

Widerstandsverhalten von holzigen Auenpflanzen

- Konzept zur Etablierung von Weichholzaunen an Fließgewässern -

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTOR-INGENIEURIN

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

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Geoökol. Sandra Schneider
aus Bad Mergentheim

Tag der mündl. Prüfung: 09.02.2010

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. h.c. mult. Franz Nestmann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Bodo Ruck

Karlsruhe 2010

Kurzfassung:

Auen nehmen 6 - 8 % der Landesfläche in Deutschland ein. Dennoch beheimaten sie fast zwei Drittel aller in Deutschland vorkommenden Lebensgemeinschaften. Heute zählen Auen jedoch zu den am stärksten bedrohten Lebensräumen in Europa. Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) und das Netz Natura 2000 schreiben den Auen daher besondere Entwicklungsbedürftigkeit zu.

Die vorliegende Arbeit richtet sich sowohl an Hydrauliker als auch an Ökologen, mit dem Ziel, ein interdisziplinäres Verständnis für die komplexen Interaktionsprozesse zwischen Strömung und holzigen Bewuchsbeständen zu schaffen.

Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt in der adäquaten Beschreibung des vegetativen Widerstandsbeiwertes von sukzessionsgeprägten Auen. Hierfür wurden an über 400 Stellen entlang der Elbe Auenvegetationsparameter erhoben. Damit wird der bisher eher dürftige Datenbestand erweitert. Die durchgeführten physikalischen Modelluntersuchungen hatten zum Ziel den Einfluss unterschiedlicher Pflanzenarten, Anordnungen und Besatzdichten für durch- und überströmte Auenbestände zu quantifizieren. Hierzu wird das Verhalten von unbelaubten und belaubten Weiden sowie Hecken in zwei Laborrinnen mit unterschiedlichen Abmessungen untersucht.

Die Widerstandsbeiwerte werden sowohl für den dimensionsbehafteten k_{st} -Beiwert als auch für den dimensionsreinen λ_{veg} -Beiwert bestimmt. Auentypische Habitate sind oft durch Pflanzenmischbestände gekennzeichnet. Aus diesem Grund sind die k_{st} -Werte in einer Entscheidungsmatrix dargestellt; dies ermöglicht ein einfaches Ablesen der k_{st} -Werte für diese Mischbestände.

Die bisher in der Fachliteratur aufgeführten Formeln zur Bestimmung des λ_{veg} -Beiwertes sind nicht für die Widerstandsbeschreibung von flexiblen, belaubten Auenbeständen geeignet. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Formel basiert auf Erkenntnissen aus den Labor- und Geländedaten. Die Formel ist eine Funktion des Bewuchsparameters (ω_p), dem Korrekturfaktor des Bewuchsparameters (cf_v), dem Gesamtwiderstandsbeiwert (c_{WR}) und der Wassertiefe (h). Dabei beschreibt der Bewuchsparameter die Dichte eines Vegetationsbestandes und der Korrekturfaktor des Bewuchsparameters berücksichtigt die stromlinienförmige Ausrichtung der Pflanze infolge des Strömungsangriffs. Damit liefert die Arbeit umfangreiche Empfehlungen zur geeigneten Beschreibung des Widerstandsbeiwertes für unterschiedliche Sukzessionsstadien.

Das Wissen um die adäquate Beschreibung des vegetativen Widerstandsbeiwertes alleine reicht jedoch nicht aus, den Flächenanteil der Auen entlang der Fließgewässer nachhaltig zu erhöhen. Daher wird eine Handlungsmatrix entwickelt, die es dem Planer ermöglicht aus biologischer und hydraulischer Sicht optimale Standorte für die Neuetablierung von Auen zu identifizieren. Die Anwendung des Verfahrens an einem 13 km langen Gewässerabschnitt an der Mittel-Elbe liefert zusätzliche praxisrelevante Empfehlungen für die Auswahl der Auenflächen.

Abstract:

About 6-8 % of the German land area is covered by wetland. These wetlands serve as a wildlife habitat for nearly two-thirds of the occurring animal species found in Germany. But nowadays vital riparian forest areas are among the most threatened biotopes in Europe. Therefore the EU-Water Framework Directive (WFD) and the Natura 2000 Network declare the necessity to preserve these riparian forest areas.

The work is addressed to hydraulic engineers as well as to ecologists with the aim to establish a mutual comprehension of the complex interaction processes between current and riparian vegetation.

The main focus of this paper is on the appropriate description of the vegetative resistance value of succession dominated riparian forest systems. At over 400 locations along the river Elbe in Germany riparian vegetation parameters were taken to enhance the existing nature-based dataset. The influence of plant species, plant arrangement and plant density for emergent and submerged vegetation was quantified by laboratory experiments, analyzing the behavior of leafy and unleafy willows and hedges.

The resistance was calculated for the dimensionful k_{st} -value and the dimensionless λ -value. Typical riparian forest biotopes are characterized by a mix of different plant types. On this account the k_{st} -values are presented in a decision matrix, which allows a simplified deduction of the situation in mixed plant stands.

The present formulas for calculating the λ -value presented in the technical literature are not suitable to describe the resistance of flexible, leafy riparian vegetation. The innovation of the presented formula is the integration of lab- as well as field-work. The derived formula is a function of the plant cover parameter (ω_p), the correction coefficient for the plant cover parameter (c_{fv}), the resistance coefficient (c_{WR}) and the water depth (h). The plant cover parameter describes the density of a plant stand. The correction coefficient for the plant cover parameter accounts for the streamlined plant-adjustment in dependence of the flow velocity.

As a result the work provides an extensive reference for the appropriate description of resistance values for diverse succession-dominated riparian forest stadia.

Additionally an operation-matrix has been developed to identify applicable riparian forest areas that consider the hydraulic influences as well as the biological needs of riparian forest vegetation. The operation-matrix presented in this work was validated on a 13 km long river stretch at the river Elbe in Germany.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung:	I
Abstract:	II
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis:	IV
Tabellenverzeichnis:	X
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 <i>Fragestellung und Relevanz</i>	1
1.2 <i>Aufbau der Arbeit</i>	3
2 Übersicht des ökologisch-hydraulischen Wirkungsgefüges	5
2.1 <i>Ökologie der Auen</i>	5
2.1.1 <i>Aspekte der Auenentwicklung</i>	5
2.1.2 <i>Charakteristische Merkmale</i>	5
2.2 <i>Weichholzauen und Hochwasser</i>	9
3 Grundlagen und Systemanalyse	10
3.1 <i>Widerstandsverhalten von holzigen Bewuchsbeständen</i>	10
3.1.1 <i>Allgemeine Fließformel</i>	10
3.1.2 <i>Widerstand hervorgerufen durch holzige Bewuchsbestände</i>	16
3.2 <i>Parameter zur Vegetationsbeschreibung</i>	24
3.2.1 <i>Vegetationsbeschreibende Parameter nach Lindner & Pasche</i>	24
3.2.2 <i>Angeströmte Vegetationsfläche</i>	25
3.2.3 <i>Offene Fragen</i>	26
3.3 <i>Anforderungen an eine modelltechnische Untersuchung</i>	27
3.3.1 <i>Messungen im Gelände</i>	27
3.3.2 <i>Messungen im Labor</i>	32
4 Untersuchungsansatz	41
4.1 <i>Wasserbauliche Modellversuche: Versuchsaufbau</i>	41
4.1.1 <i>Aufbau und Abmessungen der Laborrinnen</i>	41
4.1.2 <i>Befestigung der Vegetation</i>	45
4.1.3 <i>Untersuchte Pflanzenanordnungsvarianten</i>	47
4.2 <i>Bestimmung der vegetationsrelevanten Parameter</i>	49

4.2.1	Erhebung der Vegetationsparameter nach Lindner/Pasche.....	49
4.2.2	Erhebung der Bedeckungsdichte mittels Rasterbilder.....	50
5	Ergebnisse: Vegetationsparameter holziger Bewuchsbestände	54
5.1	<i>Im Labor erhobene Vegetationsparameter.....</i>	<i>54</i>
5.1.1	Bedeckungsdichten der untersuchten Weiden und Hecken.....	54
5.1.2	Interaktion zwischen Anströmgeschwindigkeit und hydraulisch wirksamer Vegetationsfläche....	60
5.2	<i>Im Gelände erhobene Vegetationsparameter.....</i>	<i>63</i>
5.2.1	Einteilung der Weichholzauenvegetation infolge Sukzession.....	63
5.2.2	Kartierte Pflanzenarten	66
5.2.3	Ermittelte hydraulisch relevante Vegetationsparameter: a_x , a_y , d_{veg}	66
5.2.4	Mittlere hydraulisch wirksame Vegetationsfläche im Gelände	70
5.2.5	Flächenkontraktion im Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit	72
5.2.6	Abgeleitete Empfehlung bezüglich Flächenkontraktion.....	73
6	Ergebnisse: Widerstand infolge von Weiden und Hecken	75
6.1	<i>Der Einfluss von Weiden und Hecken auf den Wasserspiegel</i>	<i>76</i>
6.2	<i>Der Einfluss der Besatzdichte auf den Wasserspiegel.....</i>	<i>78</i>
6.3	<i>Der Einfluss der Anordnung auf den Wasserspiegel.....</i>	<i>81</i>
6.4	<i>Verlauf der Fließgeschwindigkeitsprofile.....</i>	<i>86</i>
6.4.1	Übersicht über die mittleren Geschwindigkeitsprofile	87
6.4.2	Schwankungen der Fließgeschwindigkeit im Querprofil.....	91
6.5	<i>Beschreibung der Vegetation als Widerstandsbeiwert.....</i>	<i>95</i>
6.5.1	Widerstand infolge holziger Bewuchsbestände: k_{st} -Beiwerte	95
6.5.2	Widerstand infolge holziger Bewuchsbestände: λ_{veg} -Beiwerte	100
6.5.3	Bestimmung des Gesamtwiderstandsbeiwertes c_{WR}	108
6.6	<i>Abgeleitete Empfehlungen.....</i>	<i>110</i>
6.6.1	Gewässerunterhaltung	110
6.6.2	Fließgeschwindigkeitsprofil	110
6.6.3	Widerstandsbeiwerte	111
7	Diskussion	112
7.1	<i>Verlauf der Geschwindigkeitsprofile innerhalb der Vegetation</i>	<i>112</i>
7.2	<i>Das „seitliche Auslenken“ der Pflanzen infolge der Strömung</i>	<i>114</i>
7.3	<i>Erhebung von Daten im Gelände:.....</i>	<i>116</i>
7.3.1	Fließgeschwindigkeiten.....	116
7.3.2	Bewertung: Erhebung der mittleren Vegetationsparameter	116
7.4	<i>Abgeleitete Empfehlungen: empirischer k_{st}-Widerstandsbeiwerte</i>	<i>118</i>
7.5	<i>Abgeleitete Empfehlungen: dimensionsloser λ-Widerstandsbeiwerte.....</i>	<i>120</i>

8	Identifizierung von Weich- und Hartholzauenstandorten	125
8.1	<i>Handlungsmatrix</i>	126
8.2	<i>Weiterführende Empfehlungen und Hinweise</i>	128
8.2.1	Allgemeine Hinweise	128
8.2.2	Beispiel: Bälów-Rühstädter-Bogen.....	130
8.2.3	Monitoring aus hydraulischer Sicht	136
9	Zusammenfassung und Ausblick	139
10	Literatur.....	142
	Anhang:	148
	A 01: Wasserstände „Große Rinne“ und „Kleine Rinne“	149
	A 02: Unterschiedliche Besatzdichte	163
	A 03: gemittelte Geschwindigkeitsprofile	167
	A 04: Widerstandsbeiwerte, Fließgeschwindigkeiten, HN-Berechnungswerte	174
	A 05: u-Schwankungen.....	178
	A 06: Geschwindigkeitsisotachendiagramme	180
	A 07: Längsschnitte	189
	A 08: λ-Widerstandsbeiwert sowie Vegetationsparameter.....	196
	A 09: Bedeckungsdichte	199

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Naturnahes, strukturreiches Gewässer mit Auevegetation entlang des Fließgewässers (Lehmann 2003).....	1
Abb. 2: Übersicht über den Aufbau der Arbeit.....	4
Abb. 3: Grafisch-qualitatives Erklärungsmodell zur Verknüpfung der Eigenschaften eines Habitats und der dort lebenden Arten (SCHOLZ 2005).....	6
Abb. 4: Schematische Darstellung einer Aue am Beispiel der „Mittleren Elbe“ mit den morphologisch und ökologisch wichtigen Bereichen (LUGE 2005).....	6
Abb. 5: Typische Auenböden der Mittleren Elbe (SCHLOTEN 2005).....	7
Abb. 6: Vegetationsabfolge eines Flusses im Bereich eines Mittellaufes in Europa (ELLENBERG 1986).....	8
Abb. 7: Energieerhaltung nach Bernoulli.....	11
Abb. 8: Kräftebilanzierung an einem Kontrollvolumen.	11
Abb. 9: Klassifizierung der Vegetation nach BRETSCHNEIDER & SCHULZ: a: Kleinbewuchs, b: Mittelbewuchs, c: Großbewuchs (Quelle: DVWK 1991); v_m = mittlere Fließgeschwindigkeit.	16
Abb. 10: Darstellung der Nachlauflänge und -breite (bearbeitet nach DVWK 1991).....	17
Abb. 11: Beschreibung einer zugehörigen Grundfläche ($A_{Gff} = a_x \cdot a_y$) zur angeströmten Vegetationsfläche (A_{veg})(bearbeitet nach STEPHAN 2002).....	18
Abb. 12: Ermittelte Widerstandsbeiwerte für unterschiedliche Wassertiefen und Reynoldszahlen. Links: belaubte Weiden mit Gräser; rechts: unbelaubte Weiden. Zu beachten ist der unterschiedliche Skalenbereich der y-Achse für die beiden Diagramme (JÄRVELÄ 2002).	22
Abb. 13: Geschwindigkeitsprofils für unterschiedliche Vegetationsbestände (FISCHENICH 2000).....	22
Abb. 14: Verteilung von Fließpfaden innerhalb eines Vegetationsbestands (Lewandowski 1993).....	23
Abb. 15: Schematische Darstellung der Flächenkontraktion von belaubten Weiden als Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten) (OPLATKA 1998).....	25
Abb. 16: Flächenkontraktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche von belaubten Weiden bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (OPLATKA 1998); s. = Salix.	26
Abb. 17: Sedimentation von Sanden im bewuchsbestandenen Uferbereich an der Enz in Pforzheim nach einem Hochwasser (links). Prinzipskizze zur mittel- bis langfristigen Veränderung eines Gewässerbettes infolge solcher Auflandungen in Uferbereichen (rechts) (LEHMANN 2005).....	28
Abb. 18: Lage der Fließgeschwindigkeitsmesspunkte im Querprofil für den Referenzzustand (oben) sowie für unbelaubte und belaubte Pflanzen (Mitte und unten).	30
Abb. 19: Fließgeschwindigkeitslotrechten des leer-Zustands (oben) sowie für unbelaubte und belaubte Pflanzen (Mitte und unten).	30
Abb. 20: Oben: Die Fließgeschwindigkeiten als Isotachendiagramme für den leer-Zustand sowie unbelaubte und belaubte Pflanzen; Unten: Isotachendiagramme überlagert mit der relativen Position der Pflanzen im Querschnitt mit Fließrichtung in Zeichenebene.	31

Abb. 21: Verlauf des Wasserspiegels: (A) unter Normalabfluss, (B.1) bei Überströmungen einer Sohlschwelle, (B.2) bei Rückstauwirkungen infolge eines Wehres, (C) die Überlagerung der Effekte A und B.	35
Abb. 22: Verlauf des Wasserspiegels normiert auf das Bezugsniveau: (A) unter Normalabfluss, (B.1) bei Überströmungen einer Sohlschwelle, (B.2) bei Rückstauwirkungen infolge eines Wehres, (C) die Überlagerung der Effekte A und B.....	37
Abb. 23: Der Verlauf des Wasserspiegels als Schemaskizze.	38
Abb. 24: Der Verlauf des Wasserspiegels in der Laborrinne bei unterschiedlichen Durchflüssen.	38
Abb. 25: Schematischer Verlauf der Wasser- und Energiespiellage bezogen auf das Bezugsniveau für durchströmte Vegetation.	39
Abb. 26: Seitenansicht mit Längenangaben der „Großen Rinne“ (eyemotion).	41
Abb. 27: Seitenansicht mit Längenangaben der „Kleinen Rinne“ (eyemotion).	42
Abb. 28: 2D elektromagnetische Fließgeschwindigkeitsmesssonde P-EMS 30 (WL Delft Hydraulics).	43
Abb. 29: Querschnitt der Rinne mit Lage des Messrasters sowie der mit dem P-EMS aufgenommenen Messpunkte: links: „Große Rinne, rechts: „Kleinen Rinne“	44
Abb. 30: Übersicht über die Lage der Wasserstandsmessstellen (M) und den Vielpunktmessungen an den Profilen (P) in der „Großen Rinne“.....	45
Abb. 31: Übersicht über die Lage der Wasserstandsmessstellen (M) und den Vielpunktmessungen an den Profilen (P) in der „Kleinen Rinne“.....	45
Abb. 32: Pflanzenelement der belaubten Weide vor dem Einbau in die Laborrinne.	45
Abb. 33: Schemazeichnung für die Befestigung der Weiden und Hecken an den Hülsen (BAUMEISTER 2007) .	46
Abb. 34: Seitenansicht über den Einbau von Weiden an den Hülsen (BAUMEISTER 2007).	46
Abb. 35: Einbau der belaubten Weidenzweige mit einer Besatzdichte von 100 % in der „Großen Rinne“ (BAUMEISTER 2007)	47
Abb. 36: Übersicht über die Einbauvarianten der Hülsen.	48
Abb. 37: Ermittlung der Vegetations- und Abstandsparameter nach dem Lindner/Pasche-Verfahren (verändert nach BWK 2000).	50
Abb. 38: Aufbau des Messrahmens: links oben: Verschrauben des Messrahmens, rechts oben: Aufziehen des Rasters, links unten: Transport des Rahmens im Gelände, rechts unten: Aufstellen des Rahmens hinter der Vegetation.	50
Abb. 39: links: Rasteraufnahmen einer jungen Weide im Gelände als Farbfoto, rechts: konvertiertes Schwarz/Weiß-Bild.	51
Abb. 40: Schemaskizze der Rasterbildaufnahme im Labor ohne Wasser.	52
Abb. 41: links: Fotoaufnahme einer Vegetationsanordnung, rechts: zugehörige Schwarz/Weiß-Rasterung. ...	52
Abb. 42: Position der Kamera bei den Fotoaufnahmen unter Wasser: links: eine Reihe, rechts: Auswirkungen des Aufstaus von sechs Reihen auf die Flächenkontraktion.	53

Abb. 43: Einfluss der Durchströmung auf die Bedeckungsdichte von Weiden.....	55
Abb. 44: Darstellung der Bedeckungsdichte am Beispiel xxxxx: links: Aufnahme im trockenen Zustand, zugeschnitten auf die Wassertiefe bei 40 l/s; rechts: Aufnahme während der Durchströmung mit Einstauvariante E3 und einem Durchfluss von 40l/s.	56
Abb. 45: Neigung der Pflanze aufgrund von Überströmung.....	56
Abb. 46: Einfluss der Durchströmung auf die Bedeckungsdichte von Weiden bei veränderter Besatztiefe; eine Weidenreihe (= xxxxx) und sechs Weidenreihen (= 6xxxxx).	57
Abb. 47: Veränderung der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit: links: 6xxxxx_E3_40, rechts: xxxxx_E3_40; beide Bilder wurden im durchströmten Fall aufgenommen.....	59
Abb. 48: Auswirkungen einer einreihigen Weidenanordnung (xxxxx) im Vergleich zu einer einreihigen Heckenanordnung (He_xxxxx) auf die Flächenkontraktion.	59
Abb. 49: Veränderung des Bedeckungsdichteverhältnisses in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit im direkten Vergleich.....	62
Abb. 50: links: Typ 1: junger Weidenbestand; Mitte: Typ 2: mittelalter Auenbestand; rechts: Typ 3 älterer Auenbestand.....	63
Abb. 51: links: Boden-Typ 2: Boden ohne sohlnahe Vegetation aufgrund eines dichten Blätterdachs der Weiden; rechts: Boden-Typ 3: Brennesselfur inmitten eines alten Weichholzauenbestands.	64
Abb. 52: Bedeckungsdichte für unterschiedliche Altersstadien einer Weichholzaue in Abhängigkeit der Pflanzenhöhen.	65
Abb. 53: Bedeckungsdichte für die drei Auentypen: junge Weiden, mittelalte Weichholzaunen und ältere Weichholzaunen.....	65
Abb. 54: Vegetationsparameter für die Baumweidenarten: Silberweide, Fahlweide und Bruchweide.	67
Abb. 55: Vegetationsparameter für die Auenbaumart Pappel.	67
Abb. 56: Vegetationsparameter für die Strauchweidenarten: Mandelweide, Korbweide, Fuchsschwanzweide	68
Abb. 57: Vegetationsparameter für Heckenarten: Weiß-/Rotdorn, Kreuzdorn und Rosengewächse.....	68
Abb. 58: Vegetationsparameter für das uferbegleitende Rohrglanzgras.....	69
Abb. 59: links: Typ 1: junger Weiden; Mitte: Typ 2: mittelalter Weichholzaue; rechts: Typ 3: ältere Weichholzaue.....	70
Abb. 60: Vergleich der Wuchsformen: links: Strauchweide; rechts: Baumweide.	71
Abb. 61: links: Brennesselfluren vor dem Hochwasser; rechts: Brennesselfluren nach dem Hochwasser. Die Personen an den jeweiligen rechten und linken Bildrändern verdeutlichen die ursprüngliche Höhe der Brennesseln von fast 2 m.....	72
Abb. 62: Verlauf der Flächenkontraktion im Vergleich zu den Daten von OPLATKA (1998).....	73
Abb. 63: Wasserspiegellagen für die vier Untersuchungsvarianten: leer, Weiden unbelaubt (U1), Weiden belaubt (B1) und dichte Heckenvegetation (He1).....	77

Abb. 64: Einfluss unterschiedlicher Besatzdichten von 25 %, 50 % und 100 % auf den Wasserspiegel für die unbelaubten Weiden (U) und Hecken (He).	79
Abb. 65: Detailausschnitte des Wasserspiellagenverlaufs für $Q = 80$ l/s für unterschiedliche Besatzdichten für unbelaubten Weiden (U) und Hecken (He).	79
Abb. 66: Anordnungsübersicht der eingebauten Vegetationselemente mit einer Besatzdichte von 50 % in der „Großen Rinne“.	82
Abb. 67: Verlauf der Wasserspiegellagen für unbelaubte (U) und belaubte (B) Weiden mit einer Besatzdichte von 50 % für drei unterschiedliche Anordnungsmuster.	82
Abb. 68: Detailausschnitt für die Wasserspiegellagenverlauf durchströmter Vegetation mit einer Besatzdichte von 50 % bei einem Abfluss von 400 l/s.	83
Abb. 69: Anordnungsübersicht der eingebauten Vegetationselemente mit einer Besatzdichte von 100 % in der „Kleinen Rinne“.	84
Abb. 70: Verlauf der Wasserspiegellagen für unbelaubte (U) und belaubte (B) Weiden mit einer Besatzdichte von 100 % für fünf unterschiedliche Anordnungsmuster.	85
Abb. 71: Detailausschnitt für die Wasserspiegellagenverlauf mit einer Besatzdichte von 100 % bei einem Abfluss von 80 l/s.	85
Abb. 72: Übersicht über die Lage der Wasserstandsmessstellen (M) und den Vielpunktmessungen an den Profilen (P) in der „Kleinen Rinne“.	88
Abb. 73: Verlauf der gemittelten Fließgeschwindigkeit für den leer-Zustand, dichte unbelaubte (U1) und belaubte Weiden (B1) sowie dichte Hecken (He1) bei unterschiedlichen Durchflüssen in der „Kleinen Rinne“.	88
Abb. 74: Geschwindigkeitsprofile durchströmter und überströmter unbelaubter (U1) / belaubter (B1) Weiden und Hecken (He1), sowie die jeweiligen leer-Messungen.	90
Abb. 75: Verlauf der Geschwindigkeitsprofile für den leer-Zustand sowie für durchströmte unbelaubte (U1) / belaubte (B1) Weiden in der „Großen Rinne“.	91
Abb. 76: Messfeld, Isotachendiagramme und Schwankungsbreiten der Fließgeschwindigkeit für die Varianten leer (oben), unbelaubte Weiden (zweite von oben), belaubte Weiden (zweite von unten) und Hecken (unten) mit Fließrichtung in Zeichenebene.	92
Abb. 77: erste Reihe: Isotachendiagramme belaubter Weiden für unterschiedliche Wassertiefen; zweite Reihe: Isotachendiagramme überlagert mit der Vegetation mit Fließrichtung in Zeichenebene.	94
Abb. 78: Geschwindigkeitsverlauf und deren Schwankungsbreite für belaubte Weiden bei Durch- und Überströmung.	94
Abb. 79: k_{st} -Werte für dichte (U1), weniger dichte (U2) und lichte (U3) unbelaubte Weiden aufgetragen über das Verhältnis Wassertiefe (h) zur Vegetationshöhe (h_{veg}).	96
Abb. 80: k_{st} -Werte für belaubte, dichte (B1) und weniger dichte (B2) Weiden aufgetragen über das Verhältnis Wassertiefe (h) zur Vegetationshöhe (h_{veg}).	96

Abb. 81: k_{st} -Werte für dichte (He1), weniger dichte (He2) und lichte (He3) Hecken aufgetragen über das Verhältnis Wassertiefe (h) zur Vegetationshöhe (h_{veg}).....	97
Abb. 82: k_{st} -Werte für dichte, unbelaubte / belaubte Weiden und Hecken (He1).....	97
Abb. 83: Verlauf der Flächenkontraktion basierend aus den durchgeführten Laboruntersuchungen, sowie Daten von OPLATKA (1998).....	103
Abb. 84: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für unbelaubte Weiden in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) und des Besatzdichteparameters ω_P	104
Abb. 85: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für belaubte Weiden in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) und des Besatzdichteparameters ω_P	104
Abb. 86: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für Hecken in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) und des Besatzdichteparameters ω_P	106
Abb. 87: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für unbelaubte Weiden, belaubte Weiden und Hecken in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) für dichte Vegetationsbestände.....	106
Abb. 88: Geschwindigkeitsprofil für unterschiedliche Vegetationsbestände (FISCHENICH 2000).....	112
Abb. 89: Geschwindigkeitsprofile überströmter unbelaubter Weiden, belaubter Weiden Hecken sowie des Referenz-Zustands ohne Vegetationselemente.....	113
Abb. 90: Geschwindigkeitsprofile durchströmter, unbelaubter Weiden, belaubter Weiden Hecken sowie des Referenz-Zustands ohne Vegetationselemente.....	114
Abb. 91: Geschwindigkeitsprofil durchströmter, belaubte Weiden sowie des Referenz-Zustands ohne Vegetationselemente.....	114
Abb. 92: Verteilung von Fließpfaden innerhalb eines Vegetationsbestands (LEWANDOWSKI 1993).....	115
Abb. 93: erste Reihe: Isotachendiagramme belaubter Weiden für unterschiedliche Wassertiefen; zweite Reihe: Isotachendiagramme überlagert mit der Vegetation mit Fließrichtung in Zeichenebene.....	115
Abb. 94: Isotachendiagramm und Schwankungsbreiten der Fließgeschwindigkeit für die Untersuchungsreihe überströmter, belaubte Weiden (oben) und Hecken (unten) mit Fließrichtung in Zeichenebene.....	116
Abb. 95: links: „ideale“ Vegetationsanordnung; rechts: typische Weichholzaunenordnung im Gelände.....	117
Abb. 96: k_{st} -Werte für dichte, unbelaubte / belaubte Weiden und Hecken.....	119
Abb. 97: Aus der Kartierung bestimmte Vegetationsparameter für drei Baumweidenarten und der Baumart Pappel.....	121
Abb. 98: Aus der Kartierung bestimmte Vegetationsparameter für drei Strauchweidenarten und drei Heckengewächse.....	121
Abb. 99: Verlauf der Flächenkontraktion im Vergleich zu den Daten von OPLATKA (1998).....	122
Abb. 100: ermittelte λ_{veg} für unbelaubte Weiden, belaubte Weiden und Hecke unter Angabe des Produkts $\omega_P \cdot c_{WR}$ für dichte und lichte Bestände im Vergleich zu den Daten von JÄRVELÄ (2004).....	123
Abb. 101: Handlungsmatrix zur Identifizierung von Weichholzaunenstandorten sowohl aus biologischer als auch aus hydraulischer Sicht.....	126

Abb. 102: Einfluss der Fließgeschwindigkeit bei der Durchströmung von Auenbewuchs (Fotos: links: Löttsch, rechts: Bernhart).....	129
Abb. 103: Wasserspiegelanstieg durch Weiden- und Heckbewuchs bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten.	130
Abb. 104: Fließgeschwindigkeiten für ein HQ_{100} im Bereich Bälw-Rühstädter-Bogen ohne Neuanpflanzung (Ist-Zustand).....	131
Abb. 105: Ergebnisse der Habitat-Prognose-Modellierung, die grünen Flächen stellen die potentiellen Auenhabitatflächen dar.	132
Abb. 106: Mögliche Weichholzaueflächen (= grün gepunktet; Variante 1) überlagert mit den aus biologischer Sicht potentiell möglichen Habitatflächen.	133
Abb. 107: Fließgeschwindigkeitsdarstellung $HQ_{100,ref}$ überlagert mit möglichen Auenflächen der Variante 1. .	134
Abb. 108: Wasserspiegellagenänderung des $HQ_{100,Var.1}$ relativ zum $HQ_{100,ref}$	134
Abb. 109: Fließgeschwindigkeiten des $HQ_{100,ref}$ und Wasserspiegeldifferenz jeweils überlagert mit der Lage der Auenfläche von 11,2 ha.	135
Abb. 110: Fließgeschwindigkeiten des $HQ_{100,ref}$ und Wasserspiegeldifferenz jeweils überlagert mit der Lage der Auenfläche von 8,2 ha.	136
Abb. 111: Fließgeschwindigkeiten des $HQ_{100,ref}$ und Wasserspiegeldifferenz jeweils überlagert mit der Lage der Auenfläche von 4,2 ha.	136
Abb. 112: Darstellung der umsetzbaren Auenstandorte aus biologischer und hydraulischer Sicht. Die exakte Lage der Flächen ergibt sich aus der georeferenzierten Darstellung im GIS.	137

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Auszug der k_{st} -Wertetabelle für Vorländer nach Habersack (2009).	14
Tabelle 2: Vegetationsparameter für unterschiedliche, flussbegleitende Vegetationsarten (BWK 2000).	25
Tabelle 3: Gegenüberstellung der Daten beider Versuchseinrichtungen.	42
Tabelle 4: Erläuterung der in den Tabelle 5 und Tabelle 6 verwendeten Abkürzungen.	48
Tabelle 5: Variantenstudium in der „Großen Rinne“ (Abkürzungen siehe Tabelle 4).	48
Tabelle 6: Variantenstudium in der „Kleinen Rinne“ (Abkürzungen siehe Tabelle 4).	49
Tabelle 7: Veränderung der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit im Vergleich für eine und sechs Weidenreihen.	60
Tabelle 8: Übersicht der kartierten Pflanzenarten und deren Häufigkeit in Prozent bezogen auf die Gesamtanzahl der aufgenommenen Referenzflächen.	66
Tabelle 9: Übersicht über die Bedeckungsdichte der Natur-Rasterauswertung in Prozent für gering belaubte Bestände.	71
Tabelle 10: Veränderung der Wasserspiegellage in % bezogen auf den Referenzzustand für die Untersuchungsreihe E3 in der „Kleinen Rinne“:	77
Tabelle 11: Veränderung der Wasserspiegellage in % bezogen auf den Referenzzustand für die Untersuchungsreihe E3 in der „Kleinen Rinne“ in Abhängigkeit der Besatzdichte:	80
Tabelle 12: Zusammenstellung der k_{st} -Werte für unterschiedliche Auenstandorte.	98
Tabelle 13: Auszug der k_{st} -Wertetabelle für Vorländer nach HABERSACK (2009).	100
Tabelle 14: Rückrechnung des c_{WR} - Werts für un- und belaubte Weiden und Hecken.	109
Tabelle 15: Zusammenstellung der k_{st} -Werte für unterschiedliche Auenstandorte.	119
Tabelle 16: Vegetationsparameter nach dem BWK (2000):	121
Tabelle 17: Gewählte k_{st} -Verteilung und max. Zellgrößen	130

Symbolverzeichnis

Größe	Bedeutung	Einheit
A	Querschnittsfläche	[m ²]
A_{Gfl}	spezifische Grundfläche	[m ²]
A_{pro}	Probefläche	[m ²]
A_{Qfl}	angeströmte Querschnittsfläche	[m ²]
A_{veg}	angeströmte Vegetationsfläche	[m ²]
a_y	Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung	[m]
a_x	Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung	[m]
B	angeströmte Breite der Querschnittsfläche	[m]
b	Gerinnenbreite	[m]
C	empirischer Widerstandsbeiwert nach Brahms-de Chezy	[m ^{1/2} /s]
c_f	Korrekturfaktor des Besatzdichteparameters	[-]
c_n	Korrekturfaktor des Permeabilitätsfaktors	[-]
c_W	Gesamtwiderstandsbeiwert eines Zylinders infolge Verbauung und Schwerewellen	[-]
c_{WR}	Gesamtwiderstandsbeiwert der angeströmten Vegetationsfläche	[-]
c_{Wso}	Gesamtwiderstandsbeiwert eines allein stehenden Kreiszylinders	[-]
D_P	Bestockungsdichte = Anzahl der Stämme je m ²	[1/m ²]
d	Rohrdurchmesser	[m]
d_{veg}	Ast-/Stammdurchmesser	[m]
F_G	Gewichtskraft	[N]
F_O	Druckkraft auf das Kontrollvolumen von oberstrom	[N]
F_R	Reibungskraft	[N]
F_U	Druckkraft auf das Kontrollvolumen von unterstrom	[N]
F_{veg}	Strömungskraft auf die Vegetationselemente	[N]
Fr	Froude-Zahl	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Wassertiefe	[m]
h_v	Energieverlusthöhe	[m]
h_{veg}	angeströmte Pflanzenhöhe	[m]
I_E	Energieliniengefälle	[-]
I_{So}	Sohlliniengefälle	[-]
I_{Wsp}	Wasserspiegelgefälle	[-]
k_{st}	empirischer Widerstandsbeiwert nach Strickler	[m ^{1/3} /s]
l_U	benetzter Umfang	[m]
n	Manning-Beiwert	[s/m ^{1/3}]
n_B	Gesamtzahl der Pflanzen	[-]
n_y	Rauheitsdichte, Pflanzenpermeabilität	[-]
p	Druck	[N/m ²]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
r_{hy}	hydraulischer Radius	[m]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
v_m	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
v_{veg}	Anströmgeschwindigkeit an einem Kreiszyliner	[m/s]
λ_{ges}	Gesamtwiderstand	[-]
λ_I	Widerstand infolge Interaktion	[-]

λ_O	<i>Oberflächenwiderstand</i>	[-]
λ_{veg}	<i>Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation</i>	[-]
z	<i>Lagehöhe</i>	[m]
α	<i>Neigungswinkel</i>	[°]
ΔL	<i>Länge des Kontrollvolumens</i>	[m]
Δp	<i>Druckunterschied</i>	[N/m ²]
λ	<i>Widerstandsbeiwert</i>	[-]
ρ	<i>Dichte</i>	[kg/m ³]
τ	<i>Sohlschubspannung</i>	[N/m ²]
$\omega_{P-Schröder}$	<i>spezifische Vegetationsanströmfläche</i>	[1/m]
ω_p	<i>Besatzdichteparameter</i>	[1/m]



1 Einleitung

1.1 Fragestellung und Relevanz

Ein neu entstandenes Umweltbewusstsein in den vergangenen Jahrzehnten führte zu einem grundsätzlichen Umdenken im Wasserbau. Mit der Verabschiedung der EG-Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 wurde ein neuer Ordnungsrahmen unter anderem für den Schutz der Binnenoberflächengewässer, der Übergangsgewässer, der Küstengewässer und des Grundwassers definiert (Artikel 1, AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT 2000). Europaweite Revitalisierungsmaßnahmen an Fließgewässern sind die positiven Folgen dieser Richtlinie. Das Erreichen strukturreicher, diverser Fließgewässerökosysteme in gutem ökologischen Zustand ist dabei oberstes Ziel (vgl. Abb. 1). Jedoch sind die zuständigen Entscheidungsträger und planenden Ingenieure bei der Einbindung von strukturreichen Auenwäldern entlang der Fließgewässer immer noch oft zurückhaltend. Hintergrund ist zum Teil die mangelnde Kenntnis der komplexen Interaktionsprozesse zwischen Strömung und holziger Auenvegetation sowie ein fehlendes methodische Vorgehen zur Identifizierung von Anpflanzungsstandorten, die aus hydraulischer und ökologischer Sicht geeignet sind.

Fließgewässer wurden und werden aus Gründen der Schiffbarmachung, der Wasserkraftnutzung und der Nutzbarmachung von landwirtschaftlichen Flächen entlang der Vorländer ausgebaut und hinsichtlich der hydraulischen Leistungsfähigkeit im Sinne des Hochwasserschutzes optimiert.

Dies führt zu stark anthropogen geprägten und kulturtechnisch geregelten Gewässerlandschaften, wie sich am Beispiel des Rheins oder der Elbe veranschaulichen lässt: Während die Vorländer der Elbe nach SCHOLTEN (2005) noch vor wenigen hundert Jahren größere Bestände von Weichholz- und Hartholzaunen aufwiesen, ist das heutige Landschaftsbild vor allem durch extensiv genutzte Grünländer geprägt, denen die Auenwälder im Zuge landwirtschaftlicher Nutzung weichen mussten. Damit zählen Auen mit ihren typischen Pflanzengesellschaften heute zu den am stärksten bedrohten Lebensräumen in Europa (TÖCKNER 2002).



Abb. 1: Naturnahes, strukturreiches Gewässer mit Auevegetation entlang des Fließgewässers (Lehmann 2003).

Aufgrund ihres Gefährdungsgrads als Habitattyp per se werden Weichholzaunenwälder als ein prioritär zu behandelnder Lebensraum betrachtet. Diesen Gebieten wird nach der europäischen Wasserrahmenrichtlinie und dem Netz Natura 2000 zusammen mit den Gebieten der FFH-Richtlinie (Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie; 92/43/EWG) und der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG), eine besondere Entwicklungsbedürftigkeit zugeschrieben (SYSMANK et al 1998, RIEKEN 1994, HENRICHFREISE 1996). Dieser Status erschließt sich aus den vielfältigen Funktionen, die Auenwälder erfüllen. So bieten diese nicht nur Lebensraum für viele seltene Tier- und Pflanzenarten, sie beeinflussen auch den Nährstoffkreislauf innerhalb der Aue, haben einen wichtigen Einfluss auf die Wasserqualität und stabilisieren mit ihren Wurzelstrukturen Ufer- und Vorlandbereiche (FISCHENICH et al. 2001).

Die Etablierung und der Schutz von Auen hat daher deutschland- und europaweite Relevanz. Einerseits kommt Auen aufgrund ihrer eingeschränkten Verbreitung eine hohe Entwicklungsbedürftigkeit zu, andererseits sind flächenhafte Anpflanzungen vor dem Hintergrund des Hochwasserschutzes jedoch nicht unkritisch zu sehen.

Diese Arbeit richtet sich sowohl an Wasserbauingenieure als auch an Ökologen mit dem Ziel, ein interdisziplinäres Verständnis für die komplexen Interaktionsprozesse zwischen Strömung und Auenvegetation zu schaffen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der - adäquaten Abbildung der stark sukzessionsgeprägten Auensysteme in ein- und zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellen (1D/2D-HN-Modell) zur Berechnung von Wasserständen und Strömungen.

Hierfür wurden an über 400 Stellen entlang der Elbe typische Vegetationsparameter der Holzigen Bewuchsbestände erhoben und damit die bis dahin eher dürftige Sammlung von hydraulischen Daten und Vegetationsparameter für natürliche, Holzige Auenbewuchsbestände erweitert. Zudem durchgeführte physikalische Modelluntersuchungen für unterschiedliche Auenhabitats haben zum Ziel, den Einfluss unterschiedlicher Arten, Anordnungen und Besatzdichten für durch- und überströmte Weichholzaunenbestände zu quantifizieren. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass die Flächenkontraktion der angeströmten Vegetationsfläche in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit eine wichtige Größe für die Bestimmung des hydraulischen Widerstands von Auenvegetation darstellt. Diese Arbeit liefert daher unter anderem umfangreiche Empfehlungen zur geeigneten Bestimmung des Widerstandsbeiwertes von Auenvegetation für diverse Sukzessionsstadien.

Das Wissen um die adäquate Beschreibung des vegetativen Widerstandsbeiwertes alleine reicht jedoch nicht aus, den Flächenanteil der Auen entlang der Fließgewässer nachhaltig zu erhöhen. Daher ist die Entwicklung einer Handlungsmatrix, die es dem Planer ermöglicht aus biologischer und hydraulischer Sicht optimale Standorte für die Neuetablierung von Auen zu identifizieren, von Nöten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist ein Brückenschlag zwischen den natürlichen dynamischen Prozessen einer Aue, im Speziellen der holzigen Bewuchsbestände, und der parametrisierten, und damit an Zahlenwerte gebundenen Beschreibung der Vegetation in den hydraulischen Berechnungsansätzen herzustellen. Das Besondere der vorliegenden Arbeit ist die Bearbeitung dieser interdisziplinären Thematik anhand von praxisrelevanten Fragen. In Abb. 2 ist der Aufbau der Arbeit als Grafik dargestellt.

Kapitel 2 liefert einen Überblick über die charakteristischen Merkmale einer Aue sowie deren hydraulische Auswirkung auf den Wasserspiegel im Hochwasserfall. Dabei werden die wesentlichen Begriffe und Zusammenhänge, die zum Verständnis nötig sind, aus biologischer und hydraulischer Sicht erläutert.

Anschließend werden in Kapitel 3 die Grundlagen, aufgeteilt in die Bereiche „Widerstandsverhalten von holzigen Bewuchsbeständen“ und „Beschreibung der Vegetation anhand von hydraulisch relevanten Vegetationsparametern“ erläutert. Zusätzlich erfolgt eine Systemanalyse bezüglich des zu verwendenden physikalischen Modells.

In Kapitel 4 wird das methodische Vorgehen des Untersuchungsansatzes dargestellt. Dabei werden ebenfalls die jeweils angewendeten Methoden für die Bereiche „Bestimmung der vegetationsrelevanten Parameter“ sowie „wasserbauliche Modellversuche“ getrennt behandelt.

Kapitel 5 zeigt die neu gewonnenen Ergebnisse bezüglich der hydraulisch relevanten Parameter zur Beschreibung der Vegetation, basierend auf den Geländedaten sowie den Laboruntersuchungen auf. Zum einen werden die an über 400 ausgewählten Auenstandorten entlang der Mittel- und Unterelbe erhobenen Vegetationsparameter ausgewertet. Zum anderen wird der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und deren Auswirkungen auf die angeströmte Vegetationsfläche im Labor analysiert.

Kapitel 6 untersucht anhand unterschiedlicher Fragen, die sich bei der Gehölzunterhaltung mit Blick auf die einzuhaltende Hochwassersicherheit ergeben, das Verhalten der holzigen Bewuchsbestände unter dem Aspekt der Dichte und Anordnung der Pflanzen. Des Weiteren werden Widerstandsbeiwerte für unterschiedliche holzige Bewuchsbestände für den durch- und überströmten Fall ermittelt.

Mit dem Ziel, die wesentlichen Erkenntnisse zusammenzuführen, und diese bezüglich des Stands der wissenschaftlichen Fachliteratur und den sich daraus ergebenden Konsequenzen für die praktische Umsetzung zu bewerten, wird in Kapitel 7 eine Diskussion der Ergebnisse durchgeführt.

Kapitel 8 stellt ein Konzept zur Identifizierung von aus hydraulischer Sicht geeigneten Auenstandorten an Fließgewässern vor. Des Weiteren werden Empfehlungen und Hinweise abgeleitet, die die Identifikation geeigneter Standorte für Weich- und Hartholzauen erleichtern. Anschließend erfolgt eine exemplarische Anwendung für einen 15 km langen Flussabschnitt an der Elbe. Kapitel 9 liefert eine Zusammenfassung mit einem Ausblick auf weiteres Forschungspotential.

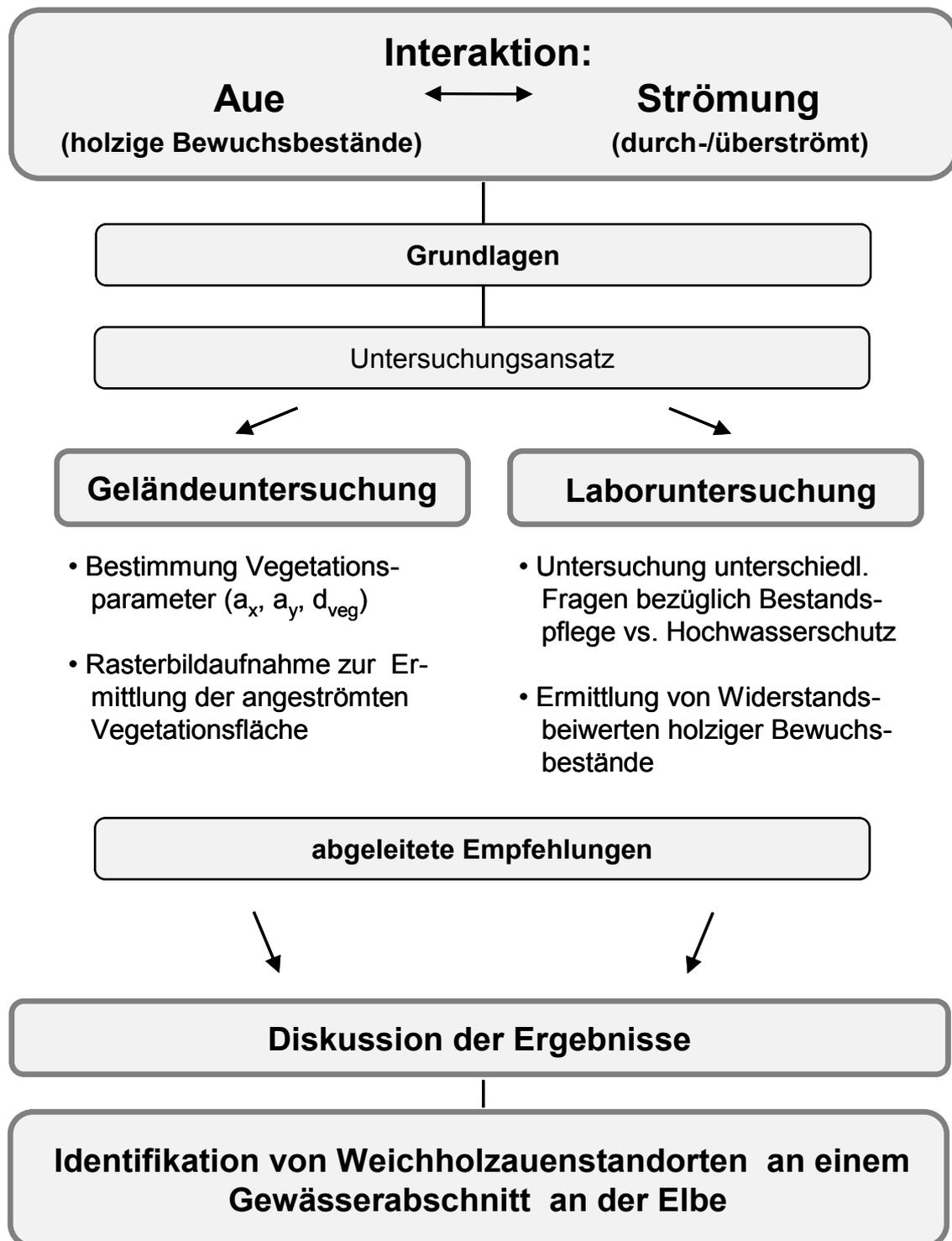


Abb. 2: Übersicht über den Aufbau der Arbeit.

2 Übersicht des ökologisch-hydraulischen Wirkungsgefüges

2.1	Ökologie der Auen
2.1.1	Aspekte der Auenentwicklung
2.1.2	Charakteristische Merkmale
2.2	Weichholzaunen und Hochwasser

Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte und charakteristischen Merkmale aufgezeigt, die eine Aue aus ökologischer und hydraulischer Sicht kennzeichnen. Dabei geht es vor allem um die Darlegung der wichtigsten Mechanismen und den sich daraus ergebenden interdisziplinären Fragestellungen, die zur Entwicklung und dem Schutz von Weichholzaunenwäldern beitragen.

2.1 Ökologie der Auen

2.1.1 Aspekte der Auenentwicklung

Der Begriff Auendynamik fasst das Zusammenspiel aller Veränderungen innerhalb des Systems Aue zusammen. Die Veränderungen werden durch das Wechselspiel der abiotischen und biotischen Faktoren hervorgerufen. Die abiotischen Faktoren umfassen vor allem die Punkte schwankende Grundwasserspiegel, Erosions- und Sedimentationsprozesse und Strömungskraft des Wassers infolge Hochwasser; die dynamische Sukzession der Pflanzengesellschaften ist der zentrale biotische Faktor. Damit ist die Auendynamik der Schlüsselfaktor für die Lebensraum- und Artenvielfalt dieses Biotops (DVG 2007).

Die so genannten Pionierstandorte bzw. offene Rohböden entstehen durch lokale, flächige Erosions- oder Sedimentationserscheinungen während eines Hochwassers. Die Ansiedlung von Weiden aus Sämlingen oder konkurrenzschwachen, krautigen Pflanzen ist auf Pionierstandorte angewiesen.

Die Sukzession bezeichnet die regelhafte, zeitliche Abfolge in der Pflanzengesellschaft. Lückige Bestände einjähriger, krautiger Pionierpflanzen werden in den Folgejahren von dichten Staudenpflanzen abgelöst. Im Folgenden dominiert das Weidengebüsch. Dieses entwickelt sich zu einem Wald aus Weiden, Erlen oder Eschen, vorausgesetzt die Sukzessionsfolge wird nicht durch Erosion infolge eines extremen Hochwasserereignisses wieder auf den Pionierstandort zurückgesetzt. Bedingt durch die Gewässerdynamik sind Auen auch unter natürlichen Bedingungen nicht durchgehend bewaldet. Bäume können durch Hochwasser freigespült werden oder altersschwach umstürzen. Daneben sorgt beispielsweise die Aktivität größerer Tiere, z.B. die des Bibers, für zusätzliche Lücken im Bestand. Im Vergleich zu den zonalen Standorten mit der typischen Klimaxvegetation, verlaufen die zeitlichen Sukzessionsstadien in den azonalen Standorten der Auen meist schneller (DVG 2007).

2.1.2 Charakteristische Merkmale

Nach DVG (2008) nehmen Auen gegenwärtig lediglich 6–8% der Landesfläche in Deutschland ein. Dennoch sind nahezu 1800 Farn- und Blütenpflanzen und über 10.000

Tierarten in diesem Ökosystem beheimatet; das entspricht einem Anteil von fast zwei Dritteln aller in Deutschland vorkommenden Faunaarten. Daraus folgt, vor allem unter dem faunistischen Gesichtspunkt, der hohe Schutzwert der Auen.

Die abiotischen Faktoren von periodisch auftretenden Überflutungen und den damit einhergehenden starken Schwankungen des Grundwasserstandes kennzeichnen den azonalen Lebensraum der Auen (LfU 2007). A- und R-Strategen, d.h. Tier- und Pflanzenarten die entweder an Mangelsituation angepasst oder mit einer hohen Reproduktionsrate ausgestattet sind, dominieren dieses Ökosystem. Auf konstante Bedingung angewiesene Arten, so genannte K-Strategen, sind deshalb gering vertreten (vgl. Abb. 3).

In Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse werden Sedimente bei Hochwasser in die Aue eingetragen und verteilt. Ein auentypisches Mikorelief entsteht, bestehend aus einem System von Rinnen, Senken und Altwässern (vgl. Abb. 4; PATT et al 2004).

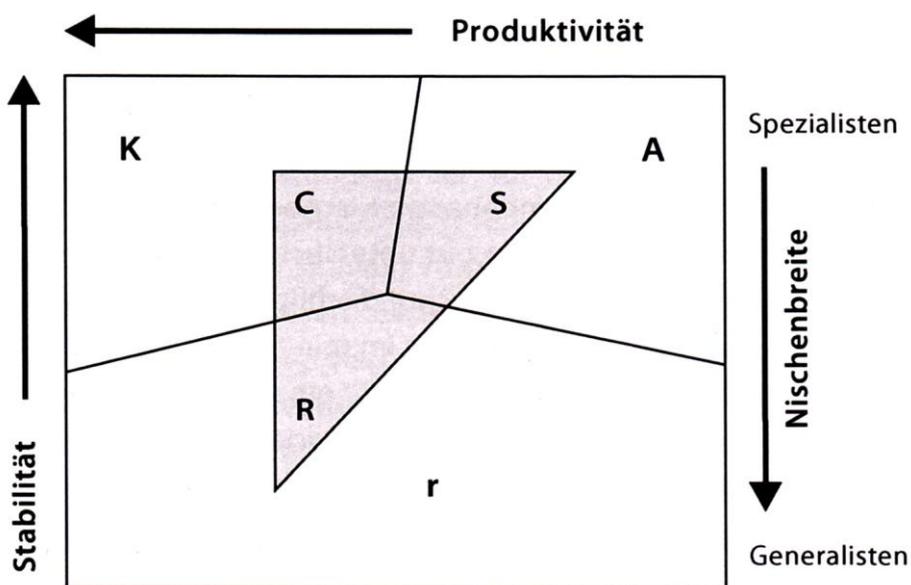


Abb. 3: Grafisch-qualitatives Erklärungsmodell zur Verknüpfung der Eigenschaften eines Habitats und der dort lebenden Arten (SCHOLZ 2005).

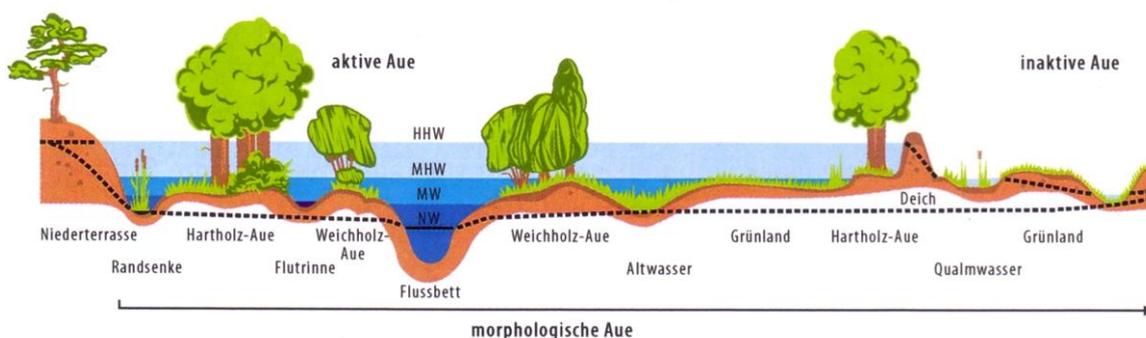


Abb. 4: Schematische Darstellung einer Aue am Beispiel der „Mittleren Elbe“ mit den morphologisch und ökologisch wichtigen Bereichen (LUGE 2005).

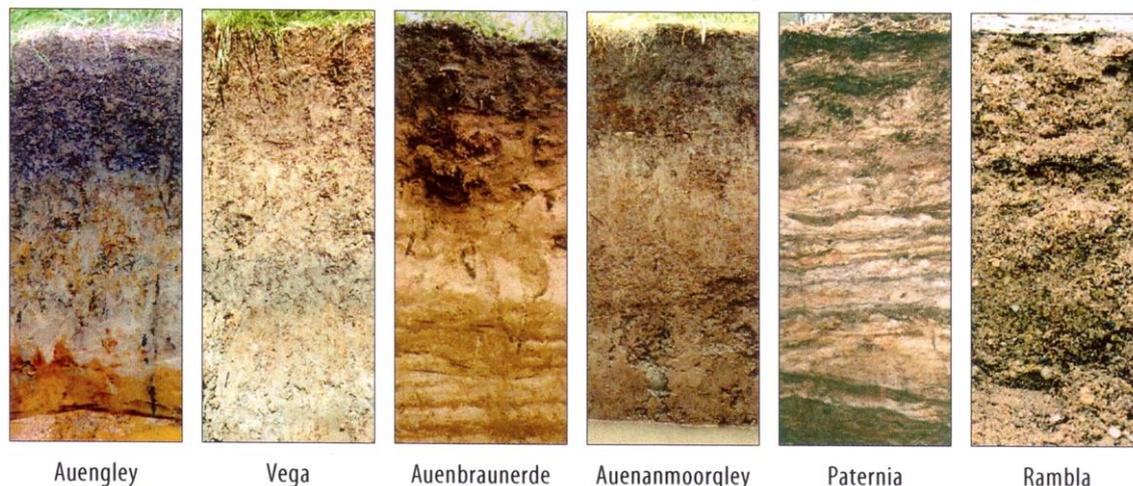


Abb. 5: Typische Auenböden der Mittleren Elbe (SCHLOTEN 2005).

In ufernahen Bereichen finden sich die grundwasserbeeinflussten AC-Auenböden (vgl. Abb. 5) Rambla, Paternia, Borowina oder der Ah/Bv/Go Boden Vega, sofern eine tiefreichende Verwitterung einsetzen konnte. Trotz des Grundwassereinflusses fehlen ausgeprägte Reduktionsflecken in diesen Böden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Ursache ist der zu Zeiten hoher Wasserstände ausreichend mitgeführte Sauerstoffgehalt des fließenden Wassers sowie die gute Durchlüftung des Bodens bei Niedrigwasser. Die Ablagerung z.T. mächtiger Auenlehme in Akkumulationsbereichen der Vorländer ist auf die Änderung in der Besiedlungsgeschichte zurückzuführen. Waldrodungen, veränderter Ackerbau und Flusskorrekturen verstärken die Bodenerosion vor allem im Oberlauf.

An Mittel- und Unterläufen von Flüssen wären ausgedehnte Auwälder die natürliche Vegetationsform. Aufgrund der Talform ist die Breite der Auen an den Oberläufen schmaler. Heute ersetzen z.T. extensiv genutzte Feuchtwiesen die Auenwälder (DVG 2008).

Neben extrem nährstoffarmen Standorten von Kies- und Sandflächen entstehen im Strömungsschatten der Strauch- und Baumvegetation sowie an den Gleitufeln und Buchten Sedimentationsbereiche mit nährstoffreichen Standorten aufgrund der dortigen Sedimentation von organischem Material. Die unterschiedlichen Zonen mit den jeweils typischen Tier- und Pflanzengesellschaften bilden ein vielfältiges Mosaik an Lebensräumen (SCHOLZ 2005).

Die artenreiche Auenfauna besiedelt die unterschiedlichsten Habitate. Dabei dient die Aue neben der Nahrungsquelle auch als Laich-, Brut- oder Nistplatz. So bevorzugen z.B. viele Insektenlarven und kieslaichende Fischarten wie der Lachs oder die Forelle die Substratlücken des Interstitials aufgrund der ausgeglicheneren Temperatur- und Strömungsverhältnisse im Vergleich zum frei fließenden Wasser.

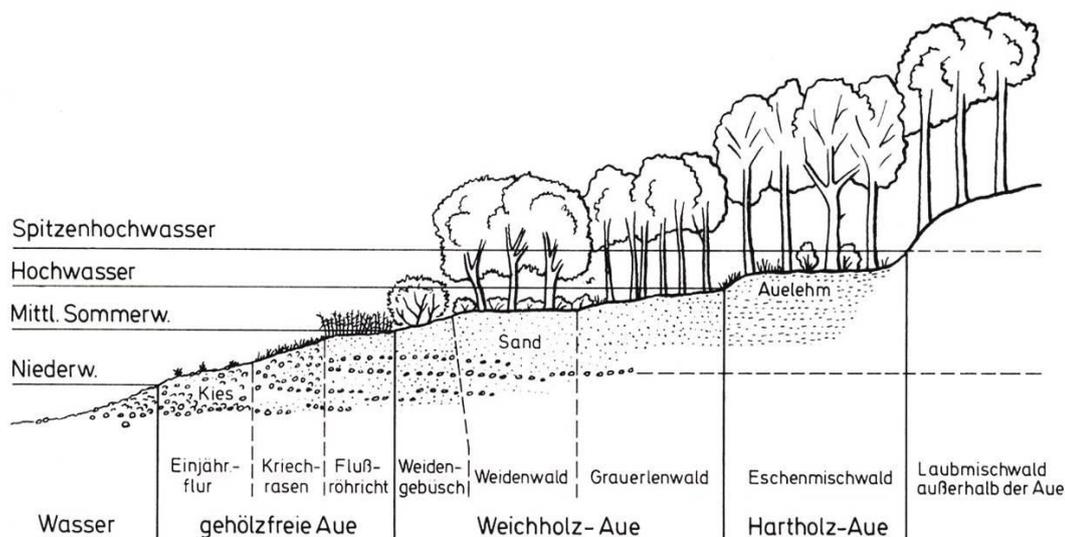


Abb. 6: Vegetationsabfolge eines Flusses im Bereich eines Mittellaufes in Europa (ELLENBERG 1986)

Die ökologische Differenzierung der Vegetation entspricht dem Ausmaß und der Dauer der Überflutung sowie dem Angebot der angelieferten Nährstoffe (SCHOLZ 2005). In Abb. 6 ist die Vegetationsabfolge für den Mittellauf eines Gewässers in Europa dargestellt. Die gehölzfreie Aue, die Einjahrflur, angesiedelt zwischen Niedrig- und Mittelwasserstand, ist gekennzeichnet durch Kriechrasen und Flußröhricht (ELLENBERG 1986). An diesen Bereich schließt sich die Weichholzaue mit den Vertretern des Weidengebüschs und des Weidenwaldes an. Die Grenze zur höher gelegenen Hartholzaue bildet die mittlere Hochwasserlinie. Langandauernder Einstau führt zu einer Einschränkung der Wurzelatmung, die je nach Vegetationstyp unterschiedlich schnell zu dauerhaften Schäden des Bestandes führen.

Dabei besitzen die Weichholzaunenarten (z.B. Schwarzpappel (*Populus nigra*), Silberweide (*Salix alba*) und Mandelweide (*Salix triandra*)) extrem hohe Überflutungstoleranzen, die es ihnen erlauben, Überflutungen von bis zu 300 Tagen im Jahr zu überleben (DISTER 1981). Dem Konkurrenzvorteil von älteren Weichholzaunenbeständen gegenüber anderen Arten der Hartholzaue, (z.B. die Stieleiche (*Quercus robur*)) steht die Konkurrenzanfälligkeit der Jungstadien entgegen. Für die Etablierung aus Samen oder auch aus vegetativem Material (z.B. abgerissene, verdriftete Äste) sind die Weichholzaunenarten auf so genannte Rohbodenstandorte angewiesen (MOSNER 2009). Diese entstehen in der Regel während stärkerer Überflutungsereignisse durch Erosions- und Sedimentationsprozesse.

Darüber hinaus spielen die hydrologischen Bedingungen eine wichtige Rolle, da die Weichholzaunenarten im Jungpflanzenstadium weder längere Perioden von Trockenheit noch eine Dauerüberstauung verkraften (AMLIN AND ROOD 2002). Aus diesen Gründen ist eine natürliche Regeneration von Weichholzaunen auch in einem vitalen Flussauensystem ein vergleichsweise seltenes Ereignis. Durch die starke anthropogene Veränderung des heutigen Fließgewässerregimes tritt eine natürliche Verjüngung der Weichholzaunen noch seltener auf und ist meist auf die Bereiche am Ufer beschränkt, da es in der Regel nur

hier zur Bildung von Rohbodenstandorten kommt. In diesen Bereichen ist ein dauerhafter Aufwuchs der Arten jedoch zumeist unwahrscheinlich, da hydrodynamische Prozesse einen solchen verhindern bzw. Uferbereiche im Zuge wasserbaulicher Maßnahmen oft freigehalten werden. Aus diesen Umständen resultiert eine flächendeckende Überalterung der Bestände der Weichholzaunen (JÄGER 2000). Obwohl eine Wiederentwicklung der zugrunde liegenden Dynamiken des Fließgewässerregimes wünschenswert wäre, sind solche Ansätze vor dem Hintergrund der Nutzung meist nicht realisierbar. Um den Vorgaben der Europäischen Union (z.B. Natura 2000, EU-Wasserrahmenrichtlinie) Folge zu leisten, ist daher eine Weichholzaunenentwicklung durch Anpflanzungen unumgänglich.

