infolge Reibung mit $\cos \varphi = 1$ bei $\varphi = 90^\circ$ und Integration über die Gesamtfläche $2 A$ bestimmt werden zu:

$$F_r = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_r \quad (3.24)$$

Aus der Summe beider Widerstandskraftanteile kann also der Gesamtströmungswiderstand eines Festkörpers beschrieben werden mit:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_d \quad (3.25)$$

wobei der Widerstandskoeffizient c_d die Summe der Widerstandsbeiwerte aus Druck c_p und Reibung c_r ist. Für die weitere Betrachtung sollte stets berücksichtigt werden, dass diese Herleitung nur auf Basis der Annahme eines einzelnen Festkörpers physikalisch korrekt ist und dass Effekte, wie Strömungsablösungen, Nachlaufwirbel etc., die stark von der Form des Körpers abhängen, einzig durch den Widerstandskoeffizienten c_d erfasst werden. Zudem basiert die Formel auf der Annahme, dass die wirksamen Flächen für Reibung und Druck von gleicher Größenordnung ist. Der Anwender muss also bei einer Ungleichverteilung der anzunehmenden Flächen situationsbedingt die dominierende Widerstandsursache und deren wirksame Fläche bestimmen.

Adaptionen zur Anwendung auf strauchigen flexiblen Mittelbewuchs

Erste Untersuchungen bezüglich der hydraulischen Auswirkung von durchströmter Vegetation wurden in sehr abstrahierter Form durchgeführt, um grundlegende Effekte der Vegetationselemente auf die Strömung, wie gegenseitige Beeinflussung durch Abschattung und Wellenbildung sowie verschiedene Anordnungsmuster, zu analysieren. Li und Shen (1973) erarbeiteten auf Basis des Kraftansatzes eine mathematische Herleitung zur Berechnung des Massenrückhaltes durch unterschiedlich angeordnete Vegetation anhand Zylinderanordnungen auf deren Basis Petryk und Bosmajian (1975) ihre oben beschriebene Substitution zum Widerstandsbeiwert λ entwickelten. Es zeigte sich, dass eine versetzte Anordnung einen deutlich stärkeren Massenrückhalt aufweist, als reihenartige oder linienförmige Anordnungen. Diese Beobachtung wurde in späteren Untersuchungen mit Zylindern aber auch natürlichen Vegetationselementen bestätigt (Lindner, 1982; Schoneboom, 2011; Nepf, 1999; Schneider, 2010).

Lindner (1982) entwickelte basierend auf Versuchen mit unterschiedlichen Zylinderanordnungen und auch natürlicher Vegetation eine Formel zur Berechnung des Widerstandskoeffizienten eines aus der Strömung ragenden Zylinders innerhalb einer Gruppe weiterer Zylinder in Abhängigkeit von Abstandsparametern und Zylinderdurchmesser, sowie unter Berücksichtigung der Ausbildung von Schwerewellen:

$$c_{wr} = c_{w\infty} \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{d_v}{a_y} \cdot c_{w\infty} \right) \cdot \left(\frac{v_v}{v} \right)^2 + \Delta c_w \quad (3.26)$$

mit

c_{wr}	Widerstandskoeffizient eines in der Gruppe stehenden Zylinders	[–]
$c_{w\infty}$	Widerstandskoeffizient eines einzelnen frei stehenden Zylinders	[–]
d_v	Durchmesser eines Zylinders	[m]
v_v	Fließgeschwindigkeit innerhalb der Gruppe	[m/s]
Δc_w	Widerstandskoeffizient eines Zylinders infolge Verbauung und Schwerewellen	[–]
a_y	Abstand der Vegetationselemente quer zur Hauptfließrichtung	[m]

Die Anwendung dieser Gleichung verursacht durch die Notwendigkeit der Definition von $c_{w\infty}$, Δc_w sowie dem Verhältnis v_v/v Schwierigkeiten in der Übertragung auf reale Vegetationsfelder. Unter der Annahme einer abstrahierten Situation kann der Widerstandskoeffizient eines Einzelzylinders nach Schlichting (2006) mit $c_{w\infty} = 1,0$ angenommen werden. Der Widerstandskoeffizient infolge Verbauung und Schwerewellen jedoch ist abhängig von der Froudezahl sowie den vorherrschenden oberstromigen und unterstromigen Wasserstandsbedingungen. Die größten Schwierigkeiten verursacht jedoch die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit innerhalb der Vegetationsgruppe, die sowohl von der Anordnung als auch von der Dichte der Einzelemente abhängt. Zu dieser Dichtewirksamkeit haben bis heute zahlreiche Autoren Untersuchungen verschiedenster Art durchgeführt. Lindner selbst postulierte, dass die Wellenausbreitung ab einem Verhältnis von $a_x/d > 40$ den Widerstand eines stromabwärts angeordneten Körpers nicht mehr beeinflusst.

Thompson u. Roberson (1976) führten eine Konzentrationskennzahl ein, die den Bedeckungsgrad der Bewuchs bestandenen Fläche definiert, und stellten anhand von Versuchen an Zylinderanordnungen fest, dass die gegenseitige Beeinflussung der Einzelemente ab einer Konzentration von 50% beginnt, so dass das Vegetationsfeld ab diesem Grenzwert als Gruppe betrachtet werden kann. Pasche (1984) nutzte die Erkenntnisse von Schlichting (2006) hinsichtlich der sich ausbildenden Nachlaufzone von einzelnen in der Strömung stehenden Festkörpern und definierte das Verhältnis der relativen Fließgeschwindigkeit v_v/v in Abhängigkeit der Länge und Breite des Nachlaufbereichs. Da diese Größen jedoch wiederum von der Geometrie der umströmten Körper und damit vom Widerstandskoeffizienten des Einzelementes abhängig sind, gestaltet sich die Anwendung auf reale Vegetationsfelder, die der Abstraktion einer Zylinderanordnung nicht nahekommen, schwierig. Pasche löst diese Problematik über eine iterative Rechnung zur Ermittlung des Widerstandskoeffizienten.

Stoesser u. a. (2010) untersuchten das Strömungsfeld einer versetzten Zylinderanordnung unter Variation von Besatzdichte und Stamm-Reynoldszahl Re_s anhand einer Large-Eddy-Simulation und verglichen ihre

Resultate mit Daten von Tanino und Nepf (2008) aus Laborversuchen mit unregelmäßig verteilten starren Zylindern unterschiedlicher Besatzdichte und Zylinder-Reynoldszahl. Beide Untersuchungen zeigten, dass für Stamm-Reynoldszahlen $Re_s < 1000$ der gemittelte Widerstandskoeffizient mit steigender Besatzdichte zunimmt. Untersuchungen von Nepf (1999) bei Stamm-Reynoldszahlen von $Re_s > 200$ zeigen ein gegensätzliches Verhalten des Widerstands mit steigender Besatzdichte.

Tanaka u. a. (2011) untersuchten den Abschattungseffekt auf den Widerstandskoeffizienten bei belaubten und unbelaubten Weiden und Robinien durch Kraftmessungen im Windkanal. Sie zeigten, dass die Größenordnung des Abschattungseffektes auf den Widerstandskoeffizienten nicht nur vom Abstand in Hauptströmungsrichtung, sondern auch von der Oberflächenrauheit der Äste abhängt. Dies zeigte sich vor allem im Verhalten mit steigender Stamm-Reynoldszahl. Bei kleinen Stamm-Reynoldszahlen konnte eine große Wirksamkeit beobachtet werden, mit steigender Stamm-Reynoldszahl reduzierte sich das Ausmaß des Widerstandseinflusses.

Die Abstraktion von Vegetation in Form eines Zylinderbesatzes setzt eine geometrische Regelmäßigkeit der zu betrachtenden Vegetation voraus, die für Strömungen durch den Stammbereich von Baumbewuchs oder durch Röhrichte denkbar sind. Jedoch werden so bei der Widerstandsermittlung von strauchigem Bewuchs viele Parameter der natürlichen Pflanze vernachlässigt, die einen maßgeblichen Einfluss auf das Widerstandsverhalten haben. So spielt die meist hohe Flexibilität mit der einhergehenden Tendenz zur Verformung bzw. Kontraktion mit steigendem Strömungsangriff, sowie die Struktur und das Vorhandensein von Laub eine große Rolle beim Widerstandsverhalten von strauchigem Bewuchs.

3.3. Einfluss vegetativer Parameter auf den Widerstand durchströmter strauchförmiger Vegetation

In Kapitel 2.2 wurde der derzeitige Wissenstand zu den für den Strömungswiderstand maßgeblichen allometrischen Gesetzen wie Biegeverhalten bzw. Steifigkeit aber auch Struktur und Wachstumsformen näher erläutert. Bei genauer Betrachtung der Gleichung 3.25 zur Widerstandskraft eines Festkörpers in der Strömung wird deutlich, dass die Auswirkungen der allometrischen Parameter innerhalb der Faktoren der Widerstand gebenden Fläche A sowie des Widerstandsbeiwertes c_d beschrieben werden müssen, bevor diese Gleichung zur Beschreibung des vegetativen Strömungswiderstands einer durchströmten strauchigen Pflanze angewendet werden kann. So haben sich zahlreiche Autoren mit der Anpassung dieser Gleichung respektive der aus ihr entwickelten Formel zur Beschreibung des vegetativen Widerstandsbeiwertes λ_{veg} an durchströmte strauchartige Pflanzen befasst. Fokus der Untersuchungen liegt einerseits auf dem sogenannten *Streamlining-Effekt*, der eine optimale Anpassung der Pflanze an die Strömung abhängig von ihrer Flexibilität bewirkt, aber auch eine Reduktion der projizierten Angriffsfläche hervorruft. Des Weiteren beleuchten die Untersuchungen die in der Gleichung zur Widerstandskraft zu betrachtende Fläche bei Pflanzenstrukturen. Letztlich wurden die Auswirkungen von Struktur und Verformung auf den Widerstandsbeiwert bzw. die Bemessungsansätze analysiert. Im Folgenden werden diese Untersuchungen näher betrachtet.

3.3.1. Der Streamlining-Effekt

In den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Bemessungsansätzen wurde der Strömungswiderstand biegesteifer Festkörper (Zylinder) betrachtet und Bemessungsansätze unter Berücksichtigung von geometrischen Faktoren, wie Anordnungsparametern etc., entwickelt. Ein maßgeblicher Unterschied der in der Natur vorkommenden Situation zu diesen Ansätzen ist die hohe Flexibilität und damit die signifikante Verformung der Pflanzen unter Strömungsbelastung. In Kapitel 2.2 wurden Untersuchungen zur Flexibilität von holziger Vegetation im Besonderen von Weiden detailliert dargestellt. So zeigte sich, dass die Biegesteifigkeit der Weiden zwar in Größenordnungen zwischen $E = 3,4 \text{ N/m}^2$ und $E = 12,4 \text{ N/m}^2$ angegeben werden kann (Oplatka, 1998; Werth, 1997), aber grundsätzlich von den Skalengesetzen der Allometrie und damit auch von strukturellen und geometrischen Gegebenheiten der Pflanze abhängt (Bertram (1989)).

Mit dem Ziel, die Auswirkungen der Flexibilität auf den Strömungswiderstand genauer zu definieren, untersuchten zahlreiche Autoren die Biegung von Pflanzen unter Strömungsbelastung und zogen Rückschlüsse auf die Quantifizierung. Einige gingen hier zunächst sehr technisch vor, indem sie auf Basis der Biegebalkentheorie die Biegung der einzelnen Pflanzenruten rein physikalisch näher betrachteten. So führten Alben u. a. (2002) Versuche mit biegsamen Glasfasern in einem Seidenfilm durch und ermittelten den dimensionslosen Widerstand aus dem Quotienten von Kraft und E-Modul. Lewandowski (1993) und Chen u. a. (2011) wandten die Biegetheorie direkt auf ein senkrecht in der Strömung stehendes flexibles Vegetationselement in Anlehnung an einen einseitig eingespannten Stab mit Streckenbelastung an. Über eine infinitesimale Betrachtung zeigten sie, dass die Biegung maßgeblich nicht nur von der Größe der angreifenden Strömungskraft und der Biegesteifigkeit des Zweiges selbst, sondern auch vom Verhältnis Wassertiefe zu Vegetationshöhe abhängt.

Zahlreiche Autoren untersuchten das Flexibilitätsverhalten der Pflanzen in der Strömung auf direktem Wege in Versuchsanordnungen in einer Laborrinne respektive in einem Windkanal. Niklas (1999) konzentrierte sich auf das Biegeverhalten der Blätter selbst. Er untersuchte das Verformungsverhalten verschiedener Blattformen unter Strömungsbeanspruchung und zeigte, dass die Verformung stark unter den Spezies variiert. Ungeteilte Blätter, wie die der Weiden, rollen sich nach Niklas zu stromlinienförmigen Tuben, so dass ihr Widerstandsbeiwert mit steigender Strömungsgeschwindigkeit auf $c_d < 0,1$ reduziert wird.

Oplatka (1998) führte Schleppversuche mit unterschiedlichen Strauchweiden durch und ermittelte das Verhältnis der projizierten Vegetationsfläche im belasteten zum unbelasteten Zustand. Es zeigte sich eine exponentielle Abnahme der relativen Fläche. Sand-Jensen (2008) führte die gleichen Versuche mit Macrophyten durch und zeigte, dass die Verformung der Pflanzen ab einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit quasi stagniert und die Widerstandskraft der Pflanze bis zu diesem Schwellenwert infolge der Biegung linear und nicht quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit steigt. Diese Effekte konnten von mehreren Autoren auch für strauchartige Weiden und Pappelzweige bestätigt werden (Freeman u. a. (2000), Vollsinger u. a. (2005), Goreham u. a. (2009), Schneider (2010), Schoneboom (2011) und Blamauer u. a. (2011)).

Auf Basis von Naturmessungen an strömungsbelasteten Strauchweiden an der Drau in Österreich entwickelten Blamauer u. a. (2011) ein Modell zur Definition des resultierenden Pflanzendurchmessers abhän-

gig vom Durchmesser im unbelasteten Zustand, der Pflanzendichte und dem sogenannten *Streamlining-Faktor*:

$$d_{veg,r} = d_{veg} \cdot b_v \cdot \rho_v \quad (3.27)$$

mit

$d_{veg,r}$	resultierender Pflanzendurchmesser	[m]
d_{veg}	Pflanzendurchmesser im unbelasteten Zustand	[m]
b_v	Streamlining-Faktor	[-]
ρ_v	Pflanzendichte	[m ³ /m ³]

Den Streamlining-Faktor ermittelte Blamauer nicht dimensionsrein auf Basis ihrer Resultate in logarithmischer Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit.

Boller u. Carrington (2006) entwickelten ihr Modell anhand dreierlei Beobachtungen des Verformungsfortschritts bei Algen:

1. Mit Beginn der Strömungsbelastung aber bei noch geringen Strömungsgeschwindigkeiten steigt zunächst die angeströmte Fläche, danach richtet sich die gesamte Pflanze stromlinienförmig aus, d.h. die Verformung findet hauptsächlich in Folge der Biegung der Hauptruten durch Zugbelastung statt.
2. Mit zunehmender Belastung geht die Ausrichtung der Pflanze in Kontraktion über, d.h. die Winkeländerung zur Aufrechten Position stagniert, während die Pflanze im Gesamten kompakter wird.
3. Ab einem Schwellenwert der Belastung ist ein Maximum der Verformung der Pflanze erreicht.

Auf Basis dieser Erkenntnisse definierten Boller und Carrington folgenden empirischen Zusammenhang der resultierenden Fläche strömungsbelasteter Pflanzen normalisiert mit der Pflanzenfläche im unbelasteten Zustand:

$$A_n = A_p/A_0 = A_\infty + a_r \cdot e^{-v/\beta_a} \quad (3.28)$$

mit

A_n	normierte Vegetationsfläche	[-]
A_p	projizierte Vegetationsfläche im belasteten Zustand	[m ²]
A_0	projizierte Vegetationsfläche im unbelasteten Zustand	[m ²]
A_∞	normierte Endgröße der projizierten Vegetationsfläche im belasteten Zustand	[-]
a_r	Maß für die Flächenreduktion	[-]
β_a	Koeffizient zur Beschreibung der Steilheit des exponentiellen Abstiegs	[-]

De Langre (2008, 2012) führte Versuche mit flexiblen Körpern unterschiedlicher Dimension durch und untersuchte deren Deformationsverhalten auf Basis der „Reconfiguration“-Gesetze nach Cauchy und Vogel (1984, 1989). Die Cauchy-Zahl gibt das Verhältnis zwischen dynamischem Druck und der Elastizität (dem

E-Modul) an. Unter Einbeziehung des Schlankheitsgrades S , dem Quotienten zwischen der minimalen Querschnittslänge l_p und der maximalen Querschnittslänge L_p des Probekörpers, ergibt die Cauchy-Zahl:

$$C_y = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L_p^3}{E \cdot l_p^3} \quad (3.29)$$

mit

C_y	Cauchy-Zahl	[-]
L_p	maximalen Querschnittslänge eines Probekörpers	[m]
l_p	minimalen Querschnittslänge eines Probekörpers	[m]
E	E-Modul	[N/m ²]

Als dimensionslose Kennzahl ist die Cauchy-Zahl also ein Maß für die Deformation. Gilt $C_y > 1$, ist der Wert des dynamischen Drucks größer als das E-Modul des Probekörpers und es findet eine Deformation des Körpers statt.

Der Vogel-Exponent ε ist ein Maß der Widerstandsreduktion infolge der Deformation eines Probekörpers. Vogel normierte die Widerstandskraft mit dem Quadrat der Fließgeschwindigkeit und zeigte anhand von Versuchen mit unterschiedlichen Blattgeometrien, dass die so normierte Kraft proportional zur Fließgeschwindigkeit mit einem pflanzenspezifischen Exponenten ist (Vogel 1984, 1989):

$$\frac{F}{v^2} \propto v^\varepsilon \quad (3.30)$$

mit

ε	Vogel-Exponent	[-]
---------------	----------------	-------

Über eine Dimensionsanalyse und die Anwendung des Vogel-Ansatzes auf einen quer belasteten Stab, analog zu einem an der Pflanze fixierten Zweig, definierte de Langre u. a. (2012) den theoretischen Vogel-exponenten für Stäbe respektive Pflanzenzweige sowie für ein Bündel aus Stäben zu $\varepsilon = -2/3$. De Langre überprüfte die Anwendbarkeit seines theoretischen Ansatzes auf Pflanzen unterschiedlichster Art über Kraftversuche an unterschiedlichen Pflanzenarten von Gräsern über Wasserpflanzen bis hin zu Holzigen Baumarten in belaubtem und unbelaubten Zustand. Die experimentell erhobenen Vogel-Exponenten variierten zwischen $\varepsilon = -0,50$ und $\varepsilon = -0,81$, für die Schwarzpappel ergab sich im unbelaubten Zustand ein Wert von $\varepsilon = -0,71$ und im belaubten Zustand ein Wert von $\varepsilon = -0,81$.

3.3.2. Die Impuls absorbierende Fläche - Auswirkung der Belaubung auf den Pflanzenwiderstand

Aufbauend auf dem klassischen Ansatz des Strömungswiderstands (vgl. Gleichung 3.25) und der Vorstellung eines klaren geometrischen Aufbaus der Vegetationselemente, verwendeten zahlreiche Autoren die in

Strömungsrichtung gesehen projizierte Fläche zur Ermittlung der vegetativen Widerstandskraft (vgl. Kapitel 3.2.2). Bei strauchartiger Vegetation muss dieser Ansatz überdacht werden, da der Strömungsangriff auf zahlreiche Einzelelemente bestehend aus Blättern und Zweigen, die über die gesamte Pflanze verteilt sind und damit über die projizierte Fläche nicht oder nur teilweise erfasst werden, aufgeteilt wird. Maßgeblicher Faktor dieses Effekts ist das Vorhandensein und die Verteilung des Laubes innerhalb der Pflanze.

Fathi-Moghadam u. Kouwen (1997) berücksichtigten diesen verteilten Strömungsangriff als erste in ihrer Widerstandsermittlung. Zur Ermittlung des Widerstandes der in ihren Versuchen verwendeten Koniferen führten sie die sogenannte Impuls absorbierende Fläche MAA (engl.: momentum absorbing area) ein. Sie bestimmten die Blattfläche mit der Pflanzenhöhe und errechneten den Widerstand auf Basis der gesamten Blattfläche als MAA . Järvelä (2004, 2005, 2006) löste das Problem durch Implementierung des Leaf-Area-Index, in die Widerstandsberechnung, kurz LAI . Dieser gibt als Quotient von einseitiger Blattfläche A_f zu projizierter Grundfläche A_b ein Maß für die Blattdichte und damit den Oberflächenanteil einer Pflanzenkrone an .

Einige Autoren untersuchten den Widerstandsanteil des Laubes auf den Gesamtwiderstand einer Pflanze. Järvelä 2004 ermittelte den Widerstand unterschiedlicher Weidenarten durch Wasserspiegelmessungen und wies auf Basis seiner Versuche einen Anteil des Laubes am Gesamtwiderstand von nahezu 90 % nach. Västilä u. a. (2011) untersuchten den Blattanteil auf den Widerstand der Schwarzpappel durch Kraftversuche und bestätigten die Größenordnung von Järvelä. In Anlehnung an Armanini u. a. (2005) empfehlen sie das Verhältnis von Blattfläche zu Stammfläche A_f/A_s als Definitionsparameter zur Charakterisierung der unterschiedlichen Pflanzenarten. Armanini u. a. führten, wie auch Västila, Kraftversuche durch. Sie ermittelten die Widerstandskraft von Silberweiden in unterschiedlichen Überströmungs- und Belaubungszuständen und zeigten, dass für die Silberweiden natürlicherweise ein Flächenverhältnis $A_f/A_s = 3,5$ vorliegt.

Schoneboom (2011) und Wilson u. a. (2008) zeigten, dass der Blattanteil am Gesamtwiderstand zudem von der vorherrschenden Fließgeschwindigkeit abhängt. So erkannten Wilson u. a. (2008) auf Basis ihrer Versuche eine deutliche Erhöhung des Blattanteils bei kleinen Fließgeschwindigkeiten infolge der zunehmenden Verformung der Blätter, als bei hohen Geschwindigkeiten, wenn die stromlinienförmige Anpassung der Blätter ihr Maximum erreicht hat. Rückschließend aus dem Verformungseffekt konnten Wilson u. a. (2008) zudem zeigen, dass damit der Widerstandsanteil von Nadeln bei Koniferen deutlich höher ist als bei Laubbäumen. Auch Schoneboom (2011) erkannte den Flexibilitätseffekt der Blätter auf den Gesamtwiderstand, seinen Untersuchungen zufolge spielt nicht nur die Blattfläche selbst, sondern auch die Blattdichte eine Rolle. Tanaka u. a. (2011) untersuchten Abschattungseffekte von Weiden und Robinien als Anordnung im Windkanal. Sie stellten eine Zunahme des Abschattungseffekts mit steigender Blattdichte der Pflanzen fest, während ab einem Verhältnis von $A_f/A_s = 5$ kein Zuwachs mehr festgestellt werden konnte, d.h. ab diesem Grenzwert war die Blattdichte so hoch, dass der Gesamtwiderstand einzig durch das Blattwerk entstanden ist.

Vollsinger u. a. (2005) führten Kraftmessungen im Windkanal mit unterschiedlichen Hartholzarten durch und werteten diese nach der Kraft auf die Biomasse aus. Damit entfernten sie sich vom Ansatz der Fläche hin zum Ansatz der Kraft auf die entgegenstehende Biomasse und stellten eine Proportionalität zwischen

dem Gesamtwiderstand und dem Produkt von Biomasse und Fließgeschwindigkeit fest. Gleichzeitig erkannten sie, dass der Widerstand auf die Einheitskronenmasse mit steigender Blattgröße und damit mit steigender Blattfläche zunimmt.

Mit dem Ziel, dem Blattwiderstand selbst detaillierter auf den Grund zu gehen, führten Albayrak u. a. (2012) Widerstandsversuche mit einzelnen Blättern unterschiedlicher Form, Oberflächen- bzw. Randrauigkeit und Steifigkeit durch und werteten das Widerstandsverhalten anhand dieser Parameter wie folgt aus:

- **Form / Rauigkeit:**

Gefiederte Blätter verursachen unabhängig von der Steifigkeit einen größeren Strömungswiderstand als kompakte Blätter, während der Widerstand mit steigender Fließgeschwindigkeit infolge der Verformung abnimmt (vgl. Niklas (1999)). Auch wirkt sich die Verzahnung der Blätter widerstandssteigernd aus. Eine Auswirkung rauer Oberfläche auf den Widerstand konnte erst mit steigender Fließgeschwindigkeit festgestellt werden.

- **Steifigkeit:**

Mit steigender Steifigkeit reduziert sich die Verformung infolge der Strömungsbelastung und damit steigt der Strömungswiderstand der Blätter. Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit sowie zunehmender Steifigkeit der Blätter steigt der Effekt von Strömungsfluktuationen auf den Widerstand, da die Blätter nicht mehr schnell genug auf die veränderte Strömungsbelastung reagieren können.

3.3.3. Bestehende Ansätze zur Implementierung von Flexibilität und Struktur strauchartiger Pflanzen

Aus der phänomenologischen Betrachtung einer unter Strömungsdruck stromlinienförmig ausgerichteten strauchförmigen flexiblen Pflanze wird klar, dass die Beschreibung im klassischen Bemessungsansatz mit der Widerstandskraft eines der Strömung ausgesetzten starren Festkörpers (vgl. Gleichung 3.25) nicht direkt möglich ist. Die projizierte Fläche A_p verändert sich mit steigendem Strömungsdruck und auch der Widerstandsbeiwert c_d , ein Maß der äußeren Form sowie der Oberflächenrauheit des Widerstandskörpers, ändert sich infolge der Verformung der Pflanze. Bisherige Untersuchungen zur Anpassung der Formelwerke konzentrieren sich einerseits auf die konkrete Analyse der funktionellen Abhängigkeiten der Einzelfaktoren der Widerstandskraft, einer dimensionsanalytischen Betrachtung des Systems, sowie quantitativen Implementierung der pflanzenspezifischen Parameter in die klassischen Gleichungsansätze, die im Folgenden näher erläutert werden.

Qualitative Beschreibung der Einzelfaktoren

Einige Autoren untersuchten den Verlauf der Widerstandskraft einer natürlichen Pflanze mit steigender Strömungsgeschwindigkeit (Oplatka (1998), Armanini u. a. (2005), Schoneboom (2011) und Västilä u. a. (2011)). Sie stellten fest, dass unter Annahme der projizierten Fläche der Pflanze im unbelasteten Zustand die Widerstandskraft infolge der steigenden Deformation der Pflanze linear mit der Fließgeschwindigkeit

steigt, $F_d \propto v$. Erst ab einem Schwellenwert der steigenden Fließgeschwindigkeit geht das System wieder nach Gleichung 3.25 „physikalisch richtig“ zur quadratischen Abhängigkeit $F_d \propto v^2$ über.

Weiterhin konzentrierten sich viele Autoren in ihren Versuchsreihen auf das Verhalten des Widerstandsbeiwertes c_d bei steigender Fließgeschwindigkeit. Niklas (1999) stellte einen deutlichen Rückgang des Widerstandsbeiwertes von Einzelblättern mit steigender Strömungsgeschwindigkeit bis $c_d < 0,1$ fest, wobei er die doppelte Blattfläche als angeströmte Fläche in der Gleichung zur Widerstandskraft angesetzt hat. Shucksmith u. a. (2011) untersuchten den Widerstandsbeiwert von Segge und Reet Beständen und stellten fest, dass eine funktionelle Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes sowohl von der Strömung als auch von der Spezies besteht. Ihre ermittelten Werte für Reet schwankten zwischen $0,8 < c_d < 2,3$, während die Werte für Segge im Bereich zwischen $2 < c_d < 10$ lagen. Auch Mayhead (1973) und Johnson u. a. (1982) haben diese funktionelle Abhängigkeit aus ihren Resultaten beschrieben, grundsätzlich stellten sie für den Widerstandsbeiwert von holzigen Baumbeständen eine Reduktion mit steigender Fließgeschwindigkeit auf $c_d < 0,5$ fest, wobei sie wie auch Shucksmith die unbelastete projizierte Vegetationsfläche für ihre Analysen angenommen hatten. Vollinger u. a. (2005) verwendeten in ihren Untersuchungen mit jungen Baumarten die projizierte Vegetationsfläche im belasteten Zustand und konnten aus ihren Resultaten eine Proportionalität des Widerstands mit dem Produkt aus projizierter Fläche und dem Quadrat der Fließgeschwindigkeit feststellen $c_d \propto A_p \cdot v^2$.

Dimensionsanalytische Betrachtung

Kouwen u. Fathi-Moghadam (2000) führten eine Dimensionsanalyse über den funktionellen Zusammenhang aller am Strömungswiderstand einer Pflanze beteiligten Parameter durch. Unter der Annahme, dass das System einer durchströmten Pflanze unabhängig von Reynoldszahl, Froudezahl und Strouhalzahl ist und unter Einbezug der Impuls absorbierenden Fläche MAA von Fathi-Moghadam u. Kouwen (1997) resultierte die Dimensionsanalyse in folgender funktioneller Abhängigkeit:

$$f\left(\frac{\rho \cdot v^2 \cdot h^4}{\xi \cdot EI}, c_d \cdot \frac{A_p}{V} \cdot h\right) = 0 \quad (3.31)$$

mit

V	Pflanzenvolumen	[m ³]
ξ	Deformationsparameter nach Kouwen	[-]

Mit dem Ansatz nach Petryk u. Bosmajian (1975) (vgl. Gleichung 3.19) und experimenteller Parameterbestimmung aus Versuchen mit Koniferen entwickelten sie damit folgende Funktion zur Berechnung des vegetativen Widerstands:

$$\lambda = 4,06 \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{\frac{\xi \cdot E}{\rho}}}\right)^{0,46} \cdot \frac{H}{h} \quad (3.32)$$

Quantitative Implementierungsansätze

Ausgehend von einem mit zunehmender stromlinienförmiger Anpassung der Pflanzen abnehmendem Widerstandsbeiwert bis zu einem Grenzwert, wenn die Pflanze ihre Endposition und Endform erreicht hat, entwickelten Boller u. Carrington (2006) in Anlehnung an ihre Gleichung zur Flächenreduktion (vgl. Gleichung 3.28) eine Gleichung zur Beschreibung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit auf Basis des Vogel-Exponenten:

$$c_n = c_\infty + c_r \cdot e^{-\varepsilon/\beta_c} \quad (3.33)$$

mit

c_n	normalisierter Widerstandsbeiwert	[-]
c_∞	Endgröße des Widerstandsbeiwertes im belasteten Zustand	[-]
c_r	Maß für die Reduktion des Widerstandsbeiwertes	[-]
β_c	Koeffizient zur Beschreibung der Steilheit des exponentiellen Abstiegs	[-]

Einsetzen in die Widerstandsgleichung (3.25) ergibt dann:

$$F_{dr} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_p \cdot A_n \cdot c_n \quad (3.34)$$

mit

F_{dr}	reduzierte Widerstandskraft einer Pflanze infolge Biegung	[N]
----------	---	-------

Auch Harder u. a. (2004) nutzten den Ansatz des Vogel-Exponenten zur Beschreibung der Kraftreduktion infolge der stromlinienförmigen Ausrichtung der Pflanzen. Mit dem Ansatz:

$$A_p = \frac{A_0}{v^{-\vartheta}} \quad (3.35)$$

definierten sie die Gleichung der reduzierten Widerstandskraft zu:

$$F_{dr} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_d \cdot A_0 \cdot u^{2+\vartheta} \quad (3.36)$$

Järvelä (2004) passte den Ansatz des vegetativen Widerstandsbeiwertes nach Petryk u. Bosmajian (1975) (vgl. Gleichung 3.15) durch Substitution und Implementierung vegetationsspezifischer Parameter an die Si-

tuation einer überströmten flexiblen Pflanze an. Zunächst nutzte er den Leaf-Area-Index, kurz LAI, und ersetzte die Blattoberfläche durch die projizierte Fläche der Pflanze im unbelasteten Zustand. Zusätzlich führte er einen Deformationsparameter α ein, der sich aus der Strömungsgeschwindigkeit und einem Vegetationsparameter χ wie folgt definiert:

$$\alpha = \left(\frac{v}{v^\chi} \right)^\chi \quad (3.37)$$

mit

α Deformationsparameter nach Järvelä [–]
 χ Vegetationsparameter nach Järvelä [–]

Einsetzen in die Gleichung des vegetativen Widerstandsbeiwertes 3.15 ergibt damit den vegetativen Widerstand nach Järvelä:

$$\lambda = 4 \cdot c_{d\chi} \cdot LAI \cdot \alpha \cdot \frac{H}{h} \quad (3.38)$$

mit

$c_{d\chi}$ artspezifischer Widerstandsbeiwert nach Järvelä [–]

Im Gesamten wird deutlich, dass die vorgestellten Ansätze die pflanzenspezifischen Eigenschaften zwar über Parameter in ihre Formelwerke implementieren, jedoch sind diese meist als dimensionsloser Beiwert in die Gleichungen eingefügt, womit sie in der Praxis nur schwer bestimmbar sind. Die Diskussion um diese dimensionslosen Parameter in die Widerstandsansätze zur Berücksichtigung der pflanzenspezifischen Eigenschaften zeigt, dass die Pflanze und im Besonderen die Hydraulik um und durch die Pflanze unter anderen Gesichtspunkten betrachtet werden müssen, als durch eine klassische Widerstandsbetrachtung von Festkörpern. Konkret ist eine strauchige Pflanze kein umströmter Festkörper, sondern ein durchströmtes poröses Element, weshalb auch die Hydraulik um und durch ein solches Element unter dem Aspekt der porösen Durchströmung sowie der veränderten Umströmung betrachtet werden sollte. Im folgenden Kapitel wird die Hydraulik durch poröse Medien sowie der Wissensstand zur Anwendung auf die Vegetationshydraulik detailliert betrachtet.

3.4. Hydraulik innerhalb poröser Medien und ihre Anwendung auf durchströmte Vegetation

Die klassische Hydraulik innerhalb poröser Medien findet ihre Anwendung vorwiegend in der Grundwasserhydraulik bzw. in der Hydraulik des hyporheischen Interstitials und damit der Strömung in Medien hoher Packdichte und geringer Porosität. Die Strömung durch solche Medien, die durch Potenzialunterschiede angetrieben wird, ist durch sehr geringe Fließgeschwindigkeiten und laminare Strömungseigenschaften geprägt. Eine Übertragung der Erkenntnisse auf die Hydraulik innerhalb einer strauchigen

Pflanze stellt also vor allem im Hinblick auf die sehr geringe „Packdichte“ und die verhältnismäßig hohen Fließgeschwindigkeiten mit stark turbulenten Eigenschaften eine Herausforderung dar. Bevor im Weiteren auf die Übertragung der bestehenden Bemessungsansätze der porösen Durchströmung auf die Hydraulik einer strauchigen Pflanze eingegangen wird, soll im Folgenden zunächst eine Definition der Begrifflichkeiten und gängigen Bemessungsansätze aufgeführt werden:

Begriffsdefinition

Zum klaren Verständnis der physikalischen Prozesse in einem durchströmten porösen System müssen die Materialeigenschaften in eindeutigen Begrifflichkeiten abgegrenzt werden. Folgende Eigenschaften aus der Hydrogeologie müssen zur Beschreibung der Durchströmung einer strauchigen Pflanze als poröse Strömung klar abgegrenzt werden (Hölting u. Coldewey (2013)):

- Die **Porosität** ϕ ist die Relation vom durchlässigen Volumen zum Gesamtvolumen eines Mediums und damit der Kehrwert des volumetrischen Feststoffanteils:

$$\phi = \frac{V_{ges} - V_{fest}}{V_{ges}} \quad (3.39)$$

mit

ϕ	Porosität	[-]
V_{ges}	Gesamtvolumen eines porösen Mediums	[m ³]
V_{fest}	Feststoffvolumen eines porösen Mediums	[m ³]

- Die **Permeabilität** K ist eine Kennzahl, die auf Basis der Poreneigenschaften die Durchlässigkeit eines porösen Mediums für Flüssigkeiten angibt. Sie muss damit für jedes Medium neu bestimmt werden und wird nach Darcy definiert zu:

$$K = \frac{k_f \cdot \nu}{g} \quad (3.40)$$

mit

K	Permeabilitätskoeffizient	[m ²]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]

- **Anisotropie:** Abhängig von Anordnung respektive Verteilung und geometrischer Form bzw. Ausrichtung der Einzelpartikel eines porösen Mediums kann die Durchlässigkeit richtungsabhängig variieren. Ein isotropes Medium weist keine Richtungsabhängigkeit in der Durchlässigkeit auf, während ein anisotropes Medium richtungsabhängig unterschiedlich durchlässig ist.

3.4.1. Grundlagen der turbulenten Durchströmung poröser Medien

Nach Darcy ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über die Austrittsfläche eines porösen Kontrollvolumens für kleine Reynoldszahlen und damit unter laminaren Bedingungen proportional zum hydraulischen Gradienten entlang des Kontrollvolumens (Bähr und Stephan (2006)):

$$v = -\frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{K}{\eta} \quad (3.41)$$

mit

$$\begin{array}{ll} \Delta x & \text{Einheitsstrecke in x-Richtung} \quad [\text{m}] \\ \eta & \text{dynamische Viskosität} \quad [\text{Ns/m}^2] \end{array}$$

Die Gültigkeit des Darcy Gesetzes (vgl. Gleichung 3.41) ist begrenzt auf Strömungen bis zu $Re = 100$. Mit steigender Reynolds-Zahl infolge größerer Poren dominieren Trägheitskräfte das System, so dass zwischen dem hydraulischen Gradienten und der Strömungsgeschwindigkeit keine lineare Abhängigkeit mehr vorliegt. Zahlreiche Autoren entwickelten Ansätze zur Beschreibung der turbulenten Durchströmung einer körnigen Packung, die auf der Gleichung nach Forchheimer basieren. Dieser erweiterte den Ansatz nach Darcy für große Reynoldszahlen zu:

$$-\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\eta}{K_1} \cdot u + \frac{\rho}{K_2} \cdot u^2 \quad (3.42)$$

wobei die Permeabilitätskoeffizienten K_1 und K_2 geometrieabhängige Konstanten sind, die für jedes System neu definiert werden müssen.

In der gängigen Literatur sowie auch in Modellrechnungen wird die sogenannte „Engelund-Gleichung“ (Engelund (1953)) für die Berechnung des Energieverlustes während der laminaren Durchströmung poröser Medien verwendet:

$$I = \beta_0 \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^3} \cdot \frac{v^2}{g \cdot d_k} \quad (3.43)$$

mit

$$\begin{array}{ll} \beta_0 & \text{Koeffizient zur Berücksichtigung der Kornform} \quad [-] \\ d_k & \text{Korndurchmesser} \quad [\text{m}] \end{array}$$

Wie auch das Darcy-Gesetz ist diese Gleichung jedoch nur für laminare Strömungen anwendbar. In der selben Veröffentlichung leitete Engelund jedoch auch eine Gleichung zur Berechnung des Energieverlustes turbulenter Durchströmung eines porösen Mediums her. Basis hierzu bildet die aus einer Dimensionsanalyse entwickelte Beziehung:

$$I = \beta \cdot \frac{v^2}{g \cdot d_k} \quad (3.44)$$

mit

β Koeffizient zur Berücksichtigung der Kornform und Porosität [-]

Diese Gleichung wird nun verglichen mit der Gleichung für turbulente Rohrströmungen:

$$I = \lambda \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{1}{r_{hy}} \quad (3.45)$$

Abbildung 3.4 zeigt ein Kontrollvolumen einer homogenen Kugelpackung mit Kugeln gleicher Korngröße.

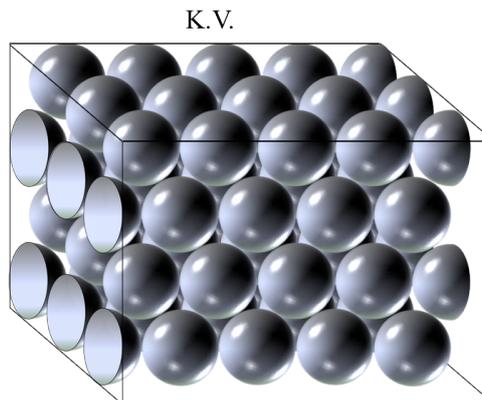


Abbildung 3.4.: Kontrollvolumen einer homogenen Kugelpackung

Mittels einer geometrischen Anpassung der einzelnen Faktoren von Gleichung 3.45 erreichte Engelund die Anwendbarkeit auf das System einer solchen Kugelpackung. Die Oberfläche O einer Einheitskugel ist definiert mit:

$$O = \pi \cdot d_k \quad (3.46)$$

Während das Volumen V_{fest} einer Einheitskugel definiert ist mit:

$$V_{fest} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_k^3 \quad (3.47)$$

Wird die Anzahl der Körner innerhalb des Kontrollvolumens bestimmt zu s , so ist das durch die Körner abgedeckte Volumen $s \cdot V_{fest} = 1 - \phi$. Aufgelöst nach s ergibt dies:

$$s = \frac{1 - \phi}{\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_k^3} \quad (3.48)$$

Die durch alle Körner vorliegende Oberfläche ist $U = s \cdot O$. Mit s aus Gleichung 3.48 ergibt diese dann:

$$U = \frac{1 - \phi}{\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_k^3} \cdot \pi \cdot d_k^2 = (1 - \phi) \cdot \frac{6}{d_k} \quad (3.49)$$

Wird der hydraulische Radius des Systems auf das gesamte Kontrollvolumen bezogen, in dem die Fläche gleich dem Wasserinhalt des Volumens also der Größe der Porosität ϕ gesetzt wird und der hydraulische Umfang gleich der Gesamtoberfläche im Kontrollvolumen ist, so kann dieser definiert werden zu:

$$r_{hy} = \frac{\phi}{U} = \frac{\phi \cdot d_k}{6 \cdot (1 - \phi)} \quad (3.50)$$

Einsetzen in die Gleichung für turbulente Rohrströmung (vgl. Gleichung 3.45) ergibt:

$$I = 3\lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^3} \cdot \frac{v^2}{g \cdot d_k} \quad (3.51)$$

Ein Vergleich mit dem dimensionsanalytisch hergeleiteten Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Energieverlust (vgl. Gleichung 3.44) Engelunds zeigt, dass der dimensionslose Faktor β für vorgegebene Geometrien physikalisch herleitbar ist.

Betz 1926 untersuchte anhand einer Kräftebilanzierung an einem Windrad die maximale Energie, die durch ein frei in der Strömung befindliches permeables Element der Strömung entzogen werden kann und wies nach, dass diese etwa 60% der im Querschnitt herrschenden Strömungsenergie entspricht. Ursache ist die durch die sich einstellenden Druckverhältnisse zusätzliche Umströmung des permeablen Körpers. Die Widerstandskraft infolge der porösen Durchströmung entspricht nach Betz dem Produkt des Massenstroms durch den Körper und der Geschwindigkeitsdifferenz vor und hinter dem Körper (vgl. Abbildung 3.5). Die ankommende Luft produziert einen Staudruck, die Energieentnahme im Körper bewirkt eine Druckreduktion. Die Geschwindigkeit im Körper ändert sich nicht wesentlich, während hinter dem Körper die Geschwindigkeitsenergie so lange in Druckenergie umgesetzt wird, bis die ursprünglichen Druckverhältnisse wiederhergestellt sind.

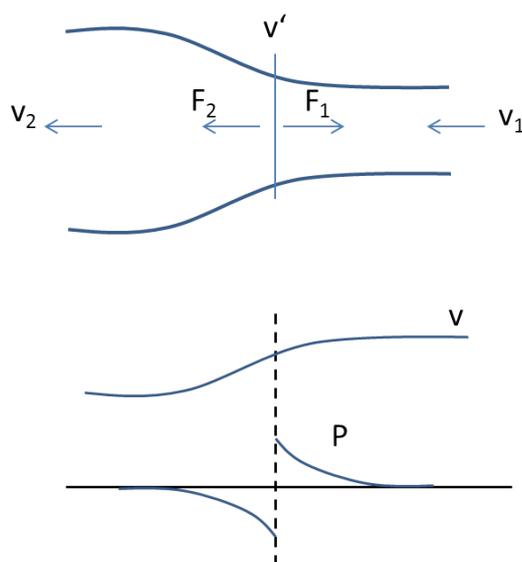


Abbildung 3.5.: Kräftebilanzierung einer Luftströmung durch eine poröse Scheibe, verändert nach Betz (1926)

3.4.2. Untersuchungen zur turbulenten Durchströmung poröser Körper

Nur wenige Autoren beschäftigten sich mit der turbulenten Durchströmung poröser Körper vor allem im Hinblick auf die Beschreibung der vegetativen Durchströmung. Die Untersuchungen beschränken sich einerseits auf eine qualitative Beschreibung porös durchströmter Pflanzen anhand analytische Untersuchungen mit Geschwindigkeitsdaten geometrischer Anordnungen andererseits auf Kraft- und Druckuntersuchungen anhand numerischer Berechnungen:

Ruck und Schmitt (1986) untersuchten mittels Geschwindigkeitsmessungen sowie optischer Auswertung von Strömungsbildern das Strömungsfeld um eine einzelne Pflanze im Windkanal. Sie stellten fest, dass die Strömungsdurchlässigkeit der Pflanze zu einer Verschiebung der charakteristischen Nachlaufwirbel führt. Das freie Durchströmen verhindert eine Strömungsablösung an der Pflanzenoberfläche, die Position der weiter unterstrom entstehenden geschlossenen Wirbelgebiete hängt vom Durchströmungsgrad ab und wandert mit abnehmender Porosität zur Pflanze hin. Diese Effekte konnte auch Gromke (Gromke (2008), Gromke u. Ruck (2008)) bestätigen. Er untersuchte die Strömungsbilder und Widerstandskoeffizienten an Modellbäumen aus unterschiedlichen Materialien im Windkanal und konnte zeigen, dass die teilweise Durchströmung der Pflanze die Konvergenzströmung an der Leeseite deutlich reduziert, dass sich jedoch im Gegensatz zu einem Festkörper am unterstromigen Kronenrand ein großer Bereich turbulenter kinetischer Energie ausbildet. Die Wirbelgrößen in diesem Bereich sind deutlich kleiner als die der Hauptströmung, aber unabhängig von der Packdichte. Ebenso konnte Gromke keine Abhängigkeit zwischen Packdichte und Widerstandskraft identifizieren.

Zinke (2010, 2012) analysierte basierend auf der Gleichung nach Forchheimer sowie Untersuchungen an Gräsern, Segge und Weizen die Anwendbarkeit der bestehenden Methoden zur porösen Durchströmung

auf durchströmte natürliche Vegetation. Sie definierte die Poren-Reynoldszahl Re_p sowie den Porenwiderstandskoeffizienten f_p in Abhängigkeit der Biomasse und dem Leaf-Area-Inex LAI . Aus ihren Daten konnte sie zeigen, dass einerseits die Struktur (in ihrem Fall die vertikale Struktur) eine maßgebliche Rolle spielt aber auch weitere Pflanzeigenschaften, wie beispielsweise die spezifische Oberfläche innerhalb der durchströmten Pflanze, berücksichtigt werden müssen.

Nicolle u. Eames (2011) ermittelten mittels einer 2D-Simulation die Kräfte und Strömungsbilder einer unregelmäßig verteilten Zylinderformation in Abhängigkeit der Besatzdichte. Aus ihren Untersuchungen konnten sie drei Fließregime definieren:

- **Packdichte kleiner als 5%:**

Die Strömungsinteraktion zwischen den Zylindern ist sehr gering, die Kräfte auf die Einzelemente sind vergleichbar denen isolierter Zylinder und das Wirbelbild setzt sich aus schnell dissipierenden Einzelwirbeln hinter den Zylindern zusammen.

- **Packdichte bis 15%:**

Es bildet sich ein lokal stabiles, stationäres Strömungsfeld aus, ohne Unterdruck auf der Rückseite. Im Nachlauf bildet sich eine Scherschicht aus, die weiter unterstrom zusammenbricht und in einer Wirbelstraße mündet.

- **Packdichte größer als 15%:**

Das Strömungsbild wird zunehmend vergleichbar mit dem um einen Festkörper mit leichtem Versatz der Wirbelstraße nach unterstrom.

Rominger u. Nepf (2011) analysierten das Strömungsbild in einer Zylinderanordnung im Detail. Sie führten Geschwindigkeitsmessungen innerhalb und vor einem rechtwinklig angeordneten Zylinderbesatz durch und stellten zunächst in Anlehnung an Nicolle u. Eames (2011) fest, dass die Distanz zur Strömungsregulierung innerhalb des Zylinderbesatzes bei geringer Besatzdichte proportional zur projizierten Zylinderfläche ist, wohingegen sie bei hoher Besatzdichte von der Besatzbreite abhängt. Unterstrom der Regulierungsstrecke wird die Strömungsgeschwindigkeit vom Ausgleich zwischen Druckgradient und Widerstand bestimmt. Romminger u. Nepf teilten die Strömungsregulierung in folgende zwei Teilbereiche:

- **Oberstrom des Besatzes:**

Den Beginn des Strömungseinflusses oberstrom der Besatzdichte definierten Romminger u. Nepf als Distanz L_0 , ab der 10% Geschwindigkeitsdifferenz bis hin zur Besatzkante vorliegt. Bis zur Besatzkante nimmt die Geschwindigkeit kontinuierlich bis zu einem definierten Wert $v_{(x=0)}$ ab, der Druckgradient in dieser Strecke hängt maßgeblich von der Besatzdichte ab und variiert zwischen dem eines Festkörpers bis zu $\Delta p = 0$ bei sehr geringer Dichte. Folgende Gleichung verdeutlicht diese Definition:

$$v(L_0) = v_{(x=0)} + 0,9 \cdot \Delta v \quad (3.52)$$

- **Unterstrom der Besatzkante:**

Der Geschwindigkeitsverlauf innerhalb des Besatzes hängt ebenso maßgeblich von der Besatzdichte ab. Bei dichten Verhältnissen nimmt die Geschwindigkeit asymptotisch bis zu einem Fixwert nahe $v = 0$ ab. Die Distanz L bis zu diesem Fixwert ist abhängig von der Besatzbreite. Bei starker Porosität, also sehr geringer Besatzdichte, nimmt die Geschwindigkeit auch bis nahezu $v = 0$ ab, steigt dann aber wieder und nähert sich asymptotisch einem Fixwert. Die Distanz bis zur minimalen Geschwindigkeit ist einerseits abhängig vom Widerstandsbeiwert der Einzelkörper, aber auch von der Besatzdichte.

Zong u. Nepf (2011) und Chen u. a. (2012) bauten auf den Resultaten von Rominger u. Nepf (2011) auf und untersuchten das Geschwindigkeitsfeld in einem als Zylinder angeordneten Besatz von Einzelzylindern. Beide Autoren setzten den Fokus auf das Geschwindigkeitsfeld unterstrom der Anordnung. Sie bestätigten den bereits von anderen Autoren festgestellten Effekt, dass die Nachlaufströmung infolge der Teildurchströmung des porösen Zylinders zunächst gleichförmig fortgesetzt wird. Die Geschwindigkeit erreicht ihren Minimalpunkt knapp unterstrom des Zylinders und steigt dann im Nachlauf kontinuierlich an, bis weiter unterstrom die Wirbelstraße beginnt (vgl. Abbildung 3.6).

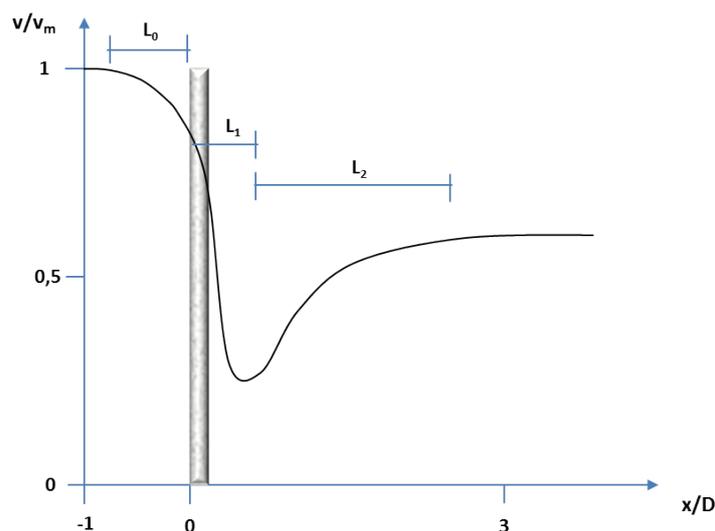


Abbildung 3.6.: Geschwindigkeitsverlauf entlang der mittleren Längsachse durch einen Zylinderbesatz, verändert nach Chen u. a. (2012)

In Anlehnung an Rominger erweiterten sie die Längendefinition der Geschwindigkeitsbereiche um die Längen L_1 und L_2 . L_1 ist die Länge des Geschwindigkeitsanstiegs bis zum Beginn der Wirbelstraße, L_2 ist die Länge der Wirbelstraße bis das ursprüngliche gleichförmige Geschwindigkeitsfeld wieder hergestellt ist. Sowohl die Länge von L_1 als auch die zugehörige Geschwindigkeit ist maßgeblich abhängig von der Porosität des Zylinders (vgl. Abbildung 3.6).

Chen u. a. (2012) erweiterten den Ansatz nach Rominger u. Nepf (2011) der Geschwindigkeitsbereiche. Sie definierten die Längen in Abhängigkeit des Besatzdurchmessers. Weiterhin identifizierten sowohl Zong u. Nepf (2011) als auch Chen u. a. (2012) aus ihren Daten zwei Turbulenzintensitätsspitzen innerhalb des

Nachlaufes: Eine Spitze liegt direkt unterstrom des porösen Zylinders infolge der Turbulenz innerhalb des Besatzes mit kleinen Wirbelgrößen und eine weitere am Ende der Strecke L_1 als Karman'sche Wirbelstraße mit den klassischen periodischen Wirbelsystemen.

Chang u. Constantinescu (2012) führten eine numerische Simulation einer Zylinderanordnung mit 20 % Besatzdichte durch und untersuchten die Auswirkungen der porösen Durchströmung auf den Druckverlauf. Sie konnten zeigen, dass dieser im Vergleich zum klassischen Druckverlauf eines Festkörperzylinders qualitativ ähnlich verläuft, absolut jedoch deutlich gedämpft wird.

3.5. Zusammenfassung des Forschungsstandes und Fazit

Kapitel 2 fasst den derzeitigen Forschungsstand zu den für die vorliegende Arbeit wesentlichen allometrischen Eigenschaften der verwendeten Pflanzen zusammen und zeigt maßgebliche Ansätze zur Definition von Struktur und dynamischer Reaktion auf mechanische Belastung.

Eine der ersten Studien zur altersabhängigen Zusammensetzung von Vegetationsgruppen bildet das Bestandsdichtegesetz nach Reineke. Mit Blick auf die Struktur strauchiger Pflanzen hat sich aus den vorliegenden Untersuchungen gezeigt, dass eine Anwendung des Gesetzes auf die Dichte von Strauchweiden nicht anwendbar ist, da diese artspezifisch unabhängig vom Bestandsalter konstant bleibt, was sich auch in einem vom Bestandsalter unabhängigen LAI widerspiegelt (Reineke (1933), Pretzsch u. Mette (2008), Schneider (2010)). Eine Anwendung des Gesetzes auf mechanische Eigenschaften, wie das Biegeverhalten der Pflanzen, erscheint jedoch auf Basis von Untersuchungen nach Bertram (1989) möglich. Grundsätzlich ist die Pflanzenstruktur und auch das Biegeverhalten der Pflanzen unter Last so angepasst, dass eine optimale Lastverteilung und -abtragung über die Pflanzenstruktur gewährleistet ist (Mattheck (2010)). Der E-Modul von Strauchweiden liegt im Bereich zwischen $E = 3 \text{ kN/mm}^2$ und $E = 12 \text{ kN/mm}^2$ (Oplatka (1998)).

Der Forschungsstand zur hydraulischen Bemessung des vegetativen Strömungswiderstands der strauchigen Weiden ist in Kapitel 3 beginnend mit einem grundsätzlichen Überblick über bestehende Implementierungsansätze in die Fließformeln überströmter und durchströmter Vegetation dargestellt. Weiterführend wird auf Untersuchungen zum Einfluss vegetativer Parameter auf den Strömungswiderstand, wie die Flexibilität und die Pflanzenstruktur, eingegangen. Schließlich wird als neuer Ansatz in der Vegetationshydraulik der Forschungsstand zur Hydraulik durch poröse Medien in ihrer Anwendung auf die Beschreibung auf durchströmte strauchige Pflanzenstrukturen erläutert.

Erste Ansätze zur Widerstandsberechnung überströmter Vegetationsfelder betrachten die Obergrenze des Vegetationsfeldes als raue Oberfläche und gehen von einer versetzten Grenzschicht aus. Auf Basis der gebogenen Pflanzenhöhe wird dann die Rauheit als Oberflächenwiderstand ermittelt (Colebrook u. White (1937), Hey (1979), Kouwen (1988), Darby (1999) und Meroney (1968)). Neuere Untersuchungen führten jedoch zu dem Ergebnis, dass infolge des Knicks im Geschwindigkeitsprofil an der Vegetationsgrenze Wirbel analog zu Kelvin-Helmholtz Scherschichtwirbeln entstehen. Diese führen einerseits zu der als MONAMI bekannten Schwingung der Pflanzendecke und zu Impuls- und Massenaustausch zwischen

freier Strömung und Vegetationsschicht. Der Widerstand des Vegetationsfeldes hängt maßgeblich von der Struktur der Vegetation ab (Ikeda u. Kanazawa (1996), Raupach u. a. (1996), Nepf u. Vivoni (2000), Ghisalberti u. Nepf (2002), Nepf u. Ghisalberti (2008) und Wilson u. a. (2003)).

Durchströmte Vegetation wird in der Hydraulik grundsätzlich als Formwiderstand betrachtet. Basis zur Berechnung des Widerstandes ist die Gleichung zur Widerstandskraft (vgl. Gleichung 3.25) eines Festkörpers in der Strömung, die auf Basis einer Kräftebilanzierung oder mittels Substitution zur Schubspannung zu einem Widerstandsbeiwert umgerechnet in die Fließformeln eingeht. Erste Untersuchungen zur Anwendung der Formel auf strauchigen Mittelbewuchs fanden in sehr abstrahierter Form unter Anwendung von Zylindergruppen statt, um grundsätzliche Effekte, wie Struktur, Anordnung und Besatzdichte auf den Widerstand zu untersuchen. Resultat der Untersuchungen sind komplexe Formelwerke mit zahlreichen zu bestimmenden Parametern, deren Anwendung auf natürliche Pflanzenstrukturen Schwierigkeiten darstellt (Li u. Shen (1973), Petryk u. Bosmajian (1975), Thompson u. Roberson (1976), Lindner (1982), Pasche (1984)). Weiterführende Untersuchungen beschäftigen sich mit der Implementierung charakteristischer Eigenschaften natürlicher Pflanzen in die Formelwerke. Fokus dieser Untersuchungen liegt hier zunächst auf dem sogenannten Streamlining-Effekt, da die Pflanze sich infolge ihrer Flexibilität lastabhängig in die Strömung beugt. Die Analysen sind teils sehr grundlegend und abstrahiert auf Basis der Biegebalkentheorie an Einzelzweigen, zahlreiche Autoren beschäftigen sich jedoch auch mit dem Biegeverhalten der gesamten Pflanze. Diese kommen vorwiegend zu dem Schluss, dass sich die relative Anströmfläche mit steigender Last exponentiell bis zu einem Grenzwert reduziert (Lewandowski (1993), Oplatka (1998), Vollsinger u. a. (2005), Schneider (2010), Boller u. Carrington (2006)).

Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit der Widerstand gebenden Pflanzenfläche und dem Einfluss von Laub auf den Widerstand. Eine strauchige Pflanze bietet der Strömung nicht, wie im grundlegenden Ansatz des Festkörperwiderstands angenommen, eine als Projektion in Strömungsrichtung definierbare Fläche, sondern setzt sich aus zahlreichen veränderlichen Einzelflächen, wie Blattwerk und Astwerk, zusammen. Daher haben zahlreiche Autoren ihre Untersuchungen auf die Auswirkungen des Blattwerks auf den Pflanzenwiderstand ausgerichtet. Einige definierten neue Flächen, wie den LAI oder die MAA in ihren Formelwerken, andere untersuchten den Widerstandsanteil des Laubes am Gesamtwiderstand detailliert und stellten fest, dass der Flexibilitätseffekt der Blätter zu einem abnehmenden Anteil des Laubes mit steigender Last führt und der Widerstand der Blätter selbst grundsätzlich von Blattform, Rauheit und Steifigkeit abhängt (Fathi-Moghadam u. Kouwen (1997), Järvelä (2004, 2005, 2006), Wilson u. a. (2008), Schoneboom (2011), Tanaka u. a. (2011), Albayrak u. a. (2012)).

Bestehende Bemessungsansätze zur Quantifizierung des vegetativen Widerstands basieren auf drei unterschiedlichen Ansätzen. Einerseits wird das lastabhängige Verhalten der Widerstandskraft bzw. des Widerstandsbeiwertes qualitativ beschrieben, diese Untersuchungen verwenden jedoch meist die unbelastete projizierte Fläche der Pflanzen zur Rückrechnung des Widerstandsbeiwertes (Oplatka (1998), Johnson u. a. (1982), Armanini u. a. (2005), Vollsinger u. a. (2005), Schoneboom (2011) und Shucksmith u. a. (2011)). Andere Autoren erarbeiteten eine Gleichung zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes mittels einer Dimensionsanalyse über die am Widerstand beteiligten Strömungs- und Pflanzenparameter λ (Fathi-Moghadam u. Kouwen (1997), Kouwen u. Fathi-Moghadam (2000)). Weitere Studien stützen ihre Ansätze auf einer quantitativen Implementierung der vegetationspezifischen Parameter in die be-

stehenden Formelwerke (Harder u. a. (2004), Järvelä u. Helmiö (2004) und Boller u. Carrington (2006)).