2.2 Weichholzaunen und Hochwasser

Eine Etablierung von Weichholzaunen entlang von Fließgewässern kann nur an den Stellen erfolgen, an denen die Hochwasserneutralität für den Bemessungsabfluss trotz der Neuanpflanzung von Weichholzaueflächen erhalten bleibt. Der Bemessungsabfluss ist maßgebend für den Hochwasserschutz – z.B. werden Deichbauwerke anhand der aus dem Bemessungsabfluss resultierenden Wasserstände dimensioniert. In den meisten Fällen entspricht der Bemessungsabfluss dem HQ_{100} , d.h. die Deiche sind so dimensioniert, dass ein Hochwasserereignis, welches statistisch gesehen einmal in hundert Jahren auftritt, schadlos innerhalb des Deichsystems abtransportiert werden kann.

Während eines Hochwasserabflusses ergeben sich innerhalb durchströmter Auenbereiche komplexe Strömungssituationen. Kommt es bei Hochwasser zu einer Überflutung der Vorländer, so bewirken die dortigen Hindernisse (z.B. Vegetation) einen Verlust an Fließenergie. Das Wasser muss die Hindernisse um- bzw. durchfließen. Um die Abflussleistung aufrecht zu erhalten, muss die Strömung im Bereich der Hindernisse beschleunigt werden – dafür benötigt das hydraulische System Energie. Diese Energie wird durch eine Erhöhung des Potentials vor dem Hindernis erzeugt, indem dort die Wasserstände und somit die Druckhöhe ansteigen. Die Höhe des vegetativ bedingten Aufstaus nach oberstrom ist von vielen Faktoren abhängig. Dabei hat die Struktur und Dichte in Abhängigkeit der natürlichen Sukzessionsfolge der Auenvegetation einen wesentlichen Einfluss auf den Strömungswiderstand, sodass je nach Vegetationsart, -alter und Jahreszeit die hydraulischen Widerstände unterschiedlich anzusetzen sind.

Bezüglich des hydraulischen Widerstandsverhaltens von flexiblen um- und durchströmten Weichholzaunen bot die Literatur bisher nur wenig praxistaugliche Anhaltspunkte (vgl. Kapitel 3.1). Dieses Problem wird gegenwärtig in der HN-Modellierung durch Schätzung der abflussabhängigen Widerstandsbeiwerte gelöst. Die Genauigkeit der Schätzung ist daher stark von der Erfahrung des Hydraulikers abhängig und führt zu Ungenauigkeiten in den Berechnungsergebnissen. In der Regel werden daher bzgl. der Zielgrößen auf der sicheren Seite liegende Widerstandswerte angenommen, was mit einer Unterschätzung des eigentlichen Potentials von Weichholzaunenstandorten einhergeht. In Kapitel 8 erfolgt daher die Beschreibung eines konzeptionellen Verfahrens unter Verwendung einer zielgerichteten Szenarienanalyse zur Identifikation geeigneter Standorte aus biologischer und hydraulischer Sicht.

3 Grundlagen und Systemanalyse

3.1	Widerstandsverhalten von holzigen Bewuchsbeständen
3.1.1	Allgemeine Fließformel
3.1.2	Widerstand hervorgerufen durch holzige Bewuchsbestände
3.2	Parameter zur Vegetationsbeschreibung
3.2.1	Vegetationsbeschreibende Parameter nach Lindner & Pasche
3.2.2	Angeströmte Vegetationsfläche
3.2.3	Offene Fragen
3.3	Anforderungen an eine modelltechnische Untersuchung
3.3.1	Messungen im Gelände
3.3.2	Messungen im Labor

3.1 Widerstandsverhalten von holzigen Bewuchsbeständen

3.1.1 Allgemeine Fließformel

Die physikalische Grundlage zur Untersuchung strömungstechnischer Fragestellungen liefert die Fluidmechanik. Die Hydromechanik, ein Teilgebiet der Fluidmechanik, beschreibt die wesentlichen Kenngrößen der Strömung, d.h. Volumenströme in Abhängigkeit von Druck, Wassertiefe, Strömungsgeschwindigkeit sowie auftretende innere Kräfte und die Kräfte auf Berandungen. Die Navier-Stokes-Gleichung liefert die mathematische Beschreibung von Fluidbewegungen. Deren exakte Lösung bereitet, aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Wassers, jedoch bis heute Schwierigkeiten. Daher haben sich in der Hydromechanik in der historischen Entwicklung zwei Herangehensweisen für die Berechnung von Strömungsphänomenen entwickelt.

Die *klassische* Hydromechanik beschreibt die Vorgänge innerhalb der Strömung auf theoretischer Basis. Dies geht mit einer Vereinfachung der Strömungsphänomene einher. Diese Vereinfachungen schränken die Übertragung der Gleichungen ein, da noch nicht alle Strömungsphänomene eindeutig mathematisch gelöst sind.

Die *technische* Hydraulik liefert für praktische Fragestellungen (Bemessungen von Rohrleitungen, Berechnungen von offenen Gerinneströmungen) Berechnungsansätze, die auf empirischen Ansätzen basieren. Dabei wird das natürliche Geschehen in Form von Koeffizienten abgebildet.

Eine elementare Größe bei der Strömung bildet die Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m . Diese wird, gemäß der Strömungstheorie mit dem Prinzip der Kontinuität, über den Durchfluss Q eines Gewässers und der angeströmten Querschnittsfläche A bestimmt:

$$Q = v_m \cdot A$$

Gl. 3-1

wobei:

A Querschnittsfläche [m^2]

Q Durchfluss [m^3/s]

v_m mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

Die quantitative Erfassung des Fließwiderstandes kann auf Basis mathematisch einfachen, empirischen Fließformeln oder anhand iterativ lösbarer Ansätze erfolgen. Bei einer eindimensionalen Strömungsanalyse wird die mittlere Geschwindigkeit innerhalb eines Querschnitts berechnet. Die im Folgenden dargestellten Berechnungsansätze gehen von einer stationären, gleichförmigen Strömung aus, d. h. der Durchfluss sowie die Strömungssituation bleiben konstant, wobei das Sohlprofilgefälle (I_{So}) gleich dem Wasserspiegelgefälle (I_{Wsp}) gleich dem Energieliniengefälle (I_E) mit $I_{So} = I_{Wsp} = I_E$ gilt (vgl. Abb. 7).

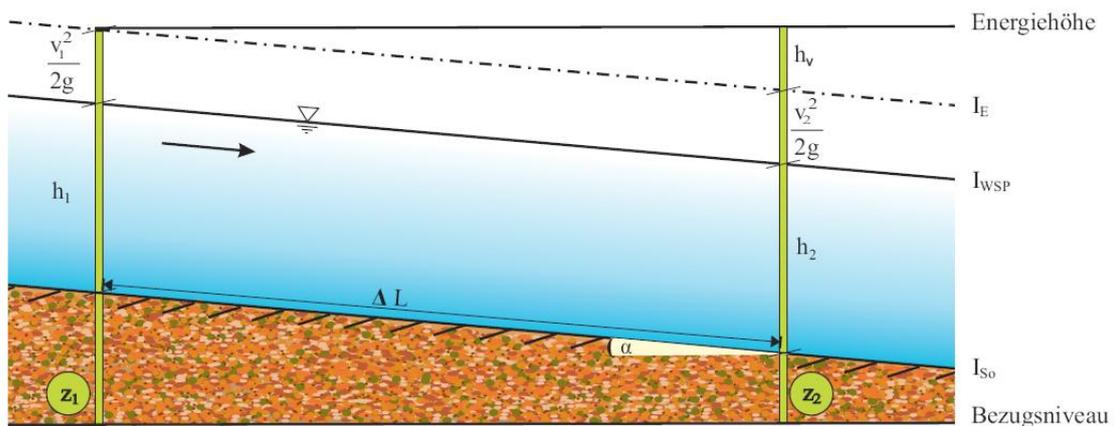


Abb. 7: Energieerhaltung nach Bernoulli.

Die im Wasserbau am häufigsten verwendeten empirischen Fließformeln für offene Gerinne gehen auf BRAHMS (1767) und DE CHEZY zurück. Sie gehen von der theoretisch aufgestellten Beziehung aus, dass alle an einem Wasserelement angreifenden Kräfte zueinander im Gleichgewicht stehen, d.h. dass die treibende Kraft gleich der haltenden Kraft ist. In Abb. 8 ist die Kräftebilanzierung an einem Kontrollvolumen dargestellt. Die treibende Kraft ist die Differenz der oberstromigen und unterstromigen Druckkraft auf das Kontrollvolumen ($= F_O - F_U$) sowie die hangabtriebsgerichtete Komponente der Gewichtskraft in Strömungsrichtung ($= F_G \cdot \sin \alpha$). Diesen Kräften steht die haltende Kraft in Form der Reibungskraft ($= F_R$) entgegen.

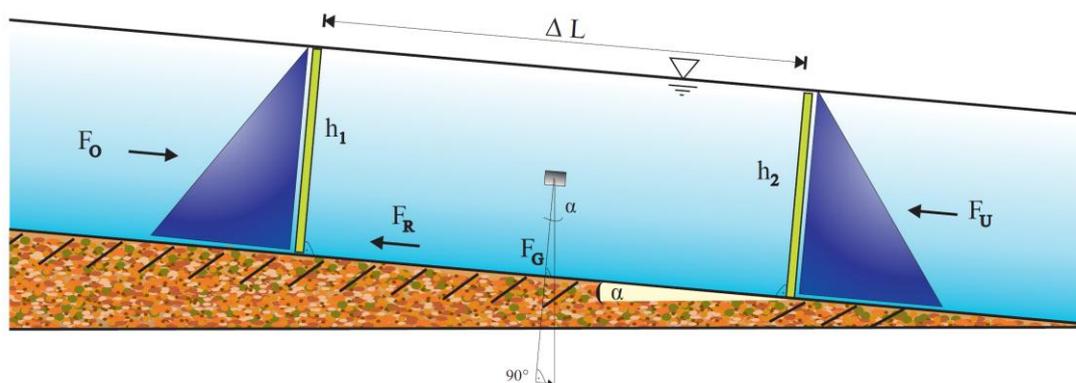


Abb. 8: Kräftebilanzierung an einem Kontrollvolumen.

Aus der Aufstellung der Kräftebilanz folgt:

$$F_O + F_G \cdot \sin \alpha = F_U + F_R \quad \text{Gl. 3-2}$$

Unter der Annahme einer gleichförmigen, stationären Strömung in einem Rechteckgerinne ist $h_1 = h_2$ und damit $A_1 = A_2$. Die einzelnen Teilgleichungen ergeben sich daraus zu:

$$F_O = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot A \quad \text{Gl. 3-3}$$

$$F_U = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot A \quad \text{Gl. 3-4}$$

$$F_G = \rho \cdot g \cdot h \cdot b \cdot \Delta L \quad \text{Gl. 3-5}$$

$$F_R = \tau \cdot l_U \cdot \Delta L = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot l_U \cdot \Delta L \quad \text{Gl. 3-6}$$

Durch Einsetzen folgt:

$$\rho \cdot g \cdot h \cdot b \cdot \Delta L \cdot \sin \alpha = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot l_U \cdot \Delta L \quad \text{Gl. 3-7}$$

Sofern $\alpha \leq 10^\circ$ gilt die Näherung $\sin \alpha = \tan \alpha = I_{So}$. Mit der Annahme $I_{So} = I_E$ und

$r_{hy} = \frac{h \cdot b}{l_U} = \frac{A}{l_U}$ sowie $\sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = C$ erhält man die Gleichung nach BRAHMS und DE CHEZY:

$$v = C \cdot \sqrt{r_{hy} \cdot I_E} \quad \text{Gl. 3-8}$$

wobei:

- b Gerinnenbreite [m]
- C empirischer Widerstandsbeiwert nach Brahms & de Chezy [$m^{1/2}/s$]
- F_O hydrost. Druckkraft auf das Kontrollvolumen von oberstrom [N]
- F_U hydrost. Druckkraft auf das Kontrollvolumen von unterstrom [N]
- F_G Gewichtskraft [N]
- F_R Reibungskraft [N]
- g Erdbeschleunigung [m/s^2]
- h Wassertiefe [m]
- I_E Energieliniengefälle [-]
- I_{So} Sohlliniengefälle [-]
- I_{WSP} Wasserliniengefälle [-]
- l_U benetzter Umfang [m]
- r_{hy} hydraulischer Radius [m]
- v_m mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- α Neigungswinkel [°]
- λ Widerstandsbeiwert [-]
- ΔL Länge des Kontrollvolumens [m]
- ρ Dichte [kg/m^3]
- τ Sohlschubspannung [N/m^2]

¹ Diese Gleichung basiert aus Untersuchungen der Rohrhydraulik.

Der dimensionsbehaftete Widerstandsbeiwert C ist als Summenparameter anzusehen, welcher die Einflüsse der Oberflächenrauheit, der Widerstände infolge von Strukturelementen, der Linienführung und der Querschnittsform berücksichtigt. Aufgrund seiner Dimension [$m^{1/2}/s$] kann C messtechnisch nicht auf direktem Wege erfasst werden.

Der Ansatz nach GAUCKLER/MANNING/STRICKLER (um 1850) liefert ein Verfahren zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes C . Eingesetzt in die Fließformel resultiert daraus die heute im zentraleuropäischen Bereich häufig verwendete modifizierte Fließformel nach GAUCKLER/MANNING/STRICKLER (sog. GMS-Formel):

$$v_m = k_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot \sqrt{I_E} \quad \text{Gl. 3-9}$$

wobei:

I_E Energieliniengefälle [-]
 k_{st} empirischer Widerstandsbeiwert nach Strickler [$m^{1/3}/s$]
 r_{hy} hydraulischer Radius [m]
 v_m mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

Dabei ist zu beachten, dass der dimensionsbehaftete Beiwert (k_{st} [$m^{1/3}/s$]) messtechnisch ebenfalls nicht erfasst werden kann und zudem von der Wassertiefe abhängt (vgl. CHOW 1959, LEHMANN 2005). Die k_{st} -Angaben in Tabellenwerken liefern eine Eingrenzung der Wertebereiche. Dabei ist zu beachten, dass die Werte meist aus Rückrechnungen ermittelt werden, die auf Messungen in Laborgerinnen basieren. Die typischen Merkmale eines Fließgewässers wie variable Linienführung, Aufweitung und Verengung, Gerinnegliederung und/oder unterschiedliche Vegetationstypen erschweren die eindeutige Bestimmung des k_{st} -Wertes. Eine belastbare Abschätzung ist somit nur mittels Rückrechnung vergangener Ereignisse möglich. Dazu liegen aufgrund der häufigen Verwendung der GMS-Formel mittlerweile viele Erfahrungswerte für den k_{st} -Wert vor. Zudem lässt sich die GMS-Formel aufgrund des einfachen Aufbaus leicht anwenden.

Einzelwiderstände, zum Beispiel hervorgerufen von durch- oder überströmter Vegetation, werden als Summenparameter in der GMS-Formel berücksichtigt. Hierzu wurden zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen in Laborgerinnen durchgeführt, um Richtwerte für den k_{st} -Wert bei unterschiedlichen Strömungswiderstandsarten zu ermitteln.

PETRYK & BOSMAJIAN veröffentlichten 1975 eine Methode, die es ermöglicht, den k_{st} -Wert für den Fall eines durchströmten Feldes, welches mit zylindrischen, starren Widerstandskörpern symmetrisch besetzt ist, zu berechnen. Als notwendige Eingangsparameter werden die Wassertiefe, die Gerinnewandungsrauheit, die angeströmte Vegetationsfläche, der hydraulische Radius und spezielle Anordnungsparameter (i.d.R. Stababstände in und quer zur Strömungsrichtung) benötigt. Mit diesem Verfahren wollte man das Widerstandsverhalten durchströmter Vegetationsbestände (z.B. auf Flussvorländern im Hochwasserfall) hydraulisch beschreiben. Der empirische Charakter bleibt dem Ansatz von PETRYK & BOSMAJIAN jedoch als Schwachstelle enthalten.

Eine umfassende Zusammenstellung von k_{st} -Werten für unterschiedlichste Pflanzentypen, rückgerechnet aus Naturdaten, veröffentlichte HABERSACK (2009). In Tabelle 1 sind

k_{st} -Werte für die Beschreibung von Gebüsch und Baumvegetation aufgetragen. Neben der Dichte des Pflanzentyps werden auch die jahreszeitlichen Unterschiede berücksichtigt. Die Wassertiefenabhängigkeit bleibt den Werten von HABERSACK weiterhin enthalten.

Tabelle 1: Auszug der k_{st} -Wertetabelle für Vorländer nach Habersack (2009).

Vorländer	Min.	Norm	Max.
a. Wiese			
kurzes Gras	25	30	35
hohes Gras	12	20	30
b. landwirtschaftlich genutzte Flächen			
Kleine Feldfrucht	20	33	50
Reifes Getreide (Reihensaat)	15	20	40
Reifes Getreide (flächig)	12	18	33
Mais	4	6	8
c. Gebüsch			
Vereinzelt, starke Krautschicht	14	20	29
Gebüsch geringer Dichte (im Winter)	10	15	25
Gebüsch geringer Dichte (im Sommer)	8	12	20
Gebüsch mittlere bis hohe Dichte (im Winter)	6	10	13
Gebüsch mittlere bis hohe Dichte (im Sommer)	4	8	14
d. Bäume			
Kahlschlag	20	25	33
Kahlschlag mit starkem Wurzelaustrieb	13	17	20
dichter Wald, wenig umgestürzte Bäume	8	10	13
dichter Wald, Abfluss bis in Asthöhe	5	8	10
dichte Weiden (im Sommer)	5	7	9

Parallel zu den Untersuchungen der Beschreibung von Vegetationswiderständen in Form eines empirischen Summenparameters beschäftigten sich Wissenschaftler mit der Entwicklung einer dimensionsreinen und somit universellen Fließformel, welche unabhängig von Randbedingungen und ohne Verwendung empirischer Beiwerte anwendbar sein sollte. Die von DARCY und WEISBACH ebenfalls um ca. 1850 veröffentlichte und durch zahlreiche Untersuchungen weiter angepasste Fließformel leitet sich aus einer Energiebilanzierung ab (vgl. Abb. 7):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_{m1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_{m2}^2}{2g} + h_v \tag{Gl. 3-10}$$

wobei:

- g Erdbeschleunigung [m/s²]
- h_v Energieverlusthöhe [m]
- p Druck [N/m²]
- v_m mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- z Lagehöhe [m]
- ρ Dichte [kg/m³]

mit

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{\Delta L}{d} \cdot \frac{1}{2} v_m^2 \cdot \rho \tag{Gl. 3-11}$$

und dem für offene Gerinne anzusetzenden hydraulischen Ersatzdurchmesser

$$d = 4r_{hy} \tag{Gl. 3-12}$$

sowie der aus der Rohhydraulik bekannten Beziehung zur Berechnung der Energiehöhenverluste

$$h_v = \frac{\lambda \cdot \Delta L \cdot v_m^2}{8 \cdot r_{hy} \cdot g} \quad \text{Gl. 3-13}$$

und der Definition der Energiehöhe

$$I_E = \frac{h_v}{\Delta L} \quad \text{Gl. 3-14}$$

ergibt sich die sogenannte Darcy-Weisbach-Fließformel

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8g} \cdot \sqrt{r_{hy} \cdot I_E} \quad \text{Gl. 3-15}$$

wobei:

- d* Rohrdurchmesser [m]
- g* Erdbeschleunigung [m/s²]
- h_v* Energieverlusthöhe [m]
- I_E* Energieliniengefälle [-]
- p* Druck [N/m²]
- r_{hy}* hydraulischer Radius [m]
- v_m* mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- λ* Widerstandsbeiwert [-]
- Δp* Druckunterschied [N/m²]
- ΔL* Länge des Kontrollvolumens [m]
- ρ* Dichte [kg/m³]

Die Fließformel kann auch auf Strömungen im offenen Gerinne angewendet werden. Da in diesem Fall jedoch - im Vergleich zur Rohrströmung - eine freie Wasserspiegeloberfläche und eine ungleichmäßige Rauheitsverteilung entlang der Gerinnewandung vorhanden ist, sind zusätzliche, vereinfachende Annahmen und Erweiterungen nötig. Zur Berechnung des dimensionslosen Beiwertes *λ* für Oberflächenwiderstände wurden aus Laborversuchen Widerstandsbeziehungen erarbeitet (z.B. COLEBROOK/WHITE 1937, KEULEGAN 1938).

Die international gebräuchlichsten, globalen Widerstandsbeiwerte hängen dabei wie folgt zusammen:

$$C = k_{st} \cdot r_{hy}^{1/6} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = \frac{1}{n} \cdot r_{hy}^{1/6} \quad \text{Gl. 3-16}$$

wobei:

- C* empirischer Widerstandsbeiwert nach Brahms & de Chezy [m^{1/2}/s]
- g* Erdbeschleunigung [m/s²]
- k_{st}* empirischer Widerstandsbeiwert nach Strickler [m^{1/3}/s]
- n* Manning-Beiwert [s/m^{1/3}]
- r_{hy}* hydraulischer Radius [m]
- λ* Widerstandsbeiwert [-]

3.1.2 Widerstand hervorgerufen durch holzige Bewuchsbestände

3.1.2.1 Allgemeine Klassifizierung vegetationsspezifischer Widerstände

Das Bestreben dieser Arbeit liegt unter anderem auf der Beschreibung des Widerstandsbeiwertes infolge von holzigen Bewuchsbeständen. BRETSCHNEIDER & SCHULZ (1985) teilen die Vorlandvegetation in drei Klassen ein. Maßgebend ist hierbei die Höhe des Bewuchses h_{veg} im Verhältnis zur Wassertiefe h (vgl. Abb. 9).

- Kleinbewuchs: Die Wuchshöhe ist deutlich kleiner als die Wassertiefe.
- Mittelbewuchs: Die Wuchshöhe entspricht in etwa der Wassertiefe.
- Großbewuchs: Die Wuchshöhe überragt deutlich die Wassertiefe.

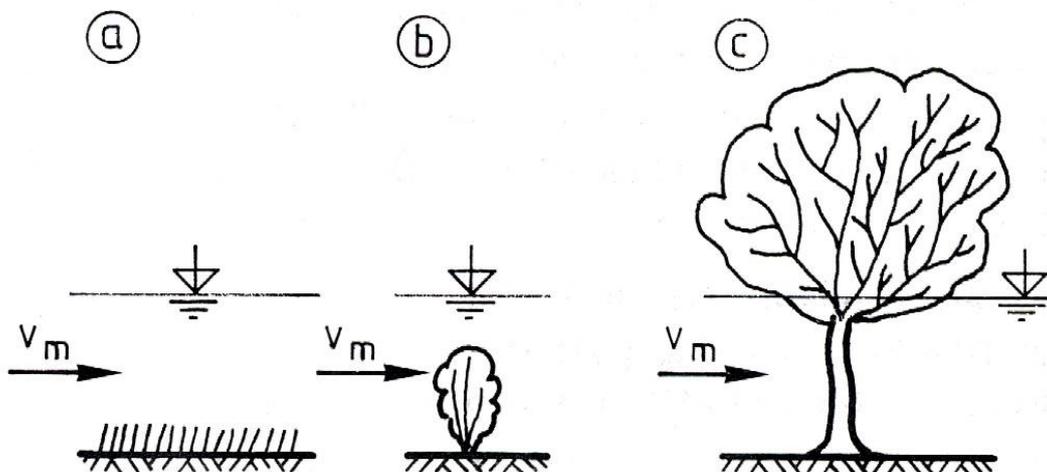


Abb. 9: Klassifizierung der Vegetation nach BRETSCHNEIDER & SCHULZ: a: Kleinbewuchs, b: Mittelbewuchs, c: Großbewuchs (Quelle: DVWK 1991); v_m = mittlere Fließgeschwindigkeit.

Das Widerstandsverhalten von Kleinbewuchs wird über eine äquivalente Flächenrauheit erfasst und als Oberflächenwiderstand berücksichtigt. Bei Mittel- und Großbewuchs hat zusätzlich die Form der Vegetation einen Einfluss auf das Widerstandsverhalten. Dieses hängt wiederum von zahlreichen Parametern ab. Die Vegetationsdichte (= Besatzdichte) und die Flexibilität bestimmen zu einem großen Teil das Widerstandsverhalten der strauch- und baumartigen Vegetation. Verschiedene Autoren haben seit den 1970er Jahren empirische Ansätze aufgestellt, um den Einfluss der Vegetation auf das Widerstandsverhalten zu beschreiben.

Ein Kernproblem aller Widerstandsberechnungen ist die Frage nach der Beschreibung der Widerstände durch charakteristische Größen. Bei der Beschreibung der Sohl- und Formrauheiten, die durch Vegetation hervorgerufen werden, genügt es nicht, die Rauheit als ein einzelnes Rauheitselement zu beschreiben. Vielmehr handelt es sich um einen aus vielen Einzelementen bestehenden Rauheitsverband (STEPHAN 2002).

Der Rauheitsverband von holzigen Bewuchsbeständen ist durch eine Variabilität in Anordnung/Besatzdichte, Flexibilität und Struktur gekennzeichnet. Des Weiteren sind Art

und Alter des Vegetationstyps sowie die zu betrachtenden Jahreszeiten (Winter/ Sommer, belaubt/ unbelaubt) zur Beschreibung des Rauheitsverbandes von Bedeutung.

Denn je nach Art des Rauheitsverbandes bilden sich unterschiedliche Strömungssituationen aus (STEPHAN 2002). Das Verhältnis des Längsabstandes a_x der Pflanzen und ihrer Höhe h_{veg} spielen dabei eine wichtige Rolle. MORRIS (1955) unterscheidet zwischen isolierter Rauheitsströmung, Wirbelüberlagerungsströmung und quasi-glatte Strömung. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass der überwiegende Anteil der Fließverluste infolge der Wirbelbildung hinter den einzelnen Rauheitselementen entsteht. Im Falle der isolierten Rauheitsströmung bildet sich hinter einer Pflanze eine ungestörte Nachlaufströmung aus, ohne dass diese von den umliegenden Rauheitselementen beeinflusst wird (vgl. Abb. 10).

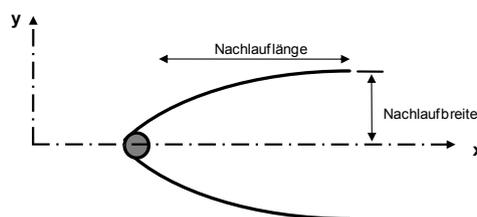


Abb. 10: Darstellung der Nachlauflänge und -breite (bearbeitet nach DVWK 1991).

Bei der Wirbelüberlagerungsströmung beeinflussen sich die Nachlaufzonen untereinander aufgrund der geringeren Pflanzenabstände a_x . Zwischen den Pflanzen bilden sich komplexe Turbulenzstrukturen aus. Bei der quasi-glatte Rauheitsströmung ist der Pflanzenabstand so gering, dass sich Totwasserzonen mit stabilen Wirbeln ausbilden, die wie eine einheitliche Oberfläche wirken.

Im Falle der isolierten Rauheitsströmung setzt sich der Fließwiderstand aus Oberflächenreibungsverlusten und Formverlusten zusammen. Der Einfluss des Formverlustes steigt bei der überlagerten Wirbelströmung. Diese wird durch den reduzierten Pflanzenabstand hervorgerufen. Mit weiter abnehmendem Pflanzenabstand verringert sich der Einfluss der Form zusehends und eine quasi-glatte Strömung mit fast ausschließlichen Oberflächenreibungsverlusten tritt ein.

Dabei kann der durch die durchströmte Vegetation verursachte hydraulische Widerstand über die Rauheitsdichte n_y beschrieben werden. Sie bildet das Verhältnis der angeströmten Vegetationsfläche (A_{veg}) zur zugehörigen bzw. elementspezifischen Grundfläche (A_{Gfl}). Die elementspezifische Grundfläche ist definiert durch die Anordnungsparameter in und quer zur Fließrichtung (a_x, a_y) (vgl. Abb. 11).

$$n_y = \frac{A_{veg}}{A_{Gfl}} = \frac{A_{veg}}{a_x \cdot a_y} \quad \text{Gl. 3-17}$$

wobei:

- A_{Gfl} spezifische Grundfläche [m^2]
- A_{veg} angeströmte Vegetationsfläche [m^2]
- a_y Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung [m]
- a_x Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung [m]
- n_y Rauheitsdichte [-]

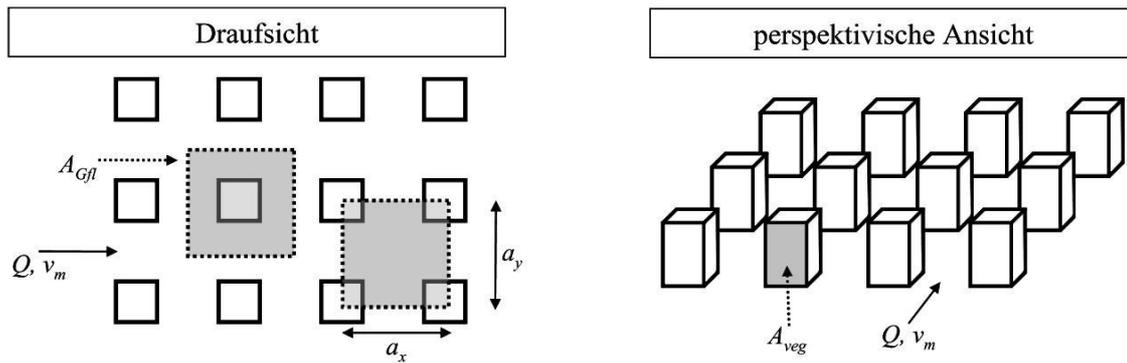


Abb. 11: Beschreibung einer zugehörigen Grundfläche ($A_{Gfl} = a_x \cdot a_y$) zur angeströmten Vegetationsfläche (A_{veg}) (bearbeitet nach STEPHAN 2002).

Die Rauheitsdichte n_y ist jedoch kein ausreichendes Maß zur Beschreibung des Fließwiderstandes. Zusätzlich muss noch die Form, Anordnung und Flexibilität mit berücksichtigt werden (DITTRICH 1998, STEPHAN 2002).

3.1.2.2 Berücksichtigung des Widerstandes von holzigen Bewuchsbeständen

Weichholzauenvegetation wird gemäß der Definition von BRETSCHNEIDER & SCHULZ (1985) zu den Klassen des Mittel- bzw. Großbewuchses gezählt und ist somit als Widerstand entsprechend zu berücksichtigen (vgl. Abb. 9). Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt, werden im deutschsprachigen Raum die hydraulischen Widerstände eines Systems meist über den empirischen k_{st} -Wert oder den dimensionslosen λ -Beiwert berücksichtigt.

Im Gegensatz zum dimensionsbehafteten k_{st} -Wert ist der Widerstandsbeiwert λ der Darcy-Weisbach Gleichung dimensionsrein und kann nach EINSTEIN (1934) durch Summation der Einzelwiderstände ermittelt werden: Der Gesamtwiderstand (λ_{ges}) einer durchströmten Auenvegetation setzt sich aus den Teilwiderständen Oberflächenwiderstand (λ_o), Widerstand infolge Vegetation (λ_{veg}) und dem Interaktionswiderstand (λ_I) zusammen. Der Oberflächenwiderstand (λ_o) sowie der Interaktionswiderstand (λ_I) werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt, da in den Laboruntersuchungen das Hauptaugenmerk auf der Untersuchung von durch- und überströmter Auenpflanzen lag. Ausführliche Information zur Berechnung des Oberflächenwiderstand (λ_o) sind z.B. in LEHMANN (2005) zu finden. Der Interaktionswiderstand (λ_I), d.h. das Phänomen der Wechselwirkung zwischen Vegetation und Hauptgerinne, wird z.B. von SCHNAUDER (2004) ausführlich behandelt.

$$\lambda_{ges} = \lambda_o + \lambda_{veg} + \lambda_I$$

Gl. 3-18

wobei:

- λ_{ges} Gesamtwiderstand [-]
- λ_o Oberflächenwiderstand [-]
- λ_{veg} Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation [-]
- λ_I Widerstandsbeiwert infolge Interaktion [-]

Nach PETRYK & BOSMAJIAN (1975) kann die am Vegetationselement angreifende Kraft auf eine spezifische Grundfläche umgelegt und als Scheinschubspannung berücksichtigt werden. Notwendige Parameter zur Beschreibung der elementspezifischen Grundfläche

sind die Anordnungsparameter in und quer zur Fließrichtung (a_x, a_y) sowie die Erfassung der angeströmten Vegetationsfläche. Die Vegetationsfläche wird nach PASCHE (1984) über den Vegetationsdurchmesser d_{veg} multipliziert mit der Wassertiefe h berechnet. Setzt man diese Scheinschubspannung mit der aus der Rohrhydraulik bekannten Sohlschubspannung gleich:

$$\tau = \frac{F_{veg}}{A_{Gfl}} \quad \text{und} \quad \tau = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v_m^2 \quad \text{Gl. 3-19}$$

mit:

$$F_{veg} = \frac{1}{2} \cdot c_{WR} \cdot A_{veg} \cdot \rho \cdot v_m^2 \quad \text{und} \quad \text{Gl. 3-20}$$

$$A_{Gfl} = a_x \cdot a_y \quad \text{Gl. 3-21}$$

und löst nach λ auf, ergibt sich durch einsetzen und umformen:

$$\lambda_{veg} = \frac{4 \cdot A_{veg}}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} = \frac{4 \cdot h_{veg} \cdot d_{veg}}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} \quad \text{Gl. 3-22}$$

wobei:

- A_{Gfl} spezifische Grundfläche [m²]
- A_{veg} angeströmte Vegetationsfläche [m²]
- a_y Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung [m]
- a_x Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung [m]
- c_{WR} Gesamtwiderstandsbeiwert der angeströmten Vegetation [-]
- d_{veg} Ast-/Stammdurchmesser [m]
- F_{veg} Strömungskraft auf die Vegetationselemente [N]
- h_{veg} angeströmte Pflanzenhöhe [m]
- v_m mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- λ Widerstandsbeiwert [-]
- λ_{veg} Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation [-]
- ρ Dichte [kg/m³]
- τ Sohlschubspannung [N/m²]

Speziell für den Fall durchströmter, regelmäßig angeordneter Stabelemente (im Sinne von Vegetationsanordnungen auf einem Flussvorland) liefert LINDNER (1982) ein Verfahren zur Berechnung von λ_{veg} . In einer natürlichen Weichholzaue sind die Astabstände so weit reduziert, dass sich die Nachlaufströmungen gegenseitig überlagern und einen zusätzlichen Widerstand bewirken. Zudem bilden sich bei der Umströmung der Äste und Stämme Schwerewellen aus, die ihrerseits den Gesamtwiderstand erhöhen.

Nach SCHLICHTING (2006) können für ideale Kreiszyylinder in einem Strömungsfeld c_{WR} -Werte von 1,0 bzw. 1,2 eingesetzt werden. Die Äste im Gelände weisen jedoch keine optimale Kreiszyylinderkontur während der Durch- und/oder Überströmung auf, sodass PASCHE (1984) aufbauend auf den Erkenntnissen von LINDNER ein iteratives Verfahren zur Bestimmung des Gesamtwiderstandsbeiwerts c_{WR} entwickelte:

$$c_{WR} = c_{W\infty} \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{d_{veg}}{a_y} \cdot c_{W\infty} \right) \cdot \left(\frac{v_{veg}}{v_m} \right)^2 + \Delta c_w \quad \text{Gl. 3-23}$$

wobei:

- a_y Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung [m]
- c_W Gesamtwiderstandsbeiwert eines Kreiszyinders infolge Verbauung und Schwerewellen [-]
- c_{WR} Gesamtwiderstandsbeiwert der angeströmten Vegetation [-]
- $c_{W\infty}$ Gesamtwiderstandsbeiwert eines einzelnen Kreiszyinders [-]
- d_{veg} Ast-/Stammdurchmesser [m]
- v_m mittlere Anströmgeschwindigkeit oberstrom des Vegetationsbestandes [m/s]
- v_{veg} Strömungsgeschwindigkeit im Vegetationsbestand [m/s]

PASCHE setzt den Widerstandsbeiwert mit $c_{W\infty}$ gleich eins an. Diese Annahme basiert auf den Erkenntnissen von SCHLICHTING, dass sofern die Strömungsverhältnisse um einen Kreiszyinder im Reynoldsbereich zwischen $Re = 3 \cdot 10^2$ und $Re = 1 \cdot 10^5$ liegen, eine laminare Strömung um den Zylinder vorliegt. Die relative Anströmgeschwindigkeit $(v_{veg}/v_m)^2$ beschreibt den Einfluss der Einengung durch benachbarte Elemente. Der Einfluss der Schwerewellen wird mit Hilfe der Beziehung zwischen der Froudezahl und den Wassertiefen von oberstrom und unterstrom berechnet. Als Erfahrungswerte aus seinem Berechnungsverfahren gibt Pasche Δc_W -Werte von 1,0 bis 1,5 an. Nähere Informationen über das Berechnungsverfahren finden sich in DVWK (1991) oder PASCHE (1984).

Die Ermittlung der für die Berechnung nötigen Vegetationsparameter gestaltet sich in der Praxis derart, dass innerhalb von definierten Referenzflächen Auszählungen der Ast-/Stammanzahl je betrachteter Grundfläche durchzuführen sind. Mittels statistischer Mittelung erfolgt eine Hochrechnung auf den gesamten vorhandenen Vegetationsbestand. Das von PASCHE (1984) vorgestellte Verfahren zur Parametrisierung der Vegetation hat sich in der Literatur (vgl. SCHUMACHER 1995, LEHMANN 2005) bisher als am zuverlässigsten erwiesen, jedoch handelt es sich dabei, mit Blick auf die Beschreibung der realen Vegetationsbestände um ein sehr arbeitsintensives Verfahren.

SCHRÖDER (1998) führt daher in seiner Arbeit den Parameter „spezifische Vegetationsanströmfläche“ $\omega_{P-Schröder}$ ein. Dieser Parameter ist definiert über den Quotienten der angeströmten Vegetationsfläche zum betrachteten Gesamtvolumen und hat die Einheit $m^2/m^3 = m^{-1}$:

$$\omega_{P-Schröder} = \frac{A_{veg}}{a_x \cdot a_y \cdot h} \quad \text{bzw. für Baumbewuchs:} \quad \omega_{P-Schröder} = d_{veg} \cdot D_P = \frac{d_{veg}}{a_x \cdot a_y} \quad \text{Gl. 3-24}$$

Damit ergibt sich die Gleichung des vegetativen Widerstandsbeiwertes nach SCHRÖDER zu:

$$\lambda_{veg} = 4 \cdot \omega_{P-Schröder} \cdot r_{hy} \cdot c_{WR} \quad \text{Gl. 3-25}$$

wobei:

- A_{veg} angeströmte Vegetationsfläche [m²]
- a_y Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung [m]
- a_x Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung [m]
- c_{WR} Gesamtwiderstandsbeiwert einer Gruppe durchströmter Kreiszyinder [-]
- D_P Bestockungsdichte = Anzahl der Stämme je m² [1/m²]
- d_{veg} Ast-/Stammdurchmesser [m]
- h Wassertiefe [m]

r_{hy} hydraulischer Radius [m]

λ_{veg} Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation [-]

$\omega_{P-Schröder}$ spezifische Vegetationsanströmfläche [1/m]

Die „spezifische Vegetationsanströmfläche“ unterteilt SCHRÖDER in folgende Klassen:

- lockerer strauchartiger Bewuchs mit $\omega_{P-Schröder} = 0,1 \text{ m}^{-1}$ bis $0,5 \text{ m}^{-1}$,
- dichter strauchartiger Bewuchs mit $\omega_{P-Schröder} = 1,5 \text{ m}^{-1}$ bis $3,0 \text{ m}^{-1}$ und
- Baumbewuchs mit $\omega_{P-Schröder} = d_{veg} \cdot D_P$.

Das Verfahren nach JAMES (2004) basiert ebenfalls auf einer Volumenbetrachtung. Die Berechnung des Widerstandsbeiwertes erfolgt über eine Abstraktion der Pflanzen als idealisierter Zylinder. Deren Naturähnlichkeit wird durch die geeignete Wahl des c_{WR} -Wertes erreicht. Hierzu stellt JAMES ein Tabellenwerk für unterschiedliche c_{WR} -Werte zur Verfügung. Eine Validierung der Daten auf Basis von Naturdaten wurde nicht durchgeführt.

YAGCI (2008) unternahm den Versuch, den Vegetationsanteil über das Verdrängungsvolumen zu berechnen. Als Untersuchungspflanzen verwendete YAGCI Koniferen, sodass eine Übertragung dieser Werte für holzige Bewuchsbestände nur bedingt möglich ist.

In Laboruntersuchungen wurde und wird Vegetation häufig vereinfacht in Form von starren, regelmäßig über die Sohle angeordneten Stäben abgebildet. Der Einfluss der real vorhandenen Flexibilität sowie die real vorhandenen Wuchs- und Verästelungsformen werden mit solchen Versuchen nicht berücksichtigt. FATHI-MAGHADEM & KOUWEN (1997) zeigten die Schwierigkeiten bei der Übertragung dieser so ermittelten Widerstandsbeiwerte auf reale Natursituationen auf.

OPLATKA (1998) bezweifelte die bisherige Aussage, dass die Widerstandskraft direkt proportional zum Quadrat der Anströmgeschwindigkeit ansteigt. Er postuliert, dass flexible Widerstandskörper sich in Abhängigkeit der angreifenden Strömungskräfte mehr oder weniger umbiegen – und dadurch stromlinienförmig ausrichten. Mit der Verkleinerung der senkrecht angeströmten Vegetationsfläche verringert sich auch der hydraulische Widerstand. In ihren Versuchen mit flexiblen Stabelementen konnten FATHI-MAGHADAEM & KOUWEN (1997) zeigen, dass sich der Gesamtwiderstandsbeiwert (c_{WR}) in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit ändert. Ausgehend von diesen Erkenntnissen können sich bei der Berechnung des Widerstandsbeiwertes nach dem klassischen LINDNER/PASCHE-Ansatz Fehleinschätzungen bezüglich des Widerstandsverhaltens von holzigen Bewuchsbeständen ergeben.

JÄRVELÄ (2002) erforschte den Effekt der Besatzdichte und Belaubung auf den Strömungswiderstand. Er führte seine Untersuchungen in einer Laborrinne durch, die mit Seggen, Gras und Weiden besetzt war und zeigte, dass belaubte Weiden einen deutlich höheren Widerstandsbeiwert verursachen als unbelaubte Weiden respektive einfache symmetrische Stabformen (vgl. Abb. 12). Zudem zeigen seine Werte, dass sich die λ -Werte für belaubte Weiden mit zunehmender Reynoldszahl infolge der stromlinienförmigen Anpassung der Vegetation verkleinern.

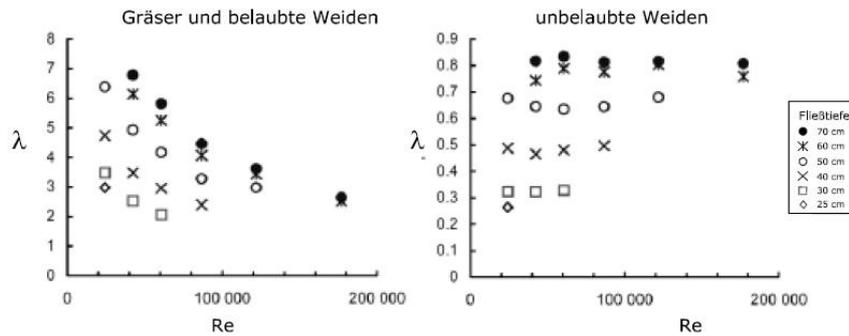


Abb. 12: Ermittelte Widerstandsbeiwerte für unterschiedliche Wassertiefen und Reynoldszahlen. Links: belaubte Weiden mit Gräser; rechts: unbelaubte Weiden. Zu beachten ist der unterschiedliche Skalenbereich der y-Achse für die beiden Diagramme (JÄRVELÄ 2002).

Dabei sind die λ -Beiwerte der belaubten Weiden von 2,0 bis 7,0 wesentlich höher im Vergleich zu den unbelaubten Weiden mit λ -Werten zwischen 0,2 bis 0,9. Bei den unbelaubten Weiden tritt ein nahezu konstanter λ -Beiwert unabhängig von der Reynoldszahl auf, während die λ -Beiwerte für belaubte Weiden mit zunehmender Reynoldszahl sinken. In beiden Fällen steigt der Widerstandsbeiwert mit steigender Wassertiefe.

FISCHENICH (2000) zeigt in seiner Arbeit unter anderem die Geschwindigkeitsprofile von durch- und überströmter Vegetation auf. In Abb. 13 ist der Verlauf der Fließgeschwindigkeit über die Tiefe für drei unterschiedliche Pflanzengesellschaftstypen schematisch dargestellt.

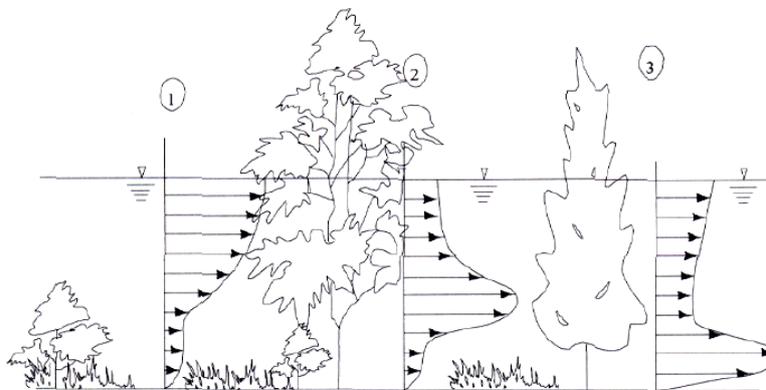


Abb. 13: Geschwindigkeitsprofil für unterschiedliche Vegetationsbestände (FISCHENICH 2000).

In Profil 1 bremst der überströmte Kleinbewuchs die Geschwindigkeit bis zur Vegetationshöhe, darüber bildet sich ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil aus. Profil 2 liefert die Geschwindigkeitsverteilung für eine kombinierte Pflanzengesellschaft aus durchströmtem Mittelbewuchs mit Kleinbewuchs. Im Bereich des Kleinbewuchses ist die Geschwindigkeit vermindert. Im Übergangsbereich, also oberhalb des Kleinbewuchses und im unteren Bereich der Belaubung des Großbewuchses, steigt die Fließgeschwindigkeit an, wird aber im Bereich dichter Belaubung wieder geringer und verläuft nahezu gleichbleibend bis zum Wasserspiegel. Die Verteilung der Geschwindigkeit bei durchströmtem Großbewuchs ohne Kleinbewuchs ist in Profil 3 aufgezeigt. Dabei nimmt die Fließgeschwindigkeit, ausgehend von der Sohle betrachtet schnell zu und wird im Bereich der

Verästelung/des Laubes stark abgebremst, wobei in Richtung Wasserspiegel die Geschwindigkeit leicht, aber stetig zunimmt.

WILSON et al. (2003) untersuchten den Effekt der Turbulenzstrukturen innerhalb überströmter, flexibler Vegetation. Die Studie zeigt, dass analog den schematischen Darstellungen von FISCHENICH innerhalb der Pflanzen das vertikale Geschwindigkeitsprofil der Strömung keine Ähnlichkeiten zum theoretisch, angenommenen, logarithmischen Geschwindigkeitsprofil aufweist, womit man außerhalb der Anwendungsbereiche der klassischen Fließformeln liegt. Des Weiteren stellte WILSON in einer weiteren Veröffentlichung aus dem Jahre 2006 fest, dass die Anwendung des starren Stabmodells zur Beschreibung natürlicher Vegetation zu einer Unterschätzung der Widerstandskraft nahe der Sohle führt. Gleichzeitig kommt es zu einer Überschätzung der Sohlschubspannung.

LEWANDOWSKI (1993) liefert eine umfassende Beschreibung der Einflussgrößen und Strömungsphänomene, die innerhalb eines Vegetationsfeldes beobachtet werden können. Unter anderem erläutert LEWANDOWSKI auf theoretischer Basis das Biegen bzw. das seitliche „Ausweichen“ von Pflanzen. Ursachen dieses „seitlichen Ausweichens“ können Unterschiede in der Steifigkeit oder Höhenstufenentwicklung zwischen den jeweiligen Pflanzen sein. Daher treten diese Effekte vor allem dann auf, sobald die Pflanzen überströmt werden. Durch das „seitliche Ausweichen“ einer Pflanze entstehen Freiflächen (vgl. A_c -Flächen in Abb. 14), die der Strömung einen geringeren Widerstand entgegen setzen. Mit steigender Strömungskraft innerhalb dieser Freifläche wird die Pflanze weiter seitlich ausgelenkt bzw. in Fließrichtung geneigt. Dies geschieht so lange, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen dem „seitlichen Ausweichen“ und der anwachsenden Strömungskraft eingestellt hat. Dieses Verhalten führt zu einer Teilung der Strömung, wobei neue Fließpfade entstehen. Diese Fließpfade führen zu einer Neuverteilung der lokalen Fließgeschwindigkeiten. Die Entstehung von Fließpfaden innerhalb der Vegetation ist schwer vorherzusagen. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens in lichterem Beständen höher als in dichteren. Infolge der Fließpfade mit den damit einhergehenden Bereichen mit höheren Fließgeschwindigkeiten sinkt der Gesamtströmungswiderstand innerhalb dieses Abschnitts. In Abb. 14 ist eine mögliche Verteilung der Fließpfade innerhalb eines Vegetationsbestands schematisch dargestellt.

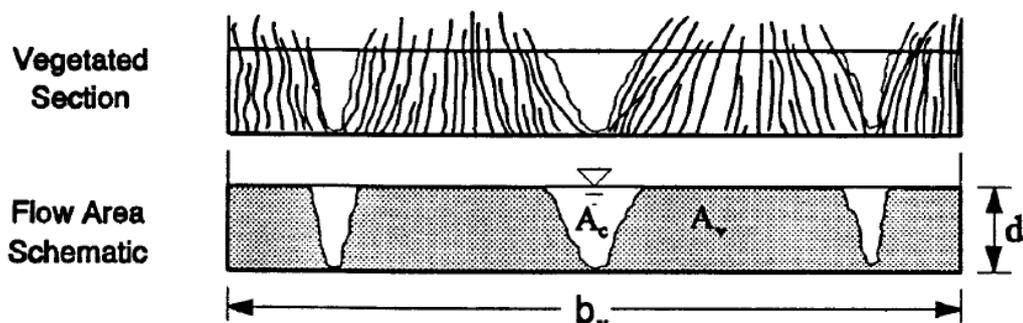


Abb. 14: Verteilung von Fließpfaden innerhalb eines Vegetationsbestands (Lewandowski 1993).

Die hier zitierte Literatur zeigt, dass hinsichtlich der Vegetationshydraulik noch keine allgemeingültigen Berechnungsansätze verfügbar sind. Das Verfahren nach LINDNER/PASCHE lässt sich im Vergleich zu anderen Ansätzen aufgrund der Untersuchungen

von RICKERT (1980), SCHUMACHER (1995), SCHNAUDER (2004) und LEHMANN (2005) am zielführendsten anwenden. Jedoch werden die Effekte von z. B. Belaubung oder Flexibilität in dem Berechnungsansatz nach PASCHE nicht berücksichtigt. Um daher die Belastbarkeit der Berechnungsergebnisse für holzige Bewuchsbestände weiter zu verbessern, muss zusätzlich auf die Flexibilität und die Erscheinungs- und Anordnungsform realer Vegetationselemente weiter eingegangen werden.

3.2 Parameter zur Vegetationsbeschreibung

Das hydraulische Widerstandsverhalten durchströmter holziger Bewuchsbestände wird durch die Pflanzendichte sowie deren Sukzessionsstadium bestimmt. Natürliche Weichholzvegetation ist durch eine große Variabilität bezüglich Flexibilität und Wuchsdichte gekennzeichnet. Diese sind wiederum abhängig von der natürlichen Sukzessionsfolge und der je nach Jahreszeit unterschiedlichen Belaubungsintensität (JÄRVÄLA 2002).

Eine exakte Berechnung des vegetationsspezifischen Widerstands geht mit einer möglichst exakten Beschreibung der Pflanzeigenschaften einher. In der Literatur werden unterschiedliche Verfahren zur Beschreibung der Strauch-, Baum- oder Heckenvegetation angegeben. In der hydrodynamisch-numerischen Berechnung (1D-/ 2D-HN-Modell) ist die Beschreibung der Vegetation in Form eines empirischen, dimensionsbehafteten Widerstandsparameters (z. B. k_{sr} - oder n -Wert) weit verbreitet (vgl. DVWK 1999).

An Stelle der Verwendung eines empirischen Widerstandsparameters sind in der Literatur auch Verfahren aufgeführt, die die Vegetationseigenschaften über geometrische Parameter (a_x , a_y , d_{veg}) beschreiben. Diese Verfahren ermöglichen die Berechnung des hydraulischen Widerstandsbeiwertes mittels dimensionsreiner Formelansätze. (vgl. Kapitel 3.1).

3.2.1 Vegetationsbeschreibende Parameter nach Lindner & Pasche

Das von PASCHE (1984) vorgestellte Verfahren zur Beschreibung der Vegetation in Form von messtechnisch erfassbaren Parametern berücksichtigt die Anordnungsparameter in und quer zur Fließrichtung (a_x , a_y) sowie die angeströmte Vegetationsfläche (A_{veg}). Sie ist das Produkt aus dem mittleren Ast- bzw. Stammdurchmesser der Vegetation (d_{veg} bzw. d_p) und der Wassertiefe (h).

Tabelle 2: Vegetationsparameter für unterschiedliche, flussbegleitende Vegetationsarten (BWK 2000).

Bewuchsort	Entwicklungsstand	d_p [m]	a_x [m]	a_y [m]
Röhricht	–	0,007	0,02	0,02
Sträucher	einjährig	0,03	0,3	0,3
	mehnjährig	0,045	0,2	0,2
Schilf	dicht	0,01	0,05	0,05
Büsche, gleichmäßiger Besatz	klein	0,3	1,5	1,5
	mittlere Größe	0,4	3,0	3,0
	groß	0,8	3,0	3,0
	aufgelockert	0,1	4,0	4,0
	in kleineren Gruppen	0,5	6,0	6,0
	in großen Gruppen mit Kronenschluß	1,0	7,0	7,0
Bäume	lockerer Besatz	0,5	10,0	10,0
	dichter junger Besatz	0,2	5,0	5,0
	mehnjähriger Besatz	0,4	5,0	5,0
	dichter mehnjähriger Besatz	0,8	5,0	5,0

Diese Parameter werden nach Empfehlung der DVWK (1991) und des BWK (2000) direkt im Gelände bestimmt. Sofern eine Vor-Ort-Erhebung nicht möglich ist, empfiehlt der BWK die Vegetationsparameter aus den in Tabelle 2 aufgeführten Erfahrungswerten von ROUVÉ (1987) und KÖNEMANN (1981) zu entnehmen.

3.2.2 Angeströmte Vegetationsfläche

Nach OPLATKA (1998) reduziert sich die angeströmte Vegetationsfläche (A_{veg}) mit steigender Anströmgeschwindigkeit (v_m). In Abb. 15 ist die Flächenkontraktion schematisch als Drauf- und Seitenansicht dargestellt.

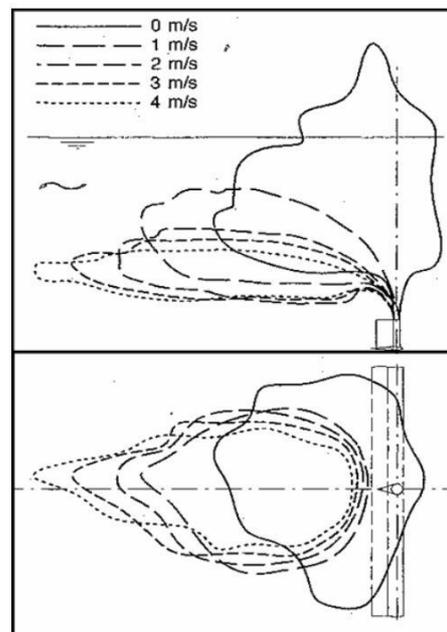


Abb. 15: Schematische Darstellung der Flächenkontraktion von belaubten Weiden als Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten) (OPLATKA 1998).

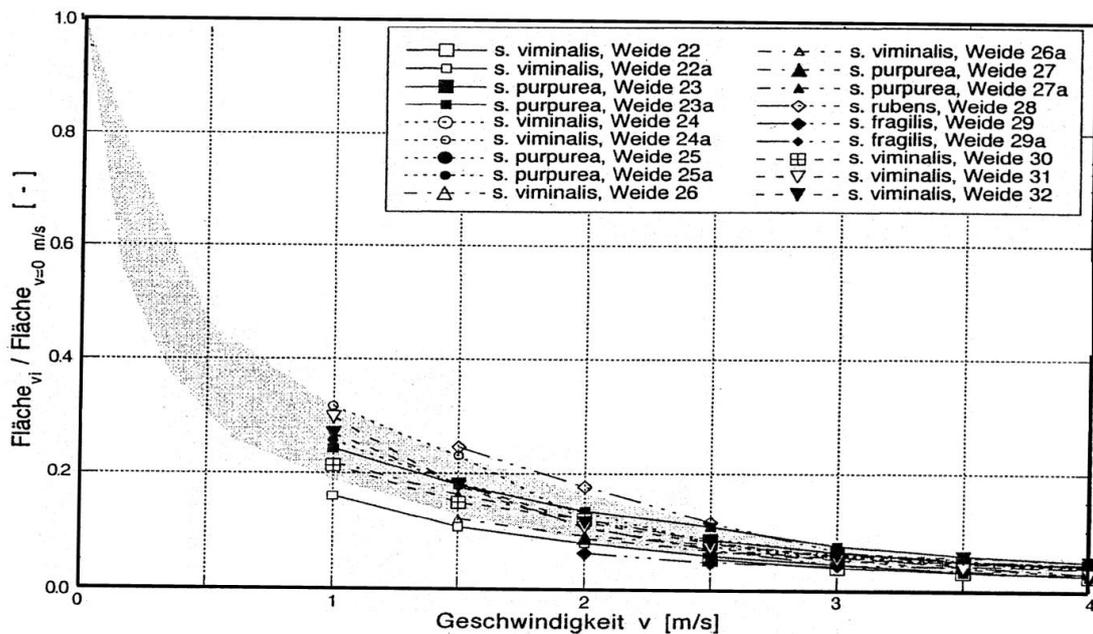


Abb. 16: Flächenkontraktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche von belaubten Weiden bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (OPLATKA 1998); s. = Salix.

Die Flächenkontraktion in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten ist für überströmte belaubte Weiden in Abb. 16 dargestellt. Eine Fließgeschwindigkeit von 1 m/s bewirkt eine Kontraktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche um 65 – 85 %, d.h. der Flächenkontraktionsfaktor liegt zwischen 0,15 – 0,35. Hier ist zu beachten, dass OPLATKA das Flächenkontraktionsverhältnis für Einzelpflanzen bestimmt. Der Einfluss überlagerter Nachlaufströmungen infolge von Gruppenanordnungen bleibt unberücksichtigt.

3.2.3 Offene Fragen

Das Ziel dieser Arbeit ist, den hydraulischen Widerstand von Weiden und Hecken für die hydrodynamisch-numerische Berechnung belastbar quantifizieren zu können. Bezüglich der geeigneten, vegetationspezifischen Beschreibung unterschiedlicher holziger Bewuchsbestände weist die Literatur noch Mängel auf. Des Weiteren konnten in der Literatur keine Daten über die angeströmte Vegetationsfläche (A_{veg}) für unterschiedliche Altersstadien gefunden werden, die aus im Gelände erhobenen Daten ermittelt wurden.

Generell sollten die im Labor ermittelten Widerstandsbeiwerte auf die Natur übertragbar sein. Im Sinne der Gesetzmäßigkeiten wasserbaulicher Modellähnlichkeit müssen im Labor wie auch im Gelände die gleichen Parameter erhoben werden. Die Vegetationsparameter sind ursprünglich aus Laboruntersuchungen unter Verwendung von starren Stäben und definierten Abständen abgeleitet worden. Dabei ist gerade die hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche ($A_{veg} = d_{veg} \cdot h$), vor allem bei belaubter Vegetation, kritisch zu hinterfragen.

Die Erhebung der Vegetationsparameter im Gelände ist eine sehr zeitintensive Arbeit. Des Weiteren muss die veränderte hydraulisch wirksame Vegetationsfläche für den durchströmten Fall, d.h. während eines Hochwassers abgeschätzt werden. Deshalb sind

Vergleichsuntersuchungen zur Bestimmung der Flächenkontraktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche im Labor sinnvoll.

OPLATKA untersuchte in seiner Arbeit die Flächenkontraktion bei Fließgeschwindigkeiten von größer 1 m/s. Im Mittel- und Unterlauf der Elbe sind die Fließgeschwindigkeiten auf den Vorländern bei einem HQ_{100} meist kleiner 1 m/s. Daher ist die Bestimmung des Flächenkontraktionsverhältnisses für geringere Fließgeschwindigkeiten notwendig.

3.3 Anforderungen an eine modelltechnische Untersuchung

Die notwendigen Daten zur Bestimmung des hydraulischen Widerstands von holzigen Bewuchsbeständen für unterschiedliche Sukzessionsstadien können im Gelände und/oder in einem physikalischen Modell im Labor erhoben werden. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile für Messungen im Gelände und in einem physikalischen Modell aufgezeigt.

a) Messungen im Gelände:

- | | |
|------------|--|
| Vorteile: | - keine Maßstabeffekte |
| Nachteile: | - Randbedingungen sind nicht klar definiert
(z.B. unterschiedliche Sohlrauheiten, Durchfluss) |
| | - hohe Streubreite der Daten
(z.B. Fließgeschwindigkeit, Vegetationszusammensetzung) |

Daraus leitet sich die Frage ab: „Wie aussagekräftig sind lokal gemessene Fließgeschwindigkeiten bezüglich des „wahren“ Mittelwertes im Gelände?“

b) Messungen im Labor:

- | | |
|------------|---|
| Vorteile: | - definierte Randbedingungen (Durchfluss, Sohlrauheit) |
| | - gleichgerichtete Strömung |
| | - systematische Vegetationsverteilung |
| Nachteile: | - Maßstabeffekte aufgrund biomechanischer Eigenschaften
(z.B. die Biegesteifigkeit der Äste ändert sich mit dem Alter) |

Daraus leitet sich die Frage ab: „Wie muss ein Modell aufgebaut sein, dass die Übertragbarkeit auf der im Gelände gemessenen Daten gewährleistet ist?“

3.3.1 Messungen im Gelände

Der Lebensraum Aue ist durch die abiotischen Faktoren wie schwankende Grundwasserstände und regelmäßige Überflutungen charakterisiert. Aufgrund der Strömungskraft des Wassers unterliegt das Oberflächenrelief der Aue beim Hochwasser stetigen Veränderungen. Bereiche mit geringen Fließgeschwindigkeiten, z.B. innerhalb dichter Krautfluren oder im Strömungsschatten hinter Sträuchern und Bäumen, können nach einer ablaufenden Hochwasserwelle hohe Sedimentationsraten aufweisen (vgl. Abb. 17). Demgegenüber stehen lokal oder auch flächenhaft auftretende Erosionserscheinungen (PATT 2004). Die damit einhergehenden, unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und Grundwasserflurabständen innerhalb einer Aue bilden die Grundlage für unterschiedliche Zo-

nen mit den jeweils typischen Pflanzengesellschaften (vgl. TOCKNER UND STANFORD 2002 und Kapitel 2.1: Ökologie der Auen).

Die Pflanzengesellschaften in einer Aue weisen einen hohen Grad an Heterogenität auf. Diese ist abhängig von der Jahreszeit und der Dynamik der Sukzession. Zusätzlich ändern sich die biomechanischen Eigenschaften holziger Pflanzen mit dem Alter der Pflanze (LÜTTGE et al 1999). WUNDER (2008) zeigt in ihrer Arbeit unter anderem auf, dass die Biegesteifigkeit von Weiden mit dem Durchmesser respektive Alter der Äste zunimmt. Eine dynamische, sukzessionsgeprägte Aue ist durch Strukturvielfalt und der damit einhergehenden hohen Diversität in der Fließgeschwindigkeitsverteilung gekennzeichnet.