Alle diese Ansätze zu durchströmter Vegetation basieren auf der Annahme, dass der Widerstand einer Pflanze mittels der Gleichung der Widerstandskraft eines Festkörpers beschrieben werden kann. Bei genauerer Betrachtung des Systems zeigt sich, dass eine dem Mittelbewuchs zugeordnete strauchige Pflanze in der Strömung kein rein umströmter Festkörper ist, sondern vielmehr ein turbulent durchströmtes poröses Element darstellt. Nur wenige Untersuchungen greifen diesen Sachverhalt auf und beschäftigen sich mit der porösen Durchströmung einer Pflanze bzw. eines porösen Besatzes im turbulenten Bereich. Die Studien, zumeist basierend auf Untersuchungen an einem abstrahierten Zylinderbesatz, beschreiben qualitativ das Strömungsbild um und durch einen solchen Besatz. Dieses Strömungsbild zeigt zunächst einen Versatz der klassischen Nachlaufzone nach unterstrom und eine Dämpfung des Druckverlaufes im Längsschnitt der durchströmten Pflanze im Vergleich zu einem umströmten Festkörper. Das Ausmaß des Nachlaufversatzes und auch der Druck und Geschwindigkeitsverlauf hängen maßgeblich von der Besatzdichte, also der Porosität, und der Struktur des Besatzes ab (Ruck u. Schmitt (1986), Gromke u. Ruck (2008), Nicolle u. Eames (2011), Rominger u. Nepf (2011), Zong u. Nepf (2011) und Chen u. a. (2012)).

Zusammenfassend zeigt sich, dass zur Beschreibung und Bemessung des Widerstands strauchiger Vegetation zahlreiche Ansätze aufgestellt wurden. Diese sind jedoch meist mit schwer definierbaren Parametern und damit einer sehr komplexen Anwendung verbunden oder gelten nur für spezielle Anwendungsbereiche. Auch wurden die Untersuchungen mit unterschiedlichsten Pflanzenarten oder abstrahierten Systemen durchgeführt, so dass die Anwendbarkeit auf natürliche strauchige Weiden überprüft werden muss. Der Effekt der Widerstands infolge Durchströmung ist nur wenig beleuchtet. Praxistaugliche verlässliche Bemessungsverfahren zur Quantifizierung des Strömungswiderstands strauchiger Weiden mit Berücksichtigung der allometrischen Eigenschaften stehen damit noch nicht zur Verfügung.

Ziel dieser Arbeit war es daher, mit weiterführenden Untersuchungen die bestehenden Bemessungsansätze zu konkretisieren und für strauchige Weiden anzupassen, aber auch physikalisch zu hinterfragen. Hierzu wird im Folgenden zunächst auf bisherige Ansätze zurückgegriffen und mittels einer direkten Messung der Widerstandskraft und der simultanen Erfassung des Flexibilitätsverhaltens der ausgewählten Weidenarten einerseits ein pflanzenspezifischer Widerstandsbeiwert auf Basis der tatsächlich lastabhängig entstandenen Pflanzenform bestimmt und andererseits das Kontraktionsverhalten genauer untersucht, um eine Anwendbarkeit der bestehenden Formelwerke mit genauer Definition des Produktes von angeströmter Fläche und Widerstandsbeiwert zu ermöglichen. Mit Blick auf die tatsächlich vorliegende hydraulische Situation einer durchströmten Pflanze werden dann detaillierte Untersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld um und durch eine strömungsbelastete strauchige Pflanze vorgestellt, die der Überprüfung der Annahme, dass die Verwendung des Ansatzes der Widerstandskraft auf einen Festkörper für die Berechnung des Widerstands strauchiger Vegetation physikalisch nicht korrekt ist, dienen. Darauf aufbauend wird eine Pilotstudie vorgestellt, die grundsätzliche Anwendbarkeit der porösen Durchströmung in einem numerischen Modell zur Abbildung der Strömung um und durch eine strauchige Pflanze überprüft. Mit einer theoretischen Herleitung des durch die Durchströmung der Pflanzenstruktur hervorgerufenen Widerstands auf Basis des Engelund'schen Ansatzes sowie weiteren Untersuchungen zur porösen Durchströmung definierter Strukturen und Lokalisierung der entstehenden Einzelwiderstände, wird dann die Widerstandskraft einer porös durchströmten Pflanze neu definiert.

Teil II.
Methodik

4. Aufbau und Durchführung der Untersuchungen

Aufbauend auf den in den Kapiteln 2.2 und 3 dargestellten Grundlagen und Untersuchungsergebnissen zum Widerstandsverhalten strauchartiger Vegetation wird im Folgenden die Methodik der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen erläutert. Beginnend bei den Versuchen zur direkten Ermittlung der Widerstandskraft von natürlichen Pflanzen wird auf die Erfassung der Kontraktion und projizierten Vegetationsfläche eingegangen. Weitere Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung um- und durchströmter Pflanzen führen dann zu einer theoretischen Hinterfragung und Anpassung der bestehenden Formelansätze. Aufbauend auf die gewonnenen Erkenntnisse folgen systematische Versuche zur Optimierung der Anwendung der porösen Durchströmung auf strauchartige Pflanzen bis hin zur numerischen Implementierung in 3D-HN-Verfahren.

4.1. Direkte Messung der Widerstandskraft an strömungsbelasteten Weiden

In Kapitel 3 wurde erläutert, dass für die Anwendung der Gleichung zur Widerstandskraft eines Festkörpers in einer Strömung auf strauchartige flexible Pflanzen (vgl. Gleichung 3.22) die Auswirkungen der allometrischen Parameter auf die Widerstand gebende Anströmfläche A der Pflanzen sowie den Widerstandsbeiwert c_d bekannt sein müssen. Wird bei einer strömungsbelasteten Pflanze deren Widerstandskraft direkt gemessen und die wirksame projizierte Fläche in situ erfasst, ist es möglich den Widerstandsbeiwert abhängig von diesen Messwerten zu ermitteln. Im Folgenden wird der Versuchsaufbau zur direkten Messung der vegetationsbedingten Widerstandskraft, sowie das System zur Ermittlung der wirksamen Pflanzenfläche erläutert.

4.1.1. Messsystem

Versuchsrinnen im Theodor-Rehbock-Laboratorium

Zur Durchführung der Versuche standen folgende zwei Strömungsrinnen des Theodor-Rehbock-Wasserbaulabors zur Verfügung:

1. Eine 20 m lange und 1 m breite Rinne, in der eine Wassertiefe von bis zu 0,35 m erreicht werden kann. Die Neigung der Rinne und damit das Sohlgefälle beträgt 0,18%. Der Zulauf der Rinne erfolgt

über eine Pumpe, die das Wasser aus dem Tiefbehälter des Labors zunächst in einen Hochbehälter und von dort über zwei Rohrleitungen, gesteuert mit je einem Schieber, in ein Beruhigungsbecken fördert. Jedes Zulaufrohr verfügt über einen magnetisch-induktiven Durchflussmesser (Firma Fischer-Porter). Aus dem Beruhigungsbecken fließt das Wasser durch einen Gleichrichter, bestehend aus aneinandergefügten PVC-Rohren mit je 1 cm Durchmesser. Am Ende der Rinne findet in Form verstellbarer Lamellen die Wasserstandsreglung statt. Das Wasser gelangt von dort über einen Ablauf in den Tiefbehälter und wird so dem Kreislauf wieder zugeführt. Die Rinne selbst ist vollständig aus Plexiglas-elementen hergestellt, so dass das Fließgeschehen in der Rinne von allen Seiten beobachtet werden kann.

2. Eine 24 m lange und $0,60\text{ m}$ breite Rinne, in der eine Wassertiefe von bis zu $0,60\text{ m}$ erreicht werden kann. Die Neigung der Rinne und damit das Sohlgefälle beträgt $0,18\%$. Der Zulauf der Rinne erfolgt über eine Pumpe, die das Wasser aus dem Tiefbehälter des Rinnenkreislaufes in ein Beruhigungsbecken fördert. Das Zulaufrohr verfügt über einen magnetisch-induktiven Durchflussmesser (Firma Fischer-Porter). Aus dem Beruhigungsbecken fließt das Wasser durch einen Gleichrichter, bestehend aus einer Lochplatte mit je $1,5\text{ cm}$ Lochdurchmesser. Am Ende der Rinne befindet sich eine steuerbare Wehrklappe, die den Unterwasserstand regelt. Das Wasser gelangt von dort über einen Ablauf in den Tiefbehälter und wird so dem Kreislauf wieder zugeführt. Die Rinne selbst verfügt über verglaste Seitenwände und eine Stahlsohle.

Aufbau und Funktionsprinzip des Kraftaufnahmesystems

Zur direkten Messung der Widerstandskraft wurde am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT im Rahmen einer Diplomarbeit ein Kraftaufnahmesystem entwickelt (Wunder (2008), Wunder u. a. (2009)). Das System basiert auf einer beidseitig am Rinnenrand gelagerten Rahmenkonstruktion, die die Strömungskraft auf einen Kraftsensor oberhalb des Wasserspiegels überträgt. Abbildung 4.1 zeigt die Rahmenkonstruktion sowie ihre funktionellen Bauteile.

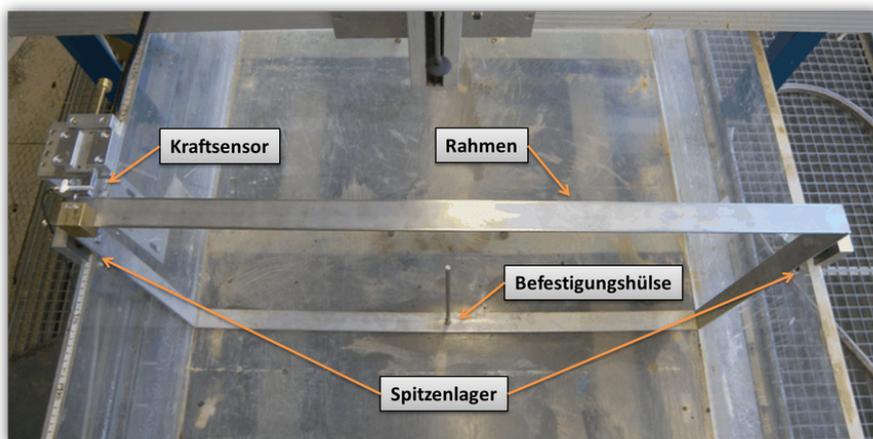


Abbildung 4.1.: Aufbau des Messrahmens in der Laborrinne in der Draufsicht.

Zur Übertragung der auf das zu messende Element einwirkenden Strömungskraft auf den auf der Rinnenwand sitzenden Kraftsensor dient ein rechteckiger Rahmen aus Flachstahl. Die Größe des Rahmens ist soweit an die Querschnittsgeometrie der Rinne angepasst, dass er in einem Abstand von jeweils ca. $0,005\text{ m}$ zur Rinnenwand und Sohle frei beweglich ist, der Strömungswiderstand des Rahmens selbst aber infolge der Wandnähe auf ein Minimum reduziert wird. Die beidseitige Lagerung des Rahmens an der Rinne ermöglicht ein freies Schwingen und damit die direkte Übertragung der Strömungskraft auf den Kraftsensor. Zur Fixierung der Pflanzen wurden an der unteren Kante des Rahmens Hülsen angebracht, die mit einem Durchmesser von $0,01\text{ m}$ etwa dem Stammdurchmesser der verwendeten Pflanze entsprechen. Zur Überprüfung der Rahmenfunktion wurde zunächst mit einer zentrisch angebrachten Hülse gearbeitet, in den weiteren Versuchen wurden fünf Hülsen zur Pflanzenbefestigung verwendet, die in gleichmäßigen Abständen auf der unteren Rahmenseite befestigt wurden. Für die Versuche wurden die Pflanzenzweige jeweils mit zwei Kabelbindern an je einer Hülse befestigt. Überstehendes Material der Kabelbinder wurde entfernt bzw. an der strömungsabgewandten Seite der Hülsen positioniert, um den Einfluss des Befestigungsmaterials auf den gemessenen Pflanzenwiderstand auf ein Minimum zu reduzieren.

Um eine möglichst unbeeinflusste Übertragung der Widerstandskräfte auf die Kraftmesssonde zu gewährleisten, wird an die Lagerung des Rahmens ein hoher Anspruch auf minimalisierten Reibungswiderstand gestellt. Aus diesem Grund fiel die Wahl auf ein Spitzenlager, das beispielsweise auch bei Waagen Verwendung findet. Das Lager besteht aus einer am Rahmen horizontal befestigten Rahmenachse, die an ihrer Unterseite längs keilförmig bis zum Drehzentrum eingefräst ist. Diese keilförmige Aussparung lagert auf einem an der Oberkante der Rinnenwand senkrecht fixierten Dorn. Somit ruht der Rahmen nur auf den beiden Spitzen der Lagerung an der rechten und linken Rinnenwand, womit die Reibung allein auf die Berührung von Dorn und Keilausschnitt begrenzt ist. Abbildung 4.2 zeigt die Systemskizze des verwendeten Spitzenlagers mit den Einzelbauteilen.

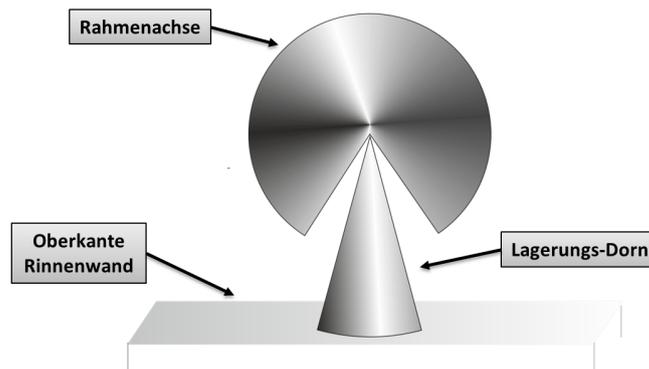


Abbildung 4.2.: Systemskizze des verwendeten Spitzenlagers mit keilförmig eingefräster Achse aus der Seitenansicht.

Zur Erfassung der Widerstandskraft wurde der s-förmige Kraftsensor KD40s der Firma ME Meßsysteme verwendet (vgl. Abbildung 4.3). Die Kraftübertragung von Rahmen zu Sensor findet über einen Anschlagklotz und eine zentrisch am Sensor befestigte Spitze statt. Der Anschlag ist mit dem Rahmen fest verbunden und wird im belastungsfreien Zustand von der Sensorspitze gerade berührt. Zur Einstellung

des Nullpunktes, also der Berührung von Spitze und Anschlag, wurde der Sensor in Fließrichtung horizontal verschieblich eingebaut. Seine Position kann mittels einer Schraube sehr fein eingestellt werden. Die zentrische Krafteinleitung auf den Sensor verursacht eine Verformung des Metalls und damit des Dehnungsmessstreifens, der auf die Sonde aufgeklebt ist. Die Verformung des Messstreifens verändert seinen Widerstand, der als Signal den Messverstärker KWS 3073 (HBM) erreicht und von dort als Kraftwert an die Recheneinheit weitergegeben wird. Der Sensor hat eine Messgenauigkeit von $\pm 1\%$ seines Maximalwertes. Je nach eingesetzter Pflanzengröße und zu erwartender Widerstandskraft wurde ein Sensor mit einem Messbereich von 10 N oder 20 N eingesetzt.

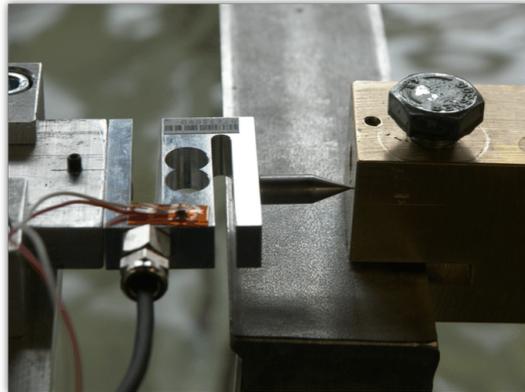


Abbildung 4.3.: Am Kraftaufnahmesystem eingebaute Kraftmesssonde KD40s in der Seitenansicht.

Zur Ermittlung des pflanzenspezifischen Widerstandsbeiwertes aus den Kraftmessungen ist zusätzlich die Erfassung der gemittelten Anströmgeschwindigkeit auf die Pflanze notwendig. Diese wurde zum Einen grob über den Zufluss und die Wassertiefe bestimmt, zum Anderen aber genauer über eine Vielpunktmessung knapp oberstrom der Rahmenposition ermittelt. Hierzu wurde die elektromagnetische Sonde P-EMS der Firma Delft-Hydraulics eingesetzt. Vorteil dieser Sonde ist ihre Robustheit und die Möglichkeit auch innerhalb von Pflanzenstrukturen Geschwindigkeitsdaten zu erfassen, da sich das Messvolumen direkt unterhalb des Sondenkopfs befindet und damit eine Störung des Messsignals durch Äste oder Blätter, im Vergleich zu Sonden mit versetztem Messvolumen, verringert werden kann. Eine detaillierte Beschreibung der Sonde erfolgt in Kapitel 4.2.

Abbildung 4.4 zeigt das System der Kraftübertragung von der Pflanze über die Rahmenkonstruktion zum Sensor in der Seitenansicht. Aus der Skizze wird ersichtlich, dass die direkt gemessene Kraft infolge der Hebelwirkung des Rahmens, abhängig vom Kraftangriffspunkt der resultierenden Gesamtwiderstandskraft der Pflanze über Hebelgesetze umgerechnet werden muss, um die tatsächlich auf die Pflanze wirkende Strömungskraft erfassen zu können. Hierzu ist es notwendig, den resultierenden Schwerpunkt der Kraftangriffsfläche zu kennen. Zur Berechnung des resultierenden Schwerpunktes wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Matlab-Programm entwickelt, das aus fotografischen Aufnahmen der stromlinienförmig ausgerichteten Pflanze aus oberstromiger Richtung deren Flächenschwerpunkt berechnet. In Kapitel 4.1.2 wird das Aufnahmeverfahren zur Ermittlung der projizierten Fläche genauer beschrieben.

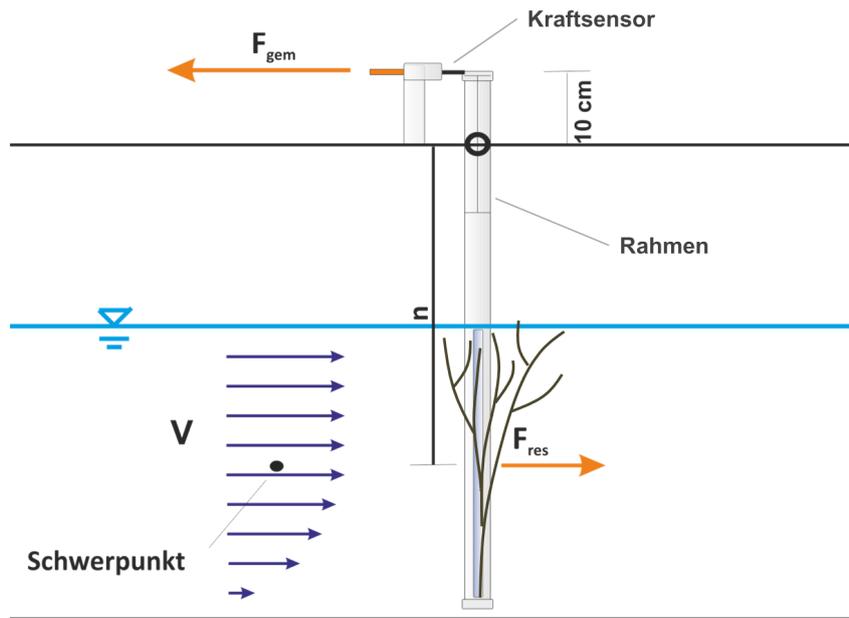


Abbildung 4.4.: Funktionsprinzip des Kraftaufnahmesystems in der Seitenansicht.

Zusätzlich zur Ermittlung der resultierenden Widerstandskraft und deren Kraftangriffspunkt muss die Widerstandskraft des unbesetzten Rahmens für alle Anströmbedingungen ermittelt und von der gemessenen Kraft mit Pflanzenbesatz abgezogen werden. Hierzu wurde ebenfalls ein automatisiertes Umrechnungsverfahren in einem Matlab-Programm entwickelt, das in Wunder (2008) im Detail beschrieben wird. Eine Überprüfung und Kalibrierung des Kraftaufnahmesystems erfolgte anhand von Messungen mit Kreiszyklindern, deren Widerstandsbeiwerte abhängig von Durchmesser und Anströmgeschwindigkeit aus Schlichting u. a. (2006) bekannt sind.

4.1.2. Erfassung der Pflanzenflexibilität: Optische Auswertung der widerstandswirksamen Fläche

Zum Widerstandsverhalten von flexiblen strauchartigen Pflanzen spielt die Pflanzenform, aber auch die Verformung und damit die mit der Last veränderliche projizierte Fläche eine maßgebliche Rolle. Abbildung 4.5 zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Ansatz der klassischen Festkörpergeometrie am Beispiel der für eine Abstraktion von Pflanzen häufig eingesetzten Zylinder zur Geometrie einer strauchartigen Pflanze, deren Fläche nicht über feste Parameter wie Wassertiefe und Durchmesser bestimmt werden kann.

Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung und Analyse des Widerstandsbeiwertes der verformten Pflanzen. Zur Erfassung der tatsächlich wirkenden Widerstandskraft ist die Kenntnis der verformten Geometrie der belasteten Pflanze notwendig (vgl. Kapitel 4.1.1). Sie gibt Auskunft über die von der Strömungsbelastung abhängige Angriffsfläche selbst, sowie über die Position der resultierenden Widerstandskraft aus dem Flächenschwerpunkt der projizierten Fläche. Andererseits steht die Verformung selbst und damit die

mit der hydraulischen Belastung veränderliche widerstandswirksame Fläche im Fokus der Untersuchungen. Diese ist abhängig von der Biegesteifigkeit der Pflanzenzweige, aber vor allem vom Belaubungsgrad und der Laubart der belasteten Pflanze (vgl. Kapitel 3.3). Damit ist es notwendig, die projizierte Vegetationsfläche in der unbelasteten Situation sowie in jeder Lastsituation parallel zur Kraftaufnahme zu erfassen.

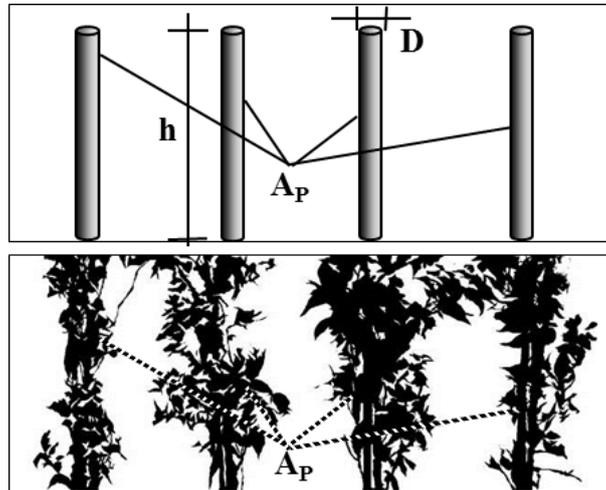


Abbildung 4.5.: Vergleich der wirksamen Angriffsfläche zwischen dem klassischen Zylinderaufbau und realen belaubten Weidensträuchern im Labor.

In Abbildung 4.6 ist die Vorgehensweise der Bildverarbeitung zur Erfassung der widerstandswirksamen Fläche für die drei verwendeten Pflanzenarten *Salix viminalis*, *Salix purpurea* und *Salix alba* dargestellt. Mit der digitalen Unterwasserkamera *Olympus μ 1030SW* wurden die im Versuchsrahmen eingebauten Pflanzen im unbelasteten Zustand, sowie im jeweils belasteten Zustand aus oberstromiger Richtung mit konstantem Abstand von $1,50\text{ m}$ fotografiert (vgl. Abbildung 4.6 oben). Ein Linsenverzerrungstest in Form einer Aufnahme von kariertem Papier mit gleicher Entfernung hat gezeigt, dass die Fehlinformation der Bilder so minimal ist, dass sie im Vergleich zu Fehlern infolge Blattbewegung innerhalb der Strömung, etc. vernachlässigt werden kann.

Weiterhin wurde die Veränderung der resultierenden Pflanzenfläche infolge der Distanz zwischen Linse und gebogener Pflanze untersucht. Je weiter die Kamera vom zu fotografierenden Element entfernt ist, desto geringer fällt dieser dem Strahlensatz folgende Effekt aus. Jedoch wird durch die Lichtabsorption des Wassers, abhängig von der Wellenlänge der Lichtfarbe, die maximal mögliche Distanz zwischen Kamera und zu fotografierendem Objekt begrenzt. So wird der Rotanteil des Lichtes bereits ab einer Distanz von einem Meter vollständig absorbiert (Frei, 2007). Mittels einer Sensitivitätsanalyse über Unterwasser-Aufnahmen der Pflanzen aus unterschiedlichen Distanzen wurde die für die hier beschriebenen Untersuchungen optimale Distanz zwischen Reduktion der Strahlensatz bedingten Flächenverfälschung und Lichtabsorption durch das Wasser innerhalb der Laborbedingungen zu etwa $1,50\text{ m}$ ermittelt. Zur Reduktion der Strömungsbeeinflussung durch das Einsetzen der Kamera in die Strömung, sowie zur festen Ausrichtung der Kamera, wurde eine Fixierungsvorrichtung mit einer Platte und zwei Gewindestäben genutzt, so dass die Linse der Kamera stets zentrisch im Querschnitt des Wasserkörpers positioniert werden konnte.

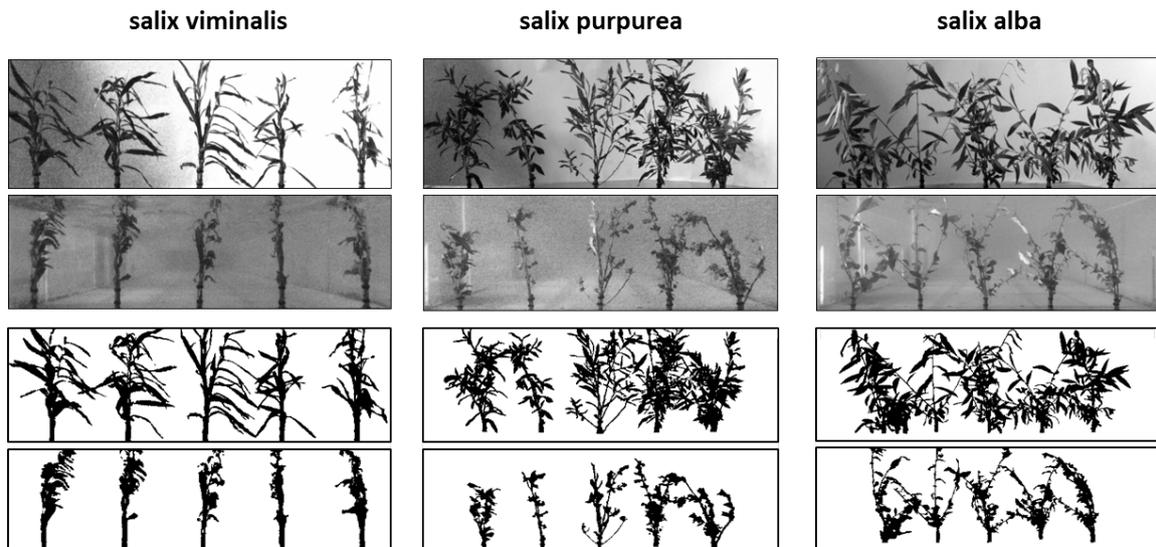


Abbildung 4.6.: Verarbeitung der fotografischen Flächenaufnahmen zu Schwarz-Weiß-Grafiken, die zur Auswertung der wirksamen Fläche sowie des resultierenden Kraftangriffs weiterverwendet werden.

Die so erhaltenen Bilder wurden anschließend entlang der Rinnenwand und der Wasseroberfläche geschnitten und über digitale Bildverarbeitung zu einer 1bit-schwarz-weiß-Grafik verarbeitet, so dass die Pflanzenfläche als schwarze Pixel vor weißem Hintergrund erscheint (vgl. Abbildung 4.6 unten). Über die Kenntnis der Rinnendimensionen und Wassertiefen konnte anschließend mit einem eigens programmierten Matlab-Programm (vgl. Anhang A.1.1), das den Anteil der schwarzen Pixel des Bildes berechnet, die projizierte Vegetationsfläche für jede Aufnahme bestimmt werden. Auf Basis dieser Auswertung konnte dann die aus der hydraulischen Last resultierende Flächenreduktion für jede eingesetzte Spezies direkt ermittelt werden. Ein zweites Matlab-Programm (vgl. Anhang A.1.2) wurde genutzt, um den Flächen-schwerpunkt aus den schwarzen Pixelstrukturen zu berechnen und damit den Hebelarm der resultierenden Widerstandskraft zur Lagerung im Kraftaufnahmesystem zu bestimmen (vgl. Kapitel 4.1.1).

4.1.3. Versuchsdurchführung

Verwendete Pflanzen

Die Auswahl der Versuchspflanzen aus den an mitteleuropäischen Flüssen natürlicherweise vorkommenden Strauchweiden wurde aus allometrischer und ökologischer Sicht in Kapitel 2.1.2 bereits im Detail beschrieben. Ziel war es, mit der Auswahl dreier Strauchweidenarten strukturell ein möglichst breites Artenspektrum der strauchartigen Pionierarten Mitteleuropas abzudecken. Mit *Salix alba*, *Salix viminalis* und *Salix purpurea* wird dieses Ziel weitestgehend erreicht, da sich diese Weidenarten in ihrem Größenwachstum aber auch in struktureller Hinsicht, wie Blattform und Größe, deutlich unterscheiden (vgl. Abbildung 4.7). Eine maßstäbliche Verkleinerung von Pflanzen stellt hinsichtlich ihres Habitus, aber auch des Biegeverhaltens sowie der Laubgröße Schwierigkeiten dar.

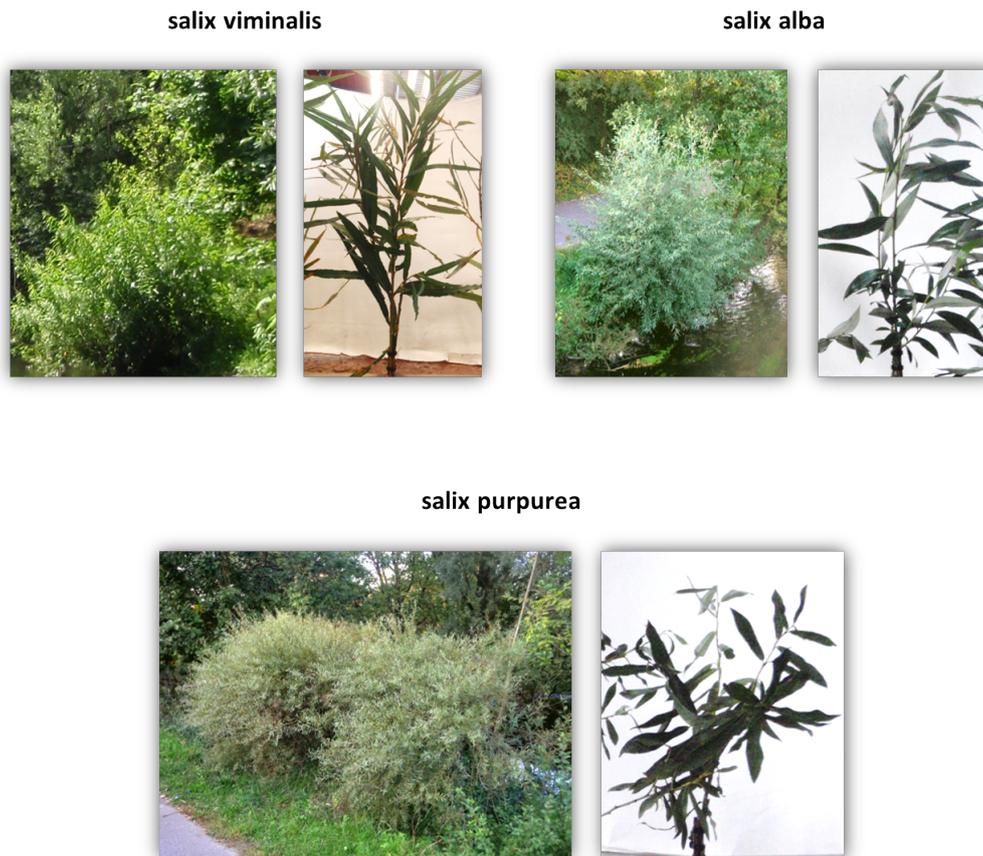


Abbildung 4.7.: Darstellung der Versuchspflanzen.

Infolge der zahlreichen Einflussfaktoren ist eine naturgetreue künstliche Nachbildung der Pflanzen im verkleinerten Labormaßstab derzeit nicht möglich. Dennoch wurde im Rahmen der Versuche Wert darauf gelegt, das natürliche Widerstandsverhalten abzubilden und damit natürliche Pflanzen zu verwenden. Für die folgend beschriebenen Versuche wurden daher zunächst Einzelzweige der entsprechenden Pflanzenspezies an der dem Labor nahe gelegenen Alb frisch geschnitten und als Bündel zu je drei Zweigen an den Hülsen des Rahmens fixiert. Um eine Abschätzung der dennoch vorliegenden Skaleneffekte treffen zu können, wurden die Versuche mit drei abgestuften Pflanzengrößen durchgeführt.

Versuchsprogramm

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die maßgeblichen hydraulischen und pflanzenspezifischen Parameter der Messreihen zur direkten Erfassung der Widerstandskraft der eingesetzten Weidenzweige. Die Versuchsreihen wurden mit jeder Pflanzenart in belaubtem sowie unbelaubtem Zustand durchgeführt, um detaillierte Informationen über den Widerstandsanteil des Laubes zu erhalten. Weiterhin fanden alle Versuchsreihen sowohl im durchströmten Zustand, in dem das Verhältnis von Wassertiefe zu ungebeugter Pflanzenhöhe $H/h = 2/3$ war, sowie im überströmten Zustand, bei dem das Verhältnis zwischen Wassertiefe zu ungebeugter Pflanzenhöhe $H/h = 1$ war, statt.

Tabelle 4.1.: Überblick der maßgeblichen Parameter des Versuchsprogramms zur direkten Messung der Widerstandskraft der Weidenpflanzen

Pflanze	Belaubung	Wassertiefe	Wassertiefe zu ungeb. Pflanzenhöhe	Fließge- schwindigkeit	Stamm- Reynoldszahl	Reynoldszahl
[-]	[-]	H [m]	H/h [-]	v [m/s]	Re _s [-]	Re [-]
<i>Salix alba</i>	belaubt	0,20 - 0,50	1	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix alba</i>	unbelaubt	0,20 - 0,50	1	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix alba</i>	belaubt	0,20 - 0,50	2/3	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix alba</i>	unbelaubt	0,20 - 0,50	2/3	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix viminalis</i>	belaubt	0,20 - 0,50	1	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix viminalis</i>	unbelaubt	0,20 - 0,50	1	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix viminalis</i>	belaubt	0,20 - 0,50	2/3	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix viminalis</i>	unbelaubt	0,20 - 0,50	2/3	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix purpurea</i>	belaubt	0,20 - 0,50	1	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix purpurea</i>	unbelaubt	0,20 - 0,50	1	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix purpurea</i>	belaubt	0,20 - 0,50	2/3	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000
<i>Salix purpurea</i>	unbelaubt	0,20 - 0,50	2/3	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000

Basierend auf den zur Verfügung stehenden Rinnendimensionen konnten die Fließtiefen zwischen $H = 0,2\text{ m}$ und $H = 0,5\text{ m}$ variiert werden. Die Fließgeschwindigkeiten in den Versuchsreihen wurden in Anlehnung an typische Geschwindigkeitswerte der bewachsenen Vorländer und Auen der Mittelgebirge zwischen $v = 0,3\text{ m/s}$ und $v = 0,7\text{ m/s}$ variiert. Für die Untersuchungen wurde Wert auf voll turbulente Strömungsbedingungen, wie sie auch in der Natur vorliegen, gelegt. Die Bestimmung der hierfür maßgeblichen Reynoldszahl bereitet hinsichtlich der Definition der anzusetzenden charakteristischen Länge Schwierigkeiten. Diese sollte so gewählt sein, dass sie ein Maß der aus dem System resultierenden größten Wirbelgrößen gibt. Denkbar sind hier drei maßgebliche Längenwerte: Der Stammdurchmesser der Einzelzweige, der Durchmesser eines Pflanzenbündels, oder aber die Wassertiefe innerhalb der Strömungsrinne. Die in Tabelle 4.1 aufgeführten Reynoldszahlen erfassen mit der Stammreynoldszahl und der Reynoldszahl des Gesamtsystems die daraus resultierende mögliche Bandbreite der maßgeblichen Reynoldszahl.

Die Resultate der Untersuchungen zur direkten Messung der Widerstandskraft sowie deren Analyse sind in Kapitel 5 aufgeführt.

4.2. Untersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld durch und um eine strömungsbelastete strauchartige Pflanze

Die in Kapitel 4.1 aufgeführten Untersuchungen beschäftigen sich mit der Anwendung des Ansatzes des Festkörperwiderstands auf die Beschreibung des Widerstands einer strauchartigen Pflanze in der Strömung. Ziel ist zunächst die Ausarbeitung des Verhaltens der projizierten Widerstandsfläche mit der Strömung sowie des pflanzenspezifischen Widerstandsbeiwertes. Bei genauerer Betrachtung wird jedoch eine strauchartige Pflanze nicht nur umströmt wie ein Festkörper, sondern infolge ihres strukturellen Aufbaus auch durchströmt. An dieser Stelle stellt sich nun die Frage, ob diese Durchströmung das hydraulische Verhalten nicht soweit ändert, dass eine Anwendung der Gleichung zur Widerstandskraft eines Festkörpers nicht mehr physikalisch belastbar angewandt werden kann. Im Folgenden wird der Versuchsaufbau der Untersuchungen zur Durchströmung von strauchartigen Pflanzen beschrieben.

Versuchsaufbau

Für die Erfassung der Geschwindigkeitsverteilung und des Strömungsverhaltens durch und um eine strömungsbelastete strauchartige Pflanze wurde eine einzelne Pflanze in einer Laborrinne zentral am Rinnenboden fixiert und die Strömungsgeschwindigkeiten in einer Langzeituntersuchung innerhalb eines hoch aufgelösten Messrasters erfasst. Hierzu kam die in Kapitel 4.1 beschriebene Laborrinne ($L \times B \times H = 24 \text{ m} \times 0,60 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$) des Theodor-Rehbock-Wasserbaulabors des KIT zur Anwendung. Abbildung 4.8 zeigt die in der Laborrinne eingebaute um- und durchströmte Pflanze aus drei Perspektiven.



Abbildung 4.8.: Durchströmte Pflanze in der Laborrinne in der Frontansicht (a), Seitenansicht (b) und Draufsicht (c).

Zur Untersuchung des Strömungsbildes um eine Pflanze in ihrer Gesamtgeometrie wurde nach einer natürlichen Pflanze gesucht, die einerseits den Dimensionen der Laborinfrastruktur gerecht wird, aber dennoch in ihrem Widerstands- und Biegeverhalten sowie in ihrer Struktur den Weidensträuchern ähnlich ist. Die Verwendung der natürlichen Weiden, wie für die Versuche zur Messung der Widerstandskraft durchgeführt, ist an dieser Stelle nicht möglich, da eine maßstäbliche Verkleinerung der gesamten Weide mitsamt ihrer mechanischen und allometrischen Eigenschaften nicht durchgeführt werden kann. Zudem wurde bereits während der zeitlich kurzen Versuche zur Messung der Widerstandskraft der Weidenzweige

festgestellt, dass die Zweige infolge des Stresses schnell ihre Blätter verlieren. Schneider (2010) analysierte verschiedene Zuchtpflanzen hinsichtlich dieser Kriterien auf die Anwendbarkeit als „Modellweide“ zur Verwendung im Labormaßstab. Sie identifizierte die Zuchtpflanze *Ficus natascha* als am besten geeignet, so dass aufbauend auf der Arbeit von Schneider diese Pflanze für die Untersuchungen im Hinblick auf die Pflanze als Gesamtkörper verwendet wurde (vgl. Abbildung 4.8). Vorteil der Verwendung dieser Pflanze ist vor allem, dass sie dem während der Versuche bestehenden hydraulischen Stress im Gegensatz zu den frisch geschnittenen Weidenzweigen lange Stand hält und damit für die Langzeitversuche zur Geschwindigkeitsverteilung gut geeignet ist.

Zur Verifizierung der Anwendbarkeit dieser Pflanzenspezies für die Laboruntersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld wurden selektive Messungen zur Widerstandskraft der *Ficus natascha* Pflanze durchgeführt und das Widerstandsverhalten mit steigender Belastung mit den ermittelten Daten zur Widerstandskraft der ausgewählten Weiden verglichen. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick dieses Versuchsprogramms, untersucht wurde der überströmte Zustand mit einem Verhältnis von Wassertiefe zu ungebogener Pflanzenhöhe von $H/h = 1$ im belaubten Zustand für die zwei Wassertiefen $H = 0,2\text{ m}$ und $H = 0,35\text{ m}$.

Tabelle 4.2.: Überblick der maßgeblichen Parameter der zusätzlichen Versuche zur direkten Messung der Widerstandskraft der *Ficus natascha* Pflanze

Pflanze	Belaubung	Wassertiefe	Wassertiefe zu ungeb. Pflanzenhöhe	Fließge- schwindigkeit	Stamm- Reynoldszahl	Reynoldszahl
[-]	[-]	H [m]	H/h [-]	v [m/s]	Re _s [-]	Re [-]
<i>Ficus natascha</i>	belaubt	0,20 - 0,35	1	0,30 - 0,70	2.300 - 5.400	70.000 - 230.000

Zur Aufnahme der Geschwindigkeitsdaten im Messraster, das im Folgenden detailliert beschrieben wird, wurde die elektromagnetische Sonde P-EMS der Firma *Delft Hydraulics* verwendet. Der elliptische Messaufnehmer des Typs E30 erzeugt ein magnetisches Feld. Das bewegte Wasser dient als Leiter und induziert eine elektrische Spannung, die mit Hilfe zweier Kontaktpaare, je ein Paar für die Geschwindigkeit in und quer zur Fließrichtung, abgegriffen und an die Recheneinheit weitergegeben wird. Das Messgerät hat laut Herstellerangaben eine Genauigkeit von $\pm 1\%$ vom Messbereich und kann Fließgeschwindigkeiten bis zu $\pm 2,5\text{ m/s}$ aufnehmen. Da sich das Messvolumen der Sonde unmittelbar unterhalb des elliptischen Messaufnehmers befindet, können mit diesem Gerät Messungen bis knapp unter den Wasserspiegel durchgeführt werden. Vorteil dieser Sonde liegt in ihrer Robustheit und in der Möglichkeit durch die direkte Messung am Sondenkopf Fließgeschwindigkeiten auch innerhalb der strauchartigen Pflanze aufnehmen zu können. Optische Verfahren sowie das in Modellversuchen häufig zum Einsatz kommende ADV können in diesem Bereich nicht eingesetzt werden. Nachteil der Sonde ist, dass nur zweidimensionale Geschwindigkeitsinformationen zur Verfügung stehen und infolge des großen Messvolumens keine Turbulenzauswertung möglich ist. Die Aufnahme Frequenz der Sonde beträgt 100 Hz .

Versuchsprogramm

Für die Erfassung einer möglichst detaillierten dreidimensionalen Geschwindigkeitsverteilung um und innerhalb einer strömungsbelasteten strauchartigen Pflanze wurde die Geschwindigkeitsaufnahme in einem engen Messraster durchgeführt. In Abbildung 4.9 ist das Messraster im Versuchsstand als Draufsicht dargestellt. Es besteht aus 19 Querprofilen mit je 17 vertikalen Profilen zu je 15 Messpunkten. Der Nullpunkt des Messrasters befindet sich am Fixierungspin der Pflanze und damit im Stammbereich also am Eintrittsquerschnitt der Strömung in die gebeugte Pflanzenstruktur. Oberstrom des Nullpunktes wurden 3 Querprofile aufgezeichnet. Je nach Belastung und damit Beugung der Pflanze verlaufen etwa 9 bis 10 Querprofile durch die belastete Pflanze und 6 bis 7 unterstrom der Pflanze. Der vertikale Abstand der Profil-Messpunkte betrug $0,01\text{ m}$ beginnend bei $0,01\text{ m}$ über der Sohle bis zu einer Höhe von $z/H = 0,3$ und ab dieser Höhe $0,03\text{ m}$ bis $0,02\text{ m}$ unterhalb des Wasserspiegels. Der laterale sowie longitudinale Abstand der Messprofile betrug konstant je $0,03\text{ m}$. Dieser Verteilung der Rasterabstände wurde unter der Annahme, dass sich infolge der Pflanzenbeugung der wesentliche Effekt der Pflanze auf das Strömungsgeschehen im unteren Drittel der Wassersäule abspielt gewählt. Eine kontinuierliche Verteilung der Rasterabstände mit $0,01\text{ m}$ über das gesamte Messvolumen konnte aus Gründen der daraus resultierenden Gesamtmesszeit nicht realisiert werden.

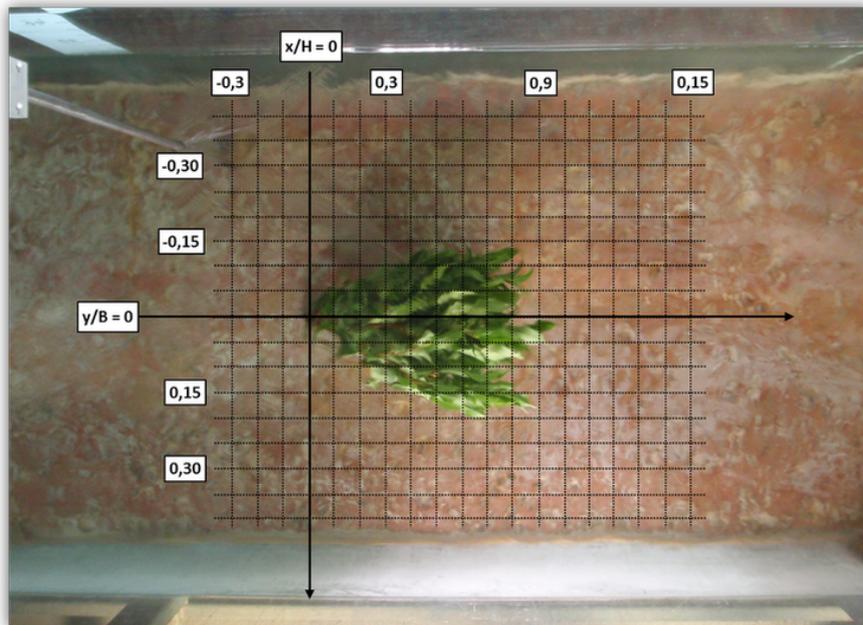


Abbildung 4.9.: Messraster normiert nach der Fließtiefe bzw. Rinnenbreite in der Draufsicht.

Zur Dimensionierung der belasteten Pflanzengeometrie im Vergleich zu den situationsbedingt aufgenommenen Geschwindigkeitsdaten wurde die Pflanze zu jedem Versuch im belasteten Zustand aus drei Perspektiven, Front-, Seiten- und Draufsicht, fotografisch aufgenommen (vgl. Abbildung 4.8). Verwendet wurde hierzu die in Kapitel 4.1 beschriebene Kamera *Olympus μ1030SW*. Die Größenabmessungen der Pflanze innerhalb der Fotografien wurde anhand an der Rinnenwand aufgezeichneten Maßskalen bzw. mittels der bekannten Querschnittsgeometrie der Rinne abgeleitet.

In Tabelle 4.3 ist das Versuchsprogramm zur Geschwindigkeitsaufnahme zusammengefasst. Das Geschwindigkeitsfeld wurde für zwei verschiedene mittlere Fließgeschwindigkeiten von $v = 0,3 \text{ m/s}$ und $v = 0,6 \text{ m/s}$ aufgenommen. Die Aufnahmezeit an jedem Datenpunkt betrug 2 min. Diese Messzeit wurde ermittelt, indem die Abweichung des zeitlichen Mittelwertes verschiedener Messdauern mit dem Mittelwert einer Langzeitmessung an charakteristischen Punkten des Versuchsaufbaus verglichen wurde. Die Messzeit von 2 min ergab das Optimum zwischen Genauigkeit des Mittelwertes und Gesamtmessdauer eines Versuchsdurchlaufes.

Tabelle 4.3.: Überblick der maßgeblichen Parameter des Versuchsprogramms zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung durch und um eine durchströmte strauchartige Pflanze

Nummer	Fließgeschwindigkeit	Pflanzenhöhe	Wassertiefe	Froudezahl	Reynoldszahl
[-]	$v \text{ [m/s]}$	$h \text{ [m]}$	$H \text{ [m]}$	$Fr \text{ [-]}$	$Re \text{ [-]}$
1	0,30	0,30	0,30	0,17	46.000 - 69.000
2	0,60	0,30	0,30	0,35	92.000 - 138.000

Wie auch bei den Kraftversuchen wurde die Pflanzengröße gleich der Wassertiefe gesetzt, so dass das System bei Belastung einer überströmten Pflanze entsprach. Die fotografische Aufnahme der verformten Pflanze wurde bei fünf verschiedenen Fließgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,15 \text{ m/s}$ und $v = 0,75 \text{ m/s}$ aufgenommen. Die Daten wurden für die im Folgenden beschriebenen numerischen Untersuchungen des Systems verwendet. Die Reynoldszahlen bewegten sich je nach mittlerer Fließgeschwindigkeit und Ansatz der charakteristischen Länge zwischen $Re = 23.000$ und $Re = 173.000$ und damit im hydraulisch rauen Bereich mit voll ausgeprägter Turbulenz.

Die Resultate der Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung um eine um- und durchströmte Pflanze sowie deren Analyse sind in Kapitel 6.1 aufgeführt.

4.3. Implementierung der gewonnenen Erkenntnisse in die HN-Modellierung

Auf Basis der Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung im Bereich einer über- und durchströmten Pflanze wurde in einer Versuchsserie untersucht, ob die Durchströmung einer Pflanze und das resultierende Strömungsfeld im Nahfeld der Pflanze über einen Porositätsansatz numerisch simuliert werden kann. Zur Simulation der turbulenten Strömung durch und um die strauchartige Pflanze wurde das 3D-RANS-Modell SSIIM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option) verwendet. Mit diesem hydrodynamisch-numerischen Modell werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) mit einem $k-\varepsilon$ -Modell auf Basis eines kartesischen Koordinatensystems unter Anwendung der finiten Volumen Methode gelöst (Fischer-Antze u. a. (2001)). Die Untersuchungen fanden im Rahmen eines

Forschungsaufenthaltes bei der Computational Fluid Dynamics Group des Georgia Institute of Technology in gemeinsamer Arbeit mit Su Jin Kim und Thorsten Stoesser statt.

4.3.1. Anwendung des Porositätsansatzes in SSIIM

Das Modell SSIIM ist grundsätzlich für Strömungen mit Sedimenttransport und damit für Strömungen im Grenzbereich zwischen freiem Fluid und durchströmtem porösen Medium konzipiert. Die Strömung durch das poröse Medium von Zelle zu Zelle wird über den hydraulischen Gradienten aus dem Engelund-Ansatz berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.4). Grundlage ist hier zunächst die Gleichung für laminare poröse Durchströmung (Engelund (1953)):

$$I = \beta_0 \frac{1 - \phi}{\phi^3} \cdot \frac{v^2}{g \cdot d_k} \quad (4.1)$$

mit

I	hydraulischer Gradient	[-]
β_0	Koeffizient zur Berücksichtigung der Kornform	[-]
ϕ	Porosität	[-]
v	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
d_k	charakteristischer Korndurchmesser	[m]

Der empirische Parameter β_0 wurde seitens des Programm-Autors in Anlehnungen an Engelund (1953) basierend auf Strömungen durch Kornfraktionen auf den Fixwert $\beta_0 = 3.0$ festgesetzt (Olsen u. Stokseth (1995)). Sowohl dieser Fixwert, als auch die Gleichung konnten im Rahmen des Projektes nicht verändert werden. Der charakteristische Korndurchmesser ist innerhalb des Programmes ebenfalls vorgegeben, er korrespondiert mit der lokalen Zellhöhe (Olsen u. Stokseth (1995)). Die Porosität ϕ kann jedoch als veränderlicher Wert in jeder einzelnen Zelle angegeben werden. Diese Option wurde genutzt um eine hydraulische Berechnung der Strömung durch und um eine strauchartige Pflanze zu simulieren, wie sie zuvor in der Laborrinne gemessen worden war.

Zur Bestimmung der Pflanzenporosität wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst wurde die Pflanze in fünf charakteristische Abschnitte geteilt, da von einer ungleichmäßigen Verteilung der Porosität über die Pflanzengeometrie ausgegangen wurde (vgl. Abbildung 4.10). Das Volumen bzw. die Geometrie der einzelnen Abschnitte wurde aus den in den Versuchen zu jedem Lastfall aufgenommenen Fotos der Pflanze aus drei Perspektiven ermittelt (vgl. Abbildung 4.8). Es diente einerseits der Volumenbestimmung innerhalb des Rechengitters und andererseits zur Bestimmung der Porosität in den unterschiedlichen Lastzuständen. Der innerhalb der Abschnittsvolumina befindliche volumetrische Pflanzenanteil wurde über Zählung von Blättern und Zweigen sowie die Bestimmung der Einzelvolumina ermittelt, so dass die Porosität über folgenden Zusammenhang berechnet werden konnte:

$$\phi = 1 - \frac{s_b \cdot V_b + s_z \cdot V_z}{V_{ges}} \quad (4.2)$$

mit

s_b	Anzahl Blätter	[-]
s_z	Anzahl Zweige	[-]
V_b	mittleres Volumen eines Blattes einer Pflanze	[m^3]
V_z	mittleres Volumen eines Zweiges einer Pflanze	[m^3]
V_{ges}	Gesamtvolumen der porösen Pflanze	[m^3]

Die erste Reihe in Abbildung 4.10 zeigt eine schwarz-weiß Grafik der unbelasteten Pflanze in der Draufsicht (Abbildung 4.10 links oben), die diskretisierte projizierte Pflanzenfläche der belasteten Pflanze in der Frontansicht für eine Belastung von $v_m = 0,3 \text{ m/s}$ (Abbildung 4.10 Mitte oben), sowie die diskretisierte projizierte Pflanzenfläche der belasteten Pflanze in der Draufsicht für eine Belastung von $v_m = 0,3 \text{ m/s}$ (Abbildung 4.10 rechts oben) mit den eingezeichneten fünf charakteristischen Porositätsabschnitten.

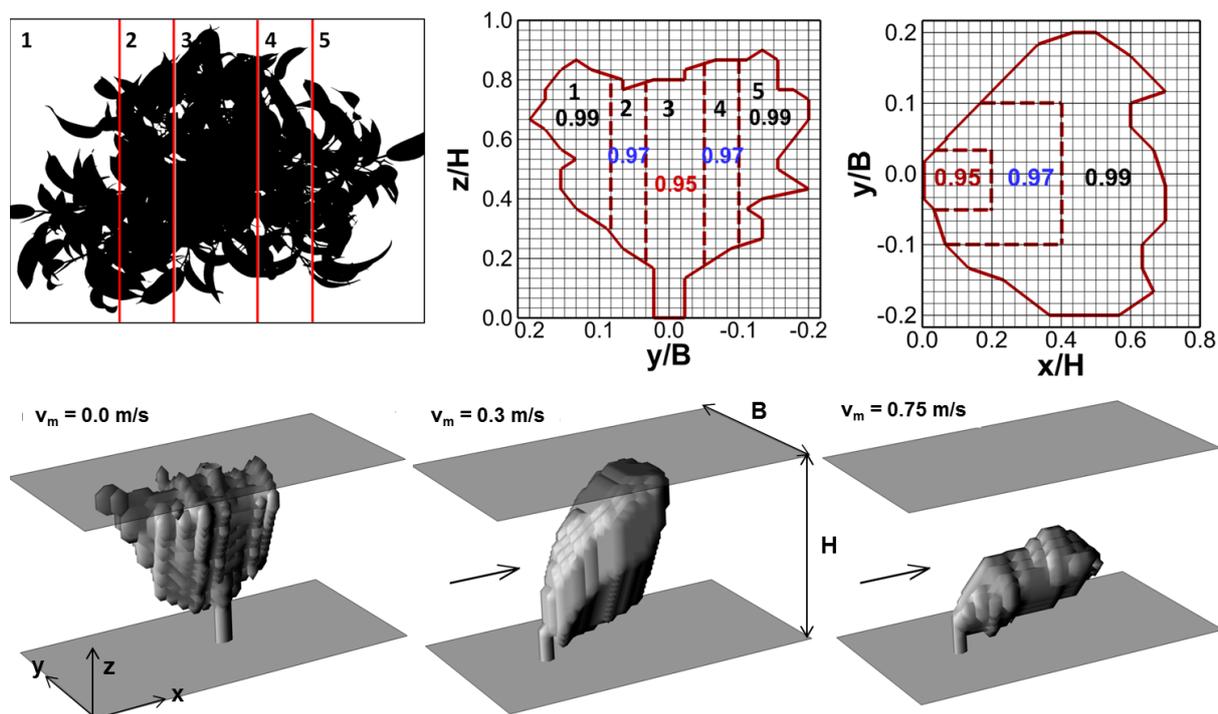


Abbildung 4.10.: Diskretisierung der Pflanze für die numerische Modellierung aus den innerhalb der Versuche aufgenommenen Flächen der jeweils belasteten Pflanze sowie Implementierung der Pflanzenporosität in das Berechnungsgitter.

Für jeden einzelnen Abschnitt wurde die Porosität aus der Volumenermittlung jedes einzelnen Lastfalls bestimmt, um die Flexibilität und damit die von der Belastung abhängige Kontraktion der Pflanze bei der Porositätsbestimmung für jeden Lastfall zu berücksichtigen. In der zweiten Reihe von Abbildung 4.10 ist die gesamte Pflanze als diskretisiertes Volumen für die Fälle der unbelasteten Pflanze, der belasteten Pflanze bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v_m = 0,3 \text{ m/s}$ und der belasteten Pflanze bei der maximal untersuchten mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v_m = 0,75 \text{ m/s}$ dargestellt. Die simulierten Belastungsfälle werden im folgenden Kapitel beschrieben sowie in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Tabelle 4.4 gibt einen beispielhaften Überblick über die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Porosität der Versuchspflanzen mit Porositätsdaten der einzelnen Abschnitte, sowie als Summe.

Tabelle 4.4.: Zusammenfassung der abschnittswisen Porositätsermittlung aus der Pflanzengeometrie.

	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4	Abschnitt 5	Σ
$s_z \cdot V_z$	0.677	13.155	70.774	12.767	1.390	98.722
$s_b \cdot V_b$	1.937	3.925	6.474	2.804	1.631	16.771
V_{ges}	574.0	656.5	1420.5	768.0	993.0	4412.0
ϕ	0.996	0.974	0.946	0.980	0.997	0.974

4.3.2. Aufbau des numerischen Modells, Randbedingungen und Kalibrierung

Grundlage der vorgestellten Modellierung der Strömung um eine belastete strauchartige Pflanze mit Hilfe des Porositätsansatzes sind die Versuche zur Geschwindigkeitsverteilung, wie sie in Kapitel 4.2 beschrieben sind. Daher wurde der Versuchsaufbau aus diesen Untersuchungen als Vorlage des numerischen Setups gewählt. Der modellierte Bereich umfasst $12 \text{ m} \times 0.60 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}$ in x-, y- und z-Richtung, das Gitter besteht aus 380.091 Gitterpunkten. In vertikaler sowie in lateraler Richtung wurde eine einheitliche Zelleinteilung gewählt, während das Gitter in Strömungsrichtung außerhalb des Pflanzenbereiches gestreckt wurde.

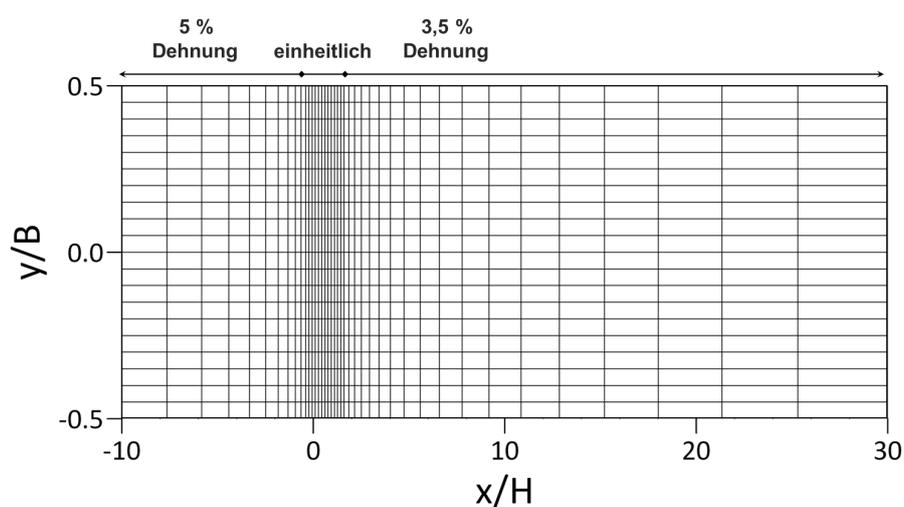


Abbildung 4.11.: Aufbau des Berechnungsgitters für die numerische Simulation.

In Abbildung 4.11 ist eine Draufsicht des Gitters dargestellt, zu sehen ist jede fünfte Gitterlinie in Strömungsrichtung und jede dritte Gitterlinie in lateraler Richtung. Die Randbedingungen des Modells sind bestimmt über eine *Dirichlet*-Bedingung am oberstromigen Modellrand mit vorgegebenem Durchfluss und eine *von Neumann*-Bedingung am unterstromigen Modellrand für alle Variablen. An der Fluidgrenze des freien Wasserspiegels kam eine *Slip*-Bedingung zur Anwendung. Die Rauheit der Seitenwände und der Sohle wurden über Wandgesetze innerhalb der jeweils ersten Zelle berücksichtigt, so dass die Rauheit durch Definition des Strickler-Beiwertes kalibriert werden konnte. Die Kalibrierung erfolgte über den Vergleich gemessener und modellierter Geschwindigkeitsprofile in Strömungsrichtung in der unbesetzten Rinne für die zwei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten $v_m = 0.30 \text{ m/s}$ und $v_m = 0.60 \text{ m/s}$. Abbildung 4.12 zeigt die Resultate der Kalibrierung des Basismodells. Überprüft wurde einerseits der anzusetzende Strickler-Beiwert sowie die notwendige Gitterauflösung.