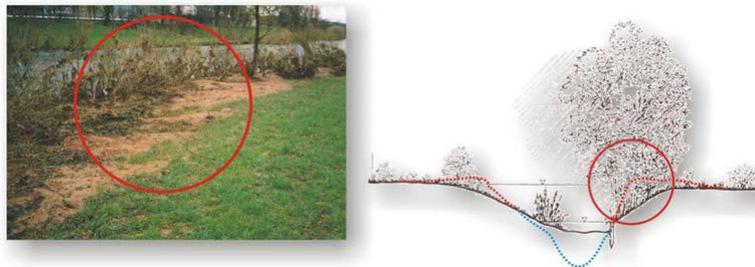


Abb. 17: Sedimentation von Sanden im bewuchsbestandenen Uferbereich an der Enz in Pforzheim nach einem Hochwasser (links). Prinzipskizze zur mittel- bis langfristigen Veränderung eines Gewässerbettes infolge solcher Auflandungen in Uferbereichen (rechts) (LEHMANN 2005).

Der große Vorteil von Fließgeschwindigkeitsmessungen im Gelände ist, dass keine Maßstabeffekte auftreten. Vor allem die biomechanischen Eigenschaften (z.B. Biegesteifigkeit der Pflanze, Verhältnis Blattdichte zu Astdichte) und die Interaktionsprozesse zwischen Krautfluren und Strauch-/Baumgesellschaften bereiten bei der geometrischen Verkleinerung im Labor Probleme. Auf der anderen Seite muss aufgrund der großen Heterogenität innerhalb der Auenpflanzengesellschaften jedoch die Frage gestellt werden, wie aussagekräftig Fließgeschwindigkeitsmessungen im Gelände sind.

Die Analyse der Variabilität der Fließgeschwindigkeit erfolgt aus Mangel an hochaufgelösten Naturmessdaten auf Basis von Labormessungen; wohl wissend, dass die Labormessungen mit Maßstabeffekten behaftet sind. Ungeachtet der Maßstabeffekte stellt sich das grundlegende Phänomen der vegetationsbedingten Geschwindigkeitsbeeinflussung auch in den Laboruntersuchungen ein. Dies ermöglicht eine qualitative, jedoch keine quantitative Analyse.

Der vegetative Widerstandsbeiwert wird mittels Rückrechnung für die unterschiedlichen Pflanzenanordnungssysteme bestimmt. Eine zentrale Eingangsgröße der Rückrechnung ist die mittlere Fließgeschwindigkeit. Die Schwierigkeit der Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeit, rein aus lokal gemessenen Fließgeschwindigkeiten, soll an einem Beispiel erläutert werden. Hierzu wurden im Labor mittels Vielpunktmessungen unter Verwendung eines elektromagnetisch-induktiven 2D-Fließgeschwindigkeitsmessgeräts (EMS) die lokalen Fließgeschwindigkeiten in Hauptfließrichtung (u) sowie deren Senkrechte (v) gemessen. Die Messpunkte innerhalb einer Messlotrechten hatten einen Abstand von einem Zentimeter. Je größer die Anzahl der Lotrechten innerhalb eines Querprofils, desto höher aufgelöst kann die Streubreite der Fließgeschwindigkeiten innerhalb

der horizontalen Ebene bestimmt werden. In Abb. 18 (Mitte und unten) ist die Lage der Messpunkte im Querschnitt für unbelaubte und belaubte Weiden dargestellt. Zusätzlich sind auf der Seite oben die Messpunkte für den leer-Zustand, d.h. gleicher Durchfluss jedoch ohne Vegetation, abgebildet. Der leer-Zustand stellt den Referenz-Zustand des Systems dar.

Abb. 19 zeigt die Streubreite der gemessenen Geschwindigkeitsprofile. Die einzelnen Lotrechten der Fließgeschwindigkeitsmessungen sind blau-grau eingefärbt; die Linie mit den roten Quadraten symbolisiert den Mittelwert aller gemessenen Lotrechten. Im leer-Zustand liegen nahezu alle Lotrechten auf einer Linie. Die Lotrechten der Messungen mit unbelaubten Weiden ergibt eine einheitliche Streubreite der Fließgeschwindigkeiten über die Tiefe. Lediglich Lotrechte 33 weist im Vergleich zu den restlichen Lotrechten dieses Querprofils deutlich geringere Fließgeschwindigkeiten auf. Bei dieser Messung war die EMS-Messsonde direkt hinter der Pflanze positioniert (vgl. Abb. 18). Ursache für die deutlich reduzierten Fließgeschwindigkeiten unterstrom der Pflanze sind die Nachlaufwirbel, die sich bei der Pflanzenumströmung bilden (vgl. PASCHE 1984).

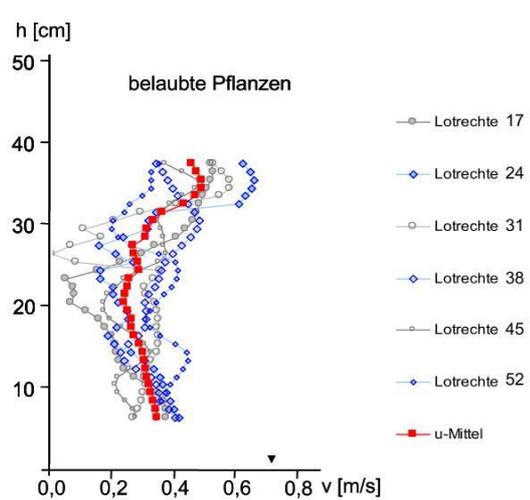
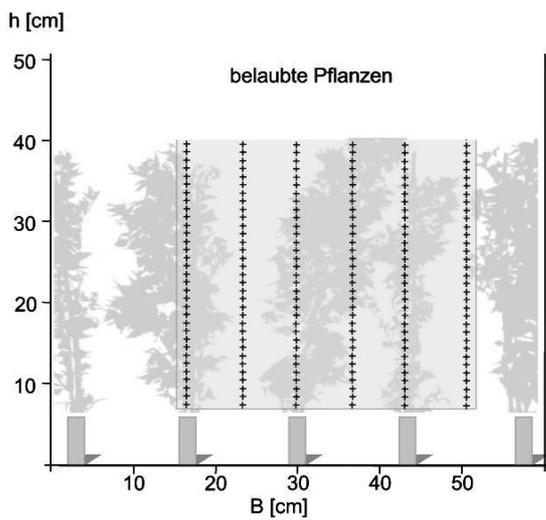
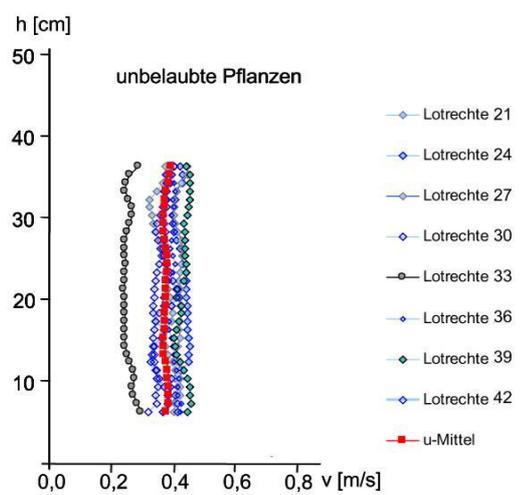
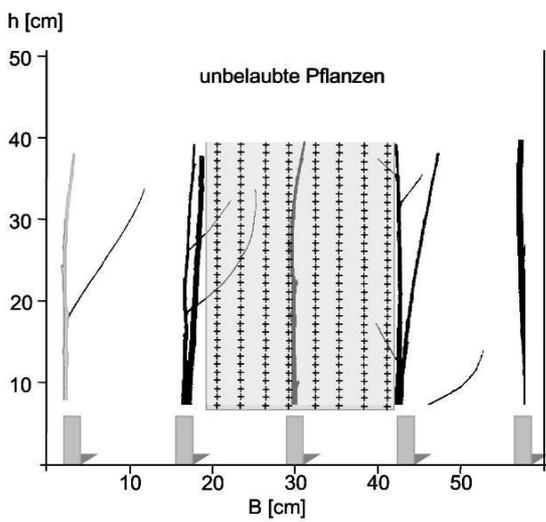
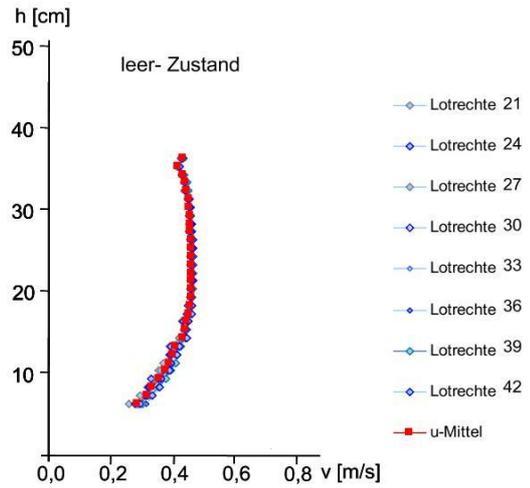
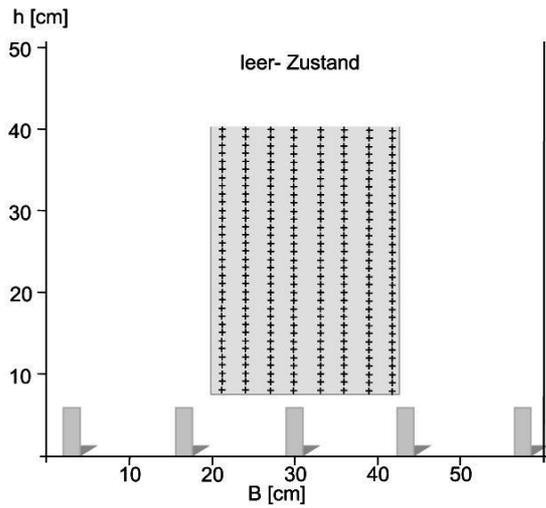


Abb. 18: Lage der Fließgeschwindigkeitsmesspunkte im Querprofil für den Referenzzustand (oben) sowie für unbelaubte und belaubte Pflanzen (Mitte und unten).

Abb. 19: Fließgeschwindigkeitslotrechte des leer-Zustands (oben) sowie für unbelaubte und belaubte Pflanzen (Mitte und unten).

Da es bei dieser Untersuchung vor allem darauf ankam die Streubreite des Systems zu erfassen, wurden bei den belaubten Pflanzen alle Lotrechten direkt hinter bzw. zwischen den einzelnen Pflanzen erhoben (vgl. Abb. 18). Die Messungen zeigen, dass die Streubreite bei belaubten Weiden im Vergleich zu unbelaubten Weiden noch höher ausfällt (vgl. Abb. 19 oben). Die Strömungskraft des Wassers führt zu einer stromlinienförmigen Ausrichtung der Pflanzen; die ebenfalls von LEWANDOWSKI (1993) beobachteten Fließpfade entstehen. Dies lässt sich an der Lotrechte 24 in der Abb. 19 für belaubte Pflanzen zeigen. Die gemessenen Fließgeschwindigkeiten sind in dieser Lotrechte bis zu einer Höhe von ca. 30 cm geringer als die mittleren Fließgeschwindigkeiten. In einer Höhe von ca. 33 cm zeigt das Geschwindigkeitsprofil der Lotrechte 24 eine deutliche Beschleunigung. Diese Beschleunigung entsteht entweder aufgrund einer starken Biegung in der Vertikalen oder durch ein seitliches Ausweichen der Pflanzen. Diese neu entstandene „Freifläche“ innerhalb des Abflussquerschnitts besitzt im Vergleich zum direkten Strömungsumfeld einen geringeren Strömungswiderstand. In der Folge steigt die Fließgeschwindigkeit lokal an. In Abb. 20 oben sind die Vielpunktmessungen der Fließgeschwindigkeit als Isotachendiagramme abgebildet. Der Einfluss der Vegetation auf die Strömung ist zu erkennen, sobald die relative Lage² der jeweiligen durchströmten Pflanzenarten transparent überlagert werden (vgl. Abb. 20 unten).

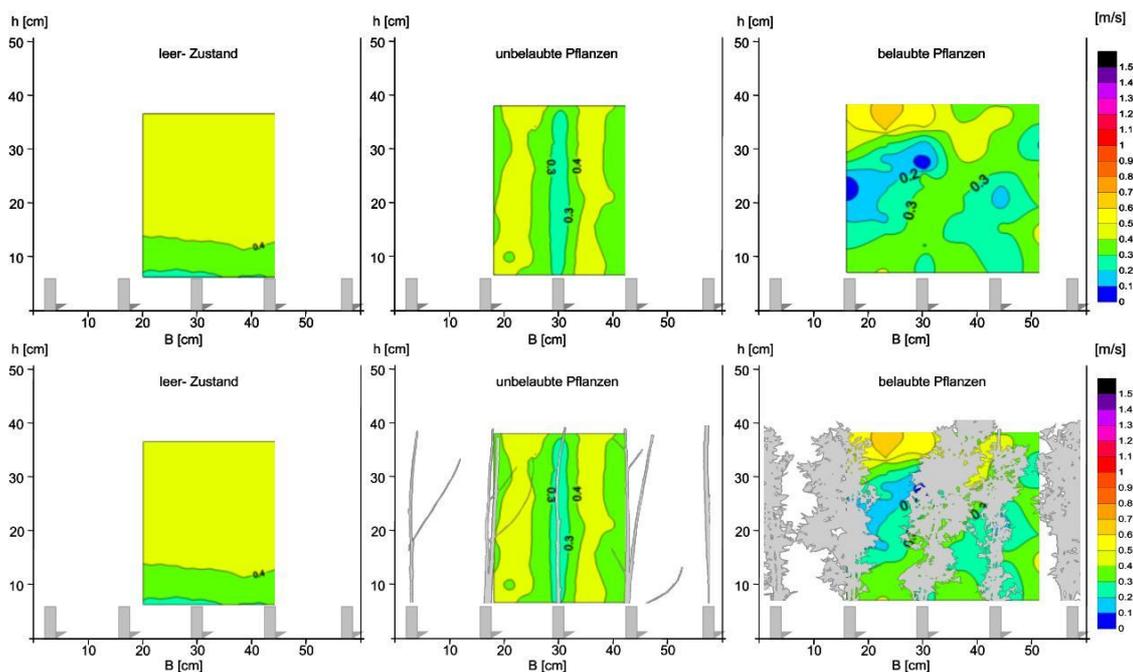


Abb. 20: Oben: Die Fließgeschwindigkeiten als Isotachendiagramme für den leer-Zustand sowie unbelaubte und belaubte Pflanzen; Unten: Isotachendiagramme überlagert mit der relativen Position der Pflanzen im Querschnitt mit Fließrichtung in Zeichenebene.

² Die Bilder der durchströmten Vegetation konnten aus messtechnischen Gründen nicht während der eigentlichen Messung der Fließgeschwindigkeiten aufgenommen werden, da der Einfluss der verwendeten Unterwasserkamera auf die Strömung zu groß ist. Daher erfolgt die Bildaufnahme separat. Damit geben die durchströmten Pflanzenbilder lediglich die relative und nicht die tatsächliche Position der Pflanzen wieder.

Zur Beantwortung der Frage: „Wie aussagekräftig sind Fließgeschwindigkeitsmessungen im Gelände?“ ist festzuhalten: sobald ein hoher Anteil an biegsamem Pflanzenmaterial (z.B. Blätter, junge Asttriebe) das System bestimmt, steigt die Streubreite der gemessenen Fließgeschwindigkeiten. Damit kann die Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit nicht durch Messung an einzelnen, lokalen Punkten oder Lotrechten im Gelände erfolgen, sondern setzt ein dichtes Netz von Vielpunktmessungen voraus. Letzteres ist jedoch nur mit einem großen Mess- und Zeitaufwand realisierbar. In Konsequenz bedeutet dies, dass Fließgeschwindigkeitsmessungen im Gelände nur als Relativwerte, aber keinesfalls als Absolutwerte betrachtet werden können.

3.3.2 Messungen im Labor

In diesem Unterkapitel soll der Frage nachgegangen werden, wie das physikalische Modell aufgebaut sein sollte, damit die gemessenen Werte auf die Natur übertragen werden können. Zur Klärung dieser Frage werden zuerst die Anforderungen gemäß einer Ähnlichkeitsbetrachtung diskutiert. Die Berechnung des Widerstandbeiwertes erfolgt auf Basis der Gauckler-Manning-Strickler- sowie der Darcy-Weisbach-Gleichung. Beide Gleichungen finden nur unter Einhaltung von Annahmen Gültigkeit. Diese Annahmen und deren Bedeutung für den physikalischen Versuchsaufbau werden im Kapitel Systemanalyse des Laborerinnenaufbaus erläutert.

3.3.2.1 Ähnlichkeitsbetrachtung

Grundsätzlich lassen sich im physikalischen bzw. hydraulischen Modellwesen nach KOBUS (1978) zwei Hauptgruppen unterscheiden:

- Ähnliche Modelle: Größenmaßstäbe stehen im Bezug zum Realmodell
- Unähnliche Modelle: Größenmaßstäbe stehen nur teilweise in Bezug zum Realmodell (beschreibende oder qualitative Modelle)

Die Forderung nach mechanischer Ähnlichkeit zwischen dem hydraulischen Modell und der Natur setzt geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit voraus (DORER 1984). Geometrische Ähnlichkeit bedeutet, dass alle Längen des Modells unter Berücksichtigung der Maßstabszahl auf die Natur übertragbar sind (= ähnliche Geometrie in Modell und Natur).

Die kinematische Ähnlichkeit ist der geometrischen Ähnlichkeit übergeordnet und erfordert, dass die Geschwindigkeits-, Zeit- und Beschleunigungsvorgänge vom Modell mit jeweils gleicher Maßstabszahl in die Natur übertragen werden (= ähnliche Stromlinienbilder in Modell und Natur).

Die dynamische Ähnlichkeit basiert auf der geometrischen und kinematischen Ähnlichkeit und besagt, dass alle Kräfte in einem Modell mit der gleichen Maßstabszahl in die Natur übertragen werden, d. h. ähnliche Kraftecke in Modell und Natur (BOLLRICH 1989). Im

Rahmen der vorliegenden Arbeit wird, aufgrund der biomechanischen Eigenschaften³ der Strauch- und Baumpflanzen (vgl. WUNDER 2008), mit einem hydraulisch unähnlichen Modell gearbeitet.

Für die naturähnliche Simulation der Strömungsvorgänge ist die Einhaltung der dynamischen Ähnlichkeit hinsichtlich der die Strömungsvorgänge bestimmenden und beeinflussenden Kräfte erforderlich. Die bei den vorliegenden Strömungsverhältnissen betrachteten Kräfte sind:

- die Schwerkraft, welche den Abflussvorgang in Gang setzt und aufrecht erhält;
- die Reibungs- und Zähigkeitskräfte, die durch Fließverluste Energielinien- und Wasserspiegelgefälle erzeugen und die Form der Geschwindigkeitsprofile bestimmen;
- die Trägheitsreaktion des Fluids, welche infolge des Beharrungsvermögens jeder Bewegungsänderung entgegen wirkt.

Der Einfluss der einzelnen Kräfte auf das Strömungsgeschehen wird durch so genannte strömungsmechanische Kennzahlen, welche auch als Quotienten der Trägheitsreaktion und der betrachteten Kraft definiert werden können, ausgedrückt. Die Kennzahlen lauten für die oben genannten Kräfte:

• Froude- Zahl:
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\text{Trägheitsreaktion}}{\text{Schwerkraft}}$$
 Gl. 3-26

• Reynolds- Zahl:
$$Re = \frac{v \cdot r_{hy}}{\nu} = \frac{\text{Trägheitsreaktion}}{\text{Zähigkeitskraft}}$$
 Gl. 3-27

wobei:

- Fr* Froudezahl [-]
- g* Erdbeschleunigung [m/s²]
- h* Wassertiefe [m]
- Re* Reynoldszahl [-]
- r_{hy}* hydraulischer Radius [m]
- v* mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- ν* kinematische Viskosität [m²/s]

Eine naturähnliche Übertragung sowohl der Schwere- als auch der Zähigkeitskräfte in ein verkleinertes Modell ist praktisch nicht möglich, da die Erdbeschleunigung und die Viskosität gewissermaßen Konstanten sind und nicht gleichzeitig kompensiert werden können. Wegen der Dominanz der Schwerkraft im vorliegenden Fall ist das Modell auf die Ähnlichkeit der Froudezahl abgestimmt.

Wie bereits erwähnt, hängen die biomechanischen Eigenschaften der Pflanzen, z.B. die Steifigkeit der Äste nicht nur vom Durchmesser, sondern auch von deren Alter ab. Des Weiteren stellen Anordnungsmuster der Vegetationsverteilung im Labor immer eine vereinfachte Abbildung der Natur dar. In Konsequenz folgt daraus, dass bei Untersuchungen

³ Unter biomechanischen Eigenschaften ist das Verhältnis der Steifigkeit zum Astdurchmesser zu verstehen. Wunder (2008) zeigt in ihrer Arbeit, dass die Biegesteifigkeit mit steigendem Astdurchmesser zunimmt. Als Ursache nennt sie den Aufbau des Stammgewebes. Jungtriebe von Weiden besitzen relativ gesehen einen hohen Anteil an weichem Holz im Verhältnis zu dreijährig oder noch älteren Weidenzweigen.

mit natürlicher Vegetation bei einem Maßstab kleiner 1:1 immer nur eine vergleichende Betrachtung der Ergebnisse zwischen Labor und Natur erfolgen kann. Um eine Übertragung der Ergebnisse auf die Natur zu gewährleisten, muss daher ein Abgleich zwischen den im Labor gewonnenen Daten mit Naturdaten erfolgen.

HABERSACK (2009) hat Untersuchungen zur Bestimmung des k_{st} -Widerstandsbeiwertes von unterschiedlichen Wald-, Strauch- und Wiesengesellschaften durchgeführt. Diese Daten basieren auf Rückrechnungen von Naturdaten. Habersack selbst ging nicht direkt auf den Lebensraum Aue ein. Dennoch liefert er k_{st} -Bandbreiten zur Quantifizierung der unterschiedlichen Vegetationswiderstände im Gelände. Dies ermöglicht eine Übertragung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Laborergebnisse auf die Natursituation. Dabei ist zu beachten, dass die k_{st} -Werte immer an die jeweiligen Gewässer- und Abflusssituationen gebunden sind und keine Absolutwerte darstellen. Das Hauptziel der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Modelluntersuchungen liegt in der Bestimmung von dimensionslosen, systemunabhängigen Widerstandsbeiwerten für unterschiedliche Auenpflanzengesellschaften.

3.3.2.2 Systemanalyse des Laborgerinnenaufbaus

Das Hauptziel der Laboruntersuchung ist die Bestimmung der Widerstandsbeiwerte von holzigen Bewuchsbeständen. Für den Aufbau der Untersuchungen ergeben sich folgende weitere Fragen:

- Wie sehen die systembedingten Eigenschaften des physikalischen Modells aus. Welche Konsequenzen ergeben sich daraus bezüglich der Ergebnisinterpretation?
- Wie lang soll/muss der eingebaute Vegetationsbestand im physikalischen Modell sein?
- An welchen Stellen müssen die entsprechenden Daten erhoben werden, damit die rückgerechneten Widerstandsbeiwerte das System „richtig“ wiedergeben?

Die Randbedingungen zur Verwendung der Grundgleichung der eindimensionalen Strömungsanalyse sind nach NAUDASCHER (1992) definiert zu:

- a) die Flüssigkeit ist homogen und inkompressibel ($\rho = \text{const}$),
- b) die Strömung ist stationär und gleichförmig mit $I_E = I_{Wsp} = I_{So}$,
- c) die Strömung wird nur von Schwerkraft und Druckkräften beeinflusst (d.h. Zähigkeitseffekte werden nicht berücksichtigt),
- d) die betrachteten Querschnitte liegen in Zonen hydrostatischer Druckverteilung (d.h. in Zonen mit krümmungsfreien Stromlinien)

Vor allem die Einhaltung von Punkt b) verdient bei Untersuchungen in Laborgerinnen eine gesonderte Betrachtung. Denn die Einhaltung einer stationären, gleichförmigen Strömung, d.h. die Einhaltung der Normalabflussbedingungen, wird bei der Anwendung der Gauckler-Manning-Strickler- und Darcy-Weisbach-Fließformel vorausgesetzt.

Im Folgenden soll eine Systemanalyse dahingehend durchgeführt werden, inwieweit die Forderung nach Normalabfluss im Rahmen der Laboruntersuchungen für die angedachten Versuche realisierbar ist. Hierfür werden zuerst die zu erwartenden Wasserspiegellagen theoretisch abgeleitet.

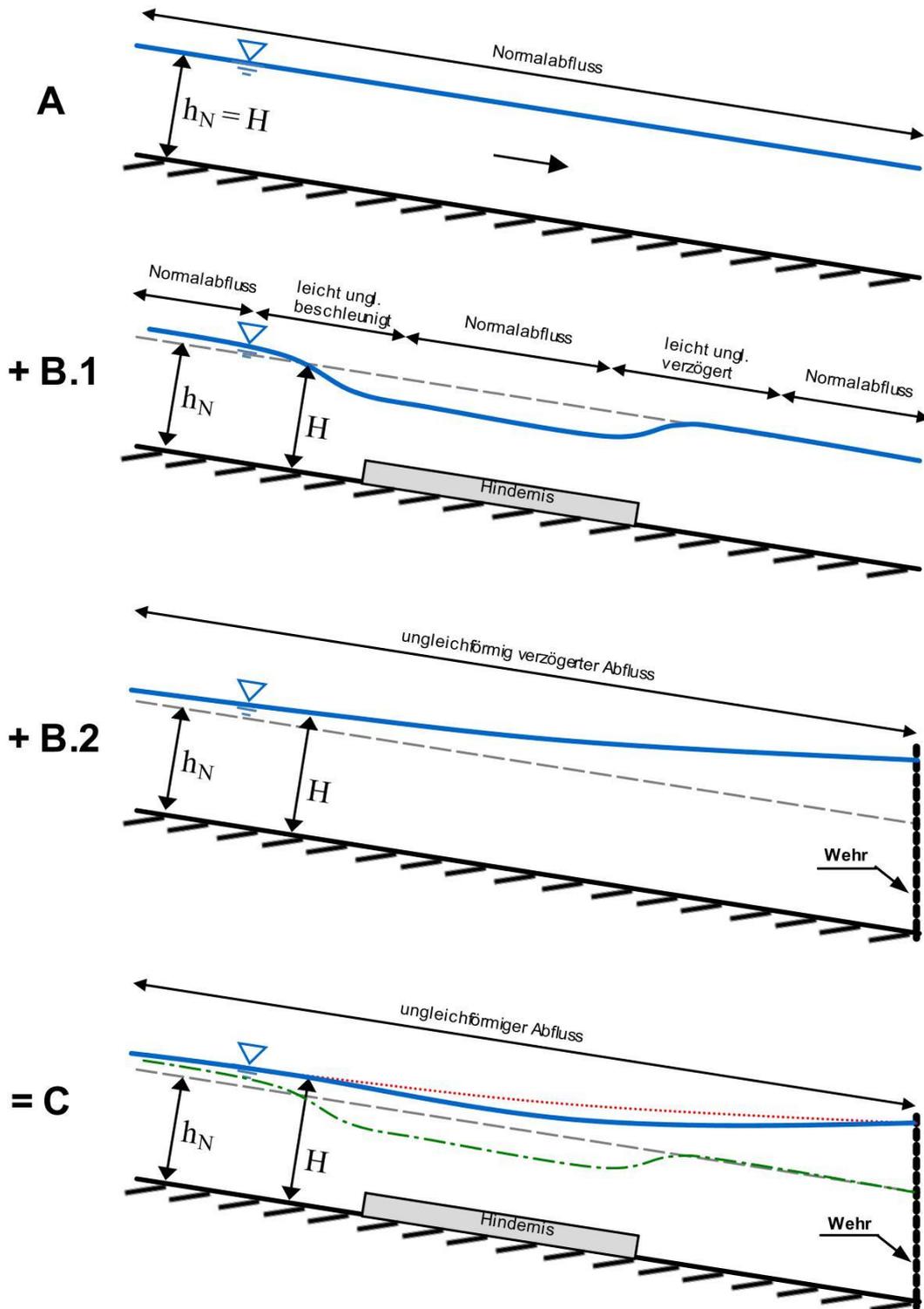


Abb. 21: Verlauf des Wasserspiegels: (A) unter Normalabfluss, (B.1) bei Überströmungen einer Sohlschwelle, (B.2) bei Rückstauwirkungen infolge eines Wehres, (C) die Überlagerung der Effekte A und B.

In Abb. 21 ist der systembedingte Verlauf des Wasserspiegels für unterschiedliche Randbedingungen schematisch dargestellt. Allen vier betrachteten Fällen liegt die Annahme eines stationären Abflusses zugrunde. Um die Zeichnung nicht zu überfrachten wird aus Gründen der Anschaulichkeit der Verlauf des Energieliniengefälles nicht mit eingezeichnet. Die durchgezogene blaue Linie markiert die sich einstellende Wassertiefe h . Die gestrichelte graue Linie mit der Wassertiefe h_N veranschaulicht den theoretischen Wasserspiegelverlauf unter Normalabflussbedingung.

Fall A skizzierte den Wasserspiegelverlauf bei Normalabflussbedingung, d.h. die Normalabflusstiefe (h_N), die Geschwindigkeit sowie die durchströmte Fläche bleiben entlang des gesamten Fließweges konstant.

In Fall B.1 führt eine lokale Änderung der Sohlbeschaffenheit zu einer lokalen Reduktion der durchströmten Querschnittsfläche. Das Wasser erfährt eine lokale Beschleunigung, die mit einer lokalen Absenkung der Wassertiefe einhergeht. Aufgrund der strömenden Abflussbedingung, d.h. $Fr < 1$, steigt zusätzlich der Wasserspiegel oberstrom der Änderung in Abhängigkeit der Höhe und des Flächenverbaus auf die Wassertiefe h an.

In Fall B.2 ist der Einfluss eines unterstrom angebrachten Wehres aufgezeigt. Das Wehr bewirkt einen Rückstau nach oberstrom. Die Staulänge kann überschlägig mit dem Quotienten Stauhöhe zu Sohlliniengefälle ermittelt werden (BOLLRICH 2000).

Fall C skizziert den Verlauf des Wasserspiegels für die überlagerten Effekte des unterstromigen Wehreinbaus sowie der eingebrachten lokalen Sohlrauheitsveränderung. Die rot gepunktete Linie zeigt den ursprünglichen Wasserspiegelverlauf infolge des Wehres, die grüne, als Strichpunkt markierte Linie die des Hindernisses.

Für die Untersuchungen stand eine Laborrinne mit einer Neigung von 1,8 ‰ zur Verfügung. Ohne einen unterstromigen Wehreinbau stellen sich Normalabfluss in der Rinne ein, dabei sind zu geringe Wassertiefen bei zu hohen Fließgeschwindigkeiten die Folge. Die Ziele der Laboruntersuchung waren sowohl die Ermittlung der Widerstandsbeiwerte für durchströmte als auch überströmte holzige Bewuchsbestände. Ein unterstromiger Einstau ermöglichte die Einstellung von höheren Wassertiefen mit geringeren Fließgeschwindigkeiten. Der Einbau von Hülsen an der Sohle dient zum einen als naturähnliche Erhöhung der Sohlrauheit und zum anderen als Befestigung für die Pflanzen. Damit ergibt sich die Frage: „An welcher Stelle müssen die Hülsen innerhalb der Rinne positioniert werden, damit sich zumindest lokal ein Normalabfluss einstellt?“.

Zur Beantwortung dieser Frage ist es hilfreich, sich den Verlauf des Wasserspiegels für die einzelnen Fälle normiert auf das Bezugsniveau anzuschauen (vgl. Abb. 22). Im Fall A verläuft der Wasserspiegel parallel zur Sohle, die Wassertiefe bleibt konstant. Im Fall B.1 senkt sich, wie bereits erwähnt, die Wassertiefe im Bereich des Sohlhindernisses ab. Das unterstromig angebrachte Wehr (B.2) führt zu einem stetigen Anstieg der Wassertiefe bis zur Wehrkrone. Eine geschickte Überlagerung der Effekte B.1 und B.2 bewirken nahezu konstante Wassertiefen in einem Teilbereich der Hülsen, sodass sich näherungsweise Normalabflussbedingungen einstellen. Dies ist der Bereich, in dem gemessen werden kann.

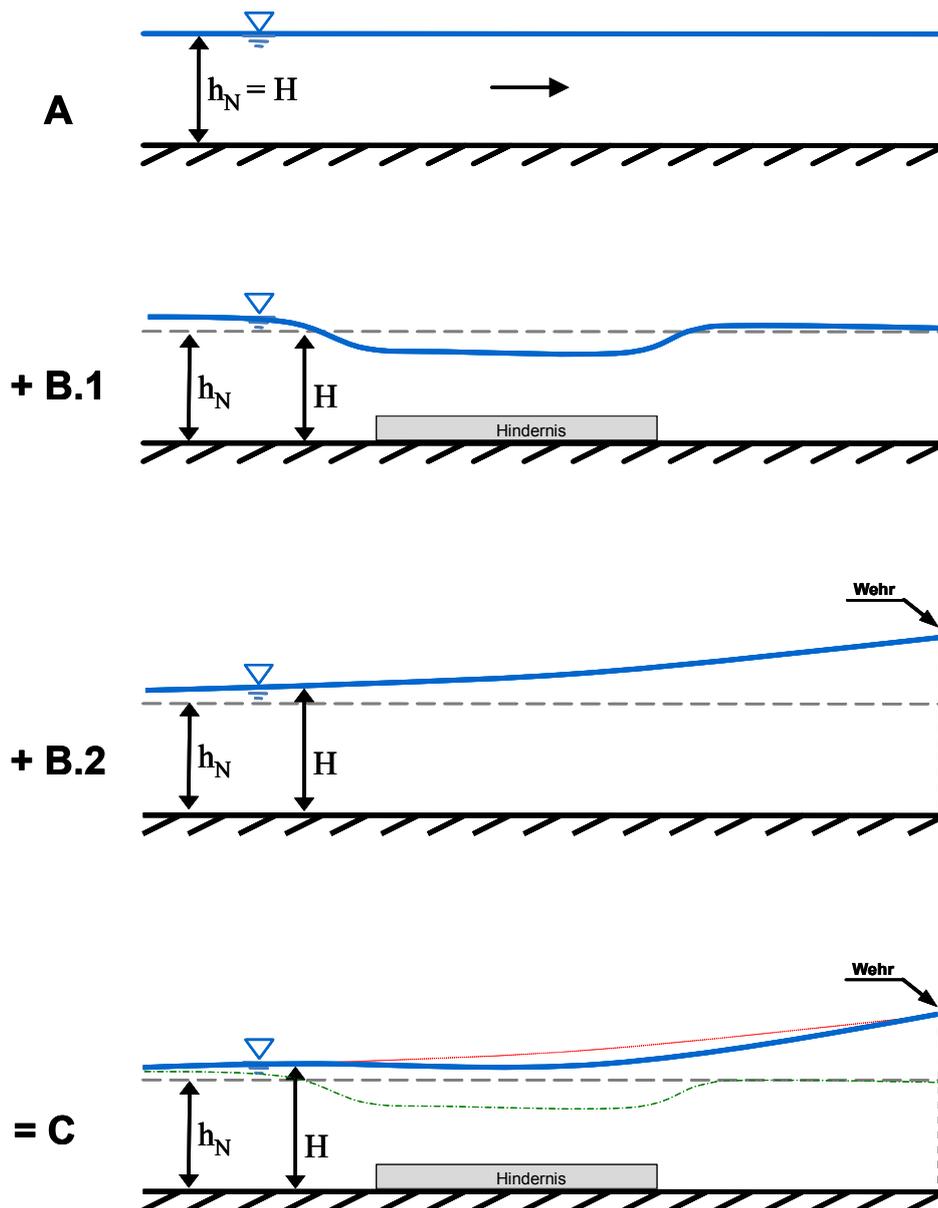


Abb. 22: Verlauf des Wasserspiegels normiert auf das Bezugsniveau: (A) unter Normalabfluss, (B.1) bei Überströmungen einer Sohlschwelle, (B.2) bei Rückstauwirkungen infolge eines Wehres, (C) die Überlagerung der Effekte A und B.

Abb. 23 zeigt eine vergrößerte Darstellung des Wasserspiegelverlaufs von Fall C. Charakteristisch für dieses Abflussverhalten ist die Ausbildung von drei unterschiedlichen Abschnitten. In Abschnitt 2 sind, wie bereits erwähnt, die Wassertiefen nahezu konstant. Abschnitt 3 steht unter dem direkten Einfluss des Wehres, was einen relativ steilen Anstieg der Wassertiefen zur Folge hat. Der Wasserspiegel in Abschnitt 1 liegt ebenfalls oberhalb der Normalabflusstiefe h_N , da dieser Bereich weiterhin durch den Rückstau des Wehres sowie der Hülsen geprägt wird.

Mit Hilfe dieser Vorüberlegung konnte die Lage der Hülsen so positioniert werden, dass sich im Bereich der Hülsen näherungsweise Normalabflussbedingungen einstellen. In Abb. 24 ist der Verlauf der Wasserspiegellagen für drei gemessene Abflüsse der Laborrinne dargestellt. In den Messwerten werden ebenfalls die drei theoretisch abgeleiteten Abschnitte identifiziert.

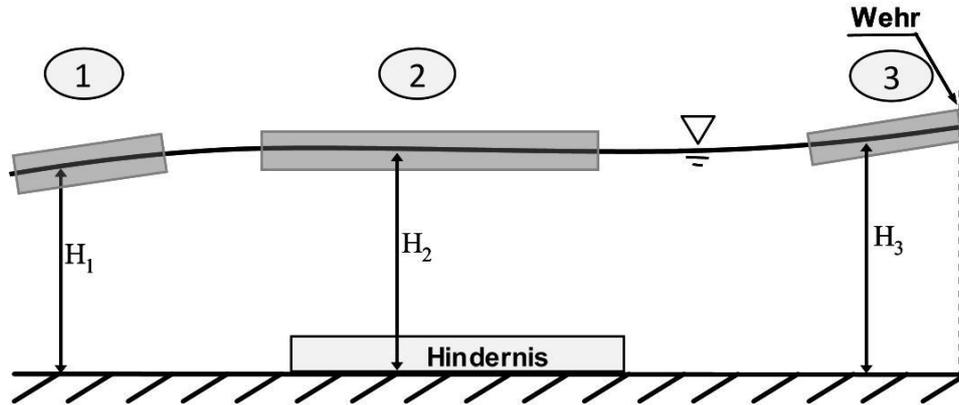


Abb. 23: Der Verlauf des Wasserspiegels als Schemaskizze.

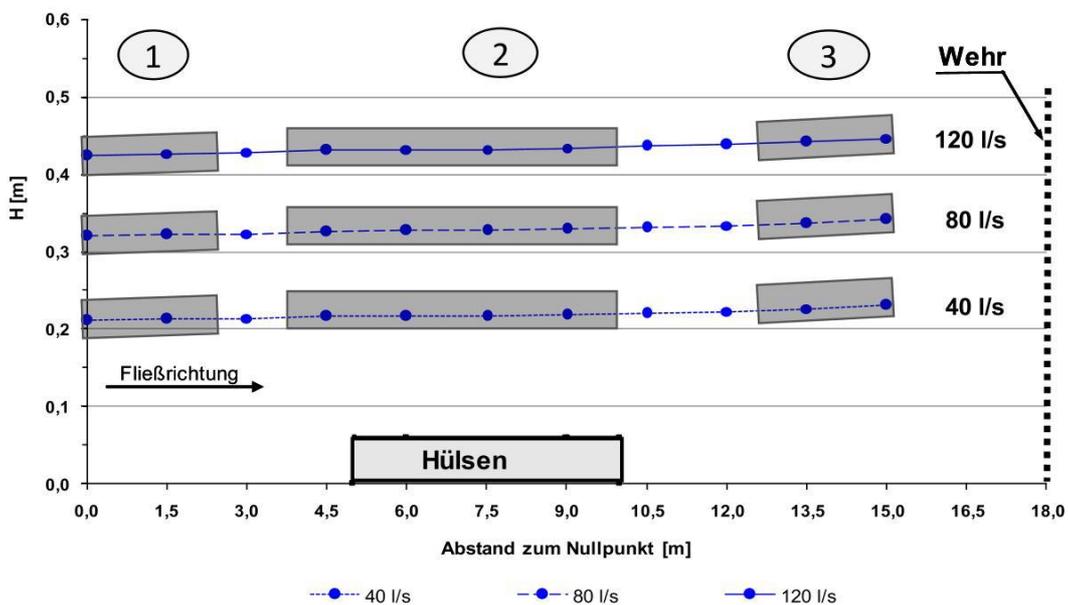


Abb. 24: Der Verlauf des Wasserspiegels in der Laborrinne bei unterschiedlichen Durchflüssen.

Fazit:

Die Ausführungen in Abb. 21 bis Abb. 24 veranschaulichen die einzelnen Teilaspekte, die beim Abfluss in der Laborrinne in Wechselwirkung treten. Des Weiteren wird gezeigt, dass die Forderung nach Normalabfluss, mit Sohlprofilen gleich Wasserspiegelgefälle gleich Energieliniengefälle, für Untersuchungen mit wehrregulierten Abflüssen im physikalischen Gerinne, wenn überhaupt, nur in Teilbereichen realisiert werden kann.

Zur Beantwortung der eingangs dieses Unterkapitels gestellten zweiten Frage „Wie lang soll/muss der eingebaute Vegetationsbestand im physikalischen Modell sein?“ soll folgende Überlegung dienen. Geht man davon aus, dass eine Pflanzengesellschaft auf die Strömung ähnlich wirkt wie eine Anreihung von durchströmten Hindernissen oder Rechen, führt jeder weitere Rechen zu einem weiteren Aufstau nach oberstrom. Eine Bestückung der gesamten Rinnenlänge mit Vegetation würde, ähnlich dem durchströmten Hindernis in Abb. 21 (B.2), bei überlagertem Wehrrückstau quasi zu Normalflussbedingungen in Teilbereichen führen. Dabei kann die Annahme der gleichgerichteten Strömung

auf Ebene der Makroskala aufgrund der Durchströmung von natürlichem Pflanzen nicht eingehalten werden.

Die Kurzlebigkeit von Pflanzen im physikalischen Modell verhindert jedoch aus Zeit- und Kostengründen diese Art des Aufbaus. Des Weiteren stellt sich die Frage, welche Effekte der Strömung im physikalischen Modell abgebildet werden sollen. Im Gelände sind die vorzufindenden Auenbestände in den seltensten Fällen in der Weise ausgedehnt, dass sich Normalabflussbedingungen einstellen. Damit ist der Effekt des lokalen auenvegetativen Aufstaus nach oberstrom für die praxisrelevanten Aufgabenstellungen von größerer Bedeutung. Aus diesem Grund wird der Aufbau des physikalischen Modells so gewählt, dass der praxisrelevante Aufstauereffekt in Abhängigkeit der Pflanzenart und -besatzdichte bestimmt wird. Hierfür genügt der Einbau eines kurzen Vegetationsabschnittes.

Mangels Normalabflussbedingung ergibt sich die Frage, an welchen Stellen die charakteristischen Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten zur Bestimmung des Widerstandsverhaltens erhoben werden müssen. In Abb. 25 ist der Wasser- und Energiespiegelverlauf bezüglich des Bezugsniveaus für einen Versuchsaufbau mit durchströmten Pflanzen schematisch dargestellt. Die Vegetation wirkt als Strömungshindernis, welches das Wasser nach oberstrom aufstaut.

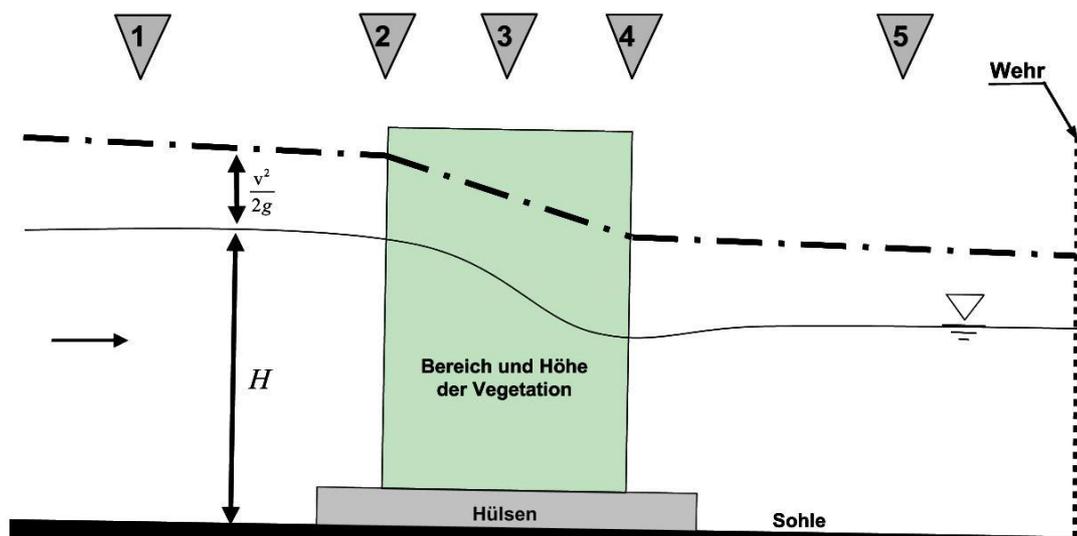


Abb. 25: Schematischer Verlauf der Wasser- und Energiespiegellage bezogen auf das Bezugsniveau für durchströmte Vegetation.

Die Rückrechnung des Widerstandsbeiwertes nach der Gauckler-Manning-Strickler- oder Darcy-Weisbach-Gleichung erfordert als Eingangsgrößen neben der Fließgeschwindigkeit den hydraulischen Radius und das Energieliniengefälle. Hierzu stehen mehrere Möglichkeiten zur Ermittlung des Energieliniengefälles zur Verfügung. Mögliche Mittelungen zur Bestimmung des Energieliniengefälles sind nach Abb. 25 z.B. zwischen:

- a) Punkt 1 und Punkt 2,
- b) Punkt 1 und Punkt 5 oder
- c) Punkt 2 und Punkt 4.

Das Energieliniengefälle steigt von a) über b) nach c) an. Je steiler das Energieliniengefälle, desto höher ist der rechnerisch ermittelte Widerstand.

Die Frage, welches Energieliniengefälle den „wahren“ Widerstandsbeiwert liefert, kann für die zu untersuchenden Fragestellung nur mittels einer belastbaren Überprüfung der Werte, z.B. unter Verwendung eines hydrodynamisch-numerischen Modells (HN-Modell), beantwortet werden. Dabei wird geprüft, inwieweit der berechnete Wasserspiegelverlauf des HN-Modells den gemessenen Laborwerten entspricht.

Die Überprüfung der Belastbarkeit der ermittelten Werte erfolgt unter Verwendung des 1D-HN-Modells Hec-RAS der U.S. Army Corps of Engineers. Die Reibungsverluste werden in diesem Berechnungsmodell als MANNING-Beiwert n berücksichtigt. Die Kalibrierung des Modells erfolgt jeweils auf Basis der Wasserstände ohne Pflanzen. Anschließend werden die Wassertiefen für die unterschiedlichen Widerstandsbeiwerte, basierend auf den Rückrechnungen der unterschiedlichen Energieliniengefälle, berechnet. Die Überprüfung ergab, dass die Bestimmung des Energieliniengefälles über die Mittelung zwischen den Punkten 2 und 4 analoge Wassertiefen von Labor und Modell liefert. Die Mittelung zwischen Punkt 1 und 2 bzw. 1 und 5 bilden das Widerstandsverhalten nicht richtig ab, das Widerstandsverhalten der Pflanzen wird dabei unterschätzt.

Generell ist jedoch zu beachten, dass das Abflussverhalten der Rinne bei den Untersuchungsreihen von der unterstromig eingestellten Wehreinrichtung bestimmt wird. Zur Vermeidung eines systematischen Fehlers werden daher die Untersuchungen mit drei unterschiedlichen Wehreinrichtungen mit daraus resultierenden unterschiedlichen Einstaubedingungen durchgeführt.

4 Untersuchungsansatz

4.1	Wasserbauliche Modellversuche: Versuchsaufbau
4.1.1	Aufbau und Abmessungen der Laborrinnen
4.1.2	Befestigung der Vegetation
4.1.3	Untersuchte Pflanzenanordnungsvarianten
4.2	Bestimmung der vegetationsrelevanten Parameter
4.2.1	Erhebung der Vegetationsparameter nach Lindner/Pasche
4.2.2	Erhebung der Bedeckungsdichte mittels Rasterbilder

4.1 Wasserbauliche Modellversuche: Versuchsaufbau

4.1.1 Aufbau und Abmessungen der Laborrinnen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden wasserbaulichen Modellversuche in zwei Laborgerinnen durchgeführt. Ein Teil der Untersuchungen wurde in der so genannten „Großen Rinne“ durchgeführt. Die „Große Rinne“ ist 60 m lang, 2,5 m breit und 0,8 m hoch. Die Wände bestehen zum Teil aus Glaselementen, die Sohlneigung beträgt 0 %. Für die weiteren Untersuchungen stand eine „Kleine Rinne“ mit einer Sohlneigung von 1,8 ‰ zur Verfügung. Die „Kleine Rinne“ ist 24 m lang, 0,6 m breit und 0,7 m hoch und mit einem eigenen Wasserkreislauf ausgestattet.

In der „Großen Rinne“ (s. Abb. 26) erfolgte die Wasserzufuhr über einen Hochbehälter. Der Durchfluss wurde über einen induktiven Durchflussmesser (IDM) ermittelt. Das Wasser floss durch ein Beruhigungsbecken mit angeschlossenem Gleichrichter, bestehend aus Hohlblocksteinen, in die Laborrinne. Die folgenden 26,2 m Fließstrecke dienten der Strömungsberuhigung. Im anschließenden 12,6 m langen Versuchsfeld wurden Hülsen mit einer Höhe von 6 cm und einem Durchmesser von 2,5 cm installiert. Sie dienten als Befestigungshalterung für die Pflanzen und bildeten eine gleichmäßige Sohlrauheit aus. Die Abstandsparameter der Hülsen betrugen in Fließrichtung 17 cm und senkrecht zur Fließrichtung 14 cm (vgl. Abb. 36). Die Abmessungen erfolgten analog dem Aufbau nach JÄRVELÄ (2002). Am unterstromigen Ende der Messrinne war ein Lamellenwehr angebracht. Bei den Untersuchungen wurde mit einer fixen Lamelleneinstellung gearbeitet. Das Vegetationsfeld mit einer Länge von 4,6 m war in der Mitte des Versuchsfeldes angeordnet (vgl. Abb. 26).

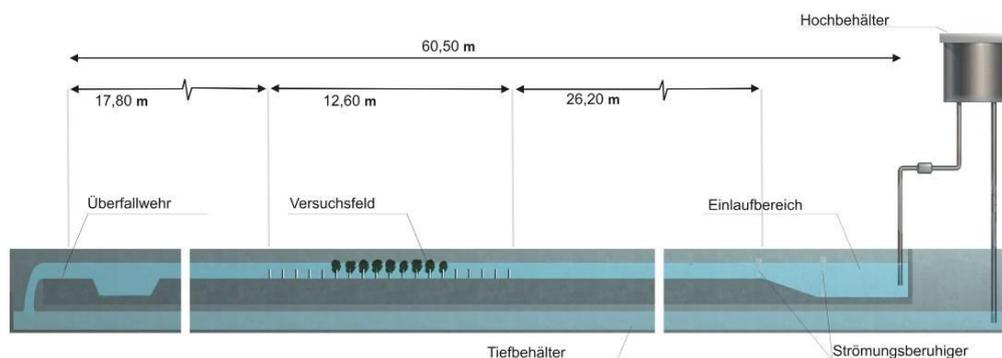


Abb. 26: Seitenansicht mit Längenangaben der „Großen Rinne“ (eyemotion).

In der „Kleinen Rinne“ bestehen die Wände auf der gesamten Rinnenlänge aus Glaselementen. Die Rinne besitzt einen eigenen Wasserkreislauf, bei dem die Wasserzufuhr über einen Wassersammelbehälter erfolgte. Ein Lochblech im Einlaufbereich sowie die anschließende Fließstrecke von 10,5 m dienten der Strömungsberuhigung. Das folgende 5,0 m lange Versuchsfeld mit installierten Hülzen wurde analog den Abstandsparemtern der „Großen Rinne“ aufgebaut. Das Vegetationsfeld besaß in der „Kleinen Rinne“ eine Länge von 3 m und war in der Mitte des Messfeldes angeordnet (vgl. Abb. 27). Ein am Auslauf angebrachtes Lamellenwehr regelte den Einstau nach oberstrom. Die Untersuchungen wurden mit drei unterschiedlichen Wehreinstaubedingungen (E1-3) durchgeführt. Damit sollte der Einfluss unterschiedlicher Energieliniengefälle auf das Widerstandsverhalten mit untersucht werden.

Die für die Untersuchung gewählten Durchflüsse betragen in der „Großen Rinne“ 200 l/s, 400 l/s, 600 l/s und 800 l/s; in der „Kleinen Rinne“ 40 l/s, 60 l/s, 80 l/s, 100 l/s und 120 l/s (vgl. Tabelle 3).

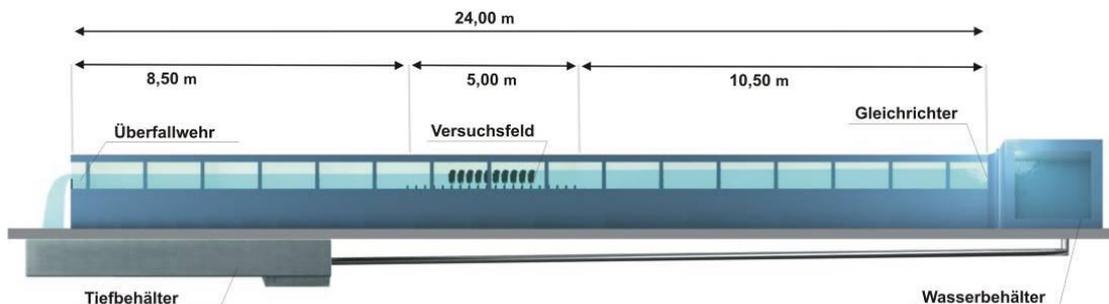


Abb. 27: Seitenansicht mit Längenangaben der „Kleinen Rinne“ (eyemotion).

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Daten beider Versuchseinrichtungen.

	Große Rinne	Kleine Rinne
Länge	60,0 m	20,0 m
Breite	2,5 m	0,6 m
Höhe	0,8 m	0,7 m
Sohlneigung	0 %	1,8 ‰ mit E1-3
Durchfluss	200 l/s 400 l/s 600 l/s 800 l/s	40 l/s 60 l/s 80 l/s 100 l/s 120 l/s
Länge des Messfeldes	12,6 m	5,0 m
Länge des Pflanzenfeldes	4,6 m	3,0 m

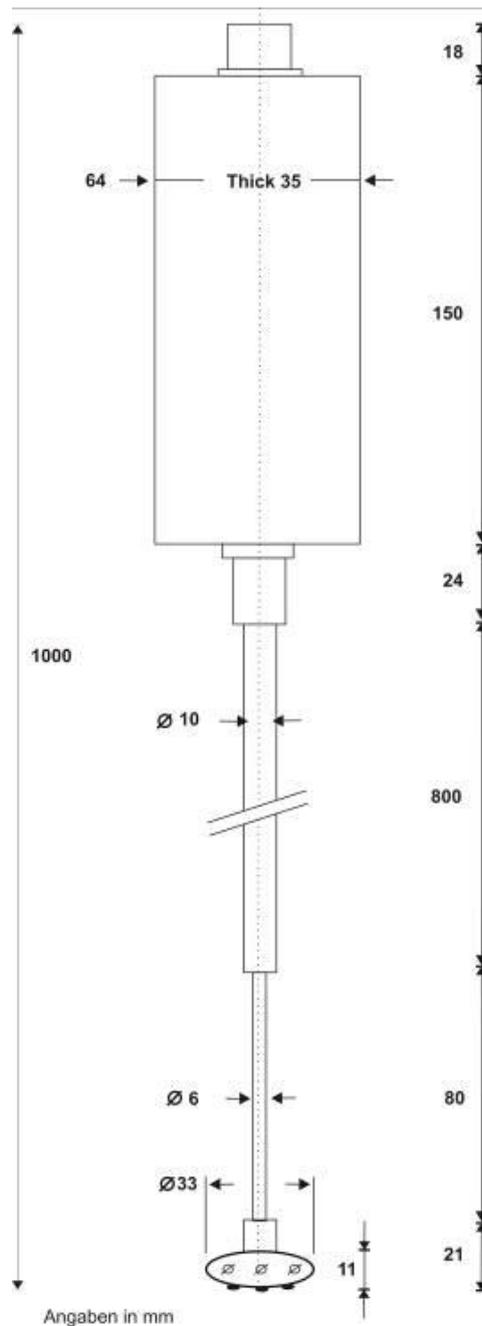


Abb. 28: 2D elektromagnetische Fließgeschwindigkeitsmesssonde P-EMS 30 (WL Delft Hydraulics).

Die Fließgeschwindigkeit wurde mit einer bi-axialen 2D elektromagnetischen Sonde des Typs E30 (P-EMS) der Firma WL Delft Hydraulics ermittelt (vgl. Abb. 28). Die Messung der Fließgeschwindigkeit erfolgt über die Spannungsänderung des magnetischen Feldes an den Messelektroden. Die Spannungsänderung verhält sich proportional zu der Strömungsgeschwindigkeit. Die messtechnisch erfassbare Maximalgeschwindigkeit beträgt 2,5 m/s, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ m/s bzw. $\pm 1\%$ des Messwertes. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten u und v entsprechen der Hauptströmungsrichtung x - bzw. der dazu senkrecht stehenden y -Richtung. Das Messvolumen des P-EMS befindet sich direkt unterhalb der Messsonde und hat eine zylindrische Form mit einer durchschnittlichen Höhe von 5 mm; der Durchmesser beträgt 50 mm. Die Fließgeschwindigkeiten je Messpunkt wurden über 30 s gemittelt, die Aufnahmefrequenz betrug 100 Hz.

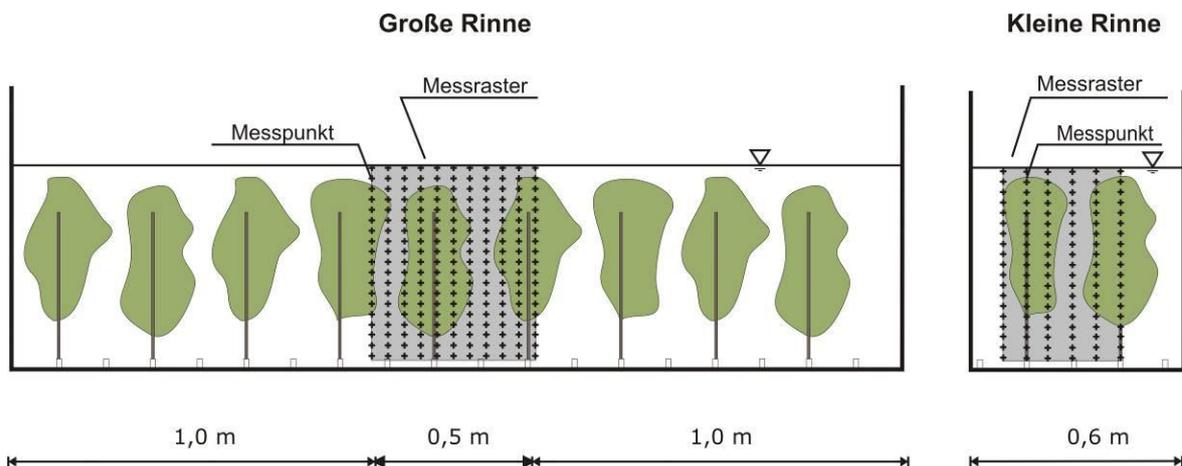


Abb. 29: Querschnitt der Rinne mit Lage des Messrasters sowie der mit dem P-EMS aufgenommenen Messpunkte: links: „Große Rinne“, rechts: „Kleine Rinne“.

Die Lage der jeweiligen Messfelder und -profile sind in Abb. 30 für die „Große Rinne“ und in Abb. 31 für die „Kleine Rinne“ dargestellt. Je Querprofil (P) wurden zwischen vier und 11 Messlotrechten aufgenommen. Aus Zeitgründen wurde nicht der gesamte Querschnitt als Vielpunktmessung erhoben. Innerhalb der Pflanzen wurde das Messraster enger gewählt. Die Messraster der Vielpunktmessungen wurden unter Verwendung eines fahrbaren Messwagens automatisiert aufgenommen. Das Messen eines Querprofils dauerte zwischen 2 und 8 h. Das Messraster reichte in der „Kleinen Rinne“ von der Wasseroberfläche bis 7 cm oberhalb der Sohle. Damit lag der tiefste Messwert 1 cm oberhalb der Hülsenhöhe. In der „Großen Rinne“ lag der tiefste Messpunkt 0,5 cm oberhalb der Rinnensohle. Die Lage der Messpunkte sind in Abb. 29 durch + Zeichen dargestellt. Der Abstand der Messpunkte je Lotrechte betrug in der „Großen Rinne“ 1 cm innerhalb und 2 cm außerhalb der Pflanzen sowie 5 cm zwischen den Lotrechten. In der „Kleinen Rinne“ wurde das gesamte Messraster mit einem Abstand von 1 cm innerhalb der Lotrechten und 7 cm zwischen den Lotrechten aufgenommen. Insgesamt wurden in der „Großen Rinne“ an 176 Querprofilen und in der „Kleinen Rinne“ an 735 Querprofilen Vielpunktmessungen erhoben. In Abb. 29 ist die Lage des aufgenommenen Messrasters in der „Großen Rinne“ sowie der „Kleinen Rinne“ dargestellt.

Zusätzlich wurde der Verlauf des Wasserspiegellagengefälles mittels einer Ultraschallabstandssonde in der „Großen Rinne“ an neun und in der „Kleinen Rinne“ an elf Messstellen (M) erhoben (vgl. Abb. 30 und Abb. 31). Die Nummerierung erfolgt analog dem Abstand zum Referenzpunkt. Der Referenzpunkt wurde in der „Großen Rinne“ 37,4 m und in der „Kleinen Rinne“ 18 m oberstrom des Wehres festgelegt. Die Messgenauigkeit der Ultraschallabstandssonde betrug laut Herstellerangaben ± 1 mm. Die Wellenbildung bei höheren Abflüssen führte zu einer Schwankung der Wasserspiegellagen, damit reduziert sich die Messgenauigkeit auf ± 2 mm.

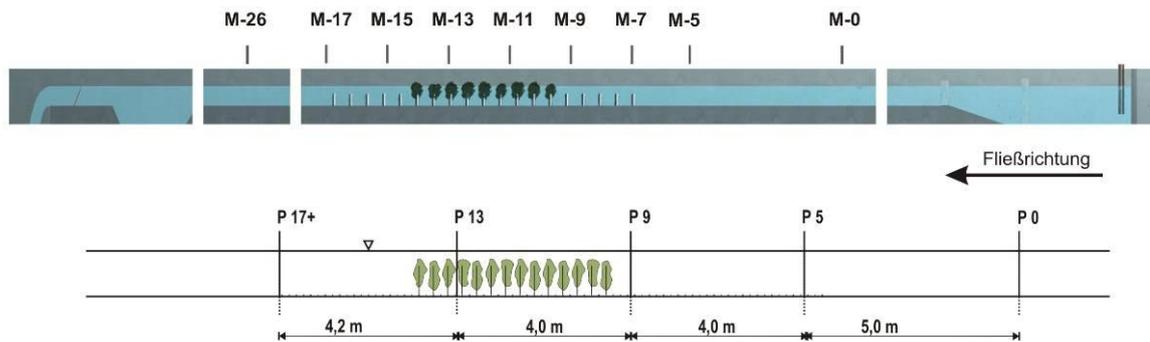


Abb. 30: Übersicht über die Lage der Wasserstandsmessstellen (M) und den Vielpunktmessungen an den Profilen (P) in der „Großen Rinne“.

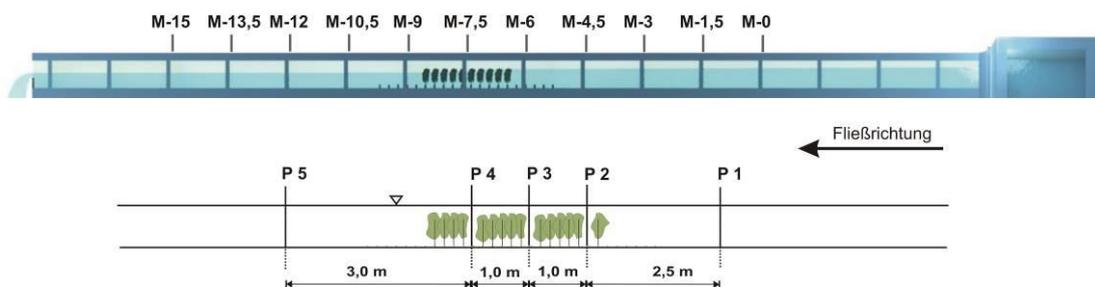


Abb. 31: Übersicht über die Lage der Wasserstandsmessstellen (M) und den Vielpunktmessungen an den Profilen (P) in der „Kleinen Rinne“.