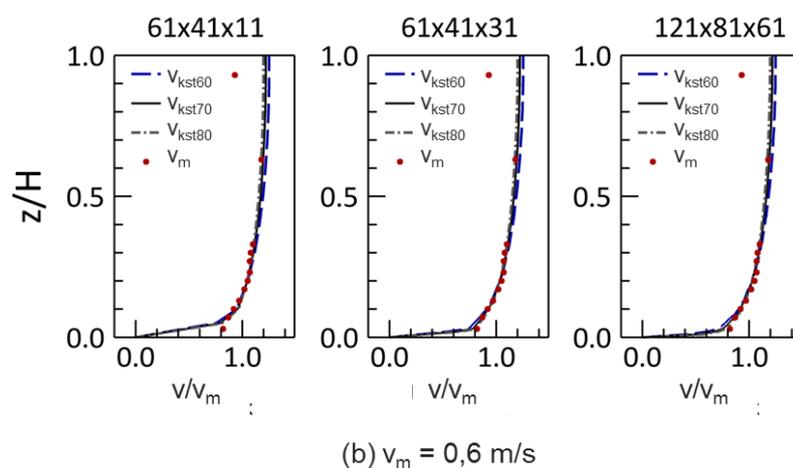
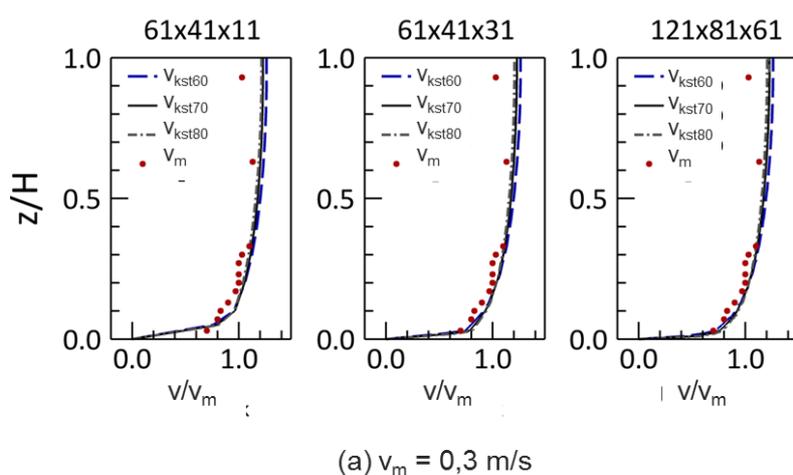


Abbildung 4.12.: Gerechnete Geschwindigkeitsprofile in der Mitte der simulierten Rinne für drei Gitterauflösungen mit drei Strickler-Beiwerten ($k_{st} = 60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, $k_{st} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und $k_{st} = 80 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) im Vergleich zu gemessenen Profilen in der Mitte der Laborrinne.

Die Abbildung zeigt die vertikalen Geschwindigkeitsprofile der gemittelten Fließgeschwindigkeit in Strömungsrichtung in der Mitte der Rinne für drei überprüfte Gitterauflösungen in x-, y- und z-Richtung (grob: $61 \times 41 \times 11$), (fein: $61 \times 41 \times 31$) und (sehr fein: $201 \times 61 \times 31$). Innerhalb dieser Gitterauflösungen wurden die Geschwindigkeitsprofile mit den drei Strickler-Beiwerten $k_{st} = 60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, $k_{st} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und $k_{st} = 80 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ modelliert und jeweils mit den gemessenen Geschwindigkeitsdaten verglichen (vgl. Abbildung 4.12 rote Punkte). Die Resultate der Modellierung zeigen für alle Fälle eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass sowohl die Wahl der Gitterauflösung als auch die Wahl des Strickler-Beiwertes einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Modellierungsergebnisse haben. Im Falle der Gitterauflösung spielt lediglich die vertikale Punktdichte eine Rolle, um eine Unterschätzung der Geschwindigkeit im wandnahen Bereich zu vermeiden, wie sie für die grobe Auflösung im Profil erkennbar ist. Eine weitere Abweichung der Modellwerte von den Messergebnissen zeigt sich für alle Varianten in der Nähe des Wasserspiegels. Diese ist zurückzuführen auf Sekundärströmungen innerhalb der Laborrinne, die in einem isotropischen Turbulenzmodell wie einem Standard- $k-\varepsilon$ Modell nicht nachgebildet werden können. Aufbauend auf den Resultaten der Kalibrierung wurde für die weitere Modellierung das feine Gitter und ein Strickler-Beiwert von $k_{st} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gewählt.

Tabelle 4.5 gibt einen Überblick über die simulierten Strömungszustände. Das Berechnungsprogramm ist angelehnt an das Bemessungsprogramm zur Geschwindigkeitsverteilung (vgl. Tabelle 4.3), jedoch mit erweiterten gestaffelten Fließgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,15 \text{ m/s}$ und $v = 0,75 \text{ m/s}$ und einer konstanten Wassertiefe von $H = 0,30 \text{ m}$. Die Geometrie der je nach Lastzustand ausgerichteten Pflanze wurde, wie oben beschrieben, für jeden Lastfall aus den Fotografien aus Front- und Seitenansicht sowie Draufsicht ermittelt.

Tabelle 4.5.: Überblick der modellierten Strömungszustände in SSIIM

Nummer	Fließgeschwindigkeit	Wassertiefe	Froudezahl	Reynoldszahl
[-]	$v \text{ [m/s]}$	$H \text{ [m]}$	$Fr \text{ [-]}$	$Re \text{ [-]}$
1	0,15	0,30	0,09	23.000 - 35.000
2	0,30	0,30	0,17	46.000 - 69.000
3	0,45	0,30	0,26	69.000 - 104.000
4	0,60	0,30	0,35	92.000 - 138.000
5	0,75	0,30	0,44	115.000 - 173.000

Die Resultate zur Implementierung der gewonnenen Erkenntnisse in die HN-Modellierung sowie deren Analyse sind in Kapitel 6.2 aufgeführt.

4.4. Theoretische Hinterfragung zur Anwendung bestehender Formelwerke poröser Durchströmung auf den Strömungswiderstand strauchartiger Vegetation

Ziel dieser Arbeit ist die Ausarbeitung einer physikalisch fundierten Beschreibung der hydraulischen Prozesse bei der Durch- und Umströmung einer strauchartigen Pflanze unter Reduktion der in den derzeit zur Verfügung stehenden Berechnungsansätzen angewandten Abstraktionen. In Kapitel 4.1 wurde ein Versuchsansatz beschrieben, der auf der bisherigen Abstraktion der Widerstandsberechnung einer Pflanze unter Anwendung der Widerstandskraft eines Festkörpers in der Strömung aufbaut und versucht, die maßgeblichen Parameter über direkte Messung und Rückrechnung an die Situation der Pflanze anzugleichen. Bei näherer Betrachtung der hydraulischen Gegebenheiten einer durchströmten strauchartigen Pflanze zeigt sich jedoch, dass die Annahme der Pflanze als Festkörper physikalisch und hydraulisch nicht korrekt ist. Abbildung 4.13 zeigt in einer schematischen Darstellung einen Vergleich der hydraulischen Strömungscharakteristik bei der Umströmung eines Festkörpers (Abbildung 4.13, links), in diesem Falle abstrahiert durch einen Zylinder, im Vergleich zur Um- und Durchströmung des selben Körpers, der jedoch permeabel ist (Abbildung 4.13, rechts).

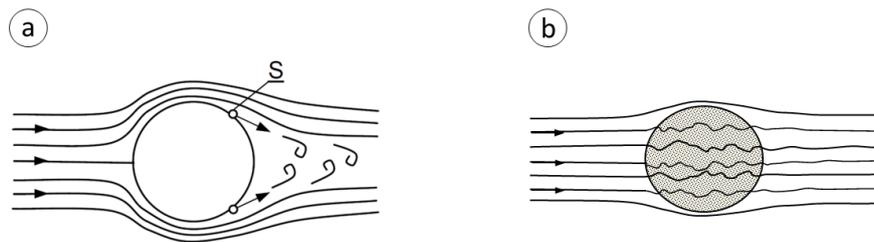


Abbildung 4.13.: Strömungscharakteristik an einem Zylinder: (a) als umströmter Festkörper, (b) als durchströmter poröser Körper.

Wie in Kapitel 3 detailliert beschrieben, setzt sich der Strömungswiderstand eines Festkörpers aus dem Widerstand infolge der Oberflächenreibung sowie dem Widerstand infolge der durch Strömungsablösung hervorgerufenen Druckverhältnissen am Körper zusammen. Im Falle eines zylindrischen Körpers ist der Widerstand bei turbulenter Umströmung maßgeblich auf den Unterdruck an der strömungsabgewandten Seite zurückzuführen, der zur Ausbildung der charakteristischen Wirbelstraße führt, wie sie auch in Abbildung 4.13, links skizziert ist. Handelt es sich bei dem Formwiderstand jedoch nicht um einen Festkörper, sondern um einen durchströmbareren Körper, so setzt sich der Widerstand aus verschiedenen weiteren Parametern zusammen, die es gilt weitergehend zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich ein Untersuchungsansatz aufgebaut, der die hydraulischen Strömungscharakteristiken bei permeablen Körpern identifizieren soll. Die Versuchsmethodik wird im Folgenden beschrieben. Basis der Versuche muss jedoch eine theoretische Hinterfragung der Hydraulik bzw. des vorliegenden Systems sein. Diese wird zuvor auf Basis des Engelund'schen Ansatzes aufgeführt.

4.4.1. Anwendung des Engelund'schen Porositätsansatzes auf strauchartige Pflanzen

Engelund leitete auf Basis einer Dimensionsanalyse eine Gleichung zur Berechnung des Widerstandes einer turbulent durchströmten Kugelpackung her (vgl. Kapitel 3.4). Soll diese nun auf die Situation einer strauchartigen Pflanze angewandt werden, so muss die geometrische Basis entsprechend der Pflanzenform und -struktur angepasst werden (vgl. Abbildung 4.14).

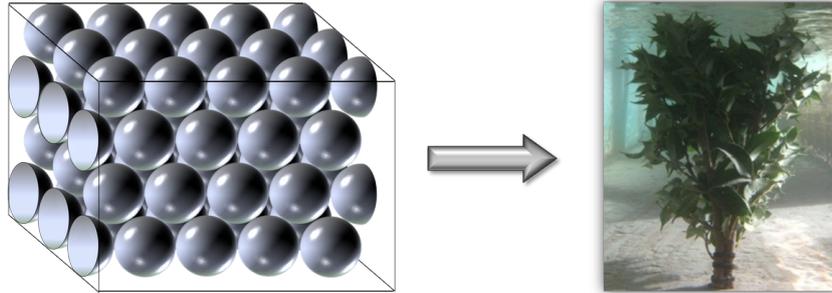


Abbildung 4.14.: Übertragung der Geometrie von der klassischen Kugelpackung auf die Situation einer belaubten Pflanze bestehend aus Astwerk und Laub.

Engelund definierte seine geometrische Anpassung aus der Definition des Volumens sowie der Oberfläche aller in einer Kugelpackung eines Kontrollvolumens vorkommenden Kugeln. Eine strauchartige Pflanze, im vorliegend aufgeführten Fall ein *Ficus natascha*, setzt sich aus Zweigen und Blättern bestimmter Größenordnung zusammen. Eine Untersuchung des Verhältnisses zwischen der Verteilung von Blattoberfläche und -volumen zu Zweigoberfläche und -volumen hat für *Ficus natascha* mit 0,30 m Wuchshöhe, wie sie in den Laboruntersuchungen verwendet wurden, folgenden Zusammenhang ergeben (vgl. Kapitel 8):

$$V_Z = 2,6 \cdot V_B \quad (4.3)$$

$$O_Z = 0,2 \cdot O_B \quad (4.4)$$

mit

V_Z	Gesamtvolumen der Zweige einer Pflanze	[m ³]
V_B	Gesamtvolumen der Blätter einer Pflanze	[m ³]
O_Z	Gesamtfläche der Zweige einer Pflanze	[m ²]
O_B	Gesamtfläche der Blätter einer Pflanze	[m ²]

Mit der Definition, dass das Volumen eines Blattes dem Produkt der Blattdicke d_B mit der einseitigen Blattfläche A_B entspricht und die Blattoberfläche als zweifache Blattfläche angenommen werden kann, kann nun nach der Engelund'schen Vorgehensweise die Herleitung des Widerstands über die Geometrie und der Gleichung für turbulente Rohrströmungen (vgl. Gleichung 3.45) erfolgen:

Das Feststoffvolumen innerhalb der Pflanze lässt sich definieren zu:

$$(1 - \phi) \cdot V_{ges} = s \cdot V_{fest} = s \cdot 3,6 \cdot V_B = s \cdot 3,6 \cdot d_B \cdot A_B \quad (4.5)$$

Aufgelöst nach s ergibt dies:

$$s = \frac{(1 - \phi) \cdot V_{ges}}{3,6 \cdot d_B \cdot A_B} \quad (4.6)$$

Die durch alle Pflanzenteile vorliegende Oberfläche ist $U = s \cdot O$. Mit s aus Gleichung 4.6 ergibt diese dann:

$$U = s \cdot O = \frac{(1 - \phi) \cdot V_{ges}}{3,6 \cdot d_B \cdot A_B} \cdot (2A_B \cdot 0,4A_B) = \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - \phi}{d_B} \cdot V_{ges} \quad (4.7)$$

Wird der hydraulische Radius des Systems nach Engelund auf das gesamte Kontrollvolumen bezogen, in dem die Fläche dem Wasserinhalt des Volumens, also der Größe der Porosität ϕ , gleichgesetzt wird und der hydraulische Umfang gleich der Gesamtoberfläche im Kontrollvolumen ist, so kann der hydraulische Radius für den Fall der Pflanze definiert werden zu:

$$r_{hy} = \frac{\phi \cdot V_{ges}}{U} = \frac{3 \phi \cdot d_B}{2 (1 - \phi)} \quad (4.8)$$

Einsetzen in die Gleichung für turbulente Rohrströmung (vgl. Gleichung 3.45) ergibt:

$$I = \frac{1}{3} \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^3} \cdot \frac{v^2}{g \cdot d_B} \quad (4.9)$$

4.4.2. Implementierung des Ansatzes in die Gleichung zur Widerstandskraft

Unter der Annahme, dass der Widerstand innerhalb des porösen Mediums maßgeblich infolge Reibung an den Einzelementen hervorgerufen wird, kann die Widerstandskraft basierend auf dem Widerstand der Strömung durch das poröse Medium als das Produkt der vorliegenden Schubspannung mit der Gesamtoberfläche definiert werden:

$$F_\phi = \tau_\phi \cdot U = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I \cdot U \quad (4.10)$$

mit

F_ϕ Widerstandskraft infolge poröser Durchströmung [N]

Mit

$$r_{hy} = \frac{\phi \cdot V_{ges}}{U} \quad (4.11)$$

und einsetzen von U aus Gleichung 4.7 ergibt dies:

$$F_\phi = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^2 \cdot d_B} \cdot V_{ges} \quad (4.12)$$

Dieser Ansatz gilt nur für den Widerstand hervorgerufen durch die Reibung innerhalb des porösen Mediums. In Kapitel 7 werden die durch äußere Randbedingungen zusätzlich auftretenden Widerstände näher betrachtet.

4.5. Versuche zur porösen Durchströmung permeabler Zylinder im Vergleich zur strauchartigen Pflanze

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit des Porositätsansatzes auf durchströmte Pflanzen wurde eine weitere Versuchsreihe gestartet. Hierzu wurde die Porosität und Porositätsform der Untersuchungskörper schrittweise von einem Festkörperzylinder bis zu einer realen Pflanze verändert, um die Auswirkungen auf das Strömungsbild für turbulent durchströmte Medien zu untersuchen. Der Versuchsaufbau sowie das Untersuchungsprogramm werden im Folgenden erläutert:

Versuchsaufbau

In Abbildung 4.15 sind die für die Versuchsreihe gewählten Geometrien zusammenfassend dargestellt. Ziel der Untersuchungen ist es, aus klar definierbaren Geometrien mit stufenweiser Steigerung des Porenanteils die hydraulischen Phänomene turbulent durchströmter Medien identifizieren zu können. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen auf dem klassischen Zylinder aufgebaut, beginnend mit einem Festkörperzylinder aus verzinktem Stahlblech, über einen zylindrischen Korb mit je einer Füllung aus Murmeln, Tischtennisbällen und Filtermaterial, wie es Gromke (Gromke, 2008) zur Simulation von Baumkronen verwendet hat, und abschließend mit der realen Pflanze, wie sie auch in den unter Kapitel 4.3 beschriebenen Untersuchungen verwendet wurde. Diese Materialreihung ermöglicht eine Abstufung der Porositäten von 0,0 % für den Festkörper über 39,3 % für die Murmeln und 46,6 % für die Tischtennisbälle bis zu 97,0 % für das Filtermaterial bzw. die Pflanze. Die unterschiedliche Packungsdichte zwischen den Murmeln und den Tischtennisbällen wurde über die lockere Schüttung innerhalb des Korbes erreicht, so dass die Tischtennisbälle mehr Porenanteil aufweisen konnten. Zur Erfassung der Geschwindigkeitsverteilung wurde je ein Zylinder bzw. eine einzelne Pflanze in einer Laborrinne zentral fixiert und in einer Langzeituntersuchung die Fließgeschwindigkeit innerhalb eines hoch aufgelösten Messrasters erfasst.



Abbildung 4.15.: Zusammenfassung der verwendeten Versuchsaufbauten mit den abgestuft gewählten Poromaterialien sowie eine Übersicht der maßgeblichen Parameter.

Hierzu kam, wie auch bei den Versuchen zur Geschwindigkeitsverteilung, die in Kapitel 4.1 unter 2. beschriebene Laborrinne des Theodor-Rehbock-Wasserbaulabors des KIT sowie die Geschwindigkeitssonde P-EMS der Firma *Delft-Hydraulics* zur Anwendung, so dass eine gute Vergleichbarkeit der Resultate erzielt werden konnte. Wie auch bei den Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung, wurde um die Zylinder bzw. die Versuchspflanzen ein engmaschiges Messgitter aufgebaut. Allerdings wurde das Gitter basierend auf den Untersuchungsergebnissen von Zong u. Nepf (2011) über die Nachlauflänge poröser Medien in unterstromiger Richtung gestreckt. Abbildung 4.16 zeigt das Messraster.

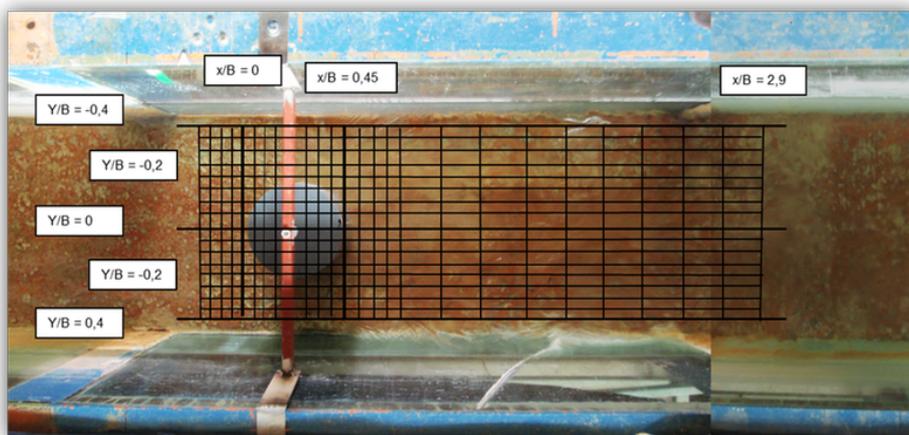


Abbildung 4.16.: Messraster der Porositätsversuche normiert nach der Fließtiefe bzw. Rinnenbreite in der Draufsicht.

Gemessen wurde in drei horizontalen Ebenen in $0,15\text{ m}$, $0,20\text{ m}$ und $0,25\text{ m}$ über der Sohle mit je 25 Querprofilen und 17 Längsprofilen, bei einer Wassertiefe von $0,3\text{ m}$. Der Nullpunkt des Messrasters befindet sich im ersten Profil oberstrom der Zylindergeometrie bzw. im Falle der Pflanze am Fixierungspin der Pflanze also am Eintrittsquerschnitt der Strömung in die poröse Struktur. Oberstrom des Nullpunktes wurden 5 Querprofile aufgezeichnet, je nach Belastung und damit Beugung der Pflanze verlaufen etwa neun bis zehn Querprofile durch die belastete Pflanze bzw. 7 Profile im Bereich der Zylinder. Innerhalb der Zylinder konnte nicht gemessen werden. Der horizontale Abstand der Profil-Messpunkte betrug $0,03\text{ m}$ beginnend beim ersten Profil bis zum 16. Profil. Ab hier wurde die Distanz in Strömungsrichtung auf $0,15\text{ m}$ erhöht.

Versuchsprogramm

Tabelle 4.6 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm zu den Untersuchungen der Geschwindigkeitsverteilung um die unterschiedlichen porösen Medien. Das Geschwindigkeitsfeld wurde für alle Aufbauten mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,30\text{ m/s}$ und einer konstanten Wassertiefe von $x/H = 0,30\text{ m}$ bzw. $x/H = 0,25\text{ m}$ im Falle der überströmten Pflanze, aufgenommen. Wie auch bei den zuvor beschriebenen Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung betrug die Aufnahmezeit an jedem Datenpunkt 2 min. Die Reynoldszahl bewegt sich je nach Wassertiefe zwischen $Re = 57.700$ und $Re = 69.200$, also im voll turbulenten Bereich. Die Resultate zur porösen Durchströmung permeabler Zylinder im Vergleich zu einer strauchartige Pflanze sowie deren Analyse sind in Kapitel 7 aufgeführt.

Tabelle 4.6.: Überblick der maßgeblichen Parameter des Versuchsprogramms zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung um poröse Zylinder im Vergleich zu einer durchströmten Pflanze

Material [-]	Element- durchmesser d [m]	Porosität ϕ [%]	Fließge- schwindigkeit v [m/s]	Wassertiefe H [m]	Gesamt- Reynoldszahl Re [-]
verzinktes Stahlblech	0,21	0,0	0,30	0,30	69.200
Zylinder mit Glasmurmeln	0,01	39,3	0,30	0,30	69.200
Zylinder mit Tischtennisbällen	0,04	46,6	0,30	0,30	69.200
Zylinder mit Filtermaterial	0,002	97,0	0,30	0,30	69.200
durchströmte Pflanze	-	97,0	0,30	0,25	57.700
überströmte Pflanze	-	97,0	0,30	0,30	69.200

Teil III.

Resultate und Diskussion

5. Direkte Messung der Widerstandskraft strömungsbelasteter Weiden und Einfluss allometrischer Eigenschaften auf den Widerstand

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit bestehender Berechnungsverfahren aus der Festkörperumströmung auf strauchartige Pflanzen wurden Kraftversuche durchgeführt, deren Resultate im folgenden Kapitel dargestellt und diskutiert werden. Der Versuchsaufbau und die Vorgehensweise der Datenanalyse hierzu ist in Kapitel 4 beschrieben. Über die direkte Messung der Widerstandskraft einer Pflanze in der Strömung können Rückschlüsse auf die wesentlichen Einflussparameter aus physikalischer aber auch allometrischer Sicht gezogen werden. Aufbauend auf einer Analyse der Widerstandskraft mit steigender hydraulischer Belastung wird das Verhalten des Widerstandsbeiwertes in Hinblick auf die Anwendbarkeit der Gleichung der Widerstandskraft von Festkörpern in der Strömung untersucht. Über eine Analyse der maßgeblichen pflanzentypischen Einflussfaktoren werden anschließend Rückschlüsse auf notwendige Anpassungen der Gleichung auf die Situation einer strauchartigen Pflanze gezogen. Im Folgenden werden zunächst die Resultate zur Widerstandskraft (Kapitel 5.1.1) und den resultierenden Widerstandsbeiwerten (Kapitel 5.2) dargestellt, die Analyse der Diskussion findet anschließend in Kapitel 5.3 statt.

5.1. Das Verhalten der vegetationsbedingten Widerstandskraft mit steigender hydraulischer Belastung

Grundlage der derzeitigen Vorgehensweise zur Berechnung des vegetationsbedingten Widerstands ist die Gleichung der Widerstandskraft eines Festkörpers in der Strömung (vgl. Kapitel 5.1.1):

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_d \quad (5.1)$$

Für die Anwendung der Gleichung auf strauchartige Pflanzen bereitet vor allem die Definition des Widerstandsbeiwertes c_d und der angeströmten Fläche A_p Schwierigkeiten, einerseits aufgrund der komplexen Geometrie der Pflanzenstruktur und andererseits infolge der Flexibilität der Pflanzen, aus der eine belastungsabhängige Formänderung resultiert und damit auch die angeströmte Fläche und den Wider-

standsbeiwert lastabhängig verändert. Eine direkte Messung der Widerstandskraft ermöglicht die Analyse des lastabhängigen Widerstandsverhaltens der Pflanzen hinsichtlich dieser Einflussparameter, wie sie für die im Folgenden dargestellten Resultate für die Spezies *Salix purpurea*, *Salix alba* und *Salix viminalis* durchgeführt wurde.

5.1.1. Die Widerstandskraft belaubter Vegetation

In Abbildung 5.1 ist die gemessene Widerstandskraft auf die im unbelasteten Zustand aufgenommene projizierte Vegetationsfläche A_0 der drei Pflanzenspezies für alle drei Skalengrößen ($H = 0,20\text{ m}$, $H = 0,35\text{ m}$ und $H = 0,50\text{ m}$) in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit v aufgetragen. Das linke Diagramm zeigt die Messdaten für den durchströmten Fall mit einem Größenverhältnis zwischen Wassertiefe und ungebeugter Pflanzenhöhe von $H/h = 2/3$. Das rechte Diagramm zeigt die Messdaten für den überströmten Fall mit einem Größenverhältnis zwischen Wassertiefe und ungebeugter Pflanzenhöhe von $H/h = 1,0$. Eine Durchströmung der Pflanze findet auch im überströmten Zustand statt, die Untersuchungen zur Durchströmung sind in Kapitel 6 aufgeführt. Im Folgenden liegt der Augenmerk auf das resultierende Verhältnis zwischen Wassertiefe und Pflanzenhöhe. Zusätzlich ist in den Diagrammen die aus der Gleichung resultierende Erwartungsfunktion dargestellt, unter der Annahme, dass der Widerstandsbeiwert zu $c_d = 1,0$ angenommen werden kann, wie es in der Literatur häufig empfohlen wird (DVWK (1991), Lehmann (2005)). Zum Vergleich der Resultate der experimentellen Untersuchungen mit der Erwartungsfunktion wurde zusätzlich eine Trendfunktion aus den Messdaten ermittelt. Der resultierende Proportionalitätsfaktor der Erwartungsfunktion entspricht im Mittel dem resultierenden Widerstandsbeiwert c_d .

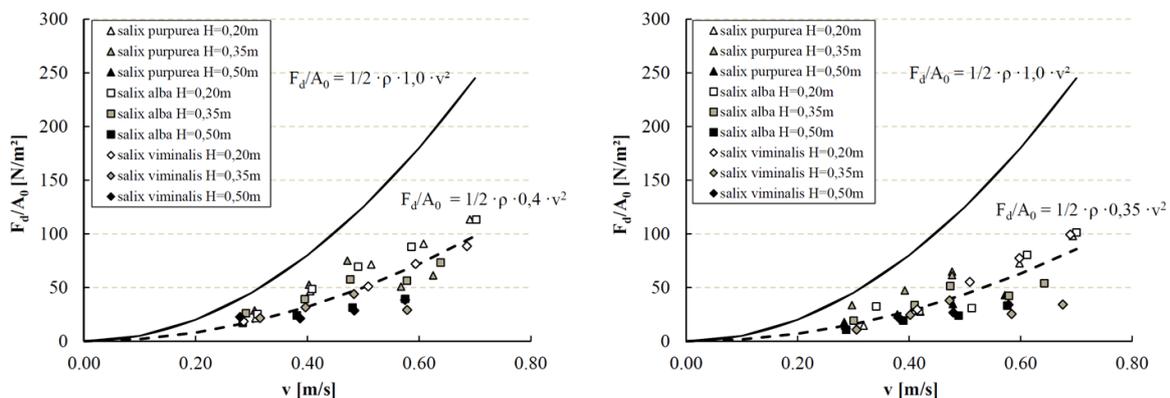


Abbildung 5.1.: Verlauf der Widerstandskraft belaubter Weidenzweige auf die im unbelasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

Der Verlauf der Kraft auf die Pflanzenfläche im unbelasteten Zustand zeigt grundsätzlich für alle Versuchspflanzen in beiden Fällen eine quadratische Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit. Die resultierende Kraft liegt jedoch im Mittel um den Faktor 0,4 für den durchströmten Fall und um den Faktor 0,35 für den überströmten Fall unterhalb der zu erwartenden Abhängigkeit. Eine lineare Zunahme

der Kraft mit zunehmender Fließgeschwindigkeit, wie sie von einigen Autoren postuliert wurde (Schoneboom (2011), Vaestila (2011)), kann anhand der vorliegenden Daten nicht bestätigt werden. Der Verlauf der Messdaten weist eine mit steigender Fließgeschwindigkeit zunehmende Streubreite auf. Eine genauere Betrachtung dieser Streuung zeigt, dass die Werte von *Salix alba* und *Salix purpurea* eher größer ausfallen als die Streuung der Werte von *Salix viminalis*. Zudem ist ein skalenabhängiges Gefälle der Kraft pro Fläche erkennbar: Je größer die Pflanze bzw. Wassertiefe, desto geringer ist die durchschnittliche Kraft pro Fläche.

Abbildung 5.2 zeigt die resultierende Widerstandskraft auf die im belasteten Zustand aufgenommene projizierte Vegetationsfläche A_p der drei Pflanzenspezies für alle drei Skalengrößen ($H = 0,20$ m, $H = 0,35$ m und $H = 0,50$ m) in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit v . Wie auch in Abbildung 5.1 zeigt das linke Diagramm die Messdaten für den durchströmten Fall und das rechte Diagramm die Messdaten für den überströmten Fall. Ebenso ist die aus der Gleichung resultierende Erwartungsfunktion unter der Annahme, dass der Widerstandsbeiwert zu $c_d = 1,0$ angenommen werden kann, dargestellt. Die Werte der Kraft auf die Pflanzenfläche im belasteten Zustand erreichen für beide Fälle im Wesentlichen einen Verlauf gemäß der Erwartungsfunktion mit einer quadratischen Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit. Die Spezies *Salix alba* und *Salix purpurea* entsprechen sehr gut dem Verlauf der Erwartungsfunktion, die Spezies *Salix viminalis* setzt sich, wie bereits in Abbildung 5.1 beobachtet, von den beiden anderen Spezies etwas ab. Die zusätzlich eingefügte Trendfunktion für den Verlauf der Kraftwerte von *Salix viminalis* auf die belastete Anströmfläche zeigt, dass die Werte dieser Spezies auf etwa $2/3$ der Werte der Erwartungsfunktion reduziert sind. Der unter Verwendung der unbelasteten projizierten Fläche beobachtete Skaleneffekt wird bei Verwendung der belasteten projizierten Fläche aufgehoben. Eine Abgrenzung der Skalen voneinander ist nicht mehr erkennbar.

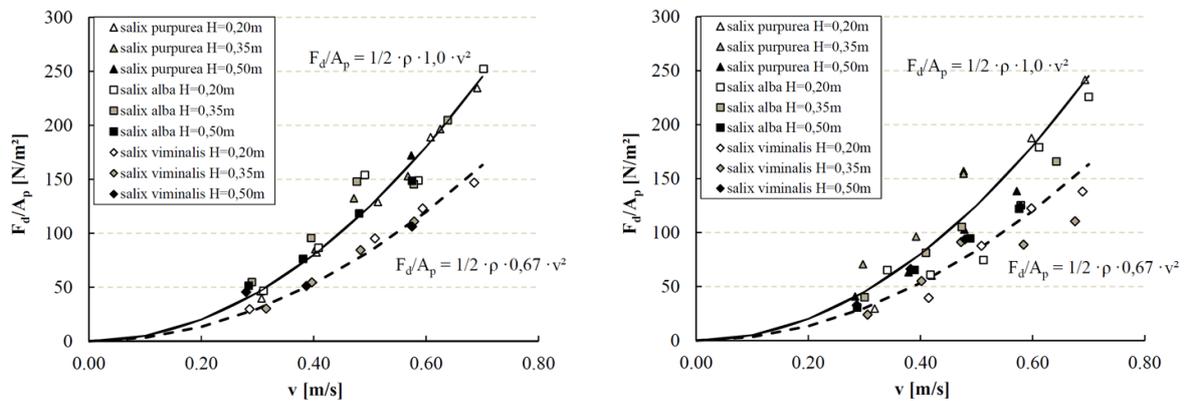


Abbildung 5.2.: Verlauf der Widerstandskraft belaubter Weidenzweige auf die jeweils im belasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

5.1.2. Die Widerstandskraft unbelaubter Vegetation

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Widerstandskraft der unbelaubten Weidenarten auf die angeströmte Fläche dargestellt. Abbildung 5.3 zeigt die resultierende Widerstandskraft auf die im unbelasteten Zustand aufgenommene projizierte Vegetationsfläche A_0 für die verwendeten Pflanzenspezies in allen drei Skalengrößen in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit v . Wie auch bei den Grafiken zuvor ist links der durchströmte Fall und rechts der überströmte Fall dargestellt, sowie eine aus der Gleichung der Widerstandskraft resultierende Erwartungsfunktion, unter der Annahme eines Widerstandsbeiwertes von $c_d = 1,0$ hinzugefügt. Die ermittelten Werte der Kraft auf die Fläche zeigen zwar einen ähnlichen Verlauf wie die Erwartungsfunktion, die Daten weisen jedoch vor allem für den durchströmten Fall eine deutliche Streuung mit Abweichungen von mehr als 100% vom Mittelwert auf.

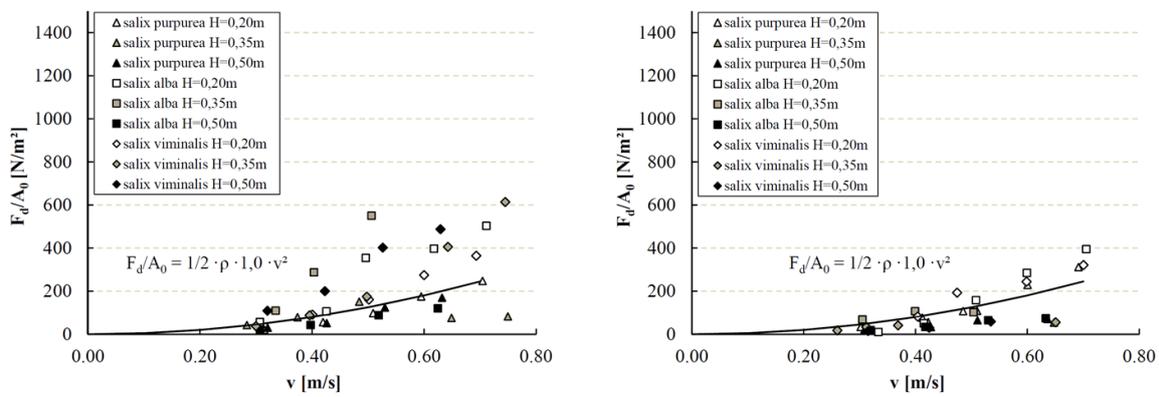


Abbildung 5.3.: Verlauf der Widerstandskraft unbelaubter Weidenzweige auf die im unbelasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

Zudem ist eine Zunahme dieser Streuung mit steigender Belastung erkennbar. Eine Betrachtung der Werte mit steigender Skalengröße zeigt, dass für den durchströmten Fall keine eindeutige Skalenabhängigkeit vorliegt, während für den überströmten Fall mit steigender Kraft auf die Fläche mit steigender Größe abnimmt. In Abbildung 5.4 ist die Widerstandskraft der unbelaubten Weidenzweige auf die im belasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche A_p für alle drei Pflanzenspezies in allen Skalengrößen dargestellt. Die bereits in Abbildung 5.3 signifikante Streuung der Kraftwerte für den durchströmten Fall fällt unter Anwendung der belasteten projizierten Fläche noch deutlich signifikanter aus. Die Abweichungen vom Erwartungswert betragen teilweise mehr als das Fünffache des Erwartungswertes. Deutlich wird auch, dass es sich hierbei nicht um eine gleichmäßige Streuung der Daten handelt, sondern diese vielmehr von einzelnen Ausreißern bei großen Belastungen geprägt ist. Für den überströmten Fall können diese Ausreißer nicht festgestellt werden und auch die grundsätzliche Streuung fällt deutlich geringer aus. Wie unter Anwendung der unbelasteten Vegetationsfläche zeigt sich auch hier eine Abhängigkeit von der Skalengröße nur für den überströmten Fall mit abnehmender Kraft auf die Fläche bei zunehmender Pflanzengröße.

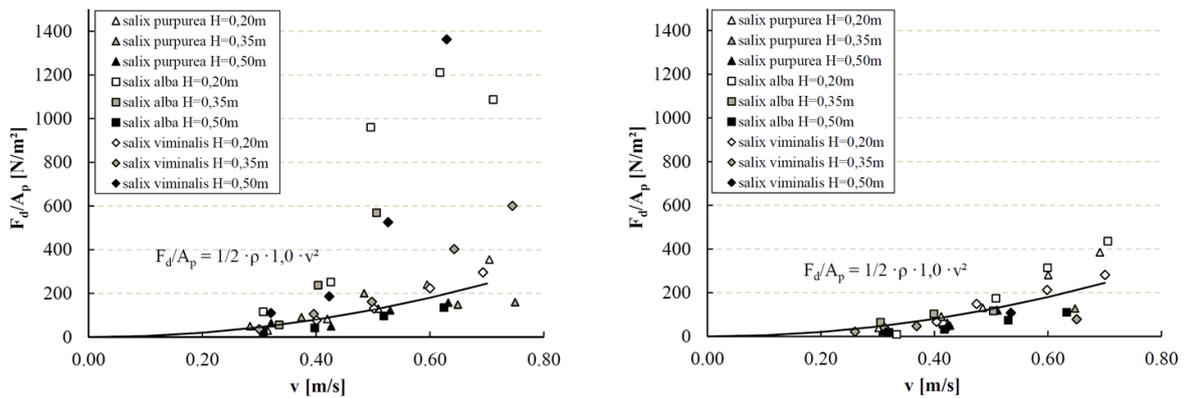


Abbildung 5.4.: Verlauf der Widerstandskraft unbelaubter Weidenzweige auf die im belasteten Zustand aufgenommene projizierte Fläche mit steigender Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

5.2. Der resultierende Widerstandsbeiwert

In Kapitel 5.1 wurde die Widerstandskraft auf die Pflanzenfläche der Weidenzweige in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit dargestellt. Die ermittelten Werte wurden mit einer Erwartungsfunktion verglichen, die einerseits auf der Gleichung zur Widerstandskraft von Festkörpern fußt und andererseits die Annahme beinhaltet, dass der Widerstandsbeiwert, wie häufig in der Literatur empfohlen, zu $c_d = 1,0$ gesetzt werden kann. Die Resultate der ermittelten Werte im Vergleich zu dieser Erwartungsfunktion haben gezeigt, dass diese Annahme nicht für alle Zustände zutreffend ist und auch die Wahl der projizierten Fläche eine wesentliche Rolle spielt. Im Folgenden werden die Untersuchungen zu den aus den Kraftmessungen und Flächenaufnahmen rückgerechneten Widerstandsbeiwerten dargestellt, mit dem Ziel eine Definition der Wichtung der einzelnen Einflussfaktoren auf den Widerstand durchführen zu können.

5.2.1. Der Widerstandsbeiwert belaubter Vegetation

In Abbildung 5.5 sind die aus den Kraftmessungen ermittelten Widerstandsbeiwerte für alle belaubten Pflanzenspezies und alle Skalenbereiche in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit im Quadrat dargestellt. Grundlage der Werte ist in diesem Fall die jeweils unbelastete projizierte Fläche. Das linke Diagramm zeigt die Daten für den durchströmten Fall mit $H/h = 2/3$. Im rechten Diagramm sind die Resultate für den überströmten Fall mit $H/h = 1,0$ dargestellt. Wie aus den oben aufgeführten Darstellungen des Kraftverlaufes auf die projizierte Fläche erwartet, liegen die Widerstandsbeiwerte deutlich unter dem angenommenen Wert von $c_d = 1,0$. Für den durchströmten Fall liegen sie zwischen $c_d = 0,2$ und $c_d = 0,7$, für den überströmten Fall zwischen $c_d = 0,15$ und $c_d = 0,8$ und bestätigen damit jeweils den aus den Kraftverläufen ermittelten mittleren Reduktionsfaktor für die Kraft von 0,4 bzw. 0,35. Dieser ist jeweils zur Übersicht als waagerechte Linie in die Diagramme eingetragen. In beiden Diagrammen zeigen die Widerstandsbeiwerte eine leicht abfallende Tendenz mit steigender Strömungsbelastung, während für den durchströmten Fall die Streuung der Werte mit zunehmender Fließgeschwindigkeit zunimmt.

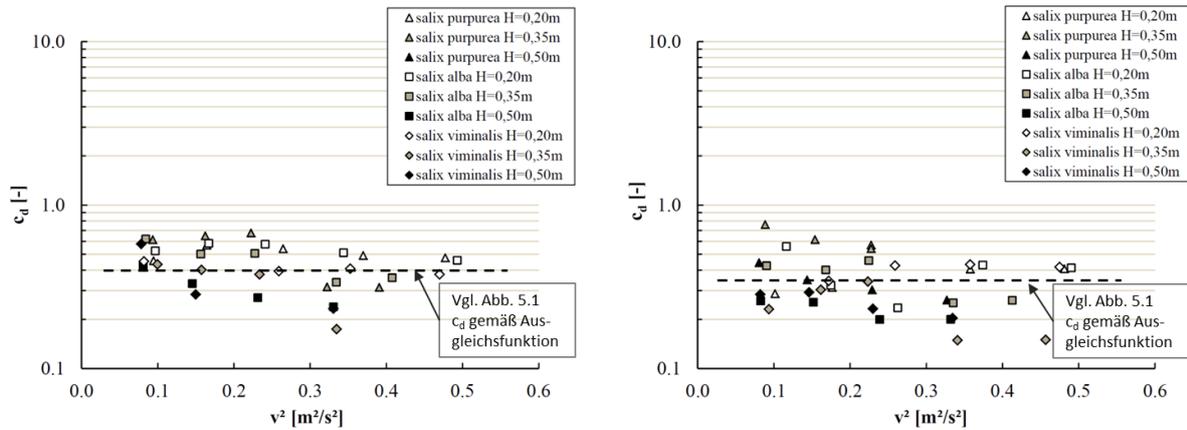


Abbildung 5.5.: Der Widerstandsbeiwert belaubter Weidenzweige berechnet mit der im unbelasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

Im überströmten Fall ist keine Abhängigkeit der Streuung von der Fließgeschwindigkeit definierbar. Der aus den Daten des Kraftverlaufes beobachtete Einfluss der Skalengröße auf die Resultate liegt auch für die Widerstandsbeiwerte vor. Mit zunehmender Pflanzengröße bzw. Wassertiefe nimmt der Widerstandsbeiwert tendenziell ab. Eine Abhängigkeit der Werte von der Pflanzenspezies kann nicht festgestellt werden. Abbildung 5.6 zeigt die Resultate der Widerstandsbeiwerte unter Anwendung der projizierten Anströmfläche im jeweils belasteten Zustand. Dargestellt sind die Widerstandsbeiwerte für alle belaubten Pflanzenspezies in allen Skalengrößen für den durchströmten Fall (vgl. Abbildung 5.6 links) und den überströmten Fall (vgl. Abbildung 5.6 rechts).

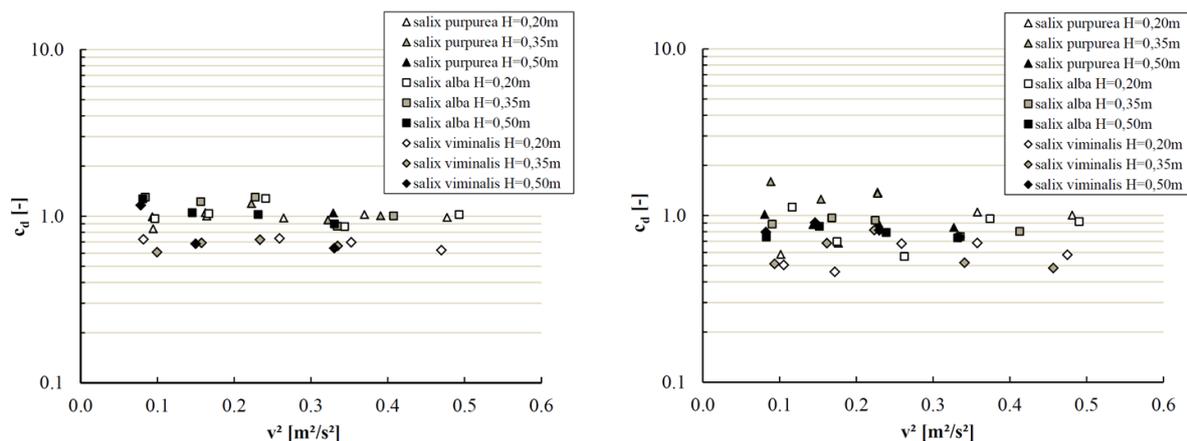


Abbildung 5.6.: Der Widerstandsbeiwert belaubter Weidenzweige berechnet mit der im belasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

Zunächst zeigt sich, dass die Streuung der Werte durch die Anwendung der angeströmten Fläche deutlich reduziert wird, die Werte schwanken im Bereich zwischen $c_d = 0,9$ und $c_d = 1,5$ für *Salix alba* und *Salix purpurea* und $c_d = 0,6$ und $c_d = 0,75$ für *Salix viminalis* für den durchströmten Fall. Für den überströmten Fall erreicht die Streuung eine Spannbreite von $c_d = 0,6$ bis $c_d = 1,8$ für *Salix alba* und *Salix purpurea* und $c_d = 0,5$ und $c_d = 0,8$ für *Salix viminalis*. Die unter Anwendung der unbelasteten projizierten Fläche auftretende Skalenabhängigkeit der Werte tritt nicht mehr auf. Eine Abnahme der Widerstandsbeiwerte mit steigender Belastung ist ebenfalls nicht mehr eindeutig feststellbar.

5.2.2. Der Widerstandsbeiwert unbelaubter Vegetation

Die äußere Form von unbelaubten Pflanzen unterscheidet sich signifikant von der belaubter Pflanzen, womit zu erwarten ist, dass sich der Widerstandsbeiwert zwischen belaubter und unbelaubter Vegetation ebenso deutlich unterscheiden müsste. Untersuchungen nach Pasche (1984) und Lindner (1982) würden vermuten lassen, dass unbelaubte Vegetation durch einer Ansammlung von Zylindern angenähert werden kann und dass damit der resultierende Widerstandsbeiwert etwa dem eines Zylinders in einer Ansammlung weiterer Zylinder, also $c_d = 1,0$ bis $c_d = 1,5$, entsprechen müsste. Im folgenden werden die Resultate von Untersuchungen zum Widerstandsbeiwert unbelaubter Vegetation erläutert.

Abbildung 5.7 zeigt die rückgerechneten Widerstandsbeiwerte der unbelaubten Weidenzweige unter Anwendung der unbelasteten projizierten Vegetationsfläche aller Spezies und Skalengrößen in Abhängigkeit vom Quadrat der Fließgeschwindigkeit. Grundlegend fällt zunächst die weite Streubreite mit Werten zwischen $c_d = 0,3$ bis $c_d = 4,0$ für durchströmte Zweige und $c_d = 0,2$ bis $c_d = 2,0$ für überströmte Zweige auf. Für den durchströmten Fall pendeln die Widerstandsbeiwerte damit im Groben um den Erwartungsbereich, wohingegen die Werte der überströmten Zweige im Mittel unterhalb des Erwartungsbereichs liegen.

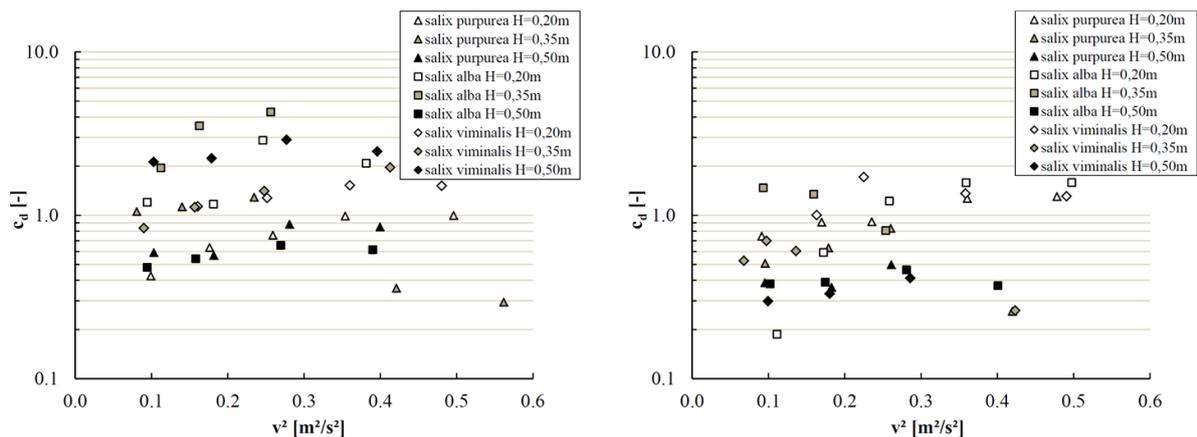


Abbildung 5.7.: Der Widerstandsbeiwert unbelaubter Weidenzweige berechnet mit der im unbelasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

Eine Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der Strömungsbelastung oder Pflanzenspezies liegt nicht vor, jedoch wird im überströmten Fall eine Belastung von der Skalengröße deutlich. Mit zunehmender Pflanzengröße bzw. Wassertiefe nimmt der resultierende Widerstandsbeiwert ab. Wird zur Ermittlung der Widerstandsbeiwerte die jeweils belastete projizierte Fläche herangezogen (vgl. Abbildung 5.8) zeigen sich wenige Abweichungen von den resultierenden Werten bei Anwendung der unbelasteten projizierten Vegetationsfläche (vgl. Abbildung 5.7). Für den durchströmten Fall findet mit einer Streubreite zwischen $c_d = 0,5$ und $c_d = 8,0$ einerseits eine Erhöhung der Werte statt, andererseits ist die Streuung noch ausgeprägter als unter Verwendung der unbelasteten projizierten Fläche.

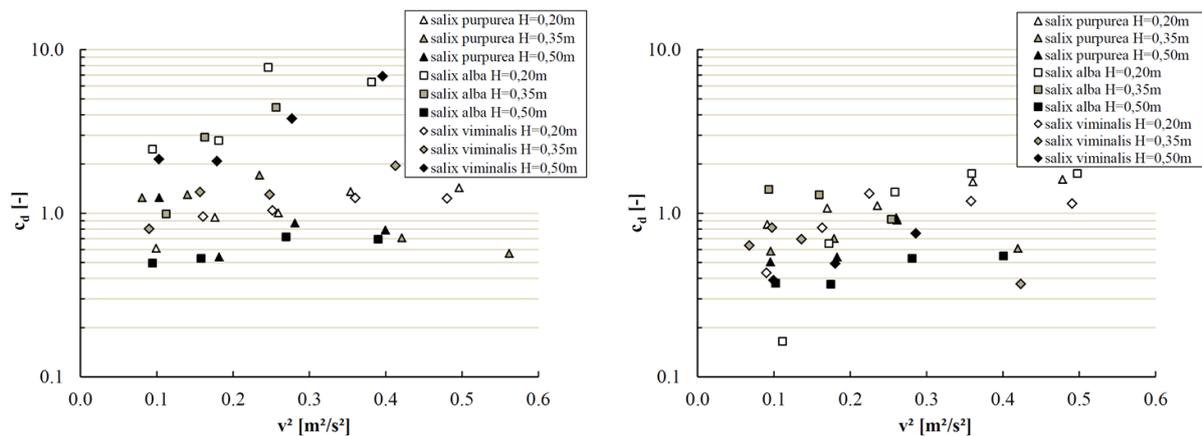


Abbildung 5.8.: Der Widerstandsbeiwert unbelaubter Weidenzweige berechnet mit der im belasteten Zustand aufgenommenen projizierten Fläche in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für den durchströmten Fall (links) und den überströmten Fall (rechts).

Das Bild der Werte für den überströmten Fall hingegen ist dem unter Anwendung der unbelasteten projizierten Vegetationsfläche sehr ähnlich. Die Streuung liegt mit Werten zwischen $c_d = 0,35$ und $c_d = 2,0$ etwa im selben Bereich und auch die Skalenabhängigkeit wird deutlich. Eine Abhängigkeit der Werte von der Strömungsbelastung oder Pflanzenspezies kann nicht definiert werden.

5.3. Beurteilung der maßgeblichen Einflussfaktoren auf das vegetationsbedingte Widerstandsverhalten

In den Kapiteln 5.1 und 5.2 sind die Resultate der Messungen zur Widerstandskraft der Versuchspflanzen ausgewertet nach der Kraft auf die projizierte Fläche sowie nach dem Widerstandsbeiwert dargestellt. Maßgeblich für die Definition der pflanzenspezifischen Widerstandskraft von strauchartigen Pflanzen ist die Kenntnis der entscheidenden Einflussfaktoren sowie deren Auswirkungen auf die resultierende Widerstandskraft. Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich folgende Beobachtungen zusammenfassen:

Sowohl für die Auswertung der Daten nach Kraft pro Fläche (vgl. Kapitel 5.1) als auch für die Auswertung nach dem Widerstandsbeiwert (vgl. Kapitel 5.2) hat sich gezeigt, dass eine Verwendung der lastspezifisch tatsächlich angeströmten Fläche A_p für belaubte Pflanzen zu stabileren Ergebnissen führt, die nahe dem Erwartungswert liegen. Die Resultate weisen eine deutlich geringere Streuung auf und ihr Verlauf ist im Wesentlichen unbeeinflusst von Skalengrößen und Überströmverhältnissen. Aus physikalischer Sicht stellt die Verwendung der lastabhängigen angeströmten Fläche die korrekte Vorgehensweise dar. Der Widerstandsbeiwert c_d ist ein empirischer Beiwert, der die Form- und Rauheitseffekte eines Widerstandskörpers auf die lokale Hydraulik berücksichtigt. Damit ergibt die Rückrechnung mit der lastabhängigen angeströmten Fläche den lastabhängig realen Widerstandsbeiwert der verformten Pflanze wieder. Für unbelaubte Pflanzen kann diese Beobachtung nicht eindeutig bestätigt werden. An dieser Stelle zeigen sich andere Einflussfaktoren von maßgeblicher Bedeutung, die im Weiteren näher beleuchtet werden.

Im Gesamten muss hinsichtlich der beobachteten Datenstreuung auch das Fehlerpotential des Kraftaufnahmesystems berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.1). Der resultierende Angriffspunkt der Strömungskraft auf die Pflanze und auch die angestömte Fläche werden aus fotografischen Aufnahmen der belasteten projizierten Fläche ermittelt. Diese unterliegt infolge des flexiblen Verhaltens der Pflanze auf die Strömung (Blattbewegung und Schwingen der gesamten Pflanze) Schwankungen.

Für belaubte Pflanzen ist kaum ein Unterschied der Datenverteilung zwischen dem durchströmten Zustand mit einem Verhältnis von Wassertiefe zu unbelasteter Pflanzenhöhe von $H/h = 2/3$ und dem überströmten Zustand mit einem Verhältnis von Wassertiefe zu unbelasteter Pflanzenhöhe von $H/h = 1$ zu erkennen. Die Resultate der unbelaubten Pflanzen jedoch zeigen deutliche Unterschiede. So weisen die Werte für den durchströmten Fall sowohl in der Auswertung nach Kraft pro Fläche als auch nach dem Widerstandsbeiwert c_d eine sehr ausgeprägte Streuung auf, die für den überströmten Fall deutlich reduziert wird. Weiterhin übersteigt der Widerstandsbeiwert der durchströmten Pflanzen den der überströmten Pflanzen im Mittel um den Faktor 2.

Eine Beobachtung des Skaleneffektes spielt vor allem hinsichtlich der Übertragbarkeit der im Modell gewonnenen Erkenntnisse auf die Natur eine wesentliche Rolle. Hier zeigt sich, dass für belaubte Pflanzen ein Skaleneffekt nur erkennbar wird, wenn die unbelastete projizierte Fläche zur Rückrechnung der Daten verwendet wird. Bei unbelaubter Vegetation ist der Skaleneffekt unabhängig von der Verwendung der angeströmten Fläche. Im durchströmten Zustand tritt kein Skaleneffekt auf.

Mit dem Ziel, mögliche Auswirkungen der unterschiedlichen Pflanzenspezies auf das Widerstandsverhalten identifizieren zu können, wurden die drei Arten *Salix purpurea*, *Salix alba* und *Salix viminalis* innerhalb der experimentellen Untersuchungen eingesetzt. Die Resultate zeigen, dass im belaubten Fall unter Anwendung der unter Belastung aufgenommenen projizierten Vegetationsfläche die Art *Salix viminalis* eine geringere Widerstandskraft auf die Fläche und damit auch einen geringeren Widerstandsbeiwert aufweist. Im unbelaubten Fall ist dieser Unterschied nicht erkennbar.

Grundsätzlich wird aus den Resultaten deutlich, dass die Belaubung einen entscheidenden Einfluss auf das Widerstandsverhalten der Pflanzen hat. Es zeigt sich, dass zunächst ein maßgeblicher Unterschied

der Widerstandsbeiwerte vom belaubten zum unbelaubten Fall zu verzeichnen ist, weiterhin weisen die Messdaten der belaubten Pflanzen deutlich stabilere Widerstandsdaten mit einer signifikant geringeren Tendenz zur Streuung auf.

Damit ergeben sich aus den Resultaten folgende maßgebliche Einflussgrößen auf das Widerstandsverhalten von strauchartigen Pflanzen:

- Verhältnis von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe
- Belaubung
- Flexibilität → Kontraktionsverhalten

Eine Untersuchung dieser Einflussgrößen und eine Quantifizierung im Hinblick auf die Definition der lastabhängigen Widerstandskraft der strauchartigen Pflanzen aus den Untersuchungsdaten sowie unter Berücksichtigung von Untersuchungsdaten vergangener Studien wird im Folgenden dargestellt.

5.3.1. Einfluss des Verhältnisses von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe

In Tabelle 5.1 ist eine Zusammenfassung der aus den Untersuchungsdaten gemittelten Widerstandsbeiwerte der unbelaubten Pflanzen aufgesplittet nach Pflanzenspezies und angewendeter projizierter Vegetationsfläche für den durchströmten und den überströmten Fall gegenübergestellt. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Widerstandsbeiwerte der überströmten Pflanzen vor allem für *Salix alba* und *Salix viminalis* auf weniger als die Hälfte reduziert sind als die Werte im durchströmten Fall. Aber auch für *Salix purpurea* zeigt sich eine deutlich Reduktion der Widerstandsbeiwerte vom durchströmten zu überströmten Fall.

Tabelle 5.1.: Zusammenfassung der resultierenden mittleren Widerstandsbeiwerte \bar{c}_d der Pflanzenspezies sowie der jeweiligen Standardabweichung s'_{cd} aus den Messdaten für den unbelaubten Fall.

	durchströmmt				überströmmt			
	$\bar{c}_d(A_p)$	$s'_{cd}(A_p)$	$\bar{c}_d(A_0)$	$s'_{cd}(A_0)$	$\bar{c}_d(A_p)$	$s'_{cd}(A_p)$	$\bar{c}_d(A_0)$	$s'_{cd}(A_0)$
Salix purpurea	1,02	0,38	0,77	0,35	0,92	0,38	0,69	0,34
Salix alba	2,88	2,22	1,78	1,10	0,93	0,55	0,87	0,52
Salix viminalis	1,99	0,45	1,69	0,43	0,76	0,33	0,76	0,47
gesamt	1,96	1,02	1,41	1,88	0,87	0,42	0,77	0,44

Weiterhin ist die Standardabweichung speziell für *Salix alba* deutlich höher für den durchströmten Fall, als für den überströmten Fall. Diese hohe Standardabweichung ist einerseits auf die im Allgemeinen starke Streuung der Daten für den durchströmten Fall zurückzuführen, aber auch in einzelnen Ausreißern, die für *Salix alba* auftreten, begründet. Während der Versuchsdurchführung der unbelaubten Pflanzen im durchströmten Fall wurde ein teilweise starkes Schwingen bzw. Oszillieren der einzelnen Zweige in der Strömung beobachtet. Diese Reaktion auf die Strömung entwickelte sich abhängig vom Durchmesser der einzelnen Zweige und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit sowie unterschiedlich für die unterschiedlichen Pflanzenspezies. Die Ursache hierfür wird darin gesehen, dass die über Strömungsgeschwindigkeit, Zweigdurchmesser und -rauheit bestimmte Ablösefrequenz der Wirbel an den Einzelzweigen im Bereich der Eigenschwingfrequenz der Zweige lag und damit zu einer Schwingungsanregung führte. Eine Ableitung der Größenordnung der zu erwartenden Wirbelablösefrequenz eines Systems ist mit der Strouhal-Zahl Sr möglich:

$$Sr = \frac{f \cdot d_s}{v} \quad (5.2)$$

mit

Sr	Strouhal-Zahl	[-]
f	Wirbelablösefrequenz	[Hz]
d_s	mittlerer Stammdurchmesser	[m]
v	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]

Die auch als dimensionslose Frequenz bezeichnete Strouhal-Zahl ist grundsätzlich abhängig von der Reynolds-Zahl des Systems, kann jedoch für den Bereich $500 \leq Re \leq 1 \cdot 10^6$ zu $Sr = 0,2$ angenommen werden. Damit kann die Wirbelablösefrequenz eines Systems berechnet werden zu:

$$f = \frac{0,2 \cdot v}{d_s} \quad (5.3)$$

Das Auftreten von Schwingungen, ausgelöst durch die vom Durchmesser des Einzelzweiges und der mittleren Anströmgeschwindigkeit abhängigen Wirbelablösefrequenz, ist damit für die untersuchten Pflanzendimensionen mit Zweigdurchmessern zwischen 2 mm und 2 cm je nach Anströmgeschwindigkeit möglich. Der theoretische Widerstandsbeiwert c_d der unbelaubten Pflanzen kann rückschließend aus den Versuchsergebnissen auf mehr als das Doppelte erhöht werden, sofern die Pflanzen zur Schwingung angeregt werden. Eine genaue Vorhersage des Auftretens der Schwingungen setzt die Kenntnis des Durchmessers sowie die Eigenfrequenz jedes einzelnen Zweiges der betreffenden Pflanze voraus.