4.1.2 Befestigung der Vegetation

Belaubte Weiden standen nicht ganzjährig für die Laboruntersuchungen zur Verfügung. In Vorversuchen hatten sich Ficuszweige als alternatives Belaubungsmaterial bewährt. Dieses Vorgehen gewährleistete ein kontinuierliches Variantenstudium ohne eine jahreszeitliche Abhängigkeit von der Pflanzenverfügbarkeit. Daher wurde für die Simulation der belaubten Weiden an einen unbelaubten Weidenzweig ein belaubter Ficustrieb mit Kabelbindern befestigt. Die Enden der Kabelbinder wurden bündig abgeschnitten (vgl. Abb. 32). Der Einfluss der Kabelbinder auf die Strömung wurde damit auf ein Minimum reduziert. Eine Besatzdichte von 100 % (= alle Hülsen sind mit einem Pflanzenelement besetzt) erforderte in der „Großen Rinne“ 486 Pflanzenelemente und in der „Kleinen Rinne“ 96 Pflanzenelemente.



Abb. 32: Pflanzenelement der belaubten Weide vor dem Einbau in die Laborrinne.

Im Versuchsstand wurden neben belaubten und unbelaubten Weiden auch Tannenzweige verwendet. Die Pflanzenhöhe (h_{veg}) betrug bei allen Untersuchungsreihen einheitlich 40,0 cm. Jedes Pflanzelement wurde in der „Großen Rinne“ und „Kleinen Rinne“ mit zwei Kabelbindern an der oberstromigen Seite der als Sohlrauheit eingebrachten Hülsen befestigt. Kabelbinder lassen sich leicht verarbeiten und sind kostengünstig in größeren Mengen erhältlich. Das Ende der Kabelbinder befand sich im Bereich der Nachlaufzone der Hülse, sodass keine Strömungsbeeinflussung stattfand. In Abb. 33 ist die Befestigung des Pflanzelementes an der Hülse schematisch dargestellt. Abb. 34 zeigt die mit Kabelbindern an den Hülsen befestigten Weiden. Abb. 35 gibt einen Eindruck über den Einbau der belaubten Weiden mit einer Besatzdichte von 100 % in der „Großen Rinne“.

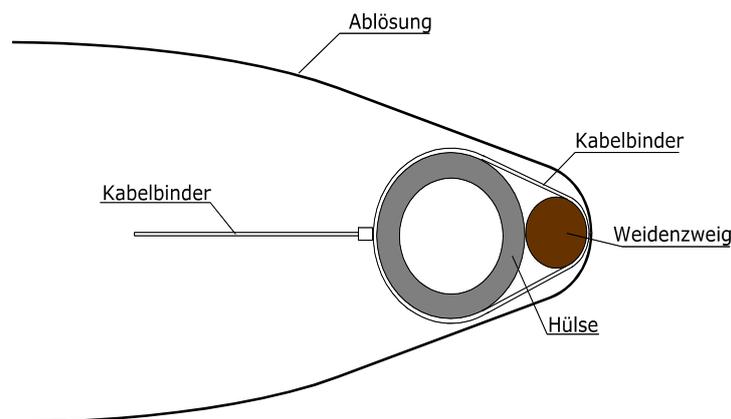


Abb. 33: Schemazeichnung für die Befestigung der Weiden und Hecken an den Hülsen (BAUMEISTER 2007)

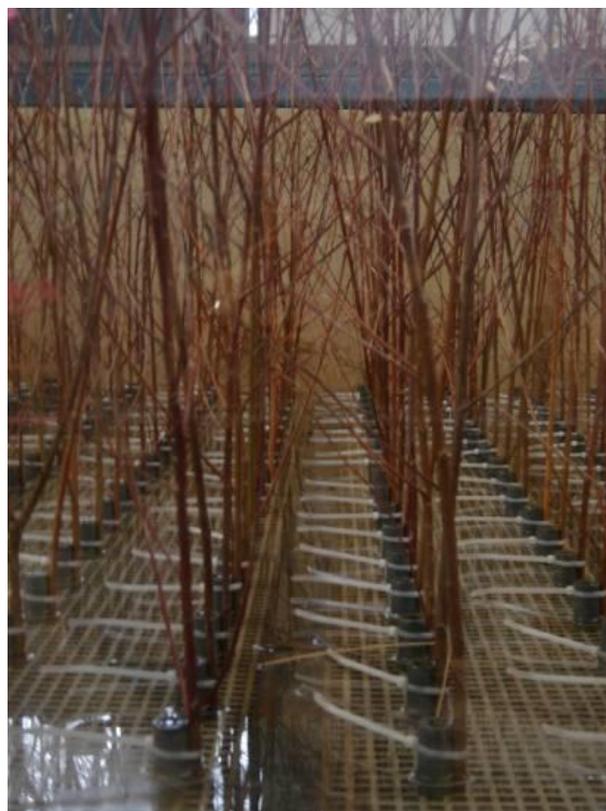


Abb. 34: Seitenansicht über den Einbau von Weiden an den Hülsen (BAUMEISTER 2007).



Abb. 35: Einbau der belaubten Weidenzweige mit einer Besatzdichte von 100 % in der „Großen Rinne“ (BAUMEISTER 2007)

4.1.3 Untersuchte Pflanzenanordnungsvarianten

Ziel der Laboruntersuchungen war die Bestimmung des hydraulischen Widerstands von durch- und überströmten holzigen Auenbewuchsbeständen. Hierfür wurden unterschiedliche Varianten mit unterschiedlichen Pflanzenarten und -dichten untersucht. Die Auswahl der einzubauenden Varianten bestimmten die Extreme der im Gelände vorkommenden Weichholzaunenbestände (sehr dichter bzw. lichter Bestand der Vegetation). Im Labor wurde einerseits die Weidenvegetation untersucht, welche durch lebende Weidenzweige den belaubten Zustand (B) und den unbelaubten Zustand (U) simulierten. Andererseits wurde auch dichte Heckenvegetation (He), simuliert durch Tannenzweige, untersucht. Abb. 36 veranschaulicht die unterschiedlich eingebauten Besatzdichten von 100 % bis 25 % (ein Viertel der Hülsen waren mit Pflanzen bestockt) mit den entsprechenden Anordnungsparametern. In Tabelle 4 sind die verwendeten Abkürzungen erläutert. In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind alle durchgeführten Untersuchungen mit den jeweiligen Durchflüssen und Einstaubedingungen aufgelistet.

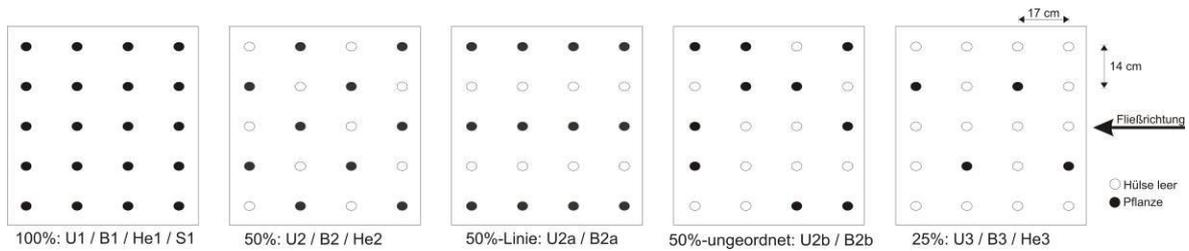


Abb. 36: Übersicht über die Einbauvarianten der Hülsen.

Tabelle 4: Erläuterung der in den Tabelle 5 und Tabelle 6 verwendeten Abkürzungen.

Abkürzung	Bedeutung
GR	Große Rinne
KR	Kleine Rinne, geneigt
U	Unbelaubte Weidenzweige
B	Belaubte Weidenzweige
S	Starre Plastikstäbe
He	Heckenvegetation
E	E1 = geringer Einstau, E2 =mittlerer Einstau, E3 = hoher Einstau
P	Profil für Geschwindigkeitsmessungen
leer	Rinne ohne Vegetationsbesatz

Tabelle 5: Variantenstudium in der „Großen Rinne“ (Abkürzungen siehe Tabelle 4).

Bezeichnung	Durchfluss [l/s]	Gemessene v-Profile	Vegetation	Besatzdichte
GR-leer	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	-	-
GR-U1	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden	100 %
GR-U2	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden	50 %
GR-U2a	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden	50 %, in Linie
GR-U2b	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden	50 %, ungeordnet
GR-U3	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden	25 %
GR-B1	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden/Ficus	100 %
GR-B2	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden/Ficus	50 %
GR-B2a	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden/Ficus	50 %, in Linie
GR-B2b	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden/Ficus	50 %, ungeordnet
GR-B3	200 l/s – 800 l/s	P0 bis P17+	Weiden/Ficus	25 %

Tabelle 6: Variantenstudium in der „Kleinen Rinne“ (Abkürzungen siehe Tabelle 4).

Bezeichnung	Durchfluss [l/s]	Einstau	Gemessene v-Profile	Vegetation	Besatzdichte
KR-Leer	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	–	–
KR-U1	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Weiden	100 %
KR-U2	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Weiden	50 %
KR-U3	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Weiden	25 %
KR-B1	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Weiden/Ficus	100 %
KR-B2	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Weiden/Ficus	50 %
KR-S1	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Plastikstäbe	100 %
KR-He1	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Tannenzweige	100 %
KR-He2	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Tannenzweige	50 %
KR-He3	40 l/s – 120 l/s	E1 bis E3	P1 – P5	Tannenzweige	25 %

4.2 Bestimmung der vegetationsrelevanten Parameter

4.2.1 Erhebung der Vegetationsparameter nach Lindner/Pasche

Bei einer Berechnung des hydraulischen Widerstandsbeiwertes nach dem PASCHE-Verfahren werden vegetationsbeschreibende Parameter benötigt. Der Abstand der Vegetationselemente in und quer zur Fließrichtung (a_x , a_y) wird aus der Gesamtanzahl der Pflanzen (n_B) je Probefläche (A_{pro}) rückgerechnet (vgl. Abb. 37). Die hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche (A_{veg}) wird aus dem mittleren Ast- bzw. Stammdurchmesser (d_{veg}) der Vegetation multipliziert mit der Wassertiefe (h) ermittelt. Große Sorgfalt ist auf die Auswahl der geeigneten Referenzflächen zu legen. Die Referenzfläche beschreibt das typische Besatzmuster des zu betrachtenden Vegetationsbestandes. Deshalb muss neben der Erhebung der Abstandsparameter auch eine Typisierung in einen jungen, mittelalten und alten Auenbestand erfolgen. Die Beschreibung, ob es sich um einen dichten oder lichten Bestand handelt, ergibt sich aus den im Gelände erhobenen vegetationspezifischen Daten. Die Erhebung der Abstandsparameter erfolgte, ausgehend von den Erfahrungen von Vegetationskartierungen an der Enz in Pforzheim (vgl. SCHNEIDER 2006), in einer Höhe von 0,75 m über der Sohle.

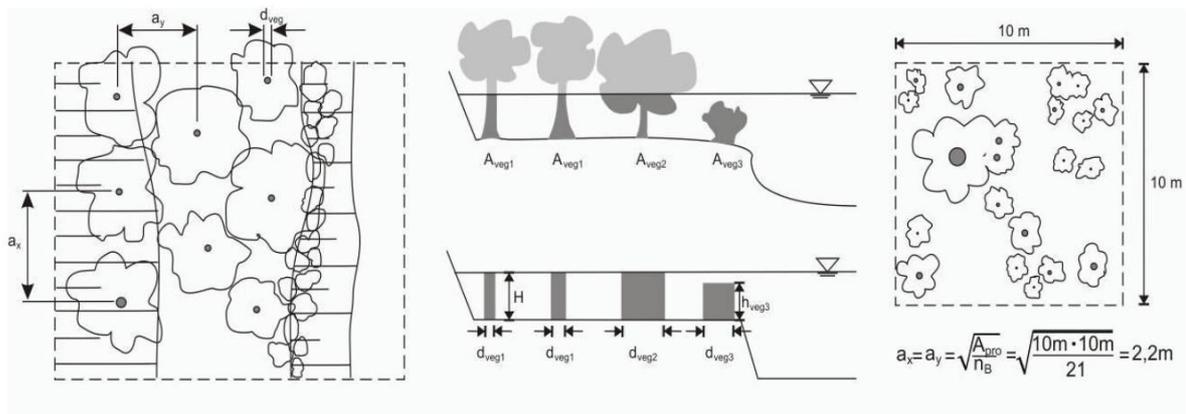


Abb. 37: Ermittlung der Vegetations- und Abstandsparameter nach dem Lindner/Pasche-Verfahren (verändert nach BWK 2000).

4.2.2 Erhebung der Bedeckungsdichte mittels Rasterbilder

4.2.2.1 Bestimmung der Bedeckungsdichte im trockenen Zustand

Die Bedeckungsdichte beschreibt den Anteil der durch Vegetation bedeckten Fläche zur durchflossenen Querschnittsfläche. Die Ermittlung basiert auf einer digitalen Schwarz/Weiß-Rasterfotoauswertung. Im Folgenden wird der Verfahrensablauf exemplarisch für die Ermittlung des Anteils der mit Vegetation bedeckten Fläche (= Bedeckungsdichte) für den trockenen Zustand, d.h. ohne Wasser, erläutert. Die Datenerhebung bei der Naturvegetation erfolgte analog zur Datenerhebung bei der Laborvegetation.



Abb. 38: Aufbau des Messrahmens: links oben: Verschrauben des Messrahmens, rechts oben: Aufziehen des Rasters, links unten: Transport des Rahmens im Gelände, rechts unten: Aufstellen des Rahmens hinter der Vegetation.



Abb. 39: links: Rasteraufnahmen einer jungen Weide im Gelände als Farbfoto, rechts: konvertiertes Schwarz/Weiß-Bild.

Die Rasterbildaufnahmen an der Elbe wurden mit einem 4,0 x 4,0 m Rahmen durchgeführt. Das 3,0 x 4,0 m große Leinentuch mit Laschen und einer Rasteraufteilung von 0,5 x 0,5 m wurden am Rahmen befestigt. Das Raster wurde direkt hinter die Vegetation gestellt (vgl. Abb. 39). Dabei war zu beachten, dass lediglich eine Vegetationsreihe aufgenommen wurde, da sonst die Bedeckungsdichte mit dem Effekt der Besatztiefe überlagert wird. Die Besatztiefe bezieht sich auf die Anzahl der Vegetationselemente die hintereinander in Strömungsrichtung stehen. Einreihige Anordnungen geben den direkten Anteil der vegetationsbedeckten Fläche wieder. Wird das Raster jedoch hinter mehrreihigen Anordnungen gestellt, wird der Anteil der vegetationsbedeckten Fläche überschätzt.

Die Bedeckungsdichte beschreibt die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche im trockenen Zustand im Verhältnis zum durchströmten Querschnitt, während die Besatztiefe den Abstandparameter a_x beschreibt. Die technischen Möglichkeiten erlauben die Fotoaufnahmen von 3D-Bildern, d.h. neben der eigentlichen Projektionsfläche können auch die entsprechenden Projektionstiefen aufgenommen werden. Aufgrund der hohen Kosten einer 3D-Kamera, konnte diese Methode im Rahmen dieser Untersuchung leider nicht angewendet werden. Die Rastereinteilung ermöglichte die Bestimmung der Größe der Naturvegetation.

Das hinterlegte Raster ermöglichte die Berechnung der Bedeckungsdichte in Abhängigkeit der Wassertiefe für unterschiedliche Wasserstände. Die Aufnahmen erfolgten in einem konstanten Abstand zur Vegetation, so dass der Krümmungseffekt der Linse einen systematischen Fehler darstellte und damit die Fehlerquote verringert wird.

Die Konvertierung der Farbfotos erfolgte mittels der Grafiksoftware PhotoShop in eine Schwarz/Weiß-Grafik (vgl. Abb. 41). Der vegetationsbedeckte Anteil wurde schwarz und der vegetationsfreie Anteil weiß eingefärbt. Das Verhältnis der schwarzen Pixel (0 = weiß, 1 = schwarz) zur Gesamtpixelanzahl ergab den vegetationsbedeckten Flächenanteile. Die Schwarz/Weiß-Grafiken wurden mit der Software Matlab eingelesen und der Schwarzanteil bestimmt. Zudem ermöglichte das erstellte Matlabskript auch die Pixelauszählung für ausgewählte Bereiche des Rasterbildes. Damit konnten anhand der Definition von unterschiedlichen Wasserständen die jeweiligen Bedeckungsdichten ermittelt werden.

Die im Labor angefertigten Aufnahmen in der „Großen“ und „Kleinen Rinne“ erfolgten mit einer 0,6 x 0,5 m großen Platte, die mit einem Fotokarton bespannt war. Die Rastergröße betrug 0,1 x 0,1 m. Die Platte wurde hinter die Bepflanzung gestellt (vgl. Abb. 40).

Die mit 1,8 ‰ geneigte „Kleine Rinne“ wurde mit unterschiedlichem Vegetationsbesatz bestückt. Zum einen wurde das Verhalten unterschiedlicher Bedeckungsdichten innerhalb einer Reihe untersucht, zum anderen sollte der Einfluss der Besatztiefe auf die Flächenkontraktion bestimmt werden. Von weiterem Interesse war das unterschiedliche Verhalten von Weiden- und Heckenvegetation in Bezug auf die Reduzierung der hydraulisch wirksamen angeströmten Vegetationsfläche in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit.

Alle Untersuchungsreihen wurden bei Durchflüssen von 40 l/s (durchströmt), 80 l/s (gerade noch durchströmt) und 120 l/s (überströmt) durchgeführt. Zusätzlich wurden die Einstaubedingungen E1 (geringer Einstau) und E3 (hoher Einstau) variiert (vgl. Kapitel 4.1).

Die Auswertung der Labor-Rasterbilder erfolgte analog dem Verfahren der Natur-Rasterbilder. Aufgrund der geänderten Lichtverhältnisse im Labor wurde statt weiß die Farbe hellblau als Rasterhintergrund verwendet. Voruntersuchungen mit der angepassten Hintergrundfarbe ergaben eine einfachere Konturidentifizierung der Vegetation. Dies ermöglichte eine schnellere Schwarz/Weiß-Konvertierung der Fotos.

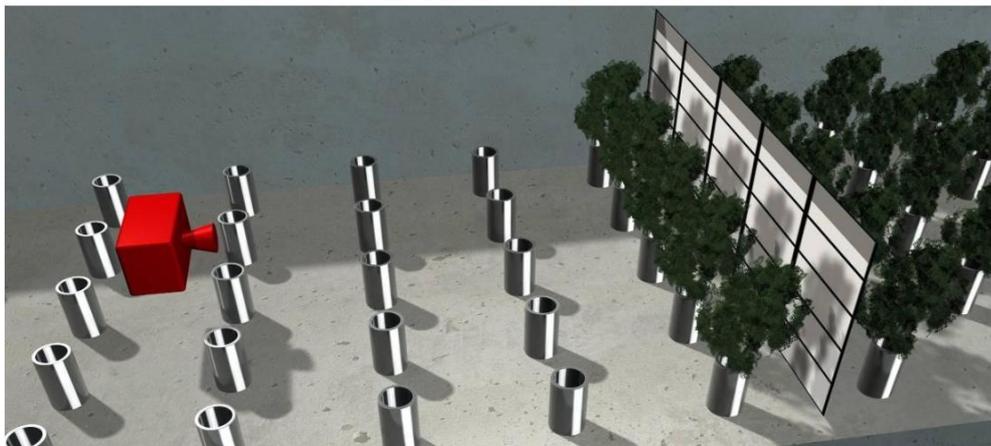


Abb. 40: Schemaskizze der Rasterbildaufnahme im Labor ohne Wasser.



Abb. 41: links: Fotoaufnahme einer Vegetationsanordnung, rechts: zugehörige Schwarz/Weiß-Rasterung.

4.2.2.2 Bestimmung der Bedeckungsdichte im durchströmten Zustand

Jede Vegetationsanordnung wurde zuerst im trockenen Zustand, d.h. ohne Wasser, und anschließend bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten unter Wasser fotografiert. Die Verwendung eines Hintergrundrasters war bei den Unterwasseraufnahmen nicht möglich. Daher konnten lediglich einzelne Reihen fotografiert werden (vgl. Abb. 42). Die Kameraeinstellung sowie der Abstand zwischen Vegetationsanordnung und Kamera wurden bei allen Aufnahmen konstant gehalten.



Abb. 42: Position der Kamera bei den Fotoaufnahmen unter Wasser: links: eine Reihe, rechts: Auswirkungen des Aufstaus von sechs Reihen auf die Flächenkontraktion.

5 Ergebnisse: Vegetationsparameter holziger Bewuchsbestände

5.1	Im Labor erhobene Vegetationsparameter
5.1.1	<i>Bedeckungsdichten der untersuchten Weiden und Hecken</i>
5.1.2	<i>Interaktion zwischen Anströmgeschwindigkeit und hydraulisch wirksamer Vegetationsfläche</i>
5.2	Im Gelände erhobene Vegetationsparameter
5.2.1	<i>Einteilung der Weichholzauenvegetation infolge Sukzession</i>
5.2.2	<i>Kartierte Pflanzenarten</i>
5.2.3	<i>Ermittelte hydraulisch relevante Vegetationsparameter: ax, ay, $dveg$</i>
5.2.4	<i>Mittlere hydraulisch wirksame Vegetationsfläche im Gelände</i>
5.2.5	<i>Flächenkontraktion im Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit</i>
5.2.6	<i>Abgeleitete Empfehlung</i>

5.1 Im Labor erhobene Vegetationsparameter

Je nach verwendetem Verfahren zur Bestimmung des Widerstandsverhaltens von Vegetationsbeständen ist unter anderem auch die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche für die Berechnung mit zu berücksichtigen. Diese hydraulisch wirksame Vegetationsfläche bezeichnet die angeströmte Fläche der Vegetation und wird bisher in den Berechnungsverfahren im „trockenen Zustand“ berücksichtigt, d.h. wenn die Bäume und Sträucher nicht mit Wasser durchströmt werden. Jedoch ist zu erwarten, dass sich die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche infolge Durchströmung reduziert.

Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich die angeströmte Vegetationsfläche im nicht durchströmten Fall im Verhältnis zur Durchströmung, d.h. bei Hochwasser, verändert. Die Versuche wurden in der geeigneten „Kleinen Rinne“ durchgeführt.

5.1.1 Bedeckungsdichten der untersuchten Weiden und Hecken

Das Wort Bedeckungsdichte bezeichnet den durch Vegetation bedeckten Anteil (= Schwarzanteil) des aufgenommenen Rasterbildes im Verhältnis zur gesamten durchflossenen Querschnittsfläche. Der Besatz beschreibt die Anzahl der Pflanzen innerhalb einer Reihe.

In den Untersuchungsreihen wurden eine bzw. sechs hintereinander angeordnete Reihen mit unterschiedlich dichtem Weiden- bzw. Heckenbesatz bestückt. Aufgrund der Fülle der durchgeführten Untersuchungen sollen zuerst die einzelnen Zeichen der im Folgenden in den Grafiken verwendeten Legenden erläutert werden. Die fünf x-Zeichen symbolisieren, dass alle Hülsen innerhalb der Reihe mit belaubten Weiden besetzt waren. Das o-Zeichen symbolisiert eine leere Hülse, d.h. ohne Pflanze innerhalb der Reihe. Die Untersuchungen wurden bei den Abflüssen 40, 80 und 120 l/s sowie den Einstaubedingungen E1 bis E3 durchgeführt. Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt wurden die Untersuchungen bei unterschiedlichen Einstaubedingungen durchgeführt, E1 bedeutet geringster und E3 höchster Einstau resp. geringste bzw. höchste Wassertiefe bei gleichem Durchfluss.

5.1.1.1 Reihe 1: Unterschiedliche Bedeckungsdichten innerhalb einer Reihe

In der „Kleinen Rinne“ wurden Untersuchungen mit einem Besatz von zwei, drei bzw. fünf Weiden innerhalb einer Reihe durchgeführt. In Abb. 43 sind die Ergebnisse der Flächenkontraktion einer Weidenreihe dargestellt. Die Bezeichnung xxxxx_E1_40 ist wie folgt zu lesen: an allen fünf Hülisen waren Weiden befestigt, der Durchfluss betrug 40 l/s und die Rinne war vom unterstromigen Ende gering eingestaut (E1).

Auf der Abszisse ist die Bedeckungsdichte der Weiden im trockenen Zustand in Prozent aufgetragen. Die Bedeckungsdichte ist auf die jeweils korrespondierende Wassertiefe im durchströmten Zustand bezogen. Hierzu wurden die Rasterbilder (= aufgenommen ohne Wasser) auf die entsprechende Wassertiefe, die sich für den jeweiligen Durchfluss einstellt, zugeschnitten. Die Ordinate zeigt die Bedeckungsdichte der Weiden im durchströmten Zustand in Prozent. Zum leichteren Lesen der Grafik ist zusätzlich eine Diagonale eingezeichnet. Die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche sinkt durch den Strömungsangriff des Wassers. Aufgrund der Reduzierung der angeströmten Fläche müssen die Punkte alle unterhalb der eingefügten Diagonalen liegen.

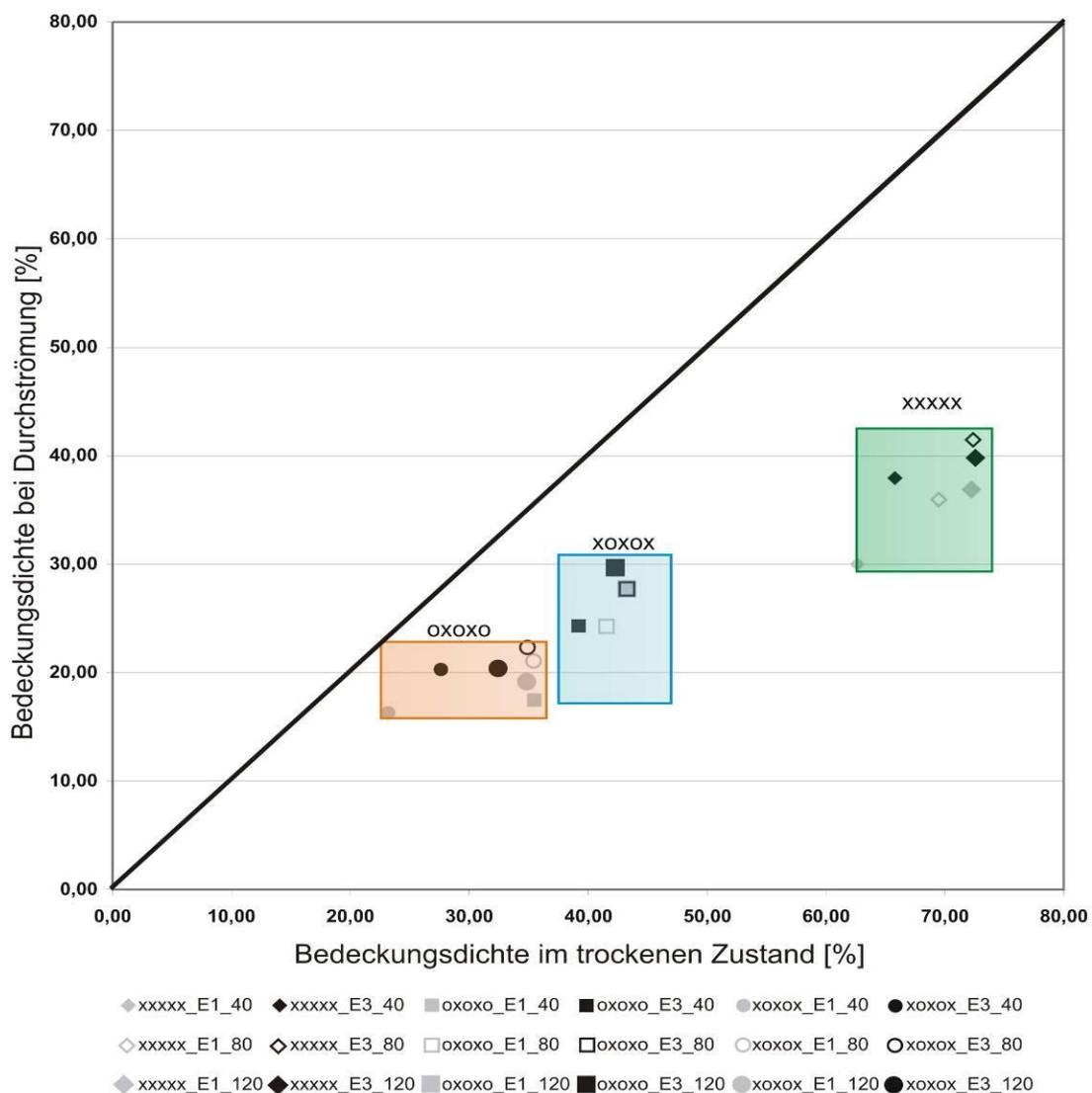


Abb. 43: Einfluss der Durchströmung auf die Bedeckungsdichte von Weiden.

In Abb. 43 sind unterschiedliche Bedeckungsdichten im trockenen Zustand sowie deren Änderungen bei einer Durchströmung dargestellt. Mit steigendem Besatz innerhalb einer Reihe steigt die Bedeckungsdichte. Werden die Pflanzen von Wasser umströmt, kommt es zu einer stromlinienförmigen Ausrichtung der Blätter und der Anteil der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche im Verhältnis zu Gesamtfläche sinkt (vgl. Abb. 44).

Bei einem Besatz aller fünf Hülsen (=xxxxx) sinkt die mittlere Bedeckungsdichte von 70 % im trockenen auf 35 % im durchströmten Zustand (vgl. Abb. 43). Sind drei Hülsen mit Weiden besetzt (=xoxox), sinkt die mittlere Bedeckungsdichte von 45 % auf 25 %. Bei einem Besatz von zwei Hülsen (=oxoxo) beträgt die mittlere hydraulisch wirksame Vegetationsfläche 30 % der Gesamtfläche bei der Aufnahme ohne Wasser und sinkt auf 20 % aufgrund der Durchströmung.

Tendenziell sinkt die Bedeckungsdichte bei steigenden Fließgeschwindigkeiten. Dies zeigt sich auch in der Grafik Abb. 43. Die hellgrauen Symbole stehen für die Einstellungen mit einem geringen Einstau (E1). Die Einstauvariante E3 führt zu einem höheren Rückstau, die Wassertiefe (h) steigt, was bei gleichem Durchfluss mit einer geringeren Fließgeschwindigkeit im Vergleich zur Einstaubedingung E1 einhergeht. Höhere Fließgeschwindigkeiten produzieren höhere Strömungskräfte auf die Pflanzen. Daraus folgt ein Ausrichten der Blätter und Äste in Strömungsrichtung, was zu einer Verringerung der angeströmten Vegetationsfläche führt. Die entsprechenden Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten sind den Anhängen A01 und A04 zu entnehmen.

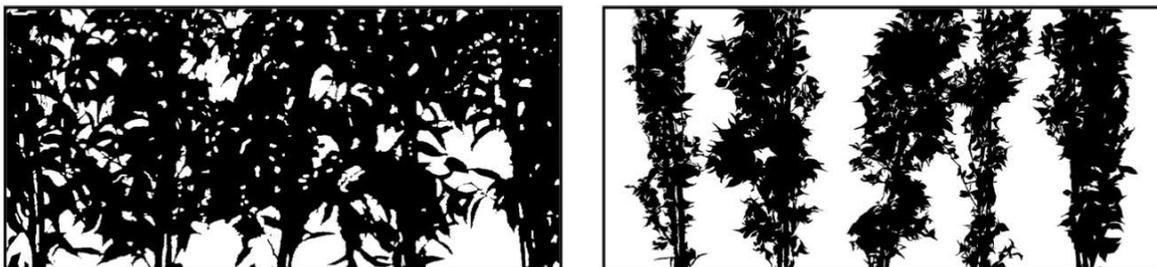


Abb. 44: Darstellung der Bedeckungsdichte am Beispiel xxxxx: links: Aufnahme im trockenen Zustand, zugeschnitten auf die Wassertiefe bei 40 l/s; rechts: Aufnahme während der Durchströmung mit Einstauvariante E3 und einem Durchfluss von 40l/s.

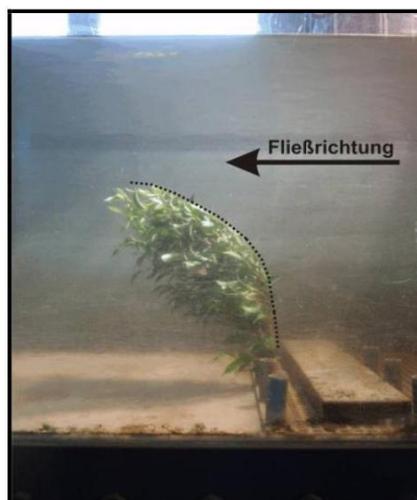


Abb. 45: Neigung der Pflanze aufgrund von Überströmung.

In den hier dargestellten Untersuchungen wird die maximale Bedeckungsdichte bei einem Abfluss von 80 l/s in Kombination mit Einstau E3 beobachtet. Wird der Durchfluss auf 120 l/s erhöht, sinkt die Bedeckungsdichte aufgrund der Überströmung. Sobald die Pflanze überströmt wird, neigt sie sich aufgrund des zusätzlichen Wasserdruckes in Strömungsrichtung. Zur Verdeutlichung ist dieser Effekt in Abb. 45 für eine einzelne Pflanze dargestellt.

5.1.1.2 Reihe 2: Gleiche Bedeckungsdichte bei veränderter Besatztiefe

Natürliche Auenbestände sind durch Gruppenanordnung von Sträuchern und Bäumen charakterisiert. Daher geht die zweite Untersuchungsreihe der Frage nach, inwieweit sich die Flächenkontraktion verändert, sobald mehrere Weidenreihen hintereinander angeordnet sind. Dabei beschreibt die Besatztiefe den Unterschied zwischen einem einreihigen und einem mehrreihigen Besatz.

Bei Unterwasseraufnahmen kann, wie bereits erwähnt, kein Raster als Hintergrundbild aufgestellt werden. Der Aufbau der Untersuchung muss daher so gewählt werden, dass nur eine Reihe fotografiert wird. Diese muss jedoch noch im Einflussbereich der sechs unterstromig angebrachten Weidenreihen sein. Der Mindestabstand zwischen diesen Reihen bestimmt die zuvor gewählte Kameraeinstellung (vgl. Kapitel 4.2.2). Diese Vegetationsanordnung ermöglicht eine Fotoauswertung analog der Untersuchungsreihe 1.

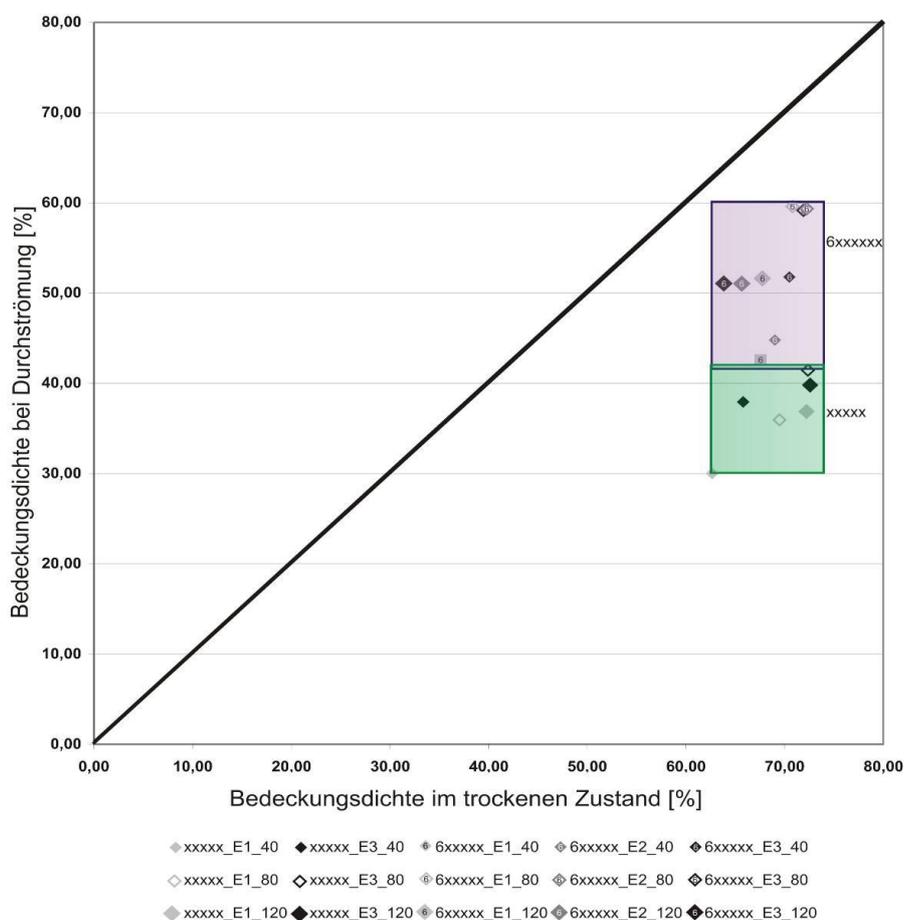


Abb. 46: Einfluss der Durchströmung auf die Bedeckungsdichte von Weiden bei veränderter Besatztiefe; eine Weidenreihe (= xxxxx) und sechs Weidenreihen (= 6xxxxx).

Der Abfluss war bei allen Untersuchungsreihen strömend, damit waren die aufgenommenen Pflanzenreihe von unterstrom beeinflusst. Die sechs Weidenreihen (= 6xxxxx) bewirken eine Reduzierung der Anströmgeschwindigkeit nach oberstrom. Es werden geringere Strömungskräfte auf die Pflanze erwartet. Dies müsste sich auch in einem veränderten Flächenkontraktionsverhältnis niederschlagen.

Die Spannbreite der Bedeckungsdichte ohne Wasser liegt für beide Untersuchungsreihen (xxxxx und 6xxxx) zwischen 63 % und 73 % und simuliert damit eine sehr dichte Weidenvegetation. Wie erwartet, kommt es zu einer veränderten Flächenkontraktion aufgrund der sechsreihigen Anordnung. Der Anteil der Vegetationsfläche in Verhältnis zur Gesamtfläche reduziert sich im durchströmten Fall für die einreihige Weidenreihe im Mittel auf 36 % und für die sechsreihige Anordnung lediglich auf 52 %.

Der Grad der Flächenkontraktion ist vor allem von der Fließgeschwindigkeit abhängig. Die Flächenkontraktion fällt, aufgrund der höheren mittleren Fließgeschwindigkeiten bei gleichem Durchfluss, für die Einstaubedingung E1 (= hellgraue Symbole, vgl. Abb. 46) im Vergleich zur Einstaubedingung E3 (= dunkelgraue Symbole) höher aus. Den Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Flächenkontraktion veranschaulichen die Schwarz/Weiß-Konvertierten-Fotos zur Bestimmung der Bedeckungsdichte (vgl. Abb. 47). Die Bedeckungsdichte beträgt im Falle der Durchströmung für 6xxxxx_E3_40 52 % und für die einreihige Anordnung xxxxx_E3_40 38 % (vgl. Abb. 46). Die sechsreihige Anordnung führt dabei zu einer Reduzierung der mittleren Fließgeschwindigkeit innerhalb des Vegetationsfeldes um 7,4 % im Vergleich zur einreihigen Anordnung (vgl. Kapitel 5.1.2). Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit erhöht sich die Strömungskraft auf die Pflanze. Die Blätter richten sich mehr und mehr in Richtung der Hauptströmung aus; die quer zur Strömung stehenden Äste und Blätter werden in Richtung Hauptstamm gelenkt. Damit wird die angeströmte Vegetationsfläche weiter reduziert. Diese Beobachtungen decken sich mit den Beobachtungen von OPLATKA (1998). Die Flächenkontraktion bzw. das stromlinienförmig Ausrichten der Pflanzen steht in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit; gleichzeitig konnten z.T. auch die von LEWANDOWSKI beschriebenen Fließpfade beobachtet werden. Eine ausführliche Diskussion dieser beiden Phänomene erfolgt in Kapitel 7.

Zusammenfassend lässt sich daraus ableiten: Je höher die Fließgeschwindigkeit, desto stärker ist die stromlinienförmige Ausrichtung der Pflanze, desto höher ist die Flächenkontraktion der angeströmten Vegetationsfläche. Der Einfluss unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten wird in Kapitel 5.1.2 genauer untersucht.

Des Weiteren zeigt Abb. 46, dass die Blattdichte der verwendeten Vegetation natürlichen Schwankungen unterliegt. Dies zeigt sich vor allem in der dargestellten Bedeckungsdichte im trockenen Zustand. Der Besatz aller fünf Hülsen (= xxxxx & 6xxxxx) in einer Reihe ist in beiden Untersuchungsreihen gleich. Betrachtet man jedoch die Bedeckungsdichte im trockenen Zustand für die einzelnen Durchflüsse für z.B. 6xxxxx_E3_120 und xxxxx_E3_120 ist festzustellen, dass diese einen Unterschied von ca. 9 % aufweisen. Dies liegt an den natürlichen Schwankungen der jeweiligen Blattdichte der verwendeten Vegetation (vgl. Anhang A09).



Abb. 47: Veränderung der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit: links: 6xxxxx_E3_40, rechts: xxxxx_E3_40; beide Bilder wurden im durchströmten Fall aufgenommen.

5.1.1.3 Reihe 3: Unterschiedliche Vegetationstypen in einer Reihe

Dichte Hecken, vor allem Rosengewächse, besiedeln zum Teil große Vorlandbereiche der Flüsse und wurden entlang der Elbe ebenfalls mit kartiert (vgl. Kap. 5.2.2). Mit dieser Untersuchungsreihe soll der Einfluss unterschiedlicher Vegetationstypen (Weiden vs. Hecken) auf die Flächenkontraktion beschrieben werden.

Abb. 48 stellt eine einreihige Weidenanordnung der einreihigen Heckenanordnung gegenüber. Ein Heckengebüsch scheint auf den ersten Blick viel dichter als eine belaubte Weide im Sommer. Jedoch ist ein typisches Merkmal von Hecken die Vielzahl von kleinen Lücken innerhalb dieser stark verästelten Pflanzen. Die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche der im Labor verwendeten Heckenvegetation beträgt im trockenen Zustand im Mittel 55 % und der von Weiden 70 %.

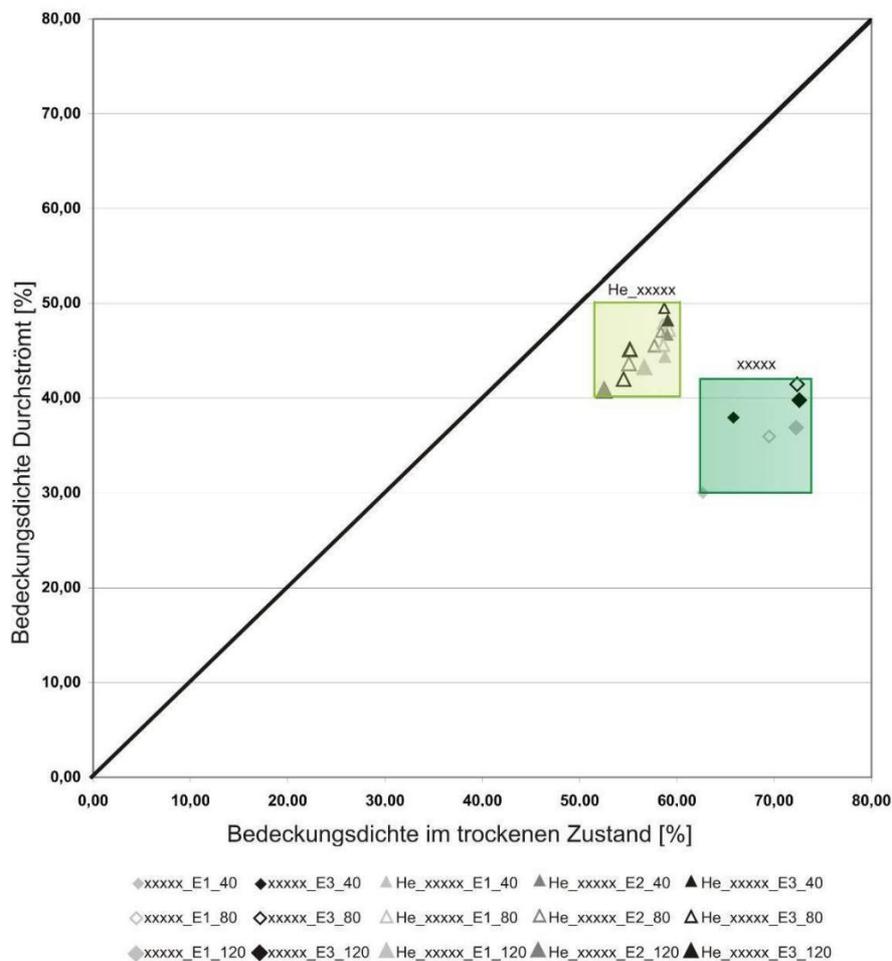


Abb. 48: Auswirkungen einer einreihigen Weidenanordnung (xxxxx) im Vergleich zu einer einreihigen Heckenanordnung (He_XXXX) auf die Flächenkontraktion.

Aufgrund des Strömungsangriffs des Wassers biegen sich die Blätter der Weide mehr in Richtung der Strömung als die deutlich steifere Belaubung der Heckengewächse. Die Flächenkontraktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche fällt bei Heckengewächsen geringer aus. Im untersuchten Fall sinkt durch die Strömung die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche bei den Hecken im Mittel um 10 % gegenüber 35 % bei den Weiden. Damit ist die Reduktion der Hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche bei Hecken im Vergleich zu Weiden deutlich geringer und kann bei den beobachteten natürlichen Schwankungen der Belaubung von fast 10 % vernachlässigt werden.

5.1.2 Interaktion zwischen Anströmgeschwindigkeit und hydraulisch wirksamer Vegetationsfläche

Wie bereits oben erwähnt, steht der Grad der Flächenkontraktion in direktem Zusammenhang mit den vorherrschenden Fließgeschwindigkeiten. Im Folgenden soll der Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Reduzierung der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche genauer betrachtet werden. Es wird postuliert, dass eine Erhöhung der mittleren Fließgeschwindigkeit eine Reduzierung der Vegetationsfläche bewirkt. Diese Annahme ist jedoch nur zulässig, sofern es sich um flexible, biegsame Vegetation handelt.

Untersuchungen bei unbelaubten Weiden ergeben eine vernachlässigbar kleine Reduzierung der Vegetationsfläche (< 5%) (vgl. Anhang A08; JÄRVÄLA 2002). Im Weiteren wird daher nur die auf Änderung der Vegetationsfläche für belaubte Vegetation eingegangen.

Tabelle 7 liefert einen Überblick über die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten der durchgeführten Versuche für einreihigen und sechsreihigen Vegetationsanordnungen. Die Pflanzenhöhe betrug bei allen Untersuchungsreihen einheitliche 0,4 m. Sind die Pflanzen durchströmt (Wassertiefe $h < 0,4$ m), bleibt die volle Pflanzenhöhe als Anströmhöhe erhalten und ein Umbiegen der Pflanze konnte nicht beobachtet werden. Ab einer Wassertiefe von $h > 0,4$ m waren die Pflanzen z.T. schon überströmt. In diesem Fall neigt sich die Pflanze in Strömungsrichtung. Das Eintauchen, d.h. der Übergang zur Überströmung erfolgt schlagartig. Diese Beobachtung deckt sich mit den Erfahrungen von OPLATKA (1998). Das Überströmen bewirkt zusätzlich zur stromlinienförmigen Ausrichtung der Blätter eine stromlinienförmige Neigung der Pflanze bezüglich ihrer Höhe (vgl. Abb. 45). Dies führt zu einer weiteren Reduzierung der angeströmten Vegetationsfläche (vgl. Anhang A08).

Tabelle 7: Veränderung der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit im Vergleich für eine einreihige (xxxxx) und eine sechsreihige (6xxxxx) Weidenanordnung.

Einstau	Durchfluss [l/s]	h (einreihig) [m]	h (mehrsreihig) [m]	ΔH [cm]	ΔH [%]	v (einreihig) [m/s]	v (mehrsreihig) [m/s]	Δv [m/s]	Δv [%]
E1	40	0,192	0,221	+2,9	+15	0,35	0,30	-0,05	-13
	80	0,301	0,339	+3,8	+13	0,44	0,39	-0,05	-11
	120	0,393	0,417	+2,4	+6	0,51	0,48	-0,03	-6
E3	40	0,248	0,268	+2,0	+8	0,27	0,25	-0,02	-7
	80	0,389	0,411	+2,2	+6	0,34	0,32	-0,02	-5
	120	0,517	0,526	+0,9	+2	0,386	0,380	-0,006	-2

Die Änderung der Bedeckungsdichte bei gleichem Durchfluss für unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten ist beispielhaft in Abb. 47 dargestellt. Tabelle 7 zeigt, dass die mehrreihige (sechsheihige) Anordnung bei der Durchflusseinstellung E1_40 eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit um 13 % bewirkt. Aufgrund der langsameren Fließgeschwindigkeiten bei 6xxxx verringert sich die Flächenkontraktion, während sich die Bedeckungsdichte bei der Durchströmung im Falle von xxxxx_E3_40 und 6xxxxx_E3_40 von 38 % auf 52 % erhöht (vgl. Abb. 46 auf Seite 59).

Der Einfluss der Anströmgeschwindigkeit auf die Flächenkontraktion ist in Abb. 49 dargestellt. Die Flächenkontraktion berechnet sich aus dem Verhältnis der Bedeckungsdichte im durchströmten zum trockenen Zustand. Eine Flächenkontraktion von 0,7 bedeutet, dass die Bedeckungsdichte infolge der Strömung um 30% reduziert wird. Die Wahl unterschiedlicher Einstaubedingungen (E1 – E3) bei gleichem Durchfluss ermöglicht eine Quantifizierung des Einflusses der Anströmgeschwindigkeit auf die Flächenkontraktion.

Wird die Fließgeschwindigkeit z.B. von 0,27 m/s auf 0,35 m/s erhöht, ändert sich die Flächenkontraktion bei einem Besatz von xxxxx (= alle 5 Hülsen sind mit Weiden besetzt) von 58 % auf 48 %. Das heißt, eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit um 27 % bewirkt eine weitere Reduzierung der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche um 10 % (vgl. Anhang A09).

Die Flächenkontraktion ist für unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten in direktem Vergleich in Abb. 49 gegenübergestellt. Die Grafik zeigt, dass mit steigender Fließgeschwindigkeit die angeströmte belaubte Vegetationsfläche immer weiter abnimmt. Ursache ist die stromlinienförmige Ausrichtung der Vegetation (vgl. OPLATKA 1998). Des Weiteren spielt der Belaubungsgrad, xxxxx bieten im Verhältnis zu oxoxo der Strömung mehr Blattwerk entgegen, für die Flächenkontraktion eine wichtige Rolle. Die Grafik zeigt, dass je höher der Belaubungsgrad ist, desto größer ist das Reduktionsverhältnis bzw. desto kleiner ist die Zahl der Flächenkontraktion.

Für die Praxis bedeutet dies, dass in die Berechnungsverfahren nicht nur die im trockenen Zustand erhobene hydraulisch wirksame Vegetationsfläche eingehen darf, sondern entsprechend der Besatztiefe und der Strömungsgeschwindigkeit ein Korrekturfaktor implementiert werden muss.

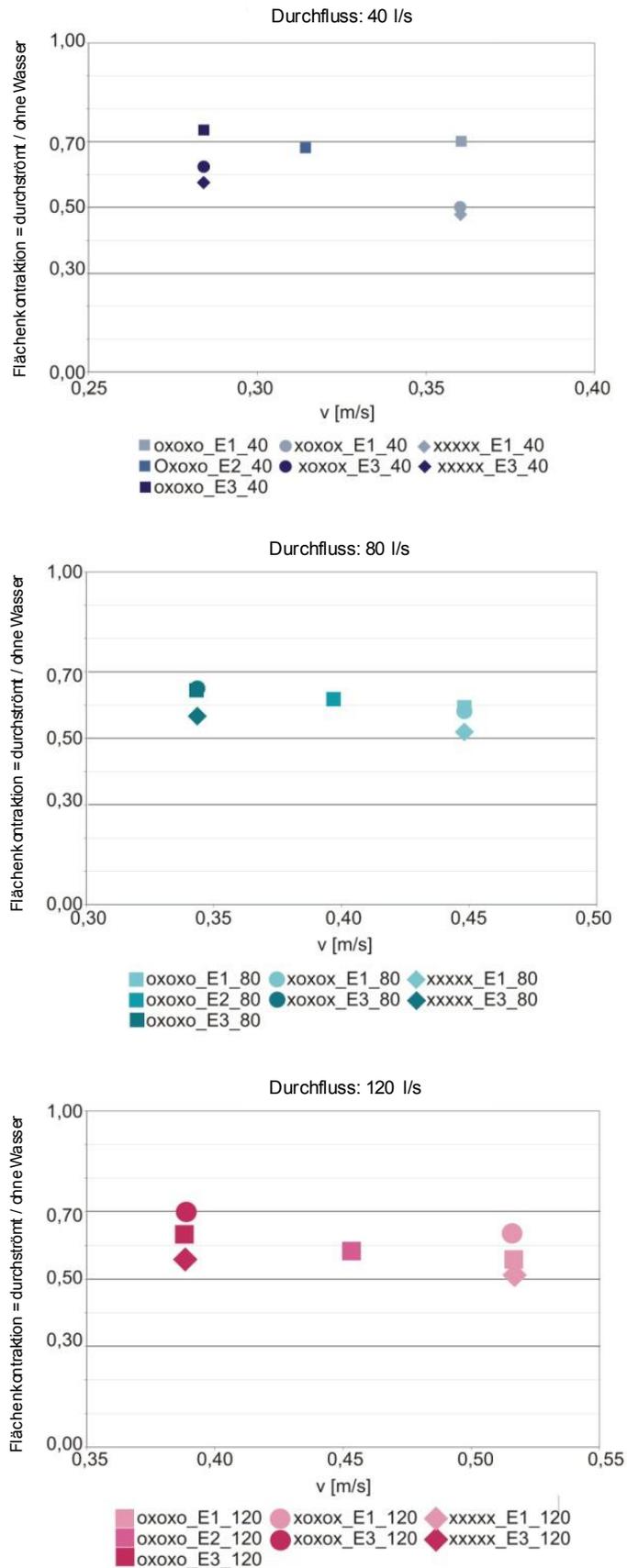


Abb. 49: Veränderung des Bedeckungsdichteverhältnisses in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit im direkten Vergleich.

5.2 Im Gelände erhobene Vegetationsparameter

Die in der Literatur von DVWK (1991) und BWK (2000) aufgeführten Vegetationsparameter werden mittels Pflanzenkartierung entlang der Mittelelbe an über 400 Referenzflächen für holzige Bewuchsbestände überprüft. Die erste Kartierung erfolgte im Juni 2006. Die zweite Kartierung im Oktober 2006 diente der Überprüfung der Belastbarkeit der im Juni erhobenen Daten. Des Weiteren wurden im Oktober 2006 die Fotos mit dem Rahmenraster hinter der Naturvegetation aufgenommen. Im Juni 2006 waren die ufernahen Vorländer der Elbe teilweise noch knietief überströmt; eine zusätzliche Aufnahme der Vegetation als Rasterfotos war deshalb nicht möglich. Während der Vegetationskartierung im Oktober war der Wasserstand der Elbe so tief, dass auch die ufernahen Vorländer trockenen Fußes erreicht werden konnten. Dies ermöglichte eine Rasteraufnahme sowohl der uferfernen als auch der ufernahen holzigen Bewuchsbeständen.

5.2.1 Einteilung der Weichholzaunenvegetation infolge Sukzession

Nach Auswertung der Rasterbilder kann die Weichholzaunenvegetation in drei Klassen unterteilt werden. Die Klasseneinteilung erfolgt ausgehend von den Altersstadien der Weichholzaue. Typ 1 repräsentiert junge Weidenbestände. Das Aufkommen von jungen Weiden ist an Rohböden gebunden. Rohböden entstehen durch Abtragungs- und Umlagerungsprozesse während eines Hochwassers. Junge Weichholzaunenbestände finden sich hauptsächlich entlang der Flussufer und/oder umschließen ältere Weichholzaunenbestände. Typ 2 steht für die Übergangsvegetation von der flexiblen jungen Weidenvegetation zu den alten, steifen Weichholzaunenbeständen. Im Vergleich zu Typ 1 sind die mittleren Astdurchmesser deutlich größer als bei den jungen Beständen. Ein dichtes Blätterdach der Weiden verhindert das Aufkommen von sohnaher Vegetation aufgrund fehlender Sonneneinstrahlung (vgl. Abb. 51: Boden-Typ 2). Das Erscheinungsbild des Typs 3 ist eine Kombination aus Typ 1 und Typ 2. Typ 3 ist durch einen weiter steigenden mittleren Astdurchmesser charakterisiert, jedoch weisen dessen Bestände auch größere Lücken zwischen den Weiden auf. Die Ursache ist das Absterben von älteren Bäumen. Durch die entstehenden Lücken gelangen Sonnenstrahlen wieder bis auf den Auenboden, wodurch wieder neue Krautfluren und Weiden aufkommen (vgl. Abb. 51: Boden-Typ 3). In Abb. 50 sind die drei Weichholzaunentypen als Rasteraufnahmen dargestellt. Die dazugehörigen Abstandsparemeter werden in Kapitel 5.2.3 erläutert.



Abb. 50: links: Typ 1: junger Weidenbestand; Mitte: Typ 2: mittelalter Auenbestand; rechts: Typ 3 älterer Auenbestand



Abb. 51: links: Boden-Typ 2: Boden ohne sohnnahe Vegetation aufgrund eines dichten Blätterdachs der Weiden; rechts: Boden-Typ 3: Brennesselflur inmitten eines alten Weichholzaunenbestands.

Die Auswirkungen eines dichten Blätterdachs sind in Abb. 51 links dargestellt: eine sohnnahe Vegetation fehlt völlig. Sterben in diesen kahlen Bodenflächen altersschwache Weiden ab, entstehen großflächige Krautfluren (z.B. Brennesselfluren). In Abb. 51 rechts ist eine Brennesselflur in einem älteren Auenbestand am Rhein dargestellt. Die Personen veranschaulichen die Wuchshöhe der Brennessel von fast 2 m.

Die im Gelände aufgenommenen Rasterfotos werden den drei Typen zugeordnet. Abb. 52 zeigt die Entwicklung der Bedeckungsdichte, d.h. die mit Vegetation bedeckte Querschnittsfläche. Für die Darstellung wird das Rasterfoto in unterschiedlichen Höhen abgeschnitten. Die Höhen stehen für unterschiedliche Wassertiefen, wodurch der Einfluss der Strömung nicht berücksichtigt wird. Die Grafik zeigt die angeströmte Vegetationsfläche (A_{veg}) für den „trockenen“ Zustand.

Ein mittelalter Auenbestand weist vom Boden aus betrachtet in den unteren 1,5 m eine Bedeckungsdichte von fast 80% auf. Wird der mittelalte Auenbestand bis zu einer Pflanzenwuchshöhe von 4,0 m betrachtet, sinkt die Bedeckungsdichte, d.h. das Verhältnis der Vegetationsfläche zur Gesamtfläche, auf ca. 60 %. Die Entwicklung der Bedeckungsdichte über die Wuchshöhe verhält sich interessanterweise bei jungen und älteren Weichholzaunenbeständen nahezu gleich. Innerhalb eines jungen Auenbestandes, im Folgenden als „junge Weiden“ bezeichnet, sinkt die Bedeckungsdichte kontinuierlich bei steigender Pflanzenhöhenbetrachtung. Die älteren Weidenbestände weisen ihr Minimum bezüglich der Bedeckungsdichte bei einer Pflanzenhöhe von 3,5 m auf. Danach steigt die Bedeckungsdichte wieder an. Ursache ist die Wuchsform der mittelalten Baumweiden mit ihren ausladenden Ästen in größerer Pflanzenhöhe (vgl. Abb. 50 links).

In Abb. 53 ist die Bandbreite der Bedeckungsdichte der Rasterfotos dargestellt; die betrachtete Pflanzenhöhe bzw. die Höhe der betrachteten Gesamtquerschnittsfläche beträgt 4 m. Die Bedeckungsdichte der mittelalten Weichholzaunen beträgt im Mittel 62 %, die der älteren Weichholzaunenbestände 41 %. Beide Werte weisen für die aufgenommenen Bilder entlang der Elbe geringe Streubreiten auf. Die Bedeckungsdichte der jungen Weiden beträgt im Mittel 38 %, die Streubreite variiert zwischen 27 % und 74% (vgl. Abb. 53).

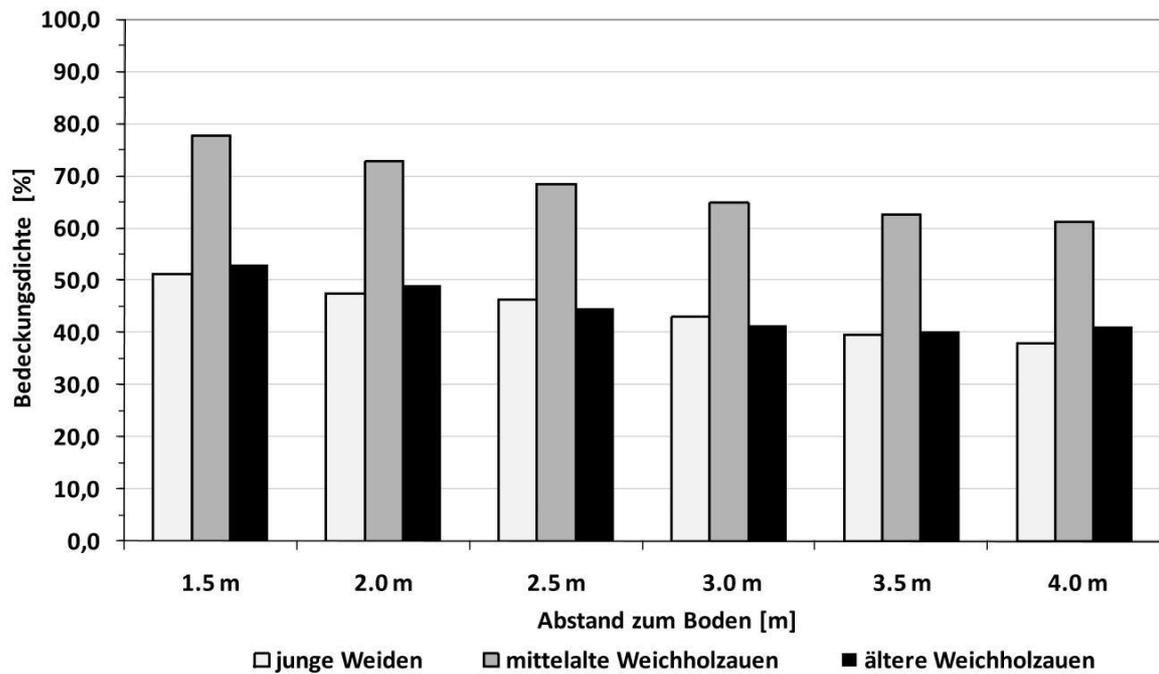


Abb. 52: Bedeckungsdichte für unterschiedliche Altersstadien einer Weichholzaune in Abhängigkeit der Pflanzhöhen.



Abb. 53: Bedeckungsdichte für die drei Auentypen: junge Weiden, mittelalte Weichholzaunen und ältere Weichholzaunen.

5.2.2 Kartierte Pflanzenarten

Weiden sind die typischen Weichholzaunvertreter (ELLENBERG 1986). Der Übergang von der Weichholzaue zur Hartholzaue verläuft im Gelände fließend. Daher liegt ein Teil der Referenzflächen im Übergangsbereich zur Hartholzaue.

Entlang der Mittelelbe finden sich immer wieder heckenartige Pflanzengesellschaften (*Crataegus* und *Rhamnus*). Sie zählen weder zu den typischen Weichholz- noch Hartholzaunvertretern, prägen jedoch das Erscheinungsbild der Elbevorländer und wurden deshalb mit kartiert. Die Abstandsparmeter des Rohrglanzgrases konnten lediglich im Juni aufgenommen werden. Im Oktober waren die Halme bereits meist schon abgeknickt, sodass eine sinnvolle Abstandsermittlung nicht mehr möglich war.

Ziel der Kartierung war die Aufnahme der hydraulisch relevanten vegetationspezifischen Parameter (a_x , a_y , d_{veg}). Diese Größen stellen die Eingangsparmeter für die Widerstandsberechnung dar. Die Ermittlung der Abstandsparmeter erfolgt an über 400 Referenzflächen. In Tabelle 8 sind die kartierten Arten entsprechend ihrer Vorkommenshäufigkeit aufgelistet. Aus Gründen einer repräsentativen Auswertung werden nur die Pflanzenarten, die mindestens fünf Mal vorhanden sind, berücksichtigt.

Tabelle 8: Übersicht der kartierten Pflanzenarten und deren Häufigkeit in Prozent bezogen auf die Gesamtanzahl der aufgenommenen Referenzflächen.

lateinischer Name	deutscher Name	Anzahl der Referenzflächen	[%]
<i>Salix triandra</i>	Mandelweide	154	37
<i>Salix x rubens</i>	Fahlweide	55	13
<i>Salix viminalis</i>	Korbweide	45	11
<i>Salix alopecuroides</i>	Fuchsschwanzweide	44	10
<i>Salix spec.</i>	Weiden allg.	15	4
<i>Salix alba</i>	Silberweide	12	3
<i>Crataegus spec</i>	Weiß-/Rotdorn	28	7
<i>Populus x canadensis</i>	Papeln	15	4
<i>Rhamnus</i>	Kreuzdorn	12	3
<i>Rosa spec.</i>	Rosengewächs	5	1
Gesamtanzahl der Referenzflächen		419	100

5.2.3 Ermittelte hydraulisch relevante Vegetationsparameter: a_x , a_y , d_{veg}

Die im Folgenden dargestellten Grafiken besitzen alle eine einheitliche Achsenskalierung, damit die Werte auch optisch gut vergleichbar sind. Auf der Abszisse ist der mittlere Astdurchmesser in Zentimeter, auf der Ordinate der Abstandsparmeter $a_x = a_y$ in Meter aufgetragen. Die Einteilung der Weidenarten (*Salix*) erfolgt entsprechend ihres Habitus (Erscheinungsbild) im adulten Zustand.

5.2.3.1 Baumweiden und Pappel

In Abb. 54 sind die Abstandsparmeter für Silberweide, Fahlweide und Bruchweide aufgetragen. Der mittlere Astdurchmesser der in den Referenzflächen aufgenommen Weiden variiert zwischen 0,2 cm bis 60,0 cm. Die Fahlweide zeigt im Vergleich zur Silberweide eine deutlich größere Bandbreite des mittleren Abstandsparmeters (vgl. Abb. 54).

Tendenziell ist festzustellen: je größer der Ast- bzw. Stammdurchmesser der Baumweiden ist, desto größer werden die Abstände der Äste bzw. Stämme untereinander.

In Abb. 55 sind die ermittelten Abstandparameter im Verhältnis zum mittleren Ast- bzw. Stammdurchmesser für die Pappel aufgetragen. Der Vergleich der beiden Diagramme zeigt, dass Baumarten eine charakteristische Verteilung der Vegetationsparameter aufweisen. Die Wahl des mittleren Abstandparameters leitet sich von dem Alter und damit von dem zugehörigen mittleren Ast-/Stammdurchmesser der Baumweide ab.

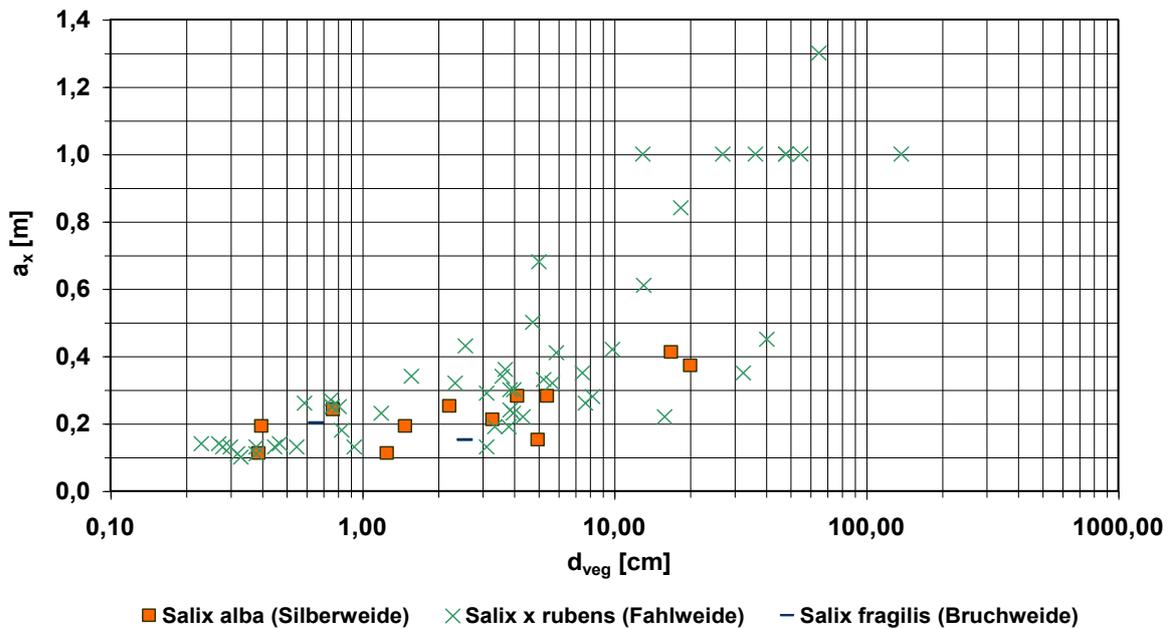


Abb. 54: Vegetationsparameter für die Baumweidenarten: Silberweide, Fahlweide und Bruchweide.

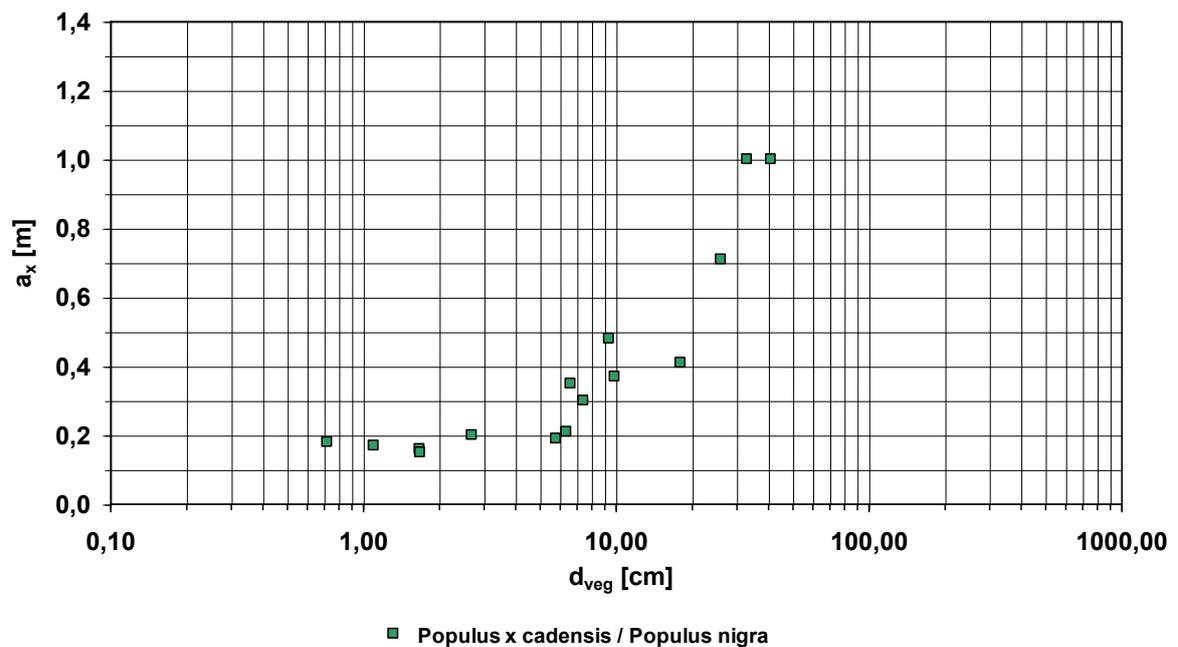


Abb. 55: Vegetationsparameter für die Auenbaumart Pappel.

5.2.3.2 Strauchweiden und Heckengewächse

Die Mandelweide ist der am häufigsten vorkommende Weichholzauenvertreter entlang der kartieren Elbevorländer. Zusammen mit der Fuchsschwanz- und Korbweide machen somit die Strauchweiden fast 60 % des für die Referenzflächen aufgenommenen Pflanzenbestandes aus.

Auffällig ist bei den Strauchweiden, im Vergleich zu den Baumweidenarten, die schmale Bandbreite der Abstandparameter a_x bzw. a_y . Der Parameter variiert bei den Strauchweiden lediglich zwischen 0,1 m und 0,4 m. Des Weiteren kann in Abb. 56 keine signifikante altersbedingte Veränderung der Abstandparameter festgestellt werden. Mit zunehmendem Alter der Weide steigt der mittlere Astdurchmesser (d_{veg}), jedoch kommt es zu keiner Veränderung des mittleren Abstandsparmeters (a_x).

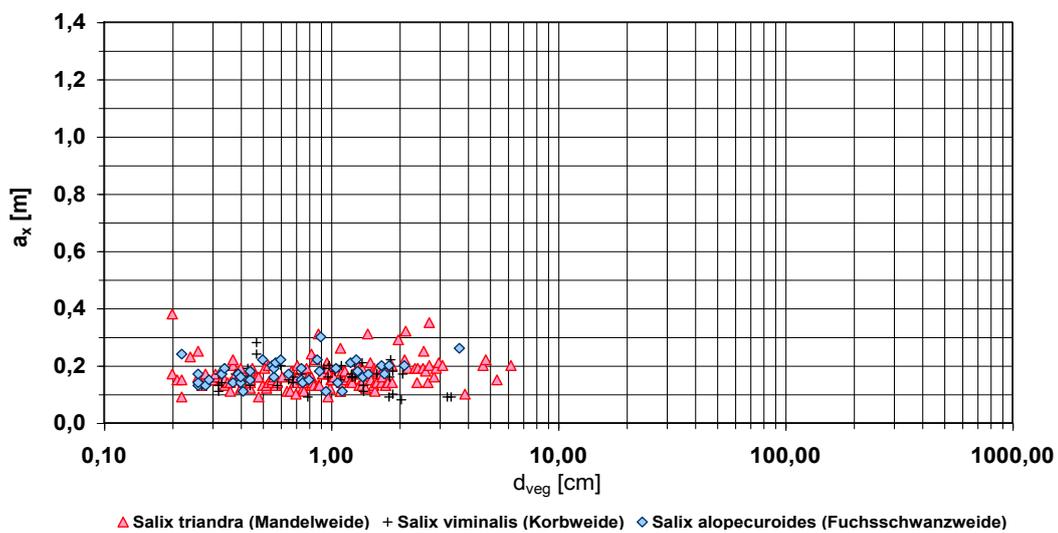


Abb. 56: Vegetationsparameter für die Strauchweidenarten: Mandelweide, Korbweide, Fuchsschwanzweide

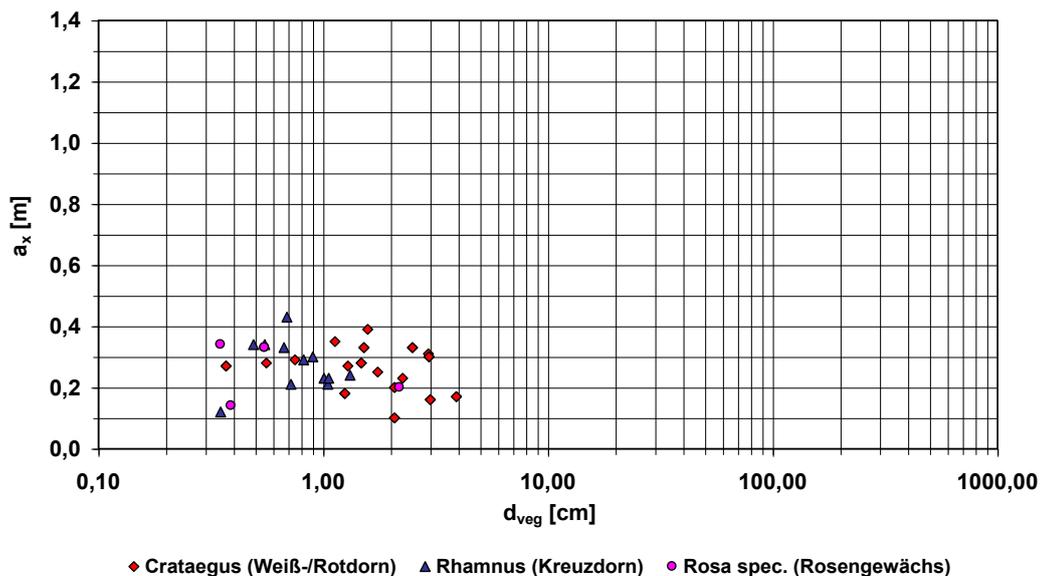


Abb. 57: Vegetationsparameter für Heckenarten: Weiß-/Rotdorn, Kreuzdorn und Rosengewächse.

Die Heckenarten Weiß-/Rotdorn und Kreuzdorn (vgl. Abb. 57) zeigen bezüglich ihrer Vegetationsparameter ein ähnliches Erscheinungsbild wie die Strauchweidenarten. Damit kann für die Strauchweiden und Hecken im Mittel ein Abstandsparemeter von 0,2 m angenommen werden. Lediglich die Wahl des mittleren Astdurchmessers ist abhängig vom Alter der Strauchweiden bzw. Hecken.

5.2.3.3 Rohrglanzgras

Der mittlere Halmdurchmesser des uferbegleitenden Rohrglanzgrases ist auf den Referenzflächen entlang der Elbe im Juni 2006 mit 0,4 cm ermittelt worden. Je nach Standort variierte der mittlere Abstandsparemeter a_x zwischen 0,1 und 0,6 m. Der BWK (2000) empfiehlt zur Beschreibung von Röhrichtern die Verwendung eines mittleren Halmdurchmessers d_{veg} von 0,7 cm und einen Abstandsparemeter a_x von 0,02 m.

Der Begriff Röhricht beschreibt eine ufernahe Pflanzengesellschaft. Zu dieser Pflanzengesellschaft zählen unter anderem auch das Schilfrohr (*Phragmites australis*), der Rohrkolben (*Typha spec.*) und das Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) sowie weitere Arten.

Eine Ursache für die unterschiedlichen Vegetationsparameter zwischen der Weichholzauenkartierung der Elbe im Juni 2006 und dem BWK könnte sein, dass der BWK die Röhricht-Pflanzengesellschaft im Gesamten beschreibt und damit ein Mittelwert aller zugehörigen Arten darstellt. Dennoch ist der geringe Abstandsparemeter a_x in Verbindung mit dem großen Halmdurchmesser d_{veg} kritisch zu hinterfragen; nach den eigenen Beobachtungen ist der gewählte Abstandsparemeter a_x von 0,02 m als zu dicht anzusehen.

Des Weiteren zeigt die Auswertung der Rohrglanzgras-Kartierung in Abb. 58, dass der Abstandsparemeter a_x stark variieren kann. Ursachen könnten Unterschiede in den lokalen Gegebenheiten wie z.B. Bodenart oder zur Verfügung stehende Nährstoffgehalte sein.

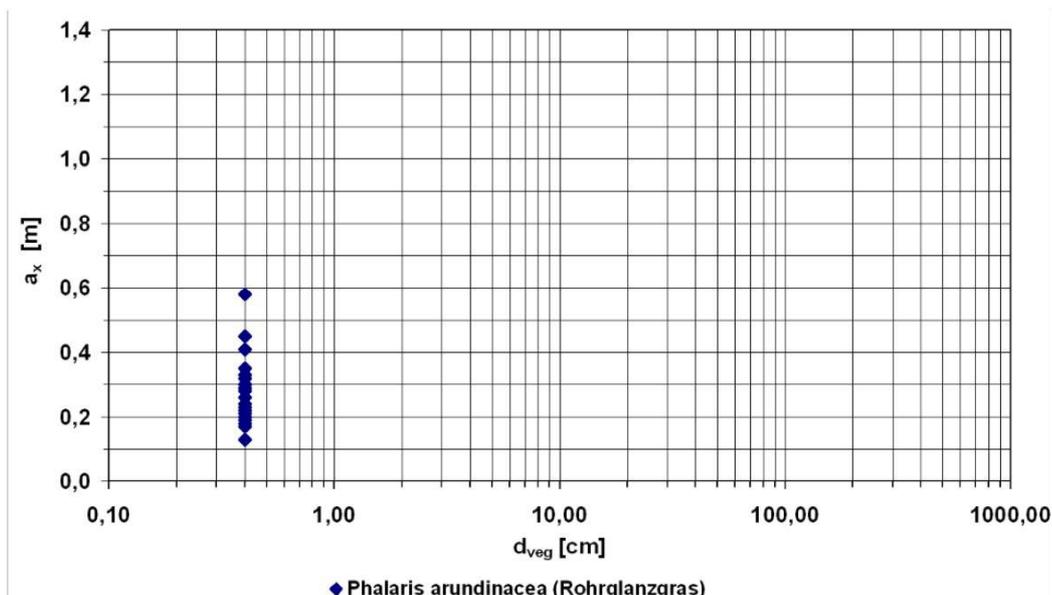


Abb. 58: Vegetationsparameter für das uferbegleitende Rohrglanzgras.

5.2.4 Mittlere hydraulisch wirksame Vegetationsfläche im Gelände

Die Empfehlungen leiten sich aus den im Gelände gewonnenen Erkenntnissen ab. Die Weichholzaubenbestände werden in drei Klassen eingeteilt (vgl. Abb. 50):

- Junge Weiden (Typ 1),
- Mittelalte Weichholzauben (Typ 2) und
- Ältere Weichholzauben (Typ 3).

Die Einteilung erfolgt, wie bereits erwähnt, nach der Sukzessionsfolge ihrer Entstehung. Mit zunehmendem Alter des Weichholzaubenbestandes verändert sich die angeströmte Vegetationsfläche. Die Einschränkung der rechnerisch ermittelten angeströmten Vegetationsflächen ($A_{veg} = h \cdot d_{veg}$) wurde bereits erläutert. Daher wird an Stelle der rechnerisch ermittelten, angeströmten Vegetationsfläche die Erhebung der Bedeckungsdichte empfohlen, die mittels einer Foto-Rasteraufnahme (vgl. Kap. 4.2.2) erfolgt.

Tabelle 9 stellt die mittleren Bedeckungsdichten der Naturaufnahmen für die drei Auentypen dar. Die Bedeckungsdichte beschreibt die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche im Verhältnis zur betrachteten, durchströmten Querschnittsfläche. Sie ist bei den mittelalten Weichholzauben am höchsten (vgl. Tabelle 9). Der Verlauf der Bedeckungsdichte junger Weiden und älteren Weichholzauben ist bei steigender Pflanzenhöhe nahezu identisch.

Die Aufnahme der Bedeckungsdichte der Naturvegetation erfolgte im Oktober, d.h. die Belaubung der Äste war zu dieser Zeit bereits gering (vgl. Abb. 59 links). Der Anteil der Belaubung ist bei den Typen 2 und 3 für die an der Elbe aufgenommenen Rasterfotos bis zu einer Wassertiefe von ca. 4 m vernachlässigbar (vgl. Abb. 59 Mitte und rechts). Damit ist eine signifikante Änderung der Bedeckungsdichte durch den Strömungsangriff bei **baumweiden-dominierten Weichholzaubenbeständen** nicht zu erwarten. Diese Annahme ist aber nur zulässig, sofern es sich:

- a) bei dem zu betrachtenden Auebestand um Baumweiden handelt und
- b) sich keine Krautfluren innerhalb des Bestandes ausgebildet haben.



Abb. 59: links: Typ 1: junger Weiden; Mitte: Typ 2: mittelalter Weichholzaue; rechts: Typ 3: ältere Weichholzaue.

Tabelle 9: Übersicht über die Bedeckungsdichte der Natur-Rasterauswertung in Prozent für gering belaubte Bestände.

Pflanzenhöhe im Abstand zum Boden	Bedeckungsdichte [%]	Bedeckungsdichte [%]	Bedeckungsdichte [%]
	Junge Weiden	Mittelalte Weichholzaunen	Ältere Weichholzaunen
1,5	51	78	53
2,0	48	73	49
2,5	46	69	45
3,0	43	65	42
3,5	40	63	40
4,0	38	61	42

Junge Weiden und ausgewachsene Strauchweiden sind durch eine über die gesamte Pflanzenhöhe reichende Belaubung gekennzeichnet (vgl. Abb. 60 links). Dichtes Blattwerk an den Ästen erhöht die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche. Die Flächenkontraktion, die durch die stromlinienförmige Anpassung der Blätter hervorgerufen wird, ist vor allem bei den jungen Weidentrieben und ausgewachsenen Strauchweiden von Bedeutung. Die Flächenkontraktion für durchströmte Strauchweiden steht in direktem Zusammenhang zur Fließgeschwindigkeit und damit auch zur resultierenden Widerstandskraft. Je größer die hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche, desto größer ist der Widerstand, den die Pflanze dem strömenden Wasser entgegensetzt.



Abb. 60: Vergleich der Wuchsformen: links: Strauchweide; rechts: Baumweide.

Ist kein dicht schließendes Blätterdach innerhalb des Auenbestandes vorhanden, kommen Krautfluren (z.B. Brennnesselfluren) auf. Die Größe der Krautfluren ist abhängig von der Größe der Auenbodenflächen, die direkte Sonneneinstrahlung erhalten. Die Brennnesselfluren biegen sich infolge der einwirkenden Strömungskraft bei Hochwasser um. Stichprobenartige Messungen am Rhein bei Raststatt ergaben eine mittlere Umleghöhe der Brennnessel von 0,5 m nach einem Hochwasser. Dieser umgebogene dichte Vegetationsbestand verhält sich im Hochwasserfall entsprechend überströmter aquatischer Vegetation. Die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Pflanzen sinkt auf nahezu Null; nicht abflussrelevanten Bereiche nahe der Sohle entstehen (vgl. STEPHAN 2002). Die Höhe des nicht abflusswirksamen Bereichs ist für Brennnesselfluren abhängig von der Pflanzenhöhe vor dem Hochwasser. Der nicht abflusswirksame Bereich kann damit mit 0,1 m bis 0,4 m über dem Boden im Hochwasserfall angenommen werden (vgl. Abb. 61).

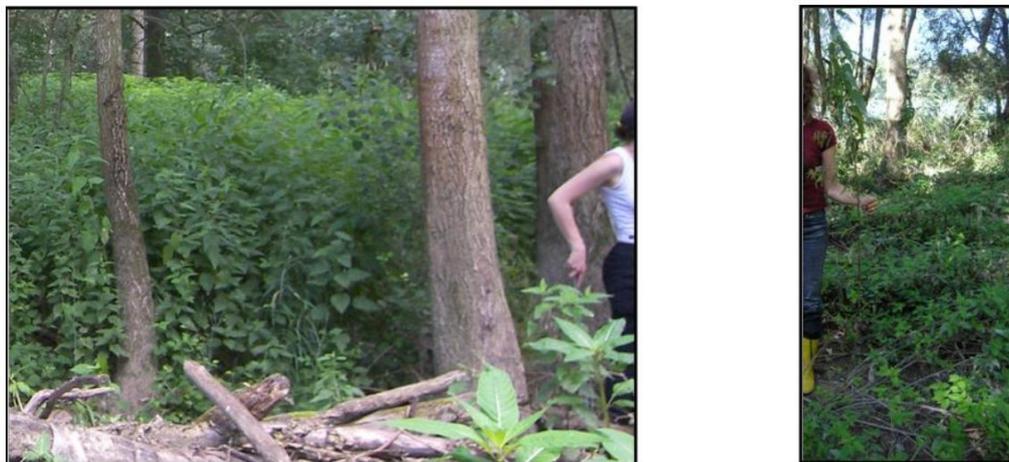


Abb. 61: links: Brennnesselfluren vor dem Hochwasser; rechts: Brennnesselfluren nach dem Hochwasser. Die Personen an den jeweiligen rechten und linken Bildrändern verdeutlichen die ursprüngliche Höhe der Brennnesseln von fast 2 m.

5.2.5 Flächenkontraktion im Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit

5.2.5.1 Belaubte Vegetation

Während des Hochwassers werden die Pflanzen durch- bzw. überströmt. Dabei kommt es vor allem bei belaubten Weiden und Hecken zu einer Reduktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit. In Abb. 62 ist der Flächenkontraktionsfaktor für unterschiedlich dicht angeordnete Weiden bei Fließgeschwindigkeiten von 0,2 bis 4,0 m/s dargestellt. Eine Fließgeschwindigkeit von z.B. 1 m/s bewirkt eine Kontraktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche um 65 – 85 %, d.h. der Flächenkontraktionsfaktor liegt zwischen 0,15 – 0,35.

Die Ergebnisse für Strömungsgeschwindigkeiten von ≥ 1 m/s basieren auf Untersuchungen von OPLATKA (1998). Die im Theodor-Rehbock-Wasserbaulabor ermittelten Flächenkontraktionen (oxoxo bis He_xxxxx) decken sich mit der von OPLATKA theoretisch abgeleiteten Annahme für Fließgeschwindigkeiten < 1 m/s (vgl. Kap. 3.2.2). Lichte Anordnungen (vgl. Abb. 62; oxoxo, xoxox) erfahren durch die Strömung eine stärkere Flächenkontraktion als dichte (vgl. Abb. 62, He_xxxxx, 6xxxxx). Bei dichten, belaubten Weidenan-

ordnungen sinkt die mittlere Fließgeschwindigkeit innerhalb des Vegetationsbestandes. Ursache ist der höhere vegetationsbedingte Widerstand des dichteren Pflanzenbesatzes. Gleichzeitig sinkt, bei geringeren mittleren Fließgeschwindigkeiten auch die Strömungskraft auf die Blätter und damit fällt die stromlinienartige Ausrichtung der Weidenblätter geringer aus.

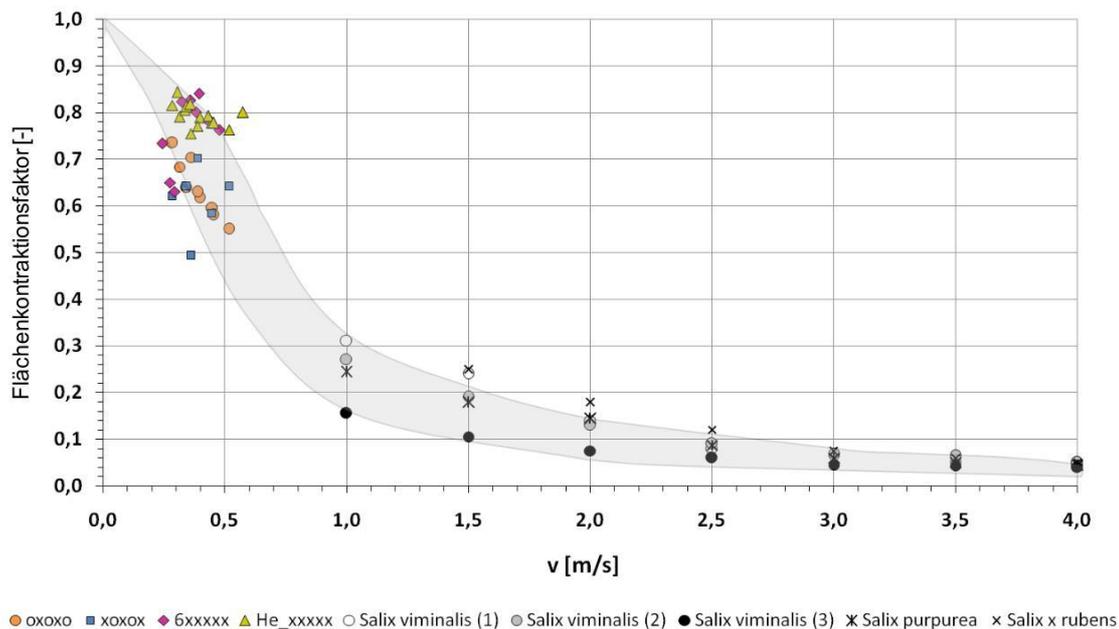


Abb. 62: Verlauf der Flächenkontraktion im Vergleich zu den Daten von OPLATKA (1998).

5.2.5.2 Unbelaubte Vegetation

Das Flächenkontraktionsverhältnis der unbelaubten holzigen Bewuchsbestände wurde nicht speziell mittels Fotoauswertung untersucht. Aufgrund der Beschaffenheit der Äste wird sich die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche als Gesamtfläche kaum ändern. Jedoch ist eine geringere Breitenausdehnung der Anströmfläche zu erwarten.

5.2.6 Abgeleitete Empfehlung bezüglich Flächenkontraktion

Die Bestimmung der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche ist ein zeitaufwendiger Arbeitsschritt. Die durchströmte Vegetationsfläche kann sich je nach Vegetationstyp und Besatztiefe deutlich zu der im trockenen Zustand ermittelten Vegetationsfläche unterscheiden.

Die biegsamen Weiden richten sich infolge der Strömungsgeschwindigkeit stromlinienförmig aus. Dabei steht die Flächenkontraktion in direktem Zusammenhang zu den Fließgeschwindigkeiten. Dies belegen die hier durchgeführten Laboruntersuchungen sowie die Ergebnisse von OPLATKA (1998).

Die steiferen Hecken erfahren selbst bei hoher Fließgeschwindigkeit nur eine geringe Reduktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche. Der Flächenkontraktionsfaktor der Hecken liegt im Mittel bei 0,8 für Fließgeschwindigkeiten bis 0,5 m/s.

Generell ist zu empfehlen, dass die Reduktion der hydraulisch wirksamen Vegetationsflächen aufgrund der Durchströmung im Hochwasserfall mit in die Widerstandsberechnung eingeht. Ansonsten kommt es zu einer permanenten Überschätzung des Widerstandsverhaltens der Weichholzaunvegetationsbestände in den HN-Berechnungen. Daher sollte die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche aus den Rasteraufnahmen, anstatt aus dem mittleren Astdurchmesser (d_{veg}) multipliziert mit der Wassertiefe (h), ermittelt werden.

Empfehlung für die HN-Berechnung bezüglich der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche:

- Die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche der jungen Weiden und Strauchweiden ist von der Belaubung (Jahreszeit) abhängig. Die **Flächenkontraktion** in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit ist bei **belaubten**, jungen Weiden sowie ausgewachsenen Strauchweiden mit zu **berücksichtigen**.
- Der Anteil der **Flächenkontraktion** kann für **unbelaubte** Weiden im Hochwasserfall **vernachlässigt** werden, da der Flächenkontraktionsfaktor nahe eins liegt.
- Flächenhaft auftretende **Brennnessel-, Kraut und Röhrichtfluren** führen zu abflussunwirksamen Bereichen und müssen entsprechend im HN-Modell **berücksichtigt** werden.
- Eine **Vor-Ort-Begehung** ist für eine möglichst exakte Abschätzung des Bestandes und damit des Widerstandsverhaltens von Weichholzaun **unabdingbar**.

6 Ergebnisse: Widerstand infolge von Weiden und Hecken

6.1	Der Einfluss von Weiden und Hecken auf den Wasserspiegel
6.2	Der Einfluss der Besatzdichte auf den Wasserspiegel
6.3	Der Einfluss der Anordnung auf den Wasserspiegel
6.4	Verlauf der Fließgeschwindigkeitsprofile
6.4.1	Übersicht über die mittleren Geschwindigkeitsprofile
6.4.2	Schwankungen der Fließgeschwindigkeit im Querprofil
6.5	Beschreibung der Vegetation als Widerstandsbeiwert
6.5.1	Widerstand infolge holziger Bewuchsbestände: k_{st} -Beiwerte
6.5.2	Widerstand infolge holziger Bewuchsbestände: λ_{veg} -Beiwerte
6.5.3	Bestimmung des Gesamtwiderstandsbeiwertes c_{WR}
6.6	Abgeleitete Empfehlungen
6.6.1	Gewässerunterhaltung
6.6.2	Fließgeschwindigkeitsprofil
6.6.3	Widerstandsbeiwerte

Das Ziel dieses Kapitel ist es, die Maßnahmen der Vegetationsunterhaltung und deren Auswirkungen auf den Wasserspiegel aufzuzeigen. Dies erfolgt anhand von praxisrelevanten Fragestellungen, die durch die einzelnen Teilkapitel führen.

Zur Beantwortung dieser praxisrelevanten Fragen werden die Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten im Labor sowohl in einer „Kleinen Rinne“ (KR) als auch in einer „Großen Rinne“ (GR) gemessen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird zur Beantwortung der Fragen nur ein zum Verständnis nötiger Auszug der Werte abgebildet. Die Aussagen, die im Folgenden dargestellt werden leiten sich aus den Ergebnissen beider Rinnen ab. Im Anhang sind die Wassertiefen und umgerechneten Werte aller Untersuchungsreihen als Zahlenwerte und z.T. auch als Grafiken aufgezeigt.

In der „Kleinen Rinne“ werden neben Weiden- auch dichte Heckenbestände simuliert. Die Ergebnisse der gemessenen Wasserspiegellagen mit einer Besatzdichte von 100 % bei Abflüssen von 40 l/s, 80 l/s und 120 l/s sind in Kapitel 6.1 dargestellt.

In Kapitel 6.2 wird der Einfluss unterschiedlicher Besatzdichten (25 %, 50 % und 100 %) auf den Wasserspiegel untersucht. Diese Frage ist vor allem für die Praxis von Bedeutung: Das „Auslichten von Vegetationsbeständen“ ist eine weit verbreitete Methode der Unterhaltung zur Hochwassersicherheit. Dieses Kapitel soll die Möglichkeiten und Grenzen einer Auslichtung aufzeigen.

Des Weiteren ist die Verteilung der Vegetation innerhalb des Abflussquerschnittes von Bedeutung. Aus diesem Grund wird in Kapitel 6.3 der Einfluss unterschiedlicher Vegetationsanordnungen auf den Wasserspiegel bei gleicher Besatzdichte erläutert.

Die sich einstellenden Geschwindigkeitsprofile innerhalb des Vegetationsbereiches im Vergleich zum leer-Zustand (Referenz-Zustand) werden in Kapitel 6.4 dargestellt. Die nach Gauckler-Manning-Strickler und Darcy-Weisbach berechneten Widerstandsbeiwerte für die unterschiedlichen Versuchsreihen werden in Kapitel 6.5 aufgezeigt. Im Anschluss erfolgt ein Zusammenstellung von abgeleiteten Empfehlungen in Kapitel 6.6.

6.1 Der Einfluss von Weiden und Hecken auf den Wasserspiegel

In diesem Kapitel wird die Frage geklärt:

- Ist ein Wasserspiegelanstieg infolge vorhandener Vegetation abhängig vom Vegetationstyp bzw. führen heckenartige Bestände zu einem höheren Wasserspiegelanstieg als strauchartige Bestände?

Diese Fragestellung ist vor allem wichtig für die Pflegemaßnahmen bei neu zu etablierenden Beständen in den ersten Jahren. Heckenartiger, dichter Bewuchs verhindert das Aufkommen von Jungpflanzen. Die Triebe von lebenden Weidenfaschinen können vor allem in den ersten Jahren sehr dichte Pflanzenbestände hervorrufen. Daher stellt sich die Frage, ob sich beide Bestände bezüglich des Widerstandsverhaltens gleich verhalten werden.

Im Folgenden wird die Entwicklung der Wasserspiegellagen für drei Untersuchungsvarianten bezogen auf den Referenzzustand in der „Kleinen Rinne“ erläutert. Die dargestellten Ergebnisse weisen alle eine Besatzdichte von 100 % auf, d.h. im Messfeld sind fünf Pflanzen je Querprofil und insgesamt 18 Reihen mit Pflanzen bestockt. Der Referenzzustand erhält im Folgenden die Bezeichnung „leer“, denn bei diesem Zustand sind die Hülsen bereits in der Rinne eingebaut, jedoch nicht mit Pflanzen bestückt. Die Hülsen bewirken eine Grundrauheit des physikalischen Modellsystems. Der k_{st} -Wert des Referenzzustands liegt im Mittel bei 38, aufgrund seiner Wassertiefenabhängigkeit variiert der Wert jedoch mit dem Durchfluss (vgl. Anhang A04). Die Untersuchungen werden bei den Abflüssen 40, 60, 80, 100 und 120 l/s sowie den Wehreinstantenbedingungen E1 bis E3 durchgeführt (vgl. Kapitel 4.1: Wasserbauliche Modellversuche: Versuchsaufbau). Die Wehreinstante E1 verursacht im Vergleich zu der Wehreinstante E3 einen geringeren Rückstau. Damit sind die Wassertiefen im Durchschnitt für E2 um 12 % und für E3 um 32 % höher als bei der Wehreinstante E1 (vgl. Anlage A04).

In Abb. 63 sind die gemessenen Wasserspiegellagen für die Durchflüsse von 40, 80, und 120 l/s und der Wehreinstantenbedingung E3 aufgezeigt. Dabei ist zu beachten, dass im Folgenden aus Gründen der besseren Anschaulichkeit die Darstellungen der Wassertiefen alle überhöht dargestellt werden. Die Bezeichnung 40_E3_U1 ist wie folgt zu lesen: der Durchfluss beträgt 40 l/s mit der Einstantenvariante E3, als Einbauvariante werden unbelaubten Weiden (U) mit einem Besatz von 100 % (1) betrachtet. Die Wasserspiegellagen für die Besatzdichten von 50 % und 25 % in der „Kleinen Rinne“ sowie die Ergebnisse der „Großen Rinne“ sind dem Anhang zu entnehmen.

Die hier dargestellten Wasserspiegellagen mit einer Besatzdichte von 100 % repräsentieren die Extreme im Gelände. Grundsätzlich bewirkt Mittel- und Großbewuchs einen Aufstau des Wassers nach oberstrom, der sich am Anstieg des Wasserspiegels ablesen lässt. Die Größe des Wasserspiegelanstiegs ist abhängig von der Art und Dichte der vorhandenen Vegetation. Belaubte Vegetationsbestände (B1) verursachen einen deutlich höheren Aufstau als unbelaubte Bestände (U1). Die relativ starre Heckenvegetation bewirkt den höchsten Aufstau innerhalb der Untersuchungsreihen.

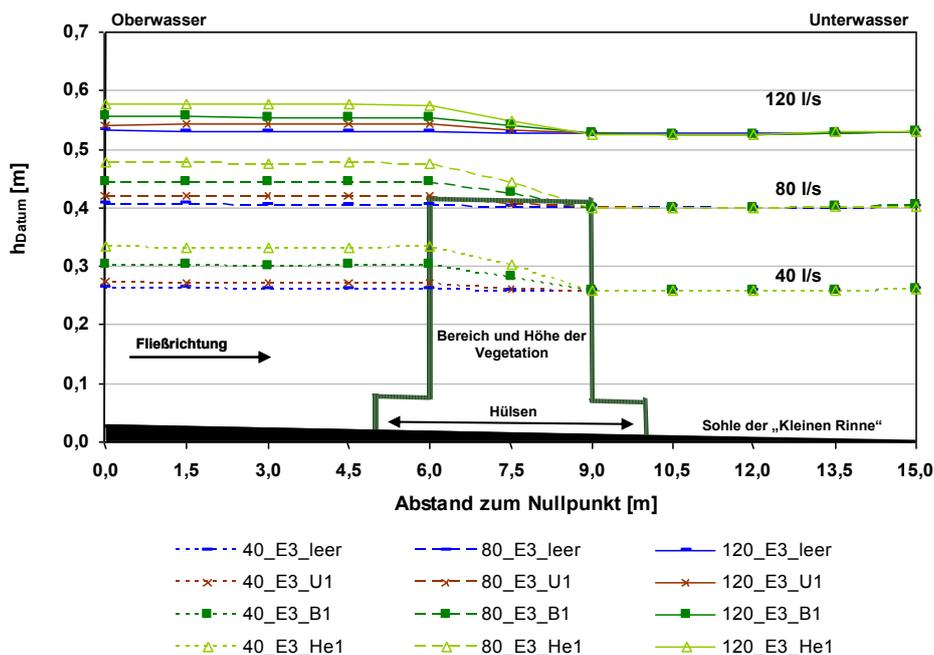


Abb. 63: Wasserspiegellagen für die vier Untersuchungsvarianten: leer, Weiden unbelaubt (U1), Weiden belaubt (B1) und dichte Heckenvegetation (He1)

Tabelle 10: Veränderung der Wasserspiegellage in % bezogen auf den Referenzzustand an der Messstelle M-7,5 für die Untersuchungsreihe E3 in der „Kleinen Rinne“:

Einbauvariante	Veränderung der Wasserspiegellage innerhalb der Vegetation an der Messstelle M-7,5	
	[%]	Δh [cm]
40_E3_leer	-	-
80_E3_leer	-	-
120_E3_leer	-	-
40_E3_U1	+4	+1,0
80_E3_U1	+4	+1,5
120_E3_U1	+2	+1,1
40_E3_B1	+16	+4,0
80_E3_B1	+10	+3,8
120_E3_B1	+5	+2,4
40_E3_He1	+29	+7,0
80_E3_He1	+19	+7,1
120_E3_He1	+9	+4,6

In Tabelle 10 ist die Veränderung der Wasserspiegellage innerhalb der Vegetation an Messstelle M-7,5 (vgl. Anlage A01 und A04) als Absolutwert sowie in Prozent bezogen auf den Referenzzustand für unbelaubte (U) und belaubte (B) Weiden und Hecken (He) mit einem Besatz von 100 % aufgetragen. Die unbelaubten Weiden bewirken eine Erhöhung der Wasserspiegellage zwischen 2 - 4 %, bzw. 1,0 bis 1,5 cm. Damit ist der durch unbelaubte Weiden hervorgerufene Aufstau im Vergleich zu belaubten Weiden und Hecken gering.

Generell ist festzuhalten, dass der relative Anstieg des Wasserspiegels im durchströmten Zustand am höchsten ausfällt. In der „Kleinen Rinne“ sind dies die Untersuchungsreihen mit Durchflüssen $Q \leq 80$ l/s (vgl. Abb. 63). Sobald die Pflanzen überströmt werden, d.h. bei $Q \geq 80$ l/s, nimmt der prozentuale Anstieg der Wassertiefe stetig ab. Bei einem Abfluss von $Q = 80$ l/s wird ein Teil der belaubten Weiden (B1) und Hecken (He1) bereits überströmt. Sobald die Pflanzen komplett überströmt werden, reduziert sich der prozentuale Wasserspiegelanstieg um ca. 2/3 im Verhältnis zur Durchströmung. Im Falle belaubter Weiden sinkt der prozentuale Wasserspiegelanstieg durchströmter Vegetation von 16 % auf 10 % mit steigender Wassertiefe respektive Fließgeschwindigkeit. Bei einer völligen Überströmung sinkt der Wasserspiegelanstieg auf einen Wert von 5 %. Ähnliches wird bei den Hecken beobachtet. Der prozentuale Wasserspiegelanstieg beträgt bei einer reinen Durchströmung 29 %, sinkt im Übergangsbereich auf 19 % und erreicht bei einer völligen Überströmung des gesamten Vegetationsbestandes einen Wert von 9 %.

Fazit:

Die Frage „Ist ein Wasserspiegelanstieg infolge vorhandener Vegetation abhängig vom Vegetationstyp?“ ist damit mit ja zu beantworten. Die belaubten Weide und Hecken liefern bei gleichem Besatz unterschiedliche Wasserspiegellagen. Eine Ursache für den geringen Wasserspiegelanstieg der belaubten Weiden gegenüber den Hecken dürfte in der stromlinienförmigeren Ausrichtung der Belaubung während des Strömungsangriffs liegen. Damit spielt die Art der Vegetation, d.h. der Vegetationstyp eine entscheidende Rolle auf die Auswirkungen des Wasserspiegelanstiegs.

6.2 Der Einfluss der Besatzdichte auf den Wasserspiegel

In diesem Kapitel soll die Frage geklärt werden:

- Kann mit einer Auslichtung des Bestandes der Wasserspiegel effizient gesenkt werden, während die Flächenausdehnung des Bestandes erhalten bleibt?

Die Besatzdichte definiert die Dichte eines Vegetationsbestandes, d.h. die Anzahl der mit Vegetationselementen bestückten Hülsen innerhalb einer definierten Flächen, z. B sind bei einer Besatzdichte von 100 % alle Hülsen bestückt. Die Nomenklatur in den Abbildungsbeschriftungen ist für 100 % = 1, für 50 % = 2 und für 25 % = 3.

In Abb. 64 ist der Wasserspiegellagenverlauf der Besatzdichten von 25 %, 50 % und 100 % für unbelaubte Weiden (U) und Hecken (He) für die Abflüsse 40 l/s, 80 l/s und 120 l/s und der Einstauvariante E3 dargestellt. Abb. 65 zeigt einen vergrößerten Detailausschnitt für den Abfluss $Q = 80$ l/s. Der Fließzustand des betrachteten Systems ist strömend, d.h. Veränderungen wie der Einbau von Vegetation, wirken sich auch nach oberstrom aus. Es wird erwartet, dass der Wasserspiegel aufgrund des höheren Gesamtwiderstandes bedingt durch die Vegetation, mit steigender Besatzdichte ansteigt. Die Messungen der Wasserspiegellagen bestätigen diese Annahme.

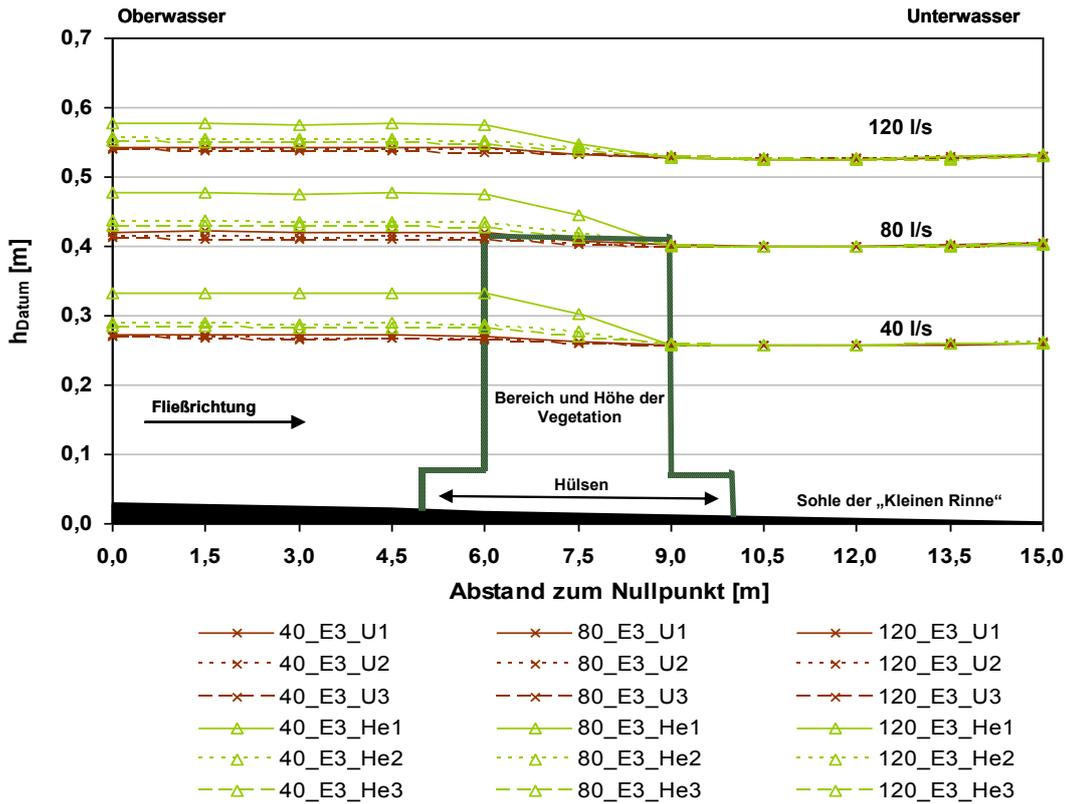


Abb. 64: Einfluss unterschiedlicher Besatzdichten von 25 %, 50 % und 100 % auf den Wasserspiegel für die unbelaubten Weiden (U) und Hecken (He).

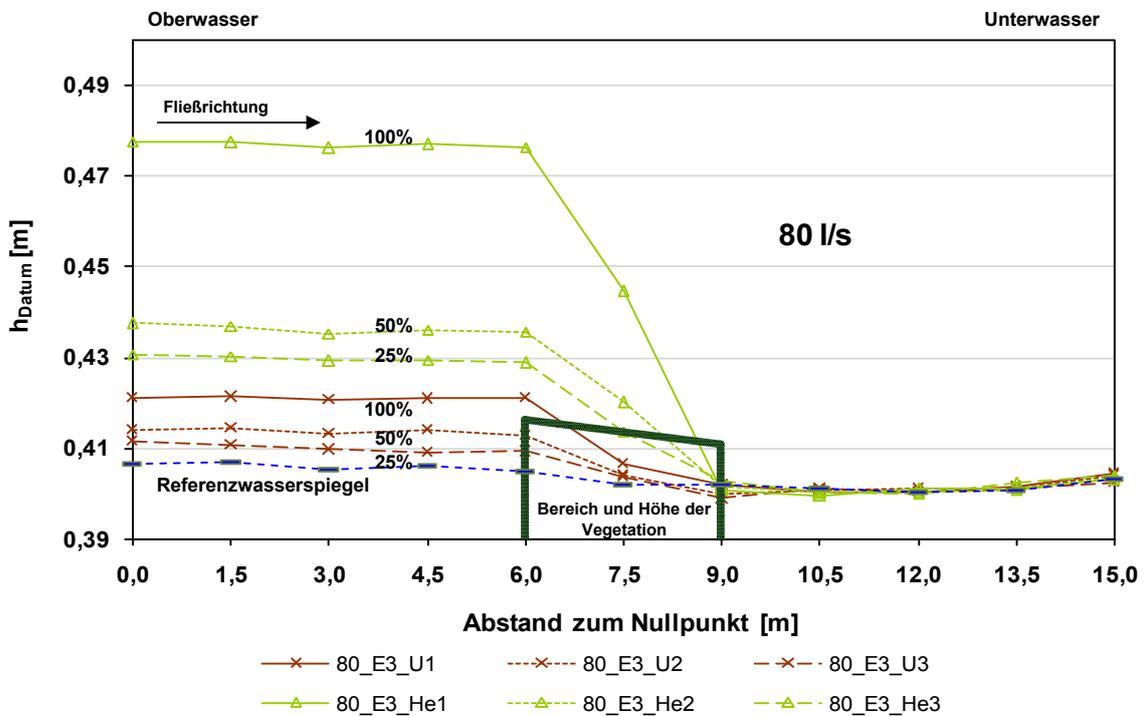


Abb. 65: Detailausschnitte des Wasserspiellagenverlaufs für $Q = 80 \text{ l/s}$ für unterschiedliche Besatzdichten für unbelaubten Weiden (U) und Hecken (He).

Tabelle 11: Veränderung der Wasserspiegellage in % bezogen auf den Referenzzustand an Messstelle M-7,5 für die Untersuchungsreihe E3 in der „Kleinen Rinne“ in Abhängigkeit der Besatzdichte:

Einbauvariante	Veränderung der Wasserspiegellage bezogen auf den Referenz-Zustand	
	[%]	Δh [cm]
40_E3_U1	+4	+1,0
40_E3_U2	+3	+0,6
40_E3_U3	+2	+0,5
40_E3_He1	+29	+7,0
40_E3_He2	+11	+2,7
40_E3_He3	+9	+2,1
80_E3_U1	+4	+1,5
80_E3_U2	+2	+0,8
80_E3_U3	+1	+0,4
80_E3_He1	+19	+7,1
80_E3_He2	+8	+3,0
80_E3_He3	+6	+2,4
120_E3_U1	+2	+1,1
120_E3_U2	+2	+0,9
120_E3_U3	+1	+0,6
120_E3_He1	+9	+4,6
120_E3_He1	+5	+2,4
120_E3_He1	+4	+0,7

Tabelle 11 listet den relativen Wasserspiegelanstieg an der Messstelle M-7,5 (vgl. Kapitel 4.1) für unbelaubte Weiden (U) und Hecken (He) für unterschiedliche Besatzdichten auf. Der relative Wasserspiegelanstieg beschreibt die Veränderung der Wassertiefe infolge Vegetation bezogen auf die Wassertiefe im leer-Zustand. Die Angaben sind sowohl als Absolutwerte als auch zur besseren Veranschaulichung in Prozent angegeben und zeigen damit sehr gut den jeweiligen Trend auf. Dabei ist anzumerken, dass in Tabelle 11 die Werte für den höchsten Einstau (E3) und den damit, im Verhältnis zu E2 und E3, geringsten mittleren Fließgeschwindigkeiten aufgetragen sind. Die Einstaubedingungen E2 und E3 weisen deutlich höher mittlere Fließgeschwindigkeiten auf, was sich in einem höheren prozentualen Wasserspiegelanstieg widerspiegelt (vgl. Anhang A04). Da die Werte für alle Einstauvarianten denselben Trend zeigen, werden im Folgenden lediglich die Werte für die Einstauvariante E3 diskutiert.

Der prozentuale Wasseranstieg bezieht sich auf den jeweiligen Referenz-Zustand, d.h. den sich einstellenden Wasserspiegel ohne Vegetationselemente. Die Erhöhung des durch unbelaubte Weiden hervorgerufenen Wasserspiegels beträgt bei einem Durchfluss von 80 l/s und einem Besatz von 25 % ein Prozent. Bei einer Verdoppelung des Besatzes verdoppelt sich der prozentuale Wasserspiegelanstieg. Eine weitere Verdopplung des Besatzes auf 100 % resultiert in einer Verdopplung des prozentualen Wasserspiegelanstiegs auf 4 %.

Dieser lineare Trend kann für die Untersuchungen mit den Hecken nicht beobachtet werden. Ein Besatz von 25 % im Übergang zur Überströmung befindlicher Hecken, d.h. $Q = 80 \text{ l/s}$, bewirkt einen prozentualen Anstieg des Wasserspiegels von 6 %, eine Verdopplung des Besatzes produziert einen Aufstau um 2 % auf 8 %. Eine weitere Verdopplung, d.h. bei einem Besatz von 100 %, führt zu einem Wasserspiegelanstieg von insgesamt 19 %. Im Vergleich zu den unbelaubten Weiden steigt der Wasserspiegelanstieg nicht linear, sondern potenziell.

Die Werte in Tabelle 11 zeigen aber auch, dass eine Senkung des Wasserspiegelanstiegs nicht nur durch Auslichten, sondern auch durch ein verändertes Verhältnis von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe erreicht werden kann. Sobald die Pflanzen überströmt werden, fällt der prozentuale Wasserspiegel geringer aus. Der Anstieg wird bei einem Besatz von 100 % für unbelaubten Weiden von 4 % auf 2 % und für Hecken von 19 % auf 9 % gesenkt.

Bei einer Erhöhung des Besatzes von belaubten Weiden und Hecken von 50 % auf 100 % steigt der Wasserspiegel überproportional an. Eine Erklärung hierfür könnte in dem Interaktionsprozess zwischen Strömung und Pflanze liegen. Dabei stehen die Pflanzen so dicht, dass sich die Nachlaufwirbel gegenseitig beeinflussen und zusätzliche Scherspannungen entstehen. Diese Scherspannungen bewirken einen zusätzlichen Strömungswiderstand, der sich in Form eines überproportionalen Anstiegs des Wasserspiegels nach oberstrom auswirkt.

Fazit:

Damit kann die Frage „Kann mit einer Auslichtung des Bestandes der Wasserspiegel effizient gesenkt werden, während die Größenausdehnung des Bestandes erhalten bleibt?“ mit ja beantwortet werden. Jedoch ist die Höhe der Absenkung des Wasserspiegels vom Vegetationstyp, dem Belaubungsgrad und dem Besatz abhängig.

Neben dem Besatz spielt auch das Verhältnis von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe für die Höhe des Wasserspiegelanstiegs eine wichtige Rolle. Letzteres könnte in der praktischen Umsetzung der Wahrung der Hochwassersicherheit die Frage aufwerfen, ob es für schmale Täler mit gleichzeitig großen Wassertiefen im Hochwasserfall aus ökologischen Gründen nicht sinnvoller ist, den Bestand auf eine bestimmte Höhe zu halten, statt auszulichten.

6.3 Der Einfluss der Anordnung auf den Wasserspiegel

In diesem Kapitel sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Welche Rolle spielt die Anordnung, d.h. die räumlich Verteilung der Vegetation, für den Aufstau nach oberstrom?
- Welchen Einfluss hat die Besatzdichte bei unterschiedlichen Anordnungsmustern?

Die folgende Untersuchungsreihe ist vor allem für die Unterhaltung der Vorlandvegetation von Bedeutung. Die Frage für die Praxis lautet: „Kann durch eine gezielte, systematische Anordnung der Vegetation der Aufstauereffekt weiter verringert werden?“

Hierzu werden zwei Untersuchungsreihen durchgeführt. Der Einfluss von drei Anordnungsmustern mit einer Besatzdichte von 50 % für belaubte (B2) und unbelaubte (U2) Weiden wurde in der „Großen Rinne“ untersucht. Der Einfluss eine Besatzdichte von 100 % wurde nach vier unterschiedlichen Anordnungsmustern, aus ökonomischen Gründen, in der „Kleinen Rinne“ analysiert.

Besatzdichte 50 %:

Abb. 66 stellt eine Übersicht über die eingebauten Vegetationsanordnungen in der „Großen Rinne“ dar. Bei den Untersuchungsreihen U2/B2 (unbelaubt/ belaubt) sind die Weiden regelmäßig versetzt eingebaut. Die Abkürzung 2a steht für einen Einbau in Linien und 2b für eine zufällige Vegetationsverteilung. Je Hülse wurde ein Vegetationselement befestigt.

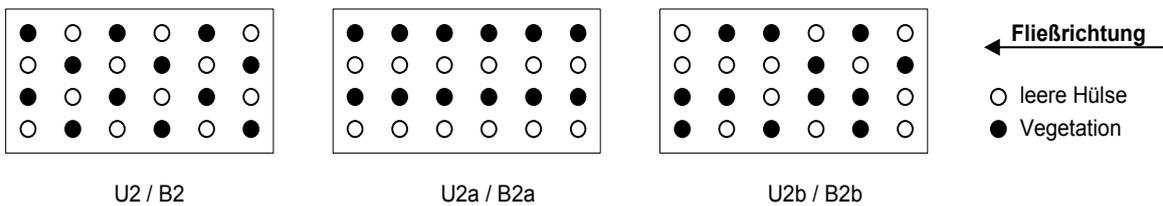


Abb. 66: Anordnungsübersicht der eingebauten Vegetationselemente mit einer Besatzdichte von 50 % in der „Großen Rinne“.

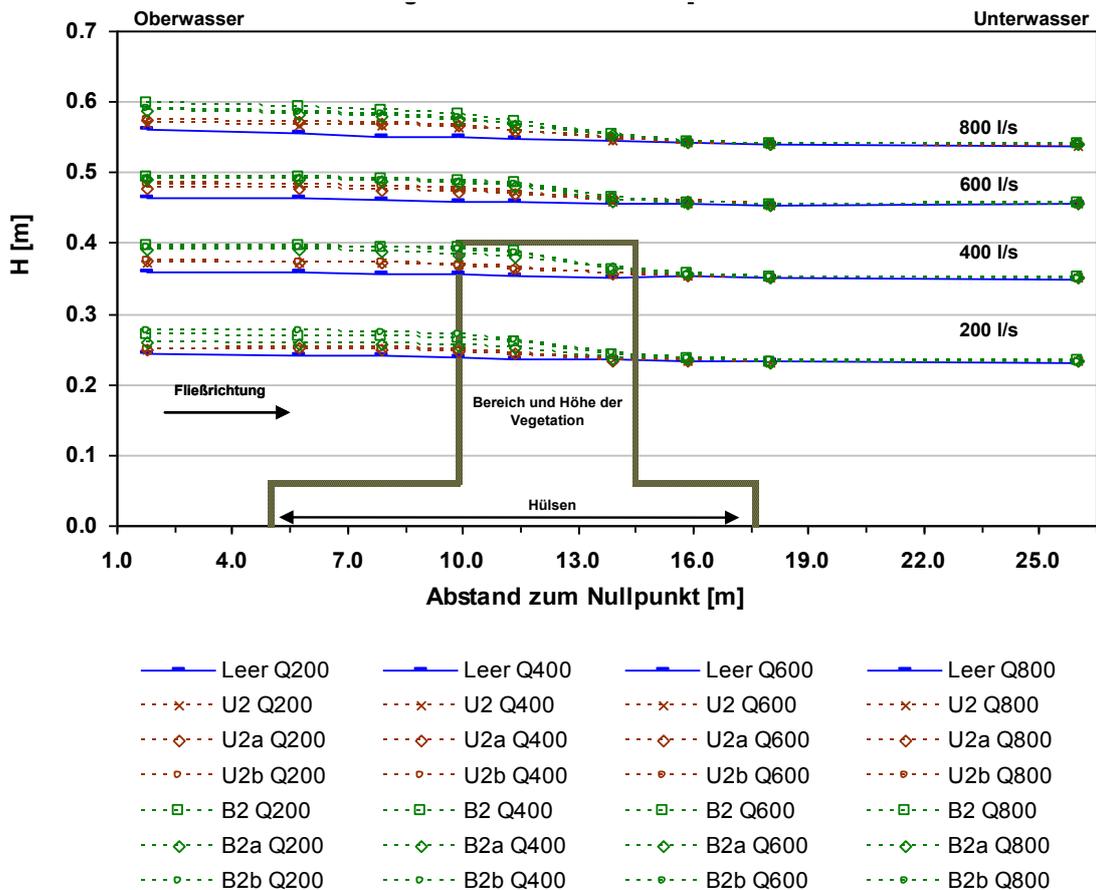


Abb. 67: Verlauf der Wasserspiegellagen für unbelaubte (U) und belaubte (B) Weiden mit einer Besatzdichte von 50 % für drei unterschiedliche Anordnungsmuster.

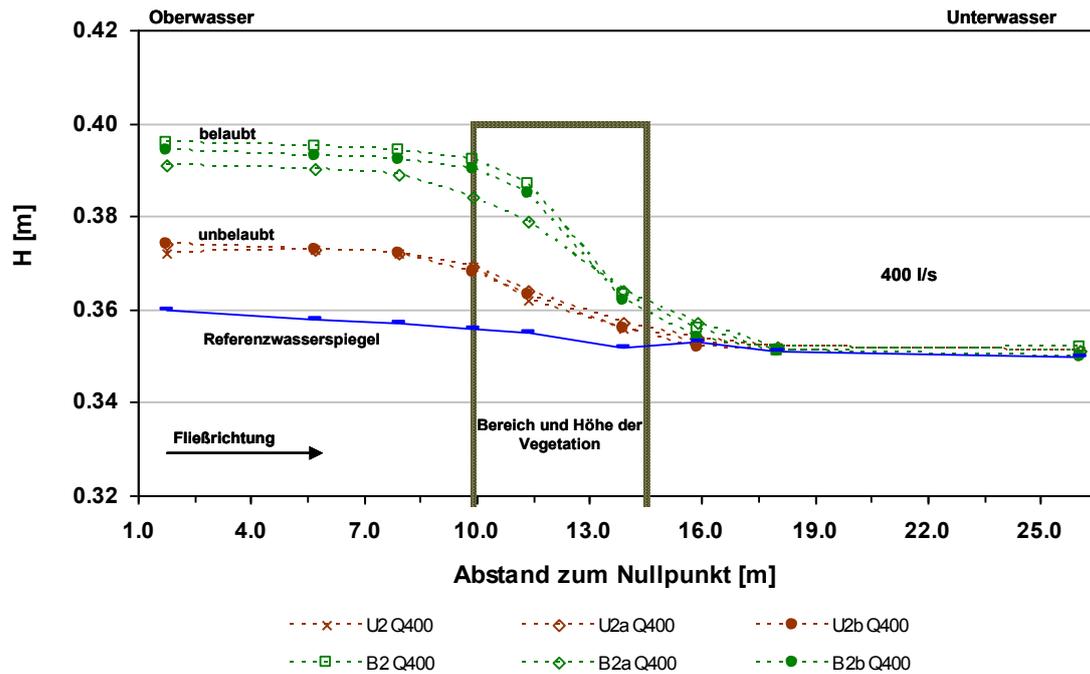


Abb. 68: Detailausschnitt für die Wasserspiegellagenverlauf durchströmter Vegetation mit einer Besatzdichte von 50 % bei einem Abfluss von 400 l/s.

In Abb. 67 ist der Wasserspiegellagenverlauf der unterschiedlichen Pflanzenanordnungen mit einer Besatzdichte von 50 % für alle untersuchten Abflüsse dargestellt. Bei den Abflüssen 200 l/s und 400 l/s sind die Pflanzen durchströmt. Höhere Durchflüsse bewirken eine Überströmung der Pflanzen. Abb. 68 zeigt einen vergrößerten Detailausschnitt für den Durchfluss von 400 l/s.