Im Falle einer Überströmung der unbelaubten Zweige wurde festgestellt, dass unabhängig von der verwendeten Vegetationsfläche ein Skaleneffekt auftritt. Je größer die Pflanze, desto geringer der Widerstand auf die Fläche bzw. desto geringer der Widerstandsbeiwert. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass

bei Überströmung mit steigender Pflanzengröße eine zunehmende Beugung der Zweige stattfindet und damit eine strömungsgünstigere Form mit steigender Pflanzengröße vorliegt. Ein weiterer Grund kann die Art der in den Untersuchungen durchgeführten Flächenaufnahme sein. Mit steigender Größe der Pflanze steigt auch der Aufnahmewinkel bei gleichem Abstand der Kamera vom aufzunehmenden Objekt, womit sich eine mögliche Linsenverzerrung deutlicher auf die resultierende Fläche auswirken kann. Da jedoch im belaubten Fall dieser Effekt nicht beobachtet werden konnte und der Linsenverzerrungstest nur unwesentliche Auswirkungen ergeben hat (vgl. Kapitel 4.1.2), wird davon ausgegangen, dass der Einfluss der Linsenverzerrung von geringerer Bedeutung ist.

In Tabelle 5.2 ist eine Zusammenfassung der aus den Untersuchungen ermittelten Widerstandsbeiwerte der belaubten Pflanzen aufgesplittet nach Pflanzenspezies und angewandeter projizierter Vegetationsfläche für den durchströmten und den überströmten Fall gegenübergestellt. Im Vergleich zu den Daten der unbelaubten Pflanzen zeigt sich eine deutliche Reduktion der Widerstandsbeiwerte aller Arten für den durchströmten Fall. Der Unterschied zwischen durchströmter und überströmter Vegetation fällt nur noch gering aus. Ursache dieses Verhaltens ist einerseits die ausbleibende Oszillation der Zweige infolge der stabilisierenden Wirkung der Blätter und die bereits im durchströmten Fall auftretende Kontraktion der Gesamtpflanze durch die strömlinienförmige Blattausrichtung. Während der Versuche wurde bei den belaubten Pflanzen mehr eine periodische Schwingung der äußeren Blätter bzw. der gesamten Pflanze festgestellt, als ein Zittern der Zweige in hoher Frequenz.

Tabelle 5.2.: Zusammenfassung der resultierenden mittleren Widerstandsbeiwerte \bar{c}_d der Pflanzenspezies sowie der jeweiligen Standardabweichung s'_{cd} aus den Messdaten für den belaubten Fall.

	durchströmt				überströmt			
	$\bar{c}_d(A_p)$	$s'_{cd}(A_p)$	$\bar{c}_d(A_0)$	$s'_{cd}(A_0)$	$\bar{c}_d(A_p)$	$s'_{cd}(A_p)$	$\bar{c}_d(A_0)$	$s'_{cd}(A_0)$
Salix purpurea	1,0	0,09	0,5	0,13	1,0	0,35	0,4	0,16
Salix alba	1,1	0,17	0,4	0,09	0,8	0,16	0,3	0,10
Salix viminalis	0,7	0,05	0,4	0,09	0,7	0,12	0,3	0,11
gesamt	0,93	0,10	0,43	0,10	0,83	0,21	0,33	0,12

Diese Schwingung wird als flexible Reaktion der Pflanze auf Wirbelbildung im Grenzbereich zwischen Pflanze und Strömung gesehen, wie sie auch von verschiedenen Autoren für überströmten Pflanzenbesatz beobachtet wurde (vgl. Ikeda u. Kanazawa (1996), Raupach u. a. (1996), Ghisalberti u. Nepf (2000, 2002, 2008)). Infolge des flexiblen Ausweichens der Pflanze als Reaktion auf Ablösewirbel reduziert sich so der Widerstand im Vergleich zu einem Festkörper. Die weitere Reduktion des Widerstandsbeiwertes bei Überströmung ist auf die zusätzliche Kontraktion in vertikaler Richtung sowie ausbleibende zusätzliche Widerstände an der Fluidgrenze zurückzuführen. Die Resultate der Standardabweichung zeigt, dass für

den belaubten Fall eine deutlich geringere Streuung der Daten vorliegt. Ursache dieser geringeren Streuung ist die stabilisierende Wirkung der Belaubung auf die stromlinienförmige Ausrichtung der Pflanze. Im Folgenden wird die Wirkungsweise der Belaubung näher betrachtet.

5.3.2. Einfluss der Belaubung

Aus den Resultaten zur Widerstandskraft auf die Fläche aber auch zum Widerstandsbeiwert wird deutlich, dass die Belaubung eine wesentliche Rolle beim Widerstandsverhalten der Pflanzen spielt. Abbildung 5.9 zeigt die belaubten Versuchszweige der drei Weidenarten im unbelasteten Zustand sowie in der Seitenansicht unter Strömungsbelastung. Aus den Aufnahmen wird deutlich, welcher hohen Anteil die Blätter an der Gesamtangriffsfläche der Pflanzen haben.



Abbildung 5.9.: Übersicht der belaubten Versuchszweige im unbelasteten Zustand sowie in der Seitenansicht unter Belastung für *Salix viminalis* (links), *Salix alba* (Mitte) und *Salix purpurea* (rechts).

Weiterhin zeigt sich, dass die etwas lanzettlichere Form der Blätter von *Salix viminalis* zu einer weiter gestreckten Gesamtform der belasteten Pflanze führen, als bei *Salix alba* und *Salix purpurea*, womit die artspezifische Differenz im Widerstandsbeiwert bzw. in der Kraft pro Fläche von *Salix viminalis* zu den anderen Weidenspezies erklärt werden kann, da die veränderte Form in einem verringerten Widerstand resultiert. Zudem kann auch der Widerstand der Blätter selbst durch die veränderte Form im Vergleich reduziert sein (vgl. Niklas (1999)). In Abbildung 5.10 ist der Anteil der Widerstandskraft des Laubes am Gesamtwiderstand der Pflanze in Abhängigkeit der Strömungsbelastung für alle Pflanzenspezies und beide Verhältnisse von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe dargestellt. F_l ist die jeweils gemessene Widerstandskraft der belaubten Pflanzen, F_s ist die jeweils gemessene Widerstandskraft der unbelaubten Pflanzen. Die Grafik zeigt, dass der Anteil des Laubes am Gesamtwiderstand von etwa $2/3$ bei kleiner Strömungsbelastung mit $v^2 = 0,1$ mit steigender Belastung auf $1/3$ bei $v^2 = 0,35$ abnimmt. Dieser Verlauf zeigt sich unabhängig von Pflanzenspezies und Verhältnis zwischen Wassertiefe zu Pflanzenhöhe und ist damit rein auf die zunehmend strömungsgünstige Verformung der Blätter selbst mit steigender Belastung zurückzuführen. Schoneboom (2011) und Wilson (2008) konnten in ihren Versuchen diesen belastungsabhängigen Verlauf ebenso feststellen.

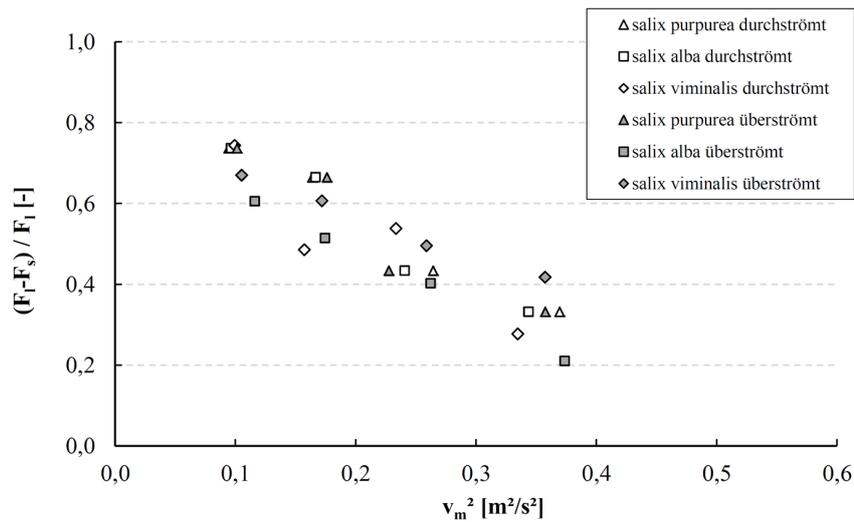


Abbildung 5.10.: Anteil der Widerstandskraft der Belaubung der Versuchspflanzen an der Gesamtwiderstandskraft mit steigender Strömungsbelastung der verwendeten Pflanzenspezies im überströmten und durchströmten Zustand.

Unter der Erwartung, dass die Blätter ab einem bestimmten Belastungsgrenzwert eine endgültige strömungsoptimierte Form erreicht haben werden und damit ab diesem Grenzwert keine weitere Reduktion des Widerstandsanteils an der Gesamtwiderstandskraft mehr stattfindet, ist ein exponentieller Zusammenhang mit asymptotischem Verlauf auf einen Grenzwert wahrscheinlich. Zur Bestätigung dieser Vermutung ist eine Fortführung der Versuche bei größerer Belastung notwendig.

5.3.3. Einfluss der Flexibilität: Das Kontraktionsverhalten strauchartiger Vegetation

Die Resultate zum Verlauf des Laubanteils an der Gesamtwiderstandskraft zeigen, dass die Kenntnis des flexiblen Verhaltens der Pflanze ein maßgeblicher Schlüssel zur Beschreibung des vegetativen Widerstandsverhaltens ist. Vergleicht man die gemittelten Widerstandsbeiwerte aus Tabelle 5.2 unter Anwendung der jeweils unter Last aufgenommenen projizierten Vegetationsfläche mit den Werten der jeweils projizierten Vegetationsfläche im unbelasteten Zustand, so zeigt sich, dass diese einen mehr als doppelt so hohen Wert annehmen. Unter realen Bedingungen zur Berechnung des vegetativen Widerstands an einem Fließgewässer ist es jedoch nicht möglich, die resultierenden Flächen in situ aufzunehmen. Aus diesem Grund ist es für den Anwender zwingend notwendig, Kenntnis über das lastabhängige Kontraktionsverhalten zu haben. Mattheck (2010) hat in seinen Untersuchungen gezeigt, dass Wind belastete Pflanzen ihre Form so ausrichten, dass die durch die Strömung verursachte Zugbelastung auf die Pflanzenstruktur optimal abgeführt werden kann. Dieses Prinzip der Lastabtragung folgt nach Mattheck den Gesetzen der Zugdreiecke (vgl. Kapitel 2.2). In Abbildung 5.11 sind die unter Strömungsbelastung gebeugten Versuchspflanzen *Salix viminalis*, *Salix alba* und *Salix purpurea* (von links nach rechts) in der Seitenansicht der Versuchsrinne dargestellt.

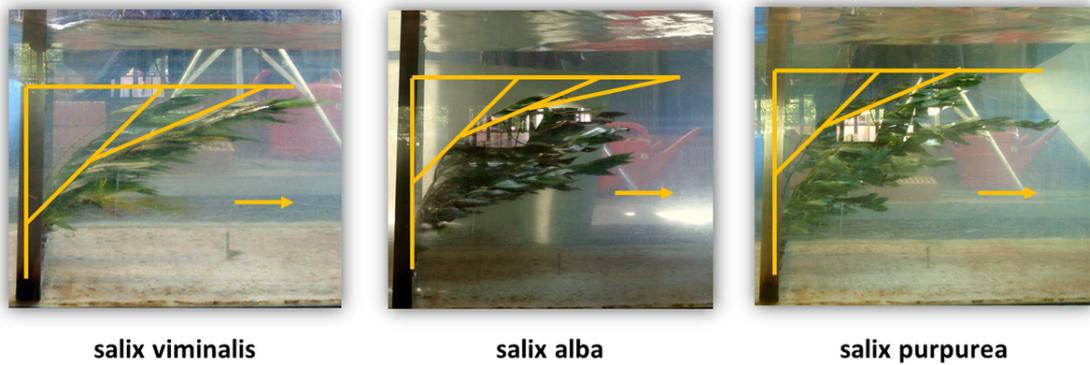


Abbildung 5.11.: Anwendung des Prinzips der Zugdreiecke nach Mattheck (2010) auf die belasteten Versuchspflanzen *Salix viminalis*, *Salix alba* und *Salix purpurea* (von links nach rechts) in der Seitenansicht der belasteten Pflanzenproben in der Laborrinne.

Auf die gebeugte Pflanzenform wurde jeweils das Prinzip der Zugdreiecke angewandt. Beginnend mit einem gleichschenkligen rechtwinkligen Dreieck wird eine Fortsetzung der Form über weitere gleichschenklige Dreiecke erreicht, die die Hälfte der Hypotenuse des ursprünglichen Dreiecks als Schenkel haben. Die Anwendung dieses Prinzips zeigt eine gute Passgenauigkeit auf die unter Strömungslast verformten Pflanzen (vgl. Abbildung 5.11). Damit kann Matthecks Theorie, dass die naturgegebene Reaktion von Pflanzen auf Zugbelastung in einer idealen Form des Lastabtrags resultiert, auch auf die Belastung einer strauchartigen Pflanze durch Wasserströmung angewendet werden. Diese Anwendung zeigt jedoch nur qualitativ die resultierende Form. Eine quantitative Beschreibung der anzusetzenden lastabhängigen Kontraktion aus der Gesamtfläche ist hieraus nicht möglich.

Der Vogel-Exponent ε als Maß der Widerstandsreduktion infolge der Deformation erscheint an dieser Stelle zunächst als geeigneter Ansatz (vgl. Kapitel 3.3.1). Aus dem von Vogel definierten Proportionalitätsverhältnis

$$\frac{F_d}{v^2} \propto v^\varepsilon \quad (5.4)$$

kann unter Berücksichtigung der Gleichung zur Widerstandskraft

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_d \quad (5.5)$$

geschlossen werden, dass der Proportionalitätsfaktor dem Produkt $1/2 \cdot \rho$ entspricht und die veränderliche Deformation beschrieben werden kann zu:

$$v^\varepsilon = A \cdot c_d \quad (5.6)$$

Die aus der Deformation resultierende Widerstandsreduktion wird damit über eine Reduktion der Belastung ausgedrückt. Aus den Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass für den Bereich der angewandten Fließgeschwindigkeiten der Widerstandsbeiwert c_d unabhängig von der Fließgeschwindigkeit ist, sofern die unter Last reduzierte projizierte Vegetationsfläche A_p berücksichtigt wird. Damit wäre der Vogel-Exponent ε aus den Versuchsreihen maßgebend für die Deformation der Pflanzen ausgedrückt durch das Verhältnis A_p/A_0 .

Abbildung 5.12 zeigt die Ermittlung des Vogel-Exponenten für die in dieser Arbeit untersuchten Pflanzenspezies, ermittelt aus den gemessenen Kraftwerten zur Fließgeschwindigkeit. Unter Anwendung von Gleichung 5.4 kann der Vogel-Exponent aus der Steigung der sich ergebenden Funktion des log-log plots von F_d/v^2 und v ermittelt werden. Die Grafik zeigt, dass aus den Versuchsdaten für jede Pflanzenspezies eine Geradensteigung mit annehmbarer Genauigkeit zwischen $R^2 = 0,794$ für *Salix viminalis* und $R^2 = 0,996$ für *Salix purpurea* bestimmt werden kann. Die Steigungen liegen bei $\varepsilon = -0,44$ für *Salix alba*, $\varepsilon = -0,74$ für *Salix purpurea* und $\varepsilon = -0,51$ für *Salix viminalis*.

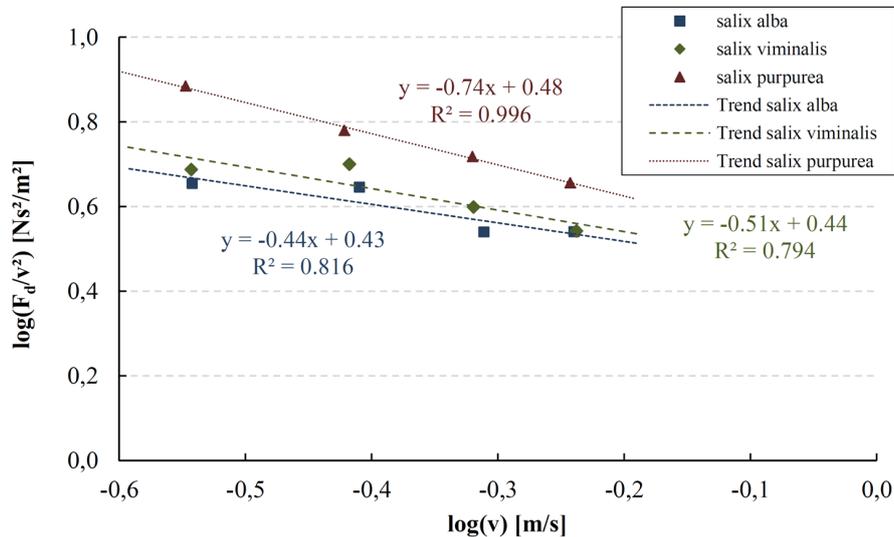


Abbildung 5.12.: Ermittlung der Gradienten der Regressionsgerade aus dem jeweiligen Auftrag zwischen $\log(F_d/v^2)$ und $\log v$ für die Pflanzenspezies *Salix viminalis*, *Salix alba* und *Salix purpurea* aus den in den Laborversuchen gemessenen Widerstandskräften.

Tabelle 5.3 zeigt einen Überblick der in dieser Arbeit ermittelten Vogel-Exponenten im Vergleich zu einer theoretischen Herleitung von de Langre u. a. (2012) sowie experimentell ermittelten Vogel-Exponenten von de Langre u. a. (2012) und Boller u. Carrington (2006) für unterschiedliche terrestrische und aquatische Pflanzenarten. Der theoretisch von de Langre ermittelte Vogel-Exponent für ein Bündel aus biegsamen Stäben beträgt $\varepsilon = -2/3$. Die experimentellen Untersuchungen von de Langre an verschiedenen Pflanzenspezies zeigen, dass die Werte der untersuchten Pflanzen grundsätzlich zwischen $\varepsilon = -0,57$ und $\varepsilon = -0,80$ schwanken und sich damit um den theoretischen Werte von $\varepsilon = -2/3$ verteilen, während die terrestrischen Spezies eher oberhalb und die aquatischen Spezies eher unterhalb dieses theoretischen Wertes liegen.

Boller u. Carrington (2006) untersuchten den Vogel-Exponenten für Seetangarten. Ihre Resultate weisen eine hohe Spannweite auf, wobei der Mittelwert mit $\varepsilon = -0,58$ denen der aquatischen Spezies von de Langre sehr nahe kommt. Die Werte der vorliegenden Studie mit $\varepsilon = -0,44$ bis $\varepsilon = -0,74$ zeigen, dass die Deformationsauswirkung der verwendeten Spezies auf deren Widerstand nicht eindeutig der von terrestrischen oder aquatischen Spezies zugeordnet werden kann, was hinsichtlich ihres Lebensraumes im Bereich der Wasserwechselzone begründbar erscheint. Wie Boller u. Carrington (2006) bereits in ihren Untersuchungen feststellten, eignet sich der Vogel-Exponent im Allgemeinen zwar gut zur vergleichenden Beschreibung des Einflusses von vegetativem Kontraktionsverhalten auf die resultierende Widerstandskraft, aus physikalischer Sicht bleiben jedoch die Mechanismen der Kontraktion unberücksichtigt und eine korrekte rechnerische Anwendung ist nicht möglich. Die Kontraktion der Pflanzen ist zwar abhängig von der Fließgeschwindigkeit, hat ihre Ursache jedoch in einer Reduktion der angeströmten Fläche und nicht in einer Reduktion der Anströmgeschwindigkeit, wie sie bei der Verwendung des Vogel-Exponenten angenommen wird. Weiterhin verursacht die Verwendung des Vogel-Exponenten als zusätzlichen Exponenten der Fließgeschwindigkeit eine Dimensionierung des Widerstandsbeiwertes c_d , die zudem noch abhängig vom pflanzenspezifischen Betrag des Vogel-Exponenten ist (Boller u. Carrington (2006)).

Tabelle 5.3.: Überblick der Vogel-Exponenten aus den vorliegenden Untersuchungen im Vergleich zur theoretischen Herleitung (de Langre u. a. (2012)) sowie Untersuchungsdaten der Studien von de Langre (2012) und Boller (2006)

de Langre u. a. (2012)	Vogel Exponent ε
Theoretisch hergeleitet	
Axial angeströmte Stäbe und Platten	-0,667
Experimentell untersucht	
Schwarzpappel belaubt (<i>Populus nigra</i>)	-0,71
Knorpeltang (<i>Chondrus crispus</i>)	-0,60
Aquatatische Blätter (Mittelwert)	-0,60
Aquatatische Spezies (41 unterschiedliche, Mittelwert)	-0,57
Landspezies (12 unterschiedliche, Mittelwert)	-0,80
Boller u. Carrington (2006)	Vogel Exponent ε
Experimentell untersucht	
Seetang	-0,42 bis -0,85
Seetang Mittelwert	-0,58
Vorliegende Studie	Vogel Exponent ε
Experimentell untersucht	
Silberweide (<i>Salix alba</i>)	-0,44
Purpurweide (<i>Salix purpurea</i>)	-0,74
Korbweide (<i>Salix viminalis</i>)	-0,51

Zusätzlich zu diesen von Boller u. Carrington (2006) aufgeführten Kriterien muss auch das typische Kontraktionsverhalten der Vegetation für die Grenzzustände berücksichtigt werden. So muss das Verhältnis zwischen unbelasteter zu belasteter Vegetationsfläche A_p/A_0 für den Grenzfall $v = 0$ gleich dem Wert $A_p/A_0 = 1$ sein, da für diesen Grenzfall keine Kontraktion stattfindet. Weiterhin wurde in zahlreichen Untersuchungen beobachtet, dass die belastete Vegetation ab einem Grenzwert der Belastung nur noch unwesentlich weiter kontrahiert (Oplatka (1998), Freeman u. a. (2000), Vollsinger u. a. (2005), Sand-Jensen (2008), Goreham u. a. (2009), Schneider (2010), Schoneboom (2011), Blamauer u. a. (2011)), so dass die beschreibende Funktion für große Fließgeschwindigkeiten also für $v \rightarrow \infty$ einen asymptotischen Verlauf annehmen muss.

Vollsinger u. a. (2005) stellten in ihren Untersuchungen an unterschiedlichen Baumarten fest, dass die Widerstandskraft pro Vegetationsmasse exponentiell mit steigender Belastung zunimmt. Boller u. Carrington (2006) definierten auf Basis ihrer Erkenntnisse aus Versuchen an Algen den theoretischen exponentiellen Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von belasteter und unbelasteter projizierter Vegetationsfläche und der durch die Fließgeschwindigkeit definierten Last (vgl. Kapitel 3.3.1):

$$A_n = A_p/A_0 = A_\infty + a_r \cdot e^{-v/\beta_a} \quad (5.7)$$

mit

A_n	normalisierte Vegetationsfläche	[m ²]
A_p	projizierte Vegetationsfläche im belasteten Zustand	[m ²]
A_0	projizierte Vegetationsfläche im unbelasteten Zustand	[m ²]
A_∞	Endgröße der projizierten Vegetationsfläche im belasteten Zustand	[m ²]
a_r	Maß für die Flächenreduktion	[–]
v	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
β_a	Koeffizient zur Beschreibung der Steilheit des exponentiellen Abstiegs der Fläche	[m/s]

In Abbildung 5.13 ist das Verhältnis zwischen belasteter und unbelasteter angeströmter Fläche zur Fließgeschwindigkeit der in dieser Arbeit untersuchten Pflanzen im Vergleich zu weiteren Untersuchungen von Schneider (2010) und Oplatka (1998), die das Kontraktionsverhalten von klassischen Weichholzarten betreffen, dargestellt. Schneider (2010) untersuchte das Kontraktionsverhalten von Pflanzen der Spezies *Ficus natascha*, die in ihren Untersuchungen als Modellweiden eingesetzt wurden, Oplatka (1998) untersuchte das Kontraktionsverhalten unterschiedlicher Strauchweiden bei hohen Belastungen. Es zeigt sich, dass sich die Untersuchungen, die in unterschiedlichen Lastbereichen durchgeführt wurden, gut ergänzen. Eine Anpassung der Koeffizienten aus der von Boller u. Carrington (2006) an Algen entwickelten Gleichung auf den aus den kombinierten Untersuchungsdaten von Strauchweiden entstehenden Verlauf zeigt, dass das Kontraktionsverhalten sehr gut mit dem exponentiellen Ansatz beschrieben werden kann. Unter Anpassung der Koeffizienten kann die Gleichung definiert werden zu:

$$A_n = A_p/A_0 = 0,05 + 0,95 \cdot e^{-v/\frac{2}{3}\text{m/s}} \quad (5.8)$$

Die Steilheit der exponentiellen Reduktion kann also definiert werden zu $\beta_a = 2/3$, während das Maß der Flächenreduktion zu $a_r = 0,95$ und die Endgröße der projizierten Vegetationsfläche im belasteten Zustand zu $A_\infty = 0,05$ definiert werden. Die Endgröße der verformten Pflanze entspricht damit $1/20$ der im unbelasteten Zustand auftretenden Fläche. Eine Anwendung dieser Gleichung sollte jedoch stets unter Berücksichtigung der natürlichen Streubreite erfolgen. Eine genauere Betrachtung der Daten zeigt, dass bei kleinen Belastungen mit $v < 2,0 \text{ m/s}$ mit Streubreiten von bis zu $\pm 0,1$ gerechnet werden muss. Mit steigender Belastung nimmt diese Streubreite signifikant ab.

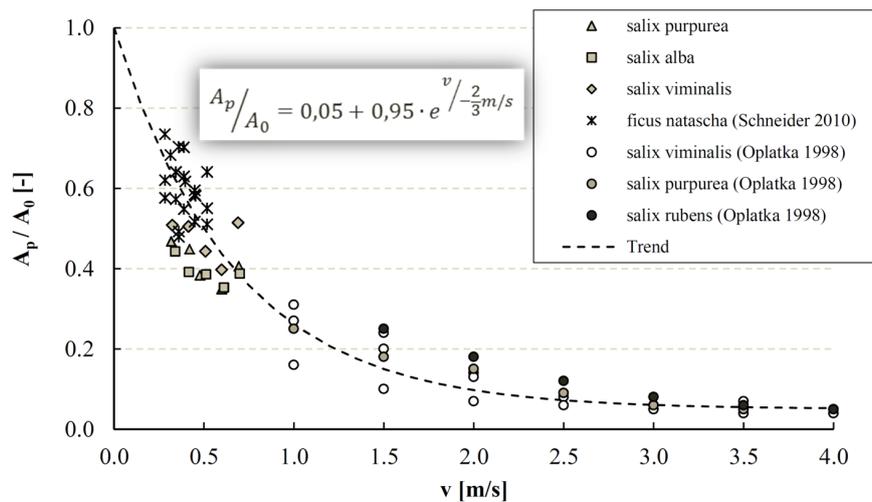


Abbildung 5.13.: Darstellung des Kontraktionsverhaltens der untersuchten Spezies im Vergleich zu weiteren Untersuchungen von Schneider (2010) und Oplatka (1998) als normierte Vegetationsfläche unter Strömungsbelastung.

5.3.4. Zusammenfassung der wesentlichen Widerstandsmerkmale und Fazit für folgende Untersuchungen

Aus den Untersuchungsergebnissen der direkt gemessenen Widerstandskraft der drei Weidenarten *Salix alba*, *Salix purpurea* und *Salix viminalis* wurden als wesentliche Einflussparameter zum hydraulischen Widerstandsverhalten das Verhältnis zwischen Wassertiefe und Pflanzenhöhe, das Vorhandensein von Belaubung und das Flexibilitätsverhalten identifiziert.

Das Verhältnis zwischen Wassertiefe und Pflanzenhöhe spielt vor allem beim Widerstand von unbelaubter Vegetation die maßgebende Rolle. Ist die Vegetation durchströmt, zeigt sich eine in Abhängigkeit von Zweigdurchmesser und Fließgeschwindigkeit auftretende Tendenz der Zweige in der Frequenz der ablösenden Wirbel zu oszillieren. Diese Oszillation erhöht den Widerstandsbeiwert der Pflanze auf mehr als das Doppelte. Da die Vorhersage dieses Schwingverhaltens auf Basis der Kenntnis der einzelnen Zweigdurchmesser und der Anströmgeschwindigkeit schwierig ist und belaubte Vegetation infolge der durch das Laub

signifikant erhöhten Anströmfläche einen deutlich höheren Widerstand aufweist als unbelaubte Vegetation, wird für die Anwendung der Formelwerke empfohlen, den Widerstand belaubter Vegetation anzusetzen und auf eine Aufspaltung in unbelaubten und belaubten Widerstand zu verzichten. Für belaubte Pflanzen hat sich gezeigt, dass das Verhältnis von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe nur geringen Einfluss auf den Widerstandsbeiwert hat. Bei Überströmung belaubter Pflanzen findet zusätzlich zur lateralen Kontraktion eine Kontraktion von oben statt, so dass der Widerstandsbeiwert infolge der strömungsoptimierten Form und auch des fehlenden Einflusses der Fluidgrenze im Vergleich zur durchströmten Pflanze im Mittel von $c_d = 0,93$ auf $c_d = 0,83$ reduziert wird.

Der Einfluss der Belaubung auf das Widerstandsverhalten der Pflanzen zeigt sich zunächst in einer Stabilisierung der Pflanze in einer von der Last abhängigen Ausrichtung. Der Anteil des Laubes am Gesamtwiderstand ist infolge der zunehmenden Kontraktion und stromlinienförmigen Ausrichtung der Blätter lastabhängig und bewegt sich für die in den vorliegenden Untersuchungen verwendeten Pflanzen und angesetzten Fließgeschwindigkeiten zwischen $F_l - F_s / F_l = 2/3$ für $v = 0,3 \text{ m/s}$ und $F_l - F_s / F_l = 1/3$ für $v = 0,6 \text{ m/s}$. Das Verhalten mit weiter steigender Belastung wird auf Basis der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Kontraktionsverhalten mit einer weiteren Abnahme bis auf einen asymptotisch angenäherten Grenzwert eingeschätzt. Diese Annahme muss jedoch durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.

Grundsätzlich zeigt sich aus den Untersuchungsergebnissen, dass die Flexibilität der Pflanzen den größten Einfluss auf das Widerstandsverhalten der strauchartigen Pflanzen hat. Aus dem exponentiellen Ansatz von Boller u. Carrington (2006) und der Überlegung zum Extremwertverhalten der Pflanzenkontraktion in Abhängigkeit der Belastung lässt sich eine Gesetzmäßigkeit des Kontraktionsverhaltens ableiten, die eine Berechnung der relativen Flächenreduktion in Abhängigkeit der Belastung zulässt. Auf diese Weise ist es möglich in der Praxis unter Kenntnis der projizierten Vegetationsfläche im unbelasteten Zustand und der Fließgeschwindigkeit die Flächenreduktion zu bestimmen. Die Anwendung der Formel sollte jedoch nur unter Berücksichtigung der natürlichen Schwankungsbreite stattfinden, die vor allem bei geringen Fließgeschwindigkeiten nicht vernachlässigt werden kann.

Aus den Untersuchungsdaten ist schließlich eine pflanzen- und lastspezifische Definition des Faktors $c_d \cdot A_p$ möglich, sofern die beobachtete Streubreite sowohl für die kontraktierte Fläche als auch für den Widerstandsbeiwert berücksichtigt wird. Mit Blick auf den physikalischen Hintergrund umfasst der Widerstandsbeiwert c_d als dimensionsloser Faktor die aus Umströmung und Körperform resultierende Widerstandsänderung eines Festkörpers. Grundsätzlich ist also eine Anpassung der bestehenden Formelwerke auf strauchartige Pflanzen, wie die untersuchten Weidenarten, möglich. Aus physikalischer Sicht ist die Anwendung der Formelwerke jedoch nicht korrekt, da die Durchströmung, wie sie bei strauchartigen Pflanzen vorliegt, völlig unberücksichtigt bleibt. An dieser Stelle stellt sich die Frage, welches Ausmaß die Durchströmung einer strauchartigen Pflanze hat und wie diese sich auf den vegetationsbedingten Widerstand auswirkt. Im Folgenden werden Untersuchungen zur Fließgeschwindigkeitsverteilung um und innerhalb durchströmter strauchartiger Pflanzen vorgestellt, die der Frage des Ausmaßes der Vegetationsdurchströmung auf den Widerstand nachgehen.

6. Das Geschwindigkeitsfeld um eine strömungsbelastete strauchartige Pflanze und die Möglichkeit der numerischen Simulation

In Kapitel 5 wurde mit einer direkten Messung der Widerstandskraft von Weidenzweigen der Widerstandsbeiwert c_d und das Kontraktionsverhalten der strauchartigen Pflanzen mit zunehmender hydrodynamischer Belastung untersucht. Grundsätzlich ist nun unter Anwendung der Untersuchungsergebnisse eine Prognose der tatsächlich wirksamen Vegetationsfläche sowie des anzusetzenden Widerstandsbeiwertes möglich. Bei genauer Betrachtung des hydraulischen Systems wird jedoch deutlich, dass die Anwendung des Festkörperansatzes mit der Gleichung der Widerstandskraft (vgl. Gleichung 5.1) auf strauchartige Pflanzen hinterfragt werden muss, denn die vorherrschende Durchströmung und der aus der Durchströmung resultierende Widerstand bleibt mit dieser Herangehensweise unberücksichtigt.

Im Folgenden werden daher Untersuchungen vorgestellt, die zunächst zum Ziel haben, mit Hilfe der Aufnahme eines hochaufgelösten Geschwindigkeitsfeldes um eine durchströmte strauchartige Pflanze die Auswirkungen der Durchströmung auf das Strömungsbild zu analysieren. In einem weiteren Schritt wird daraufhin eine Versuchsserie vorgestellt, die der Beantwortung der Frage dient, ob die Durchströmung einer strauchartigen Pflanze in einem numerischen Modell mit Hilfe eines Porositätsansatzes grundsätzlich simuliert werden kann, so dass der hydraulische Widerstand der Pflanze in der korrekten Größenordnung abgebildet wird. Der Versuchsaufbau und die Vorgehensweise der Datenanalyse sowie der Aufbau und die Kalibrierung des numerischen Modells hierzu sind in Kapitel 4 beschrieben. Im Folgenden werden zunächst Vorversuche zur Anwendbarkeit der verwendeten Pflanze *Ficus natalensis* als Modellpflanze für strauchartige Weiden (Kapitel 6.1.1) und die Resultate der Versuche zur Geschwindigkeitsverteilung um und durch eine strömungsbelastete strauchartige Pflanze beschrieben (Kapitel 6.1.2). Anschließend erfolgt die Analyse und Diskussion der Resultate (vgl. Kapitel 6.1.3) sowie die Diskussion der Implementierungsmöglichkeit mit einem Porositätsansatz innerhalb eines HN-Modells (vgl. Kapitel 6.2).

6.1. Geschwindigkeitsmessungen

Wir bei der Widerstandsberechnung von strauchartiger Vegetation der Festkörper-Widerstandsansatz verwendet, wird vorausgesetzt, dass der Widerstand auf die gleichen Widerstandsquellen wie bei einer Festkörperumströmung zurückzuführen ist. Bewirkt jedoch eine Durchströmung der Pflanzenstruktur eine

Änderung der Strömungssignatur und damit eine Änderung der Widerstandsquellen, ist die Verwendung des Festkörper-Widerstandsansatzes zur Berechnung des vegetativen Widerstands physikalisch nicht mehr korrekt. Zur Beantwortung der Frage, in welchem Ausmaß strauchartige Pflanzen durchströmt werden und welchen Einfluss diese Durchströmung auf das Widerstandsverhalten hat bzw. ob der Ansatz des Festkörperwiderstands überdacht werden muss, werden im Folgenden zunächst Untersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld um eine durchströmte Pflanze vorgestellt. Beginnend mit Vorversuchen zur Validierung der Untersuchungsmethode wird dann die Geschwindigkeitsverteilung bei unterschiedlichen Strömungszuständen vorgestellt und anschließend genauer auf ihre hydraulische Charakteristik hin analysiert.

6.1.1. Vorversuche zum Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld um eine strömungsbelastete Pflanze war es notwendig, eine Pflanze zu verwenden, die einerseits den strukturellen und mechanischen Eigenschaften einer natürlichen Weide entspricht, andererseits aber auch dem Labormaßstab gerecht wird. Eine maßstäbliche Verkleinerung der realen Weiden auf die Dimension einer Laborrinne ist aus technischer Sicht sehr komplex, da alle mechanischen und strukturellen Eigenschaften der Weiden maßstäblich ähnlich abgebildet werden müssten. Stützend auf Untersuchungen von Schneider (2010) wurde daher für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen die Spezies *Ficus natascha* verwendet. Um die Übertragbarkeit der Widerstandscharakteristik dieser Art auf die in den Untersuchungen zur Widerstandskraft verwendeten Weidenarten *Salix alba*, *Salix purpurea* und *Salix viminalis* zu überprüfen, wurden stichprobenartige Messungen zur Widerstandskraft mit *Ficus natascha* Pflanzen durchgeführt und mit den Resultaten der Weidenwiderstände (vgl. Kapitel 5) verglichen. Für diese Probe wurde der Zustand der überströmten belaubten Pflanzen gewählt. Die Ermittlung der lastabhängigen Widerstandskraft sowie der Widerstandsbeiwerte fand unter Verwendung der jeweils belasteten Vegetationsfläche statt.

Abbildung 6.1 links zeigt die Resultate der Untersuchungen zur lastabhängigen Widerstandskraft der *Ficus natascha* Pflanze im Vergleich zu den Werten der Widerstandskraft der untersuchten Weidenarten (*Salix alba*, *Salix purpurea* und *Salix viminalis*) sowie die Erwartungsfunktion des Kraftverlaufs unter der Annahme eines Widerstandsbeiwertes von $c_d = 1,0$. In Abbildung 6.1 rechts sind die ermittelten lastabhängigen Widerstandsbeiwerte im Vergleich zu denen der Weiden dargestellt. Die Resultate zeigen, dass die Kraftwerte des *Ficus natascha* in ihrem lastabhängigen Verlauf sehr nah an der Erwartungsfunktion liegen. Im Vergleich zu den Daten der Weidenarten entspricht der Verlauf der lastabhängigen Widerstandskraft von *Ficus natascha* damit etwa dem Kraftverlauf von *Salix alba* und *Salix purpurea*. Die Werte für *Salix viminalis* liegen, wie in Kapitel 5 bereits dargestellt, etwas unterhalb. Die Resultate der Widerstandsbeiwerte bestätigen die aus den Untersuchungen zur Widerstandskraft gewonnenen Erkenntnisse. Für *Ficus natascha* liegen die Widerstandsbeiwerte im Mittel bei $c_d = 1,0$, eine fallende oder steigende Tendenz mit zunehmender Last kann nicht eindeutig bestimmt werden. Damit spiegelt das Widerstandsverhalten von *Ficus natascha* das der untersuchten Weiden sehr gut wieder, womit für die folgenden Untersuchungen eine Übertragbarkeit des Widerstandsverhaltens sowie des Strömungsverhaltens um die Pflanze auf reale Weiden angenommen wird.

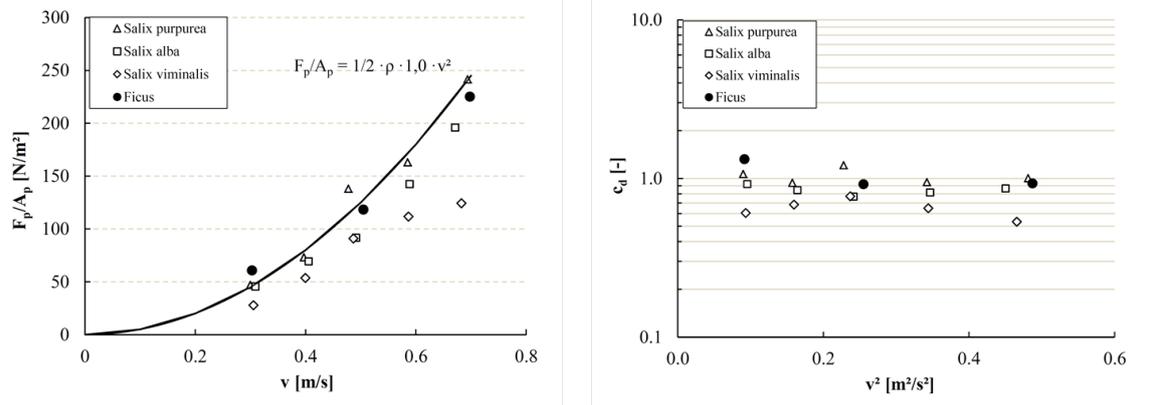


Abbildung 6.1.: Vergleich des Widerstands der für die Geschwindigkeitsuntersuchungen verwendeten *Ficus natascha* Pflanze mit den Widerstandsuntersuchungen der beliebten Weidenarten. Links: Vergleich des Kraftverlaufs auf die angeströmte Vegetationsfläche mit steigender Belastung, rechts: Vergleich des Widerstandsbeiwertes c_d mit steigender Belastung.

Wie in Kapitel 4.2 erläutert, wurde zur Visualisierung des Strömungsbildes durch eine strömungsbelastete Pflanze ein hochaufgelöstes dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld um eine überströmte strauchartige Pflanze aufgenommen. Um die Strömungscharakteristiken der aufgezeichneten Versuchszustände gut untereinander vergleichen zu können, muss zunächst das Strömungsfeld in der verwendeten Laborrinne im unbesetzten Zustand überprüft werden.

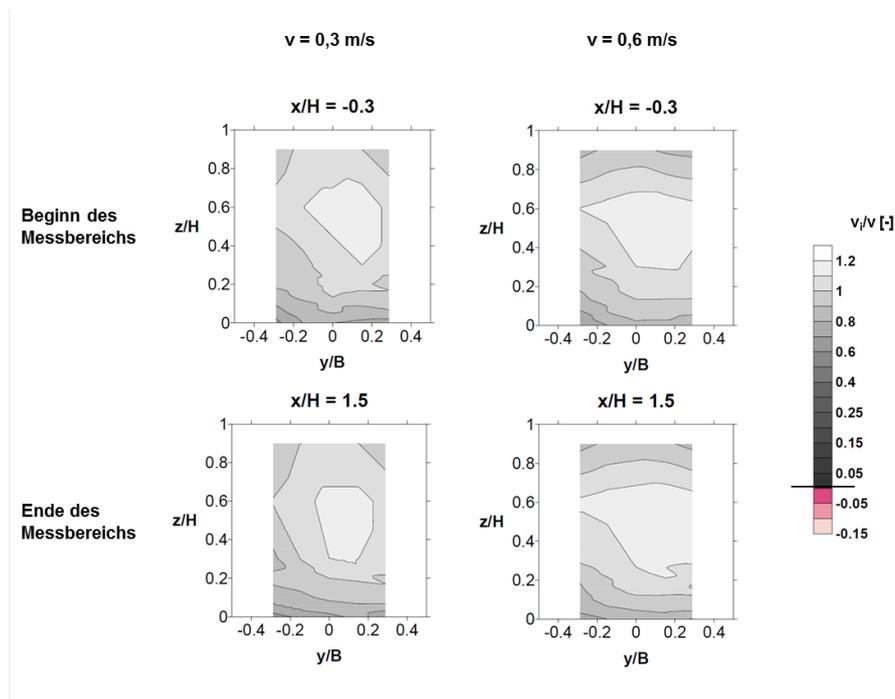


Abbildung 6.2.: Übersicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung im ersten und letzten Querprofil des Untersuchungsabschnittes in der unbesetzten Strömungsrinne bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ (linke Spalte) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (rechte Spalte).

Abbildung 6.2 zeigt Querprofile der unbesetzten Rinne bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ (linke Spalte) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (rechte Spalte). Dargestellt ist jeweils das erste und letzte Querprofil des späteren Messbereiches bei $x/H = -0,3$ und $x/H = 1,5$ als Isotachendiagramm der normierten Fließgeschwindigkeit (v_i/v) (vgl. Messraster in Abbildung 4.9). Die Isotachendiagramme vom ersten zum letzten Profil zeigen für beide mittleren Fließgeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede. Es kann also von einer gleichförmigen Strömung innerhalb des Messbereiches ausgegangen werden. Grundsätzlich zeigt sich jedoch für jedes Querprofil eine leichte Verlagerung der hohen Fließgeschwindigkeiten auf die rechte Rinnenseite. Da dieser Effekt für alle Querprofile gleich erscheint, wird die Ursache in der Rinnengeometrie oder in der Anströmsituation der Rinne gesehen. Im Rahmen der Untersuchungen war es nicht möglich, die Rinnengeometrie oder die Anströmbedingungen der Rinne zu korrigieren. Da es sich jedoch hierbei um einen systematischen Fehler handelt, der bei allen Versuchen gegeben ist, kann dieser im Weiteren unberücksichtigt bleiben.

6.1.2. Resultate der Geschwindigkeitsmessungen

Abbildung 6.3 zeigt eine Übersicht ausgesuchter Querprofile der zeitlich gemittelten normierten Fließgeschwindigkeiten aus der Geschwindigkeitserfassung als Isotachendiagramm für alle untersuchten Varianten. Die Daten sind spaltenweise aufgeteilt mit den Ergebnissen der Untersuchungen bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ unbelaubt und belaubt in den ersten beiden Spalten und den Ergebnissen bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$ unbelaubt und belaubt in den letzten beiden Spalten. Die Auswahl der Querprofile erfolgte nach charakteristischen Positionen in Bezug auf die belastete Pflanze. Dargestellt sind je die Querprofile kurz vor Eintritt in die Pflanzenstruktur am Fixierungspunkt der Pflanze ($x/H = 0,0$), direkt nach Eintritt in die Pflanzenstruktur ($x/H = 0,2$), innerhalb der Pflanzenstruktur ($x/H = 0,4$), am Austrittsquerschnitt aus der Pflanzenstruktur ($x/H = 0,8$) sowie je ein Querprofil am Ende der Aufnahmestrecke ($x/H = 1,2$).

Mit einem ersten grundlegenden Vergleich der Daten mit den Referenzmessungen aus Abbildung 6.2 wird deutlich, dass die in der unbesetzten Rinne vorgefundene unsymmetrische Strömungsverteilung quer zur Fließrichtung für den Fall der unbelaubten Pflanzen deutlich erkennbar bleibt. Im belaubten Fall dominiert die Pflanze als Störkörper jedoch das Strömungsbild, so dass die Verteilung der Fließgeschwindigkeit weitestgehend symmetrisch erscheint.

Die Resultate der Geschwindigkeitsverteilung der unbelaubten Pflanzen zeigen zwischen den Resultaten der beiden untersuchten Fließgeschwindigkeitszustände $v = 0,3 \text{ m/s}$ und $v = 0,6 \text{ m/s}$ ein vergleichbares Bild. Das erste Querprofil am Pflanzeneintrittspunkt zeigt nur geringe Auswirkungen der Pflanze auf die Strömungsverteilung. Ein Rückstauereffekt im Bereich der Pflanze (bei $y/B = 0,0$) wird nur für den Fall der geringeren Strömungsbelastung mit $v = 0,3 \text{ m/s}$ ersichtlich. Die unbelaubte Pflanze hat also infolge der hohen Permeabilität nur wenig Einfluss auf die oberstromigen Strömungsverhältnisse, so dass dort nur wenig Rückstau entsteht.

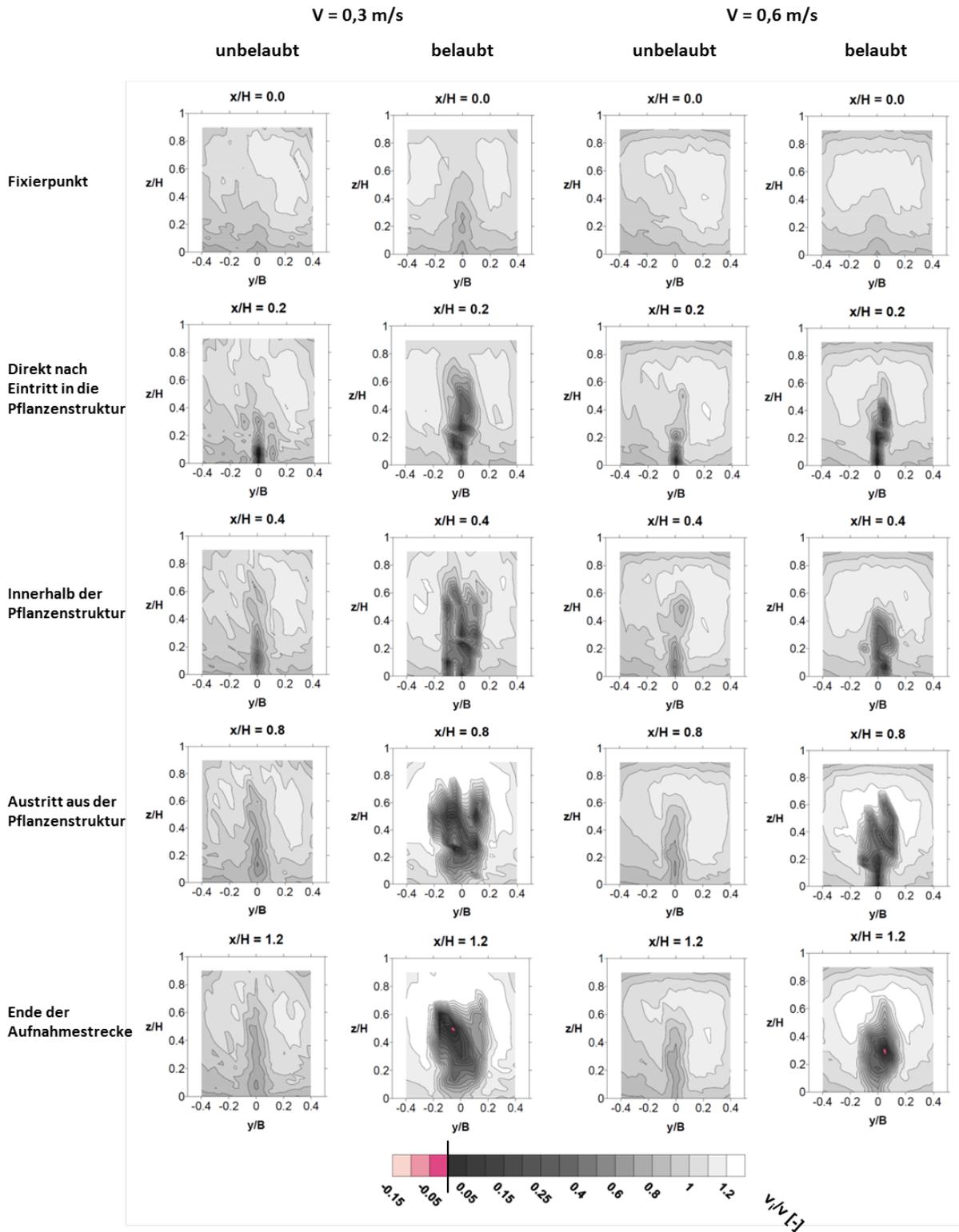


Abbildung 6.3.: Übersicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung als Querprofile für die unbelaubte (1. und 3. Spalte) und belaubte (2. und 4. Spalte) Pflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ (1. und 2. Spalte) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (3. und 4. Spalte).

Die deutlichste Geschwindigkeitsreduktion wird knapp unterstrom des Eintritts in die unbelaubte Pflanzenstruktur bei $x/H = 0,2$ erreicht. Vor allem im Nachlaufbereich des Stammes der Pflanze geht die Geschwindigkeit auf Werte um 10% der mittleren Anströmgeschwindigkeit zurück. Rückströmbereiche treten in der zeitlich gemittelten Auswertung nicht auf. Mit beginnendem Austritt der Strömung aus der Pflanzenstruktur wird die Geschwindigkeitsreduktion im Nachlauf der Pflanze abgeschwächt, bleibt aber in der Größenordnung der Verteilung am Abströmquerschnitt bei $x/H = 0,8$ bis zum letzten aufgenommenen Querprofil bei $x/H = 1,2$ in der vollen Ausdehnung erhalten. Der maßgebliche Unterschied zwischen den Resultaten der unbelaubten Pflanze bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ und der bei $v = 0,6 \text{ m/s}$ liegt einerseits in der gleichmäßigeren Strömungsverteilung und andererseits in der geringeren vertikalen Ausdehnung der Geschwindigkeitsreduktion für $v = 0,6 \text{ m/s}$.

Die Geschwindigkeitsverteilung der zeitlich gemittelten normierten Fließgeschwindigkeiten für die belaubten Pflanzen zeigen wesentliche Unterschiede zu denen der unbelaubten Pflanzen. Dies wird bereits beim ersten Querprofil am Eintritt in den Pflanzenquerschnitt deutlich. Die Pflanze selbst wird an dieser Position infolge der stromlinienförmigen Ausrichtung nur im Stammbereich von der Messsonde erreicht, dennoch zeigt sich vor allem bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ eine ausgeprägte Geschwindigkeitsreduktion bis zu einer Höhe von $z/H = 0,6$. Die maximale Höhe der gebeugten Pflanze, die etwa bei $x/H = 0,6$ erreicht wird, beträgt bei dieser Belastung etwa $z/H = 0,7$. Knapp nach Eintritt in die Pflanzenstruktur bei $x/H = 0,2$ grenzt sich der Pflanzenbereich mit einem ausgeprägten Geschwindigkeitsgradienten im Grenzbereich zwischen freier Strömung und Pflanzenstruktur vom freien Strömungsfeld ab. Das Geschwindigkeitsfeld innerhalb der Pflanzenstruktur bis zum Austrittsquerschnitt (Querprofil bei $x/H = 0,4$ und $x/H = 0,8$) ist geprägt von einer sehr ungleichverteilten Geschwindigkeit mit punktuell sehr geringen normierten Fließgeschwindigkeiten bis auf Werte unterhalb $v_i/v = 0,1$. Rückströmbereiche sind in diesem Bereich nicht zu beobachten. Weiterhin entwickelt sich um die Pflanze ein Beschleunigungsbereich, der am Ende der Pflanzenstruktur sein Maximum erreicht. Berücksichtigt werden muss an dieser Stelle, dass die hier ausgewerteten Geschwindigkeiten zeitlich gemittelte Werte darstellen, zur Analyse von möglicherweise auftretenden Rückströmungen müssen die Schwankungsgrößen betrachtet werden. Im folgenden Kapitel werden diese analysiert und beurteilt.

Das letzte aufgenommene Profil der belaubten Pflanzen ($x/H = 1,2$) zeigt für beide mittlere Geschwindigkeiten eine Vergleichmäßigung der Geschwindigkeit im Nachlauf, negative Geschwindigkeiten sind jeweils nur in einem Punkt erkennbar, eine Analyse der Rückströmung muss auch an dieser Stelle mit einer Untersuchung der Schwankungsbreiten durchgeführt werden (vgl. Kapitel 6.1.3). Die räumliche Ausdehnung des Nachlaufes der Pflanze am letzten aufgenommenen Querprofil entspricht für beide mittlere Geschwindigkeiten dem des Austrittsquerschnitts. Auch die Dimension des Beschleunigungsbereiches um die Pflanzenstruktur bleibt bis zum letzten Querprofil erhalten. Diese Effekte geben Hinweise darauf, dass die Durchströmung durch die Pflanze in einer nicht vernachlässigbaren Größenordnung auftritt, da sie die Nachlaufströmung signifikant beeinflusst. Maßgeblicher Unterschied der Geschwindigkeitsdaten zwischen $v = 0,3 \text{ m/s}$ und $v = 0,6 \text{ m/s}$ ist die räumliche Ausdehnung der Geschwindigkeitsbereiche gleicher Größenordnung. Die Charakteristik der Geschwindigkeitsverteilung innerhalb dieser Bereiche ist vergleichbar.

Abbildung 6.4 zeigt eine dreidimensionale Darstellung der aufgenommenen Geschwindigkeitsverteilungen als Isotachendiagramme mit einem ebenen Profil der normierten Geschwindigkeitsverteilung in einer Höhe

von $z/H = 0,03$ oberhalb der Rinnensohle und einem darauf ausgerichteten Längsprofil der Geschwindigkeitsverteilung in der Rinnenmitte bei $y/B = 0,0$. Dargestellt sind die Isotachendiagramme für $v = 0,3 \text{ m/s}$ (obere Reihe) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (untere Reihe) im unbelaubten (linke Spalte) und belaubten (rechte Spalte) Zustand. Mittels dieser Darstellung wird eine kontinuierliche Visualisierung der Strömungsentwicklung in Fließrichtung möglich. Die jeweils eingezeichnete grüne Linie zeigt die aus der jeweiligen Last resultierende Pflanzenkontur im Bereich des abgebildeten Längsprofils.

Aus der Grafik wird der Einfluss des Laubes auf das Strömungsbild ersichtlich. Die unbelaubten Pflanzen weisen eine deutlich geringere Beugung auf, beeinflussen die Strömung aber im wesentlichen im stark verzweigten Stammbereich. Im Bereich der äußeren Zweige zeigt sich eine ausgeprägte Durchströmung der Pflanzenstruktur. Mit beginnender Abströmung aus der Pflanzenstruktur findet ein stetiger Ausgleich der Geschwindigkeitsverteilung statt. Die Auswirkungen der Pflanze sind jedoch dennoch bis zum Ende der Aufnahmestrecke bei $x/H = 1,2$ vorhanden. Die Strömung im sohnahen Bereich zeigt wenig Beeinflussung durch die Pflanze. Die Beeinflussung der Strömung nach oberstrom ist in beiden Fällen auf eine sehr kurze Distanz von weniger als $x/H = 0,2$ begrenzt.

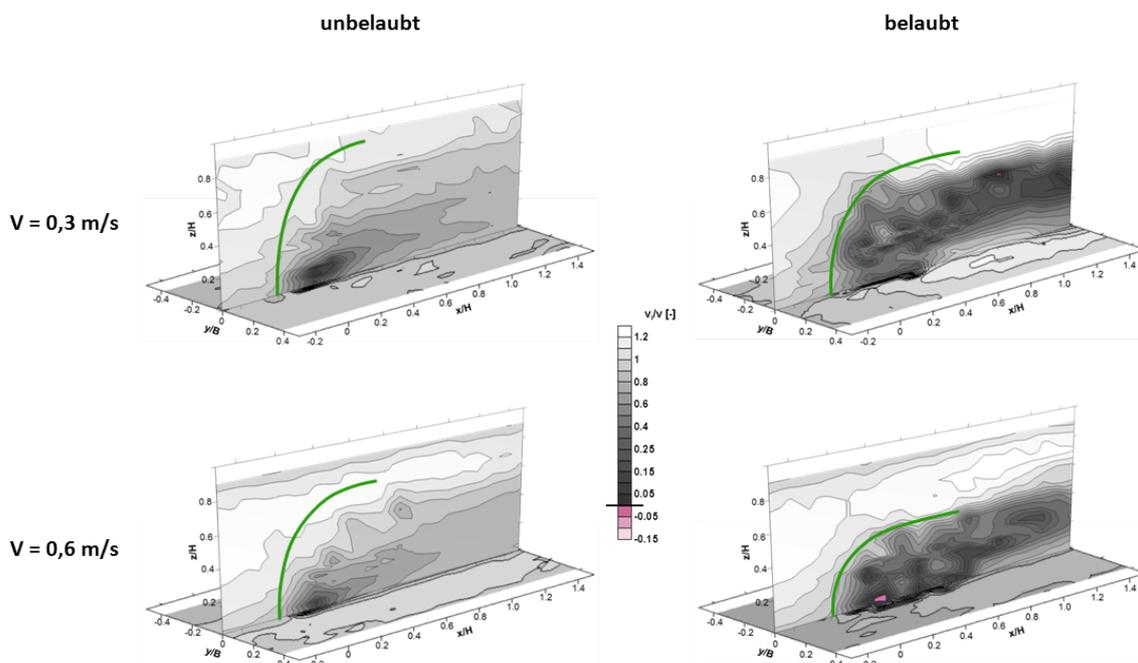


Abbildung 6.4.: Dreidimensionale Ansicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung um die strömungsbelaubte Pflanze bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ (obere Reihe) und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (untere Reihe) im unbelaubten (linke Spalte) und belaubten (rechte Spalte) Zustand.