Der Wasserspiegelverlauf der unbelaubten Weiden (U) verändert sich nur geringfügig innerhalb der Pflanzen bei verschiedenen Anordnungen. Diese Abweichungen werden auf Messungenauigkeiten innerhalb der Pflanzen zurückgeführt. Der Strömungsangriff des Wassers bewirkt eine Eigenschwingung der Pflanzen. Diese Eigenschwingung verursacht einen zusätzlichen Aufstau mit einhergehender Wellenbildung, die zu einer zusätzlichen Schwankung der Wasseroberfläche führt. Oberstrom der unbelaubten Weiden sind die Wasserspiegellagen nahezu identisch.

Unterschiede in den Wasserspiegellagen ergaben sich bei den belaubten Untersuchungsreihen (B). Den geringsten Wasserspiegelanstieg verursachen die in Linien eingebauten Weiden (B2a). Diese Anordnung bewirkt, dass die Pflanzen insgesamt dem Wasser einen geringeren Widerstand entgegensetzen. Die Strömung folgt den vegetationsfreien Bahnen, erfährt jedoch infolge des reduzierten Strömungsquerschnitts eine lokale Erhöhung der Fließgeschwindigkeit. Bezogen auf die versetzt angeordneten belaubten Weiden (B2) bewirkt die Anordnung der Pflanzen in Linien (B2a) eine maximale Reduzierung der Wassertiefe um 5 mm bzw. 2 % bei einem Abfluss von 400 l/s. Insgesamt fällt der Einfluss der Anordnung für eine Besatzdichte von 50 % für unbelaubte wie belaubte Weiden sehr gering aus.

Besatzdichte: 100 %:

In der „Kleinen Rinne“ wird der Einfluss der Anordnung bei einem Besatz von 100 % untersucht. Bei einer Besatzdichte von 100 % ist zuerst jede Hülse mit einem Vegetationselement bestückt. Diese Anordnung erhält in der Nomenklatur eine 1. Eine Änderung der Anordnungsmuster bei einem gleich bleibenden Ausgangsbesatz von 100 % bedeutet somit, dass entsprechend der Änderung des Anordnungsmusters mehrere Vegetationselemente an einer Hülse befestigt werden müssen. Dabei bleibt die Gesamtanzahl der eingebauten Vegetationselemente konstant, jedoch erfolgt eine veränderte Verteilung innerhalb der Fläche. Damit kann nur eine „theoretische Besatzdichte“ in Bezug auf die Anzahl der verwendeten Vegetationselemente von 100 % eingehalten werden.

Abb. 69 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Anordnungsmuster. In der Untersuchungsreihe U1/B1 ist an allen Hülsen des Messfeldes jeweils eine belaubte bzw. unbelaubte Weide befestigt. U1a/B1a untersucht den Einfluss einer einzelnen, wandnahen Weidenlinie und U1b/B1b repräsentiert eine zufällige Verteilung der Vegetation. Zusätzlich wurde eine schachbrettartige (1c) sowie eine pfeilartige (1d) Anordnung untersucht.

In Abb. 70 sind die Wasserspiegellagen der unterschiedlichen 100 %-Besatzanordnungen für die Durchflüsse 40 l/s, 80 l/s und 120 l/s dargestellt. Die Auswirkung der Anordnungsmuster ist bei der reinen Durchströmung (Q = 40 l/s) am höchsten, bei der die Pflanzenhöhe größer oder gleich der Wassertiefe ist. Die Reduzierung des Aufstaus nach oberstrom konnte bei gleicher Besatzdichte für einen dichten, belaubten, durchströmten Weidenbestand durch eine linienartige Anordnung (B1a) um bis zu 9 % gesenkt werden. Sobald das Pflanzenkollektiv überströmt wird, d.h. Q = 120 l/s, reduziert sich die absenkende Wirkung der linienartigen Anordnung auf lediglich 1 % (vgl. Anhang 02).

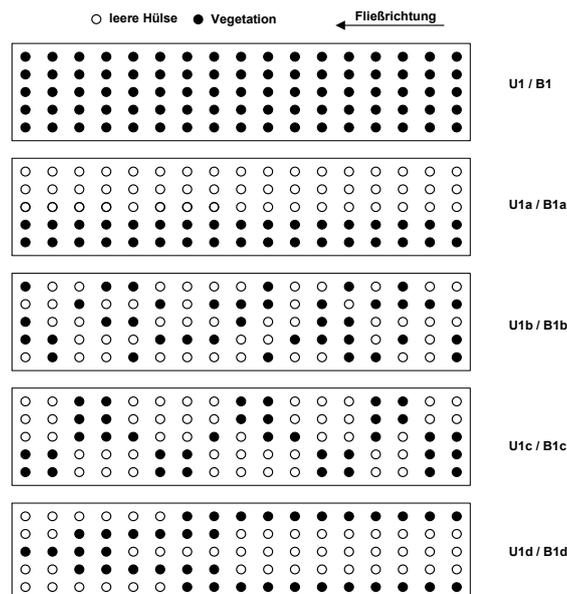


Abb. 69: Anordnungsübersicht der eingebauten Vegetationselemente mit einer Besatzdichte von 100 % in der „Kleinen Rinne“.

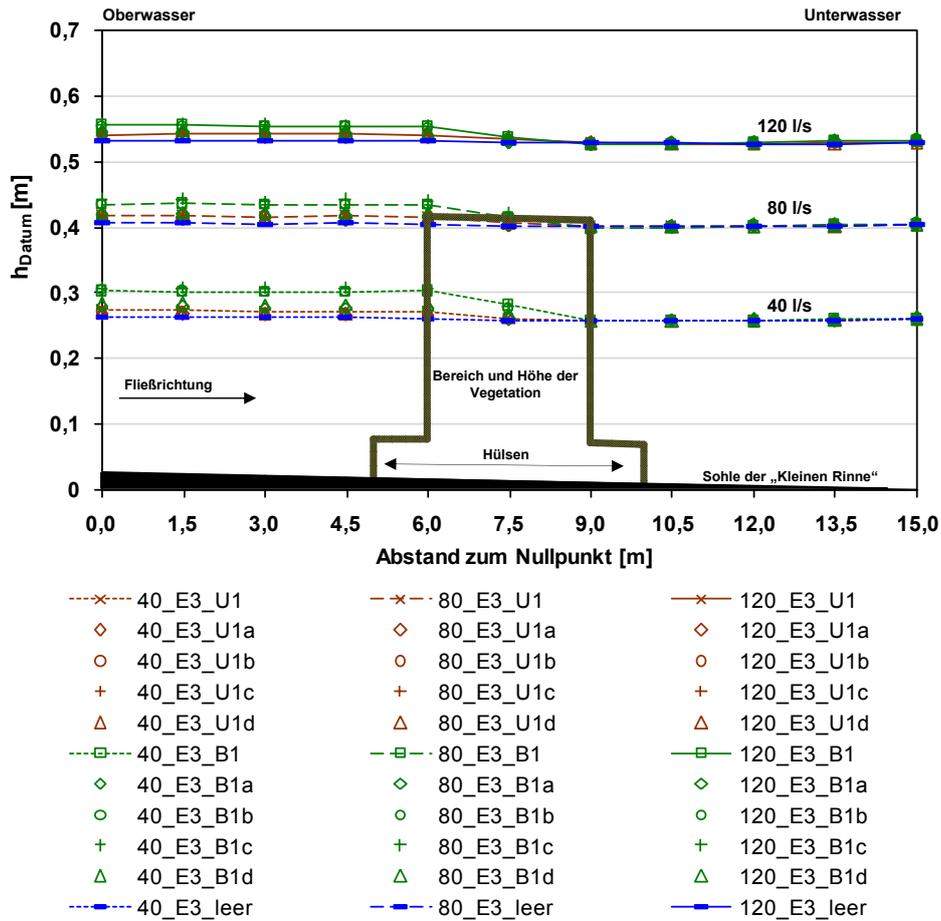


Abb. 70: Verlauf der Wasserspiegellagen für unbelaubte (U) und belaubte (B) Weiden mit einer Besatzdichte für fünf unterschiedliche Anordnungsmuster.

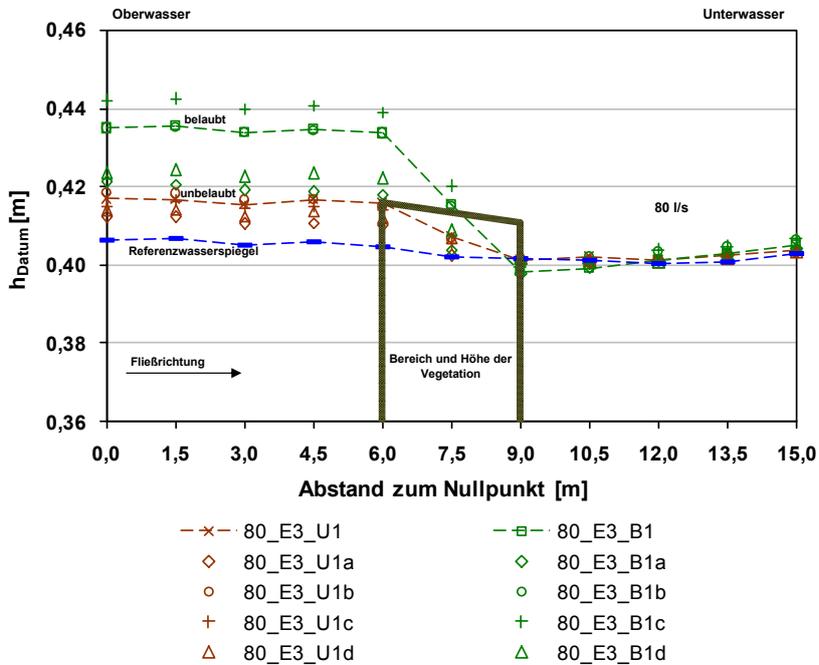


Abb. 71: Detailausschnitt für die Wasserspiegellagenverlauf mit einer Besatzdichte von 100 % bei einem Abfluss von 80 l/s.

In Abb. 71 sind die Wasserspiegellagen der unterschiedlichen Anordnungsmuster mit einem Besatz von 100 % für den Durchfluss von $Q = 80 \text{ l/s}$ und der Eintaubedingung E3 dargestellt. Der volle Besatz (1) und die zufällige (1b) Verteilung liefern annähernd identische Wassertiefen. Dieses Resultat war auf den ersten Blick nicht zu erwarten. Ursache dieses Phänomens ist das Anbringen von mehreren Vegetationselementen an einer Hülse, denn damit wird die effektive hydraulisch wirksame Vegetationsfläche reduziert. Die schachbrettartige Anordnung (1c) bewirkt im Vergleich zu einer geordneten Verteilung (1) einen höheren Aufstau. In Prozent ausgedrückt, handelt es sich jedoch lediglich um eine Erhöhung der Wassertiefe von 1 %. Der pfeilartige (1d) sowie der als Linien (1a) durchgeführte Einbau verursachen bei den unbelaubten wie auch bei den belaubten Weiden den geringsten Widerstand und damit den geringsten Aufstau. Die maximale prozentuale Reduzierung im Vergleich zum vollen, symmetrischen Besatz (1) beträgt für belaubte Weiden bei einem Durchfluss von 80 l/s 3 % bzw. 4 %.

Fazit:

Damit kann die Frage „Welchen Einfluss hat die Besatzdichte bei unterschiedlichen Anordnungsmustern?“ analog der Frage „Hat die Besatzdichte einen Einfluss auf den Aufstauereffekt?“ in Kapitel 6.3 beantwortet werden. Die Auswirkungen auf den Wasserspiegelanstieg nach oberstrom von belaubten Weiden und Hecken steigt bei der Erhöhung des Besatzes von 50 % auf 100 % überproportional. Damit hat auch die räumliche Verteilung der Pflanzen bei einem Besatz von 100 % eine größere Auswirkung auf den Wasserspiegel als bei einem Besatz von 50 %.

Zur Beantwortung der Frage „Welche Rolle spielt die Anordnung, d.h. die räumliche Verteilung der Vegetation, für den Aufstau nach oberstrom?“ ist festzuhalten, dass sich je nach räumlicher Verteilung der Pflanzenmasse der Wasserspiegel unabhängig vom Besatz absenken, aber auch erhöhen kann. Eine konzentrierte Anordnung innerhalb einer Linie bewirkt die höchste Reduzierung des Aufstauereffekts. Bei dieser Anordnung ist jedoch auch zu beachten, dass die Absenkung der Wasserspiegellage vor allem auf die Verringerung der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche zurückzuführen ist.

Für die Praxis bedeutet dies, dass die Anordnung der Pflanzen im Verhältnis zur Bedeckungsdichte einen deutlich geringeren Einfluss auf die Reduktion des Aufstaus hat. Sobald die Pflanzen überströmt werden, ist der Effekt der Anordnung vernachlässigbar.

6.4 Verlauf der Fließgeschwindigkeitsprofile

In diesem Kapitel sollen folgende Fragen untersucht werden:

- Wie stellt sich der Verlauf der Fließgeschwindigkeitsprofile für die unterschiedlichen Vegetationsbestände dar?
- Wie ist die räumliche Verteilung der Fließgeschwindigkeit innerhalb eines Vegetationsfelds?
- Wie hoch ist die jeweilige Schwankungsbreite zum mittleren Fließgeschwindigkeitsprofil für unterschiedliche Vegetationsbestände?

Die folgende Untersuchungsreihe ist vor allem für die Messung der Fließgeschwindigkeit im Gelände von Bedeutung. Die Frage für die Praxis, die dabei beantwortet werden soll, lautet: „Wie eindeutig sind die Fließgeschwindigkeitsmessergebnisse bei Naturmesskampagnen innerhalb von Vegetationsbeständen?“

Zuerst werden die zeitlich und räumlich gemittelten Fließgeschwindigkeitsprofile der leer-Zustände (= Referenzzustand), der unbelaubten und belaubten Weiden sowie dichter Heckenbestände im Falle von Durch- und Überströmung aufgezeigt. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der räumlichen Verteilung der gemessenen Fließgeschwindigkeiten des Querprofils als Isotachendiagramme. Anhand dieser Isotachendiagramme wird die zum Teil sehr hohe Schwankungsbreite zur mittleren Fließgeschwindigkeit deutlich. Aus Gründen der Übersicht sind in diesem Kapitel lediglich die Werte für dichte belaubte und unbelaubte Weiden sowie dichte Hecken als Grafiken abgebildet. Die Werte der weiteren Untersuchungsreihen sind dem Anhang A03 und A05 zu entnehmen.

6.4.1 Übersicht über die mittleren Geschwindigkeitsprofile

In Abb. 72 ist zur Erinnerung noch einmal die Position der Pflanzen in der „Kleinen Rinne“ sowie die Lage der gemessenen Fließgeschwindigkeitsprofile (P) aufgezeigt. Im Folgenden beziehen sich die erläuterten Fließgeschwindigkeiten auf das Profil P3 innerhalb des Vegetationsbestandes. Die Werte der gemessenen Fließgeschwindigkeiten der Profile 1 bis 5 der „Kleinen Rinne“ sowie die gemessenen Werte in der „Großen Rinne“ sind dem Anhang A06 und A07 zu entnehmen. Die Tendenz der Fließgeschwindigkeitsentwicklung ist in beiden Rinnen ähnlich, sodass im Folgenden die Werte der „Kleinen Rinne“ mit der Einstaubedingung E3 und den Durchflüssen 40 l/s, 80 l/s und 120 l/s diskutiert werden. Die Auflistung der gemessenen und anschließend gemittelten Fließgeschwindigkeiten aller Untersuchungsvarianten sind für das Profil 3 dem Anhang A03 zu entnehmen.

In Abb. 73 ist der Verlauf der gemittelten Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Vegetationsstands für den leer-Zustand, dichte unbelaubte (U1) und belaubte (B1) Weiden sowie dichte Hecken (He1) bei unterschiedlichen Durchflüssen an dem Profil P3 für die „Kleine Rinne“ dargestellt. Die gepunktete Linie mit der Höhe von 40 cm symbolisiert die Höhe der Pflanzen im nicht durchströmten Zustand. Die Hülsen, die für eine Grundrauheit des Systems sorgen und als Halterung für die Pflanzen dienen, besitzen eine Höhe von 6 cm. Die Darstellungen der Profile für die „Kleine Rinne“ zeigen den Verlauf der Fließgeschwindigkeit ab einem Zentimeter oberhalb der Hülsen bis zwei Zentimeter unterhalb der Wasseroberfläche.

Im leer-Zustand bildet sich oberhalb der Hülse ein nahezu logarithmisches Geschwindigkeitsprofil aus. Mit steigendem Durchfluss respektive Wassertiefe nimmt die mittlere Fließgeschwindigkeit zu (Abb. 73 links oben). Unbelaubte Weiden (U1; Abb. 73 rechts oben) bewirken eine Vergleichmäßigung der Strömung. Die gemessene mittlere Fließgeschwindigkeit ist bei einem Durchfluss von 40 l/s fast 20 % geringer als bei den Abflüssen von 80 l/s und 120 l/s. Diese Tendenz kann auch bei den Untersuchungen in der „Großen Rinne“ beobachtet werden (vgl. Anhang 03). Eine mögliche Erklärung ist, dass mit steigender Wassertiefe der Einfluss der Hülsen als Oberflächenwiderstand stetig ab-

nimmt und der Gesamtwiderstand der Pflanzen mit steigender Wassertiefe das Strömungsgeschehen bestimmt. Sobald die Pflanzen überströmt werden erfolgt der Hauptabfluss, unabhängig von dem Vegetationstyp oberhalb des vegetativen Bereichs. Hier bilden sich aufgrund des geringeren Fließwiderstands die höchsten Fließgeschwindigkeiten des Geschwindigkeitsprofils aus.

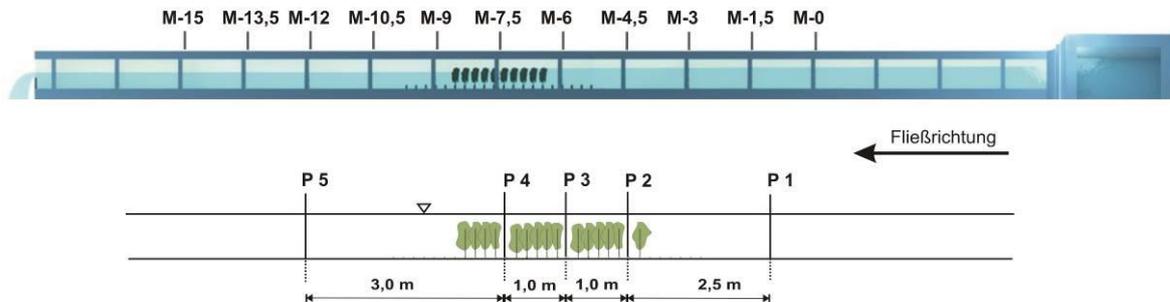


Abb. 72: Übersicht über die Lage der Wasserstandsmessstellen (M) und den Vielpunktmessungen an den Profilen (P) in der „Kleinen Rinne“.

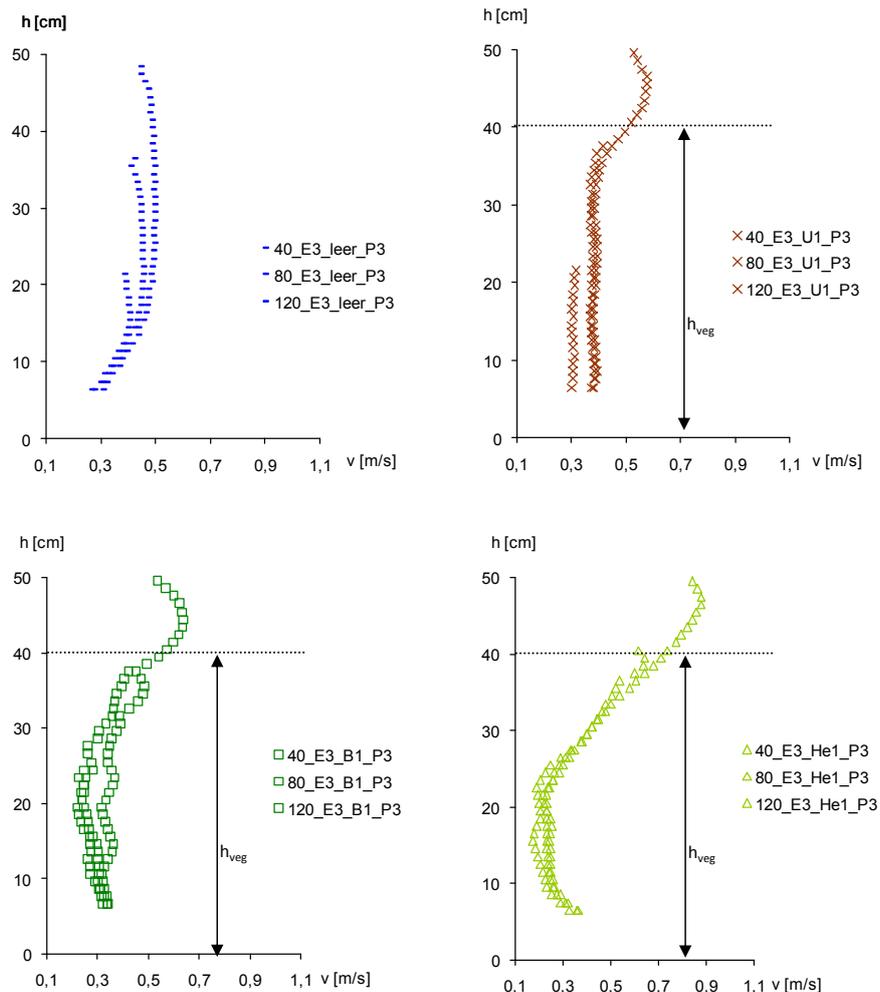


Abb. 73: Verlauf der gemittelten Fließgeschwindigkeit für den leer-Zustand, dichte unbelaubte (U1) und belaubte Weiden (B1) sowie dichte Hecken (He1) bei unterschiedlichen Durchflüssen in der „Kleinen Rinne“.

Der Verlauf der Fließgeschwindigkeit ist innerhalb der belaubten Weiden (B) für alle untersuchten Abflusszustände nahezu gleich, lediglich im überströmten Zustand stellt sich auch innerhalb des Vegetationsbestandes eine geringfügig höhere Fließgeschwindigkeit ein (Abb. 73 links unten). Auch hier erfolgt der Hauptabfluss oberhalb der Vegetation, sobald diese überströmt wird. Dichte Hecken (He) verursachen die stärkste Reduzierung der Fließgeschwindigkeit innerhalb des Vegetationsbestandes (Abb. 73 rechts unten). Die Steifigkeit der Äste und Blätter spielt dabei sicherlich eine entscheidende Rolle. Diese Steifigkeit und Dichte der Äste und Blätter behindert eine allzu starke stromlinienförmige Ausrichtung der Pflanze. In der Folge bleibt die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche, die einen hohen Vegetationswiderstand verursacht, trotz Strömungsangriff des Wassers hoch (vgl. Kapitel 5.1). Der Hauptabfluss findet im Falle einer Überströmung ebenfalls oberhalb der Pflanzen statt.

In Abb. 74 sind die Geschwindigkeitsprofile durchströmter und überströmter, unbelaubter (U1) / belaubter (B1) Weiden und Hecken (He1) sowie dem leer-Zustand im direkten Vergleich für die Durchflüsse 40 l/s, 80 l/s und 120 l/s dargestellt. Die linke Grafik in Abb. 74 zeigt die Fließgeschwindigkeitsentwicklung für eine reine Durchströmung der Pflanzen. Dabei entspricht die Wassertiefe in etwa 2/3 der Pflanzenhöhe. Im mittleren Bild erreicht die Wassertiefe nahezu die Pflanzenhöhe der unbelaubten Weiden, wobei die unbelaubten Weiden noch nicht überströmt sind. Die belaubten Weiden und Hecken werden bei der Einstaubedingung E3 und einem Abfluss von 80 l/s aufgrund des Strömungsdrucks des Wassers in Strömungsrichtung geneigt. Zusätzlich ist das Blattwerk der Pflanzen im oberen Drittel lichter, sodass die Pflanzen in diesem Bereich der Strömung weniger Widerstand entgegen setzen. In der Folge kommt es zu höheren Fließgeschwindigkeiten der oberen Zentimeter unterhalb der Wasseroberkante. In der rechten Grafik sind alle drei Pflanzeneinbauten überströmt. Die unbelaubten Weiden biegen sich kaum in der Strömung. Dadurch entsteht in einer Höhe von 40 cm ein klarer Schnitt zwischen dem durchströmten Bereich der Pflanze und dem Bereich der Überströmung. Die belaubten Weiden und Hecken werden zusätzlich in der Vertikalen in Strömungsrichtung geneigt. Dabei entsteht jedoch keine klare Trennlinie zwischen dem durchströmten und überströmten Bereich. Die zeigt sich auch an dem flacheren Anstieg des Geschwindigkeitsgradienten in z-Richtung der Hecken im Verhältnis zu den unbelaubten Weiden.

Des Weiteren deuten die Geschwindigkeitsprofile der belaubten Weiden und Hecken auf eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in Sohlhöhe hin (vgl. Abb. 74). Diese Vermutung kann mit den Messwerten in der „Großen Rinne“ bestätigt werden (vgl. Abb. 75)⁴. Abb. 75 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeitsprofile für durchströmte, dichte belaubte und unbelaubte Weiden im direkten Vergleich für einen Durchfluss von 400 l/s in der „Großen Rinne“. Dabei dient der leer-Zustand wiederum als Referenz, auf die die vegetationsbestandenen Messreihen der Geschwindigkeitsprofile bezogen werden. Bei den belaubten Weiden (B1) wird eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in Sohlhöhe, d.h. bis zur Höhe

⁴Die Messungen in der „Kleinen Rinne“ erfolgten vollautomatisiert. Da eine Millimeter-genaue Verfahrungsrichtung des Messwagens in Hauptfließrichtung nicht gewährleistet werden konnte, war die Gefahr einer Beschädigung der Messsonde durch die steifen, nichtbiegsamen Hülsen zu hoch. Daher wurde in der „Kleinen Rinne“ auf die Messung der Fließgeschwindigkeit innerhalb der Hülsen verzichtet.

der Hülsen, beobachtet. Die Verteilung der Hülsen im Vergleich zum Blattwerk könnte als Erklärung für die erhöhten Fließgeschwindigkeiten in Sohlhöhe dienen. Das Blattwerk ist im Bereich der Wuchshöhe von 10 cm bis 30 cm nahezu flächendeckend verteilt. Damit bildet das Blattwerk ein relativ kompaktes Strömungshindernis. Im Vergleich dazu, kann die Strömung nahezu ungehindert in den unteren sechs Zentimetern, im Bereich der Hülsen, durchfließen. Daraus lässt sich ableiten: Je dichter das Blattwerk, desto mehr weicht die Strömung auf Bereiche, die einen geringeren Widerstand bieten aus. Im Vergleich zum leer-Zustand kommt es daher in der Folge zu höheren Fließgeschwindigkeiten in Sohlhöhe.

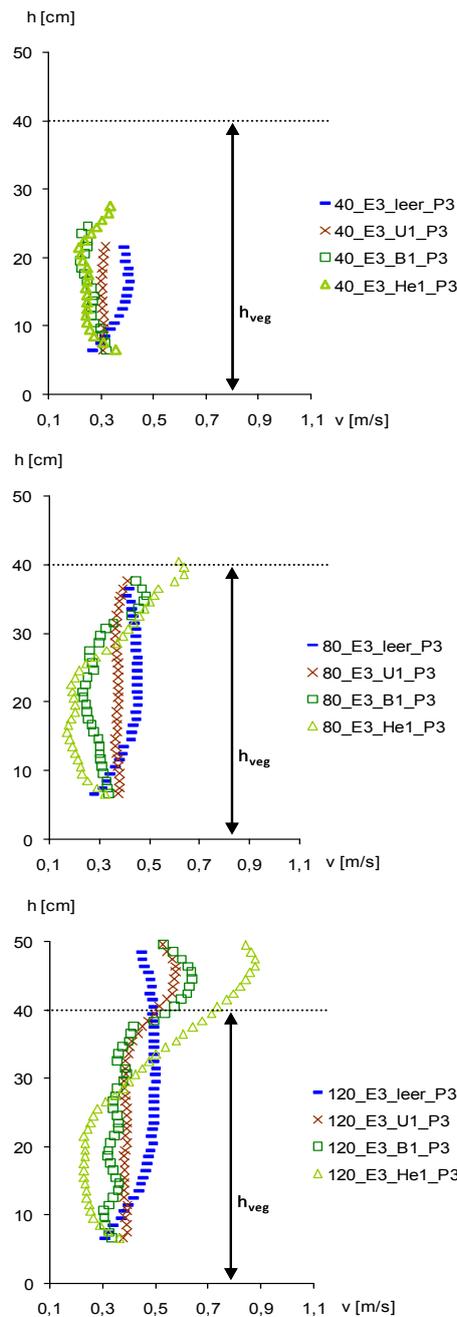


Abb. 74: Geschwindigkeitsprofile durchströmter und überströmter unbelaubter (U1) / belaubter (B1) Weiden und Hecken (He1), sowie die jeweiligen leer-Messungen.

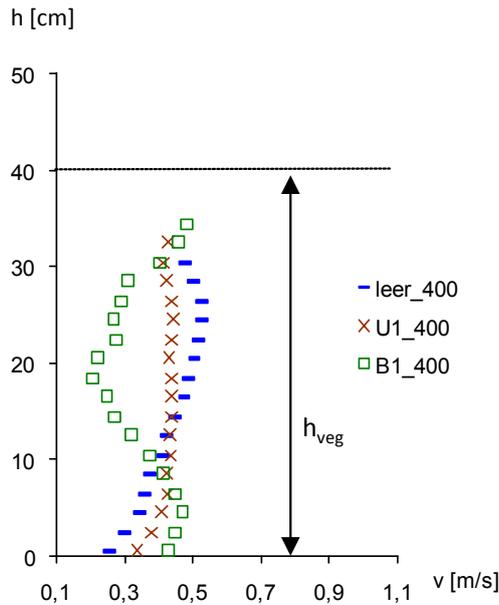


Abb. 75: Verlauf der Geschwindigkeitsprofile für den leer-Zustand sowie für durchströmte unbelaubte (U1) / belaubte (B1) Weiden in der „Großen Rinne“.

Fazit:

Zu Beginn dieses Abschnitts wurde die Frage gestellt, wie sich der Verlauf der Fließgeschwindigkeitsprofile für unterschiedliche Vegetationsbestände darstellt. Aus den Messreihen kann abgeleitet werden, dass sich statt dem logarithmischen Geschwindigkeitsprofil ein *S*-förmiger Verlauf des Profils einstellen wird je dichter, verzweigter und steifer ein Pflanzenbestand ist. Damit bildet jede Pflanzenart ihr eigenes, typisches Geschwindigkeitsprofil aus.

6.4.2 Schwankungen der Fließgeschwindigkeit im Querprofil

Innerhalb eines Vegetationsbestandes stellen sich sehr komplexe Strömungsmuster ein. Im vorangegangenen Abschnitt wurde der Verlauf der mittleren Fließgeschwindigkeiten im Profil aufgezeigt. Im Folgenden sollen nicht die mittleren, sondern die lokalen Geschwindigkeitsverteilungen diskutiert werden. Die Darstellung in Form von Isotachendiagrammen bietet eine anschauliche Möglichkeit der Visualisierung der räumlichen Geschwindigkeitsverteilungen. Abb. 76 veranschaulicht die Strömungszustände für überströmte, unbelaubte und belaubte Weiden sowie Hecken. Zusätzlich ist der zugehörige Vergleichswert im Referenz leer-Zustand dargestellt. Die Abbildung zeigt links die Lage der Messpunkte. In der Mitte sind die gemessenen Fließgeschwindigkeiten als Isotachendiagramme und rechts die mittleren Geschwindigkeiten sowie deren Schwankungsbreite dargestellt. Aus Gründen der besseren Anschaulichkeit ist das Isotachendiagramm mit der jeweiligen Vegetation hinterlegt.

Die sehr geringe Schwankungsbreite der Fließgeschwindigkeit im leer-Zustand (vgl. Abb. 76, oben) verdeutlicht deren homogene Verteilung innerhalb der horizontalen Ebene. Der Einfluss der Hülsen ist bis in eine Höhe von 10 cm oberhalb der Sohle zu beobachten. In Abb. 76 (zweite Reihe von oben) ist das Strömungsprofil für überströmte, unbelaubte Weiden (U1) dargestellt. Das hinterlegte Vegetationsbild veranschaulicht die Höhe und

Lage der Vegetation im nicht durchströmten Zustand. Das Isotachendiagramm zeigt den Widerstandseinfluss der Pflanzen auf die Strömung. Im Nahfeld der Pflanzen reduziert sich die lokale Fließgeschwindigkeit von ursprünglich 0,5 m/s auf Werte kleiner 0,3 m/s. Charakteristisch für die unbelaubten Weiden ist die einheitliche Schwankungsbreite der mittleren Fließgeschwindigkeit über die Höhe.

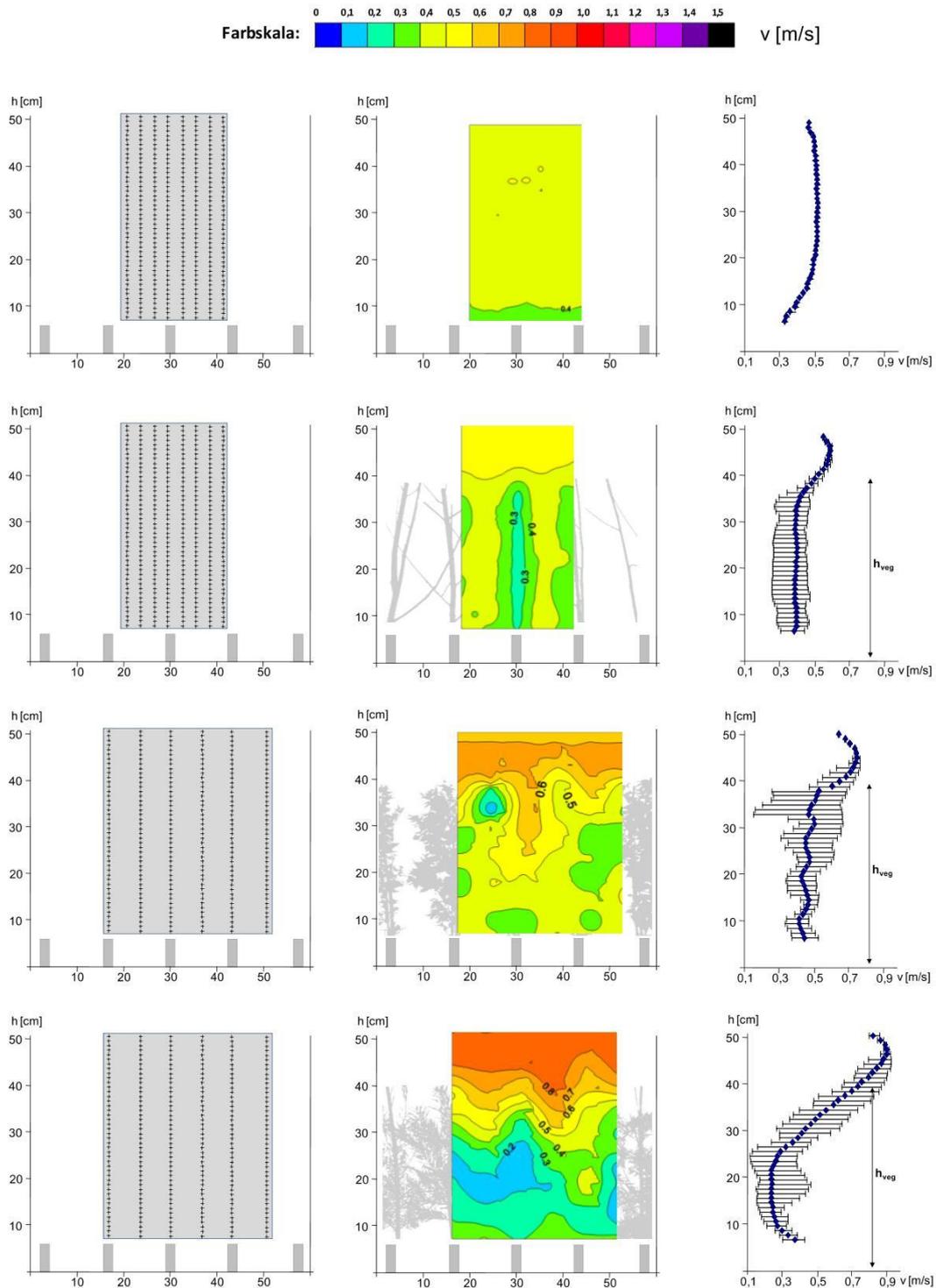


Abb. 76: Messfeld, Isotachendiagramme und Schwankungsbreiten der Fließgeschwindigkeit für die Varianten leer (oben), unbelaubte Weiden (zweite von oben), belaubte Weiden (zweite von unten) und Hecken (unten) mit Fließrichtung in Zeichenebene.

Die Geschwindigkeitsverteilung der belaubten Weiden (vgl. Abb. 76, zweite Reihe von unten) ist im Vergleich zu den unbelaubten Weiden vor allem in der unteren Hälfte homogener. Das Blattwerk ist in diesem Bereich relativ gleichmäßig und flächig verteilt. Die lokal auftretenden, geringfügig höheren Fließgeschwindigkeiten sind auf natürliche Schwankungen in der Blatt- und Astverteilung der Pflanzen zurückzuführen. Es wird vermutet, dass das relativ dichte Blattwerk mit dem darin enthaltenen Lückensystem Turbulenzen induziert und damit eine Durchmischung mit einhergehender Vergleichmäßigung der Strömung bewirken. Infolge dieser höheren Durchmischung ist die Position der einzelnen Äste und Zweige der Pflanzen nicht mehr im Isotachendiagramm erkennbar. Im Gegensatz dazu, zeigt die Strömungsverteilung in der oberen Hälfte der Pflanzenhöhe klare Beschleunigungsbereiche auf. Diese entstehen, sobald die Pflanze überströmt wird und aufgrund der Strömung seitlich ausweicht. Eine Ursache hierfür könnte in der Verteilung der Blätter liegen. Die verwendeten Weiden weisen im oberen Fünftel der Pflanze einen stetig geringer werdenden Anteil an Blättern und Ästen auf, d.h. der vegetationsfreie Anteil ist in diesem Bereich erhöht. Dies ermöglicht ein seitliches Ausweichen einzelner Pflanzen. Insgesamt zeigt die Schwankungsbreite der mittleren Fließgeschwindigkeit über das Profil im Vergleich zu den unbelaubten Weiden jedoch über die Höhe eine größere Variabilität.

Das Isotachendiagramm der Hecken zeigt für den durchströmten Bereich der Vegetation eine weitere Reduzierung der Fließgeschwindigkeit gegenüber den Weiden. Hauptverantwortlich für dieses Strömungsbild ist die dichtere und vor allem steifere Struktur der Hecken. Die stromlinienförmige Ausrichtung der Äste und Belaubung fällt deutlich geringer aus. Die Folge ist eine höhere hydraulisch wirksame Vegetationsfläche respektive ein höherer Vegetationswiderstand. Charakteristisch für die Hecken ist die nahezu gleich bleibende Schwankungsbreite der Strömung über die Höhe (Abb. 76, rechts unten). Die Darstellung des Isotachendiagramms für Hecken zeigt auch, dass eine dichte, steife Vegetation zu einer horizontalen Schichtung der Geschwindigkeit führt.

In Abb. 77 sind die Isotachendiagramme der belaubten Weiden für unterschiedliche Durchflüsse mit und ohne überlagerte Vegetation dargestellt⁵. Die Abbildung ohne die überlagerte Vegetation zeigt ein relativ einheitliches Strömungsbild für durchströmte Weiden. Die erhöhte Strömungskraft infolge der Überströmung führt zu einer weiteren stromlinienförmigen Ausrichtung der Blätter und Äste, was mit einem geringeren Widerstand infolge Vegetation und mit einer höheren mittleren Fließgeschwindigkeit innerhalb des Bestandes einhergeht (vgl. Abb. 77 rechts).

In Abb. 78 sind die mittleren Fließgeschwindigkeiten für belaubte Weiden für die Durchflüsse 40 l/s, 80 l/s und 120 l/s abgebildet. Die durch Balken dargestellte Schwankungsbreite ist innerhalb des Vegetationsbereichs nahezu gleich bleibend. Sobald die Weiden überströmt werden, ist die Schwankungsbreite, ähnlich den Werten im leer-Zustand, ver-

⁵ Die Vegetationsbilder bei Durchströmung können nicht während des eigentlichen Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt werden (vgl. Kap. 4.2.2.2: Bestimmung der Bedeckungsdichte im durchströmten Zustand). Aufgrund des Lichtbrechungseffektes zeigen die Unterwasserbilder nur den durchströmten vegetativen Anteil der Pflanze. Aus Gründen eines besseren Vergleichs wurde für alle drei Abflusszustände das durchströmte Vegetationsbild für den Abfluss von 120 l/s gewählt. Tatsächlich fällt die Flächenkontraktion der Durchflüsse 40 l/s und 80 l/s etwas geringer aus.

nachlässigbar. Auf die Ausbildung der Scherschicht im Übergangsbereich zwischen Durchströmung und Überströmung und den damit verbundenen Turbulenzstrukturen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Hierzu sei auf die Arbeit von z.B. NEPF (2000) verwiesen.

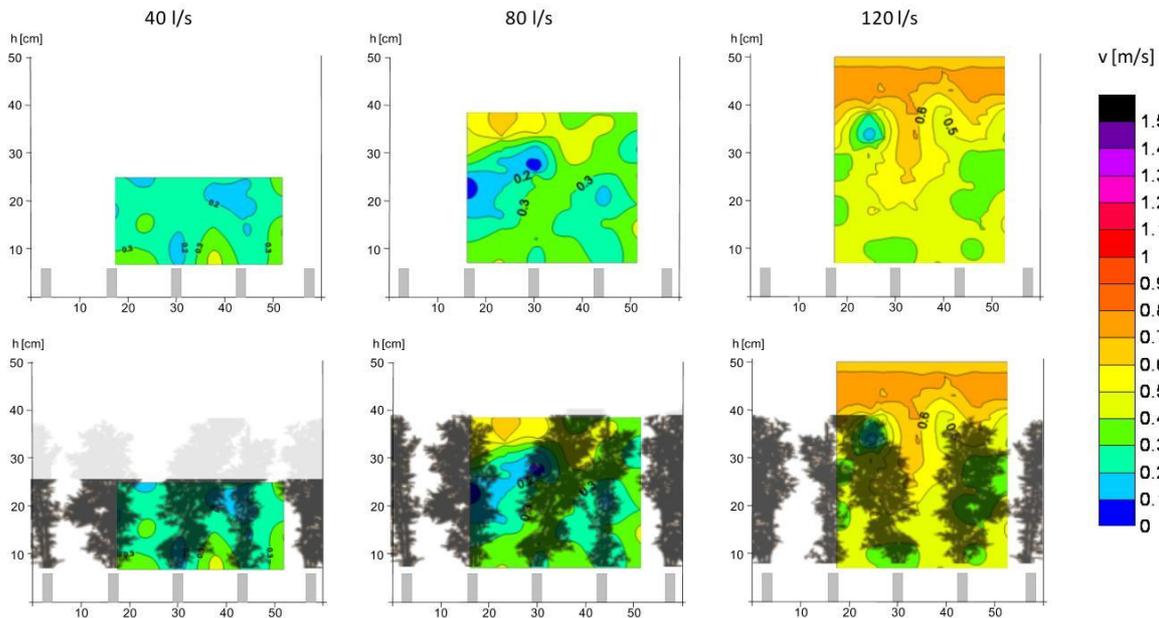


Abb. 77: erste Reihe: Isotachendiagramme belaubter Weiden für unterschiedliche Wassertiefen; zweite Reihe: Isotachendiagramme überlagert mit der Vegetation mit Fließrichtung in Zeichenebene.

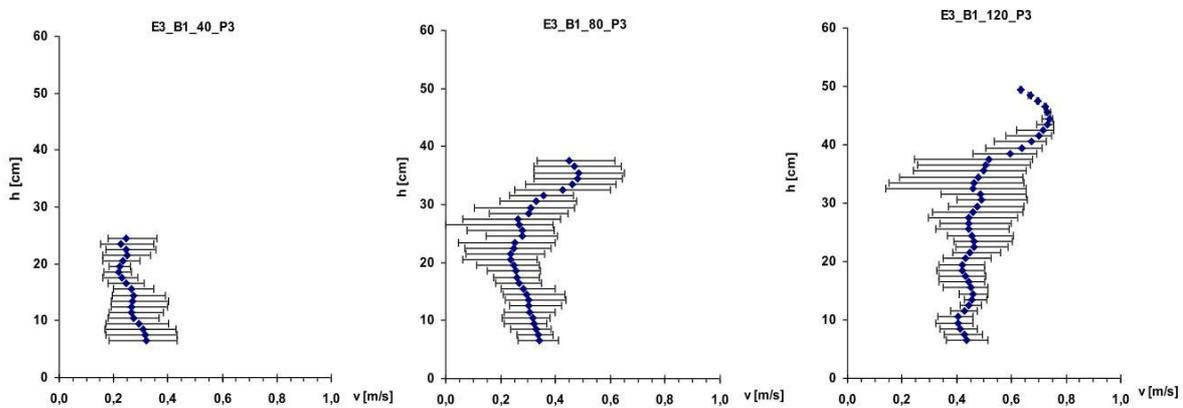


Abb. 78: Geschwindigkeitsverlauf und deren Schwankungsbreite für belaubte Weiden bei Durch- und Überströmung.

Fazit:

Die Auswertungen zeigen, dass die Frage nach der Ausbildung der Schwankungsbreite zum mittleren Geschwindigkeitsprofil nicht allgemeingültig beantwortet werden kann. Vielmehr ist die Schwankungsbreite, ähnlich dem Verlauf der Fließgeschwindigkeitsprofile, sehr stark vom Pflanzentyp und dessen Belaubung abhängig; Pflanzen mit biegsamen Blättern/Ästen zeigen in den Messreihen eine höhere Streubreite in Bezug zur mittleren Fließgeschwindigkeit als Pflanzen mit eher steiferen Blättern/Ästen.

6.5 Beschreibung der Vegetation als Widerstandsbeiwert

In diesem Kapitel sollen folgende Fragen bearbeitet werden:

- Lassen sich die Laboruntersuchungen auf die Natur übertragen?
- Wie sehen die Vegetationswiderstandsbeiwerte für unterschiedliche holzige Bewuchsbestände entlang der Fließgewässer aus?
- Decken sich die rückgerechneten c_{WR} -Werte aus den Laboruntersuchungen mit den Literaturangaben?

6.5.1 Widerstand infolge holziger Bewuchsbestände: k_{st} -Beiwerte

Die Übertragbarkeit der im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf die Natursituation stellt das zentrale Kriterium bei der Bestimmung des jeweiligen vegetativen Widerstandsbeiwertes dar. Sofern die geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit eingehalten ist, können die Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen direkt auf die Natur übertragen werden. Die dynamische Ähnlichkeit kann, wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, für Weiden nur für einen Labormaßstab von 1:1 eingehalten werden. Die Steifigkeit der Äste hängt nicht nur vom Durchmesser, sondern auch vom Alter des Astes ab. Des Weiteren stellen die untersuchten Anordnungsmuster der Vegetationsverteilung im Labor immer eine vereinfachte Abbildung der Natur dar. Die Konsequenz ist, dass bei Untersuchungen mit natürlicher Vegetation bei einem Maßstab kleiner 1:1 immer eine vergleichende Betrachtung der Ergebnisse zwischen Labor und Natur erfolgen muss.

Die Verwendung von k_{st} -Werten zur Beschreibung der Fließwiderstände hat eine lange Tradition; dementsprechend umfangreich sind auch die zur Verfügung stehenden Tabellenwerke. Daher wird im Folgenden bei der vergleichenden Betrachtung für die Überprüfung der Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Natur zuerst die Auswertung der k_{st} -Werte herangezogen, ohne dabei außer Acht zu lassen, dass die k_{st} -Widerstandsbeiwerte von dem jeweiligen System, vor allem der Abflusstiefe, abhängig sind.

In Abb. 79 bis Abb. 81 sind die im Rahmen der Laboruntersuchung ermittelten k_{st} -Werte für belaubte Weiden und Hecken dargestellt. Abb. 79 zeigt die k_{st} -Werte für unbelaubte Weiden. Der Besatz mit einer Dichte von 100 % (U1) liefert den kleinsten k_{st} -Wert. Je lichter der Besatz, d.h. von U2 nach U3, desto größer und damit „glatter“ wird der mittlere k_{st} -Wert. Die hinzugefügten Trendlinien geben den Verlauf des k_{st} -Werts für den jeweiligen Besatz wieder. Dabei wird die Trendlinie in die zwei Bereiche, durch- und überströmt, eingeteilt. Solange die Pflanzen durchströmt werden, d.h. das Verhältnis Wassertiefe zu Vegetationshöhe $< 1,0$ ist, bleibt der k_{st} -Wert nahezu gleich bleibend. Tritt eine Überströmung der Pflanzen ein, wird der k_{st} -Wert abhängig von der Wassertiefe respektive Überströmungshöhe größer. Diese Zweiteilung des k_{st} -Verlaufs ist auf die veränderte Rauheitswirkung der Pflanzen zurückzuführen. Im durchströmten Fall wirken die Pflanzen ähnlich einer Formrauheit auf die Strömung. Infolge Überströmung ändert sich die Rauheitswirkung der Pflanze, sie wirkt in diesem Fall ähnlich einer Oberflächenrauheit. Generell nimmt in einem Rechteckgerinne der Einfluss einer Oberflächenrauheit auf die Strö-

mung mit steigender Wassertiefe respektive Überströmung ab. Diese lässt sich auch am k_{st} -Verlauf der überströmten, unbelaubten Weiden ablesen.

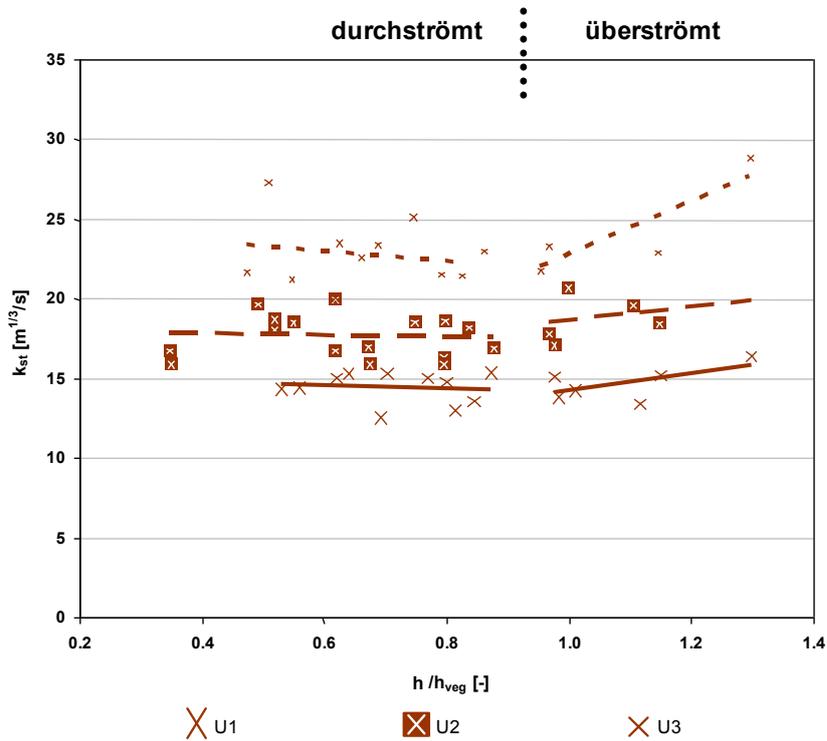


Abb. 79: k_{st} -Werte für dichte (U1), weniger dichte (U2) und lichte (U3) unbelaubte Weiden aufgetragen über das Verhältnis Wassertiefe (h) zur Vegetationshöhe (h_{veg}).

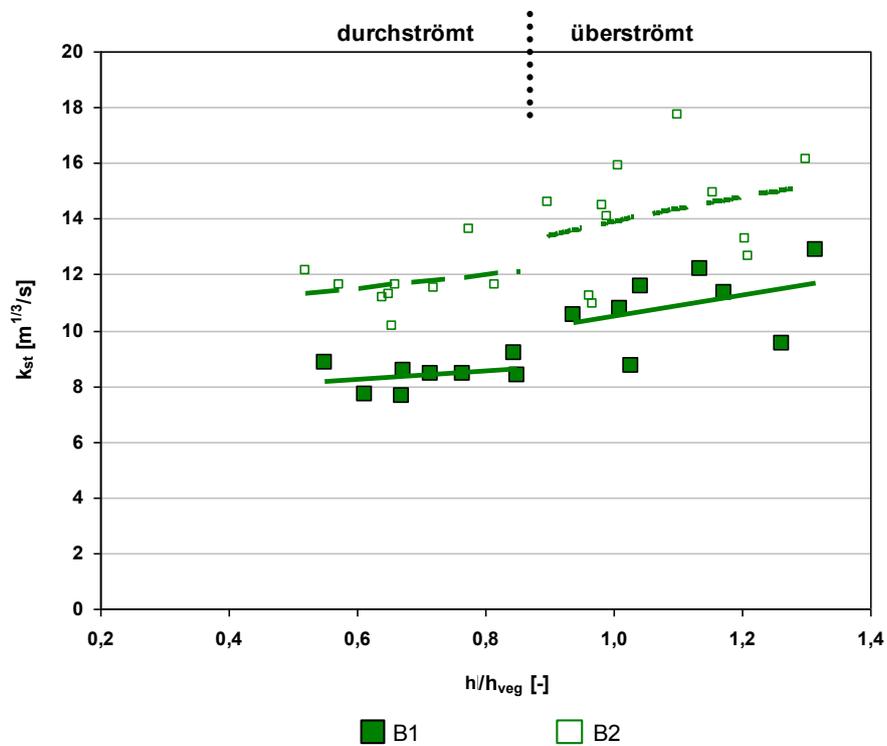


Abb. 80: k_{st} -Werte für belaubte, dichte (B1) und weniger dichte (B2) Weiden aufgetragen über das Verhältnis Wassertiefe (h) zur Vegetationshöhe (h_{veg}).

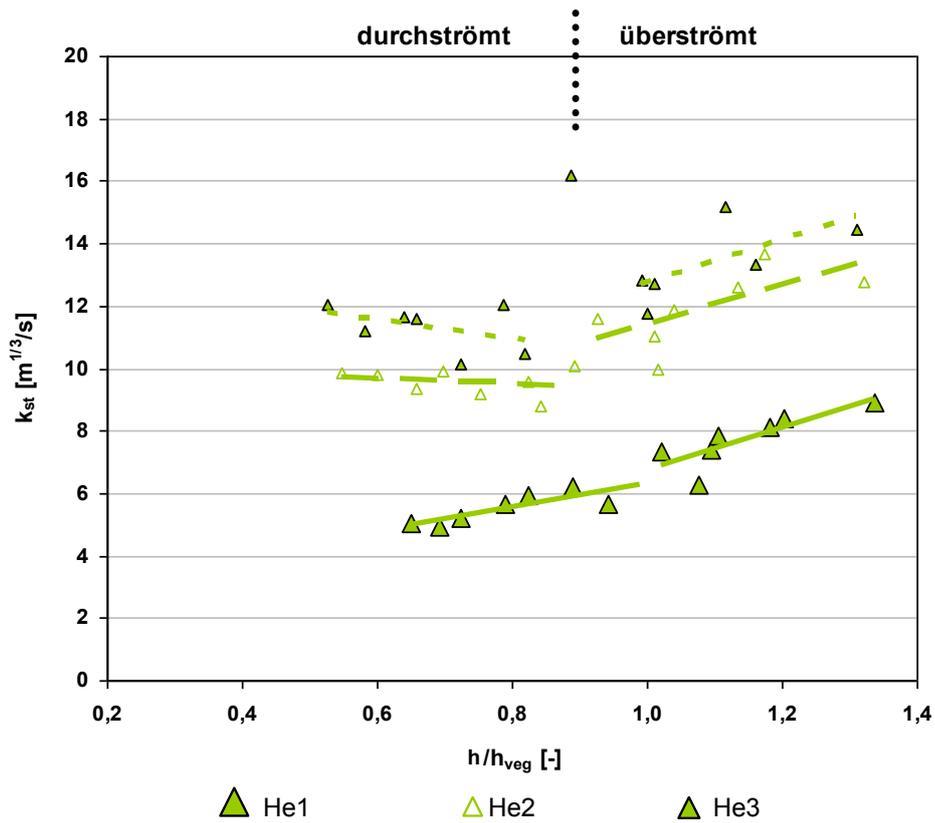


Abb. 81: k_{st} -Werte für dichte (He1), weniger dichte (He2) und lichte (He3) Hecken aufgetragen über das Verhältnis Wassertiefe (h) zur Vegetationshöhe (h_{veg}).

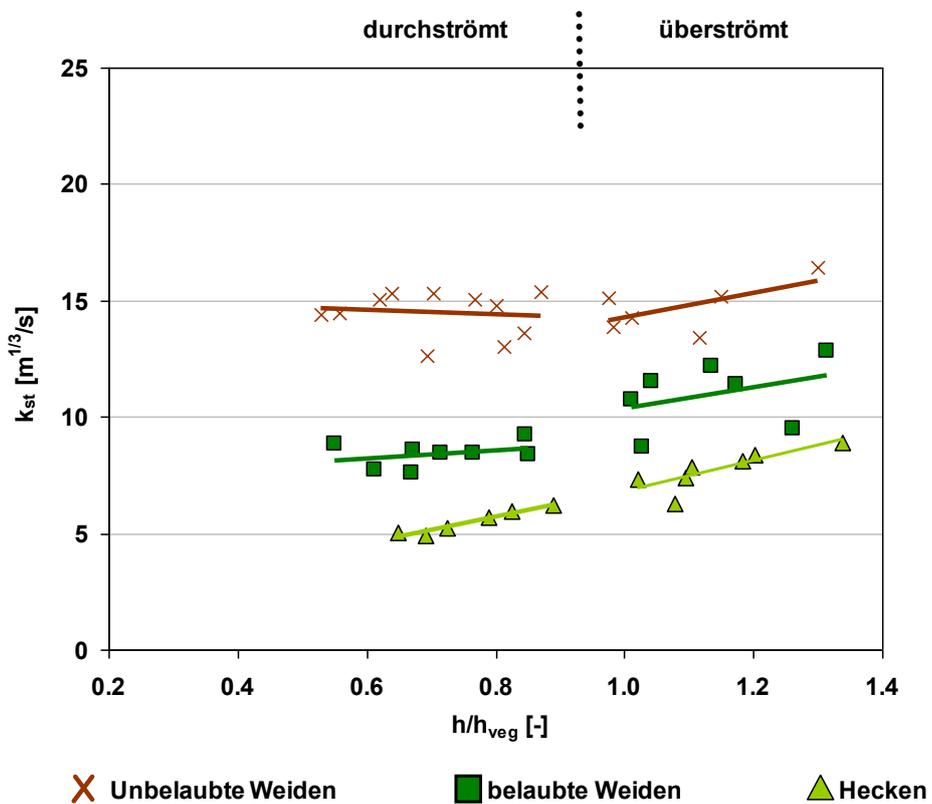


Abb. 82: k_{st} -Werte für dichte, unbelaubte / belaubte Weiden und Hecken (He1).

In Abb. 80 sind die k_{st} -Werte für belaubte Weiden in der „Kleinen Rinne“ mit einem Besatz von 100 % (B1) bzw. 50 % (B2) über das Verhältnis Wassertiefe (h) zur Vegetationshöhe (h_{veg}) aufgetragen. Hier verlaufen die k_{st} -Werte ebenfalls relativ konstant für die dichten (B1) und lichtereren (B2) Bestände, sofern die Pflanzen nur durchströmt werden. Sobald eine Überströmung eintritt, steigt der k_{st} -Wert mit zunehmender Überströmungshöhe. Die Grafik zeigt des Weiteren, dass je dichter der Besatz ist, desto kleiner und damit „rauer“ ist der k_{st} -Wert, denn B1 weist doppelt so viele Pflanzen je m^2 auf als B2. Für durchströmte, belaubte Weidenbestände ergeben die Laboruntersuchungen im Mittel einen k_{st} -Wert von acht für dichte, belaubte Weiden (B1) und einen k_{st} -Wert von 12 für lichtere Bestände (B2).

Die k_{st} -Werte für dichte Hecken (He1) schwanken in den Untersuchungsreihen während der reinen Durchströmung zwischen 5 und 6 (vgl. Abb. 81). Sobald die Hecken überströmt werden, steigt der k_{st} -Wert in den Untersuchungsreihen bis auf 9 an, da der Einfluss der Rauheitswirkung der Hecken auf die Strömung ebenfalls mit steigender Überströmung abnimmt. Damit kann der zu erwartende Effekt, dass bei geringerer Dichte des Vegetationsbestands der k_{st} -Wert ansteigt, durch die Untersuchungen für Weiden und Heckenbestände bestätigt werden. In Abb. 82 sind die k_{st} -Werte im Vergleich für dichte Bestände von unbelaubten und belaubten Weiden und Hecken dargestellt. Die Grafik zeigt, dass neben der Dichte auch die Art der Vegetation für die adäquate Wahl des Rauheitsbeiwerts von Bedeutung ist. Im Vergleich zu den biegsameren Weiden liefern die steiferen Äste und Blätter der Hecken den kleinsten k_{st} -Wert. Die unbelaubten Weiden bieten der Strömung, im Fall der Durchströmung, ein Widerstand entgegen, der sich mit einem k_{st} -Wert im Mittel von 14 niederschlägt.

Tabelle 12: Zusammenstellung der k_{st} -Werte für unterschiedliche Auenstandorte.

	Hecken, Gebüsch, dichtes Unterholz, Junge Weiden (z.B. als Austrieb von Faschinenwalzen)	k_{st} [$m^{1/3}/s$]	Weichholzaunen (Sommer, belaubt)	k_{st} [$m^{1/3}/s$]	Weichholzaunen (Winter, unbelaubt)	k_{st} [$m^{1/3}/s$]
dicht	durchströmt	4-7	durchströmt	7-10	durchströmt	13-15
	überströmt	8 +	überströmt	11 +	überströmt	16 +
Übergang	durchströmt	8-10	durchströmt	11-13	durchströmt	16-19
	überströmt	11+	überströmt	14 +	überströmt	20 +
licht	durchströmt	10-13	durchströmt	14-16	durchströmt	20-25
	überströmt	14 +	überströmt	16 +	überströmt	26 +

In Tabelle 12 sind die ermittelten k_{st} -Werte aus den Laboruntersuchungen zusammengestellt. Die Tabelle hat das Ziel, Extremwerte unterschiedlicher Auenstandorte abzubilden. Natürliche Auenstandorte können auf kleinster Flächenausdehnung dichte Heckenbereiche neben lichterem Weidenbeständen mit lokalen Krautfluren aufweisen. Damit stellen Auen im Gelände eine Mischform der untersuchten Vegetationstypen und –dichten dar; Tabelle 12 liefert hierzu die jeweiligen Spannweiten der k_{st} -Werte. In der Horizontalen sind die Pflanzenarten aufgetragen. Für die Weiden erfolgt eine weitere Unterteilung entsprechend der jahreszeitlichen Unterschiede, da der Belaubung ein wesentlicher Einfluss auf den resultierenden k_{st} -Wert zuzuschreiben ist. In der Vertikalen erfolgt die Einteilung nach der Dichte des Bestandes unterteilt in dicht, Übergang und licht. Die Tabelle ist so sortiert, dass die Pflanzenart mit dem kleinsten k_{st} -Wert links oben und rechts unten die Pflanzenart mit dem größten k_{st} -Wert steht. Dazwischen sind die Übergangsformen dargestellt. Die Form der Darstellung ermöglicht das leichte Abgreifen von k_{st} -Werten für Bestände, die eine Mischform aus Weiden und Hecken bilden, da die Sortierung einen graduellen Übergang der Werte in der Vertikalen, der Horizontalen sowie der Diagonalen berücksichtigt.

Die Eingangsfrage für dieses Kapitel lautete „Lassen sich die Laboruntersuchungen auf die Natur übertragen?“. Eine Übertragung der Ergebnisse setzt, wie bereits erwähnt, einen Vergleich der Laborwerte mit Naturdaten voraus. In Tabelle 13 sind k_{st} -Werte für die Beschreibung von Gebüsch und Baumvegetation nach HABERSACK (2009) aufgetragen. Neben der Dichte des Pflanzentyps werden auch die jahreszeitlichen Unterschiede berücksichtigt. Diese Daten basieren auf Rückrechnungen von Naturereignissen.

Die im Labor ermittelten k_{st} -Werte decken sich mit den von Habersack rückgerechneten Werten aus der Natur (vgl. Tabelle 12 und Tabelle 13). Damit ist gewährleistet, dass die Untersuchungen im Labor auf die Natur übertragen werden können. Lediglich die Begrifflichkeiten in den Tabellen sind z.T. unterschiedlich gewählt. Das von Habersack aufgeführte dichte Gebüsch deckt sich mit den im Labor ermittelten k_{st} -Werten für dichte Hecken. Die Bezeichnung Hecken in Tabelle 12 schließt sowohl sehr dichtes Aufkommen von Jungweiden, z.B. infolge des Einbaus von lebenden Faschinenwalzen zur Ufersicherung als auch die von Habersack als Gebüsch bezeichneten Standorte mit ein. Des Weiteren ist zu beachten, dass beide Tabellen den Effekt einer lokalen Verklausung nicht berücksichtigen. Hierzu sei auf die Untersuchung von HARTLIEB (2006) verwiesen, der für sehr dichten, durchströmten Mais einen k_{st} -Wert von bis zu eins ermittelte. Vereinfacht betrachtet ist die lokale Wirkung einer Verklausung auf die Strömung mit der eines dichten Maisbestandes vergleichbar.

Tabelle 13: Auszug der k_{st} -Wertetabelle für Vorländer nach HABERSACK (2009).

Vorländer	Min.	Norm	Max.
a. Wiese			
kurzes Gras	25	30	35
hohes Gras	12	20	30
b. landwirtschaftlich genutzte Flächen			
Kleine Feldfrucht	20	33	50
Reifes Getreide (Reihensaat)	15	20	40
Reifes Getreide (flächig)	12	18	33
Mais ⁶	4 (1) ⁶	6 (3-5) ⁶	8
c. Gebüsch			
Vereinzelt, starke Krautschicht	14	20	29
Gebüsch geringer Dichte (im Winter)	10	15	25
Gebüsch geringer Dichte (im Sommer)	8	12	20
Gebüsch mittlere bis hohe Dichte (im Winter)	6	10	13
Gebüsch mittlere bis hohe Dichte (im Sommer)	4	8	14
d. Bäume			
Kahlschlag	20	25	33
Kahlschlag mit starkem Wurzelaustrieb	13	17	20
dichter Wald, wenig umgestürzte Bäume	8	10	13
dichter Wald, Abfluss bis in Asthöhe	5	8	10
dichte Weiden (im Sommer)	5	7	9

Das Ziel der Arbeit liegt vor allem in der Bestimmung des dimensionslosen, wassertiefen-unabhängigen λ -Widerstandsbeiwertes. Im Vergleich zu den k_{st} -Werten konnte keine umfassende Zusammenstellung, auf Basis von Naturdaten rückgerechneten λ -Beiwerten für Weich- und Hartholzauenvegetation gefunden werden. Somit ist für eine Analogiebeurteilung, Labor vs. Natur, der Umweg über die k_{st} -Beiwertauswertung nötig; wohl wissend, dass für die λ -Beiwertberechnung andere Eingangsparameter eingehen als für die k_{st} -Beiwerte und damit eine gewisse Restunsicherheit bezüglich dieser Analogiebeurteilung besteht.

6.5.2 Widerstand infolge holziger Bewuchsbestände: λ_{veg} -Beiwerte

Bevor im Folgenden die λ_{veg} -Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen erläutert werden, erfolgt zuvor eine kurze Wiederholung der theoretischen Diskussion, welche Einzelphänomene eine Weich- bzw. Hartholzauenvegetation charakterisieren. Im Anschluss daran erfolgt eine Anpassung der bestehenden Gleichung basierend auf den Erkenntnissen der rückgerechneten Widerstandsbeiwerte unter Berücksichtigung der Flächenkontraktion und der Bedeckungsdichte sowie weiterer charakteristischer Vegetationsparameter.

Nach PETRYK & BOSMAJIAN (1975) kann der Widerstand der Vegetation beschrieben werden mit:

$$\lambda_{veg} = \frac{4 \cdot A_{veg}}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} = \frac{4 \cdot h_{veg} \cdot d_{veg}}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} \quad \text{Gl. 6-1}$$

⁶ In Klammer sind die Werte nach HARTLIEB (2006) dargestellt. Er ermittelte k_{st} -Wert von bis zu eins für sehr dichte, durchströmte Maisbestände.

wobei:

- A_{veg} angeströmte Vegetationsfläche [m²]
- a_y Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung [m]
- a_x Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung [m]
- c_{WR} Gesamtwiderstandsbeiwert der angeströmten Vegetation [-]
- d_{veg} Ast-/Stammdurchmesser [m]
- h_{veg} angeströmte Pflanzenhöhe [m]
- λ_{veg} Gesamtwiderstandsbeiwert der durchströmten Vegetation [-]

Der vegetative Widerstandsbeiwert (λ_{veg}) von Auen setzt sich aus der angeströmten Astfläche ($A_{veg} = h_{veg} \cdot d_{veg}$) sowie der in Abhängigkeit von der Jahreszeit vorhandenen Belaubung zusammen. Der Anteil der Belaubung wird jedoch in Gl. 6-1 nicht berücksichtigt.

Damit wird die tatsächlich angeströmte Vegetationsfläche (A_{veg}) für belaubte Vegetation nicht richtig wiedergegeben. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, die angeströmte Astfläche durch die tatsächlich angeströmte Vegetationsfläche zu ersetzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Beschreibung der tatsächlich angeströmten Vegetationsfläche durch die Einführung eines so genannten Permeabilitätsfaktors umgesetzt. Der Permeabilitätsfaktor beschreibt, in Anlehnung an die Arbeit von STEPHAN (2002), den Anteil der angeströmten Vegetationsfläche zur gesamt durchströmten Querschnittsfläche. Damit gibt der Permeabilitätsfaktor den prozentualen Vegetationsanteil der angeströmten Querschnittsfläche wieder mit:

$$A_{veg} = n_y \cdot A_{Qfl}$$

$$\Leftrightarrow n_y = \frac{A_{veg}}{A_{Qfl}} = \frac{h_{veg} \cdot d_{veg}}{h \cdot B} \quad \text{Gl. 6-2}$$

$$\Leftrightarrow A_{veg} = n_y \cdot h \cdot B$$

wobei:

- A_{Qfl} angeströmte Querschnittsfläche [m²]
- A_{veg} angeströmte Vegetationsfläche [m²]
- B angeströmte Breite der Querschnittsfläche
- d_{veg} Ast-/Stammdurchmesser [m]
- h Wassertiefe [m]
- h_{veg} angeströmte Pflanzenhöhe [m]
- n_y Permeabilitätsfaktor [-]

Nach umformen und einsetzen von Gl. 6-2 in Gl. 6-1 folgt:

$$\lambda_{veg} = \frac{4 \cdot A_{veg}}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} = \frac{4 \cdot h \cdot n_y \cdot B}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} \quad \text{Gl. 6-3}$$

Statt der angeströmten Astfläche führte SCHRÖDER (1998) in seiner Arbeit zusätzlich den Parameter „spezifische Vegetationsanströmfläche“ ein. Dieser beschreibt die Besatzdichte je m². Dabei wird der mittlere Astdurchmesser mit der Anzahl der Stämme je m² multipliziert und durch die zugrunde gelegte Fläche ($a_x \cdot a_y$) dividiert. Diese Herangehensweise hat sich in der Praxis jedoch nicht durchgesetzt, da die Gleichung weiterhin mit dem mittleren Astdurchmesser arbeitet und dabei die Belaubung unberücksichtigt bleibt.

Im Folgenden wird die Idee von SCHRÖDER aufgegriffen und entsprechend der tatsächlich angeströmten Vegetationsfläche umformuliert. Hierzu wird der Parameter „Besatzdichteparameter ω_P “ eingeführt. Dieser beschreibt die Dichte des Bestandes im Verhältnis zur zugrunde gelegten Grundfläche. Dabei ist die Bestandsdichte das Produkt des Permeabilitätsfaktors multipliziert mit der Breite des Vegetationsbestandes. Der Besatzdichteparameter ist damit definiert zu:

$$\omega_P = \frac{n_y \cdot B}{a_x \cdot a_y} \quad \text{Gl. 6-4}$$

wobei:

ω_P Besatzdichteparameter [1/m]

Berücksichtigt man noch zusätzlich die bereits von OPLATKA (1998) beobachtete räumliche Verteilung der Pflanze in longitudinaler Richtung (vgl. Abb. 15 auf Seite 25) erweitert sich Gl. 6-4 um den Korrekturfaktor c_n . Damit erweitert sich der Besatzdichteparameter zu:

$$\omega_P = \frac{n_y \cdot B}{a_x \cdot a_y} \cdot c_n \quad \text{Gl. 6-5}$$

wobei:

c_n Korrekturfaktor für die Permeabilität[-]

Nach einsetzen der Gl. 6-5 in Gl. 6-3 ergibt sich:

$$\lambda_{veg} = 4 \cdot H \cdot \omega_P \cdot c_{WR} \quad \text{Gl. 6-6}$$

Statt der Breite des Vegetationsbestandes kann auch die Breite der zugrunde gelegten Grundfläche, d.h. der Abstand der Pflanzenelemente senkrecht zur Fließrichtung eingesetzt werden ($B = a_y$). Damit reduziert sich der Besatzdichteparameter ω_P auf:

$$\omega_P = \frac{n_y \cdot a_y}{a_x \cdot a_y} \cdot c_n = \frac{n_y}{a_x} \cdot c_n \quad \text{Gl. 6-7}$$

Damit steht der Besatzdichteparameter in direkter Abhängigkeit zur Permeabilität n_y . Dies entspricht einer „zweidimensionalen Betrachtung“ der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche. Die Dimension in die Tiefe wird durch den Abstandsparameter a_x sowie durch den Korrekturfaktor für die Permeabilität c_n berücksichtigt.

In Kapitel 5.1.2 wurde bereits gezeigt, dass sich die hydraulisch wirksame Vegetationsfläche in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit weiter reduziert. Diese Flächenkontraktion ist auch bei der Berechnung des vegetativen Widerstandsbeiwertes zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird zusätzlich noch der Korrekturfaktor cf_v eingeführt. Dieser beschreibt die Reduktion des Besatzdichteparameters ω_P in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors cf_v ist der vegetative Widerstandsbeiwert λ_{veg} definiert zu:

$$\lambda_{veg} = 4 \cdot H \cdot \omega_P \cdot cf_v \cdot c_{WR} \quad \text{Gl. 6-8}$$

wobei:

cf_v Korrekturfaktor des Besatzdichteparameters [-]

Der Verlauf des Korrekturfaktors cf_v für Weiden und Hecken kann damit direkt aus Abb. 83 abgelesen werden. Die Interpretation der Grafik wurde in Kapitel 5.1.2 ausführlich erläutert. Zusammenfassend sei hier erwähnt, dass die Flächenkontraktion stärker ausfällt, d.h. einen kleineren Wert annimmt, je lichter und biegsamer die Pflanzen sind. Dichte Hecken weisen, bei den hier dargestellten Untersuchungen den geringsten Korrekturfaktor des Besatzdichteparameters auf. Der cf_v -Wert liegt für dichte, durchströmte Hecken im Mittel bei 0,8 unter Berücksichtigung einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,4 m/s.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung des vegetativen λ -Widerstandsbeiwertes unter Berücksichtigung der neu eingeführten Parameter aufgezeigt und erläutert. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden die λ -Beiwerte in Abhängigkeit der Reynoldszahl dargestellt. Für die Berechnung der Reynoldszahl wird als charakteristische Länge die Wassertiefe verwendet.

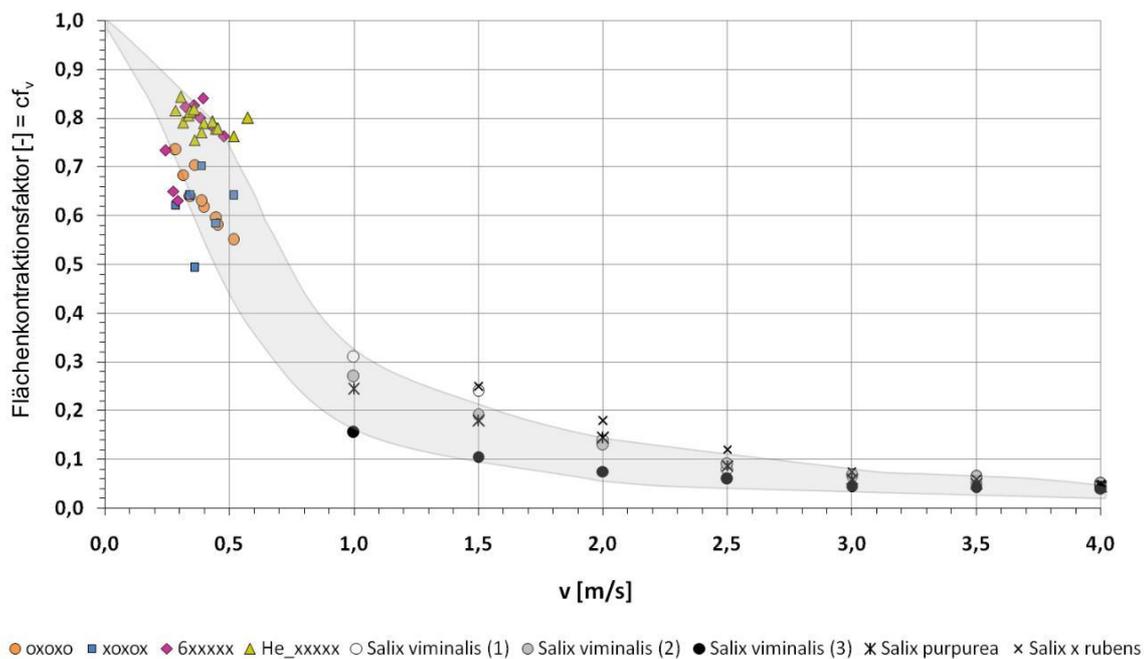


Abb. 83: Verlauf der Flächenkontraktion basierend aus den durchgeführten Laboruntersuchungen, sowie Daten von OPLATKA (1998).

In Abb. 84 ist der Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes für unbelaubte Weiden in Abhängigkeit der Reynoldszahl für unterschiedliche Besatzdichteparameter aufgetragen. Je lichter der Bestand, desto kleiner ist der Besatzdichteparameter ω_p , desto geringer ist der λ -Beiwerte. Die Untersuchungen mit einem Besatzdichteparameter von $\omega_p = 0,07$ entsprechen der Untersuchungsreihe U3, $\omega_p = 0,10$ der Untersuchungsreihe U2 und $\omega_p = 0,26$ der Untersuchungsreihe U1. Die Trendlinien zeigen den jeweiligen Verlauf der unterschiedlichen Besatzdichten auf. Auffällig sind die nahezu konstanten Verläufe der λ -Beiwerte und die damit verbundene Unabhängigkeit von der Reynoldszahl.

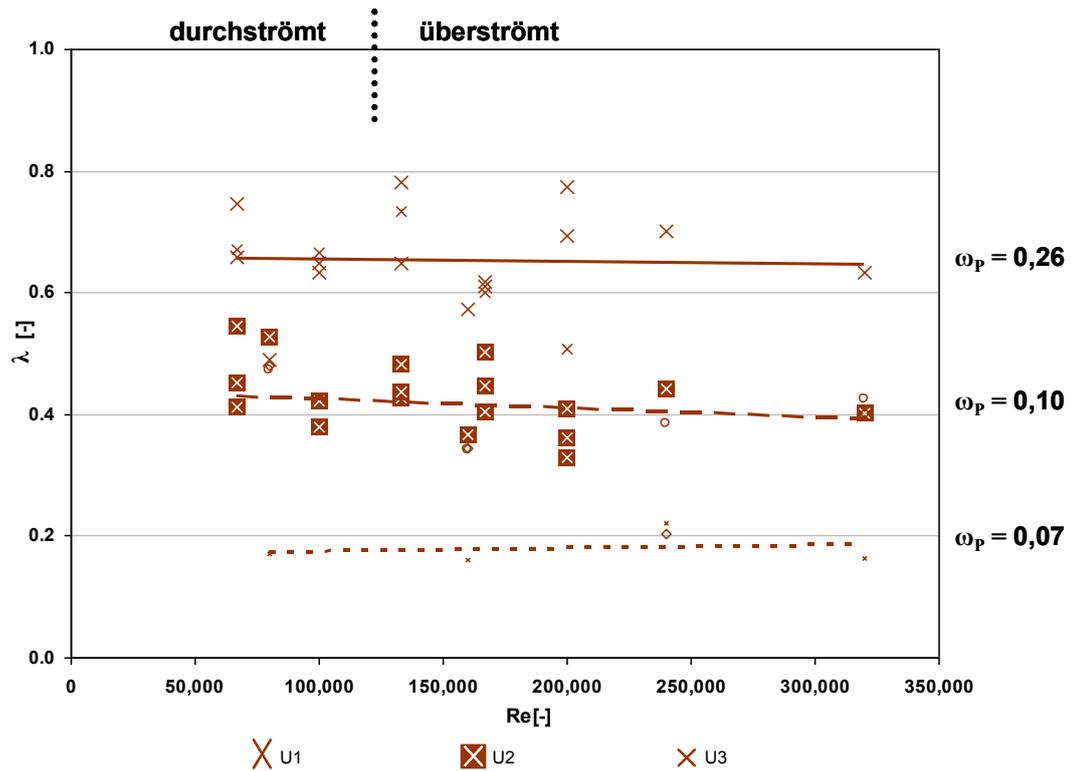


Abb. 84: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für unbelaubte Weiden in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) und des Besatzdichteparameters ω_p .

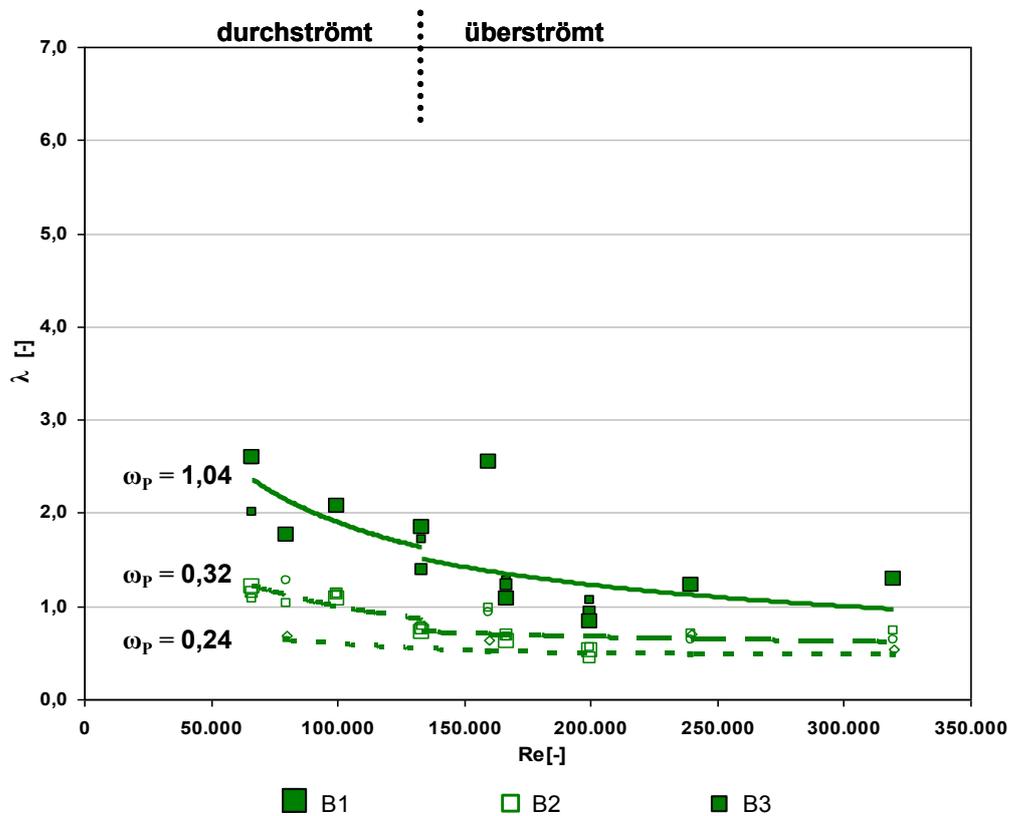


Abb. 85: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für belaubte Weiden in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) und des Besatzdichteparameters ω_p .

Abb. 85 zeigt die Entwicklung des λ -Beiwertes für belaubte Weiden. Im Vergleich zu den unbelaubten Weiden reicht die Skalierung der Ordinate jedoch von eins bis sieben, statt von Null bis eins. Dabei variieren die λ -Beiwerte für belaubte Weiden zwischen 0,3 und 2,6 (vgl. Anhang 04). Analog der unbelaubten Weiden ergibt der höchste Besatzdichteparameter ω_p wiederum die höchsten λ -Beiwerte. Im Gegensatz zu den unbelaubten Weiden ist der jeweilige Verlauf der λ -Beiwerte für belaubte Weiden von der Reynoldszahl abhängig.

Auffällig ist auch der steilere Verlauf der Kurve für dichtere Bestände (B1) im Vergleich zu lichter Beständen (B3) für Reynoldszahlen kleiner 150.000. Des Weiteren zeigen die jeweiligen Trendlinien eine Zweiteilung der Kurve, unterteilt in die Bereiche durch- und überströmt. Sobald die Pflanzen überströmt werden, erfährt die Trendlinie einen Versatz zu einem niedrigeren λ -Beiwert. Die Größe des Versatzes sinkt mit der Abnahme der Besatzdichte und verschwindet in der Untersuchungsreihe B3 völlig. Die Untersuchungsreihe B3 zeigt insgesamt einen relativ gleichmäßigen, fast schon horizontalen Verlauf des λ -Beiwertes, ähnlich der von unbelaubten Weiden.

Die Abhängigkeit der λ -Beiwerte in Bezug auf die Reynoldszahl kann auf mehrere Gründe zurückgeführt werden. Der prozentuale Anteil der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche, d.h. der Permeabilitätsfaktor, ist für belaubte Weiden direkt von der Fließgeschwindigkeit abhängig. Abb. 83 zeigt die Zunahme der Flächenkontraktion bzw. des Korrekturfaktors des Besatzdichteparameters ($c_{f,v}$) mit steigender Fließgeschwindigkeit. In Konsequenz steigt die stromlinienförmige Ausrichtung der Pflanze mit steigender Fließgeschwindigkeit. Dies wiederum geht mit einer Reduktion des Permeabilitätsfaktors der belaubten Weiden einher. Eine kleinere hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche bzw. ein kleinerer Permeabilitätsfaktor bietet der Strömung einen geringeren Widerstand, was sich an dem geringeren vegetativen Widerstandsbeiwert ablesen lässt.

In Abb. 86 ist der Verlauf der λ -Beiwerte für Hecken dargestellt. Die Skalierung der Ordinate erfolgt analog der unbelaubten Weiden. Auch hier führen dichtere Bestände (He1) im Vergleich zu lichter Beständen (He3) zu höheren λ -Beiwerten. Ebenfalls ist eine Zweiteilung der jeweiligen Trendlinien in die Bereiche durch- und überströmt zu beobachten.

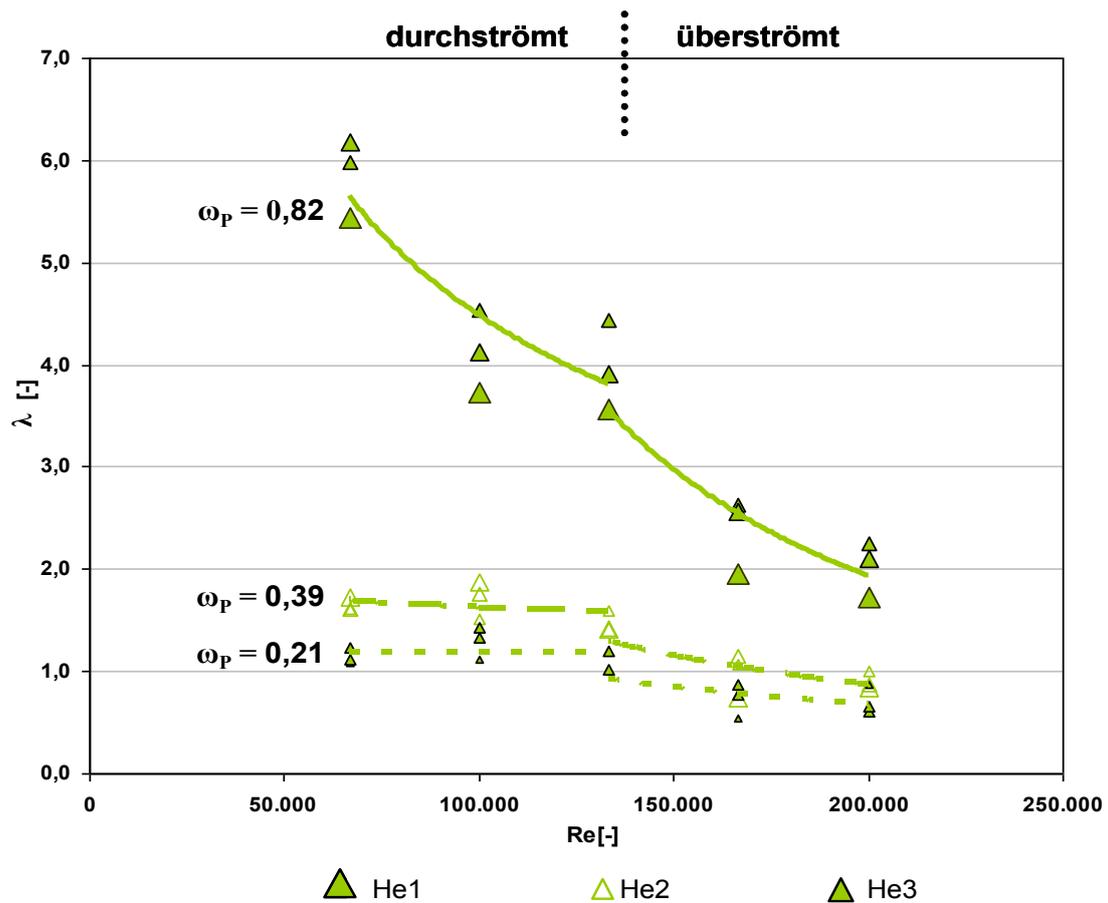


Abb. 86: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für Hecken in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) und des Besatzdichteparameters ω_p .

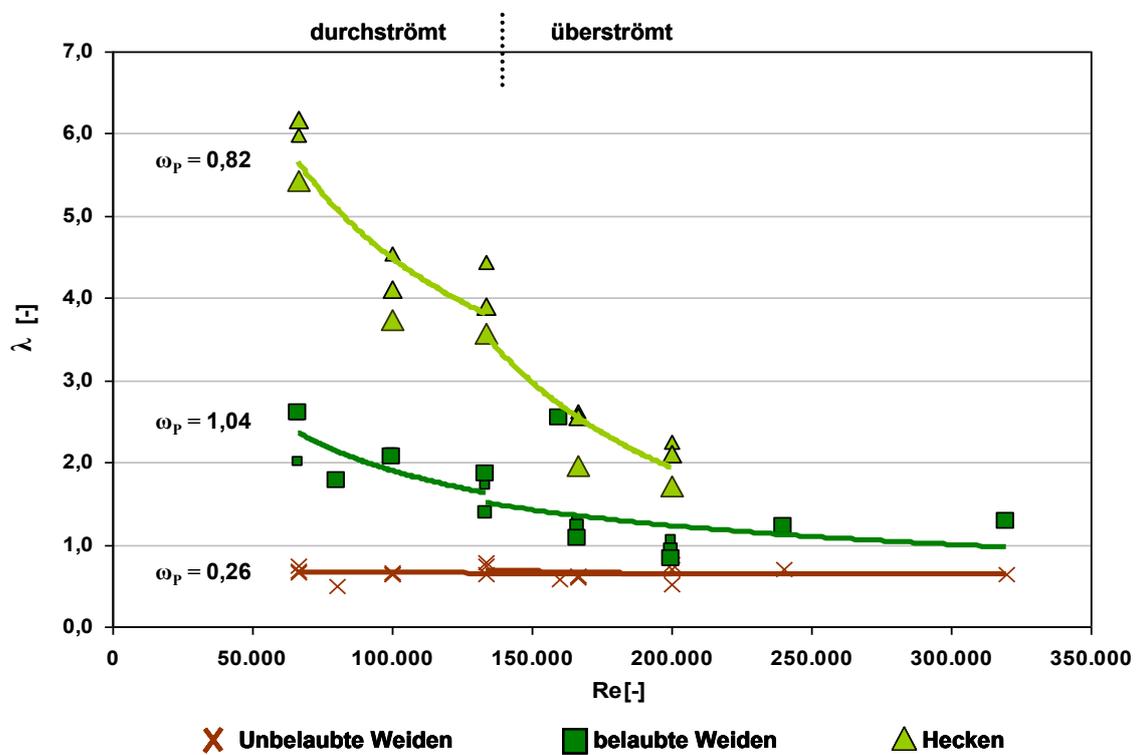


Abb. 87: Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für unbelaubte Weiden, belaubte Weiden und Hecken in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) für dichte Vegetationsbestände.

Des Weiteren ist vor allem der starke Anstieg der λ -Beiwerte zwischen den Besatzreihen He2 und H1 auffällig. Diese Tendenz zeigt sich auch in der Grafik der belaubten Weiden (vgl. Abb. 85) beim Übergang von Untersuchungsreihen B2 zu B1; jedoch nicht in der Deutlichkeit der Heckenwerte. Eine Ursache für den im Verhältnis zur Besatzdichte überproportionalen Anstieg der λ -Beiwerte wird in der Wechselwirkung zwischen Strömung und den zusätzlichen Turbulenzen infolge überlagerter Nachlaufströmung vermutet (vgl. hierzu LINDNER 1982 und PASCHE 1984). Um verlässliche Aussagen über die Turbulenzstrukturen und deren Auswirkung auf die Strömung machen zu können, hätten jedoch die Messzeiten der lokalen Fließgeschwindigkeiten deutlich erhöht werden müssen. Daher kann eine zuverlässige Auswertung bezüglich Turbulenzstrukturen mit den aufgenommenen Messwerten nicht erfolgen; dies wiederum war auch nicht das Ziel dieser Arbeit.

In Abb. 87 ist der Verlauf des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) für unbelaubte Weiden, belaubte Weiden und Hecken in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) für dichte Vegetationsbestände dargestellt. Im direkten Vergleich der Kurven kann folgendes festgehalten werden:

- Die λ_{veg} -Beiwerte sind für:
 - unbelaubte Weiden **unabhängig** von der Reynoldszahl
 - belaubte Weiden und Hecken **abhängig** von der Reynoldszahl
- Die steiferen Hecken liefern die höchsten λ_{veg} -Beiwerte, die unbelaubten Weiden die geringsten und die Werte für belaubte Weiden liegen dazwischen.
- Eine Zerteilung der Trendlinien in die Bereiche durch- und überströmt wird nur für die belaubten Weiden und Hecken beobachtet, wobei der Versatz der Kurven bei den steiferen Hecken stärker ausfällt.

Fazit:

Das von DVWK (1999) vorgeschlagene und in der Praxis weit verbreitete Verfahren zur Bestimmung des vegetativen Widerstandsbeiwertes λ_{veg} basiert auf den Eingangsgrößen des mittleren Astdurchmessers d_{veg} und den Abstandsparemtern a_x und a_y . Dieses Verfahren eignet sich relativ gut für unbelaubte Weiden, denn hierfür ist die geforderte Reynoldsunabhängigkeit gegeben. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Belaubung eine wichtige Rolle bei der Bestimmung des λ_{veg} -Beiwertes spielt. Jedoch wird in dem Berechnungsverfahren nach DVWK (1991) und BWK (2000) die Belaubung nicht berücksichtigt, was in der Folge zu erheblichen Fehleinschätzungen bezüglich des Widerstandsverhaltens von Weiden führen kann. Diese potentielle Fehleinschätzung lässt sich an dem Vergleich der λ_{veg} -Beiwerte in Abb. 87 für unbelaubte und belaubte Weiden zeigen. Beide Untersuchungsreihen haben die gleichen mittleren Astdurchmesser und Abstandsparemeter und dennoch fallen die λ_{veg} -Beiwerte aufgrund der Belaubung sehr unterschiedlich aus.

6.5.3 Bestimmung des Gesamtwiderstandsbeiwertes c_{WR}

Ausgehend von den Erkenntnissen des vorigen Kapitels wird vermutet, dass neben dem Besatzdichteparameter und dem Korrekturfaktor für die Fließgeschwindigkeit die Steifigkeit bzw. der Verästelungsgrad der Pflanzen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung des λ_{veg} -Beiwertes spielt. Anlass für diese Vermutung sind die ähnlichen Besatzdichteparameter und Fließgeschwindigkeitskorrekturfaktoren von dichten, belaubten Weiden (B1) und dichten Hecken (He1), deren mittlerer ω_P -Werte bei 1,04 bzw. 0,82 liegt. Dennoch liefert die Rückrechnung unterschiedliche λ_{veg} -Werte (vgl. Abb. 87). Die Ursache muss demzufolge in dem jeweiligen Gesamtwiderstandsbeiwert, hervorgerufen durch die eingesetzte Vegetation, zu finden sein.

Basierend auf den Daten der angeströmten Vegetationsfläche (vgl. Kapitel 5.1.2), dem mittleren Vegetationsabstand a_x , dem Korrekturfaktor für die Permeabilität c_n und dem Korrekturfaktor für die Fließgeschwindigkeit c_f kann der Gesamtwiderstandsbeiwerten c_{WR} rückgerechnet werden. Dabei ist der Wert für den Korrekturfaktor für die Permeabilität (c_n) im Rahmen dieser Arbeit zu $\frac{1}{4}$ bestimmt worden. In Tabelle 14 sind die ermittelten c_{WR} -Werte für dichte, un- und belaubte Weiden sowie Hecken dargestellt. Der Gesamtwiderstandsbeiwert (c_{WR}) verläuft für die verwendeten Pflanzen nicht konstant. Eine Hauptursache dürfte in der variable Form und Größe der Vegetationsfläche liegen, da diese vom Durchfluss und der Fließgeschwindigkeit abhängig ist.

Die c_{WR} -Werte für Hecken variieren zwischen 1,0 und 5,3. Dabei fällt der deutliche Sprung der c_{WR} -Werte infolge Überströmung auf. Sofern die Hecken nur durchströmt werden, ergeben sich c_{WR} -Werte von 2,5 und höher. Sobald eine Überströmung erfolgt, sinkt der Wert auf Werte zwischen 1,0 und 1,2. Die belaubten Weiden ergeben c_{WR} -Werte zwischen 1,0 und 2,8 im durchströmten Fall, wohingegen eine Überströmung eine Reduktion der Werte auf 0,4 bis 0,5 bewirkt. Diese Werte liegen deutlich unter den c_{WR} -Wert der überströmten, unbelaubten Weiden. Eine mögliche Erklärung dieses Phänomens könnte in der stromlinienförmigen Ausrichtung der belaubten Pflanzen liegen, die sich in der Strömung wie ein umströmter Kegel verhalten und damit der Strömung einen geringeren Gesamtwiderstand entgegensetzen.

Die Rückrechnung für durchströmte, unbelaubte Weiden ergab c_{WR} -Werte im Bereich von 1,5 bis 2,2. Ein Vergleich mit den Literaturwerten zeigt, dass der Wertebereich sich auch mit den Forschungsergebnissen von WUNDER (2009) deckt. WUNDER bestimmte mittels Kraftmessungen für unbelaubte Weidenzweige c_{WR} -Wert von 1,9 bis 2,1. PASCHE (1984) empfiehlt in seiner Arbeit die Verwendung von c_{WR} -Wert zwischen 1,2 - 1,5. Diese Werte leiten sich jedoch aus Laboruntersuchungen mit starren Stäben ab. Der Gesamtwiderstandsbeiwert verästelter, struktureicher Pflanzen müsste jedoch eine viel größere Spannbreite aufweisen. Dies belegen auch die Rückrechnungen der c_{WR} -Werte aus den hier durchgeführten Laboruntersuchungen. Damit zeigt sich auch die verbundene Unsicherheit in der Wahl des „richtigen“ c_{WR} -Wertes der holzigen Bewuchsbestände.

Tabelle 14: Rückrechnung des c_{WR} -Werts für un- und belaubte Weiden und Hecken.

	λ [-]	v [m/s]	h [m]	λ_O [-]	λ_{veg} [-]	a_x [m]	n_y [-]	cf_v [-]	ω_P [1/m]	c_{WR} [-]
40_U1_E3	0.67	0.27	0.248	0.10	0.57	0.14	0.15	1.00	0.27	2.2
60_U1_E3	0.67	0.31	0.320	0.10	0.57	0.14	0.16	1.00	0.28	1.6
80_U1_E3	0.73	0.34	0.393	0.10	0.63	0.14	0.15	1.00	0.27	1.5
100_U1_E3	0.60	0.36	0.460	0.10	0.50	0.14	0.14	1.00	0.25	1.1
120_U1_E3	0.51	0.38	0.520	0.10	0.41	0.14	0.12	1.00	0.21	0.9
40_B1_E3	2.60	0.25	0.268	0.10	2.50	0.14	0.63	0.73	0.82	2.8
60_B1_E3	2.08	0.29	0.341	0.10	1.98	0.14	0.71	0.84	1.07	1.4
80_B1_E3	1.85	0.32	0.411	0.10	1.75	0.14	0.72	0.87	1.12	1.0
100_B1_E3	1.07	0.36	0.469	0.10	0.97	0.14	0.70	0.79	0.99	0.5
120_B1_E3	0.83	0.38	0.526	0.10	0.73	0.14	0.69	0.75	0.92	0.4
40_HE1_E3	5.43	0.23	0.290	0.10	5.33	0.14	0.59	0.82	0.86	5.3
60_HE1_E3	3.73	0.28	0.356	0.10	3.63	0.14	0.59	0.84	0.89	2.9
80_HE1_E3	3.56	0.31	0.431	0.10	3.46	0.14	0.55	0.81	0.80	2.5
100_HE1_E3	1.96	0.35	0.481	0.10	1.86	0.14	0.55	0.82	0.81	1.2
120_HE1_E3	1.72	0.37	0.535	0.10	1.62	0.14	0.54	0.77	0.74	1.0

Fazit:

Die Rückrechnung der c_{WR} -Werte und der Abgleich dieser Werte mit Literaturangaben liefert die nötige Überprüfung der Belastbarkeit der hier vorgestellten Formel. Daraus leiten sich für die praktische Anwendung der Berechnung des vegetativen Widerstandsbeiwertes (λ_{veg}) folgende Konsequenzen ab:

- In den Untersuchungen wurden c_{WR} -Werte für holzige Bewuchsbestände zwischen 0,4 bis 5,3 ermittelt. Damit weisen die c_{WR} -Werte eine deutlich höhere Spannweite auf, als die bisher in der Literatur empfohlenen Werte von 1,2 bis 1,5.
- Die Berechnung des dimensionslosen, vegetativen Widerstandsbeiwertes λ_{veg} ist das Produkt aus der Wassertiefe h , dem Bewuchsparameter ω_P , dem Korrekturfaktor für die Fließgeschwindigkeit cf_v sowie dem entsprechenden Gesamtwiderstandsbeiwert c_{WR} .

$$\lambda_{veg} = 4 H \cdot \omega_P \cdot cf_v \cdot c_{WR}$$

6.6 Abgeleitete Empfehlungen

6.6.1 Gewässerunterhaltung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Art der Vegetation, d.h. der Vegetationstyp, eine signifikante Rolle auf die Auswirkungen des Wasserspiegelanstiegs hat. Die Hecken repräsentieren eine Kombination aus steifem und dichtem Bestand, bewirken den stärksten Aufstau; je flexibler und lichter der Bestand ist, als Vertreter seien hier die unbelaubten Weiden genannt, desto stärker ist die stromlinienförmige Anpassung und desto geringer ist der Aufstau nach oberstrom.

Durch die Auslichtung eines Bestandes kann der Wasserspiegel effizient gesenkt werden. Die Höhe der Absenkung des Wasserspiegels ist damit vom Vegetationstyp, dem Belaubungsgrad und dem Besatz abhängig. Dabei hat die Anordnung der Pflanzen innerhalb des Bestandes selbst im Verhältnis zur Besatzdichte einen deutlich geringeren Einfluss auf die Reduktion des Aufstaus. Sobald die Pflanzen überströmt werden, ist der Effekt der Anordnung nahezu vernachlässigbar.

Damit kann durch eine gezielte Gewässerunterhaltung die Aufstauwirkung des Vegetationsbestandes und damit der Wasserspiegel, je nach herrschender mittlerer Fließgeschwindigkeit, nachhaltig gesenkt werden. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Je dichter der Bestand, desto größer ist der Aufstau nach oberstrom.
- Dichte und steifere Sträucher und Hecken bewirken im Vergleich zu jungen, ein- bis dreijährigen, flexible Weiden einen größeren Aufstau.
- Statt eines regelmäßigen Auslichtens des Bestandes, wird das Schlagen von Abflussschneisen empfohlen.
- Generell sollte die Sinnhaftigkeit des Auslichtens sowie die exakte Lage von Abflussschneisen mittels 2D-HN-Modell verifiziert werden; z.B. wird ein Auslichten des Vegetationsbestandes in einem abflussunwirksamen Bereich innerhalb des Abflussquerschnitts zu keiner nennenswerten Wasserspiegelabsenkung führen.

6.6.2 Fließgeschwindigkeitsprofil

Der Verlauf der Fließgeschwindigkeitsprofile für die unterschiedlichen Vegetationsbestände kann wie folgt zusammengefasst werden: je dichter, verzweigter und steifer ein Pflanzenbestand ist, desto mehr stellt sich anstatt des logarithmischen Geschwindigkeitsprofils ein S-förmiger Verlauf des Profils ein. Die Ausprägung des S-förmigen Geschwindigkeitsverlaufs ist damit von der Pflanzenart und –dichte abhängig. Die Streubreite der lokalen Fließgeschwindigkeiten zum mittleren Geschwindigkeitsprofil wird stark vom Pflanzentyp und dessen Belaubungsgrad beeinflusst; Pflanzen mit biegsamen Blättern/Ästen zeigen in den Messreihen eine höhere Streubreite in Bezug zur mittleren Fließgeschwindigkeit als Pflanzen mit eher steiferen Blättern/Ästen.

Die Streubreite der Fließgeschwindigkeiten zeigt die damit verbundene Schwierigkeit bei der Bestimmung des „wahren“ mittleren Geschwindigkeitsverlaufs über die Tiefe. Eine

aussagekräftige Ermittlung der Geschwindigkeitsprofile im Gelände setzt aus diesem Grund Vielpunktmessungen voraus.

Die veränderten Fließgeschwindigkeitsverteilungen zwischen vegetationsbestandenen und vegetationsfreien Bereichen können lokale Sedimentations- und Erosionsprozesse auslösen. Der Grad der Sedimentation/Erosion hängt vom Fließgeschwindigkeitsgradienten zwischen den einzelnen Teilbereichen ab. Je stärker der Gradient, desto eher besteht die Tendenz zu Sedimentations-/Erosionsprozessen. Eine „schleichende“ Sedimentation mit einhergehender Verringerung des Abflussquerschnitts und der damit verbundenen Gefährdung der Hochwassersicherheit kann jedoch nur durch ein gezieltes Monitoringkonzeptes identifiziert werden (siehe hierzu Kapitel 8.2.3 Monitoring aus hydraulischer Sicht).

6.6.3 Widerstandbeiwerte

Die k_{st} -Wertebestimmung für die typischen Mischbestände der Auen wird durch die Darstellung der k_{st} -Werte in Form einer Entscheidungsmatrix erleichtert. Dabei sind die Pflanzenarten nach der Bedeckungsdichte in Kombination mit ihrer stromlinienförmigen Anpassung in der Horizontalen und nach der jeweiligen Dichte des Bestandes in der Vertikalen aufgetragen. Die jeweiligen pflanzenspezifischen k_{st} -Werte nehmen unabhängig von der Wassertiefe einen nahezu konstanten Verlauf an, sofern eine reine Durchströmung der Vegetation vorliegt. Sobald der Pflanzenbestand überströmt wird, erhöht sich der k_{st} -Beiwert mit steigender Überströmungshöhe.

Soll der Fall einer eventuell auftretenden Verklausung mit berücksichtigt werden, sind diese lokalen Bereiche nach den Untersuchungen von HARTLIEB (2006) mit einem k_{st} -Wert von eins anzusetzen.

Für die Berechnung des λ_{veg} -Widerstandsbeiwertes können die entsprechenden vegetationsbeschreibenden Parameter für unterschiedliche Auenbestände aus den in dieser Arbeit dargestellten Tabellen und Grafiken entnommen, oder direkt im Gelände bestimmt werden. Die λ_{veg} -Beiwerte für unbelaubte Weiden sind unabhängig von der Reynoldszahl und für belaubte Weiden und Hecken abhängig von der Reynoldszahl. Die steiferen Hecken liefern die höchsten λ_{veg} -Beiwerte, die unbelaubten Weiden die geringsten und die Werte für belaubte Weiden liegen dazwischen.

Generell gilt für beide Verfahren: Eine Vor-Ort-Begehung ist für eine möglichst exakte Abschätzung des Vegetationsbestandes und dem damit verbundenen Widerstandsverhalten unabdingbar.

7 Diskussion

7.1	Verlauf der Geschwindigkeitsprofile innerhalb der Vegetation
7.2	Das „seitliche Auslenken“ der Pflanzen infolge der Strömung
7.3	Erhebung von Daten im Gelände:
7.3.1	Fließgeschwindigkeiten
7.3.2	Bewertung: Erhebung der mittleren Vegetationsparameter
7.4	Abgeleitete Empfehlungen: empirischer k_{st} -Widerstandsbeiwerte
7.5	Abgeleitete Empfehlungen: dimensionsloser λ -Widerstandsbeiwerte

Das Ziel der in diesem Kapitel durchgeführten Diskussion ist zum einen die Bewertung der erarbeiteten Ergebnisse im Vergleich zu bestehenden Erkenntnissen aus der Wissenschaftsfachliteratur. Zum anderen, soll wie bereits schon in Kapitel 6 z.T. umgesetzt, ein Brückenschlag zwischen den Erkenntnissen der Vegetationsauswertung in Kapitel 5 sowie der hydraulischen Auswertung der Laboruntersuchungen in Kapitel 6 erfolgen.

7.1 Verlauf der Geschwindigkeitsprofile innerhalb der Vegetation

In Abb. 88 sind die Schemazeichnungen von FISCHENICH (2000) für über- und durchströmte Vegetation abgebildet. Im Vergleich dazu sind in Abb. 89 die gemessenen Geschwindigkeitsprofile aus den Laboruntersuchungen für überströmte Vegetation und in Abb. 90 die Geschwindigkeitsprofile der durchströmten Vegetation dargestellt. Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile im Labor weisen jedoch nur teilweise eine Ähnlichkeit mit den von FISCHENICH (2000) schematisch aufgezeigten Geschwindigkeitsprofilen für über- und durchströmte Vegetation auf.

Der Vergleich der Daten zeigt, dass der Verlauf der Geschwindigkeitsprofile sowohl vom Zustand „durchströmt“ oder „überströmt“ als auch von der Dichte des Vegetationsbestandes und von der Steifigkeit der jeweiligen Pflanzart abhängt.

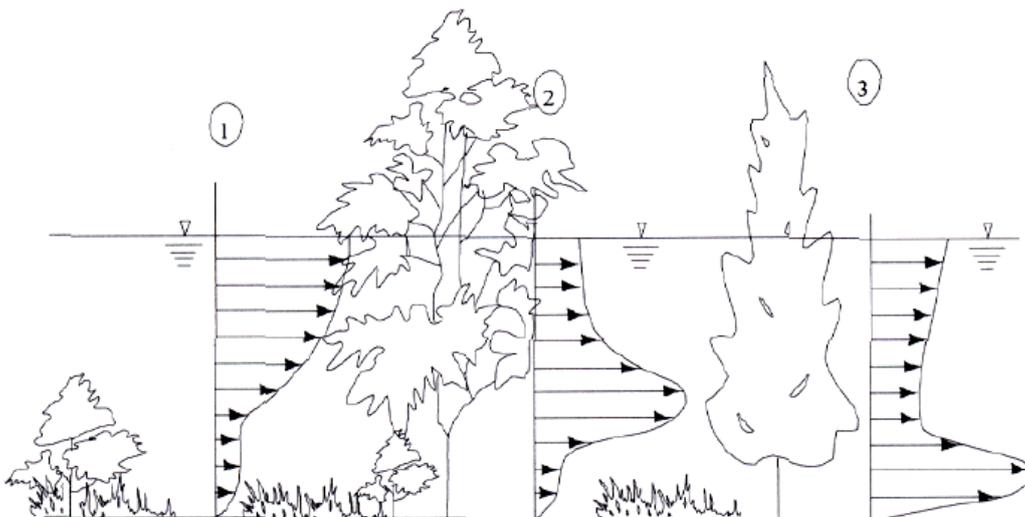


Abb. 88: Geschwindigkeitsprofilen für unterschiedliche Vegetationsbestände (FISCHENICH 2000).

Profil 1 in der Schemazeichnung von FISCHENICH stellt das klassische Geschwindigkeitsprofil für überströmte Pflanzen abstrahiert dar (vgl. Abb. 88). Analog der Einteilung nach BRETSCHNEIDER & SCHULZ (1985) ist die Vegetation für diese Strömungssituation der Klasse des Kleinbewuchses zuzuordnen. Dabei ist die Reduktion der Fließgeschwindigkeit innerhalb des durchströmten Vegetationsbereiches, d.h. der Bereich zwischen Sohle und Pflanzenhöhe direkt vom Besatz, der Belaubung sowie der Steifigkeit abhängig. Generell ist festzuhalten, dass je dichter und steifer der Bewuchs ist, z.B. der von Hecken, desto geringer ist die mittlere Fließgeschwindigkeit innerhalb des durchströmten Bereichs und desto höher ist die mittlere Fließgeschwindigkeit im überströmten Bereich im Vergleich zum Referenz-Zustand ohne Vegetationselemente.

Die Ausbildung des Profils 2 nach FISCHENICH für durchströmte Vegetation wird bei den durchgeführten Laboruntersuchungen nicht beobachtet. Vielmehr entspricht der tendenzielle Verlauf der Geschwindigkeitsprofile innerhalb der Vegetation bei einer reinen Durchströmung der Vegetation dem der zuvor beschriebenen Durchströmung mit überlagerter Überströmung. Auch bei einer reinen Durchströmung wird das sich einstellende Geschwindigkeitsprofil primär durch die Pflanzenart und der damit verbundenen Steifigkeit und dem Besatz bestimmt.

Das Profil 3 nach FISCHENICH zeigt sich innerhalb der Modelluntersuchungen nur ansatzweise für dichte belaubte Weiden (B1) und Hecken (He1), letztere sind in Abb. 91 nicht dargestellt. Ausgehend von der Sohle sind innerhalb der ersten sechs Zentimeter lediglich die Hülsen sowie der Hauptstamm der Pflanze für das Widerstandsverhalten in diesem Bereich verantwortlich. Aufgrund der fehlenden Belaubung in Sohlnähe fällt die horizontale Verteilung der Permeabilität⁷ im Bereich der Hülsen im Vergleich zum Anteil mit dichter Belaubung deutlich geringer aus, mit sinkendem vegetativem Widerstand infolge geringerer Belaubung steigt die mittlere Fließgeschwindigkeit in diesem Bereich an.

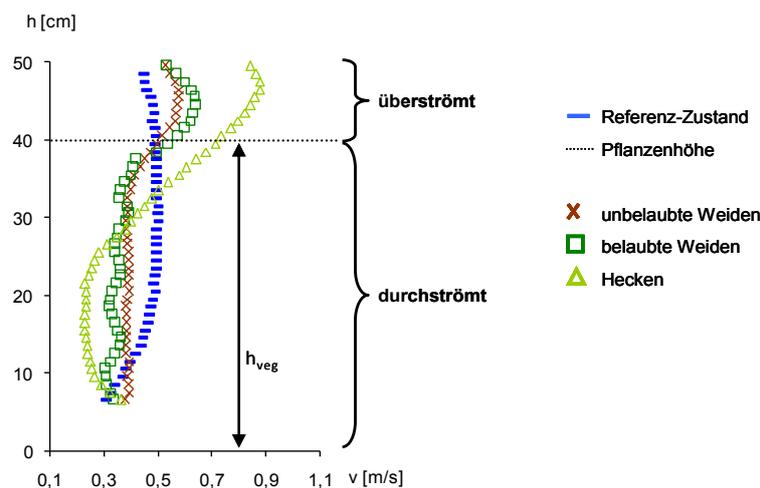


Abb. 89: Geschwindigkeitsprofile überströmter unbelaubter Weiden, belaubter Weiden Hecken sowie des Referenz-Zustands ohne Vegetationselemente.

⁷ Die Permeabilität beschreibt das Verhältnis der angeströmten Vegetationsfläche zur jeweiligen durchströmten Querschnittsfläche. Eine geringere Permeabilität bietet der Strömung einen geringeren Widerstand, was mit einer erhöhten Fließgeschwindigkeit in diesem Bereich einhergeht.

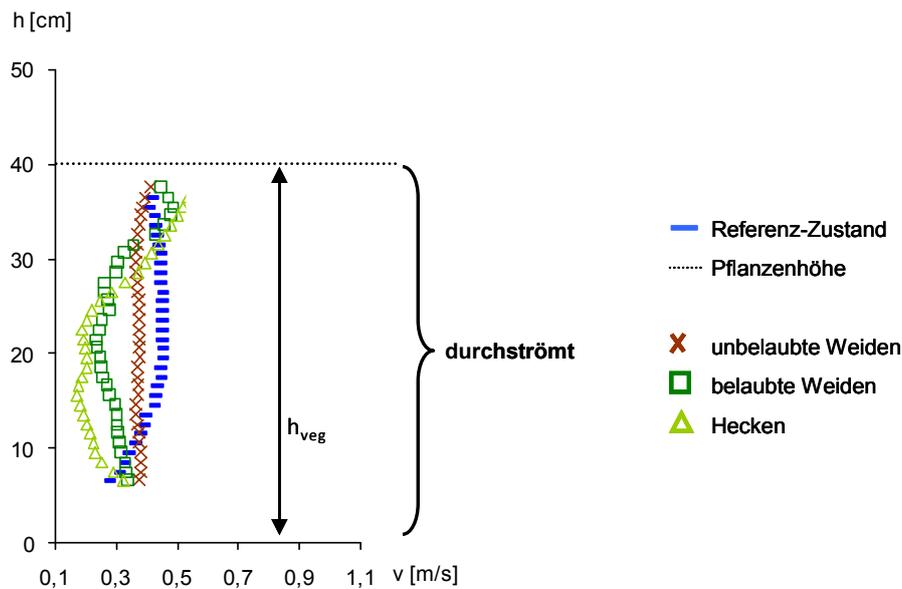


Abb. 90: Geschwindigkeitsprofile durchströmter, unbelaubter Weiden, belaubter Weiden Hecken sowie des Referenz-Zustands ohne Vegetationselemente.

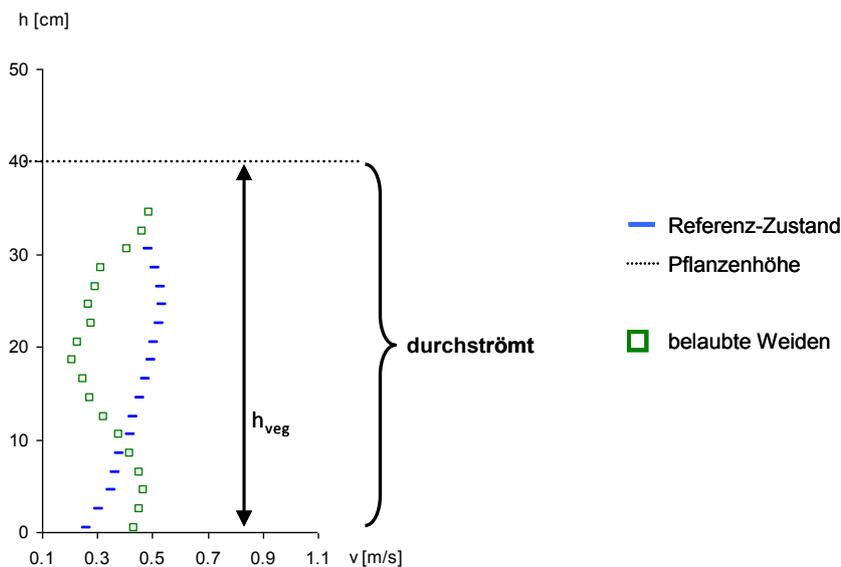


Abb. 91: Geschwindigkeitsprofil durchströmter, belaubte Weiden sowie des Referenz-Zustands ohne Vegetationselemente.

7.2 Das „seitliche Auslenken“ der Pflanzen infolge der Strömung

Ein seitliches Ausweichen der Pflanze infolge der Strömung und den damit entstehenden Fließpfaden, wie sie von LEWANDOWSKI (1993) beschrieben werden, sind auch während der Laboruntersuchungen, z. B. bei der Überströmung von Weiden, beobachtet worden. Die Rückrechnung des Widerstandsbeiwertes kann dabei auf Grund der entstandenen Fließpfade mit den dabei einhergehenden, lokal anzutreffenden erhöhten Fließgeschwindigkeiten und den daraus folgenden geringeren Wassertiefen leicht unterschätzt werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Trendlinie aus mindestens drei Einzelwerten gebildet wird, sind die lokalen Effekte im Mittel vernachlässigbar.

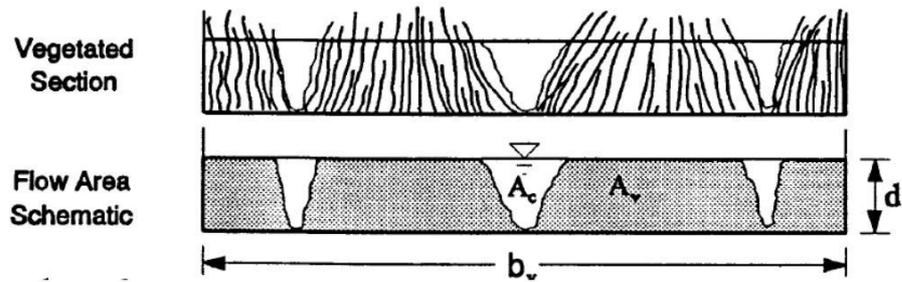


Abb. 92: Verteilung von Fließpfaden innerhalb eines Vegetationsbestands (LEWANDOWSKI 1993).

In Abb. 92 ist eine schematische Verteilung von Fließpfaden nach LEWANDOWSKI (1993) dargestellt. Abb. 93 stellt die Verteilung der Fließgeschwindigkeit in Form von Isotachendiagrammen dar, die auf Vielpunktmessungen innerhalb der belaubten Weiden basieren. Die obere Reihe in Abb. 93 zeigt die Isotachendiagramme und deren Bereich innerhalb des Abflussquerschnitts in der 60 cm breiten Laborrinne. Die Lage der belaubten Weiden ergibt sich aus der Überlagerung der ausgeschnittenen Unterwasseraufnahmen mit dem Isotachendiagramm (vgl. Abb. 93, untere Reihe).

Die beiden rechten Diagramme in Abb. 93 zeigen entstandene Fließpfade innerhalb des Abflussquerschnitts für überströmte, belaubte Weiden. Nach Aussage von LEWANDOWSKI (1993) wird die Entstehung von Fließpfaden durch die Überströmung der Pflanzen begünstigt. Diese Beobachtung kann mit den Laboruntersuchungen bestätigt werden. Bei einer reinen Durchströmung (vgl. Abb. 93, die beiden linken Bilder) bildet sich kein Fließpfad aus. Sobald die Wassertiefe die Pflanzenhöhe jedoch erreicht, erhöht sich die Tendenz der Ausbildung eines Fließpfades (vgl. Abb. 93, die beiden Bilder in der Mitte). Das Vorhersagen dieser Fließpfade gestaltet sich jedoch schwierig. Beobachtungen im Labor ergeben, dass vor allem unterschiedliche Aststeifigkeiten der Pflanzen die Bildung dieser Fließpfade fördern.

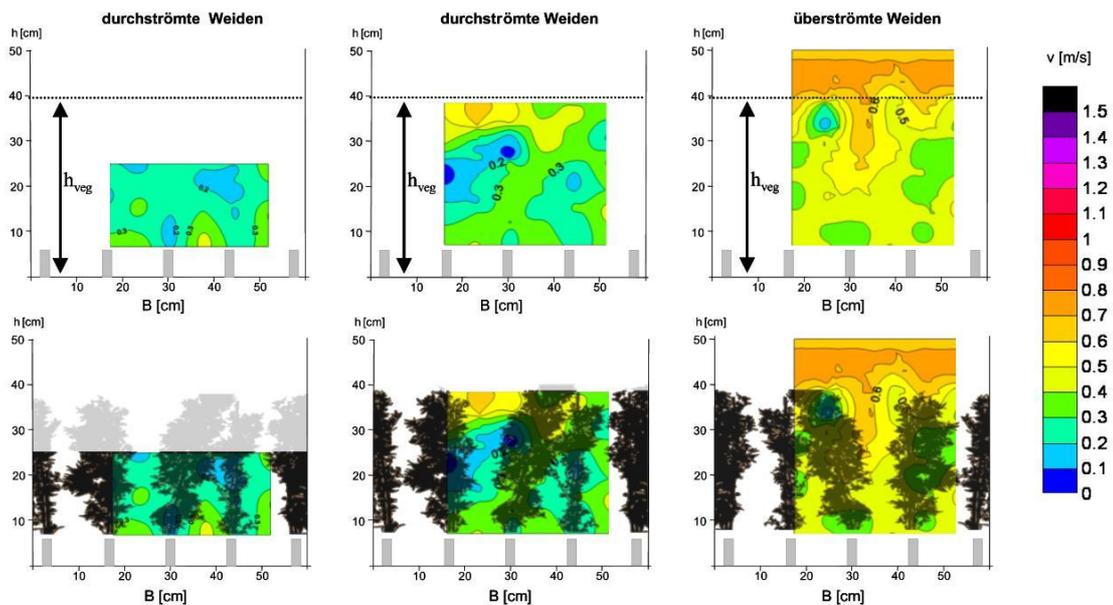


Abb. 93: erste Reihe: Isotachendiagramme belaubter Weiden für unterschiedliche Wassertiefen; zweite Reihe: Isotachendiagramme überlagert mit der Vegetation mit Fließrichtung in Zeichenebene.

7.3 Erhebung von Daten im Gelände:

7.3.1 Fließgeschwindigkeiten

Die große Streubreite der Fließgeschwindigkeit bezüglich des Mittelwertes für belaubte Weiden und Hecken (vgl. Abb. 94) zeigt die Schwierigkeit der Interpretation von Naturmessdaten bezüglich der Bestimmung der „wahren“ mittleren Fließgeschwindigkeit auf. Der Zusammenhang zwischen der Streubreite der mittleren Fließgeschwindigkeit und der Pflanzenart kann auch aus Abb. 94 abgelesen werden. Sobald die Wassertiefe die Pflanzenhöhe übersteigt, in diesem Fall bei einer Wassertiefe größer 40 cm, nimmt die Streubreite um die mittlere Fließgeschwindigkeit einen vernachlässigbar kleinen Wert an.