Für die belaubte Pflanze bestätigt sich das aus den Querprofilen entnommene Bild. Die Durchströmung der Pflanze führt zu einer stark reduzierten aber positiven Geschwindigkeit mit unregelmäßiger Verteilung innerhalb der Pflanzenstruktur und einem ausgeprägten Geschwindigkeitsgradienten zur freien Strömung. Das Feld der reduzierten Geschwindigkeit wird im Nachlauf als kontinuierliche Abströmung bis zum letzten Aufnahmeprofil fortgesetzt. Im sohnahen Bereich wird im Nachlauf vor allem für $v = 0,3 \text{ m/s}$ eine Beschleunigung der Strömung erkennbar. Rückströmbereiche mit negativen mittleren Fließgeschwindig-

keiten sind nur im direkten Nachlauf des Stammes bei $v = 0,6 \text{ m/s}$ zu erkennen. Für $v = 0,3 \text{ m/s}$ ist eine Stauwirkung der Pflanze bis zum ersten aufgenommenen Geschwindigkeitsprofil bei $x/H = -0,2$ sichtbar. Die Stauwirkung bei $v = 0,6 \text{ m/s}$ beschränkt sich auf einen sehr kurzen Bereich oberstrom der Pflanzenstruktur, das Querprofil bei $x/H = -0,2$ zeigt in diesem Fall eine unbeeinflusste Strömungsverteilung.

6.1.3. Die Strömungscharakteristik um eine strauchartige Pflanze

Die Analyse der Geschwindigkeitsverteilung um und innerhalb einer strauchartigen Pflanze (vgl. Kapitel 6.1.2) hat gezeigt, dass die strauchartige Struktur sowohl für die unbelaubte als auch die belaubte Pflanze das Strömungsverhalten im Nachlauf signifikant beeinflusst. Damit unterscheidet sich das hydraulische Bild der durchströmten Pflanze wesentlich von dem um einen Festkörper. In Abbildung 6.5 zeigt eine Systemskizze des Effektes am Beispiel eines Festkörperzylinders im Vergleich zu einem porösen Zylinder:

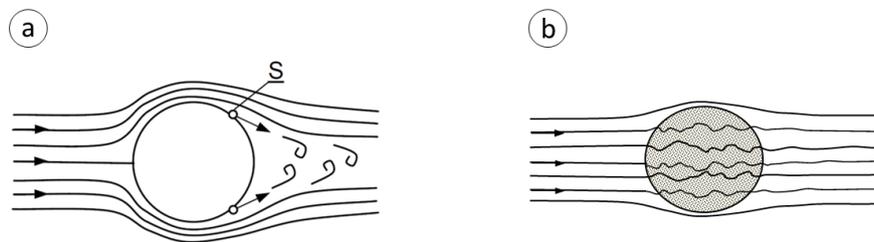


Abbildung 6.5.: Systemskizze der Strömungscharakteristik an einem Zylinder: (a) als umströmter Festkörper, (b) als durchströmter poröser Körper.

Die Pflanze wird durchströmt, die Fließgeschwindigkeit innerhalb der Pflanze wird jedoch infolge lokaler Widerstände durch Zweige und Blätter reduziert. Das Geschwindigkeitsfeld innerhalb der Pflanze ist inhomogen verteilt, da die Verteilung der Blätter und Zweige und die daraus resultierenden Reibungs- und Druckverhältnisse zu lokalen Beschleunigungen oder Geschwindigkeitsreduktionen führt. Der Strömungsimpuls aus der Pflanzenstruktur unterstrom der Pflanze führt zu einer Fortsetzung des Geschwindigkeitsfeldes mit verringerter Fließgeschwindigkeit im Gegensatz zum Strömungsbild an einem Festkörper, dessen strömungsabgewandte Seite von Unterdruck und daraus resultierender periodischer Rückströmung geprägt ist.

Abbildung 6.6 zeigt die vertikalen Geschwindigkeitsprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten in der Rinnenmitte sowie die Schwankungsbreiten an jedem Messpunkt für $v = 0,3 \text{ m/s}$ für die belaubte Pflanze (obere Reihe) sowie die unbelaubte Pflanze (untere Reihe). In Anlehnung an die Darstellung der Querprofile ist je ein Profil oberstrom der Pflanze ($x/H = -0,2$), am Fixierungspins ($x/H = -0,0$), knapp unterstrom des Fixierungspins ($x/H = 0,2$), innerhalb der Pflanzenstruktur ($x/H = 0,4$), am Austrittsquerschnitt ($x/H = 0,8$) und am Ende der Aufzeichnungsstrecke ($x/H = 1,2$) dargestellt. Die Höhe der gebeugten Pflanze ist in den betreffenden Profilen mit einer horizontalen Linie gekennzeichnet. Die Schwankungsbreiten umfassen jeweils den maximalen und minimalen Wert der Fließgeschwindigkeit am

jeweiligen Messpunkt aus der Messdauer von 3 Minuten. Eine detaillierte Turbulenzauswertung nach zeitlichen und räumlichen Schwankungsgrößen wäre aufgrund des großen Messvolumens der P-EMS-Sonde nicht aussagekräftig (vgl. Kapitel 4.2).

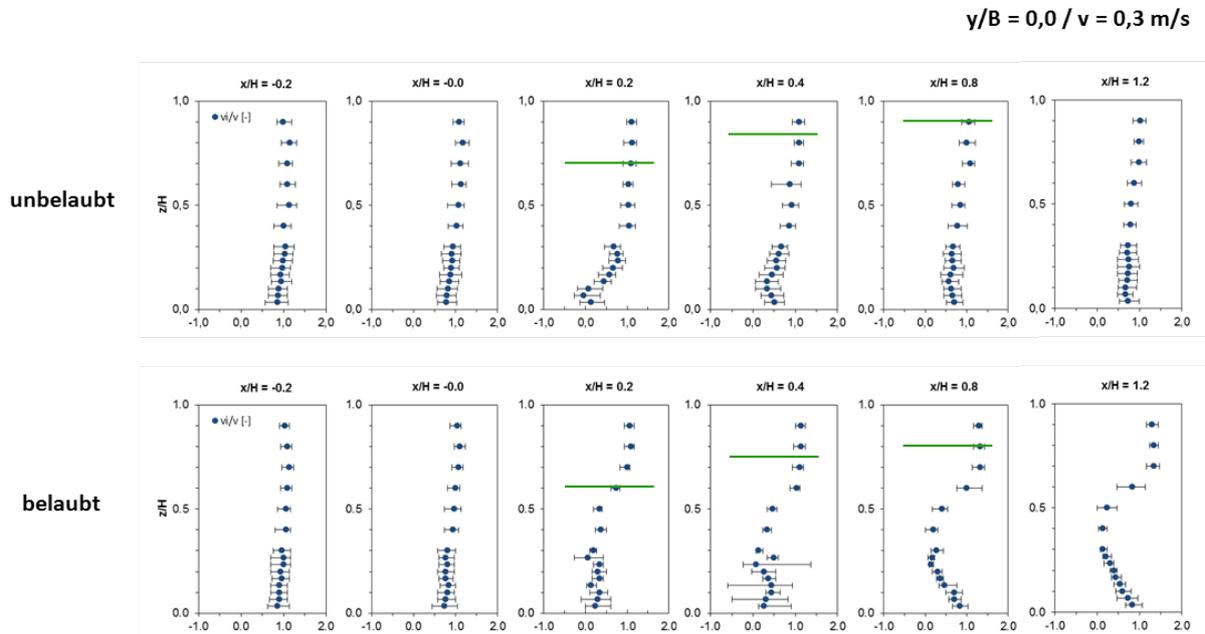


Abbildung 6.6.: Vergleich der normierten vertikalen Geschwindigkeit und ihrer Schwankungsgrößen entlang der Längsachse zentral durch die durchströmte Pflanze ($y/B = 0,0$) für den unbelaubten (obere Reihe) und belaubten (untere Reihe) Fall bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

Eine Analyse der Daten bestätigt im Wesentlichen die Beobachtungen aus Kapitel 6.1.2. Oberstrom der Pflanze ist ein ungestörtes Geschwindigkeitsprofil zu beobachten mit moderaten Schwankungsbreiten und einer Geschwindigkeitsreduktion am Wasserspiegel infolge der Fluidgrenze. Mit Eintritt in die Pflanzenstruktur spiegelt sich die Dimension und Struktur der gebeugten Pflanze im Geschwindigkeitsprofil wieder. Die Geschwindigkeitsprofile der unbelaubten Pflanze weisen in der unteren Hälfte der Pflanze eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion auf, während die Strömung im oberen Bereich der Pflanze bis zur frei fließenden Strömung nur geringen Störungen unterliegt. Dieser Effekt ist auf die Zweigverteilung der unbelaubten Pflanze zurückzuführen. Im Stammbereich ist die Pflanze deutlich dichter verzweigt und hat größere Zweigdurchmesser, die Randbereiche sind geprägt von einzelnen dünnen Zweigen. Die zur Sohle hin zunehmenden Schwankungsbreiten sind ein Indiz für zunehmende Wirbelbildung im direkten Nachlauf des Stammbereiches, die auch die Schwankungen in den negativen Geschwindigkeitsbereich direkt unterstrom des Stammes bei $x/H = 0,2$ erklären.

Auch für die belaubte Pflanze tritt die Geschwindigkeitsreduktion nicht unmittelbar an der Grenze von Pflanze und freiem Fluid auf, sondern erst mit zunehmendem Eintritt in die Pflanzenstruktur. Zahlreiche Autoren zeigten an Untersuchungen überströmter Vegetationsfelder, dass Wirbelbildungen im Grenzbe-
 reich zwischen freier Strömung und Vegetationsstruktur das Geschwindigkeitsprofil im grenznahen Vegetationsbereich deutlich beeinflusst (vgl. Kapitel 3.2.1). Nach Ghisalberti und Nepf (2000; 2002; 2008) ist die

Eindringtiefe dieser Wirbelstrukturen abhängig von Vegetationsdichte, Struktur und Reynoldszahl. Die verringerte Geschwindigkeitsreduktion im Grenzbereich der Pflanzenstruktur im Vergleich zum Pflanzeninneren kann auf den Einfluss dieser Wirbelstrukturen, aber auch auf eine größere Permeabilität an dieser Stelle zurückgeführt werden. Innerhalb der belaubten Pflanze sind deutliche lokale Schwankungsbreiten zu verzeichnen, die sehr unregelmäßig verteilt sind und an die inhomogene Geschwindigkeitsverteilung der Conturplots innerhalb der Pflanzenstruktur erinnern. Diese Verteilung ist auf lokale Ablösungen und Druckschwankungen an den einzelnen Blättern und Zweigen zurückzuführen. Die Detektion dieser Schwankungen hängt aber auch maßgeblich von der Position des Sondenkopfes zu einzelnen Strukturelementen ab. Der Abstand der Messpunkte voneinander beträgt je nach Position zwischen 0,01m und 0,03m in der Vertikalen und 0,03m in der Horizontalen (vgl. Kapitel 4.2). Trifft das Messvolumen der Sonde den direkten Nachlauf eines Zweiges oder Blattes, sind andere Schwankungsbreiten zu erwarten als bei einer Position des Messvolumens zwischen zwei Strukturelementen.

Ein Vergleich der Geschwindigkeitsprofile im Nachlauf der unbelaubten und belaubten Pflanze zeigt deutliche Unterschiede in ihrer Charakteristik. Im Fall der unbelaubten Pflanze gleicht sich das Geschwindigkeitsprofil bereits bei Austritt aus der Pflanzenstruktur dem eines ungestörten Geschwindigkeitsprofils an. Bis zum Ende der Aufnahmestrecke ist nur noch eine geringe Abweichung des Geschwindigkeitsprofils von dem des ersten Messquerschnitts zu erkennen. Auch die Schwankungsbreiten zeigen keine wesentlichen Abweichungen mehr. Für den belaubten Fall sieht der Verlauf deutlich anders aus. Die grundsätzliche Geschwindigkeitsreduktion im Bereich der Pflanzenstruktur setzt sich zunächst fort bis zum letzten Messquerschnitt, während die Schwankungsbreiten im Nachlauf deutlich unter die des ungestörten Profils am ersten Messquerschnitt zurückgehen. Im Gegensatz dazu fällt eine deutliche Zunahme der Schwankungsgrößen im Grenzbereich zwischen Nachlauf und frei fließender Strömung auf.

Aus diesem Bild kann geschlossen werden, dass der aus der Durchströmung der Pflanze resultierende Impuls in Hauptströmungsrichtung einen Unterdruck auf der unterstromigen Seite der Pflanze, wie er bei Festkörpern auftritt, unterbindet, so dass sich eine geschwindigkeitsreduzierte aber stabile und gerichtete positive Strömung im Nachlauf entwickelt. Zwischen dieser langsamen Nachlaufströmung und der freien Strömung entsteht eine Scherschicht mit großem Geschwindigkeitsgradienten, der zu lokalen Wirbelbildungen führt und damit die erhöhten Schwankungen im Grenzbereich produziert.

Sohnah zeigt sich mit zunehmendem Verlauf nach unterstrom eine Zunahme der mittleren Geschwindigkeit. Dies ist auf die sich nach unten hin verjüngende Geometrie der Pflanze zurückzuführen. Der schmale Stammbereich wird umströmt, es bildet sich ein kurzer lokaler Nachlauf mit den charakteristischen Wirbelstrukturen, die sich in den lokalen Schwankungsbreiten zeigen und die relativ schnelle Umströmgeschwindigkeit verteilt sich im verlängerten Nachlauf über die gesamte Breite der Pflanze. Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass das Laub einer strauchartigen Pflanze das Strömungsfeld um eine strauchartige Pflanze maßgeblich beeinflusst und damit auch einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtwiderstand der Pflanze beiträgt. Järvelä u. Helmiö (2004) ermittelten aus ihren Untersuchungen einen Anteil des Laubes am Gesamtwiderstand der Pflanze von 90%, während Schoneboom (2011) und Wilson u. a. (2008) feststellten, dass der Anteil des Laubes am Gesamtwiderstand von der mittleren Anströmgeschwindigkeit abhängt (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Resultate der Kraftmessungen an *Salix alba*, *Salix*

purpurea und *Salix viminalis* zeigen einen geschwindigkeitsabhängigen Anteil des Laubes zwischen etwa 70% bei einer mittleren Geschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ und etwa 33% bei $v = 0,7 \text{ m/s}$ (vgl. Kapitel 5.3.2).

Abbildung 6.7 zeigt einen Vergleich der vertikalen Geschwindigkeitsprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten in der Rinnenmitte bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) und entlang des seitlichen Grenzbereiches zwischen gebeugter Pflanze und freier Strömung bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) sowie die Schwankungsbreiten an jedem Messpunkt für $v = 0,3 \text{ m/s}$. Die Auswahl der Profile in Strömungsrichtung entspricht der Darstellung aus Abbildung 6.6, ebenso wurde die Höhe der gebeugten Pflanze in den betreffenden Profilen mit einer horizontalen Linie gekennzeichnet.

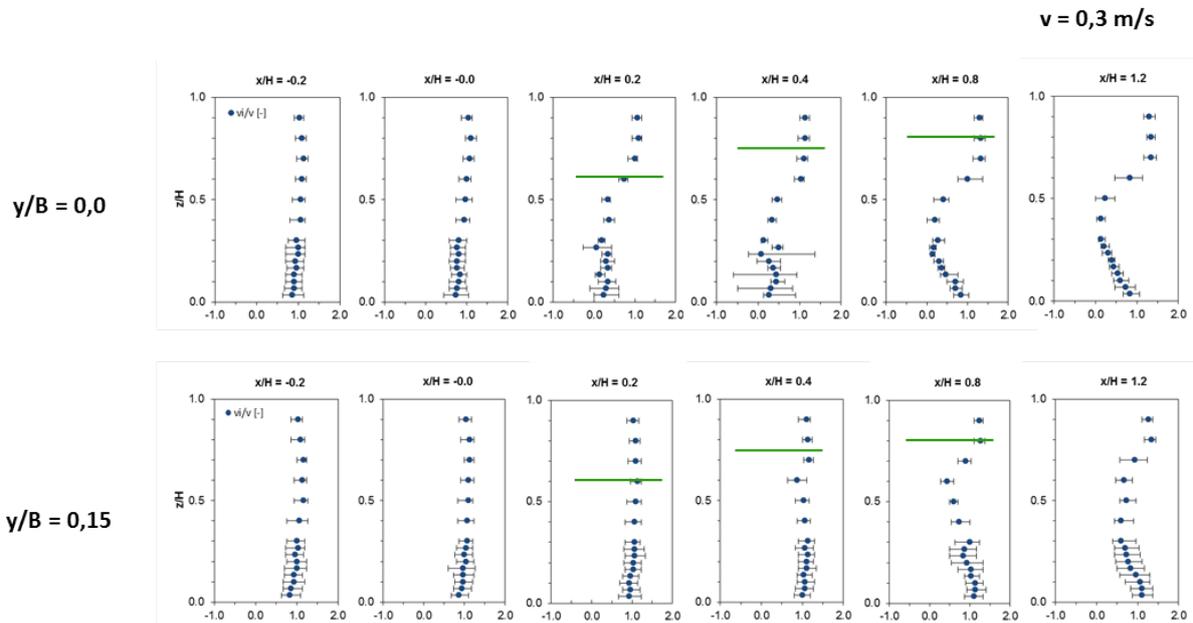


Abbildung 6.7.: Vergleich der normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofile zentral durch die durchströmte Pflanze bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) mit den normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofilen entlang des Randbereiches der strömungsbelasteten Pflanze bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

Infolge der stromlinienförmigen Ausrichtung der Pflanze wird das Strömungsfeld im seitlichen Grenzbereich zwischen durchströmter Pflanze und freier Strömung erst bei $x/H = 0,4$ von der Pflanzenstruktur leicht beeinflusst. Beim Austrittsquerschnitt aus der Pflanzenstruktur wird die Beeinflussung in Form einer Geschwindigkeitsreduktion einhergehend mit einer moderaten Reduktion der Schwankungsbreiten über die gesamte Höhe der gebeugten Pflanze deutlich (vgl. Abbildung 6.7 untere Reihe). Etwa die untere Hälfte des Pflanzenbereiches zeigt zwar nur eine moderate Geschwindigkeitsreduktion, die Schwankungsbreiten nehmen in diesem Bereich jedoch deutlich zu.

In einem Vergleich dieser Resultate mit dem entsprechenden Isotachendiagramm der Querprofile aus Abbildung 6.3 wird ersichtlich, dass das Profil gerade den Grenzbereich zwischen langsamer Nachlaufströmung und schneller freier Strömung trifft. Infolge der Pflanzenform liegt der obere Teil des Profils

im Bereich der stabilen Nachlaufströmung der Pflanzenstruktur und der sohlnahe Teil erreicht die Scherzone, worauf die erhöhten Schwankungsbreiten an dieser Stelle zurückzuführen sind. Das letzte Profil des Messbereichs zeigt, wie die Aufzeichnungen entlang der Rinnenmitte auch, eine nahezu unveränderte Fortführung des Geschwindigkeitsverlaufes entlang des Profils. Die Schwankungsbreiten nehmen zu, vor allem im Bereich der oberen Pflanzengrenze wird infolge der Scherschicht zwischen Nachlauf und freier Strömung, wie auch beim Profil der Rinnenmitte, eine ausgeprägte Schwankungsbreite deutlich.

Abbildung 6.8 zeigt einen Vergleich der vertikalen Geschwindigkeitsprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten in der Rinnenmitte bei $y/B = 0,0$ für $v = 0,3 \text{ m/s}$ (obere Reihe) und für $v = 0,6 \text{ m/s}$ (untere Reihe) sowie die Schwankungsbreiten an jedem Messpunkt. Die Auswahl der Profile in Strömungsrichtung entspricht der Darstellung aus Abbildung 6.6, ebenso wurde die Höhe der gebeugten Pflanze in den betreffenden Profilen mit einer horizontalen Linie gekennzeichnet. Die normierten Geschwindigkeitsprofile für $v = 0,6 \text{ m/s}$ zeigen zunächst eine sehr ähnliche Charakteristik wie die für $v = 0,3 \text{ m/s}$, jedoch spiegelt sich die zunehmende Kontraktion der Pflanze mit steigender Last auch im Geschwindigkeitsprofil wieder. Die vertikale Ausdehnung der Geschwindigkeitsreduktion innerhalb der Pflanzenstruktur wird entsprechend der Kontraktion der Pflanze gestaucht. Die für $v = 0,3 \text{ m/s}$ vorherrschenden großen Schwankungsbreiten innerhalb der Pflanzenstruktur sind für $v = 0,6 \text{ m/s}$ nur noch an wenigen lokalen Stellen wiederzufinden. Als Ursache ist an dieser Stelle die stromlinienförmige Ausrichtung der Blätter zu sehen, die mit zunehmender Last ebenfalls zunimmt, so dass lokale Störungen und damit einhergehende Wirbelstrukturen verringert werden und eine gerichtete Strömung durch die Pflanze entsteht.

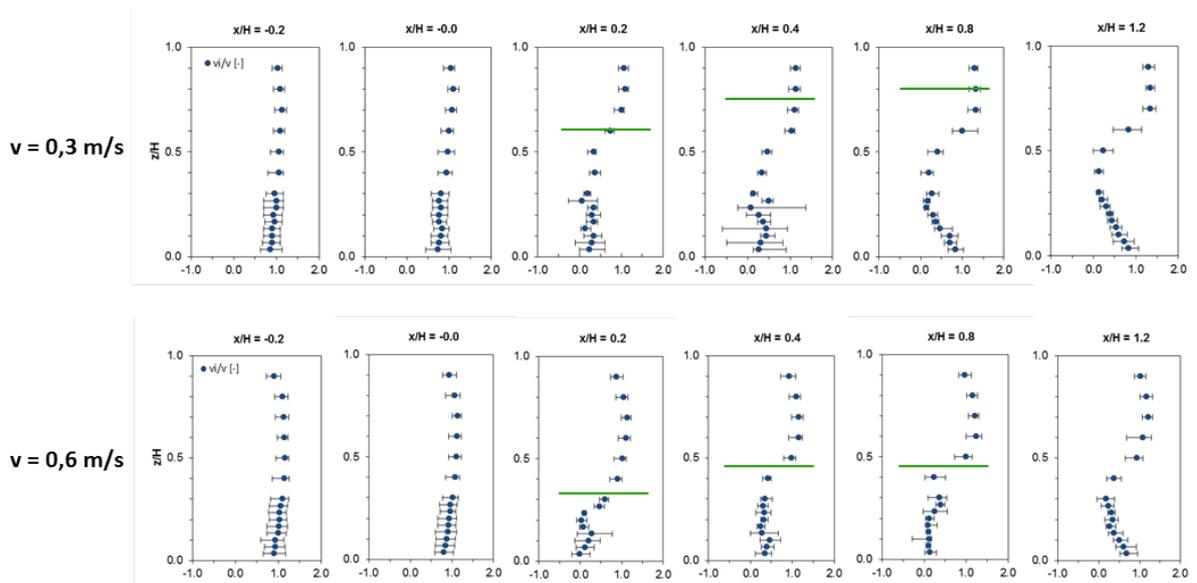


Abbildung 6.8.: Vergleich der normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofile zentral durch die durchströmte Pflanze bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ (obere Reihe) mit den normierten vertikalen Geschwindigkeitsprofilen zentral durch die durchströmte Pflanze bei $v = 0,6 \text{ m/s}$ (untere Reihe).

Die Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung um eine strauchartige Pflanze haben gezeigt, dass die Durchströmung der strauchartigen Pflanzen eine Größenordnung erreicht, die die Hydraulik und damit auch das Widerstandsverhalten der Pflanzen wesentlich beeinflusst. Vorwiegend führt die Durchströmung

und der daraus resultierende Strömungsimpuls in Fließrichtung zu einer gerichteten geschwindigkeitsreduzierten Nachlaufströmung ohne Rückströmungen im direkten Nachlauf. Eine Strömungsablösung mit einhergehendem Unterdruck auf der strömungsabgewandten Seite und Ausbildung der klassischen periodischen Wirbel wird aufgrund dieser positiven Nachlaufströmung im direkten Nachlauf zunächst unterbunden. Eine Aussage zu möglichen Wirbelbildungen im weiter unterstromigen Bereich ist an dieser Stelle nicht möglich. Aus dem geschwindigkeitsreduzierten Nachlauf und der gleichzeitig vorherrschenden seitlichen Umströmung mit erhöhter Geschwindigkeit entsteht ein ausgeprägter Geschwindigkeitsgradient, der auf eine Scherschicht hinweist.

Der Strömungswiderstand strauchartiger Pflanzen resultiert also im Vergleich zum Strömungswiderstand von Festkörpern aus anderen Widerstandsquellen. Der Widerstand infolge Strömungsablösung und Unterdruck auf der strömungsabgewandten Seite wird im Wesentlichen abgelöst vom Widerstand infolge lokaler Reibung während der Durchströmung der Pflanzenstruktur und der Wirbelbildung im Bereich der Scherschicht zwischen Nachlauf und Umströmung.

Die Vermutung, dass eine Betrachtung der strauchartigen Pflanze als Festkörper in der Widerstandsrechnung physikalisch nicht korrekt ist, ist damit richtig. Zur Beurteilung und rechnerischen Erfassung der Widerstandsquellen und des resultierenden Gesamtwiderstands der strauchartigen Pflanzen ist eine detailliertere Untersuchung der Strömungsverhältnisse notwendig. Die Situation einer durchströmten Geometrie legt nahe, die Pflanze als poröse Struktur zu betrachten und mit Ansätzen zur porösen Durchströmung den Widerstand zu quantifizieren. Im folgenden Kapitel wird eine Untersuchungsreihe vorgestellt, die die Möglichkeit der numerischen Simulation einer Pflanzendurchströmung mittels eines Porositätsansatzes untersucht.

6.2. Numerische Untersuchungen zur Durchströmung einer strauchartigen Pflanze unter Anwendung des Porositätsansatzes

Eine hydrodynamisch numerische Modellierung der Durchströmung strauchartiger Pflanzen stellt bis heute eine große Herausforderung dar, da zur Berücksichtigung von Struktur und biomechanischem Verhalten der flexiblen Pflanzen bisher keine numerisch verwendbaren Ansätze zur Verfügung stehen. Bisherige Studien implementieren den vegetationsbedingten hydraulischen Widerstand als Formwiderstand in den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANS) unter der idealisierten Annahme einer Zylindergruppe mit bestimmtem Widerstandsbeiwert c_d und geometrischen Kenngrößen (Choi u. Kang (2004), Defina u. Bixio (2005), Fischer-Antze u. a. (2001), Lopez u. Garcia (2001), Naot u. a. (1996), Naylor (2003)). In einigen Studien wurde damit begonnen, die Vegetation explizit innerhalb des numerischen Gitters zu berücksichtigen, um die Realität der Pflanzendurchströmung genauer abzubilden (Stoesser u. a. (2009), Stoesser u. a. (2010)). Über diese Vorgehensweise kann dann der Ansatz der Vegetation als poröses Medium verfolgt und die Auswirkung unterschiedlicher Besatzdichte auf das Strömungsfeld untersucht werden (Nicolle u. Eames (2011) und Chang u. Constantinescu (2012)). Wenn es gelingt, mit Hilfe eines Porositätsansatzes die reale Durchströmung einer strauchartigen Pflanze abzubilden, so ist es möglich,

das Strömungsfeld im Detail auch innerhalb der Pflanze zu untersuchen, wo eine direkte Messung der Strömungsparameter und Auswertung nach Turbulenzcharakteristik mit den bisherigen Messmethoden nicht möglich ist. Im Folgenden wird eine Untersuchungsreihe vorgestellt, in der die in Kapitel 6.1 beschriebenen Resultate zur Geschwindigkeitsverteilung um eine strauchartige Pflanze genutzt wurden, um ein hydrodynamisch-numerisches Modell der Durchströmung einer strauchartigen Pflanze auf Basis eines Porositätsansatzes aufzustellen und das Strömungsbild sowie das resultierende Widerstandsverhalten genauer zu analysieren. Die Untersuchungen wurden in gemeinsamer Arbeit mit Thorsten Stoesser und SuJin Kim der Computational Fluid Dynamics Group am Georgia Institute of Technology (USA) mit dem Programm SSIIM durchgeführt. Detaillierte Informationen zu Programm, Modellaufbau und Kalibrierung sind in Kapitel 4.3 dargestellt.

6.2.1. Validierung des Modells anhand der Labordaten zur Geschwindigkeitsverteilung

Bevor eine Analyse der numerisch ermittelten Strömungsverteilung innerhalb und um eine mittels Porositätsansatz simulierte strauchartige Pflanze möglich ist, muss zunächst die Anwendbarkeit dieses Ansatzes auf diesen konkreten Fall überprüft werden. Aus diesem Grund wurden die im Labor ermittelten Untersuchungsdaten zum Geschwindigkeitsfeld um und innerhalb einer strauchartigen Pflanze bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ und $v = 0,6 \text{ m/s}$ (vgl. Kapitel 6.1) genutzt, um eine Validierung des Modells durchzuführen. Bei der Verwendung des Porositätsansatzes wird innerhalb des Berechnungsgitters jeder Zelle, die innerhalb der Pflanze liegt, ein Porositätswert zugewiesen und damit die verringerte Permeabilität bzw. der Widerstand in Form eines aus dem Widerstand resultierenden hydraulischen Gradienten simuliert. Eine Detaillierte Beschreibung des Modellaufbaus sowie der Berechnungsweise ist in Kapitel 4.3.2 zu finden.

In den Abbildungen 6.9 und 6.10 sind die Ergebnisse der numerischen Simulation für eine mittlere Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ und $v = 0,6 \text{ m/s}$ als Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung den Messdaten aus den Laboruntersuchungen gegenübergestellt. Die oberen beiden Reihen zeigen jeweils die Resultate der Laboruntersuchungen, die unteren beiden Reihen die Resultate der numerischen Berechnung an den entsprechenden Querprofilen. Wie auch bei den Grafiken zur Geschwindigkeitsverteilung in Kapitel 6.1, fiel die Auswahl der Querprofile auf die strömungsbedingt charakteristischen Bereiche kurz oberstrom der Pflanze ($x/H = -0.2$), direkt am Fixierungspin ($x/H = 0.0$), unterstrom des Fixierungspins ($x/H = 0.2$), innerhalb der Pflanzenstruktur ($x/H = 0.4$), am Austrittsquerschnitt aus der Pflanze ($x/H = 0.8$) und unterstrom der Pflanze auf Höhe des letzten Messquerschnitts der Laboruntersuchungen ($x/H = 1.2$). Grundsätzlich zeigen die Resultate der Berechnungsergebnisse im Vergleich zu den gemessenen Geschwindigkeitsdaten eine gute Übereinstimmung. Wie auch für die gemessenen Geschwindigkeitsprofile liegt für beide mittleren Geschwindigkeiten eine nahezu unbeeinflusste Geschwindigkeitsverteilung oberstrom der Pflanze ($x/H = -0.2$) vor, während sich am Fixierungspin bei $x/H = 0.0$ vor allem für $v = 0,3 \text{ m/s}$ eine Wölbung der Isotachen im Bereich des Pins mit reduzierten Geschwindigkeiten ausbildet. Die Ausdehnung und auch Größenordnung der Geschwindigkeitsreduktion innerhalb der Pflanzenstruktur zeigt vergleichbare Verhältnisse zwischen den gemessenen und den berechneten Ergebnissen, wobei die berechneten Querprofile eine deutlich gleichmäßigere Verteilung der Isotachen aufweisen.

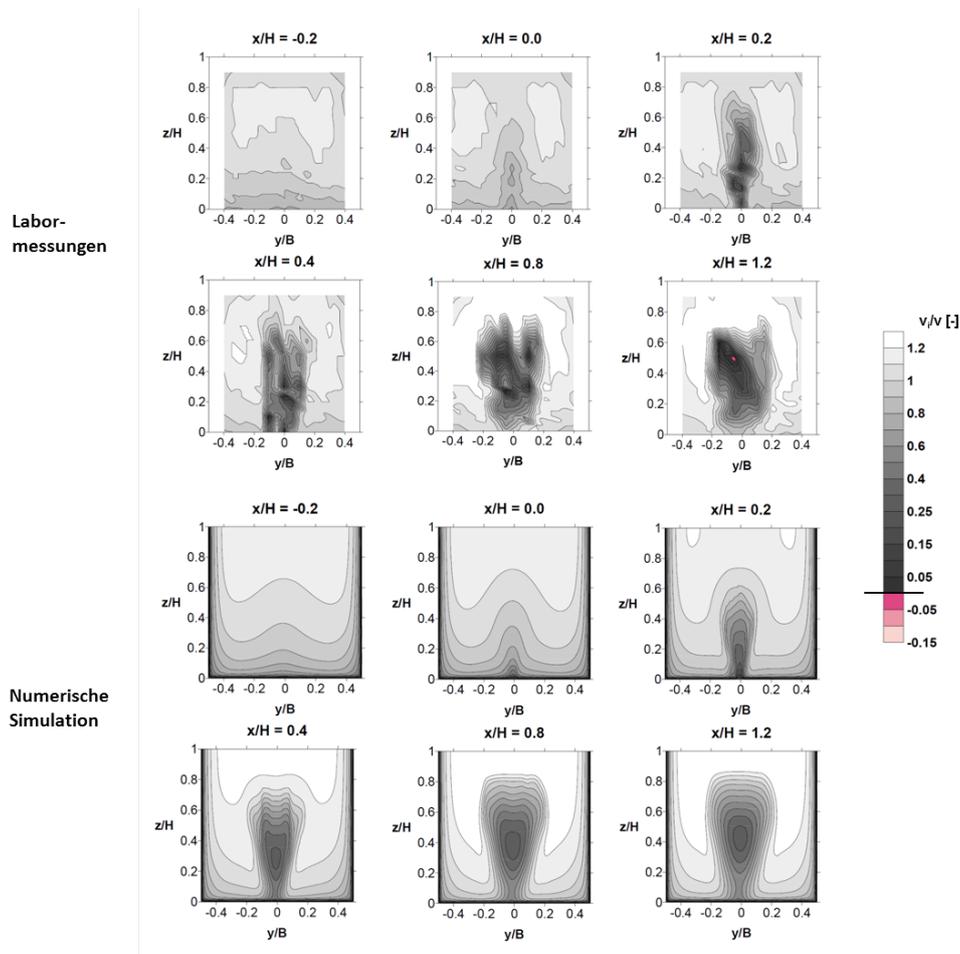


Abbildung 6.9.: Vergleich der im Labor gemessenen Querprofile der Fließgeschwindigkeit (obere sechs Isotachendiagramme) mit den in der numerischen Simulation berechneten Geschwindigkeitsprofilen an den selben Positionen bezogen auf die belastete Pflanze (untere sechs Isotachendiagramme) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

Diese Homogenität innerhalb der simulierten Pflanzenstruktur ist auf die Zuweisung der Porositätswerte innerhalb des Berechnungsgitters zurückzuführen, die auf gleichmäßige Weise erfolgte, während die Blätter und Zweige innerhalb der realen Pflanze vor allem im Fall geringer hydraulischer Belastung ungleichmäßig über das Pflanzenvolumen verteilt sind. Je höher die Belastung auf die Pflanze, desto stärker richten sich Blätter und Zweige stromlinienförmig aus und desto homogener wird auch die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der realen Pflanze. Aus diesem Grund ist die Verteilung der Isotachen bei $v = 0,6 \text{ m/s}$ auch für die Daten der Labormessung deutlich homogener. Wie auch schon in Kapitel 6.1 dargestellt, wirkt sich zudem die Position der Messsonde zu den Einzelstrukturen innerhalb der Pflanze auf die lokale Geschwindigkeitsmessung aus. Unterstrom der Pflanze setzt sich im Nachlaufbereich für die numerisch ermittelte Geschwindigkeitsverteilung, wie auch bei den gemessenen Daten beobachtet, das Geschwindigkeitsbild des Austrittsquerschnitts fort ($X/H = 0,8$ bis $x/H = 1,2$) und es liegt eine symmetrische Verteilung vor. Die Verteilung der gemessenen Daten erscheint infolge unsymmetrischer Verteilung der Einzelstrukturen der Pflanze unsymmetrisch, die Asymmetrie setzt sich nach unterstrom hin fort.

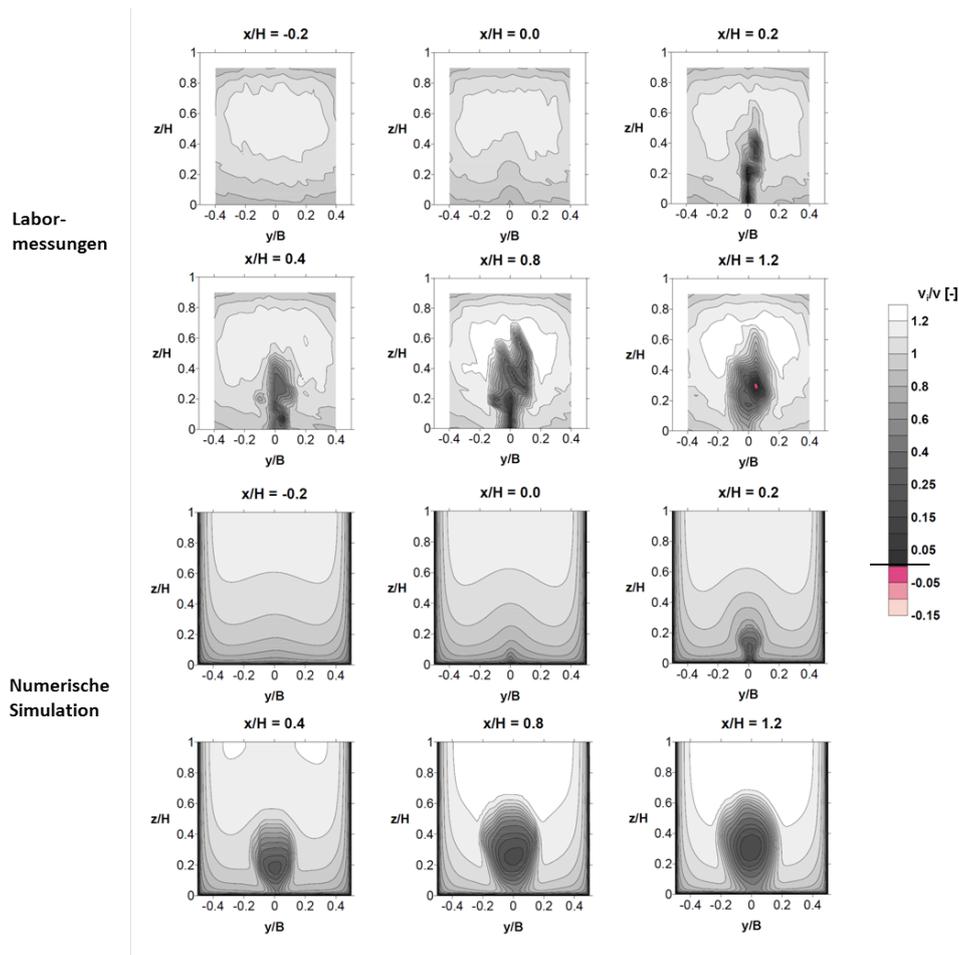


Abbildung 6.10.: Vergleich der im Labor gemessenen Querprofile der Fließgeschwindigkeit (obere sechs Isotachendiagramme) mit den in der numerischen Simulation berechneten Querprofilen an den selben Positionen bezogen auf die belastete Pflanze (untere sechs Isotachendiagramme) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$.

Der Beschleunigungsbereich um die geschwindigkeitsreduzierte Nachlaufzone bildet sich auch in den Resultaten der berechneten Geschwindigkeiten ab dem Austrittsquerschnitt ($x/H = 0,8$) aus. Auch die Unterschiede in der Geschwindigkeitsverteilung zwischen $v = 0,3 \text{ m/s}$ und $v = 0,6 \text{ m/s}$, die aus dem von der hydraulischen Last abhängigen Maß der Kontraktion der flexiblen Pflanze resultieren, werden mit der numerischen Simulation gut abgebildet. So führt das größere Pflanzenvolumen bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ zu einer stärkeren Geschwindigkeitsverzögerung oberstrom der Pflanze, was durch ein deutliches Ausbeulen der Isotachen bei $x/H = 0,0$ deutlich wird. Weiterhin wirkt sich die Beschleunigung der Geschwindigkeit um die Pflanze bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ bis an den Wasserspiegel hin aus, da im Vergleich zur weiter kontraktierten Pflanze bei $v = 0,6 \text{ m/s}$ weniger Raum für die Umströmung zur Verfügung steht. Die Resultate der Geschwindigkeitsuntersuchungen im Labor haben nur vereinzelt negative Fließgeschwindigkeiten gezeigt, die klassische Wirbelstraße eines Festkörpers ist infolge der fortgesetzten Durchströmung weitestgehend unterbunden. In den Resultaten der numerischen Untersuchungen spiegelt sich dieses Bild wieder.

In den Abbildungen 6.11 und 6.12 sind die vertikalen Profile der normierten Fließgeschwindigkeiten in der Rinnenmitte bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) und im Grenzbereich zwischen Pflanze und freier Strömung bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) für $v = 0,3 \text{ m/s}$ (Abbildung 6.11) und für $v = 0,6 \text{ m/s}$ (Abbildung 6.12) dargestellt. Die in der Laborrinne gemessenen Werte sind mit blauen Punkten, die berechneten Profile als schwarze Linie dargestellt.

Diese Art des Vergleichs zwischen gemessenen und gerechneten Geschwindigkeitsverteilungen ermöglicht eine detaillierte Beurteilung der Qualität der Berechnungsdaten. Grundsätzlich zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung der berechneten Daten mit den gemessenen Werten. Vor allem die Resultate im Grenzbereich zwischen Pflanze und freier Strömung ($y/B = 0,15$) stimmen bis auf Höhe der Pflanzenstruktur ($x/H = 0,4$) sehr gut überein. Vorwiegend für $v = 0,3 \text{ m/s}$ zeigen sich jedoch Unstimmigkeiten zwischen dem gerechneten Profil und den gemessenen Werten hinsichtlich der Position und der Größenordnung des geschwindigkeitsreduzierten Bereichs bei $x/H = 0,8$ und $x/H = 1,2$. An dieser Stelle kommt die Diskretisierung der Pflanzengeometrie und die Verteilung der Porositätswerte innerhalb des Berechnungsgitters zum Tragen. Die Geometrie der belasteten Pflanzen wurde mit Hilfe von Fotos aus jeweils drei Perspektiven mit Unter-Wasser-Aufnahmen von oberstromiger Richtung, seitlich durch die Glaswand der Rinne und durch den Wasserpiegel ermittelt. Infolge unterschiedlicher Lichtbrechungswinkel durch die Medien Glas, Wasser und Luft sowie den Effekt der Momentaufnahme einer bewegten Pflanze, kann es bei der Diskretisierung zu Fehlern in der Geometrie kommen, die sich in einer Abweichung des Profils gerade in den Randbereichen auswirken kann.

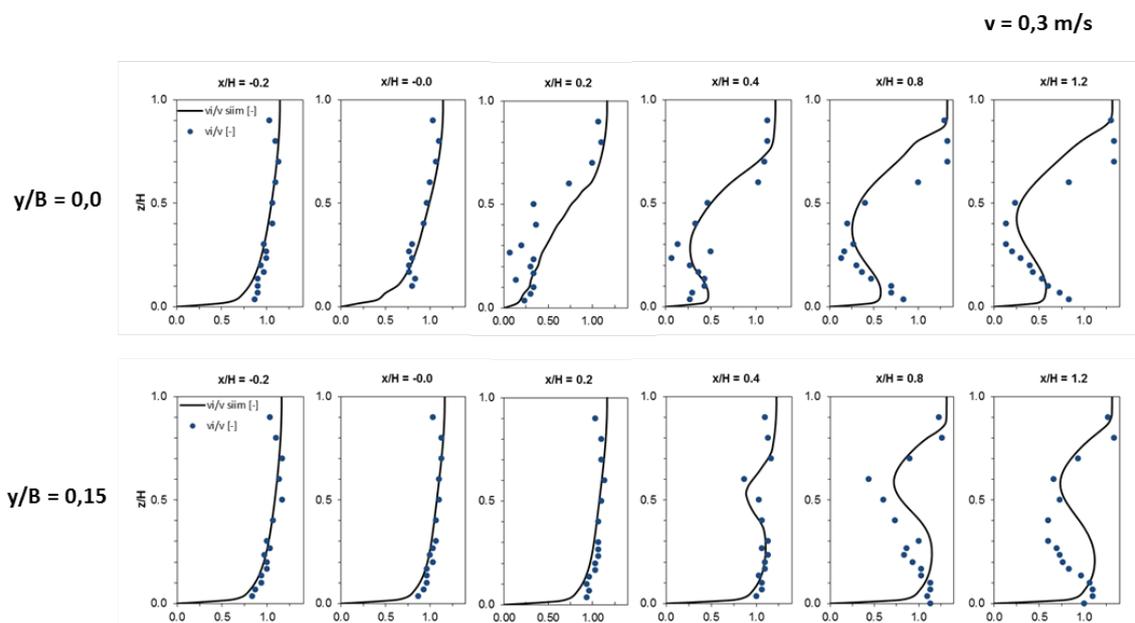


Abbildung 6.11.: Vergleich der gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofile (blaue Datenpunkte) mit den simulierten Geschwindigkeitsprofilen (schwarze Linie) zentral durch die durchströmte Pflanze bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) und entlang des Randbereiches der strömungsbelasteten Pflanze bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

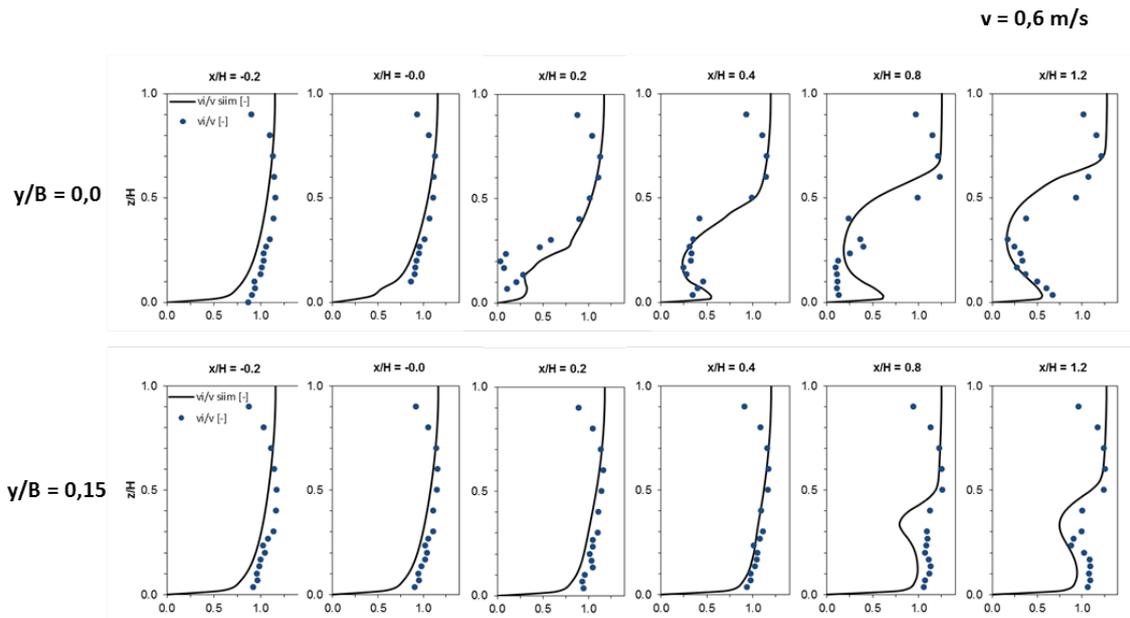


Abbildung 6.12.: Vergleich der gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofile (blaue Datenpunkte) mit den simulierten Geschwindigkeitsprofilen (schwarze Linie) zentral durch die durchströmte Pflanze bei $y/B = 0,0$ (obere Reihe) und entlang des Randbereiches der strömungsbelasteten Pflanze bei $y/B = 0,15$ (untere Reihe) bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$.

Auch die gerechneten Profile entlang der Rinnenmitte treffen die gemessenen Werte grundsätzlich gut. Fehler sind vor allem an lokalen Stellen zu sehen und jeweils im Grenzbereich zwischen Pflanze und freier Strömung, sohnah und entlang der Überströmung. Die lokalen Fehleinschätzungen ergeben sich aus der gleichmäßig angenommenen Porosität, so dass lokale Störstellen und die resultierenden lokalen hydraulischen Veränderungen, wie sie in der Realität auftreten, nicht simuliert werden können. Die Fehleinschätzungen im Grenzbereich zwischen Pflanze und freier Strömung sind vorwiegend in der lokalen Diskretisierung der Pflanzengeometrie und in der Fehleinschätzung der erhöhten Durchströmung der porösen Randbereiche, wie sie in Kapitel 6.1 dargestellt ist, begründet.

Im Gesamten zeigt sich aus dem Vergleich der gemessenen Geschwindigkeitswerte mit den gerechneten Daten, dass der Ansatz, die Pflanze als poröses Medium zu simulieren, grundsätzlich gut vergleichbare Ergebnisse liefert, obwohl die im Programm SSIIM verfügbare Gleichung (vgl. Gleichung 4.3.1) zur Ermittlung des hydraulischen Gradienten nach (Engelund (1953)) grundsätzlich auf die Durchströmung von Sedimentflächen im laminaren Bereich mit vergleichsweise dichter Kugelpackung ausgerichtet ist. Eine Anpassung der Formelwerke auf die turbulent durchströmte Pflanze mit geringer Porosität kann die Resultate an dieser Stelle sicherlich weiter verbessern. Es kann jedoch angenommen werden, dass die poröse Durchströmung der strauchartigen Pflanze der zukunftsweisende und physikalisch richtige Ansatz zur Ermittlung des hydraulischen Widerstands und der Strömungsverteilung um und durch eine strauchartige Pflanze ist.

6.2.2. Widerstandsbetrachtung aus der Simulation im Vergleich zum gemessenen Widerstand

Basierend auf dem mit den Laboruntersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung validierten numerischen Modell wurde die Strömung um eine strauchartige Pflanze aus gestaffelten Fließgeschwindigkeiten von $v = 0,15 \text{ m/s}$, $v = 0,3 \text{ m/s}$, $v = 0,45 \text{ m/s}$, $v = 0,6 \text{ m/s}$ und $v = 0,75 \text{ m/s}$ mit aus den Laboruntersuchungen jeweils ermittelten resultierenden stromlinienförmigen Geometrien der belasteten Pflanze untersucht (vgl. Kapitel 4.3.2). Abbildung 6.13 zeigt eine dreidimensionale Ansicht der aus der numerischen Berechnung ermittelten normierten Geschwindigkeitsverteilung als Isotachendiagramm in einer Ebene entlang der Sohle und als Längsschnitt entlang der Rinnenmitte durch die Pflanze bei einer mittleren Anströmgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ (oben) und $v = 0,75 \text{ m/s}$ (unten). Die jeweils zugehörige Geometrie der belasteten Pflanze, wie sie in der Diskretisierung der Pflanze im Modell und für die Porositätsdefinition verwendet wurde, ist als grüne 3D-Grafik in das Geschwindigkeitsfeld implementiert.

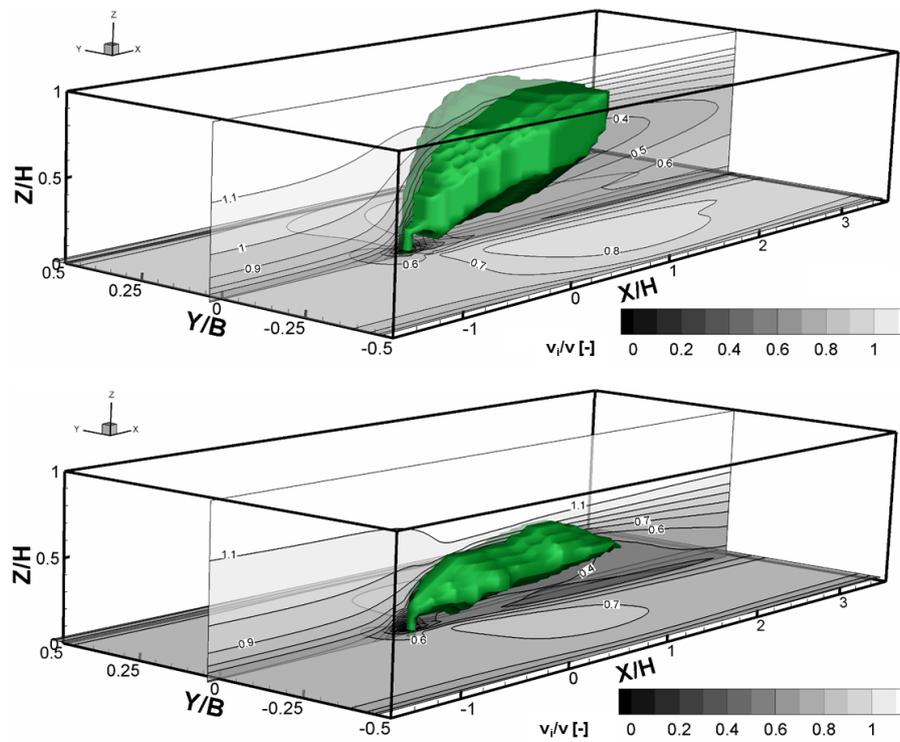


Abbildung 6.13.: Dreidimensionale Ansicht der normierten Geschwindigkeitsverteilung aus der Strömungsberechnung bei $v = 0,3 \text{ m/s}$ (oben) und $v = 0,75 \text{ m/s}$ (unten).

Im Vergleich der beiden Belastungsfälle zeigen sich einige wesentliche Einflüsse der resultierenden Pflanzenform auf das Strömungsbild. So ist der hydraulische Einfluss der Pflanze als Störkörper nach oberstrom für beide Fälle räumlich sehr kurz mit $x/H < 0,5$, während über der gebeugten Pflanze eine Beschleunigung stattfindet, die umso ausgeprägter ist, je schneller die Grundströmung und je stromlinienförmiger die Pflanzenform ist. An der Sohle bildet sich knapp unterstrom des Stammes seitlich der Pflanze ein Bereich erhöhter relativer Fließgeschwindigkeit aus, der für den Fall der langsamen Gesamtströmung ausgepräg-

ter erscheint als für den Fall der schnellen Gesamtströmung, da infolge der erhöhten Kontraktion dem Strömungsfeld mehr Raum für ein Ausweichen über die Pflanze zur Verfügung steht. Im Leebereich der Pflanzen wird deutlich, dass die Größenordnung und Stabilität der langsamen Nachlaufströmung ebenso maßgeblich von der Verformung der Pflanze abhängt. Je weiter die Pflanze verformt ist und je mehr Raum für den umströmenden Massenfluss zur Verfügung steht, desto stabiler ist die Nachlaufströmung und desto langsamer findet der Ausgleich mit der schnelleren Umströmung statt.

Aus Beobachtungen nach Hochwasserereignissen in der Natur ist bekannt, dass sich die Umströmung von Pflanzen auch auf die Morphologie an der Sohle auswirkt. Die klassischen Auswaschungen an der oberstromigen Seite und Ablagerungszonen auf der unterstromigen Seite von strauchartigen Pflanzen nach einem Hochwasser müssen in direktem Zusammenhang mit der Sohlschubspannung, die sich entlang der Pflanzen entwickelt, stehen. Eine direkte Auswertung der Sohlschubspannung auf Basis der im Labor ermittelten Geschwindigkeitsdaten ist nicht möglich, da das Messfeld einerseits zu groß ist, um die erhaltenen Daten für eine Turbulenzbewertung zu nutzen und andere Messverfahren nicht in die Pflanzenstruktur hinein messen können. Daher bietet die Auswertung der numerisch berechneten Geschwindigkeitsinformationen eine gute Alternative. Abbildung 6.14 zeigt die aus den numerischen Berechnungen ermittelten normierten Sohlschubspannungsverteilungen für alle fünf berechneten mittleren Fließgeschwindigkeiten als Isotachendiagramm sowie als Längsschnitt entlang der Rinnenmitte durch die Pflanze. Da die Strömung um eine Pflanze kein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil mehr ausbildet, wurde die Sohlschubspannung über die turbulente kinetische Energie E_{kin} ermittelt (Rodi (1984)) und mit der jeweiligen Schubspannung der Strömung ohne Vegetation normiert.

Infolge der stromlinienförmigen Ausrichtung der Pflanze, die mit steigender Last zunimmt, sowie der daraus resultierenden hydraulischen Verhältnisse entstehen unterschiedliche Bilder der Schubspannungsverteilung an der Sohle. Aus der Umströmung der Pflanze im Stammbereich und Beschleunigung der Strömung entsteht eine Erhöhung der Sohlschubspannung im direkten oberstromigen Nahfeld der Pflanze. Aus den vergleichenden Darstellungen der normierten Sohlschubspannungen in Abbildung 6.14 wird deutlich, dass das Ausmaß und die räumliche Ausdehnung dieser erhöhten Sohlschubspannung maßgeblich von der hydraulischen Belastung abhängt. Je geringer die Anströmgeschwindigkeit und damit die hydraulische Last auf die Pflanze, desto größer ist die relative Schubspannung im Nahbereich der Pflanze und desto weiter wirkt sich diese nach unterstrom hin aus. Ursache dieses Effektes ist, dass die Pflanze sich mit zunehmender hydraulischer Last weiter stromlinienförmig ausrichtet und sich damit immer mehr der Sohle annähert. Damit wird eine sohlnahe Umströmung des Stammbereiches immer mehr unterbunden und die relative Sohlschubspannung nimmt ab. Im direkten Nachlauf der Pflanze bildet sich ein langgezogener Bereich sehr geringer Sohlschubspannung aus, dessen Größenordnung und räumliche Ausdehnung mit steigender hydraulischer Last bis $v = 0,6 \text{ m/s}$ zunimmt, bei $v = 0,75 \text{ m/s}$ aber wieder zurückgeht. Auch hier ist die mit steigender Last zunehmende stromlinienförmige Ausrichtung und der Pflanze Ursache, da sich mit zunehmender Beugung der Pflanze ein stabiler Nachlauf mit langsamer Fließgeschwindigkeit ausbilden kann, der von der umgebenden Strömung auf lange Distanz unbeeinflusst bleibt, wie es auch für die Geschwindigkeitsverteilung schon beobachtet wurde (vgl. Abbildung 6.13). Nimmt die Kontraktion der Pflanze weiter zu, kann jedoch die Strömung von oben her die Nachlaufströmung schneller ausgleichen, so dass der Effekt der verringerten Sohlschubspannung abgemindert wird.

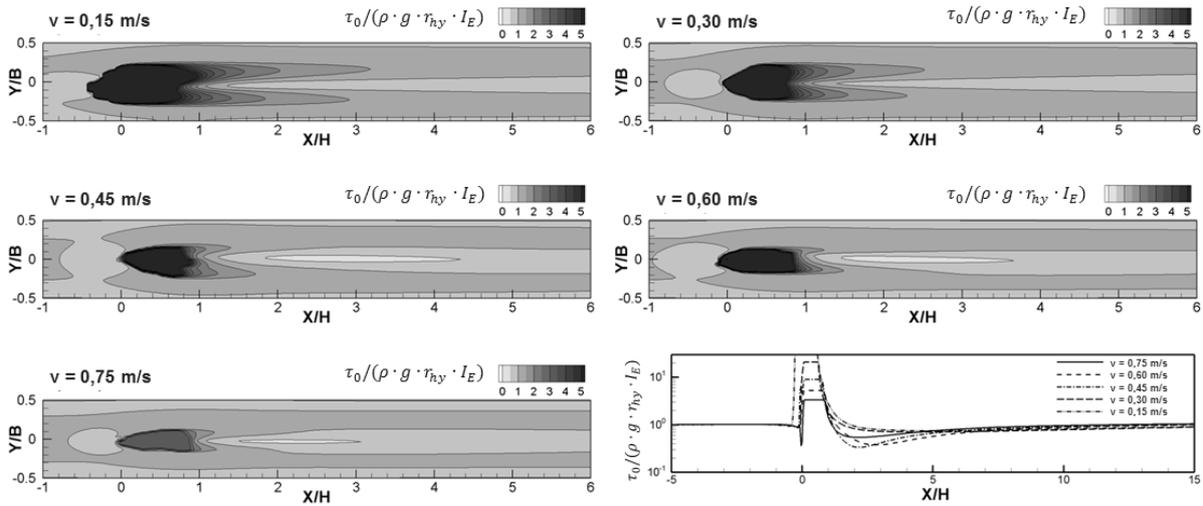


Abbildung 6.14.: Normalisierte Schubspannungsverteilung im Nahbereich der Pflanze für die fünf simulierten mittleren Fließgeschwindigkeiten. Die Sohlenschubspannung wurde mit dem Integral der Schubspannung ($\tau = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E$) der unbesetzten Rinne normalisiert.

Über eine Bilanzierung der Druckdifferenz zwischen zwei Querschnitten oberstrom und unterstrom der diskretisierten Pflanze ist es möglich aus den Ergebnissen der numerischen Berechnung die resultierende Widerstandskraft der über den Porositätsansatz modellierten Pflanzen zu bestimmen und mit Kenntnis der angeströmten Fläche den theoretischen Widerstandsbeiwert c_d rückzurechnen. Die linke Grafik in Abbildung 6.15 zeigt die Resultate der aus der Bilanzierung ermittelten Widerstandskraft auf die Fläche im Vergleich der gemessenen Kräfte für die untersuchten Weidenarten *Salix alba*, *Salix purpurea* und *Salix viminalis* sowie die gemessenen Widerstandskräfte der für die Versuche zur Geschwindigkeitsverteilung verwendeten Pflanze *Ficus natascha* als Funktion der mittleren Fließgeschwindigkeit und unter Verwendung der belasteten projizierten Vegetationsfläche. Ebenso eingetragen ist die Erwartungsfunktion unter der Annahme, dass der Widerstandsbeiwert zu $c_d = 1,0$ angenommen werden kann.

Aus den Daten der numerisch errechneten Widerstandskraft wird deutlich, dass diese einerseits sehr gut mit den gemessenen Werten der Widerstandskraft des *Ficus natascha* und auch mit denen der Weidenarten übereinstimmen. Ebenso weisen sie eine sehr gute Übereinstimmung mit der Erwartungsfunktion auf. Erst mit zunehmender hydraulischer Last bei $v = 0,75 \text{ m/s}$ weicht die errechnete Kraft auf die Fläche von der Erwartungsfunktion ab. Damit ergibt sich ein hydraulischer Widerstand der Pflanze in vergleichbarer Größenordnung zu dem eines Zylinders mit gleicher Anströmfläche, obwohl sich die Widerstandsquelle einer strauchartigen Pflanze stark von dem eines Festkörperzylinders unterscheidet. Hier scheinen sich die Teilwiderstände in der Bilanz wieder auszugleichen. Infolge der stromlinienförmigen Ausrichtung der Pflanze und der Teildurchströmung wird der Formwiderstand zunächst reduziert, da der für Festkörper klassische Unterdruckbereich auf der Leeseite infolge der Durchströmung ausbleibt. Zusätzlich auftretender Widerstand infolge der Reibung innerhalb der Pflanzenstruktur und Energieverlust infolge der Scherung zwischen der langsamen Nachlaufströmung und der schnellen Umströmung gleichen diese Widerstandsreduktion offensichtlich sehr genau wieder aus. Der abweichende Trend mit steigender Belastung, wie er für $v = 0,75 \text{ m/s}$ deutlich wird, veranschaulicht den Einfluss der Wechselwirkung zwischen hydraulischer Belastung und flexibler Reaktion der Pflanze. Der Verlust durch die Reibung innerhalb

der Pflanzenstruktur und die Verluste im Scherbereich bleiben bei dieser Belastung erhalten bzw. steigen weiter, während die Pflanze einer strömungsoptimierten Form nahe kommt, die nur noch wenig weitere Widerstandsreduktion bewirkt, womit der Gesamtwiderstand steigt.

In Abbildung 6.15 rechts sind die aus der jeweiligen Widerstandskraft errechneten Widerstandsbeiwerte derselben Pflanzen als Funktion der Fließgeschwindigkeit im Quadrat dargestellt. Die Werte liegen im Durchschnitt um den Wert $c_d = 1,0$ und sind damit nahe den gemessenen Werten für *Ficus natascha*, aber auch für die Weidenarten *Salix alba* und *Salix purpurea*. Abweichungen zeigen sich für die Randgeschwindigkeiten. So liegt der Widerstandsbeiwert bei $v = 0,15 \text{ m/s}$ mit $c_d = 0,6$ deutlich unterhalb des mittleren Wertes und der Widerstandsbeiwert bei $v = 0,75 \text{ m/s}$ mit $c_d = 1,3$ oberhalb. Dieser Trend ist ein Spiegelbild des für die Widerstandskraft bereits beobachteten Effektes der Wechselwirkung von flexibler Ausrichtung und hydraulischer Last.

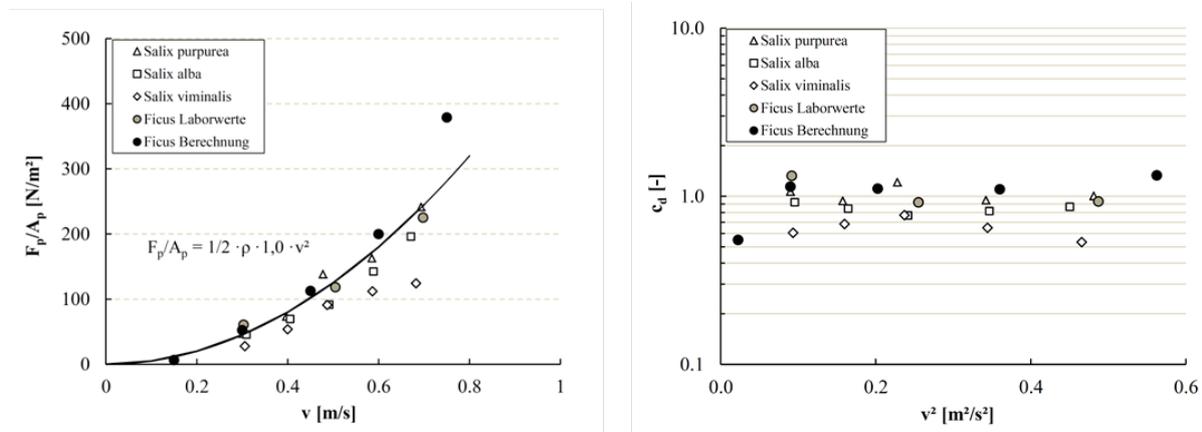


Abbildung 6.15.: Auswertung der charakteristischen Widerstandsdaten der simulierten Pflanze im Vergleich zu den Messdaten der Laborversuche. Links: Kraft auf die angeströmte Fläche als Funktion der Fließgeschwindigkeit, rechts Widerstandsbeiwert c_d als Funktion der quadrierten Fließgeschwindigkeit.

Während der Volumenaufnahme im Labor bei sehr geringer Belastung mit $v = 0,15 \text{ m/s}$ konnte beobachtet werden, dass die Pflanze auf die Strömungsbelastung infolge der sehr langsamen Fließgeschwindigkeit nicht mit einer stromlinienförmigen Ausrichtung sondern mit einer Auffächerung der Pflanzenstruktur reagierte. Infolge der auffächernden Reaktion der Pflanze nimmt die Porosität und damit der Durchströmungsanteil bei einer solch geringen hydraulischen Belastung noch weiter zu. Der Widerstand infolge lokaler Strömungsablösungen innerhalb der Pflanze bleibt moderat, da die Blätter auf Wirbelstrukturen der langsamen Strömung flexibel reagieren können und infolge des größeren Durchströmungsanteils reduziert sich der relative Gradient zwischen langsamer Nachlaufströmung und schneller Umströmung. Damit entsteht im Gesamten ein relativ geringer Widerstand, der sich im Widerstandsbeiwert wiederfindet. Bei einer hohen hydraulischen Belastung der Pflanze mit $v = 0,75 \text{ m/s}$ tritt der bereits bei der Analyse der Widerstandskraft bereits beschriebene Effekt auf, dass die weiter stromlinienförmige Ausrichtung der Pflanze mit steigender hydraulischer Belastung nur noch gering ausfällt, die Belastung und damit der Widerstand jedoch weiter zunimmt.

6.2.3. Vertiefende Analyse des Kontraktionsverhaltens auf Basis von Volumendaten

Für die Untersuchungen zur Widerstandskraft bzw. zum Widerstandsbeiwert unterschiedlicher natürlicher Weidenarten wurde ein exponentielles Verhalten der Pflanzenkontraktion mit steigender hydraulischer Belastung beobachtet (vgl. Kapitel 5.3.3). Abbildung 6.16 zeigt das aus den Untersuchungen zur angeströmten Vegetationsfläche resultierende Verhalten der relativen Anströmfläche A_p/A_0 mit steigender hydraulischer Belastung der verwendeten Weidenarten im Vergleich zu Studien von Oplatka (1998), Schneider (2010) und der aus den Daten ermittelten Funktion der Flächenkontraktion auf Basis der Erkenntnisse von Boller u. Carrington (2006).

Für die Untersuchungen zur numerischen Simulation der Durchströmung einer strauchartigen Pflanze wurde im Labor die zu jeder hydraulischen Last zugehörige Geometrie, also das Volumen der belasteten Pflanze anhand fotografischer Aufnahmen ermittelt. Aus diesen Aufnahmen konnten ebenso die jeweiligen angeströmten Vegetationsflächen ermittelt werden. Die ermittelten Werte der angeströmten Fläche sind in Abbildung 6.16 als schwarze Rauten zusätzlich eingetragen. Aus den Daten wird ersichtlich, dass das Kontraktionsverhalten des *Ficus natascha* dem der Weiden sehr ähnlich ist und der gleichen Trendfunktion folgt. Mit den Daten der Volumina der jeweils belasteten Pflanzen kann zusätzlich eine Analyse des Kontraktionsverhaltens über das gesamte Volumen der Pflanze durchgeführt werden.

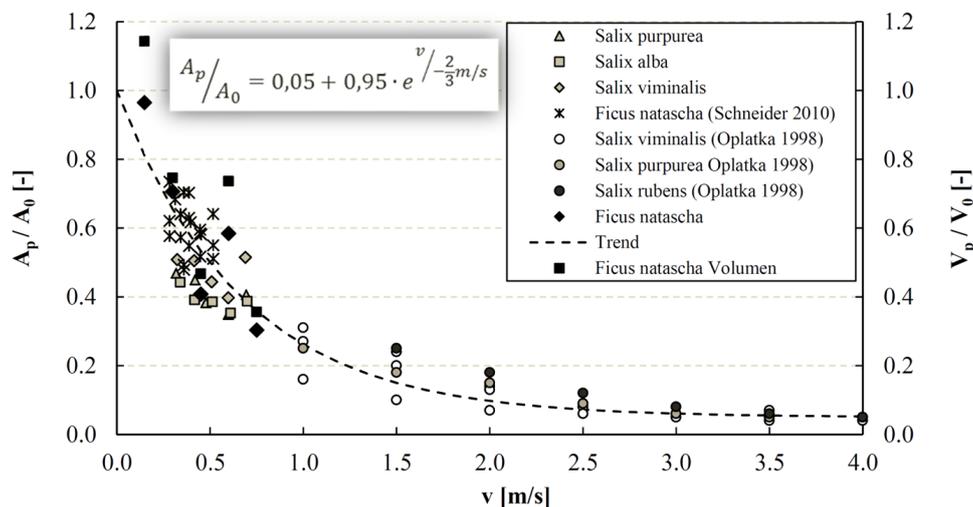


Abbildung 6.16.: Zusätzliche Auswertung des Volumenverhaltens mit steigender Belastung auf Basis der dreidimensionalen Aufnahme der lastabhängigen Pflanzegeometrie.

Hierzu wurde zusätzlich zur relativen Anströmfläche das relative Volumen als Quotient des belasteten Volumens zum unbelasteten Volumen V_p/V_0 als Sekundärachse im Diagramm integriert. Die Werte des rela-

tiven Volumens der belasteten Pflanzen als Funktion der mittleren Fließgeschwindigkeit sind als schwarze Quadrate in das Diagramm eingetragen. Aus dem Vergleich der Daten wird deutlich, dass das relative Volumen der Pflanzen zwar jeweils etwas über der relativen angeströmten Fläche liegt, aber dennoch im Gesamten dem Kontraktionsverhalten der Fläche für alle Pflanzenarten nahe kommt. Eine Beschreibung der Volumenkontraktion kann damit auch mit der angenommenen exponentiellen Gleichung, wie sie im Diagramm dargestellt ist, erfolgen. Einzige Ausnahme bildet das Kontraktionsverhalten bei sehr geringer Fließgeschwindigkeit. Hier ist das Volumen der unbelasteten Pflanze geringer als das Volumen der belasteten Pflanze. Dies ist auf den bereits oben beschriebenen Effekt zurückzuführen, dass die Pflanze bei sehr geringer hydraulischer Belastung zunächst auffächert, bevor sie sich mit steigender Belastung stromlinienförmig ausrichtet. Dieses Verhalten der Pflanzen wurde auch schon von Boller u. Carrington (2006) bei Untersuchungen mit Algen festgestellt.

6.3. Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen sowie der numerischen Untersuchung zum Geschwindigkeitsfeld um eine durchströmte Pflanze

In Kapitel 5 wurden Untersuchungen zur Widerstandskraft vorgestellt, die gezeigt haben, dass der Strömungswiderstand von strauchartigen Weiden mit den vorliegenden Bemessungsansätzen zum Festkörperwiderstand in einer Strömung zwar beschrieben werden kann, dass die Verwendung dieser Ansätze aber physikalisch nicht korrekt ist, da die Pflanzen durchströmt werden und damit die Physik der Festkörperumströmung nicht mehr gegeben ist. Um das Maß der Pflanzendurchströmung und die Auswirkungen auf den hydraulischen Widerstand genauer zu untersuchen, wurde an einer strauchartigen Pflanze ein hochaufgelöstes Geschwindigkeitsfeld aufgenommen, das eine Visualisierung der hydraulischen Verhältnisse innerhalb und um eine strauchartige Pflanze ermöglicht. Die Resultate zur Geschwindigkeitsverteilung wurden anschließend verwendet, um ein hydrodynamisch-numerisches Modell zu validieren, in dem die Pflanze mit Hilfe eines Porositätsansatzes direkt in das Berechnungsgitter implementiert wird. Mit dem so validierten Modell konnte schließlich für weitere Strömungszustände das hydraulische Bild, aber auch das Widerstandsverhalten der strauchartigen Pflanze mit steigender hydraulischer Belastung untersucht werden. Für die Diskretisierung der Pflanze im numerischen Modell wurden im Labor für jeden Lastfall jeweils die resultierenden Pflanzenvolumina der hydraulisch belasteten Pflanze ermittelt. Diese Volumendaten wurden zusätzlich genutzt, um das bereits in Kapitel 5.3.3 analysierte Kontraktionsverhalten der strauchartigen Pflanze im Hinblick auf die Volumenkontraktion zu erweitern.

Die Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung haben gezeigt, dass die Durchströmung der strauchartigen Pflanze das hydraulische Bild im Vergleich zu dem einer Festkörperumströmung maßgeblich ändert, so dass auch die Widerstandsquellen und deren Größenordnung neu definiert werden müssen. Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsverteilung lassen schließen, dass sich der Gesamtwiderstand aus folgenden Quellen zusammensetzt:

- Reibungswiderstand innerhalb der Pflanze infolge lokaler Strömungsablösungen an Zweigen und Blättern.
- teilweise Umströmung der Pflanze mit Beschleunigung nach unterstrom.

- Scherung zwischen der sehr stabilen Nachlaufströmung mit langsamer aber positiver Fließgeschwindigkeit und der reaktiv schnellen Umströmung.

Die Nachlaufströmung mit sehr geringer aber positiver Fließgeschwindigkeit zeigt in den Resultaten eine hohe Stabilität, so dass die in den Laboruntersuchungen aufgenommene Messstrecke nicht ausreicht, um Aussagen über Länge und Strömungsverhalten am Ende des Nachlaufes zu treffen.

Die Validierung des numerischen Modells mit den o.g. Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung haben gezeigt, dass der Ansatz, eine strauchartige Pflanze mit Hilfe eines Porositätsansatzes zu simulieren, grundsätzlich gute Ergebnisse liefert. Die innerhalb des Modells zur Verfügung stehenden Formelwerke zur Implementierung der Porosität in das Berechnungsgitter sollten jedoch auf die Situation einer turbulent durchströmten strauchartigen Pflanze angepasst werden. Dies war im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen leider nicht möglich. Bestätigt wurde die Anwendbarkeit des Porositätsansatzes im numerischen Modell mit der Analyse der Widerstandsdaten aus weiteren Untersuchungen mit gestaffelten Fließgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse zu Widerstandskraft auf die angeströmte Fläche und zum Widerstandsbeiwert deckten sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen der direkten Kraftmessung. Geringe Abweichungen sind hauptsächlich auf die Vorgehensweise der Diskretisierung des Pflanzenvolumens, aber auch der Porositätsannahmen zurückzuführen, weitere Unsicherheiten ergeben sich aus der Vorgehensweise bei der Messung der Widerstandskraft (vgl. Kapitel 5).

Die Analyse des Kontraktionsverhaltens des gesamten Volumens der strauchartigen Pflanze im Vergleich zum zuvor angesetzten Kontraktionsverhalten der Anströmfläche hat ergeben, dass die Volumenkontraktion den gleichen Gesetzen folgt, wie die Kontraktion der angeströmten Fläche, so dass die Anwendung der exponentiellen Abnahme mit asymptotischer Annäherung auf eine Endgröße auch auf das Volumen der strauchartigen Pflanzen angewendet werden kann.

7. Untersuchungen zur Durchströmung poröser Medien und dessen Anwendung auf eine strauchartige Pflanze

In Kapitel 6 sind Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung um und durch eine strömungsbelastete strauchartige Pflanze sowie numerische Untersuchungen zur Verwendbarkeit eines Porositätsansatzes zur Widerstandsbeschreibung einer strauchartigen Pflanze vorgestellt. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass eine strauchartige Pflanze hydraulisch gesehen ein poröser durchströmter Körper ist, dessen Durchströmung aus vom Festkörperwiderstand abweichenden Widerstandsquellen resultiert. Bevor ein Berechnungsverfahren zum Gesamtwiderstand eines solchen turbulent durchströmten Körpers aufgestellt werden kann, müssen die Einzelwiderstände zunächst lokalisiert und ihre Quantifizierung definiert werden. In Kapitel 4.4 werden die bestehenden Bemessungsansätze zum Widerstand poröser durchströmter Medien in ihrer Anwendung auf turbulent durchströmte strauchartige Pflanzen hinterfragt und zunächst die Gleichung zur Berechnung des hydraulischen Verlustes infolge der Durchströmung eines porösen Mediums auf die Struktur einer strauchartigen Pflanze angepasst. Im Folgenden werden nun Untersuchungen vorgestellt, die basierend auf geometrisch klar aufgebauten porösen Strukturen die Widerstandsquellen eines turbulent durchströmten Körpers in einer Laborrinne ermitteln (vgl. Kapitel 7.1). Aufbauend auf den daraus erlangten Erkenntnissen wird dann ein Bemessungsvorschlag zur Quantifizierung des Gesamtwiderstandes erarbeitet (vgl. Kapitel 7.2). Der Versuchsaufbau und die Vorgehensweise der Datenanalyse hierzu ist in Kapitel 4 beschrieben.

7.1. Das Strömungsbild der porösen Durchströmung im Vergleich unterschiedlicher Geometrien

Wie in Kapitel 4.5 beschrieben, wurde zur Analyse des Strömungsverhaltens bei poröser Durchströmung je ein hoch aufgelöstes ebenes Geschwindigkeitsfeld um Zylinder mit steigender Porosität und strauchartige Pflanzen aufgenommen. In Abbildung 7.1 sind Isotachendiagramme der Fließgeschwindigkeit in Strömungsrichtung aller untersuchter Geometrien bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$ dargestellt. Von links nach rechts zeigt die Abbildung je den Isotachendiagramm eines glatten Festkörperzylinders, eines Zylinders bestehend aus Kugeln mit einem Durchmesser von $d = 0,01 \text{ m}$ mit einer Porosität von $\phi = 0,393$, eines Zylinders bestehend aus Kugeln mit einem Durchmesser von $d = 0,04 \text{ m}$ mit einer Porosität von $\phi = 0,466$, eines Zylinders gefüllt mit Filtermaterial mit einer Porosität von $\phi = 0,970$, sowie einer überströmten und einer durchströmten Pflanze mit je einer Porosität von $\phi = 0,970$.

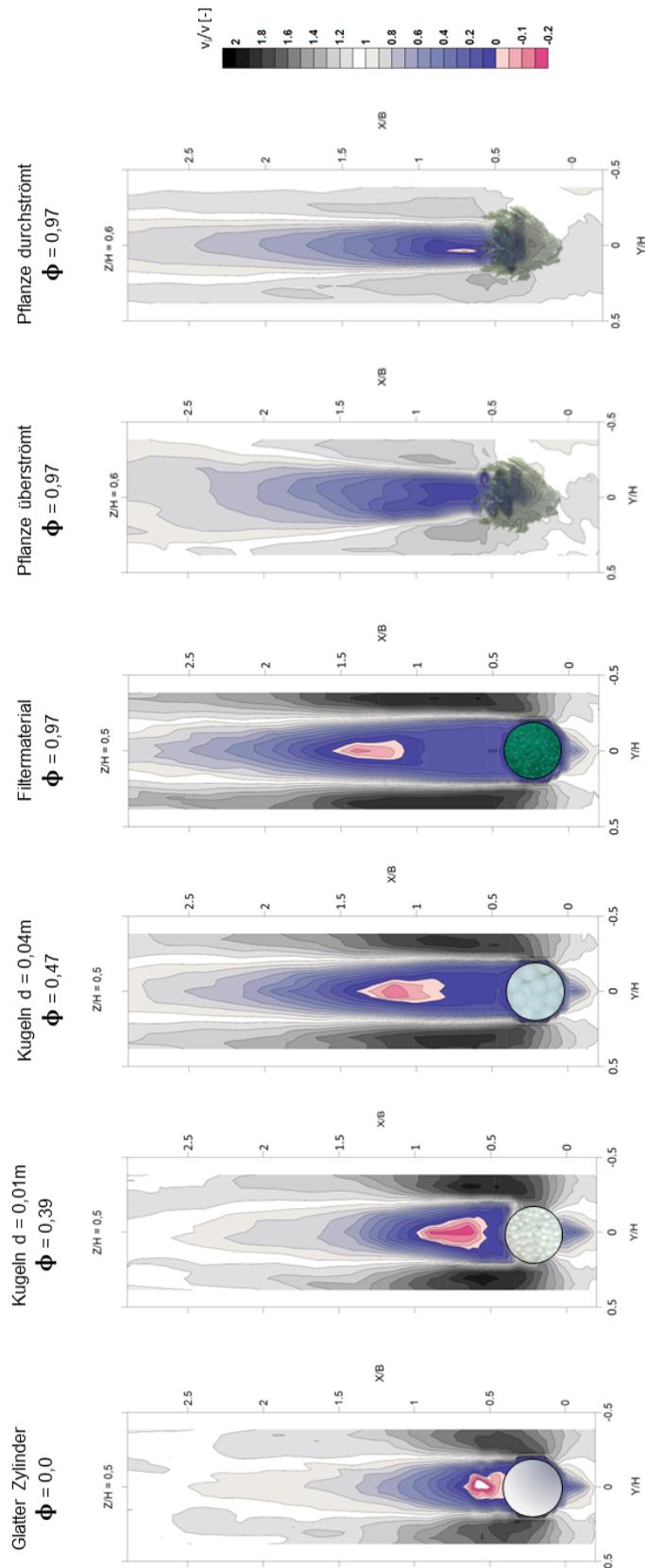


Abbildung 7.1.: Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung in Strömungsrichtung um und durch Zylinder und strauchartige Pflanzen mit steigender Porosität von links nach rechts bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 m/s$.

Basierend auf den Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung sowie Untersuchungen zur Nachlaufstrecke bei poröser Durchströmung (Zong u. Neph (2011) und Chen u. a. (2012)) wurde die Messstrecke bis auf $x/B = 3,0$ verlängert. Zur Aufnahme der Strömungsgeschwindigkeiten wurde für die Zylinder eine horizontale Ebene auf der Höhe $z/H = 0,5$ gewählt, da hier die Strömungsbeeinflussung durch Grenzflächennähe weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Bei der Pflanze hat sich eine optimale Aufzeichnung der Durchströmung in einer Höhe von $z/H = 0,6$ ergeben, da in dieser Höhe die Pflanze in Folge ihrer Verformung die größtmögliche durchströmte Fläche bietet. Die normierten Fließgeschwindigkeiten sind wie folgt unterteilt: Rückströmungen ($v_i/v < 0,0$) sind in Rotabstufungen dargestellt, Fließgeschwindigkeiten, die kleiner als die mittlere Fließgeschwindigkeit sind ($v_i/v < 1,0$) in Blauabstufungen und Fließgeschwindigkeiten die größer als die mittlere Fließgeschwindigkeit sind ($v_i/v > 1,0$) in Graustufen. Die mittlere Fließgeschwindigkeit des gesamten Systems betrug $v = 0,3\text{m/s}$.

Ein Vergleich der Geschwindigkeitsdaten der Zylinder untereinander zeigt eine zunehmende Auswirkung der Durchströmung mit steigender Porosität sowohl oberstrom des Zylinderelementes als auch im Nachlaufbereich. Zunächst ist festzustellen, dass die klassische Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit im Staubereich knapp oberstrom des Zylinders, wie sie für den Festkörperzylinder deutlich ausgeprägt ist, mit steigender Porosität abnimmt. Auf unterstromiger Seite hingegen verschiebt sich die klassische Rückströmzone mit steigender Porosität weiter nach unterstrom, während die Ausprägung der Rückströmung deutlich abgeschwächt wird. Weiterhin zeigt sich, dass im direkten Nachlauf eine sehr schwache aber positive Strömung in Fließrichtung vorliegt, deren Geschwindigkeit mit steigender Porosität und zunehmendem Versatz der Rückströmzone zunimmt. Die beschleunigte Umströmung seitlich dieses Nachlaufbereiches wird parallel zum Versatz der Rückströmzone nach unterstrom verlängert und es bildet sich ein Bereich mit hohem Geschwindigkeitsgradienten zwischen der schnellen Umströmung und der langsamen Nachlaufströmung aus dem porösen Medium.

Im Vergleich zu den Resultaten der Zylinder zeigen die Geschwindigkeitsverläufe der Pflanzen eine deutliche Abweichung der Geschwindigkeitsverteilung und -größe auch bei gleicher Porosität. Für die Beurteilung der Strömungsbilder ist zu berücksichtigen, dass der Eintritt der Strömung in die Pflanzenstruktur infolge der Pflanzenbiegung erst bei etwa $x/B = 0,2$ stattfindet. Eine Reduktion der Geschwindigkeit knapp oberstrom der Pflanze als Staubereich ist aus den Geschwindigkeitsdaten nicht mehr klar definierbar. Bereits bei den Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung um eine strauchartige Pflanze wurde festgestellt, dass der bei Festkörpern vorliegende Rückstau infolge der stromlinienförmigen Ausrichtung und der Durchströmung der Pflanze deutlich reduziert ist (vgl. Kapitel 6.1.2). Im Gegensatz zu den Zylinderversuchen, war es bei den Messungen zur Geschwindigkeitsverteilung um bzw. durch die strömungsbelastete Pflanze möglich, auch die Strömung innerhalb der Pflanze aufzuzeichnen.

Der Bereich der durchströmten Pflanze ist sehr deutlich an der unregelmäßigen und unsymmetrischen Strömungsstruktur zwischen $x/B = 0,2$ und $x/B = 0,6$ zu erkennen. Die normierten Fließgeschwindigkeiten in diesem Bereich liegen zwischen $v_i/v = 0,15$ und $v_i/v = 0,7$, während die Umströmung im Vergleich derer entlang der porösen Zylinder deutlich geringere Geschwindigkeiten aufweist. Der Nachlaufbereich der Pflanzen hingegen zeigt nur eine kurze Strecke mit stark verzögerter Geschwindigkeit, die nach unterstrom innerhalb einer Strecke von $x/B = 1,5$ wieder soweit beschleunigt wird, dass eine fast

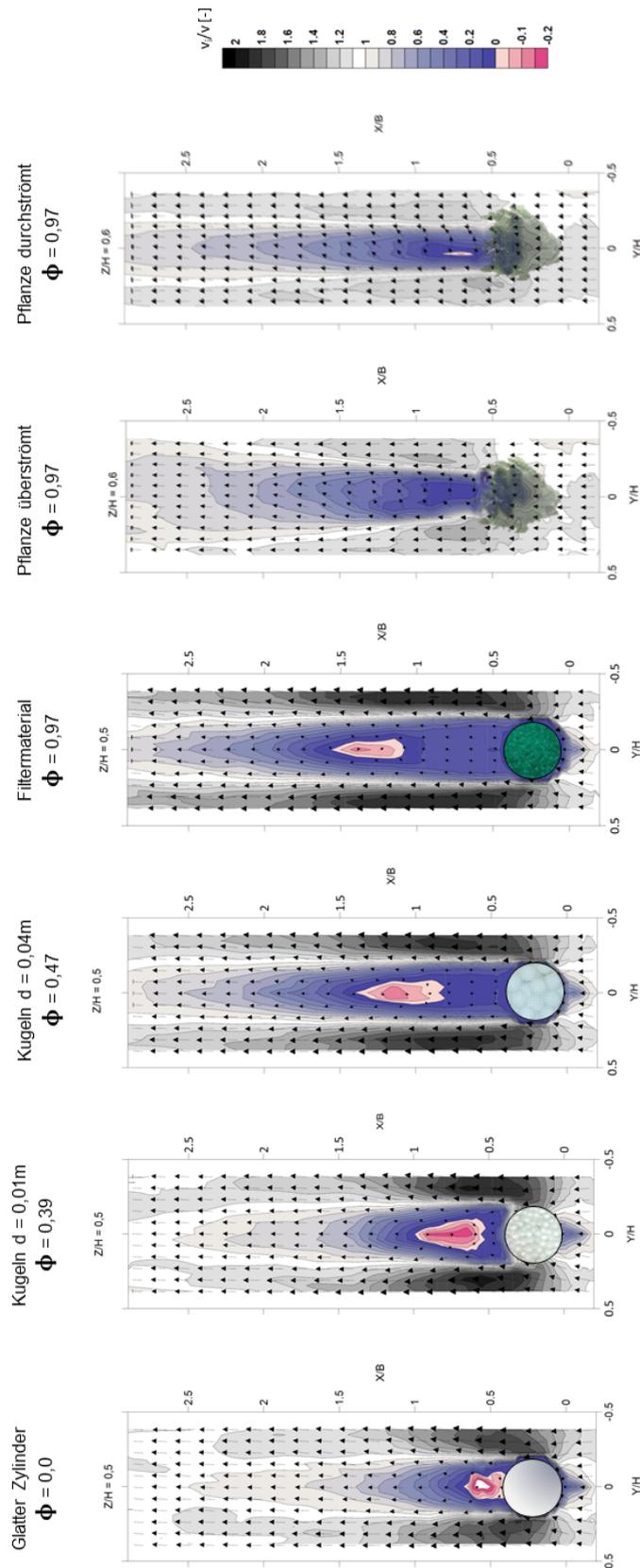


Abbildung 7.2.: Isotachendiagramme und Vekordiagramme der Geschwindigkeitsverteilung in und quer zur Strömungsrichtung um und durch Zylinder und strauchartige Pflanzen mit steigender Porosität von links nach rechts.

vollständig gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt vorliegt. Der Geschwindigkeitsgradient zwischen Nachlaufzone und Umströmung fällt entsprechend den Ausprägungen der Geschwindigkeitsfelder geringer aus, als der im Nachlauf der porösen Zylinder. Rückströmbereiche liegen nur in sehr geringem Maße an lokalen Stellen direkt hinter der Pflanzenstruktur vor. Vergleicht man die Daten zwischen durchströmter und überströmter Pflanze, fallen in der grundsätzlichen Strömungscharakteristik kaum Unterschiede auf. Auffällig ist jedoch die unsymmetrischere Geschwindigkeitsverteilung in Strömungsrichtung für den Fall der überströmten Pflanze sowohl innerhalb des Pflanzenbereiches, als auch im Nachlauf, deren Auswirkung bis zur Vergleichmäßigung der Geschwindigkeitsverteilung erkennbar ist. Abbildung 7.2 zeigt die oben beschriebenen Isotachendiagramme überlagert mit einem Vektorplot aus den resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen in und quer zur Fließrichtung. Die Ausrichtung der Vektoren bestätigen die oben beschriebenen charakteristischen Effekte von verringertem Rückstau, Ausbildung einer positiven Nachlaufzone, Versatz und Dämpfung der Rückströmzone sowie des ausgeprägten Geschwindigkeitsgradienten zwischen verlängerter Nachlaufströmung und beschleunigter Umströmung.

Abbildung 7.3 zeigt Aufnahmen einer Visualisierung der Strömungsverhältnisse einer durchströmten Pflanze im Vergleich zu einem Festkörperzylinder mittels Tracerzugabe. Die Aufnahmen wurden im selben Versuchsaufbau erstellt, der auch für die Aufzeichnung der Geschwindigkeitsverteilung zum Einsatz kam. Die obere Aufnahmenreihe zeigt jeweils die reinen Tracerbilder des umströmten Zylinders (vgl. Abb. 7.3 links) und der durchströmten Pflanze im zeitlichen Versatz (vgl. Abb. 7.3 Mitte und rechts). In der unteren Aufnahmenreihe sind die aus den Tracerbildern resultierenden Strömungscharakteristika zusätzlich hervorgehoben. Für jedes Bild wurde hierzu knapp oberstrom des jeweils eingebauten Elementes zentral in der Rinne der Strömung Farbe zugegeben.

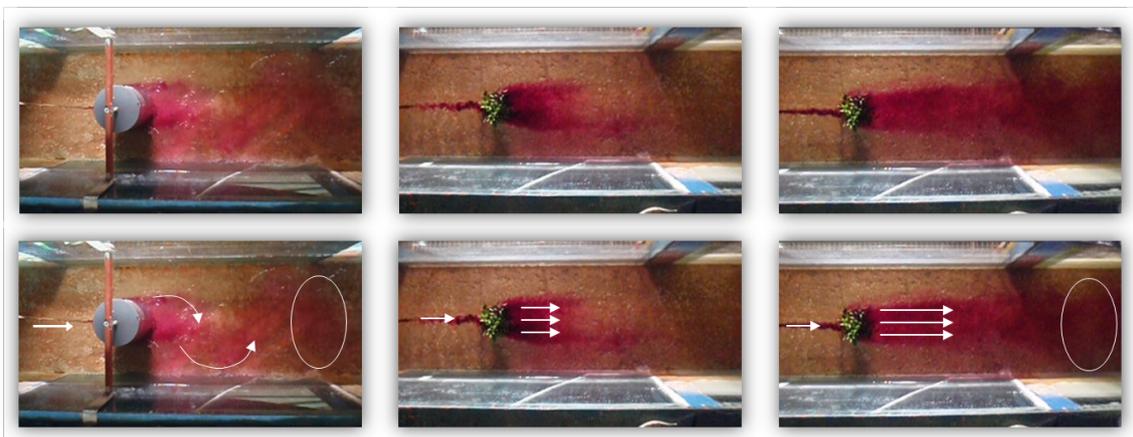


Abbildung 7.3.: Visualisierung der Strömungsverhältnisse einer durchströmten strauchartigen Pflanze im Vergleich zu einem umströmten Festkörperzylinder. Links: Tracerbild eines umströmten Festkörperzylinders. Mitte und rechts: Tracerbild einer durchströmten Pflanze im zeitlichen Versatz.

Das Tracerbild um den Festkörperzylinder zeigt das klassische Strömungsbild. Der zentral ankommende Strömungspfad wird als Umströmung aufgeteilt, die Strömung löst ab und im Nachlauf bildet sich die klassische Karman'sche Wirbelstraße, einhergehend mit einer vollständigen Durchmischung bei etwa

$x/B = 1,5$ (vgl. Abbildung 7.3 links, gelbe Markierung). Das Tracerbild der durchströmten Pflanze dagegen weist eine andere Strömungscharakteristik auf. Der zentrale Strömungspfad wird nicht mehr als Ganzes aufgeteilt, sondern führt vollständig durch die Pflanzengeometrie und wird dort über die gesamte Pflanzenbreite verteilt. Unterstrom verlässt ein gleichförmiger über die gesamte Pflanzenbreite ausgedehnter Massenstrom die Pflanze, der seine Ausdehnung bis weit nach unterstrom beibehält. Wirbelbildungen gemäß einer Karman'schen Wirbelstraße, wie sie bei Festkörperwiderständen klassischerweise auftreten, sind im direkten Nachlauf der Pflanze nicht vorhanden und auch im weiteren Verlauf nicht eindeutig definierbar.

Eine Detailaufnahme des Grenzbereiches zwischen der mit Tracer eingefärbten Nachlaufströmung und der umgebenden Strömung des Nachlaufbereiches einer durchströmten Pflanze ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Deutlich erkennbar wird, dass eine Durchmischung der beiden Strömungsbereiche erst deutlich unterstrom bei etwa $x/B = 2,5$ stattfindet (vgl. Abbildung 7.3 rechts, gelbe Markierung), während sich im Grenzbereich zwischen der Nachlaufströmung und der umgebenden Strömung klassische Scherschichtwirbel ausbilden. Diese Visualisierung der Scherung mitsamt der Ausbildung der klassischen Kelvin-Helmholtz-Wirbel bestätigen die Vermutung in Kapitel 6.1.3 einer Scherzone, die als zusätzliche Widerstandsquelle bei einer durchströmten strauchartigen Pflanze wirkt.

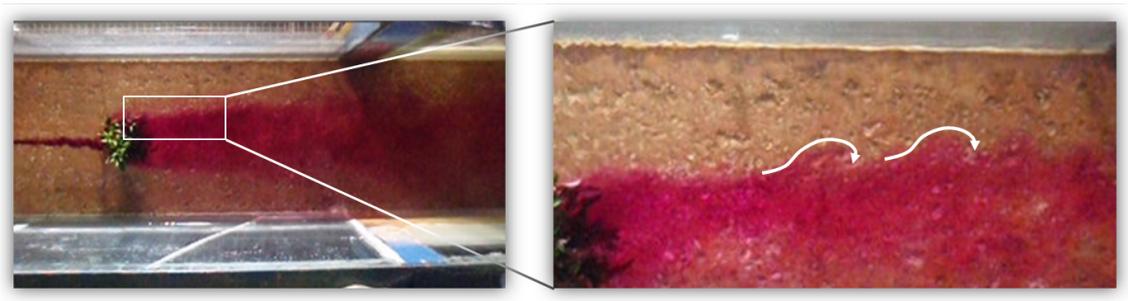


Abbildung 7.4.: Detailausschnitt aus der Visualisierung im Bereich des Geschwindigkeitsgradienten zwischen langsamem Nachlauf und schnellerer Umströmung mit der charakteristischen Ausbildung von Scherschichtwirbeln.

In Abbildung 7.5 sind die normierten Geschwindigkeiten charakteristischer Querprofile für den Festkörperzylinder, den Zylinder mit Kugeln von $d = 0,04$ m sowie die durchströmte und die überströmte Pflanze dargestellt. Die Querprofile wurden für die folgenden vier Bereiche ausgewertet:

- $x/B = 0,0$: Knapp oberstrom der Versuchselemente.
- $x/B = 0,6$: Im direkten Nachlaufbereich der Versuchselemente.
- $x/B = 1,4$: Im verlängerten Nachlaufbereich der Versuchselemente.
- $x/B = 2,9$: Das letzte aufgezeichnete Querprofil.

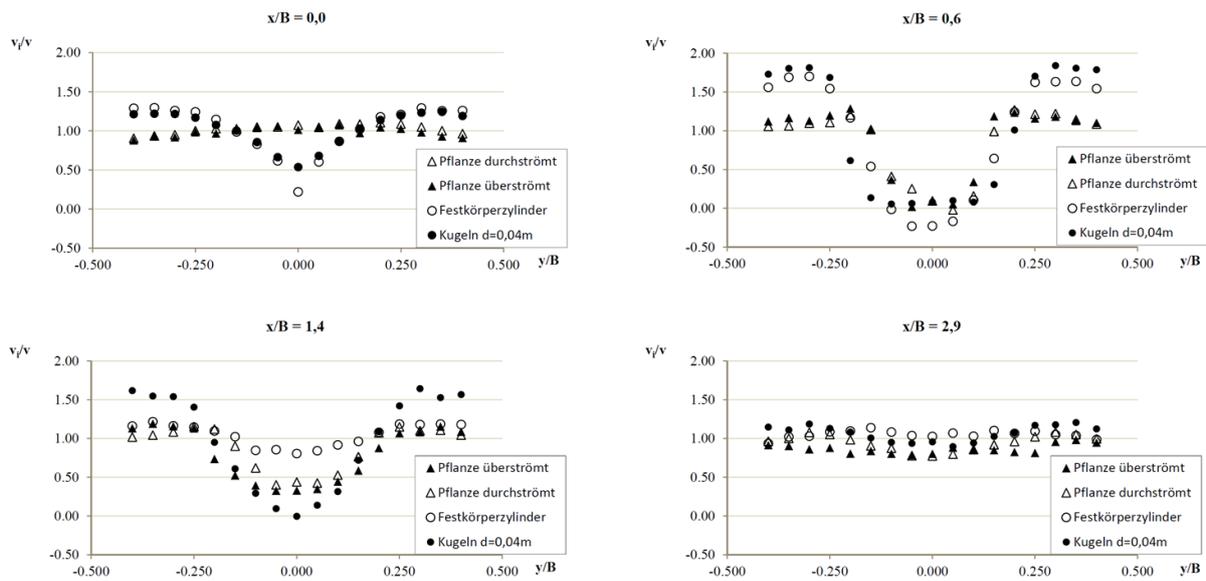


Abbildung 7.5.: Querprofile der Geschwindigkeitsdaten des Festkörperzylinders, des Zylinders mit Kugeln $d = 0,04$ m und der durchströmten sowie überströmten Pflanze knapp vor dem Element, im direkten Nachlauf, im weiteren Nachlauf sowie am unterstromigen Aufnahmeende.

Im Bereich knapp oberstrom der Elemente bei $x/B = 0,0$ liegt für den Festkörperzylinder wie erwartet im Zentrum eine Geschwindigkeitsreduktion gegen $v_i/v = 0,0$ vor, während die Geschwindigkeit in den Randbereichen also außerhalb des Zylinders bereits beschleunigt wird und über die mittlere Fließgeschwindigkeit steigt. Die Daten des mit Kugeln gebildeten Zylinders weisen qualitativ einen ähnlichen Verlauf auf, wobei absolut sowohl die Reduktion der Geschwindigkeit im Zentrum als auch die Beschleunigung in den Randbereichen gedämpfter ausfällt. Für die Pflanzen liegt eine gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung in diesem Bereich vor. An dieser Stelle muss berücksichtigt werden, dass der Eintritt der Strömung in die Pflanzengeometrie infolge der Pflanzenbiegung weiter unterstrom stattfindet.

Die Resultate des Nachlaufbereiches bei $x/B = 0,6$ zeigen ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen den Querprofilen der Zylinder und denen der Pflanzen. Das Geschwindigkeitsprofil des Festkörperzylinders ist geprägt von einem schmalen Nachlaufbereich mit negativen Fließgeschwindigkeiten, im Übergangsbereich steigt die Fließgeschwindigkeit dann bis auf Werte von $v_i/v > 1,5$ in den Randbereichen. Die Geschwindigkeitsreduktion im Nachlaufbereich des Kugel-gefüllten Zylinders erreicht zwar Werte bis knapp über $v_i/v = 0,0$, negative Werte werden jedoch an dieser Stelle nicht erreicht, wogegen die Beschleunigung bis fast auf $v_i/v = 2,0$ ausfällt. Die Resultate der überströmten und durchströmten Pflanze in diesem Bereich sind sehr ähnlich. Die Geschwindigkeit im Nachlaufbereich bleibt knapp über $v_i/v = 0,0$, gefolgt von einem steilen Geschwindigkeitsgradienten im Übergangsbereich, wobei die Geschwindigkeit im Randbereich die mittlere Geschwindigkeit des Systems nur wenig übersteigt.

Im unterstromigen Verlauf des Nachlaufbereiches bei $x/B = 1,4$ zeigen sich deutliche Unterschiede in der Geschwindigkeitsverteilung zwischen den beiden Zylinderkörpern. Während das Geschwindigkeitsprofil

des Festkörperzylinders nur noch sehr gedämpfte Auswirkungen von Nachlauf und Umströmung zeigt, ist das Profil des Kugel-gefüllten Zylinders noch deutlich von den Auswirkungen geprägt. Die minimale Geschwindigkeit bewegt sich nach wie vor im Bereich knapp über $v_i/v = 0,0$, der Gradient im Übergangsbereich ist jedoch flacher und die maximale Geschwindigkeit in den Randbereichen erreicht nur noch Werte um $v_i/v = 1,6$. Auch die Querprofile der Pflanzen zeigen einen im Vergleich deutlich gedämpften Verlauf. Die minimale Geschwindigkeit des Nachlaufes erreicht für beide Fälle Werte um $v_i/v = 0,4$, während die Geschwindigkeiten der Umströmung nur noch wenig über der mittleren Fließgeschwindigkeit des Systems liegt. Das letzte Querprofil bei $x/B = 2,9$ zeigt für alle Fälle einen nahezu gleichförmigen Geschwindigkeitsverlauf, die Geschwindigkeitswerte schwanken um $v_i/v = 1,0$. Auswirkungen der Nachlaufströmung sind nur noch in vernachlässigbarem Maße vorhanden.

Abbildung 7.6 zeigt ein Längsprofil der normierten Fließgeschwindigkeiten zentral entlang der Fließrichtung, oberstrom des Versuchsaufbaus beginnend bei $x/d_v = -1$ bis $x/d_v = 9$ in unterstromiger Richtung für den Festkörperzylinder, den mit Kugeln mit $d = 0,04\text{m}$ gefüllten Zylinder sowie die durchströmte und die überströmte Pflanze. Weiterhin sind die charakteristischen Längen, wie sie von Rominger u. Nepf (2011) bzw. Zong u. Nepf (2011) definiert wurden für alle Fälle aufgetragen.

Der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils des Festkörperzylinders zeigt die klassischen Merkmale der Festkörperumströmung. Der Bereich zwischen $x/d_v = 0$ und $x/d_v = 1$ weist Leerstellen auf, da infolge der festen Geometrie in diesem Bereich nicht gemessen werden kann. Das Längsprofil beginnt mit einem ausgeprägten Geschwindigkeitsgradienten und Geschwindigkeitsreduktion auf $v_i/v = 0,25$ bis knapp oberstrom des Zylinders. Im Nachlauf wird die Geschwindigkeit weiter reduziert, das Minimum von $v_i/v = -0,25$ wird bei $x/d_v = 1,75$ erreicht. Anschließend folgt ein Geschwindigkeitsanstieg, die ursprüngliche mittlere Fließgeschwindigkeit des Systems wird bei $x/d_v = 5,5$ erreicht.

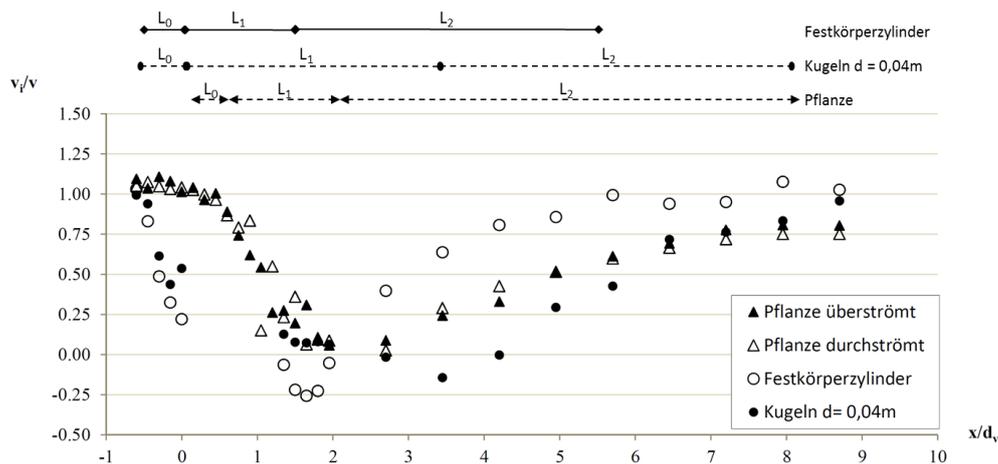


Abbildung 7.6.: Längsprofil der Geschwindigkeitsdaten des Festkörperzylinders, des Zylinders mit Kugeln $d = 0,4\text{m}$ und der durchströmten sowie überströmten Pflanze.

Auch das Längsprofil des Kugel-gefüllten Zylinders beginnt mit einer signifikanten Geschwindigkeitsreduktion vor der Zylindergeometrie. Allerdings fällt die normierte Fließgeschwindigkeit vor dem Zylinder nur auf einen Wert von $v_i/v = 0,4$ mit einem leichten Anstieg vor dem Eintritt in die poröse Kugelpackung. Der Nachlauf beginnt mit einer konstanten Geschwindigkeit um $v_i/v = 0,1$ und anschließendem Rückgang auf $v_i/v = -0,125$ bei $x/d_v = 3,5$. Nach einem Anstieg der Werte wird die ursprüngliche mittlere Fließgeschwindigkeit des Systems etwa bei $x/d_v = 9$ erreicht.

Wie auch schon bei der Analyse der Querprofile (vgl. Abbildung 7.5) beobachtet, verhält sich das Längsprofil des Geschwindigkeitsverlaufes für die durchströmte Pflanze und die umströmte Pflanze nahezu identisch. Infolge der Biegung der Pflanze ist der Eintritt der Strömung in die Pflanzengeometrie versetzt zu $x/d_v = 0,6$. Die Geschwindigkeit oberstrom des Pflanzenbesatzes ist nur von einer geringen Geschwindigkeitsreduktion geprägt, während die Geschwindigkeit innerhalb der Pflanze mit großem Geschwindigkeitsgradient reduziert wird. Das Minimum von $v_i/v = 0,1$ wird bei $x/d_v = 1,5$ erreicht und konstant gehalten bis $x/d_v = 0,6$. Anschließend erfolgt ein kontinuierlicher Geschwindigkeitsanstieg bis zum letzten Messpunkt auf $v_i/v = 0,75$.

7.2. Rechnerische Erfassung der Widerstände aus der porösen Durchströmung und ihrer Effekte

Aus den zuvor dargestellten Resultaten der Untersuchungen zum Geschwindigkeitsbild um poröse Körper wird deutlich, dass die Anwendung der Festkörperhydraulik auf die Widerstandsberechnung vegetativer Widerstände aus strauchartiger Vegetation physikalisch nicht belastbar ist. In Abbildung 7.7 sind die wesentlichen Erkenntnisse der Strömungscharakteristik durchströmter poröser Elemente im Vergleich zur Festkörperumströmung grafisch zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die Isotachendiagramme des Festkörperzylinders, des porösen Zylinders mit gleicher Porosität wie die Pflanze, sowie der durchströmten Pflanze. Grundsätzlich lassen sich aus den Resultaten die folgenden charakteristischen Strömungseffekte ableiten, aus denen sich der resultierende Widerstand der strauchartigen Vegetation in der Strömung zusammensetzen muss:

- **Strömungsaufteilung:**

Im Gegensatz zur Festkörperumströmung wird bei der porösen Durchströmung der aus oberstrom des Körperquerschnitts ankommende Massenstrom in zwei Massentströme aufgeteilt: Ein Teil, der mit verminderter Geschwindigkeit durch den Pflanzenquerschnitt hindurch strömt und ein Teil, der infolge des Widerstands, wie auch bei der Festkörperumströmung, zur Seite ausweicht und beschleunigt wird. Die jeweiligen Anteile hängen einerseits von der Porosität, aber auch von der Permeabilität des entstehenden Körpers ab.

- **Druckverhältnisse:**

Infolge der Teildurchströmung durch den porösen Körper reduziert sich der für die Festkörperumströmung klassische Staudruck oberstrom des Körpers in Abhängigkeit der Porosität bzw. Permeabilität. Im weiteren Verlauf sorgt der aus der Durchströmung resultierende Impuls in Richtung des Nachlaufes für eine signifikante Reduzierung des Unterdruckes, der bei der Festkörperumströmung

zu den periodischen Nachlaufwirbeln der Karman'schen Wirbelstraße führt. Damit reduziert und versetzt bzw. verhindert er die Wirbelbildung hinter dem porösen Körper mit steigender Porosität und Permeabilität.

- **Nachlaufströmung:**

Aus dem Impuls der Durchströmung resultiert zudem eine positive Strömung innerhalb des Nachlaufes einhergehend mit einer Verlängerung des beschleunigten Strömungsfeldes resultierend aus der Umströmung. Die Länge dieses Nachlaufbereichs sowie die Größe der Fließgeschwindigkeit innerhalb des Nachlaufbereiches und auch die Ausprägung der anschließenden Bildung von Nachlaufwirbeln hängt maßgeblich von der Porosität und Permeabilität ab. Zwischen der langsamen Nachlaufströmung und der beschleunigten Umströmung liegt ein hoher Geschwindigkeitsgradient und damit eine Scherung vor, die zu Scherungswirbelbildung führt.

- **Biomassenverteilung:**

Aus dem Vergleich der Strömungsbilder zwischen dem homogen gefüllten Zylinder mit Filtermaterial mit einer Porosität von $\phi = 0,97$ und der Pflanze mit der selben Porosität aber einer Blatt- und Astverteilung zeigt sich, dass eine steigende Permeabilität die Auswirkungen der porösen Durchströmung weiter verstärkt.

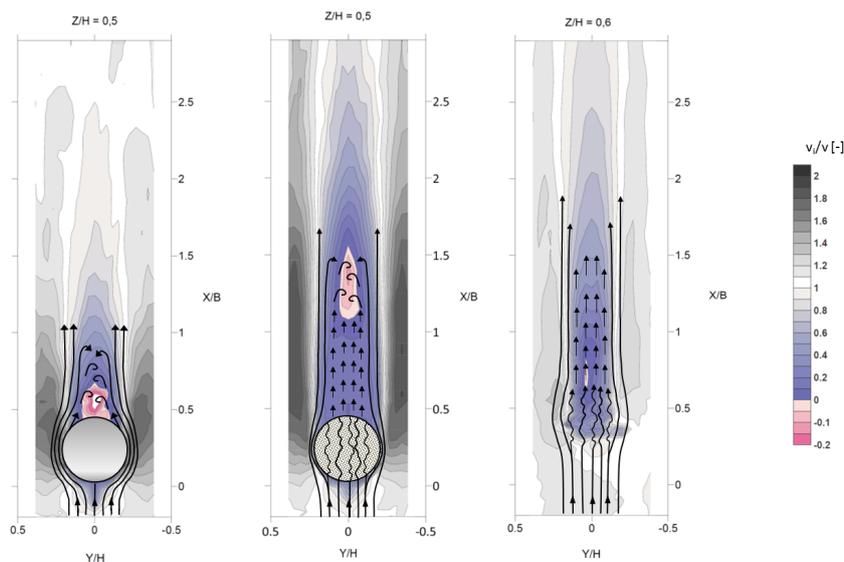


Abbildung 7.7.: Grafische Zusammenfassung der wesentlichen Strömungscharakteristiken einer porösen Durchströmung von Einzelelementen im Vergleich zur Festkörperumströmung.

Aus diesen Strömungseffekten lassen sich Ablagerungsphänomene erklären, wie sie häufig nach Hochwasserereignissen beobachtet werden können. Abbildung 7.8 zeigt das Ablagerungsverhalten im Nachlaufbereich strauchartiger Pflanzen nach einem Hochwasser, nachgebildet im Labor (vgl. Abbildung 7.8 links und Mitte) und als Fotoaufnahme des Nachlaufbereiches eines Weidengebüsches an der Enz bei Pforzheim (vgl. Abbildung 7.8 rechts) aus Untersuchungen von Lehmann 2005. Sowohl innerhalb des Pflanzenbereiches aber vor allem in der Nachlaufzone der Weidengebüsches finden sich große Ablagerungsfelder wieder.



Abbildung 7.8.: Aufnahmen der resultierenden Ablagerungsbilder im Nachlaufbereich von strauchartigen Vegetationsgruppen. Links und Mitte: Untersuchung im Labor, rechts: Foto einer Ablagerungszone im Nachlauf eines Weidengebüschriegels nach einem Hochwasserereignis an der Enz (Quelle: Lehmann 2005).

Diese Ablagerungen entstehen durch die stark verzögerte aber positive Strömung im Nachlauf der porösen Sträucher. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind erheblich langsamer als die der umgebenden Strömung, so dass mit der Hochwasserwelle mitgeführte Schwebstoff- und Geschiebefrachten sich ablagern können.

Aus den o.g. Erkenntnissen gilt es nun, dem planenden Ingenieur eine physikalisch fundierte Berechnungsmöglichkeit zur Quantifizierung des Strömungswiderstands strauchartiger Vegetation zur Verfügung zu stellen. Eine nähere Betrachtung zeigt, dass sich der aus der porösen Durchströmung resultierende Widerstand aus wenigen Einzelwiderständen zusammensetzt. Unter der Annahme, dass diese Widerstände sich gegenseitig nicht signifikant beeinflussen, können diese mittels einer Impulsbilanz bzw. Kräftebilanzierung additiv zu einer Gesamtwiderstandskraft zusammengesetzt werden. Abbildung 7.9 zeigt eine Skizze der wesentlichen angreifenden Widerstandskräfte einer Strömung in einem Kontrollvolumen mit porösem Störkörper.

Der Gesamtwiderstand resultiert aus:

- Druck infolge der Teilumströmung (Staudruck oberstrom und Unterdruck am Ende des Nachlaufes),
- Reibung innerhalb der Pflanzenstruktur infolge der Durchströmung und
- Turbulenz am unterstromigen Austritt aus der porösen Struktur sowie in der Scherschicht zwischen Nachlaufströmung und Umströmung (vgl. Ruck u. Schmitt (1986), Zong u. Nepf (2011) und Chen u. a. (2012)).

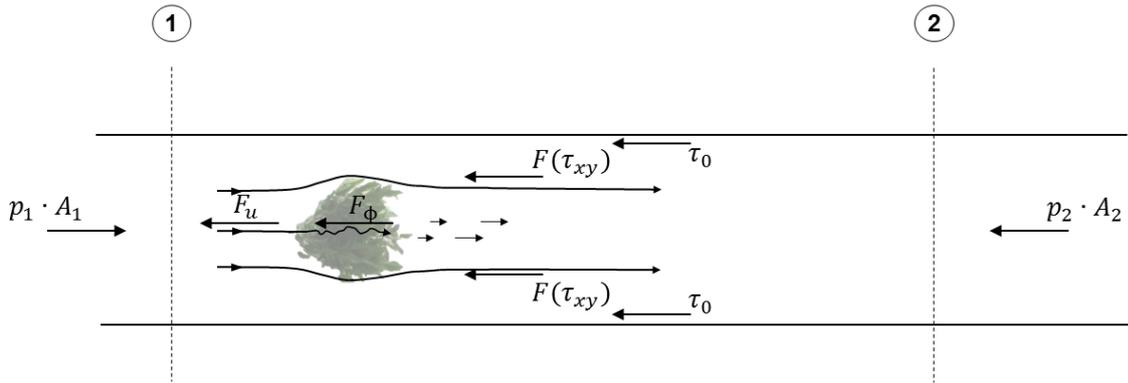


Abbildung 7.9.: Kräftebilanzierung der aus einem durchströmten porösen Körper resultierenden Widerstände (Hydrostatische Kräfte und Impulskräfte heben sich auf).

Mit einer Massenbilanz aus den Daten der Geschwindigkeitsuntersuchungen lassen sich die Strömungsanteile, welche der Umströmung und der Durchströmung zugeordnet werden müssen ermitteln. Für den Fall der Pflanze konnte dies exemplarisch durchgeführt werden, da hier auch Geschwindigkeitsdaten aus der Pflanzenstruktur vorliegen. Die Bilanz zeigt, dass etwa die Hälfte des ankommenden Massenstroms durch die Pflanze geführt wurde, während die andere Hälfte die Pflanze umströmte. Dies bedeutet, dass für die Ermittlung der Widerstandskraft aus der Umströmung die Geschwindigkeit $v_u = 1/2 v$ angesetzt werden muss. Die Widerstandskraft ergibt sich damit zu:

$$F_u = \frac{1}{2} \cdot \rho \left(\frac{1}{2} \cdot v \right)^2 \cdot A_p \cdot c_d \quad (7.1)$$

Für den aus der Durchströmung resultierenden Widerstand muss ebenso die Geschwindigkeit $v_u = 1/2 \cdot v$ angesetzt werden. Basierend auf dem Ansatz nach Engelund (1953) und der Anpassung für strauchartige Vegetation (vgl. Gleichung 4.12) kann die Widerstandskraft infolge Durchströmung definiert werden zu:

$$F_\phi = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot v \right)^2 \cdot \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^2 \cdot d_B} \cdot V_{ges} \quad (7.2)$$

Der resultierende Gesamtwiderstand kann damit ausgedrückt werden als:

$$F_{\phi, ges} = \frac{5}{24} \cdot \rho \cdot v^2 \left(A_p \cdot c_d + \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^2 \cdot d_B} \cdot V_{ges} \right) + F(\tau_{xy}) \quad (7.3)$$

Der Term $F(\tau_{xy})$ umfasst die Widerstandsanteile infolge der Turbulenz im Abströmbereich und entlang der Scherströmung. Offen bleibt an dieser Stelle, ob der Effekt der Permeabilität auf das Ausmaß der Durchströmung mit Hilfe der geometrischen Herleitung vollständig abgebildet ist. Dies muss in weiteren Untersuchungen detailliert analysiert werden. Ebenso muss untersucht werden, wie der Widerstandsanteil infolge der Turbulenz berechnet werden kann und ob die additive Zusammensetzung in der Form, wie in Gleichung 7.3 vorgenommen, zur richtigen Quantifizierung des Gesamtwiderstandes führt.

7.3. Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur turbulenten Durchströmung poröser Körper

Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Geschwindigkeitsverteilung um eine strauchartige Pflanze und den Resultaten der numerischen Simulation mit einem Porositätsansatz (vgl. Kapitel 6) wurde die Hydraulik um poröse Körper in einer turbulenten Strömung systematisch untersucht. Hierzu wurden Zylinder mit unterschiedlicher Porosität, gestaffelt von $\phi = 0,0$ bis $\phi = 0,97$, sowie eine durchströmte und eine überströmte Pflanze den gleichen Strömungsbedingungen ausgesetzt und das resultierende Geschwindigkeitsbild in einem hoch aufgelösten Messraster in einer Ebene untersucht.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die zunehmende Durchströmung mit steigender Porosität das Strömungsfeld und das resultierende Widerstandsverhalten maßgeblich beeinflusst. Das hydraulische Bild der Zylinder mit gestaffelter Porosität zeigt folgende Merkmale:

- Der Staubereich auf der oberstromigen Seite der Zylinder nimmt mit steigender Porosität ab.
- Die Rückströmzone, bekannt als Karman'sche Wirbelstraße, wird mit zunehmender Porosität nach unterstrom versetzt und ihre Ausdehnung wird verringert.
- Zwischen dem Austrittsquerschnitt aus dem porösen Medium und dem Beginn der Rückströmzone bildet sich ein Nachlauf mit stabiler positiver Strömung sehr geringer Fließgeschwindigkeit.
- Mit dem Versatz der Rückströmzone wird die Teilumströmung um den Zylinder verlängert und es findet eine weitere Beschleunigung statt.
- Zwischen dem Nachlauf mit geringer Fließgeschwindigkeit und der Umströmung mit erhöhter Fließgeschwindigkeit entwickelt sich eine Scherzone mit ausgeprägtem Geschwindigkeitsgradienten.

Das Geschwindigkeitsbild der turbulent durchströmten strauchartigen Pflanzen zeigt grundsätzlich ein ähnliches Verhalten, infolge der erhöhten Permeabilität. Im Vergleich zu den Zylindern liegen jedoch folgende Abweichungen im Strömungsbild vor:

- Die Strukturverteilung innerhalb der Pflanzen ist inhomogen. Dies wirkt sich in einem ungleichverteilten Geschwindigkeitsbild innerhalb der Pflanzestruktur aus.

- Infolge der vergleichsweise hohen Permeabilität der Pflanzen wird die Durchströmung im Vergleich zu der des Zylinders gleicher Porosität erhöht und der Umströmungsanteil sinkt.
- Die Strecke des verzögerten Nachlaufes ist kürzer als die des Zylinders gleicher Porosität und es entwickelt sich keine Rückströmzone. Die Scherzone zwischen Nachlauf und Umströmung bildet sich jedoch auch für die Pflanzen aus.

Im Gesamten kann aus den Resultaten der Untersuchungen geschlossen werden, dass die Anwendung der Gleichung der Widerstandskraft eines Festkörpers in einer Strömung (vgl. Gleichung 3.25) für strauchartige Pflanzen nicht korrekt ist. Die Strömungsaufteilung in Durchströmung und Umströmung sowie der veränderte Nachlauf resultieren vielmehr in drei charakteristischen Widerstandsquellen, die in der Summe den Gesamtwiderstand der strauchartigen Pflanze ergeben. Diese Widerstandsquellen sind: Druck infolge der Teilumströmung der Pflanze, Reibung innerhalb der Pflanzenstruktur und Verluste infolge der Scherströmung zwischen Nachlauf und Umströmung. Mittels einer exemplarischen Kräftebilanzierung wurde basierend auf den in Kapitel 4.4 hergeleiteten Formelwerken und den phänomenologischen Beobachtungen der Porositätsuntersuchungen ein theoretischer Bemessungsansatz zur Beschreibung des Gesamtwiderstands einer strauchartigen turbulent durchströmten Pflanze aufgestellt.

Die Untersuchungsergebnisse und aufgestellten Formelwerke bilden zunächst eine gute Basis zum Verständnis des Widerstandsverhaltens strauchartiger Vegetation und den einzelnen Widerstandsquellen. Die Richtigkeit der Formelwerke sollte jedoch in weiterführenden Untersuchungen mit Fokus auf die turbulente Durchströmung poröser Medien abhängig von Strukturverteilung und Form überprüft werden. Zudem müssen die Einzelwiderstände anhand detaillierter Untersuchungen abhängig von Porosität und Permeabilität quantifiziert werden.

Teil IV.

Zusammenfassung und Empfehlungen

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage nach dem Strömungsverhalten um und durch strauchartige Weiden und der Erarbeitung eines physikalisch belastbaren Ansatzes zur Bemessung des resultierenden hydraulischen Widerstands dieser Pflanzen. Grundlage zur Definition eines solchen Ansatzes ist die Kenntnis über relevante Eigenschaften der betreffenden Pflanzenarten selbst sowie über bis heute aufgestellte Berechnungsverfahren zur Beschreibung des hydraulischen Widerstands der Pflanzen. Hierzu wurde der aktuelle Forschungsstand zu den relevanten pflanzenphysiologischen Eigenschaften mit Fokus auf Habitus, Allometrie und Biegemechanik (vgl. Kapitel 2) und zur Vegetationshydraulik mit Fokus auf die Bemessung überströmter und durchströmter Vegetation (vgl. Kapitel 3) zusammengefasst.

Untersuchungen zu den relevanten pflanzenphysiologischen Eigenschaften holziger und v.a. baumartiger Vegetation (vgl. Kapitel 2) beschreiben das Biegeverhalten, die Bestandsdichte aber auch weitere Eigenschaften holziger Vegetation über die Skalengesetze nach Reineke (1933) und Yoda u. a. (1963). Eine Anwendung dieser Gesetze auf die Volumendichte strauchartiger Vegetation konnte nicht nachgewiesen werden. Weiterführende Untersuchungen haben vielmehr ergeben, dass die Dichte strauchartiger Vegetation unabhängig vom Bewuchsalter ist (Schneider (2010)) und die flexible Biegung der Pflanzen aus einer Form des optimalen Lastabtrags resultiert (Mattheck (2010)).

Bisherige Untersuchungen zur Bemessung des hydraulischen Widerstands von strauchartiger Vegetation (vgl. Kapitel 3) basieren zunächst auf der Annahme, dass der Formwiderstand einer strauchartigen Pflanze zur Schubspannung substituiert werden kann. Grundlage für diese Annahme ist die Verwendbarkeit der Gleichung zur Widerstandskraft eines um- und überströmten Festkörpers zur Berechnung des Widerstands einer durchströmten strauchartigen Pflanze. Da die Pflanzen jedoch nicht starr sondern flexibel sind und auch in ihrer Permeabilität nicht mit einem Festkörper gleichgesetzt werden können, ist es notwendig diese charakteristischen Eigenschaften in der Gleichung zu berücksichtigen. Hierzu gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen. Einige Autoren abstrahieren die Pflanzen entweder als Anordnung von Zylindergruppen und fokussieren ihre Untersuchungen auf die gegenseitige Beeinflussung der Einzelkörper, andere ermitteln einen arttypischen Widerstandsbeiwert auf Basis der direkten Messung der Widerstandskraft. Pflanzeigenschaften, wie Flexibilität, Belaubung und Struktur, werden entweder mittels zusätzlicher dimensionsloser artspezifischer Beiwerte in die Gleichungen eingesetzt, oder über weitere funktionale Abhängigkeiten bestimmt.

Die zahlreichen zur Verfügung stehenden Ansätze zur Beschreibung und Bemessung des Widerstands strauchartiger Vegetation sind damit meist mit schwer definierbaren Parametern und einer sehr komplexen Anwendung verbunden oder gelten nur für spezielle Anwendungsbereiche. Der Effekt des Widerstands infolge der mehr oder weniger ausgeprägten Durchströmung der Pflanzenstruktur bleibt in den meisten Untersuchungen unberücksichtigt. Wenige Untersuchungen beschäftigen sich mit der porösen Durchströmung von Pflanzenstrukturen.

Auf Basis dieser Kenntnisse wurde in dieser Arbeit der Ansatz gewählt, zunächst mittels direkter Messung der Widerstandskraft der Pflanzen die widerstandswirksamen Einzelparameter zu analysieren (vgl. Kapitel 5). Mit einer hoch aufgelösten Vielpunktgeschwindigkeitsmessung wurde anschließend die Wir-

kungsweise der Durchströmung einer strauchartigen Pflanze auf das Strömungsverhalten und die resultierenden Widerstandsquellen untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse konnten dann genutzt werden, die untersuchten Strömungszustände in einem hydrodynamisch-numerischen Modell (SSIIM) zu simulieren, in dem die Pflanze als durchströmtes poröses Medium definiert wurde (vgl. Kapitel 6). Mit einer physikalischen Analyse der durchströmten Pflanze als poröses Medium und detaillierten Untersuchungen zur Durchströmung poröser Körper basierend auf klar definierten Strukturen konnten dann die Widerstandsquellen lokalisiert und ein neuer Berechnungsansatz aufgestellt werden (vgl. Kapitel 7).

Die Untersuchungen zur direkten Messung der Widerstandskraft von Weiden (vgl. Kapitel 5) haben gezeigt, dass der hydraulische Widerstand der Pflanzen im Wesentlichen von drei Faktoren abhängt: Das Verhältnis von Wassertiefe zu Pflanzengröße, die Belaubung und das Flexibilitätsverhalten. Die Auswirkungen des Verhältnisses von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe zeigen sich vor allem bei unbelaubten Pflanzen. Ein Herausragen unbelaubter Zweige über den Wasserspiegel hinweg kann Strömungsablösungen induzieren, deren Wirbel im Bereich der Eigenfrequenz der Zweige pulsieren, so dass die Zweige beginnen zu oszillieren und damit der Widerstand signifikant erhöht wird. Die Vorhersage dieses Schwingverhaltens auf Basis der Kenntnis der einzelnen Zweigdurchmesser und der Anströmgeschwindigkeit ist schwierig. Zudem weist belaubte Vegetation infolge der durch das Laub signifikant erhöhten Anströmfläche einen deutlich höheren Widerstand auf als unbelaubte Vegetation.

Daher wird für die Anwendung der Formelwerke empfohlen, den Widerstand belaubter Vegetation anzusetzen und auf eine Aufspaltung in unbelaubten und belaubten Widerstand zu verzichten. Der Einfluss der Belaubung auf das Widerstandsverhalten der Pflanzen wird zunächst in einer Stabilisierung der Pflanze in einer von der hydraulischen Last abhängigen stromlinienförmigen Ausrichtung deutlich. Der Anteil des Laubes am Gesamtwiderstand ist infolge der zunehmenden Kontraktion und stromlinienförmigen Ausrichtung der Blätter ebenso lastabhängig und nimmt mit zunehmender hydraulischer Belastung ab. Grundsätzlich zeigt sich aus den Untersuchungsergebnissen, dass die Flexibilität der Pflanzen den größten Einfluss auf das Widerstandsverhalten der strauchartigen Pflanzen hat.

Aus dem exponentiellen Ansatz von Boller u. Carrington (2006) und der Überlegung zum Extremwertverhalten der Pflanzenkontraktion in Abhängigkeit von der Belastung wurde eine Gesetzmäßigkeit des Kontraktionsverhaltens abgeleitet, die eine Berechnung der relativen Flächenreduktion in Abhängigkeit der Belastung ermöglicht. Auf diese Weise ist es möglich in der Praxis unter Kenntnis der projizierten Vegetationsfläche im unbelasteten Zustand und der Fließgeschwindigkeit die Flächenreduktion zu bestimmen. Mit den in dieser Arbeit ermittelten Widerstandsbeiwerten der untersuchten Pflanzenspezies kann damit der resultierende Widerstand der Pflanzen bestimmt werden. Die Anwendung dieser Bemessungsansätze sollte jedoch nur unter Berücksichtigung der natürlichen Schwankungsbreite stattfinden, die vor allem bei geringen Fließgeschwindigkeiten nicht vernachlässigt werden kann.

Da die Anwendung des Ansatzes zur Widerstandskraft eines Festkörpers auf eine strauchartige Pflanze infolge der Durchströmbarkeit physikalisch nicht korrekt ist, wurden weiterführende Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung um und durch eine strauchartige Pflanze durchgeführt, um den Durchströmungsanteil und das resultierende hydraulische Bild der strauchartigen Pflanzen zu überprüfen (vgl. Kapitel 6). Aus den Resultaten der Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung wurde deutlich, dass die

Durchströmung der strauchartigen Pflanze in einer nicht zu vernachlässigenden Größenordnung stattfindet, so dass das hydraulische Bild im Vergleich zu dem einer Festkörperumströmung signifikant verändert wird und die Widerstandsquellen und deren Größenordnung neu definiert werden müssen.

Im Wesentlichen zeigen sich vier maßgebliche hydraulische Effekte der Durchströmung auf das Strömungsverhalten um eine strauchartige Pflanze: Infolge der Teildurchströmung und der stromlinienförmigen Ausrichtung der Pflanze wird der Rückstau direkt oberstrom auf eine sehr kurze Strecke reduziert, unterstrom entwickelt sich eine Nachlaufzone mit stabiler positiver Strömung von geringer Fließgeschwindigkeit, die Teilumströmung wird parallel zur Nachlaufströmung fortgesetzt und es findet eine Beschleunigung ab dem Pflanzenquerschnitt statt. Zwischen der Nachlaufzone und der verlängerten Umströmung bildet sich dabei ein Scherbereich mit ausgeprägtem Geschwindigkeitsgradienten aus. Die Simulation der in den Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung durchgeführten Strömungszustände einer hydraulische belasteten strauchartigen Pflanze mit einem Porositätsansatz im HN-Modell SSIIM ergaben sehr gute Übereinstimmungen im hydraulischen Strömungsbild.

In einer weiteren Simulation zusätzlicher Strömungszustände und einer Auswertung nach den resultierenden Widerstandsdaten konnte im Vergleich zu den gemessenen Widerständen diese Übereinstimmung zusätzlich bestätigt werden. Aus diesen Erkenntnissen kann geschlossen werden, dass die Annahme der strauchartigen Pflanze als poröses durchströmtes Medium richtig ist, dass jedoch die zur Verfügung stehenden Formelwerke auf die Situation einer turbulent durchströmten Pflanze angepasst werden müssen. Eine zusätzliche Untersuchung des voluminösen Kontraktionsverhaltens der Pflanze in Abhängigkeit zur hydraulischen Belastung ergab, dass die Volumenkontraktion den gleichen Gesetzen folgt, wie die Kontraktion der angeströmten Fläche. Damit ist die Anwendung der exponentiellen Abnahme mit asymptotischer Annäherung auf eine Endgröße auch auf das Volumen der strauchartigen Pflanzen möglich.

Basierend auf den Untersuchungen zur numerischen Simulation der Strömung um eine strauchartige Pflanze mittels eines Porositätsansatzes wurde die Geschwindigkeitsverteilung um Körper unterschiedlicher Porosität untersucht (vgl. Kapitel 7). Die Resultate haben gezeigt, dass das hydraulische Bild maßgeblich vom Porositätsgrad des Störkörpers abhängt, da mit steigender Durchströmung auch die während der Versuche zur Geschwindigkeitsverteilung um eine strauchartige Pflanze erkannten Effekte auf das hydraulische Bild zunehmend ausgeprägter erscheinen.

Aus den Untersuchungsergebnissen sowie einer theoretischen Überlegung zur Anpassung der Formelwerke poröser Durchströmung auf die Geometrie einer strauchartigen Pflanze wurde dann mittels einer Kräftebilanzierung aus Strömungsangriff und Einzelwiderständen eine Gleichung der Gesamtwiderstandskraft einer strauchartigen Pflanze entwickelt. Der Gesamtwiderstand setzt sich zusammen aus dem Widerstand infolge Reibung innerhalb der Pflanzenstruktur, dem Widerstand infolge Druck bei der Teilumströmung sowie dem Widerstand resultierend aus den Scherwirbeln zwischen der langsamen Nachlaufströmung und der schnellen Umströmung. Die Erkenntnisse der vorgestellten Arbeit zeigen, dass der Ansatz, eine strauchartige Pflanze hydraulisch als durchströmtes poröses Medium zu betrachten, richtig ist. Die aufgestellte Gleichung zur Berechnung der resultierenden Gesamtwiderstandskraft auf Basis eines Porositätsansatzes erfasst alle lokalisierten Widerstandsquellen.

Empfehlungen

Ziel der vorgestellten Arbeit war es, einen Berechnungsansatz zur Bestimmung des hydraulischen Widerstands strauchartiger Vegetation zur Verfügung zu stellen. Auf Basis von experimentellen und hydrodynamisch-numerischen Untersuchungen sowie theoretischen Überlegungen wurde o.g. Ansatz erarbeitet, mit Hilfe dessen der hydraulische Widerstand strauchartiger Pflanzen nun definiert werden kann.

Für die Anwendung dieses Ansatzes in der Praxis spielt die im konkreten Fall mögliche Berechnungsweise und Auflösung des Berechnungsgitters eine wesentliche Rolle. Ist es möglich eine 3D-HN-Strömungsmodellierung mit Zellgrößen, die um ein Vielfaches kleiner als der Pflanzendurchmesser sind zu verwenden, wie sie derzeit vorwiegend im Rahmen von Forschungsarbeiten durchgeführt werden, so kann die in dieser Arbeit entwickelte, auf die Zelleinheit bezogene Gleichung des hydraulischen Gradienten resultierend aus dem Widerstand infolge Durchströmung des porösen Mediums (vgl. Gleichung 4.9) direkt genutzt werden:

$$I = \frac{1}{3} \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^3} \cdot \frac{v^2}{g \cdot d_B}$$

Infolge der derzeit zur Verfügung stehenden Rechnerleistungen ist eine Strömungsberechnung mittel- und großräumiger Gebiete mit dreidimensionalen Verfahren nicht in akzeptablen Berechnungszeiten durchführbar. Daher kommen hier vorwiegend zweidimensionale Verfahren zum Einsatz. Auch wird abhängig von der Gebietsgröße häufig eine Gitterauflösung des Berechnungsgitters von mehreren Metern gewählt, so dass die Verwendung des Porositätsansatzes auf die gesamte Berechnungszelle den tatsächlichen Widerstand um ein Vielfaches überschätzen kann. Daher wird für die 2D- (und auch 1D-) Strömungsmodellierung empfohlen, die tatsächlich resultierende Widerstandskraft, deren Berechnungsgleichung im Rahmen der vorgestellten Arbeit entwickelt wurde (vgl. Gleichung 7.3), zu verwenden und die Kraft gemäß der Umlegung auf die Fläche zu einem Widerstandsbeiwert λ zu substituieren:

$$F_{\phi, ges} = \frac{5}{24} \cdot \rho \cdot v^2 \left(A_p \cdot c_d + \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^2 \cdot d_B} \cdot V_{ges} \right) + F(\tau_{xy})$$

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass bei Verwendung der Substitution der Kraft zum Widerstandsbeiwert λ das Verhältnis zwischen der Gesamtgrundfläche der Zelle und der vom Widerstand der Pflanze beeinflussten Grundfläche in der Berechnung berücksichtigt bleiben muss.

Die Anwendung der vorgestellten Gleichung zur Gesamtwiderstandskraft einer strauchartigen Pflanze in der Praxis setzt die Kenntnis der einzusetzenden Parameter voraus. Abbildung 7.10 zeigt eine Übersicht für die Berechnung der notwendigen Parameter sowie den derzeitigen Stand hinsichtlich der Definitionsmöglichkeit.

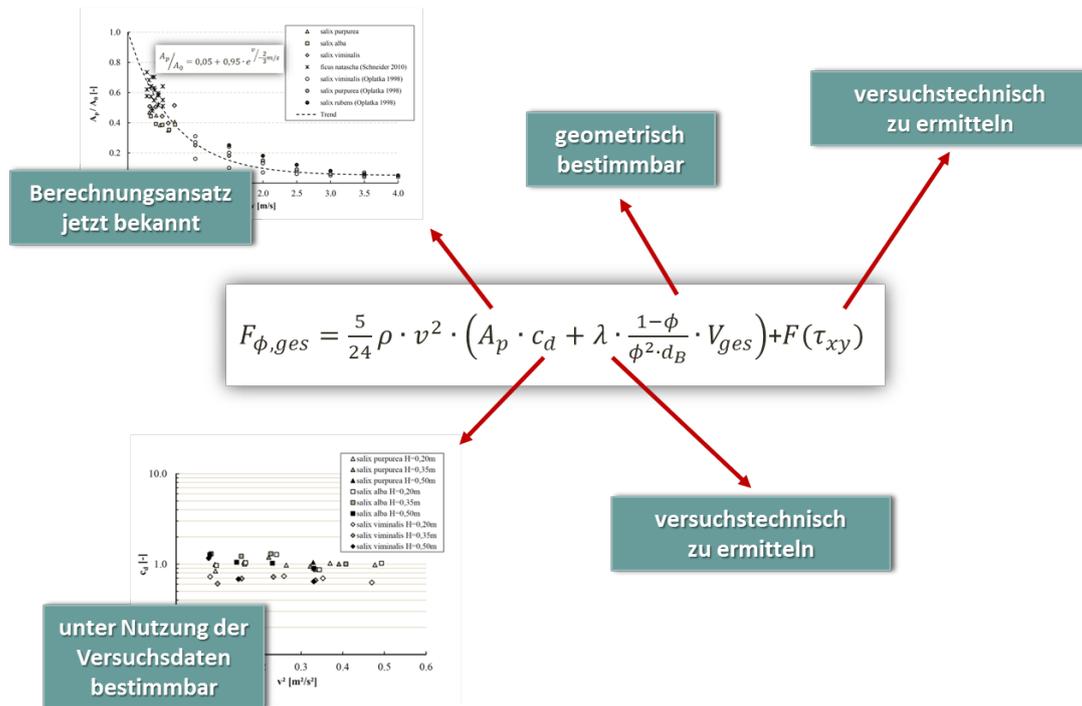


Abbildung 7.10.: Betrachtung der zu bestimmenden Parameter der Gleichung zur Berechnung der resultierenden Gesamtwiderstandskraft.

Die für die Berechnung notwendigen Parameter sind:

- Die angeströmte Fläche unter Strömungslast A_{veg} :
Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kontraktionsgleichung (vgl. Diagramm 6.16) ermöglicht die Bestimmung dieser Fläche unter Verwendung der unbelasteten Vegetationsfläche A_0 und der Strömungsgeschwindigkeit v .
- Der pflanzenspezifische Widerstandsbeiwert c_d :
Dieser kann für die verwendeten Weidenarten aus den vorgestellten Untersuchungen abgeleitet werden (vgl. Tabellen 5.2 und 5.1).
- Pflanzengeometrische Informationen, wie Porosität ϕ , Blattdicke d_B und Volumen V_{ges} :
Diese Daten können für den konkreten Fall im Rahmen einer Kartierung vor Ort erhoben werden, z.T. stehen auch Daten aus der Literatur zur Verfügung.
- Der Widerstandsbeiwert λ und die Widerstandskraft infolge der Scherströmung im Nachlauf $F(\tau_{xy})$:
Für diese Parameter stehen derzeit noch keine direkt anwendbaren Ansätze oder Daten zur Verfügung. Es wird empfohlen, diese basierend auf weiterführenden Untersuchungen zu definieren. Hierzu bietet sich eine hybride Modellierung beginnend mit klaren geometrischen Porositätsstrukturen und stufenweiser Anpassung auf komplexe Pflanzenstrukturen an.

Für weiterführende Untersuchungen wird empfohlen, die aufgestellte Gleichung mit detaillierten Messungen an unterschiedlichen Porositätsgeometrien zu überprüfen und die Einzelparameter der Teilwiderstände zu quantifizieren. Zudem sollte die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf verschiedene Gruppenanord-

nungen weiter überprüft werden. Bis damit ein physikalisch gesicherter Ansatz für ein breites Anwendungsfeld in der Praxis zur Verfügung steht, können die in dieser Arbeit ermittelten Widerstandsbeiwerte der belasteten Weiden (vgl. Tabellen 5.2 und 5.1) sowie die Kontraktionsgleichung (vgl. Diagramm 6.16) verwendet werden, um den Strömungswiderstand abzuschätzen.

Summary

This paper is on flow behavior through and around shrubby willows and describes the development of a physically reliable approach for the dimensioning of the resulting drag of these plants. The basic prerequisite for the definition of such an approach is to know the relevant characteristics of the respective plant species itself and the calculation methods which have so far been employed for the calculation of the hydraulic drag of plants. To this end, the current state of research of the relevant physiological characteristics of plants was summarized with a main focus on habitus, allometry and flexural mechanics (cf. chapter 2) as well as the current state of research on vegetation hydraulics with a main focus on the calculation of different characteristics of emergent or submerged plants (cf. chapter 3).

Studies on the relevant physiological characteristics of woody and arboreal vegetation (cf. chapter 2) describe the flexural behavior, the stand density and other properties of woody vegetation using the power laws according to Reineke (1933) and Yoda u. a. (1963). So far, there has been no evidence that these laws are appropriate for the calculation of the volume density of shrubby vegetation. More detailed studies even showed that the density of shrubby vegetation is not related to the age of the vegetation (Schneider (2010)) and the flexural behavior of the plants results in a shape that facilitates optimal load transfer (Mattheck (2010)).

Research projects on the calculation of the hydraulic drag of shrubby vegetation (cf. chapter 3) have so far been based on the presumption that the form drag of a shrubby plant can be substituted with shear stress. This presumption is based on the common proceeding of using the same equation for the calculation of the drag force of solid bodies and the calculation of the drag of shrubby plants alike.

Since however this kind of plants is not rigid, but flexible and as its structure differs strongly from that of solid bodies, it is necessary to adjust the equation correspondingly to these characteristics. There are different ways to do this: Some authors treat the plants as an abstract arrangement of cylinder groups and focus on the mutual impact the single bodies have on one another, while others determine a species-specific drag coefficient by measuring the drag force directly. Plant properties such as flexibility, foliation and structure are either inserted in the equation by means of additional dimensionless species-specific constants or determined with further functional dependences.

Most of the numerous approaches that can be employed for the description and calculation of the drag of shrubby vegetation thus contain parameters that are difficult to define and their ways of application are highly complex; or they are only valid in a very confined field of application. The drag effect resulting from the perfusion of the plant structure is not considered in most studies. Only few research projects deal with the porous perfusion of plant structures. This is why we chose to analyze the particular drag-relevant parameters first, by measuring the drag force of the plants directly (cf. chapter 5). Second, the effects of the perfusion of a shrubby plant on the flow behavior and the resulting drag sources were examined by means of a high-resolution velocity measurement. These findings were then used to simulate the examined

flow situations in a hydrodynamic-numerical model (SSIIM), in which the plant was treated as a porous medium (cf. chapter 6). Analyzing the physics of a perfused plant as a porous medium and investigating on the perfusion of porous bodies with clear structures facilitated the localization of drag sources and thus finally permitted the development of a new calculation approach (cf. chapter 7).

The analysis of directly measured drag force values of willows (cf. chapter 5) revealed that the hydraulic drag of the plants basically depends on three factors: the relation of water depth to plant size, foliation and flexural behavior. The impacts of the relation of water depth to plant height are particularly strong in leafless plants. Leafless twigs protruding over the water surface can induce separated flow with eddies that pulse at the natural frequency of the twigs, so causing the twigs to oscillate. In this case, the drag is increased significantly. The oscillatory behavior is hardly predictable on the basis of the single twig diameters and the approach velocity. Moreover, leafy vegetation has a considerably higher drag than leafless vegetation, because the foliage increases the momentum absorbing area significantly.

Therefore, the recommendation is to use formulae for the drag of leafy vegetation instead of differentiating between leafy and leafless vegetation. The influence foliation has on the drag behavior of plants first becomes apparent when the plant is stabilized in a streamlined alignment depending on the hydraulic load. The proportion of foliation-related drag depends on the load and decreases with rising hydraulic load due to the contraction and streamlined alignment of the leaves. The test results reveal that the flexibility of the plants has the major impact on the drag behavior of shrubby plants.

The regular contraction behavior was described in a new formula derived from the exponential approach of Boller u. Carrington (2006) and the considerations on contraction behavior of plants in extreme value situations depending on the load, now permitting to calculate the relative reduction of the surface depending on the load. In practice, this enables engineers to determine the surface reduction on the basis of the projected vegetation area under load-free conditions and the flow velocity. The drag coefficients of the examined plant species determined in this research project facilitate the calculation of the resulting drag of the plants. These dimensioning approaches should, however, be applied under consideration of the natural fluctuation margins, which must not be ignored especially in the case of low flow velocities.

Since the application of approaches for the drag force of solid bodies on the drag forces of shrubby plants is incorrect in physical terms, further investigations were made on the velocity distribution through and around shrubby plants in order to determine the proportion of perfusion and review the hydraulic signature through and around shrubby plants (cf. chapter 6). The results of the tests on velocity distribution show that the perfusion of shrubby plants has a dimension which is not negligible: the hydraulic signature differs significantly from the flow signature around a solid body and the drag sources as well as their dimensions need to be redefined.

The perfusion basically has four important hydraulic effects on the flow behavior around a shrubby plant: Due to the partly perfusion and the streamlined alignment of the plant, the backflow directly upstream of the plant is reduced to a very short stretch, while a wake zone with stable positive flow and a low flow velocity is developed downstream. Moreover, the flow proportion running around the plant continues

in parallel with the wake flow, accelerating from the plant's cross-section. Lastly, a shear area with a distinctive velocity gradient develops between wake zone and the extended flow around the plant. The simulation of the flow conditions of a shrubby plant under hydraulic load with a porosity approach in the HN-model SSIIM delivered a flow pattern that conformed well to the measured data.

The results of another simulation of further flow conditions were compared to the resulting drag data and confirmed this accordance. These findings indicate on the one hand that treating shrubby plants as perfused porous media is correct, but also on the other hand that the existing formulae must be adapted to the situation in a turbulently perfused plant. In this context, additional investigations on the voluminous contraction behavior of the plant depending on the hydraulic load revealed that the contraction of the volume follows the same laws as the contraction of the front surface. Therefore, it is possible to apply the rule of exponential decrease with asymptotic approximation to a final value also to the volume of shrubby plants.

Based on the testing of a numerical simulation of the flow around a shrubby plant by means of a porosity approach, the velocity distribution around bodies with different degrees of porosity was examined (cf. chapter 7). The results revealed that the hydraulic signature depends strongly on the degree of porosity of the flow obstacle, because the effects that could be observed during the tests on the velocity distribution around a shrubby plant become more and more distinctive with an increasing degree of perfusion.

Finally, an equation for the total drag force of a shrubby plant was developed on the basis of the test results and theoretical considerations on the adaptation of existing formulae for porous perfusion to the geometry of a shrubby plant by means of a balance between forces due to the flow and the different drag components. The total drag is composed of the frictional resistance within the plant structure, the pressure drag in the proportion of flow around the plant and the drag resulting from the eddies in the shear area between the slow current downstream of the plant and the fast flow around it.

The findings of the present work prove that the approach of treating shrubby plants as perfused porous media in a hydraulic context is correct. The equation developed for the calculation of the resulting total drag force on the basis of a porosity approach includes all localized drag sources:

$$F_{\phi,ges} = \frac{5}{24} \cdot \rho \cdot v^2 \left(A_p \cdot c_d + \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^2 \cdot d_B} \cdot V_{ges} \right) + F(\tau_{xy})$$

Before applying this equation in practice, it is however necessary to validate it by means of detailed measurements in porous media with different shapes and to quantify the every single parameter of the drag components. Moreover, the transferability of the findings to different plant arrangements is yet to be validated. By the time a physically validated approach is available delivering dependable results, the drag coefficients of willows under load (cf. tabulars 5.2 and 5.1) and the contraction equation (cf. figure 6.16) developed in the framework of this research project can be used in order to estimate drag dimensions.

Recommendations

The aim of the presented study was to provide a calculation approach to determine the hydraulic resistance of shrub-like vegetation. The presented approach has been developed on the basis of experimental and hydrodynamic-numerical studies and theoretical considerations. With the aid of this, it is now possible to define the hydraulic resistance of shrub-like plants. The in this case possible method of calculation and resolution of the computational mesh is essential to apply this approach in a practical way. If one would to use 3D HN flow modelling method with cell sizes that are many times smaller than the plant diameter (which is currently mainly used in the research field), then based on the cell unit as a result of the resistance due to the flow through the porous medium (cf. equation 4.9), one could use the equation of the hydraulic gradient directly:

$$I = \frac{1}{3}\lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^3} \cdot \frac{v^2}{g \cdot d_B}$$

Due to the current available computing power, a flow calculation of middle to large scale areas with a three dimensional model is not able to be process within an acceptable speed. Which is why two dimensional methods are mostly used. Regardless of the size of the area, often a resolution of the computational meshes of several meters are chosen, so the porosity calculation can by far overestimate the actual resistance of the whole computational cell. Therefore it is recommended to use the actual resulting resistance, (using the respective equation that was developed within the presented study - cf. equation 7.3) for the two dimensional (as well as the one dimensional) flow modelling and to substitute the force in accordance to the surface distribution to the resistance coefficient λ :

$$F_{\phi, ges} = \frac{5}{24} \cdot \rho \cdot v^2 \left(A_p \cdot c_d + \lambda \cdot \frac{1 - \phi}{\phi^2 \cdot d_B} \cdot V_{ges} \right) + F(\tau_{xy})$$

At this point it should be noted that when using substitution of the force to the resistance coefficient ? the ratio between the total base area of the cell and the base area, influenced by the resistance of the plant, should remain included in the calculation.

The application of the presented equation for total drag force of a shrub-like plant in practice requires knowledge of the parameters that would be used. Figure 7.10 shows an overview of the calculation of the necessary parameters and the current status regarding the possible definitions.

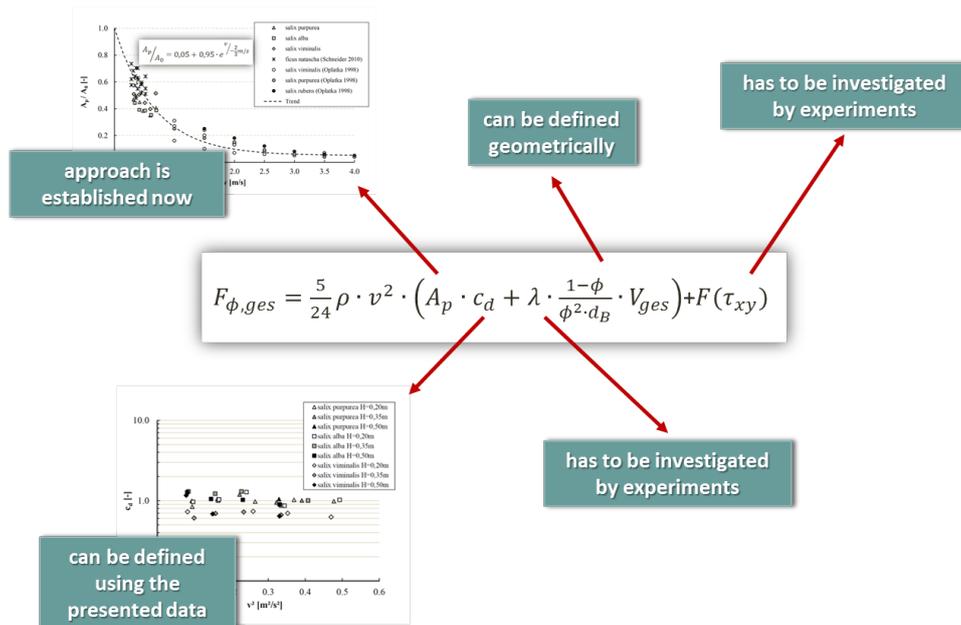


Abbildung 7.11.: Overview of the parameters to be determined of the equation to calculate the resulting total resistance.

The necessary parameters for the calculations are:

- Area that is subjected to flow under flow load A_{veg} :
The contraction equation, developed as part of this study (cf. diagram 6.16) enables to determine this area using the unstressed vegetation area A_0 and the flow velocity v .
- Drag coefficient for vegetation c_d :
For willow species, this can be derived from the presented studies (cf. table 5.2 and 5.1).
- Geometrical information of the plant: porosity ϕ , leaf thickness d_B and volume V_{ges} :
When mapping, this information can be attained on site. Presently data are also available from literature.
- The resistance coefficient λ and the drag force due to shear flow that follows up $F(\tau_{xy})$:
No direct applicable approaches or data are available for these parameters at the moment. It is recommended to define them based on further studies. Hybrid modelling, starting with clear geometrical porosity structures and a gradual adaptation to complex vegetation structures would be an option.

For further studies, it is recommended to validate the equation by means of detailed measurements in various porous media and to quantify single parameters of the drag components. Moreover, the transferability of the findings to different plant arrangements should be validated. By the time a physically validated approach is available delivering dependable results, the drag coefficients of willows under load (cf. table 5.2 and 5.1) and the contraction equation developed in the framework of this research project (cf. figure 6.16) can be used in order to estimate drag dimensions.

Literaturverzeichnis

- [Albayrak u. a. 2012] ALBAYRAK, I. ; NIKORA, V. ; MILER, O. ; O'HARE, M.: Flow-plant interactions at a leaf scale: Effects of leaf shape, serration, roughness and flexural rigidity. In: *Aquatic Sciences* 74 (2012), S. 267–286
- [Alben u. a. 2002] ALBEN, S. ; SHELLEY, M. ; ZHANG, J.: Drag reduction through self-similar bending of a flexible body. In: *Nature* 420 (2002), S. 479–481
- [Armanini u. a. 2005] ARMANINI, A. ; RIGHETTI, M. ; GRISENTI, P.: Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale. In: *Journal of Hydraulic Research* 43 (2005), Nr. 5, S. 481–487
- [Bähr u. Stephan 2006] BÄHR, H. D. ; STEPHAN, K.: *Wärme und Stoffübertragung*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. – ISBN 3–540–32334–1
- [Bertram 1989] BERTRAM, J. E. A.: Size-dependent differential scaling in branches: The mechanical design of trees revisited. In: *Trees* 4 (1989), S. 241–253
- [Betz 1926] BETZ, A.: *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Göttingen : Vandenhoeck und Ruprecht, 1926. – ISBN 3–922964–11–7
- [Blamauer u. a. 2011] BLAMAUER, B. ; KLÖSCH, M. ; TRITTHART, M. ; HABERSACK, H.: Refining parameterization of bar vegetation roughness based on in-situ-measurements of vegetation bending during flood events. In: 34TH IAHR CONGRESS (Hrsg.): *Proceedings*. 2011, S. 3388–3395
- [BMU u. BfN 2009] BMU ; BFN: *Auenzustandsbericht - Flussauen in Deutschland*. 1. Aufl. Niestetal : Silber Druck, 2009
- [Boller u. Carrington 2006] BOLLER, M.L. ; CARRINGTON, E.: The hydrodynamic effects of shape and size change during reconfiguration of a flexible macroalga. In: *The Journal of Experimental Biology* 209 (2006), S. 1894–1903
- [Bollrich 2007] BOLLRICH, G.: *Technische Hydromechanik 1*. 6. Aufl. Berlin : Huss-Medien, 2007. – ISBN 978–3–345–00912–9
- [Böswirth u. a. 2008] BÖSWIRTH, L. ; OERTEL, H. ; PRANDTL, L. ; BÖHLE, M.: *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre: Grundlagen und Phänomene*. 12. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008. – ISBN 978–3–8348–0430–3
- [Chang u. Constantinescu 2012] CHANG, K. ; CONSTANTINESCU, G.: Numerical simulation of flow past a porous cylinder with 20% solid volume fraction. In: *Journal of Computational Fluids Engineering* 17 (2012), Nr. 3, S. 87–92
- [Chen u. a. 2011] CHEN, L. ; STONE, M. C. ; ACHARYA, K. ; STEINHAUS, K. A.: Mechanical analysis for emergent vegetation in flowing fluids. In: *Journal of Hydraulic Research* 49 (2011), S. 766–774

- [Chen u. a. 2012] CHEN, Z. ; ORTIZ, A. ; ZONG, L. ; NEPF, H.: The wake structure behind a porous obstruction and its implications for deposition near a finite patch of emergent vegetation. In: *Water Resources Research* 48 (2012), Nr. 9
- [Choi u. Kang 2004] CHOI, S.U. ; KANG, H.: Reynolds stress modelling of vegetated open channel flows. In: *Journal of Hydraulic Research* 42 (2004), Nr. 1, S. 3–11
- [Chow 1959] CHOW, V. T.: *Open-channel hydraulics*. New York, Toronto, London : McGraw-Hill, 1959
- [Colebrook u. White 1937] COLEBROOK, C. F. ; WHITE, C. M.: Experiments with fluid friction in roughened pipes. In: *Proceedings of the Royal Society of London* 161 (1937), Nr. A, S. 367–378
- [Darby 1999] DARBY, S. E.: Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 125 (1999), Nr. 5, S. 443–454
- [Defina u. Bixio 2005] DEFINA, A. ; BIXIO, A.C.: Mean flow and turbulence in vegetated open channel flow. In: *Journal of Water Resources Research* 41 (2005), Nr. W07006
- [Dister 1983] DISTER, E.: Zur Hochwassertoleranz von Auenwaldbäumen an lehmigen Standorten. In: *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*. Mainz 10 (1983), S. 325–336
- [DVWK 1991] DVWK: *Hydraulische Berechnung von Fließgewässern: Merkblatt zur Wasserwirtschaft*. Heft 220. Hamburg und Berlin : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 1991
- [Einstein 1934] EINSTEIN, A.: Der hydraulische oder Profil-Radius. In: *Schweizerische Bauzeitung* 103 (1934), Nr. 8, S. 89–91
- [El-Hakim u. Salama 1992] EL-HAKIM, O. ; SALAMA, M.: Velocity distribution inside and above branched flexible roughness. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118 (1992), Nr. 6, S. 914–927
- [Ellenberg 1996] ELLENBERG, H.: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 5. Aufl. Stuttgart : Ulmer, 1996. – ISBN 3–8001–2696–6
- [Engelund 1953] ENGELUND, F.: *On the laminar and turbulent flows of groundwater through homogeneous sand*. Bd. 4. Copenhagen : Technical University of Denmark, 1953
- [Enquist u. Niklas 2002] ENQUIST, B. J. ; NIKLAS, K.: Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants. In: *Science* 295 (2002), S. 1517–1520
- [Fathi-Moghadam u. Kouwen 1997] FATHI-MOGHADAM, M. ; KOUWEN, N.: Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 123 (1997), Nr. 1, S. 51–57
- [Fischer-Antze u. a. 2001] FISCHER-ANTZE, T. ; STOESSER, T. ; BATES, P. B. ; OLSEN, N. R.: 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation. In: *Journal of Hydraulic Research* 39 (2001), Nr. 3, S. 303–310
- [Freeman u. a. 2000] FREEMAN, G. E. ; RAHMEYER, W. H. ; COPELAND, R. R.: Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation: Technical Report,. In: *U.S. Army Engineer Research and Development TR-00-25* (2000), S. ERDC/CHL CHETN
- [Frei 2007] FREI, H.: *Digitale Unterwasserfotografie von A bis Z*. 1. Aufl. Stuttgart : Franckh-Kosmos Verlag, 2007. – ISBN 978–3–440–11128–4

- [Ghisalberti u. Nepf 2002] GHISALBERTI, M. ; NEPF, H. M.: Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. In: *Journal of Geophysical Research* 107 (2002), Nr. C2, S. 3-1 – 3-11
- [Goreham u. a. 2009] GOREHAM, J. ; MCKAY, S. K. ; STONE, M. C. ; ACHARYA, K. ; FISCHENICH, J. C.: Riparian vegetation bending and washout in the Southwestern U.S. In: 33RD IAHR CONGRESS (Hrsg.): *Proceedings*. 2009, S. 2577–2584
- [Gromke 2008] GROMKE, C.: *Einfluss von Bäumen auf die Durchlüftung von innerstädtischen Straßenschluchten*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Diss., 2008
- [Gromke u. Ruck 2008] GROMKE, C. ; RUCK, B.: Aerodynamic modelling of trees for small-scale wind tunnel studies. In: *Forestry* 81 (2008), Nr. 3, S. 243–258
- [Harder u. a. 2004] HARDER, D. L. ; SPECK, O. ; HURD, C. L. ; SPECK, T.: Reconfiguration as a prerequisite for survival in highly unstable flow-dominated habitats. In: *Journal of Plant Growth Regulation* 23 (2004), S. 98–107
- [Hey 1979] HEY, R. D.: Flow resistance in gravel-bed-rivers. In: *Journal of the Hydraulics Division* 105 (1979), Nr. HY4, S. 365–379
- [Höltling u. Coldewey 2013] HÖLTING, B. ; COLDEWEY, W. G.: *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 8. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2013. – ISBN 978-3-8274-2354-2
- [Ikeda u. Kanazawa 1996] IKEDA, S. ; KANAZAWA, M.: Three-dimensional organized vortices above flexible water plants. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 122 (1996), Nr. 11, S. 634–640
- [Järvelä 2004] JÄRVELÄ, J.: *Flow resistance in environmental channels: Focus on vegetation*. Helsinki, Helsinki University of Technology Water Resources Publication, Diss., 2004
- [Järvelä 2005] JÄRVELÄ, J.: Characterization of branched woody vegetation for estimating flow resistance. In: 31TH IAHR CONGRESS (Hrsg.): *Proceedings*. 2005, S. 1877–1883
- [Järvelä 2006] JÄRVELÄ, J.: Vegetative flow resistance: characterization of woody plants for modeling applications. In: GRAHAM, Randall (Hrsg.): *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress*. American Society of Civil Engineers, 2006. – ISBN 0784408564, S. 1–10
- [Järvelä u. Helmiö 2004] JÄRVELÄ, J. ; HELMIÖ, T.: Hydraulic considerations in restoring boreal streams. In: *Nordic Hydrology* 35 (2004), Nr. 3, S. 1–12
- [Johnson u. a. 1982] JOHNSON, R. C. JR. ; RAMEY, G. E. ; O’HAGAN, D. S.: Wind induced forces on trees. In: *Journal of Fluids Engineering* 104 (1982), S. 25–30
- [Kouwen 1988] KOUWEN, N.: Field estimation of biomechanical properties of grass. In: *Journal of Hydraulic Research* 26 (1988), Nr. 5, S. 559–568
- [Kouwen u. Fathi-Moghadam 2000] KOUWEN, N. ; FATHI-MOGHADAM, M.: Friction factors for coniferous trees along rivers. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 126 (2000), Nr. 10, S. 732–740
- [Kouwen u. a. 1981] KOUWEN, N. ; LI, R. M. ; SIMONS, D. B.: Flow resistance in vegetated waterways. In: *Transactions of the ASAE* (1981), S. 684–698

- [de Langre 2008] LANGRE, E. de: Effects of wind on plants. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 40 (2008), S. 41–68
- [de Langre u. a. 2012] LANGRE, E. de ; GUTIERREZ, A. ; COSSÉ, J.: On the scaling of drag reduction by reconfiguration in plants. In: *C.R.Mechanique* 340 (2012), S. 35–40
- [Lehmann 2005] LEHMANN, B.: *Empfehlungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Raum unter Berücksichtigung der Hochwassersicherheit*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2005
- [Lewandowski 1993] LEWANDOWSKI, J. A.: *Vegetation resistance and circulation modeling in a tidal wetland*. Berkeley, University of California, Diss., 1993
- [Li u. Shen 1973] LI, R. M. ; SHEN, H. W.: Effects of tall vegetations on flow and sediment. In: *Journal of Hydraulics Division* 99 (1973), Nr. HY5, S. 793–814
- [Lindner 1982] LINDNER, K.: *Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen*. Braunschweig, TU Braunschweig, Diss., 1982
- [Lopez u. Garcia 2001] LOPEZ, F. ; GARCIA, M.H.: Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 127 (2001), Nr. 5, S. 392–402
- [Mattheck 2002] MATTHECK, C.: *Mechanik am Baum*. 1. Aufl. Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe, 2002. – ISBN 3–923704–39–9
- [Mattheck 2010] MATTHECK, C.: *Denkwerkzeuge nach der Natur*. 1. Aufl. Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie, 2010. – ISBN 978–3–923704–73–6
- [Mayhead 1973] MAYHEAD, G. J.: Some drag coefficients for british forest trees derived from wind tunnel studies. In: *Agricultural Meteorology* 12 (1973), S. 123–130
- [Meroney 1968] MERONEY, R. N.: Characteristics of wind and turbulence in and above model forests. In: *Journal of Applied Meteorology* 7 (1968), S. 780–788
- [Naot u. a. 1996] NAOT, D. ; NEZU, I. ; NAKAGAWA, H.: Hydrodynamic behaviour of partly vegetated open-channels. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 122 (1996), Nr. 11, S. 625–633
- [Neary 2003] NEARY, V.S.: Numerical solution of fully developed flow with vegetative resistance. In: *Journal of Engineering Mechanics* 129 (2003), Nr. 5, S. 558–563
- [Nepf 1999] NEPF, H. M.: Drag, turbulence and diffusion in flow through emergent vegetation. In: *Water Resources Research* 35 (1999), Nr. 2, S. 479–489
- [Nepf u. Ghisalberti 2008] NEPF, H. M. ; GHISALBERTI, M.: Flow and transport in channels with submerged vegetation. In: *Acta Geophysica* 55 (2008), Nr. 3, S. 753–777
- [Nepf u. Vivoni 2000] NEPF, H. M. ; VIVONI, E. R.: Flow structure in depth-limited, vegetated flow. In: *Journal of Geophysical Research* 105 (2000), Nr. C12, S. 28–547 – 28–557
- [Nicolle u. Eames 2011] NICOLLE, A. ; EAMES, I.: Numerical study of flow through and around a circular array of cylinders. In: *Journal of Fluid Mechanics* 679 (2011), S. 1–31
- [Niklas 1999] NIKLAS, K. J.: A mechanical perspective on foliage leaf form and function. In: *New Phytologist* 143 (1999), S. 19–31

- [Olsen u. Stokseth 1995] OLSEN, N. R. B. ; STOKSETH, S.: Three-dimensional numerical modelling of water flow in a river with large bed roughness. In: *Journal of Hydraulic Research* 33 (1995), Nr. 4, S. 571–581
- [Oplatka 1998] OPLATKA, M.: *Stabilität von Weidenverbauungen an Flußufeln*. Zürich, ETH Zürich, Diss., 1998
- [Pasche 1984] PASCHE, E.: *Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und ihre mathematische Modellierung*. Aachen, RWTH Aachen, Diss., 1984
- [Petryk u. Bosmajian 1975] PETRYK, S. ; BOSMAJIAN, G.: Analysis of flow through vegetation. In: *Journal of Hydraulics Division* 101 (1975), Nr. HY7, S. 871–884
- [Philippi 1990] PHILIPPI, G.: *Die Farn- und Blütenpflanzen Baden-Württembergs*. Band 2: Spezieller Teil (Spermatophyta). Stuttgart : Ulmer, 1990. – ISBN 978-3-8001-3323-9
- [Pretzsch 2000] PRETZSCH, H.: Die Regeln von Reineke, Yoda und das Gesetz der räumlichen Allometrie. In: *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 171 (2000), Nr. 11, S. 205–210
- [Pretzsch u. Mette 2008] PRETZSCH, H. ; METTE, T.: Linking stand-level self-thinning allometry to the tree-level leaf biomass allometry. In: *Trees* 22 (2008), S. 611–622
- [Raupach u. a. 1996] RAUPACH, M. R. ; FINNIGAN, J. ; BRUNET, Y.: Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing layer analogy. In: *Boundary-Layer Meteorology* 60 (1996), S. 375–395
- [Reineke 1933] REINEKE, L. H.: Perfecting a stand-density index for evenaged forests. In: *Journal of Agricultural Research* 46 (1933), Nr. 7, S. 627–638
- [Rodi 1984] RODI, W.: *Turbulence models and their application in hydraulics: a state-of-the art review*. 2. Aufl. Delft : International Association for Hydraulic Research, 1984. – ISBN 90-212-7002-1
- [Rominger u. Nepf 2011] ROMINGER, J. T. ; NEPF, H. M.: Flow adjustment and interior low associated with a rectangular porous obstruction. In: *Journal of Fluid Mechanics* 680 (2011), S. 636–659
- [Ruck u. Schmitt 1986] RUCK, B. ; SCHMITT, F.: Das Strömungsfeld der Einzelbaumumströmung. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105 (1986), Nr. 1, S. 178–196
- [Sand-Jensen 2008] SAND-JENSEN, K.: Drag and reconfiguration of freshwater macrophytes. In: *Freshwater Biology* 48 (2008), S. 271–283
- [Schiechtel 1990] SCHIECHTEL, Hugo M.: *Weiden in der Praxis: Die Weiden Mitteleuropas, ihre Verwendung und ihre Bestimmung*. Berlin : Patzer, 1990. – ISBN 978-3-87617-082-4
- [Schlichting u. a. 2006] SCHLICHTING, H. ; GERSTEN, Klaus ; KRAUSE, E. ; OERTEL, H. JR: *Grenzschicht-Theorie (German Edition)*. 10. Aufl. Dordrecht : Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-23004-5
- [Schneider 2010] SCHNEIDER, S.: *Widerstandsverhalten von Weiden und Hecken: Konzept zur Etablierung von Weichholzauen an Fließgewässern*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Diss., 2010
- [Schoneboom 2011] SCHONEBOOM, T.: *Widerstand flexibler Vegetation und Sohlenwiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern*. Braunschweig, TU Braunschweig, Diss., 2011

- [Shucksmith u. a. 2011] SHUCKSMITH, J. D. ; BOXALL, J. B. ; GUYMER, I.: Bulk flow resistance in vegetated channels: Analysis of momentum balance approaches based on data obtained in aging live vegetation. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 137 (2011), Nr. 12, S. 1624–1635
- [Sigloch 2003] SIGLOCH, Herbert: *Technische Fluidmechanik: Mit 61 Tabellen*. 4., bearb. Aufl. Berlin : Springer, 2003. – ISBN 3–540–00338–X
- [Stoesser u. a. 2010] STOESSER, T. ; KIM, S. J. ; DIPLAS, p.: Turbulent flow through idealized emergent vegetation. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 136 (2010), Nr. 12, S. 1003–1017
- [Stoesser u. a. 2009] STOESSER, T. ; PALAU-SALVADOR, G. ; RODI, W. ; DIPLAS, p.: Large eddy simulation of turbulent flow through submerged vegetation. In: *Transport in Porous Media* 78 (2009), Nr. 3, S. 347–365
- [Tanaka u. a. 2011] TANAKA, N. ; TAKENAKA, H. ; YAGISAWA, J. ; MORINAGA, T.: Estimation of drag coefficient of a real tree considering the vertical stand structure of trunk, branches, and leaves. In: *International Journal of River Basin Management* 9 (2011), Nr. 3-4, S. 221–230
- [Tanino u. Nepf 2008] TANINO, Y. ; NEPF, H. M.: Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 134 (2008), Nr. 1, S. 34–41
- [Thompson u. Roberson 1976] THOMPSON, G. T. ; ROBERSON, J. A.: A theory of flow resistance for vegetated channels. In: *Transactions of the ASCE* 19 (1976), Nr. 2, S. 288–293
- [Västilä u. a. 2011] VÄSTILÄ, K. ; JÄRVELÄ, J. ; ABERLE, J. ; SCHONEBOOM, T.: Vegetative drag in natural, foliated plant stands. In: 34TH IAHR CONGRESS (Hrsg.): *Proceedings*. 2011, S. 2978–2985
- [Vogel 1984] VOGEL, S.: Drag and flexibility in sessile organisms. In: *American Society of Zoologists* 24 (1984), S. 37–44
- [Vogel 1989] VOGEL, S.: Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds. In: *Journal of Experimental Botany* 40 (1989), Nr. 217, S. 941–948
- [Vollsinger u. a. 2005] VOLLSINGER, S. ; MITCHELL, S. J. ; BYRNE, K. E. ; NOVAK, M. D. ; RUDNICKI, M.: Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species. In: *Canadian Journal of Forest Research* 35 (2005), S. 1238–1249
- [Werth 1997] WERTH, D. E. JR.: *Predicting resistance and stability of vegetation in floodplains*. Logan, Utah, Utah State University, Diss., 1997
- [Wilson u. a. 2008] WILSON, C. A. M. E. ; HOYT, J. ; SCHNAUDER, I.: Impact of foliage on the drag force of vegetation in aquatic flows. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 134 (2008), Nr. 7, S. 885–891
- [Wilson u. a. 2003] WILSON, C. A. M. E. ; STOESSER, T. ; BATES, P. D. ; PINZEN, A. B.: Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 129 (2003), Nr. 11, S. 847–853
- [Wunder 2008] WUNDER, S.: *Aufbau eines Versuchsstandes zur Bestimmung der Strömungskraftverteilung bei Weiden*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 2008
- [Wunder u. a. 2009] WUNDER, S. ; LEHMANN, B. ; NESTMANN, F.: Measuring drag force of flexible vegetation directly: development of an experimental methodology. 2009, S. 1483–1489

- [Wunder u. a. 2011] WUNDER, S. ; LEHMANN, B. ; NESTMANN, F.: Determination of the drag coefficients of emergent and just submerged willows. In: *Journal of River Basin Management* 9 (2011), Nr. 3-4, S. 231–236
- [Wunder u. a. 2014] WUNDER, S. ; SEIDEL, F. ; NESTMANN, F.: Flow characteristics of turbulent flow through and around porous cylinders in comparison with shrubby vegetation. In: *Journal of Applied Water Engineering and Research, eingereicht* (2014)
- [Yoda u. a. 1963] YODA, K. ; KIRA, T. ; OGAWA, H. ; HOZUMI, K.: Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants XI). In: *Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University* 14 (1963), Nr. D, S. 107–129
- [Zinke 2010] ZINKE, P.: Flow resistance parameters for natural emergent vegetation derived from a porous media model. In: RIVER FLOW 2010 (Hrsg.): *Proceedings*. 2010, S. 461–468
- [Zinke 2012] ZINKE, P.: Application of a porous media approach for vegetation flow resistance. In: RIVER FLOW 2012 (Hrsg.): *Proceedings*. 2012, S. 301–308
- [Zong u. Nepf 2011] ZONG, L. ; NEPF, H.: Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel. In: *Journal of Fluid Mechanics* 691 (2011), S. 368–391

Anhang

A. Anhang

A.1. Matlab files

Matlab-Code zur Bestimmung des Flächenanteils der schwarzen Pixel der monochrome verarbeiteten Pflanzenbilder.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               %
%   Projektionsfläche bestimmen   %
%                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%
%Dateilisten einlesen

clear all
[dummy dateiname] = xlsread('ListeDateinamen','bmp');
[dummy dateiname1] = xlsread('ListeDateinamen','ohne_bmp');
clear dummy

%% Vegetationsfläche berechnen

for a=1:length(dateiname)
    %Bild einlesen
    P=imread(dateiname{a});
    %image(A) %shows picture

image(P) %shows picture

    %[b]=percentwhite(P)
    [w]=find(P(:,:,1)<1);
    Schwarz(a)=length(w)/prod(size(P(:,:,1)));
    Weiss(a)=1-Schwarz(a);

end
%% Speichern als excel-file
schwarz= Schwarz';
weiss= Weiss';
dateiname2='percentwhite_SW';

B= num2cell(schwarz);
C= num2cell(weiss);
A= [dateiname1, B, C];
%xlswrite('percentwhite_SW', A);
xlswrite(dateiname2,{'Name','schwarz','weiß'},'A1:C1')
xlswrite(dateiname2,A, 'A2:C6'); %hier muss C auf die Länge der Daten angepasst werden
%save (dateiname2,'schwarz','weiss')
```

Matlab-Code zur Bestimmung des Flächenschwerpunktes der projizierten Pflanzenfläche aus den monochrome verarbeiteten Pflanzenbildern.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      Schwerpunkt berechnen      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Datenlisten einlesen

clear all

[dummy dateiname] = xlsread('ListeDateinamen','bmp');
[dummy dateiname1] = xlsread('ListeDateinamen','ohne_bmp');
clear dummy

%% Berechnet Schwerpunkt
for a=1:length(dateiname)
    %Bild einlesen
    P=imread(dateiname{a});
    %image(A) %shows picture
    [i,j]=size(P); %i=zeilen j=spalten

% Schwerpunkt x-Richtung (horizontal)

    Breite=j/100; %normiert auf Rinnenbreite in cm bzw. =100 %
    %Anzahl schwarzer Pixel berechnen

    %Schwerpunkt berechnen x-Richtung
    for k=1:j
        A(k)=sum(P(:,k) == 0); %Summe schwarzer Pixel pro Spalte, Null = Schwarz
    end
    Summe_A=sum(A(1,:)); %Summe schwarzer Pixel gesamt (=Ai)
    for n=1:j
        Ai_xi(n)=(A(n)*n); %Summe (Ai*xi)/Summe (Ai)
    end
    Summe_Ai_xi=sum(Ai_xi(1,:));

    Schwerpunkt_x_pixel= Summe_Ai_xi/Summe_A;
    x_S_Prozent(a)=100/j*Schwerpunkt_x_pixel;
    Schwerpunkt_x_cm(a)= Schwerpunkt_x_pixel/Breite;
    clear A Summe_A Ai_xi Summe_Ai_x

% Schwerpunkt y-Richtung (vertikal)

    Hoehe=i/20; %normiert auf Rinnenhöhe in cm bzw. =100 %
    %Anzahl schwarzer Pixel berechnen
    %Schwerpunkt berechnen y-Richtung
    for kk=1:i
        AA(kk)=sum(P(kk,:) == 0); %Summe schwarzer Pixel pro Zeile
    end
    Summe_AA=sum(AA(1,:)); %Summe schwarzer Pixel gesamt
    for nn=1:i
        Ai_yi(nn)=(AA(nn)*nn);
    end
    Summe_Ai_yi=sum(Ai_yi(1,:));

    Schwerpunkt_y_pixel=Summe_Ai_yi/Summe_AA;
```

```

y_S_Prozent(a) = 100/i*Schwerpunkt_y_pixel; %KO-System-Nullpunkt oben links
Schwerpunkt_y_cm(a)= Schwerpunkt_y_pixel/Hoehe; % Koordinatensystem beginnt oben
clear AA Summe_AA Ai_yi Summe_Ai_yi
end

%% Speichern als excel-file

Schwerpunkt_x_cm= Schwerpunkt_x_cm';
Schwerpunkt_y_cm= Schwerpunkt_y_cm';
dateiname2='schwerpunkt_xy_SW';
B= num2cell(Schwerpunkt_x_cm);
C= num2cell(Schwerpunkt_y_cm);
A= [dateiname1, B, C];
%xlswrite('schwerpunkt_xy_SW', A);
xlswrite(dateiname2, {'Name', 'Schwerpunkt x', 'Schwerpunkt y'}, 'A1:C1')
xlswrite(dateiname2,A, 'A2:C6'); %hier muss C auf die Länge der Daten angepasst werden
%save (dateiname2, 'Schwerpunkt_x_cm', 'Schwerpunkt_y_cm')

```

A.2. Untersuchungsergebnisse

A.2.1. Widerstandskraft und Widerstandsbeiwerte

Tabelle A.1.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten durchströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.10	0.056	1.42	25.37	0.53	119500	2390
0.41	0.17	0.056	2.72	48.69	0.58	62831	3142
0.49	0.24	0.056	3.88	69.49	0.58	75508	3775
0.59	0.34	0.056	4.91	87.95	0.51	90185	4509
0.70	0.49	0.056	6.33	113.40	0.46	108015	5401
0.29	0.08	0.166	4.34	26.14	0.62	78077	2231
0.40	0.16	0.166	6.51	39.26	0.50	106436	3041
0.48	0.23	0.166	9.56	57.64	0.51	128348	3667
0.58	0.33	0.066	3.72	56.43	0.34	155628	4447
0.64	0.41	0.066	4.83	73.32	0.36	171864	4910
0.28	0.08	0.123	2.11	17.16	0.42	109305	2186
0.38	0.15	0.123	2.96	24.07	0.33	146563	2931
0.48	0.23	0.123	3.86	31.38	0.27	184888	3698
0.57	0.33	0.123	4.85	39.44	0.24	221092	4422

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.10	0.06	1.42	25.37	0.53	119500	2390
0.41	0.17	0.06	2.72	48.69	0.58	62831	3142
0.49	0.24	0.06	3.88	69.49	0.58	75508	3775
0.59	0.34	0.06	4.91	87.95	0.51	90185	4509
0.70	0.49	0.06	6.33	113.40	0.46	108015	5401
0.29	0.08	0.17	4.34	26.14	0.62	78077	2231
0.40	0.16	0.17	6.51	39.26	0.50	106436	3041
0.48	0.23	0.17	9.56	57.64	0.51	128348	3667
0.58	0.33	0.07	3.72	56.43	0.34	155628	4447
0.64	0.41	0.07	4.83	73.32	0.36	171864	4910
0.28	0.08	0.12	2.11	17.16	0.42	109305	2186
0.38	0.15	0.12	2.96	24.07	0.33	146563	2931
0.48	0.23	0.12	3.86	31.38	0.27	184888	3698
0.57	0.33	0.12	4.85	39.44	0.24	221092	4422

Tabelle A.2.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten überströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.34	0.12	0.015	0.97	65.29	1.12	52446	2622
0.42	0.17	0.014	0.84	60.99	0.70	64277	3214
0.51	0.26	0.012	0.92	74.60	0.57	78815	3941
0.61	0.37	0.013	2.39	179.08	0.96	94077	4704
0.70	0.49	0.013	3.02	225.72	0.92	107708	5385
0.30	0.09	0.045	1.82	40.09	0.89	80874	2311
0.41	0.17	0.039	3.19	81.30	0.97	110321	3152
0.47	0.22	0.046	4.87	105.21	0.94	127556	3644
0.58	0.34	0.015	1.85	125.36	0.75	155860	4453
0.64	0.41	0.014	2.36	165.92	0.80	172957	4942
0.29	0.08	0.036	1.11	30.63	0.74	110422	2208
0.39	0.15	0.031	2.01	65.42	0.86	149814	2996
0.49	0.24	0.026	2.48	94.61	0.79	187940	3759
0.58	0.33	0.028	3.45	122.12	0.74	221551	4431

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.34	0.12	0.030	0.97	32.50	0.56	131115	2622
0.42	0.17	0.030	0.84	28.23	0.32	64277	3214
0.51	0.26	0.030	0.92	30.91	0.24	78815	3941
0.61	0.37	0.030	2.39	80.46	0.43	94077	4704
0.70	0.49	0.030	3.02	101.34	0.41	107708	5385
0.30	0.09	0.095	1.82	19.22	0.43	80874	2311
0.41	0.17	0.095	3.19	33.72	0.40	110321	3152
0.47	0.22	0.095	4.87	51.46	0.46	127556	3644
0.58	0.34	0.044	1.85	42.33	0.25	155860	4453
0.64	0.41	0.044	2.36	54.01	0.26	172957	4942
0.29	0.08	0.104	1.11	10.71	0.26	110422	2208
0.39	0.15	0.104	2.01	19.34	0.25	149814	2996
0.49	0.24	0.104	2.48	23.85	0.20	187940	3759
0.58	0.33	0.104	3.45	33.18	0.20	221551	4431

Tabelle A.3.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten durchströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.09	0.003	0.35	116.25	2.47	47215	2361
0.43	0.18	0.003	0.66	252.07	2.78	65462	3273
0.50	0.25	0.002	2.21	960.64	7.82	76277	3814
0.62	0.38	0.002	2.48	1211.18	6.35	95000	4750
0.71	0.51	0.003	3.14	1087.47	4.30	109385	5469
0.33	0.11	0.014	0.79	55.63	0.99	90177	2576
0.40	0.16	0.008	1.80	237.64	2.92	108590	3103
0.51	0.26	0.006	3.45	569.15	4.44	136247	3893
0.31	0.09	0.032	0.76	23.44	0.50	118109	2362
0.40	0.16	0.034	1.44	41.90	0.53	152843	3057
0.52	0.27	0.031	2.96	96.65	0.72	199538	3991
0.62	0.39	0.030	4.03	135.33	0.69	240154	4803
v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.09	0.006	0.35	56.67	1.20	118038	2361
0.43	0.18	0.006	0.66	106.11	1.17	65462	3273
0.50	0.25	0.006	2.21	354.51	2.88	76277	3814
0.62	0.38	0.006	2.48	397.58	2.09	95000	4750
0.71	0.51	0.006	3.14	503.46	1.99	109385	5469
0.33	0.11	0.007	0.79	109.49	1.95	90177	2576
0.40	0.16	0.006	1.80	287.63	3.54	108590	3103
0.51	0.26	0.006	3.45	550.37	4.30	136247	3893
0.31	0.09	0.034	0.76	22.66	0.48	118109	2362
0.40	0.16	0.034	1.44	42.87	0.54	152843	3057
0.52	0.27	0.034	2.96	88.29	0.66	199538	3991
0.62	0.39	0.034	4.03	120.18	0.62	240154	4803

Tabelle A.4.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten überströmten Silberweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.33	0.11	0.008	0.07	9.18	0.17	51292	2565
0.41	0.17	0.006	0.35	56.23	0.65	63800	3190
0.51	0.26	0.006	1.10	174.42	1.35	78185	3909
0.60	0.36	0.006	1.98	314.22	1.75	92169	4608
0.71	0.50	0.006	2.75	436.03	1.75	108508	5425
0.31	0.09	0.014	0.91	65.17	1.40	82115	2346
0.40	0.16	0.014	1.42	103.36	1.30	107423	3069
0.50	0.25	0.012	1.36	116.70	0.92	135603	3874
0.32	0.10	0.036	0.68	19.10	0.37	122910	2458
0.42	0.17	0.037	1.19	32.15	0.37	160615	3212
0.53	0.28	0.031	2.27	74.43	0.53	203846	4077
0.63	0.40	0.024	2.59	109.98	0.55	243429	4869
v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.33	0.11	0.007	0.07	10.41	0.19	128231	2565
0.41	0.17	0.007	0.35	50.98	0.59	63800	3190
0.51	0.26	0.007	1.10	158.15	1.22	78185	3909
0.60	0.36	0.007	1.98	284.90	1.59	92169	4608
0.71	0.50	0.007	2.75	395.35	1.59	108508	5425
0.31	0.09	0.013	0.91	68.55	1.47	82115	2346
0.40	0.16	0.013	1.42	107.23	1.35	107423	3069
0.50	0.25	0.013	1.36	102.39	0.81	135603	3874
0.32	0.10	0.035	0.68	19.46	0.38	122910	2458
0.42	0.17	0.035	1.19	34.01	0.39	160615	3212
0.53	0.28	0.035	2.27	65.23	0.46	203846	4077
0.63	0.40	0.035	2.59	74.44	0.37	243429	4869

Tabelle A.5.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten durchströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.09	0.025	0.99	39.69	0.84	47262	2363
0.41	0.16	0.026	2.15	82.31	1.00	62323	3116
0.51	0.26	0.026	3.29	129.01	0.98	79108	3955
0.61	0.37	0.022	4.18	188.99	1.02	93523	4676
0.69	0.48	0.022	5.23	234.63	0.98	106277	5314
0.31	0.09	0.052	2.42	46.33	0.99	82280	2351
0.40	0.16	0.052	4.45	85.30	1.05	108470	3099
0.47	0.22	0.048	6.34	132.42	1.19	126942	3627
0.57	0.32	0.020	3.12	152.95	0.95	152801	4366
0.63	0.39	0.019	3.76	196.56	1.01	168269	4808
0.57	0.33	0.046	7.91	172.11	1.05	220596	4412

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.09	0.046	0.99	21.57	0.46	118154	2363
0.41	0.16	0.046	2.15	46.64	0.57	62323	3116
0.51	0.26	0.046	3.29	71.53	0.54	79108	3955
0.61	0.37	0.046	4.18	90.81	0.49	93523	4676
0.69	0.48	0.046	5.23	113.45	0.48	106277	5314
0.31	0.09	0.084	2.42	28.71	0.61	82280	2351
0.40	0.16	0.084	4.45	52.65	0.65	108470	3099
0.47	0.22	0.084	6.34	75.04	0.68	126942	3627
0.57	0.32	0.061	3.12	50.88	0.32	152801	4366
0.63	0.39	0.061	3.76	61.32	0.31	168269	4808

Tabelle A.6.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten überströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.32	0.10	0.019	0.55	29.62	0.58	48985	2449
0.42	0.18	0.017	1.04	60.18	0.68	64600	3230
0.48	0.23	0.016	2.45	156.95	1.38	73385	3669
0.60	0.36	0.015	2.74	187.60	1.05	92000	4600
0.69	0.48	0.015	3.71	241.55	1.00	106708	5335
0.30	0.09	0.044	3.12	70.68	1.60	80066	2288
0.39	0.15	0.046	4.40	96.34	1.25	105598	3017
0.48	0.23	0.037	5.73	154.55	1.36	128408	3669
		0.000					
		0.000					
0.28	0.08	0.045	1.85	40.87	1.02	109069	2181
0.38	0.14	0.041	2.59	63.24	0.88	145695	2914
0.48	0.23	0.035	3.59	102.78	0.90	183983	3680
0.57	0.33	0.032	4.44	138.42	0.85	219901	4398

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.32	0.10	0.038	0.55	14.56	0.29	122462	2449
0.42	0.18	0.038	1.04	27.64	0.31	64600	3230
0.48	0.23	0.038	2.45	64.84	0.57	73385	3669
0.60	0.36	0.038	2.74	72.63	0.41	92000	4600
0.69	0.48	0.038	3.71	98.08	0.41	106708	5335
0.30	0.09	0.093	3.12	33.61	0.76	80066	2288
0.39	0.15	0.093	4.40	47.34	0.62	105598	3017
0.48	0.23	0.093	5.73	61.65	0.54	128408	3669
		0.000					
		0.000					
0.28	0.08	0.103	1.85	17.86	0.44	109069	2181
0.38	0.14	0.103	2.59	25.04	0.35	145695	2914
0.48	0.23	0.103	3.59	34.65	0.30	183983	3680
0.57	0.33	0.103	4.44	42.93	0.26	219901	4398

Tabelle A.7.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten durchströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.10	0.010	0.29	30.25	0.61	48427	2421
0.42	0.18	0.009	0.78	83.09	0.94	64547	3227
0.51	0.26	0.010	1.36	130.51	1.01	78308	3915
0.59	0.35	0.010	2.43	240.10	1.36	91508	4575
0.70	0.50	0.010	3.43	355.32	1.43	108338	5417
0.28	0.08	0.021	1.06	50.17	1.25	76402	2183
0.37	0.14	0.022	1.97	91.07	1.30	100722	2878
0.48	0.23	0.019	3.78	200.73	1.71	130355	3724
0.65	0.42	0.018	2.62	148.95	0.71	174683	4991
0.75	0.56	0.018	2.87	159.71	0.57	201765	5765
0.32	0.10	0.011	0.71	64.21	1.25	123397	2468
0.43	0.18	0.025	1.21	49.15	0.54	163880	3278
0.53	0.28	0.024	2.90	122.31	0.87	203846	4077
0.63	0.40	0.025	3.97	157.88	0.79	243077	4862

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.31	0.10	0.014	0.29	21.08	0.43	121068	2421
0.42	0.18	0.014	0.78	55.90	0.64	64547	3227
0.51	0.26	0.014	1.36	97.80	0.76	78308	3915
0.59	0.35	0.014	2.43	175.07	0.99	91508	4575
0.70	0.50	0.014	3.43	247.34	1.00	108338	5417
0.28	0.08	0.025	1.06	42.45	1.05	76402	2183
0.37	0.14	0.025	1.97	78.87	1.13	100722	2878
0.48	0.23	0.025	3.78	151.26	1.29	130355	3724
0.65	0.42	0.035	2.62	75.35	0.36	174683	4991
0.75	0.56	0.035	2.87	82.62	0.29	201765	5765
0.32	0.10	0.023	0.71	30.41	0.59	123397	2468
0.43	0.18	0.023	1.21	51.51	0.57	163880	3278
0.53	0.28	0.023	2.90	123.79	0.88	203846	4077
0.63	0.40	0.023	3.97	169.40	0.85	243077	4862

Tabelle A.8.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten überströmten Purpurweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.30	0.09	0.010	0.41	38.98	0.85	46462	2323
0.41	0.17	0.010	0.92	91.27	1.08	63385	3169
0.49	0.24	0.010	1.29	131.01	1.11	74631	3732
0.60	0.36	0.010	2.74	281.05	1.56	92369	4618
0.69	0.48	0.010	3.73	385.04	1.61	106369	5318
0.31	0.10	0.013	0.37	28.04	0.59	83207	2377
0.42	0.18	0.014	0.86	62.66	0.70	113795	3251
0.51	0.26	0.013	1.65	122.14	0.94	137339	3924
0.65	0.42	0.013	1.71	127.82	0.61	174367	4982
0.31	0.10	0.027	0.64	24.06	0.50	118750	2375
0.43	0.18	0.023	1.15	49.35	0.54	164381	3288
0.51	0.26	0.019	2.26	118.82	0.91	196462	3929

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.30	0.09	0.012	0.41	33.98	0.75	116154	2323
0.41	0.17	0.012	0.92	77.12	0.91	63385	3169
0.49	0.24	0.012	1.29	107.38	0.91	74631	3732
0.60	0.36	0.012	2.74	228.70	1.27	92369	4618
0.69	0.48	0.012	3.73	311.51	1.30	106369	5318
0.31	0.10	0.015	0.37	24.25	0.51	83207	2377
0.42	0.18	0.015	0.86	56.43	0.63	113795	3251
0.51	0.26	0.015	1.65	108.18	0.83	137339	3924
0.65	0.42	0.032	1.71	54.14	0.26	174367	4982
0.31	0.10	0.035	0.64	18.42	0.39	118750	2375
0.43	0.18	0.035	1.15	33.12	0.36	164381	3288
0.51	0.26	0.035	2.26	65.06	0.50	196462	3929
0.64	0.40	0.035	2.46	70.80	0.35	244615	4892

Tabelle A.9.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten durchströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
		0.021					
0.29	0.08	0.034	1.01	29.69	0.73	43974	2199
0.51	0.26	0.029	2.79	95.24	0.74	78292	3915
0.59	0.35	0.032	3.94	123.01	0.70	91338	4567
0.69	0.47	0.033	4.85	146.89	0.63	105446	5272
0.32	0.10	0.093	2.82	30.23	0.61	84903	2426
0.40	0.16	0.076	4.13	54.48	0.69	106805	3052
0.48	0.23	0.068	5.75	84.45	0.72	130102	3717
0.58	0.33	0.017	1.83	110.94	0.66	155750	4450
		0.017					
0.28	0.08	0.056	2.57	45.56	1.16	107577	2152
0.39	0.15	0.047	2.42	51.22	0.68	148821	2976
		0.004					
0.57	0.33	0.041	4.37	106.27	0.64	221077	4422

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
		0.055					
0.29	0.08	0.055	1.01	18.49	0.45	43974	2199
0.51	0.26	0.055	2.79	51.04	0.39	78292	3915
0.59	0.35	0.055	3.94	72.05	0.41	91338	4567
0.69	0.47	0.055	4.85	88.57	0.38	105446	5272
0.32	0.10	0.131	2.82	21.59	0.43	84903	2426
0.40	0.16	0.131	4.13	31.59	0.40	106805	3052
0.48	0.23	0.131	5.75	43.98	0.38	130102	3717
0.58	0.33	0.063	1.83	29.18	0.17	155750	4450
		0.063					
0.28	0.08	0.114	2.57	22.63	0.58	107577	2152
0.39	0.15	0.114	2.42	21.27	0.28	148821	2976
0.48	0.23	0.114	3.25	28.60	0.24	186103	3722
0.57	0.33	0.114	4.37	38.43	0.23	221077	4422

Tabelle A.10.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die belaubten überströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.32	0.11	0.032	0.86	26.62	0.51	49923	2496
0.41	0.17	0.034	1.33	39.51	0.46	63785	3189
0.51	0.26	0.028	2.49	87.78	0.68	78277	3914
0.60	0.36	0.028	3.49	122.46	0.69	91985	4599
0.69	0.47	0.032	4.48	138.07	0.58	106015	5301
0.31	0.09	0.048	1.16	23.97	0.51	82295	2351
0.40	0.16	0.048	2.63	55.14	0.68	108186	3091
0.47	0.22	0.045	4.08	91.25	0.82	127212	3635
0.58	0.34	0.018	1.58	88.85	0.52	157179	4491
0.68	0.46	0.019	2.12	110.53	0.48	181902	5197
0.29	0.08	0.037	1.20	32.66	0.80	110186	2204
0.38	0.15	0.033	2.20	66.28	0.91	147055	2941
0.48	0.23	0.029	2.74	93.76	0.82	184387	3688
0.58	0.33	0.028	3.49	124.11	0.74	222416	4448

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.32	0.11	0.045	0.86	19.10	0.36	124808	2496
0.41	0.17	0.045	1.33	29.57	0.34	63785	3189
0.51	0.26	0.045	2.49	55.25	0.43	78277	3914
0.60	0.36	0.045	3.49	77.46	0.43	91985	4599
0.69	0.47	0.045	4.48	99.34	0.42	106015	5301
0.31	0.09	0.107	1.16	10.78	0.23	82295	2351
0.40	0.16	0.107	2.63	24.53	0.30	108186	3091
0.47	0.22	0.107	4.08	38.02	0.34	127212	3635
0.58	0.34	0.062	1.58	25.40	0.15	157179	4491
0.68	0.46	0.062	2.12	34.21	0.15	181902	5197
0.29	0.08	0.103	1.20	11.67	0.28	110186	2204
0.38	0.15	0.103	2.20	21.41	0.29	147055	2941
0.48	0.23	0.103	2.74	26.68	0.23	184387	3688
0.58	0.33	0.103	3.49	34.05	0.20	222416	4448

Tabelle A.11.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten durchströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.30	0.09	0.008	0.31	39.07	0.86	46267	2313
0.40	0.16	0.008	0.63	76.66	0.96	61630	3081
0.50	0.25	0.009	1.12	131.01	1.04	77142	3857
0.60	0.36	0.009	1.91	223.31	1.24	92294	4615
0.69	0.48	0.009	2.53	296.11	1.23	106615	5331
0.30	0.09	0.018	0.65	36.17	0.80	80738	2307
0.40	0.16	0.014	1.51	105.72	1.35	106517	3043
0.50	0.25	0.019	3.01	161.33	1.30	134010	3829
0.64	0.41	0.004	1.72	402.76	1.95	172941	4941
0.74	0.55	0.004	2.61	600.64	2.17	200498	5729
0.32	0.10	0.007	0.73	110.10	2.15	123231	2465
0.42	0.18	0.007	1.34	186.25	2.08	162615	3252
0.53	0.28	0.005	2.69	525.87	3.80	202404	4048
0.63	0.40	0.002	3.26	1362.76	6.89	241987	4840

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.30	0.09	0.007	0.31	44.83	0.99	115668	2313
0.40	0.16	0.007	0.63	91.01	1.13	61630	3081
0.50	0.25	0.007	1.12	160.75	1.28	77142	3857
0.60	0.36	0.007	1.91	274.55	1.53	92294	4615
0.69	0.48	0.007	2.53	364.37	1.52	106615	5331
0.30	0.09	0.017	0.65	37.56	0.84	80738	2307
0.40	0.16	0.017	1.51	87.78	1.12	106517	3043
0.50	0.25	0.017	3.01	174.60	1.41	134010	3829
0.64	0.41	0.004	1.72	405.54	1.97	172941	4941
0.74	0.55	0.004	2.61	613.83	2.21	200498	5729
0.32	0.10	0.007	0.73	108.99	2.12	123231	2465
0.42	0.18	0.007	1.34	199.96	2.24	162615	3252
0.53	0.28	0.007	2.69	402.02	2.90	202404	4048
0.63	0.40	0.007	3.26	487.52	2.46	241987	4840

Tabelle A.12.: Übersicht der gemessenen Messdaten für die unbelaubten überströmten Korbweiden, berechnet mit belasteter Vegetationsfläche (oben) und mit unbelasteter Vegetationsfläche (unten)

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_p [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.30	0.09	0.011	0.21	19.47	0.43	46154	2308
0.40	0.16	0.009	0.58	66.62	0.82	62138	3107
0.47	0.22	0.009	1.38	148.58	1.32	72969	3648
0.60	0.36	0.008	1.74	212.71	1.19	92077	4604
0.70	0.49	0.008	2.29	281.49	1.15	107754	5388
0.26	0.07	0.017	0.37	21.51	0.64	70030	2001
0.31	0.10	0.018	0.71	39.80	0.82	83985	2400
0.37	0.14	0.018	0.86	47.19	0.69	99271	2836
0.65	0.42	0.013	1.05	78.33	0.37	175158	5005
0.32	0.10	0.027	0.52	19.36	0.39	121237	2425
0.42	0.18	0.023	1.04	44.42	0.49	163231	3265
0.53	0.29	0.019	2.05	107.77	0.75	205609	4112

v [m/s]	v^2 [m ² /s ²]	A_0 [m ²]	F_d [N]	F_d/A_p [N/m ²]	c_d [-]	Re [-]	Re_s [-]
0.30	0.09	0.007	0.21	28.74	0.64	115385	2308
0.40	0.16	0.007	0.58	81.90	1.00	62138	3107
0.47	0.22	0.007	1.38	193.00	1.72	72969	3648
0.60	0.36	0.007	1.74	243.84	1.36	92077	4604
0.70	0.49	0.007	2.29	321.16	1.31	107754	5388
0.26	0.07	0.021	0.37	17.82	0.53	70030	2001
0.31	0.10	0.021	0.71	33.94	0.70	83985	2400
0.37	0.14	0.021	0.86	41.13	0.61	99271	2836
0.65	0.42	0.019	1.05	55.30	0.26	175158	5005
0.32	0.10	0.035	0.52	14.82	0.30	121237	2425
0.42	0.18	0.035	1.04	29.82	0.33	163231	3265
0.53	0.29	0.035	2.05	59.01	0.41	205609	4112

A.2.2. Isotachendiagramme der gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen

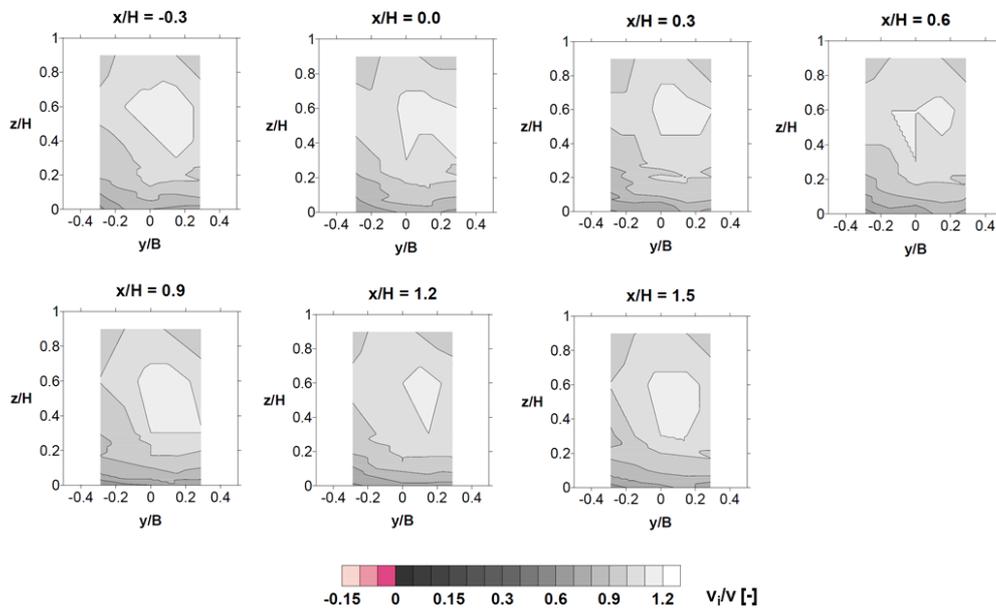


Abbildung A.1.: Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung der unbesetzten Rinne bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

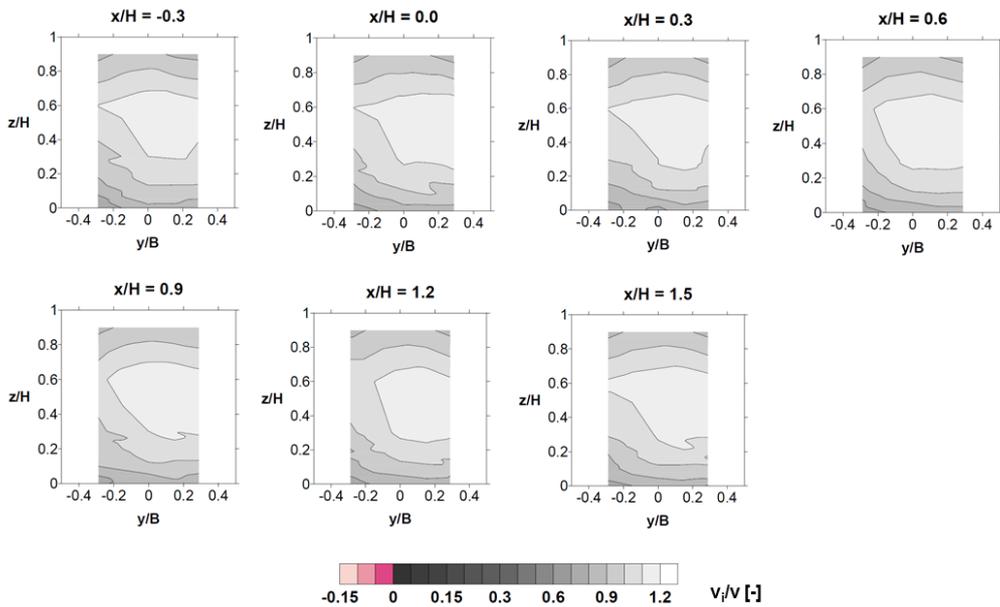


Abbildung A.2.: Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung der unbesetzten Rinne bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$.

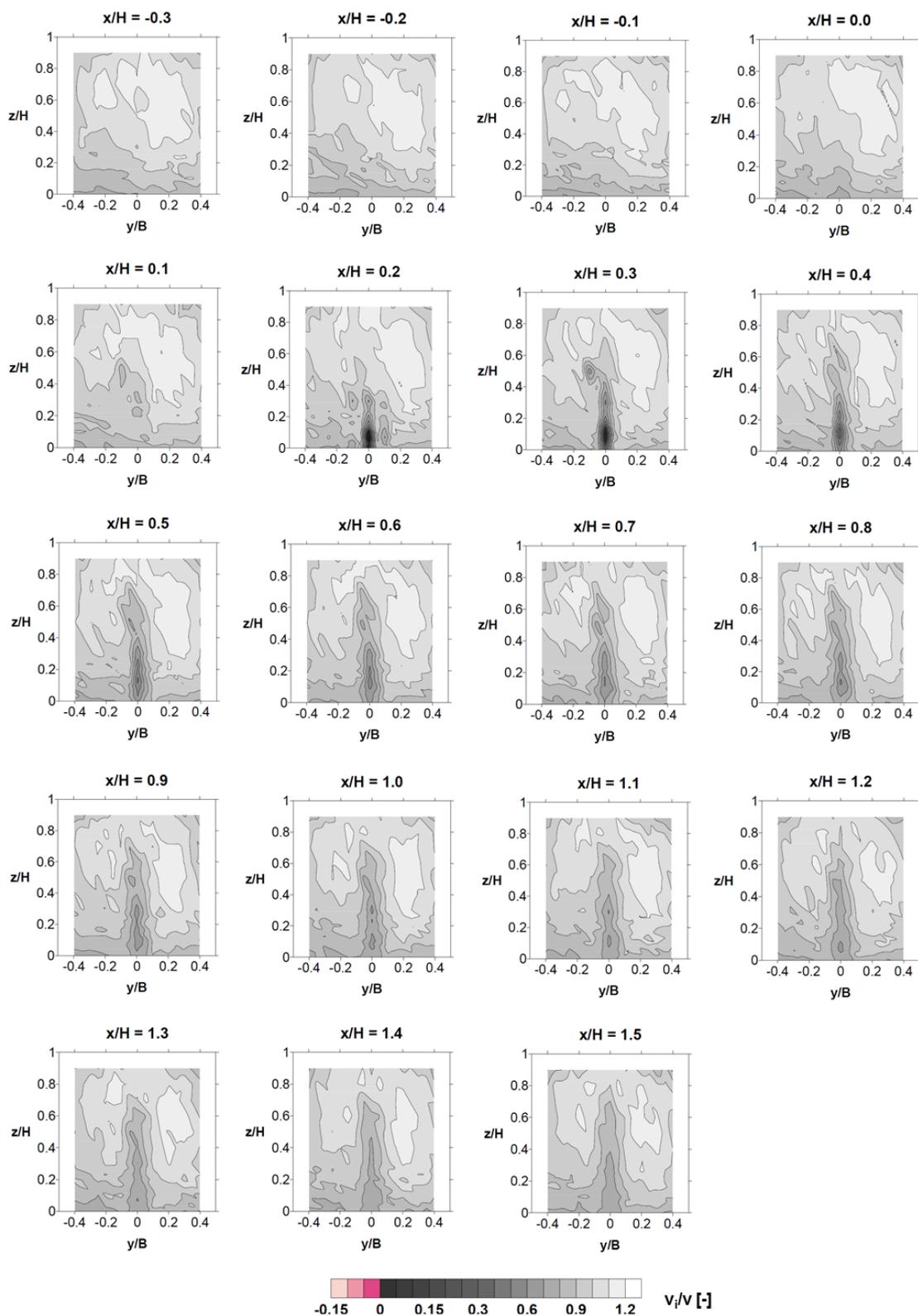


Abbildung A.3.: Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine unbelaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

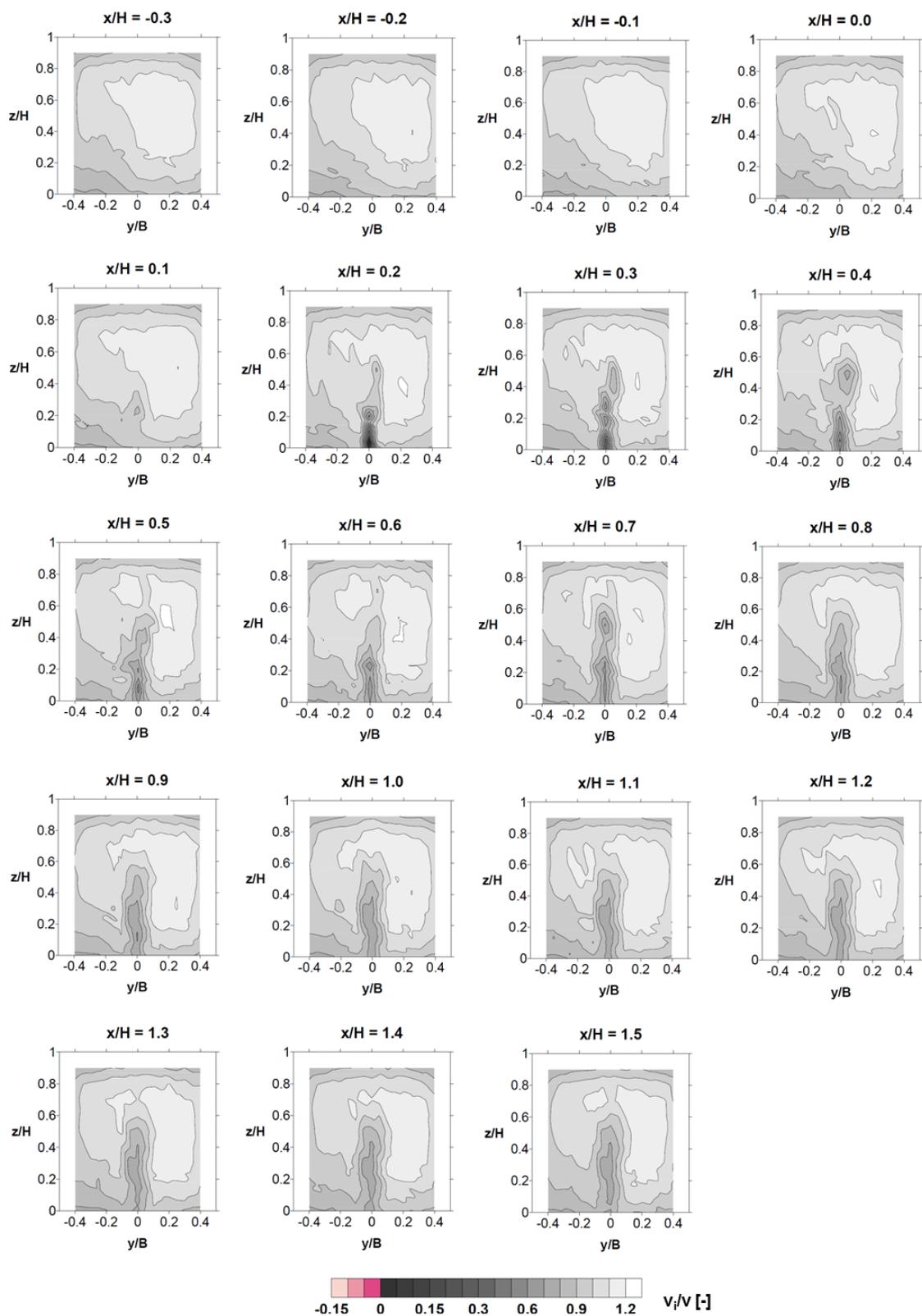


Abbildung A.4.: Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine unbelaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$.

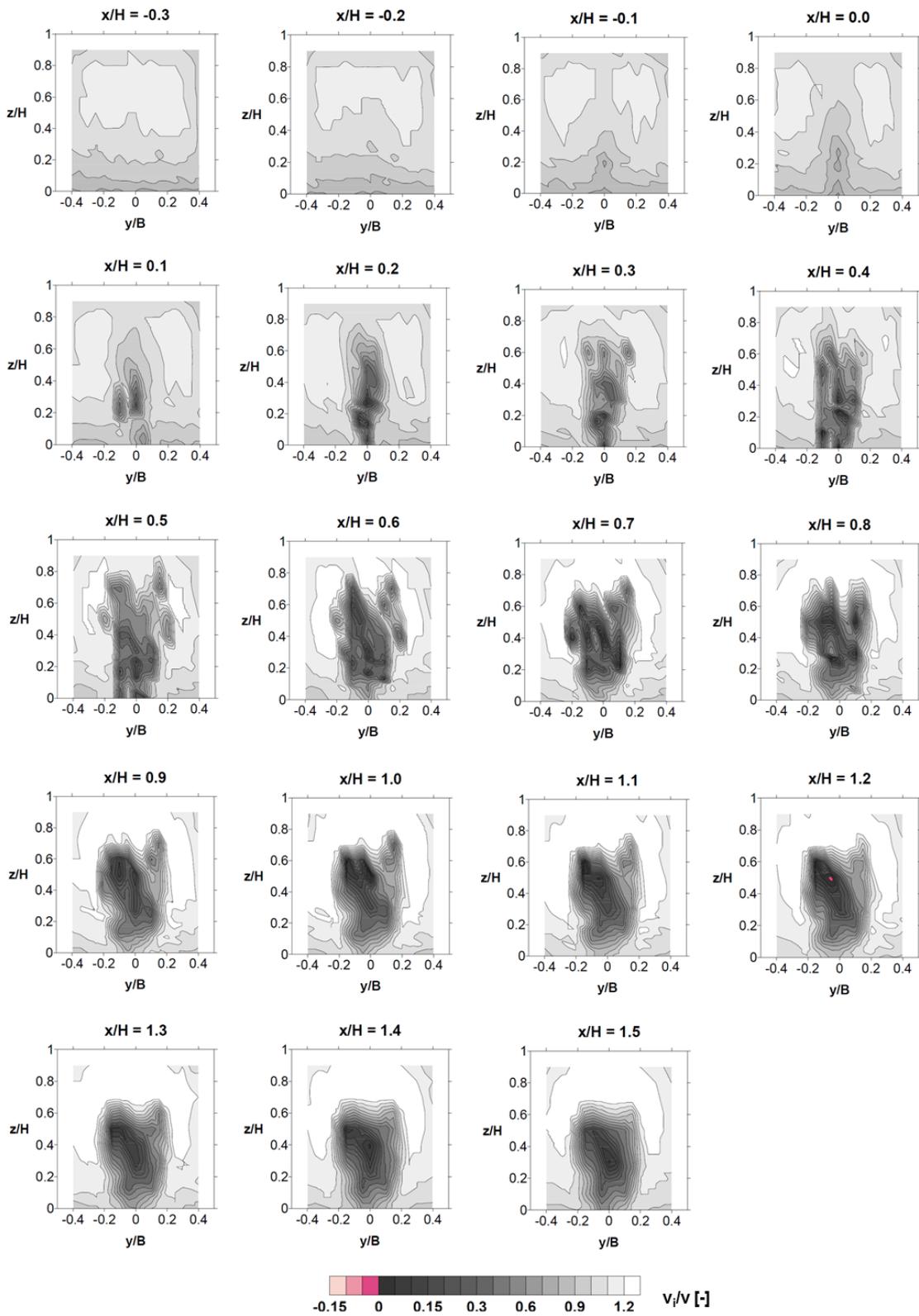


Abbildung A.5.: Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

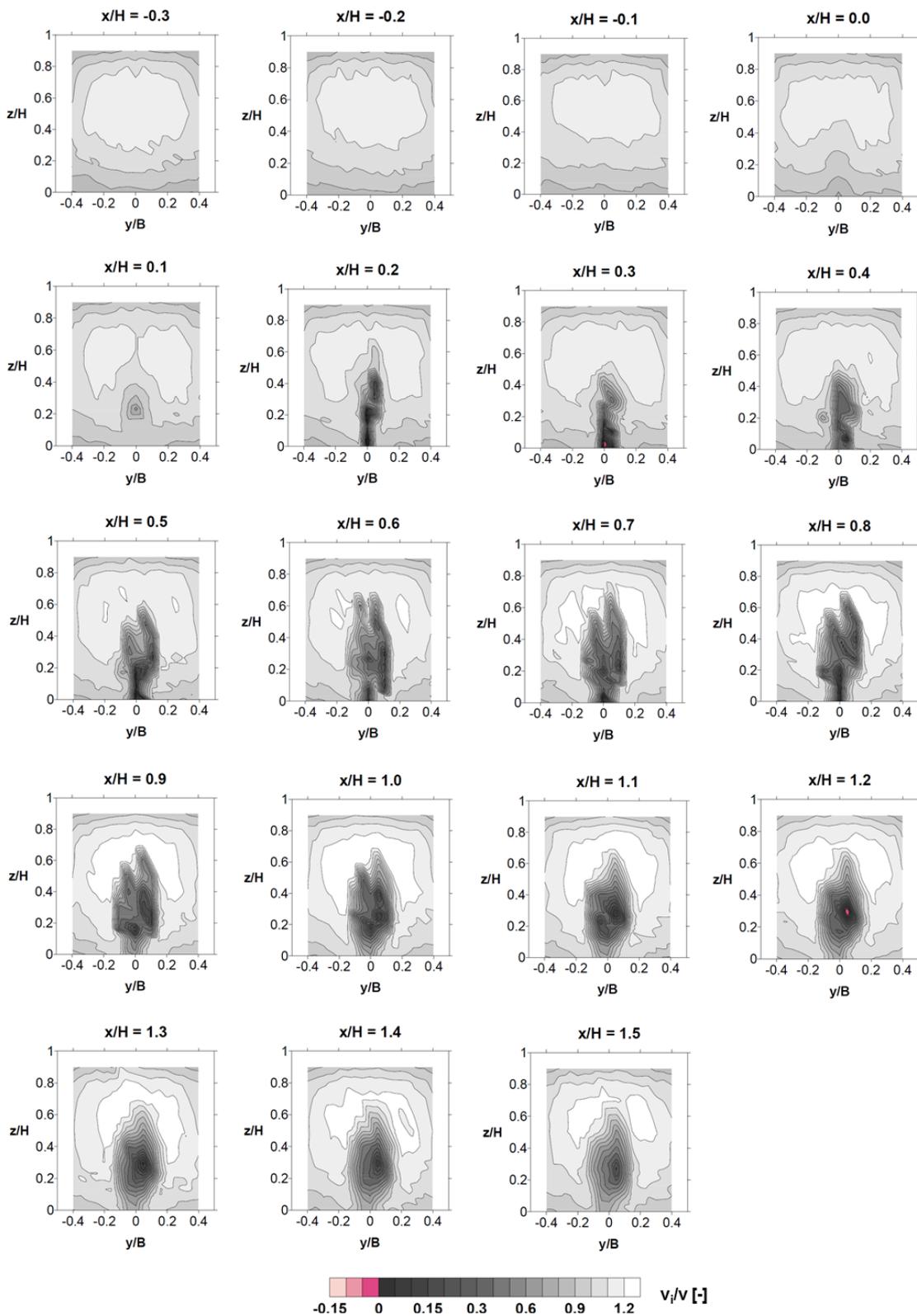


Abbildung A.6.: Isotachendiagramme der Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$.

A.2.3. Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilungen

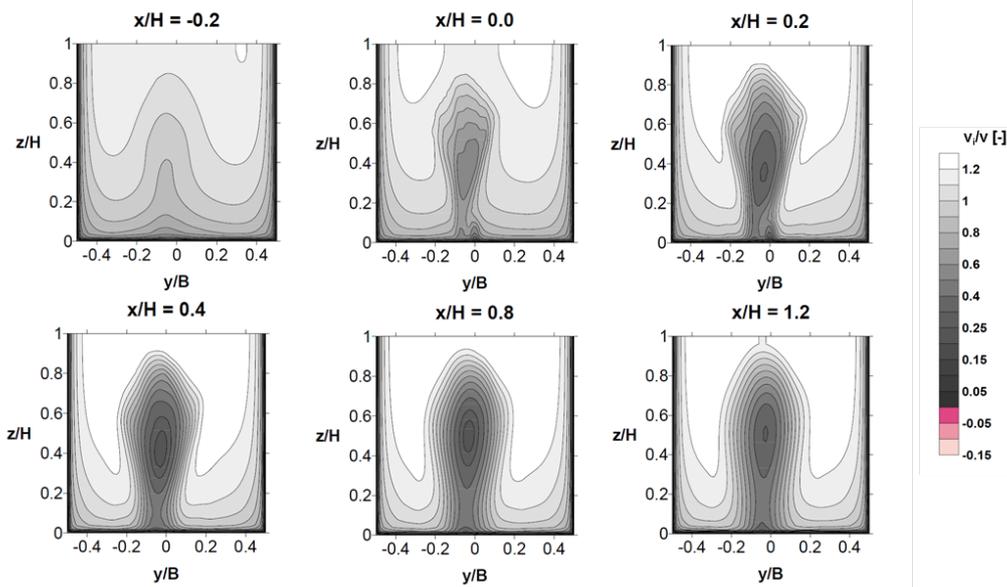


Abbildung A.7.: Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,15 \text{ m/s}$.

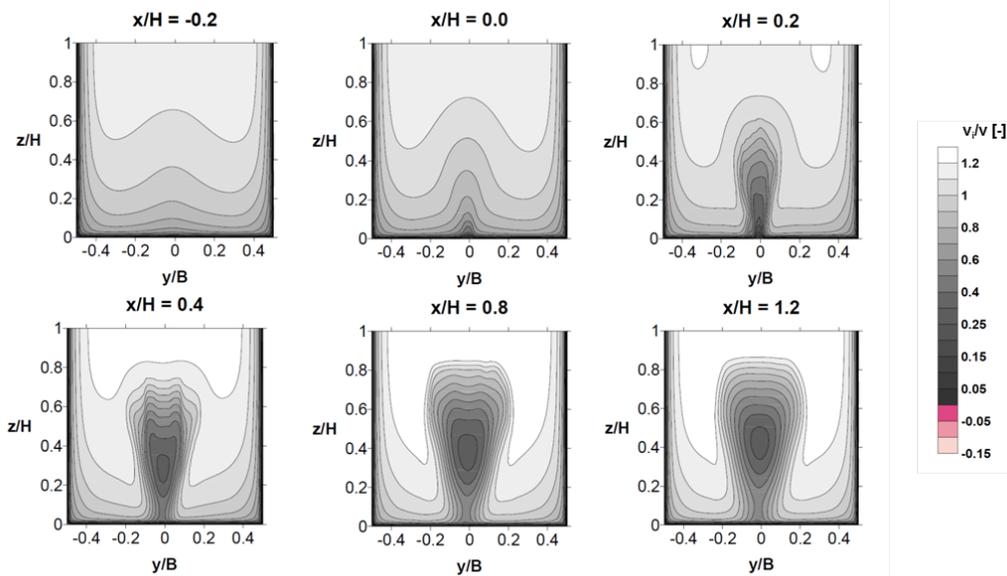


Abbildung A.8.: Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,3 \text{ m/s}$.

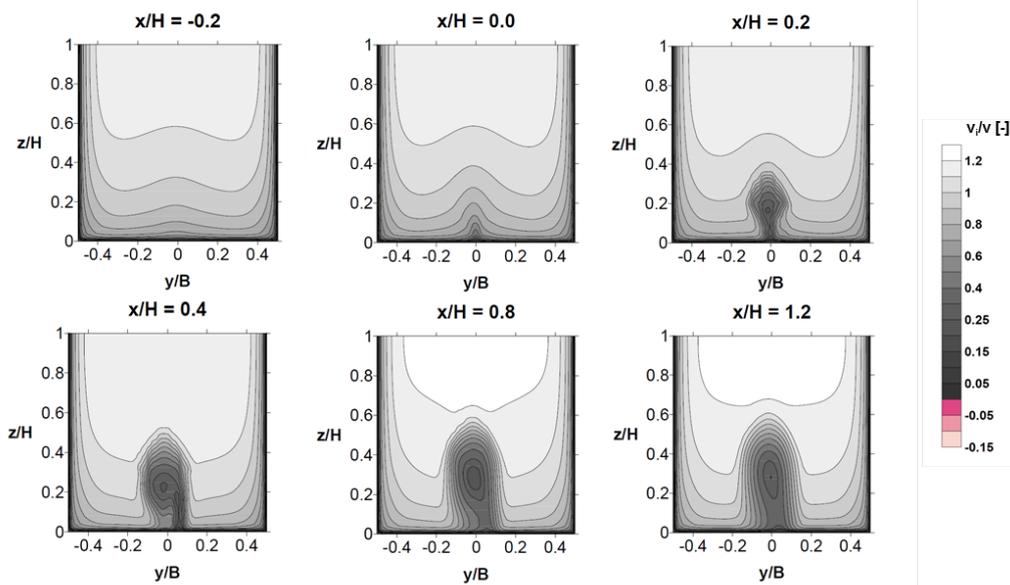


Abbildung A.9.: Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,45 \text{ m/s}$.

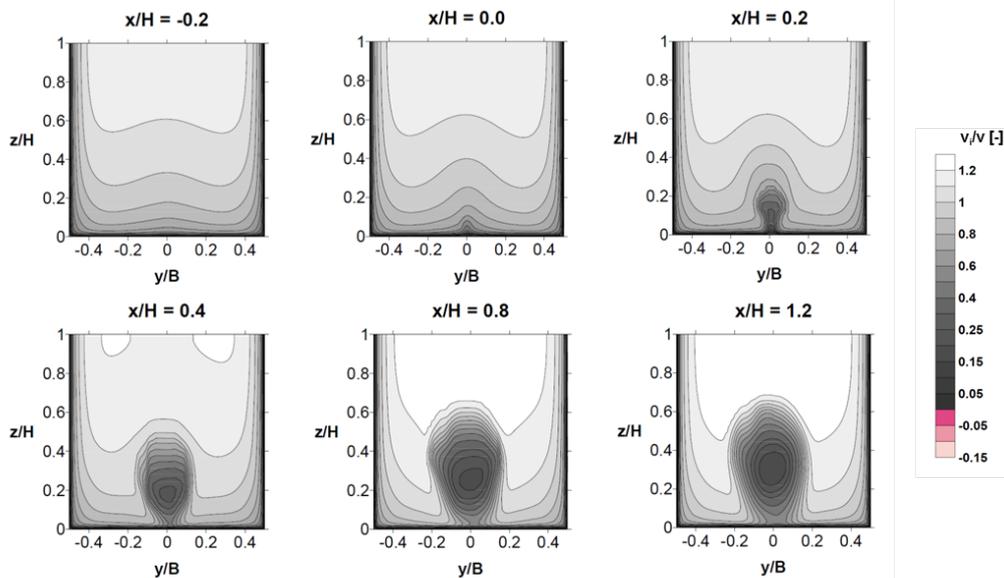


Abbildung A.10.: Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,6 \text{ m/s}$.

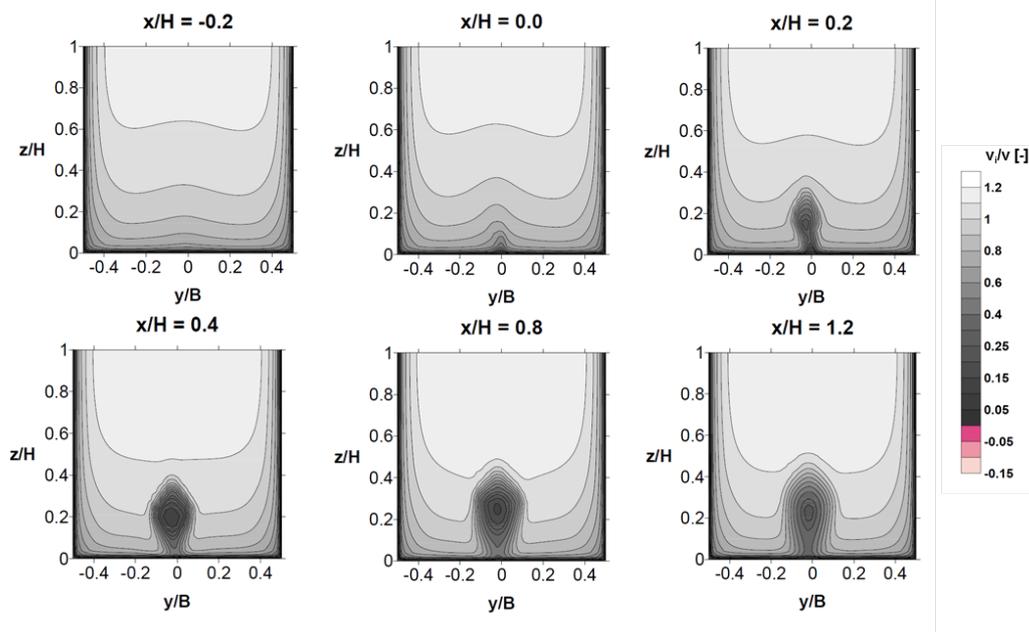


Abbildung A.11.: Isotachendiagramme der gerechneten Geschwindigkeitsverteilung um eine belaubte Einzelpflanze bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v = 0,75 \text{ m/s}$.

A.2.4. Poröse Durchströmung

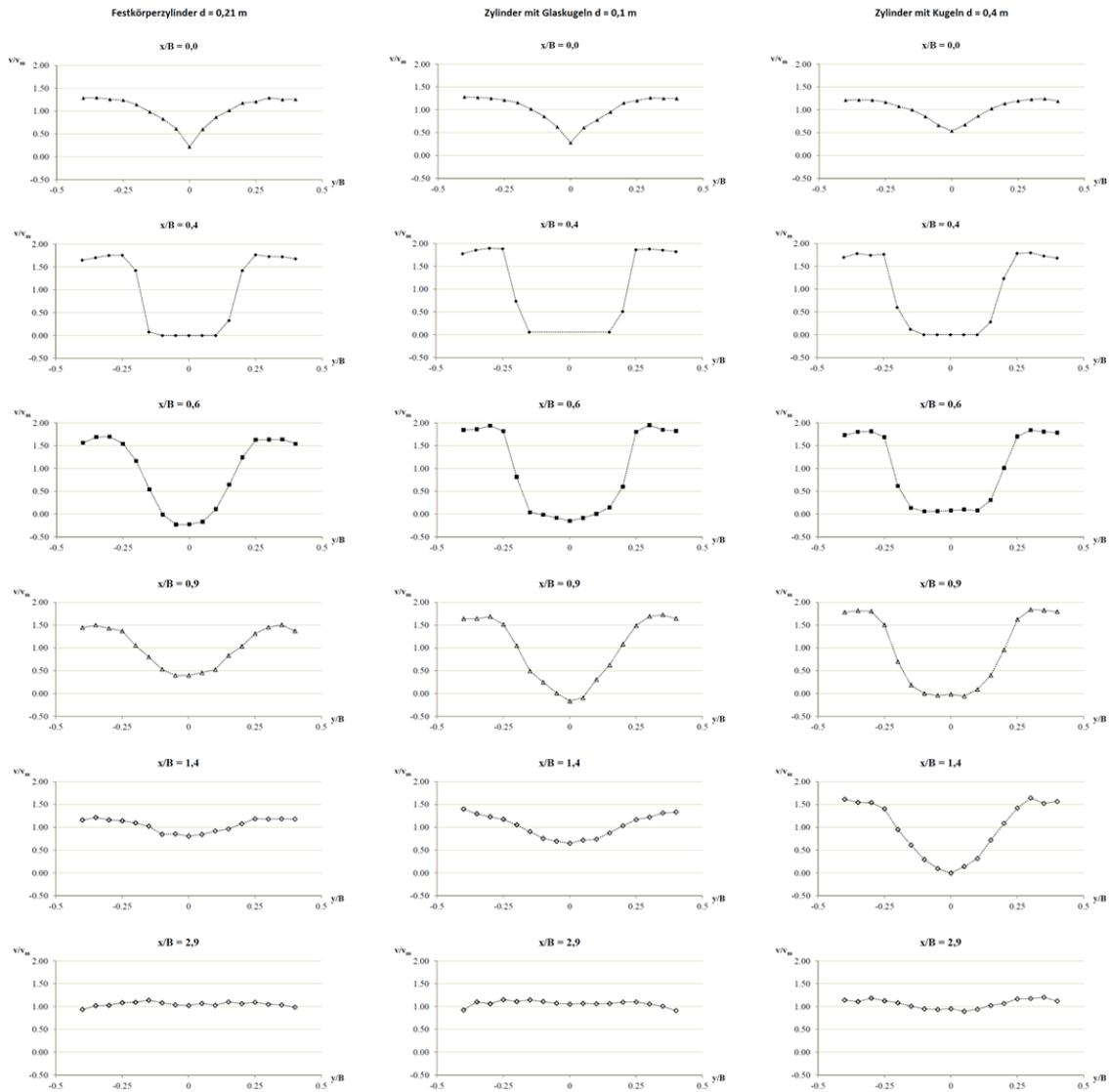


Abbildung A.12.: Querprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten poröser Durchströmung für den Festkörperzylinder, den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01\text{ m}$) und den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01\text{ m}$)

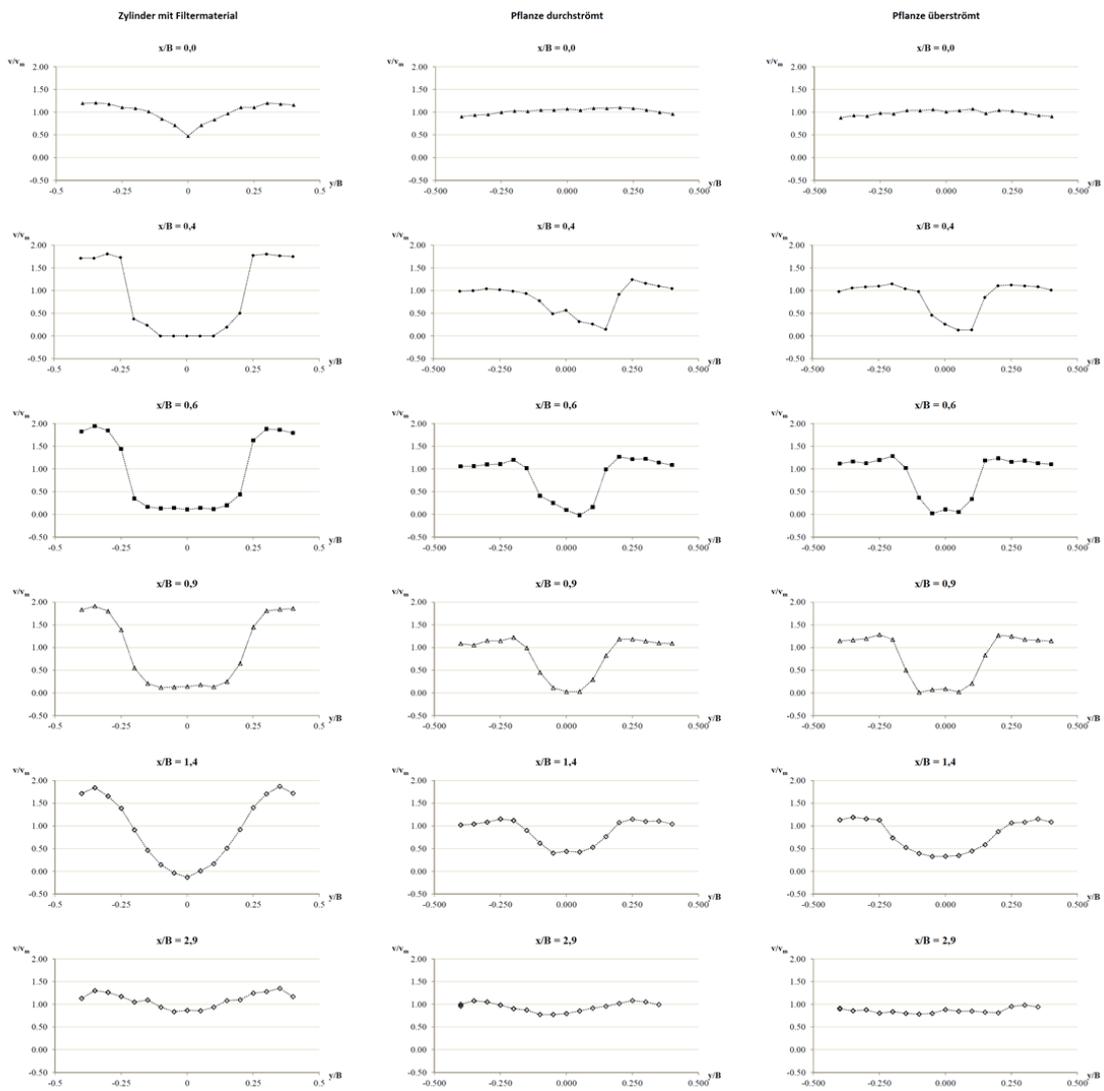


Abbildung A.13.: Querprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten poröser Durchströmung für den Zylinder mit Filtermaterial, die durchströmte Pflanze und die überströmte Pflanze

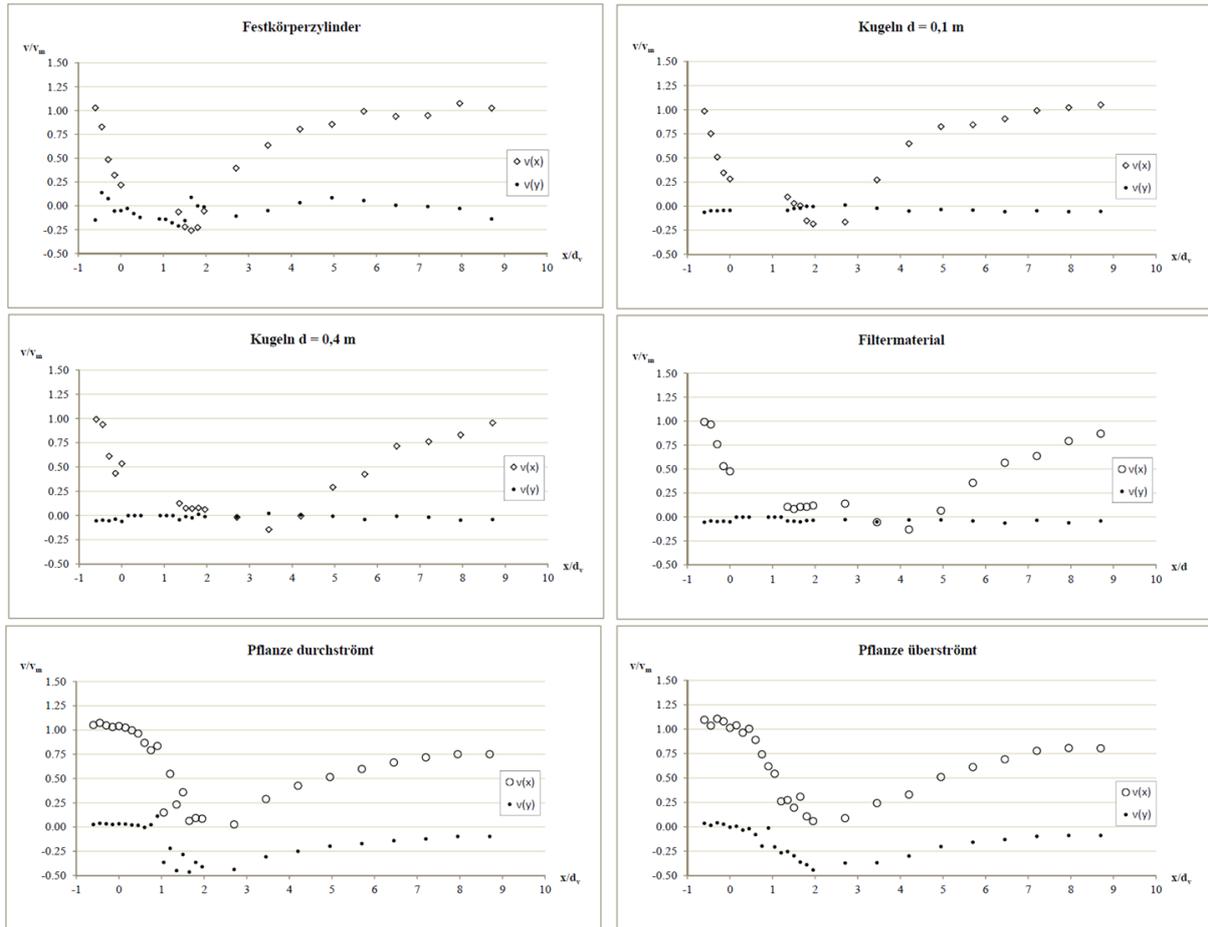


Abbildung A.14.: Längsprofile der normierten Fließgeschwindigkeiten für den Festkörperzylinder, den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01m$), den Zylinder mit Kugeln ($d = 0,01m$), den Zylinder mit Filtermaterial, die durchströmte Pflanze und die überströmte Pflanze