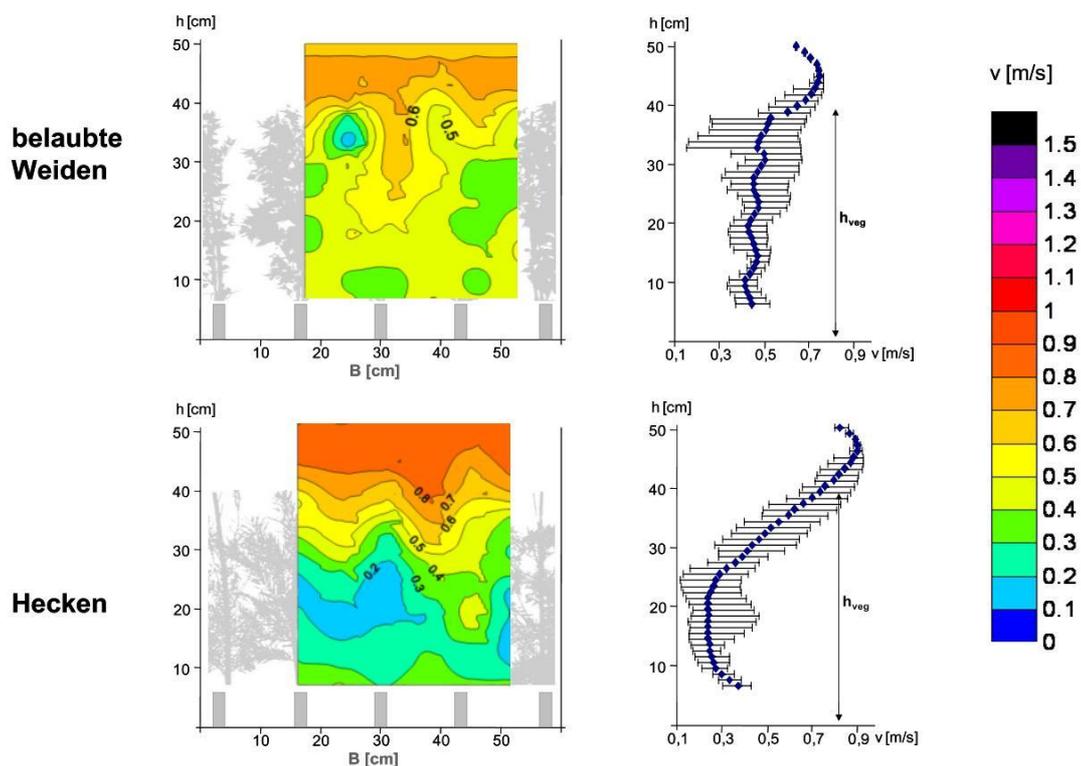
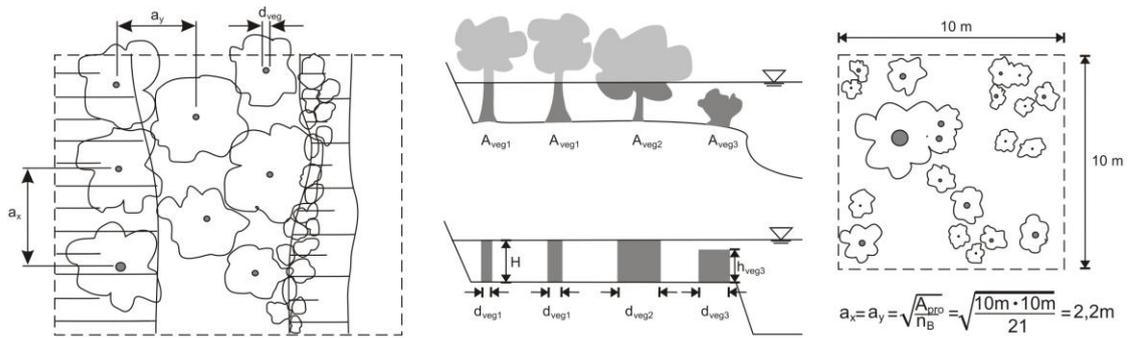


Abb. 94: Isotachendiagramm und Schwankungsbreiten der Fließgeschwindigkeit für die Untersuchungsreihe überströmter, belaubte Weiden (oben) und Hecken (unten) mit Fließrichtung in Zeichenebene.

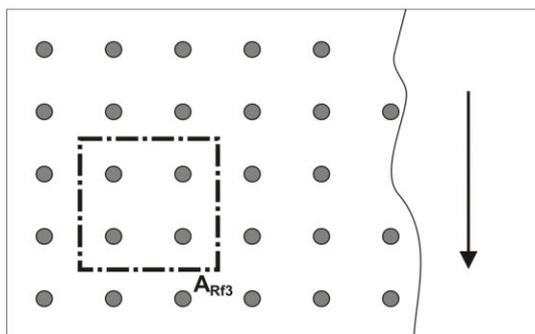
Eine verlässliche Aussage über die Fließgeschwindigkeitsverteilung und der daraus abgeleiteten mittleren Fließgeschwindigkeit innerhalb eines Vegetationsbestandes kann im Gelände daher nur erfolgen, sofern die Daten mittels Vielpunktmessung erhoben werden. Vergleiche über die räumliche Verteilung von Fließgeschwindigkeiten konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Daher besteht im Bereich des Abgleichs der im Labor erhobenen Vielpunktmessungen und den daraus abgeleiteten mittleren Geschwindigkeitsprofilen mit hoch aufgelösten Naturmessdaten Forschungsbedarf.

7.3.2 Bewertung: Erhebung der mittleren Vegetationsparameter

Das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Vegetationsparameter nach PASCHE (1984) ist ursprünglich aus Laboruntersuchungen unter Verwendung von starren Stäben mit definierten Vegetationsparametern entwickelt worden. In Abb. 95 werden die Schwierigkeiten bei der Erhebung der Vegetationsparameter im Gelände veranschaulicht.



$$d_{veg} = \frac{\sum d_{veg}}{n_B} \rightarrow a_x \cdot a_y = \frac{A_{veg}}{n_B} \rightarrow a_x = a_y = \sqrt{\frac{A_{veg}}{n_B}}$$



$A_{veg} = d_{veg} \cdot H$: Laborsituation: Pflanzen werden als symmetrisch angeordnete „starre“ Stäbe simuliert

A_{Rf} = Referenzfläche

$A_{veg} = d_{veg} \cdot H$: (= Blätter werden nicht mit berücksichtigt)

A_{veg} : aus Rasterbildauswertung, Flächenkontraktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für flexible, belaubte Auenvegetation

Abb. 95: links: „ideale“ Vegetationsanordnung; rechts: typische Weichholzaunenordnung im Gelände.

Auf der linken Seite von Abb. 95 ist eine „ideale“ Vegetationsanordnung dargestellt. Dieser Bestandsaufbau ist im Gelände sicherlich nur auf angepflanzte Auenbestände beschränkt und aufgrund fehlender Strukturdiversität aus ökologischer Sicht nicht erstrebenswert. Für diese „Idealvegetation“ lassen sich die für die hydraulischen Berechnungen benötigten mittleren Vegetationsparameter schnell und präzise erheben. Anders verhält es sich mit den im Gelände typischerweise vorkommenden Beständen (rechte Seite Abb. 95). Die Wahl der geeigneten Referenzfläche erweist sich in diesem Fall deutlich schwieriger. Je nach Wahl der Referenzfläche ergeben sich hierbei unterschiedliche mittlere

Vegetationsparameter. Die in Abb. 95 eingezeichnete Referenzfläche 1 (Rf1) gibt die mittleren Vegetationsparameter dieses Bestandes am besten wieder. Referenzfläche 2 (Rf2) würde zu dichte Abstandsparameter liefern. Die Folge wäre eine Überschätzung des vegetativen Strömungswiderstands. Referenzfläche 3 (Rf3) ermittelt zu lichte Werte, d.h. der Einfluss des vegetativen Strömungswiderstands würde in diesem Fall unterschätzt werden.

Für die exakte Bestimmung der mittleren Vegetationsparameter müsste der gesamte Bestand kartiert werden. Dies ist aufgrund des sehr zeitaufwendigen Verfahrens in der Realität nicht durchführbar. Gleichzeitig veranschaulicht die dargestellte Situation in Abb. 95 die Spannweite der Vegetationsparameter in Abhängigkeit von der Lage der Referenzfläche. Daher können, obwohl eine Vor-Ort-Kartierung durchgeführt wurde, die ermittelten mittleren Vegetationsparameter je nach Wahl der Referenzfläche unterschiedlich ausfallen.

7.4 Abgeleitete Empfehlungen: empirischer k_{st} -Widerstandsbeiwerte

Die Ermittlung der k_{st} -Werte diene der Klärung, ob die Voraussetzung der Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Natur gegeben ist. In der Literatur (z.B. HABERSACK 2009, SCHNEIDER 2001) liegen k_{st} -Werte vor, die auf Rückrechnungen von im Gelände erhobenen Daten basieren. Ein Abgleich der aus den Labordaten gewonnenen k_{st} -Werte mit den Literaturdaten gewährleistet, dass die Pflanzen im Modell das Verhalten der Pflanzen im Gelände simulieren.

Dem k_{st} -Wert haftet ein Wassertiefenabhängiger Charakter an. Die Auswertung der Daten liefern für durchströmte Vegetation nahezu gleich bleibenden k_{st} -Werte in Abhängigkeit der Pflanzenart und Besatzdichte. Erst sobald der Pflanzenbestand überströmt wird, ist der Wassertiefenabhängige Verlauf der k_{st} -Werte zu beobachten (vgl. Abb. 96).

Für die Praxis hat dieser k_{st} -Verlauf der Weiden und Hecken folgende Bedeutung: Sind die Pflanzen im HN-Modell als Mittel- und Großbewuchs zu simulieren, kann der k_{st} -Wert als konstant angesehen werden. Sobald eine Überströmung erfolgt, muss der k_{st} -Wert der Wassertiefe angepasst werden. Hydraulisch gesehen verhält sich der Bewuchs, sobald er überströmt wird, als Kleinbewuchs und die Rauheitswirkung sinkt mit steigender Überströmung.

In Tabelle 15 sind die k_{st} -Werte für unterschiedliche Auenstandorte in Form einer Entscheidungsmatrix zusammengestellt. Die Sortierung der Daten zum einen nach der Pflanzenart in der Horizontalen und zum anderen nach der Besatzdichte in der Vertikalen ermöglicht ein einfaches Abgreifen der entsprechenden k_{st} -Werte. Diese Sortierung der Daten hilft vor allem beim Einschätzen der k_{st} -Werte von Mischbeständen, denn aus der Matrixtabelle lassen sich leicht die jeweiligen Extremwerte für den durch- bzw. überströmten Fall entnehmen. Der sehr dichte, steife Heckenbestand ist in der Tabelle links oben, der lichte, biegsame Bestand von unbelaubten Weiden ist rechts unten aufgeführt.

7.5 Abgeleitete Empfehlungen: dimensionsloser λ -Widerstandsbeiwerte

Die aus den Untersuchungsdaten ermittelte Gleichung für holzige Bewuchsbestände lautet:

$$\lambda_{veg} = 4 \cdot h \cdot \omega_P \cdot c_{f_v} \cdot c_{WR}$$

Im Folgenden werden die Parameter einzeln diskutiert.

- $\omega_P = c_n \cdot n_y / a_x$:

Der Bewuchsparameter ω_P ist der Quotient aus Permeabilität n_y und Abstandsparemeter in Fließrichtung a_x sowie dem Korrekturfaktor der Permeabilität c_n . Der Vorteil der Betrachtungsweise mit einem Bewuchsparameter ist, dass hier alle drei Dimensionen berücksichtigt werden. Die prozentuale hydraulisch wirksame Vegetationsfläche bzw. der Permeabilitätsfaktor n_y bezeichnet das Verhältnis der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche im „trockenen Zustand“ zur gesamt durchflossenen Querschnittsfläche. Der Permeabilitätsfaktor bezieht sich auf die Projektionsfläche der y-z-Ebene und liefert damit den vegetativen Anteil in der Zweidimensionalen. Die Verwendung des Index y verhindert eine Verwechslung mit dem Parameter MANNING n . Im Anhang A08 sind die n_y -Werte für unbelaubte und belaubten Weiden (U / B) sowie der Hecken (He) mit unterschiedlichem Besatz aufgetragen. Der Vegetationsabstandsparemeter a_x berücksichtigt als dritte Dimension die Tiefe. Der Korrekturfaktor c_n gibt die Reduktion der Gesamtanströmfläche in die Tiefe wieder und wird im Rahmen dieser Untersuchung zu dem Wert $\frac{1}{4}$ bestimmt.

Richtwerte für die a_x -Werte von holzigen Bewuchsbeständen können aus Abb. 97 und Abb. 98 entnommen werden. Der Habitus, d.h. die äußere Erscheinungsform der Silber-, Fahl- und Bruchweide ähnelt einer baumartigen Wuchsstruktur. In Abb. 97 ist die Entwicklung der Vegetationsparameter für die Baumweiden und für die Pappel dargestellt. Die farbig hinterlegte Fläche veranschaulicht die Tendenz der Vegetationsparameter für die Pappel. Die blau gepunkteten Linien geben die Hüllkurven für die Vegetationsparameter der baumartigen Salix-Arten an.

Die strauchartigen Weidenarten sowie die Heckengewächse weisen einen ähnlichen Verlauf bezüglich der Vegetationsparameter auf. Auffällig ist hier die geringe Spannbreite des Abstandsparemters a_x . Abb. 98 zeigt den über die Jahre steigenden mittleren Vegetationsdurchmesser d_{veg} , bei fast gleich bleibenden Abstandsparemters. Für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes bedeutet dies, dass der Abstandsparemeter für Strauchweiden im Mittel zwischen 0,1 m bis 0,45 m liegt. Die Wahl des mittleren Durchmessers hängt vom Alter des Bestandes ab.

Ein Vergleich der in Abb. 97 aufgeführten Vegetationsparameter mit einem Auszug aus den Werten nach z.B. BWK (2000, vgl. Tabelle 16) zeigt die Diskrepanz der an der Elbe erhobenen Werte und den Angaben in der Literatur auf. In der Tabelle sind z.T. weit größere Abstandsparemters a_x angegeben als an der Elbe für Weichholzaunenbestände erhoben wurden. Die Vegetationsparameter im Gelände variieren je nach Alter auch innerhalb eines Bestandes. Die Verwendung der Werte nach DVWK (1991) bzw. BWK (2000) ist für Baumweiden ohne eine Vor-Ort-Kartierung nicht zu empfehlen, da

es sonst zu einer Fehleinschätzung der Abstandparameter kommen kann. Die Auswirkungen einer nicht berücksichtigten Belaubung auf den Widerstandsbeiwert zeigen die Abb. 96 und Abb. 100. In beiden Abbildungen sind die Widerstandsbeiwerte für unbelaubte Weiden sowie belaubte Weiden bei gleicher Besatzdichte aufgetragen, z.B. unterschätzt der k_{st} -Wert der unbelaubten Weiden den Effekt der Belaubung um sechs k_{st} -Einheiten.

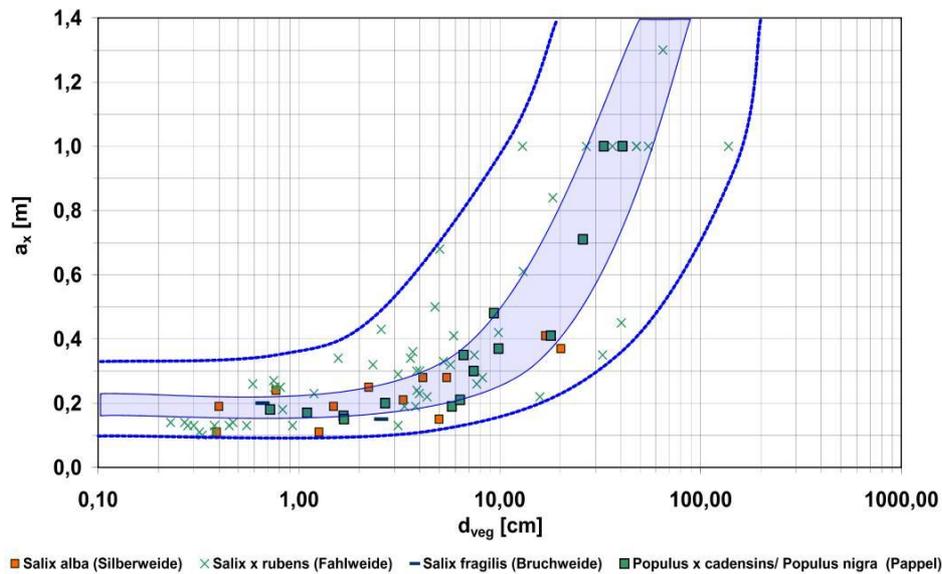


Abb. 97: Aus der Kartierung bestimmte Vegetationsparameter für drei Baumweidenarten und der Baumart Pappel.

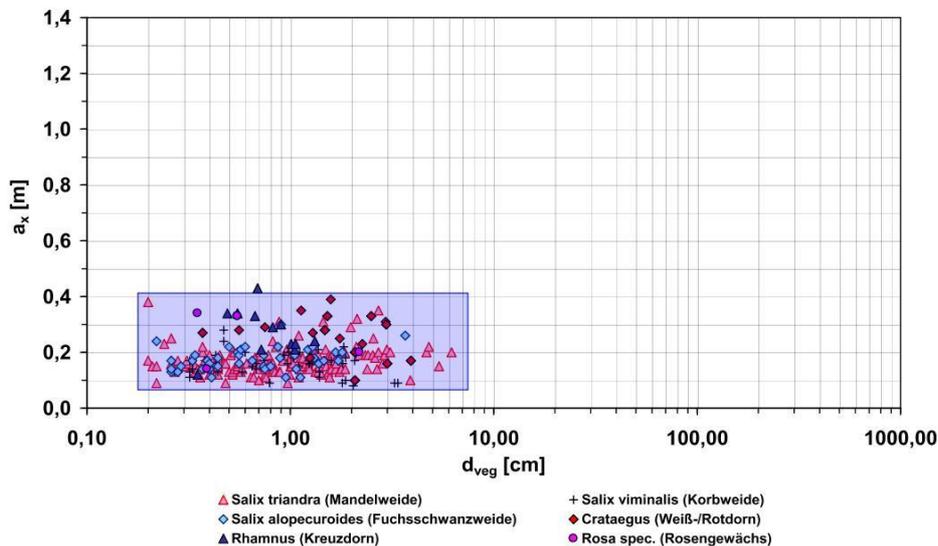


Abb. 98: Aus der Kartierung bestimmte Vegetationsparameter für drei Strauchweidenarten und drei Heckengewächse.

Tabelle 16: Vegetationsparameter nach dem BWK (2000):

Bewuchsart	Entwicklungsstand	d_{veg} [m]	a_x [m]
Bäume	lockerer Besatz	0,5	10,0
	dichter junger Besatz	0,2	5,0
	mehrfähriger Besatz	0,4	5,0
	dichter mehrfähriger Besatz	0,8	5,0

- c_{fv} :

Der Parameter c_{fv} dient als Korrekturfaktor des Bewuchsparameters ω_p . In Abb. 99 ist der c_{fv} -Faktor bzw. Flächenkontraktionsfaktor für unterschiedliche, belaubte Weiden- und Heckenbestände in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit aufgetragen. Die grau hinterlegte Kurve basiert auf einem von OPLATKA 1998 postulierten Verlauf.

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit bewusst darauf verzichtet, einen funktionalen Zusammenhang für den Korrekturfaktor als Funktion der Fließgeschwindigkeit abzuleiten. Die Grafik liefert erste Anhaltswerte, eine Ableitung eines funktionalen Zusammenhangs in diesem Stadium würde der großen Heterogenität in Bezug auf Alter und Zusammensetzung der Auenpflanzengesellschaft jedoch nicht gerecht werden.

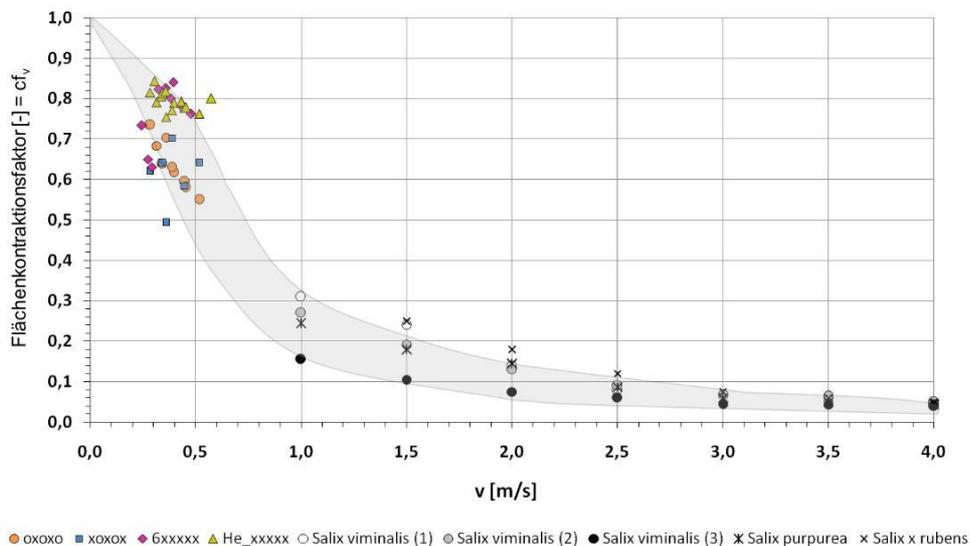


Abb. 99: Verlauf der Flächenkontraktion im Vergleich zu den Daten von OPLATKA (1998).

- c_{WR} :

Der Parameter c_{WR} ist ein Korrekturwert, der dem Gesamtwiderstand der Pflanze Rechnung trägt. Dieser Faktor ist zurzeit noch der unsicherste bezüglich des anzunehmenden Wertebereichs. Die Rückrechnungen zeigen, dass sich der c_{WR} -Wert analog den Erkenntnissen von FATHI-MAGHADAEM & KOUWEN (1997) in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Wassertiefe zu Pflanzenhöhe ändert.

Für belaubte Weiden sind bisher lediglich die Werte von OPLATKA (1998) und Werte für unbelaubte Weiden von WUNDER (2009) veröffentlicht. Die rückgerechneten c_{WR} -Werte in Anhang 10 zeigen, dass die vereinfachte Annahme des c_{WR} -Wertes von 1,2 bis 1,5 nach z.B. DVWK (1991) nur für einen sehr eingeschränkten Bereich der holzigen Bewuchsbestände zutrifft. Daher liegt in der Bestimmung der c_{WR} -Wert für holzige Bewuchsbestände noch ein großes Forschungspotential.

- λ_{veg} :

Eine Zusammenstellung des vegetativen Widerstandbeiwertes λ_{veg} für holzige Bewuchsbestände ist in Abb. 100 dargestellt. Die durchgezogenen Trendlinien zeigen den Kurvenverlauf der λ_{veg} -Werte für unbelaubte und belaubte Weiden und Hecken für

dichte Bestände; die gestrichelte Trendlinie die der lichten Bestände auf. Der λ_{veg} -Wert nimmt von den Hecken über die belaubten Weiden bis hin zu den unbelaubten Weiden stetig ab. Je nach Dichte des Bestandes wird diese Dreier-Kurvenschar nach oben bzw. unten verschoben.

Des Weiteren sind in der Grafik in dem grau hinterlegten Kasten die Werte aus dem Produkt „ $4 \cdot \omega_P \cdot c_{WR}$ “ aufgetragen. In der linken Spalte stehen die Werte der dichten, in der rechten Spalte die der lichten Bestände. Die Abhängigkeit der λ_{veg} -Werte von der Reynoldszahl lässt sich auf die Variabilität der c_{WR} -Werte in Abhängigkeit der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit und damit auch der Reynoldszahl zurückführen. Aufgrund der noch bestehenden Unsicherheiten bezüglich des Verlaufs der c_{WR} -Werte für unterschiedliche Auenpflanzen kann es hilfreich sein, in der Praxis statt ω_P und c_{WR} getrennt zu betrachten, das Produkt zu wählen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bewusst darauf geachtet, den Bewuchsparameter ω_P und den Gesamtwiderstandsbeiwert c_{WR} getrennt zu untersuchen. Dies ermöglicht eine getrennte Analyse des Einflusses der jeweiligen Parameter auf das Ergebnis des vegetativen Widerstandsbeiwertes von Auenpflanzengesellschaften.

Die mit einem Stern markierten Werte sind Messungen aus der Veröffentlichung von JÄRVELÄ (2004). Die belaubten Weidenuntersuchungen von JÄRVELÄ wurden in Kombination mit Seggen durchgeführt. Daraus ergeben sich insgesamt dichtere Bewuchsparameter mit höheren λ_{veg} -Werten für belaubte Weiden im Vergleich zu den im Theodor-Rehbock-Wasserbaulabor ermittelten Werten.

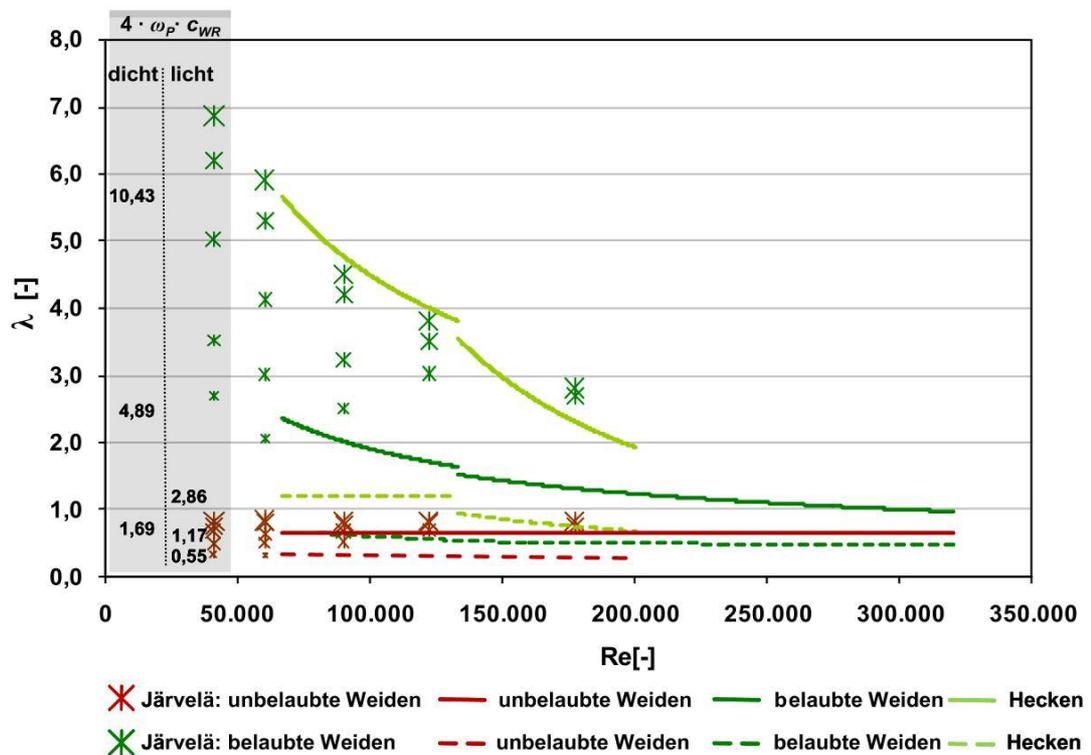


Abb. 100: ermittelte λ_{veg} für unbelaubte Weiden, belaubte Weiden und Hecke unter Angabe des Produkts $\omega_P \cdot c_{WR}$ für dichte und lichte Bestände im Vergleich zu den Daten von JÄRVELÄ (2004).

Die λ_{veg} -Werte aus der belaubten Weiden-Seggen-Kombination decken sich sehr gut mit den Untersuchungen der Hecken. Ein dichter Untergrundbewuchs erhöht die Permeabilität n_y bei einer gleichzeitigen Reduzierung des Vegetationsabstandsparameters a_x .

Daraus lässt sich vermuten, dass die Gesamtsteifigkeit des Vegetationsbestandes und damit auch der Korrekturfaktor cf_v bei Beständen mit Untergrundbewuchs im Vergleich zu Vegetationsbeständen ohne Untergrundbewuchs höher ausfallen wird. Ursache ist die vermutlich geringere stromlinienförmige Ausrichtung der Weidenblätter infolge der hohen Blatt-/Halmdichte der Seggen und der damit verbundenen höheren Steifigkeit des Kombinations-Systems Weiden-Seggen.

8 Identifizierung von Weich- und Hartholzauenstandorten

8.1	Handlungsmatrix
8.2	Weiterführende Empfehlungen und Hinweise
8.2.1	<i>Allgemeine Hinweise</i>
8.2.2	<i>Beispiel: Bälów-Rühstädter-Bogen</i>
8.2.3	<i>Monitoring aus hydraulischer Sicht</i>

Bereits in Kapitel 2.1 „Ökologie der Auen“ wird auf die Notwendigkeit von mesoskaligen, morphologischen Heterogenitäten und der damit verbundenen Vielzahl an Habitaten innerhalb der Auen hingewiesen. Diese Diversität an Habitattypen ist die Voraussetzung für eine artenreiche Flora- und Faunagesellschaft.

Das Wissen um eine adäquate Beschreibung des vegetativen Widerstandsbeiwertes alleine reicht im Planungsprozess noch nicht aus, den Flächenanteil der strukturreichen Auen in Deutschland nachhaltig zu erhöhen. Vielmehr bedarf es eines Handlungskonzeptes, das auch einem eher weniger biologisch interessierten Planer ermöglicht, geeignete Auenwaldstandorte zu identifizieren. Bei der Auswahl der Flächen ist darauf zu achten, dass die Flächen sowohl aus hydraulischer als auch aus biologischer Sicht geeignet sind. Die biologische Anforderung an den Standort ergibt sich aus dem Wechselspiel von Überflutungstoleranz und Trockenstress der Wurzeln; zu feuchte Standorte infolge zu lang anhaltender Staunässe führen zu einem Abfaulen der Wurzeln, zu trockene Standorte infolge zu lang andauernder niedriger Grundwasserstände führen dagegen zum Vertrocknen der Wurzeln. Damit ist die geeignete Standortwahl aus biologischer Sicht eine notwendige Voraussetzung für eine nachhaltige Etablierung von Auenwäldern entlang der Fließgewässer.

Im Folgenden wird eine Handlungsmatrix zur Identifizierung von Auenstandorten vorgestellt. Das Verfahren basiert auf einer iterativen Verschneidung der Ergebnisse eines 2D-hydrodynamisch-numerischen-Modells mit einem biologischen Habitat-Prognose-Modell in einem Geoinformationssystem (GIS). Eingangsgrößen des biologischen Modells sind unter anderem die lokalen Grundwasserschwankungen, die Bodenart, das Altersstadium der Pflanzengesellschaft sowie deren Überflutungstoleranz. Eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise von Habitat-Prognose-Modellen findet sich z.B. in MOSNER et al. (2009).

Darüber hinaus werden in Kapitel 8.2 weitere praxisrelevante Empfehlungen gegeben, die helfen, die Wahrung der Hochwassersicherheit auch nach Jahren der Vegetationsentwicklung zu gewährleisten. Diese leiten sich aus den Erfahrungen an der Elbe und der Enz ab.

8.1 Handlungsmatrix

Ein hoch aufgelöstes zweidimensionales hydrodynamisch-numerisches Berechnungsmodell (2D-HN-Modell) bildet neben dem Habitat-Prognose-Modell⁸ die Grundlage für die Auenstandortbestimmung (vgl. Abb. 101). Dabei bestimmt die jeweiligen Rastergrößen der beiden Modelle die Datengenauigkeit. Eine metergenaue Angabe über die Pflanzungsflächen setzt eine Auflösung des 2D-HN-Modells und des Habitat-Prognose-Modells von kleiner als einem Meter voraus. Dabei ist jedoch zu beachten, dass je aufgelöster/detailierter das Modell ist, desto länger ist die Rechenzeit.

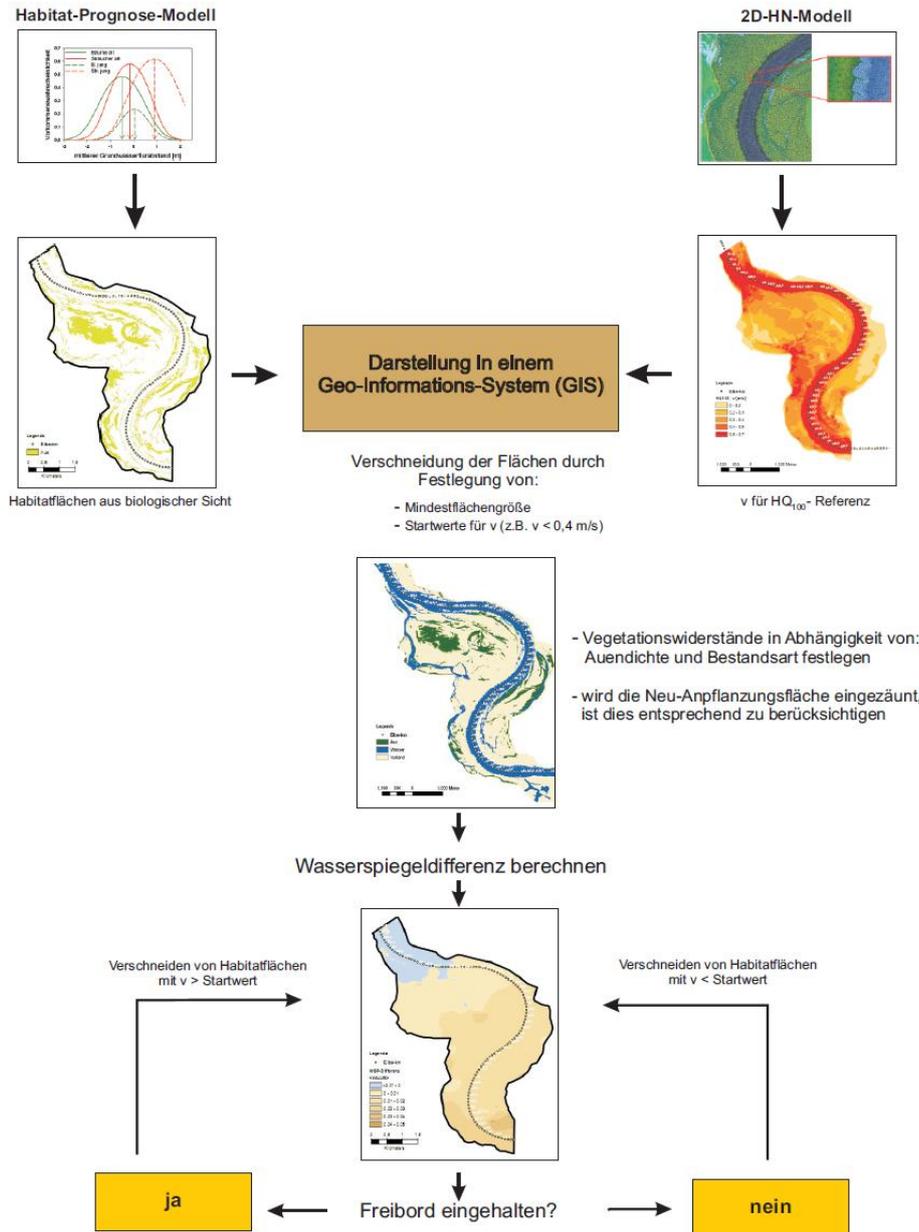


Abb. 101: Handlungsmatrix zur Identifizierung von Weichholzauenstandorten sowohl aus biologischer als auch aus hydraulischer Sicht.

⁸ Steht kein Habitat-Prognose-Modell zur Verfügung, können potentiellen Flächen vereinfacht anhand der mittleren Standardabweichung der Pegelschwankungen berechnet werden. Eine Schritt-für-Schritt Anleitung dieses Verfahrens ist z.B. in SCHNEIDER (2007) zu finden.

Das Habitat-Prognose-Modell liefert aus biologischer Sicht die **potentiellen Flächen** für eine Weichholzauenetablierung. Die Identifizierung der **umsetzbaren bzw. bepflanzbaren Flächen** erfolgt mittels 2D-HN-Berechnung, indem Flächen bezüglich ihres Aufstaupotentials bewertet werden.

Für diese Bewertung muss sowohl die Anzahl der zu bewertenden Flächen als auch deren Größe solange variiert werden, bis die am besten für die Bepflanzung geeigneten Flächen identifiziert werden. Dabei wird folgende Vorgehensweise praktiziert:

1. Identifizierung der potentiellen Flächen aus biologischer Sicht mittels Habitat-Prognose-Modell
2. Berechnung der lokalen Fließgeschwindigkeitsverteilung des Bemessungsabflusses für den Ist-Zustand, d.h. der Zustand ohne die potentiellen Neuanpflanzungsflächen mittels Verwendung eines 2D-HN-Modells
3. Einlesen der Ergebnisse des Habitat-Prognose-Modells sowie der Geschwindigkeitsverteilung als Rasterdatensätze ins GIS
4. Startwerte für die maximalen Fließgeschwindigkeitsflächen festlegen; empfohlen wird ein Startwert von 0,4 m/s
5. Verschneidung der Habitat-Prognose-Modell-Flächen mit den Fließgeschwindigkeitsflächen im GIS:
 - a. Maximale Mindestgröße der Neuanpflanzungsflächen festlegen
 - b. Verschneidung dieser Flächen mit den im Untersuchungsgebiet kurz- und mittelfristig verfügbaren Flächen
 - c. Konturgebung der Flächen mit Blick auf die Strömungsbeeinflussung (Stromlinienform) im 2D-HN-Modell
6. Widerstandsparameter für die Auenflächen entsprechend den Empfehlungen in Kap. 6.5 zuweisen
7. 2D-HN-Berechnung der Wasserspiegellagen mit/ohne Auenwaldanpflanzung für den Bemessungsabfluss. Darauf aufbauend: Darstellung der lokalen Wasserstandsänderungen infolge potentieller Auenflächen im unmittelbaren und mittelbaren Umfeld der Flächen bzw. im Bereich gefährdeter Objekte
8. Fallstudium:
 - a. Die Auenflächen führen zu keinem signifikanten Wasserspiegelanstieg, d.h. der Startwert der maximalen Fließgeschwindigkeitsflächen kann von z.B. 0,4 m/s auf 0,45 m/s erhöht werden, damit können weitere potentielle Flächen des Habitatmodells unter Einhaltung der hydraulischen Kriterien mit berücksichtigt werden.
 - b. Es entsteht ein Wasserspiegelanstieg, der zu einer Gefährdung der umliegenden Infrastruktur im Hochwasserfall führt, d.h. die Hochwasserneutralität ist nicht gegeben. Der Startwert der Fließgeschwindigkeitsflächen muss weiter, z.B. von 0,4 m/s auf 0,35 m/s gesenkt werden.

Die unter Punkt (5) genannte Flächenkonturgebung ist aus hydraulischer bzw. ökologischer Sicht wie folgt zu verstehen:

- Größeren, zusammenhängenden Auenflächen sind aus ökologischen Gründen Vorzug zu geben; Einzelpflanzungen sind zu vermeiden.
- Durch die Anpflanzungen dürfen keine Querriegel senkrecht zur Hauptströmungsrichtung entstehen.
- Die Flächenformen sind stromlinienförmig, länglich gestreckt und möglichst parallel zur Hauptströmungsrichtung des Bemessungsabflusses anzulegen.

8.2 Weiterführende Empfehlungen und Hinweise

8.2.1 Allgemeine Hinweise

In der Praxis muss bisher der HN-Modellierer meist nach selbst festgelegten Kriterien geeignete Standorte für eine Weichholzauenanpflanzung auswählen. Folgende Kriterien spielen dabei eine wichtige Rolle:

- Zur Verfügung stehende Flächen, d.h. Flächen die bereits im Besitz des Landes oder einer Umweltorganisation sind.
Diese Flächen müssen nicht neu erworben oder aus ihrer landwirtschaftlichen Nutzung herausgenommen werden. Der Vorteil liegt vor allem bei der Umsetzung/Pflanzung in ihrer Zeit- und Kostenersparnis.
- Städte-/landschaftsplanerische Gesichtspunkte:
Auen erfüllen neben den ökologischen auch städteplanerische bzw. ästhetische Aufgaben, vor allem bei einer Auenetablierung innerhalb von Ortslagen. Die Anpflanzung haben zum einen den Eindruck eines naturähnlichen Umfelds zu vermitteln und zum anderen als Sichtfenster auf das Gewässer zu dienen.
- Optische und strömungstechnische Gesichtspunkte:
Die Flächen werden nach dem eigenen optischen Empfinden des Modellierers auf den Vorländern verteilt, sofern dem Modellierer keine weiteren Entscheidungskriterien an die Hand gegeben werden. Stehen dem Modellierer keine zusätzlichen Entscheidungskriterien zur Verfügung, hängt die Auswahl und Formgebung der Flächen somit stark von dem Erfahrungsschatz des Modellierers ab. Dieser Punkt ist nicht zu vernachlässigen.

Die Höhe des Aufstaus des Wasserspiegels nach oberstrom infolge der Vegetation ist, wie bereits in Kapitel 6 erwähnt, von vielen Faktoren abhängig. Dabei sind jedoch vor allem die herrschenden Fließgeschwindigkeiten des Ist-Zustandes⁹ auf den Vorländern von Bedeutung. Werden für die Neuetablierung von Auenwaldflächen mit hohen Fließgeschwindigkeiten ausgewählt, ist der resultierende Wasserspiegelanstieg deutlich höher als in Bereichen mit geringerer Strömungsbelastung respektive Fließgeschwindigkeit.

⁹ Der Ist-Zustand bezeichnet den aktuellen Zustand der Vorländer inklusive der bereits vorhandenen Vegetation, jedoch ohne die neu zu planenden Weichholzauenstandorte. Der Ist-Zustand stellt den Referenzzustand dar, auf den die unterschiedlichen Weichholzauenetablierungs-Varianten bezogen werden.



Abb. 102: Einfluss der Fließgeschwindigkeit bei der Durchströmung von Auenbewuchs (Fotos: links: Lötsch, rechts: Bernhart).

Werden im Gegenzug Weichholzaunen innerhalb von Bereichen mit geringer Fließgeschwindigkeit angelegt, kann es sein, dass selbst große Auenbestände keinen signifikanten Aufstau bewirken.

Der Einfluss der Fließgeschwindigkeit durchströmter Vegetation ist in Abb. 102 dargestellt. Im linken Bild ist die Anströmgeschwindigkeit niedrig und die Vegetation wirkt sich kaum abflusshindernd aus, weshalb kein relevanter Aufstau nach oberstrom vorhanden ist. Das rechte Bild zeigt durch- bzw. umströmten Bewuchs bei deutlich höheren Fließgeschwindigkeiten. Insbesondere im Nahbereich der Vegetation ist der Aufstau nach oberstrom gut zu erkennen.

Höhere Fließgeschwindigkeiten bewirken höhere Fließwiderstände und damit einhergehend auch stärkere Wasserspiegelanhebungen. Dabei ist zu beachten, dass die Fließgeschwindigkeit in der Formel zur Berechnung des Strömungswiderstandes mit der zweiten Potenz eingeht. Damit steigt der Strömungswiderstand mit steigender Fließgeschwindigkeit nicht linear sondern potenziell an.

Der durch Bewuchs hervorgerufene Wasserspiegelanstieg in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit ist in Abb. 103 dargestellt. Die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten bei konstantem Durchfluss werden durch veränderte Sohlprofilgefälle im Laborgerinne eingestellt. Die Bezeichnung v_{ref} bezieht sich auf die gemessenen Fließgeschwindigkeiten im leer-Zustand. Die Graphik zeigt, dass der relative Wasserspiegelanstieg durch Bewuchs bei höheren Fließgeschwindigkeiten, im Vergleich zu geringeren Fließgeschwindigkeiten, deutlich höher ausfällt. Der Wasserspiegelanstieg der Untersuchungsreihe $v_{ref} = 0,41$ m/s, beträgt 11,0 cm bei Hecken und 7,1 cm bei belaubten Weiden. Im Vergleich hierzu liegt der Aufstau für die Untersuchungsreihe mit einer Fließgeschwindigkeit von $v_{ref} = 0,33$ m/s im leer-Zustand, für die Hecken bei 6,6 cm und der belaubter Weiden bei 4,3 cm.

Die Aufgabe des HN-Modellierers besteht nun darin, zuerst die Bereiche mit langsameren Fließgeschwindigkeiten zu bestimmen. Denn das Ziel sollte sein, einen möglichst hohen Anteil der Vorländer als Auenflächen unter Beachtung der Hochwasserneutralität auszuweisen. Dies setzt neben der Identifizierung der Bereiche mit geringen Fließgeschwindigkeiten auch eine hydraulisch sinnvolle, stromlinienförmige Formgebung der Neuanpflanzungsflächen voraus.

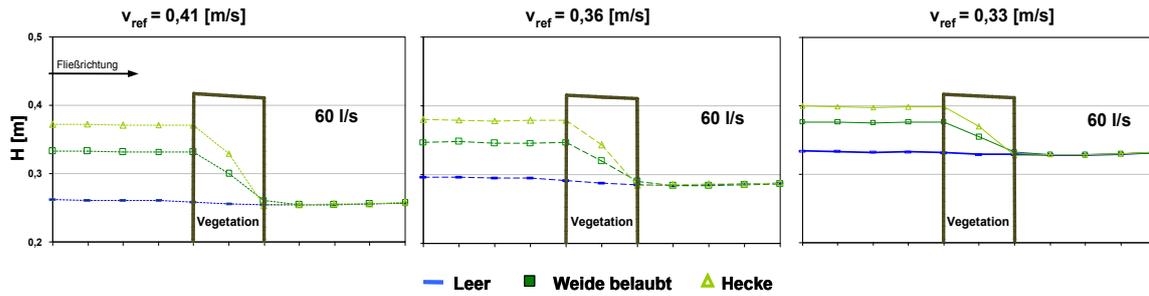


Abb. 103: Wasserspiegelanstieg durch Weiden- und Heckbewuchs bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten.

8.2.2 Beispiel: Bälów-Rühstädter-Bogen

8.2.2.1 Verwendetes HN-Modell und Kalibrierungsdaten:

Die Identifikation der geeigneten Anpflanzungsflächen erfordert, wie bereits erwähnt, eine mehrstufige HN-Simulationsrechnung. Im Folgenden wird für die Elbeflusskilometer 439 bis 452, den Bereich Bälów-Rühstädter-Bogen, der Einfluss unterschiedlicher Anpflanzungsflächen auf den Wasserspiegel dargestellt. Das verwendete 2D-HN-Modell basiert aus der Software FLUMEN.

Das Programm FLUMEN löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen mittels einer Finiten-Volumen-Methode (FVM) basierend auf einem unstrukturierten Dreiecksgitter. In Tabelle 17 sind die gewählten k_{st} -Werte sowie die maximalen Zellgrößen der Verdichtungspolygone, welche für die Erstellung des Berechnungsnetzes verwendet wurden, aufgeführt. Die Modellkalibrierung erfolgte durch den Vergleich der berechneten mit den an der Elbe erhobenen Wasserspiegellagen.

Da auf Seiten der Behörden zur Zeit eine zum Teil eher zurückhaltende Haltung gegenüber der Neuetablierung von Weichholzaunenflächen besteht, werden die zu etablierenden Auenwaldflächen in den hier dargestellten Simulationsrechnungen als sehr dicht angenommen. Vor diesem Hintergrund und mit dem Bestreben evtl. fehlende Unterhaltungsmaßnahmen, Totholz und Verklausung mit zu berücksichtigen, ergibt sich ein sehr konservativer k_{st} -Ansatz von $4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Tabelle 17: Gewählte k_{st} -Verteilung und max. Zellgrößen

k _{st} -Verteilung [m ^{1/3} /s]						max. Zellgröße [m ²]			Anzahl
global	Polygone					Polygone			
Vorland	Fluss-schlauch	Sied-lungen	Baum-reihen	Seiten-/Altarme	Potentielle Anpflanzungen	Umhüll-ende	Fluss-schlauch	Potentielle Auen	Zellen
20	34	10	12	25	4	1000	100	100	116320

8.2.2.2 Fließgeschwindigkeiten des Ist-Zustandes

Abb. 104 stellt die Verteilung der Fließgeschwindigkeit des Ist-Zustandes für den HQ₁₀₀ dar. Die beige-roten Bereiche kennzeichnen Flächen mit Fließgeschwindigkeiten < 0,2 m/s, der hellorange Bereich von 0,2 bis 0,3 m/s, der orange Bereich von 0,3 bis 0,4 m/s und der dunkelorange Bereich von 0,4 bis 0,5 m/s. Fließgeschwindigkeiten von > 0,5 m/s sind in rot dargestellt. In Abb. 105 sind die aus biologischer Sicht geeigneten Weichholzauenstandorte für das Untersuchungsgebiet aufgezeigt. Diese potentiellen Auflächen wurden mit dem Habitat-Prognose-Modell ermittelt.

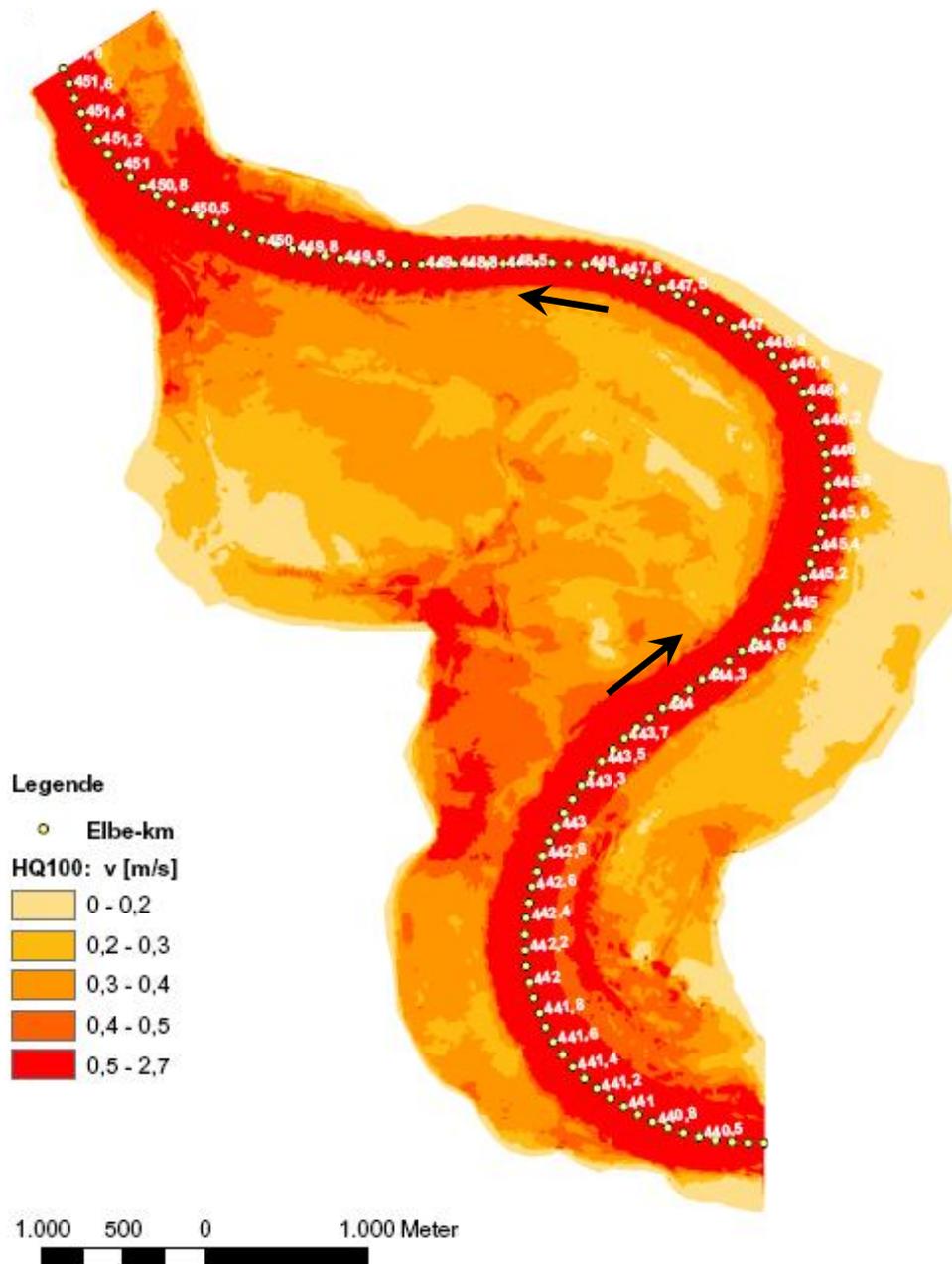


Abb. 104: Fließgeschwindigkeiten für ein HQ₁₀₀ im Bereich Bälów-Rühstädter-Bogen ohne Neuanpflanzung (Ist-Zustand).

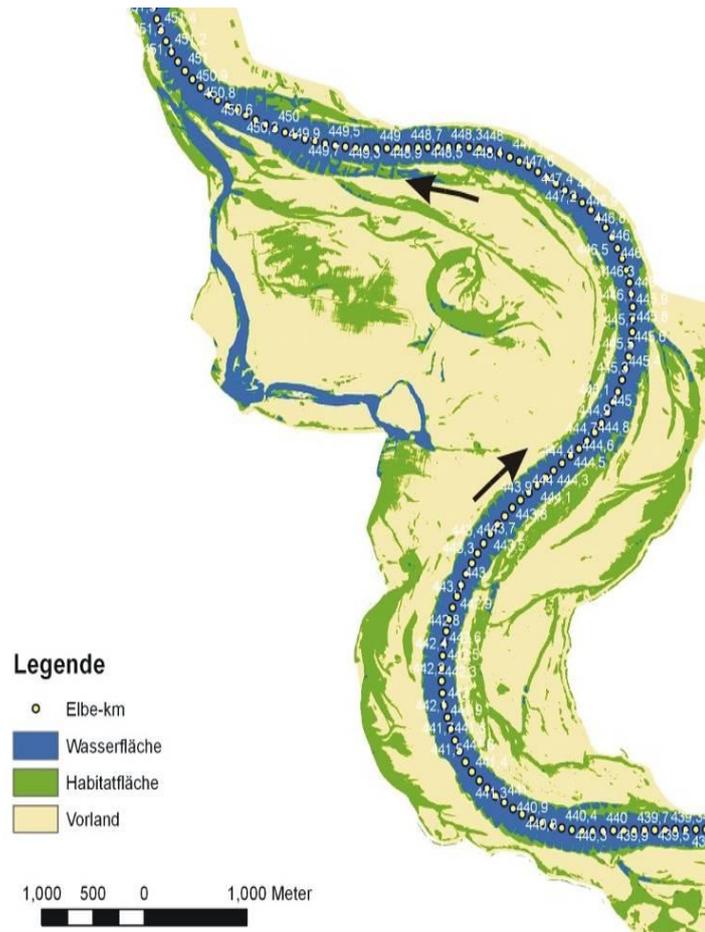


Abb. 105: Ergebnisse der Habitat-Prognose-Modellierung, die grünen Flächen stellen die potentiellen Auenhabitatflächen dar.

Die Auswirkung einzelner Auenflächen wird mit Blick auf die Veränderung des Wasserspiegels im Folgenden aufgezeigt. Dabei werden drei Anpflanzungsflächen hinsichtlich der sich einstellenden Wasserspiegellagenänderung für das HQ₁₀₀ diskutiert.

8.2.2.3 Auenwaldetablierungsfläche ≈ 49 ha

Innerhalb des Untersuchungsgebietes ist ein Teil der Flächen im Besitz des Naturschutzfonds Brandenburg. Dieser hat die Bereitschaft signalisiert, die bisher noch extensiv genutzten Weidenflächen in einen Auenwald zu überführen. Ein weiterer Teil der Flächen wird auf Basis der Fließgeschwindigkeiten des Ist-Zustands für ein HQ₁₀₀ ermittelt. Aus Untersuchungsgründen wurde darauf geachtet, dass die Flächen unterschiedliche Fließgeschwindigkeitsbandbreiten abdecken. Dies lässt eine Bewertung des lokalen Einflusses der Fließgeschwindigkeit zu.

Die untersuchten Auenwaldflächen betragen insgesamt ca. 49 ha. Eine Auswahl der aus hydraulischer und biologischer Sicht potentiell geeigneten Flächen sind als grün gepunktete Anpflanzungsflächen mit entsprechender Größenangabe in Abb. 106 dargestellt. Die Flächen des Naturschutzfonds sind rot eingerahmt.

Das hier dargestellte Beispiel *Bälw-Rühstädter-Bogen* beschäftigt sich unter anderem auch mit einem in der Praxis oft auftretenden Dilemma. Eine Organisation, in diesem Fall der Naturschutzfond Brandenburg, stellt Flächen zur Verfügung. Der Eigentümer würde

ein Teil der Flächen auf eigene Kosten in einen Auenwald überführen. Jedoch liegen diese Flächen innerhalb eines Bereiches mit relativ hohen Fließgeschwindigkeiten. Daher ist die Wahl und Flächenkontur im Bereich des Naturschutzfonds sicherlich nicht als eine hydraulische Idealkontur zu bezeichnen. Vielmehr war der Wunsch, einen möglichst großen Anteil der Flächen, die im Besitz des Naturschutzfonds sind, in eine Auenwaldnutzung zu überführen.

In Abb. 107 sind die Fließgeschwindigkeiten des Ist-Zustandes (=HQ_{100,ref}) mit den ausgewählten Auenflächen abgebildet. Die Fließgeschwindigkeiten des Ist-Zustandes der 11,2 ha großen Fläche auf der brandenburgischen Seite sind im Mittel kleiner 0,3 m/s. Die 4,2 ha große Fläche im Besitz des Naturschutzfonds liegt in einem Bereich bei dem die Fließgeschwindigkeiten > 0,4 m/s sind. Die Flächen auf der sachsen-anhaltinischen Seite liegen hauptsächlich in Bereichen mit Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,2 bis 0,4 m/s.

Die mittels 2D-HN-Berechnung ermittelte Wasserspiegellage ergibt für die hier dargestellte Variante einen lokal begrenzten Wasserspiegelanstieg von maximal 5 cm bei einem 100-jährlichen Abflussereignis (siehe Abb. 108). Für die im Untersuchungsgebiet liegenden Bauwerke (wie z.B. Bauernhöfe) bzw. Deiche im oberstromigen Nahbereich der Maßnahmen ergibt sich ein geringfügiger Anstieg von rechnerisch 3 cm.

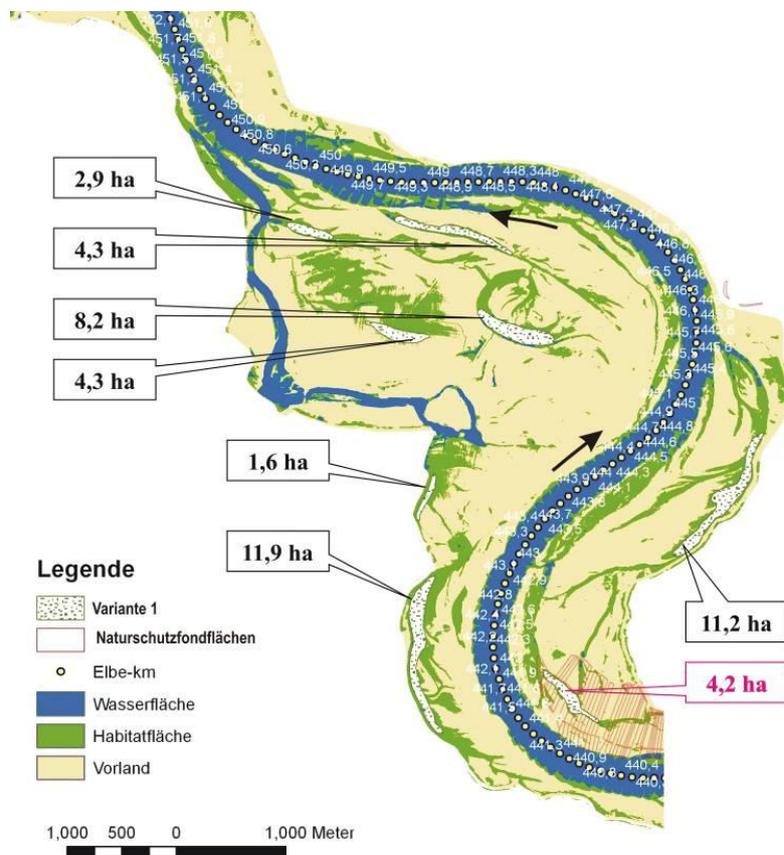


Abb. 106: Mögliche Weichholzaueflächen (= grün gepunktet; Variante 1) überlagert mit den aus biologischer Sicht potentiell möglichen Habitatflächen.

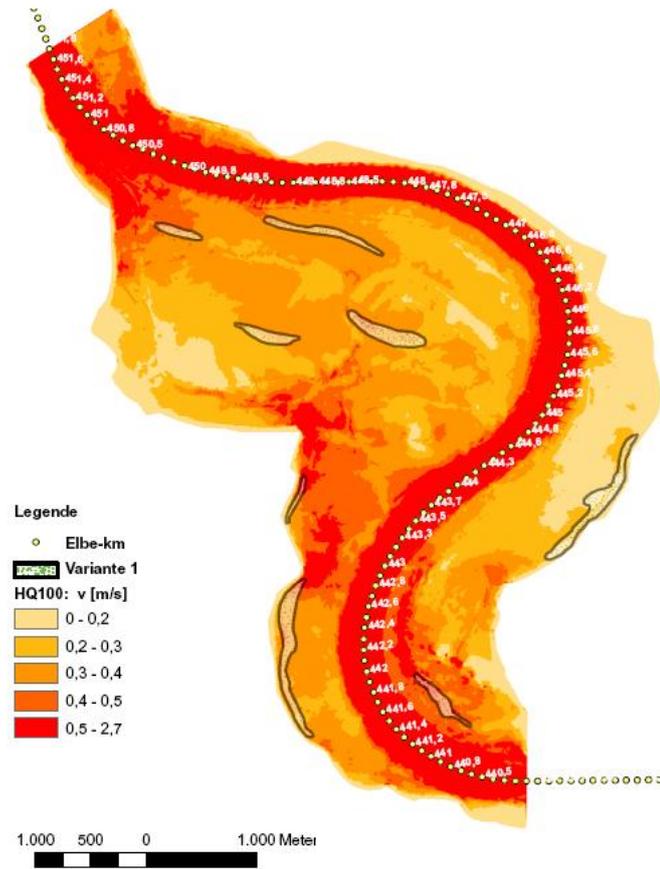


Abb. 107: Fließgeschwindigkeitsdarstellung HQ_{100,ref} überlagert mit möglichen Auenflächen der Variante 1.

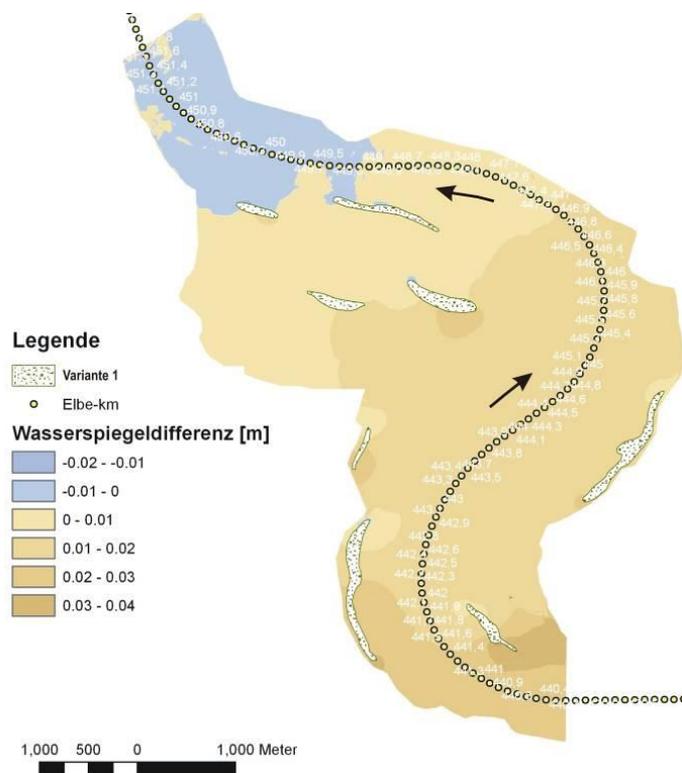


Abb. 108: Wasserspiegellagenänderung des HQ_{100,Var.1} relativ zum HQ_{100,ref}.

Insgesamt fällt der Wasserspiegelanstieg trotz einer Auenfläche von fast 50 ha gering aus. Anhand von drei ausgewählten Flächenbeispielen soll die Interaktion zwischen der herrschenden Fließgeschwindigkeit im Ist-Zustand und des infolge von Weichholzaunen produzierten Aufstaus diskutiert werden:

Fall 1: Fließgeschwindigkeit des Ist-Zustandes < 0,3 m/s

Der rote Rahmen in Abb. 109 (links) markiert die Lage der 11,2 ha großen Weichholzaunenetablierungsfläche im Vergleich zum gesamten Untersuchungsgebiet. Das mittlere Bild zeigt den Bereich der Fließgeschwindigkeiten des Ist-Zustandes für ein HQ₁₀₀. Die Auenwaldfläche liegt in einem Bereich mit Fließgeschwindigkeiten kleiner 0,3 m/s. Das rechte Bild veranschaulicht den lokalen Wasserspiegelanstieg bzw. -absenkung. Je dunkler die Farben werden, desto höher ist der Wasserspiegelanstieg. Die 11,2 ha große Auenwaldfläche bewirkt am unterstromigen Ende der Vegetationseinheit eine relative Wasserspiegelabsenkung von 1 cm und einen relativen Wasserspiegelanstieg von 1 cm am oberstromigen Ende der Vegetationseinheit.

Wie oben bereits erwähnt, werden die Weich- und Hartholzaunen mit einem sehr rauen k_{st} -Wert von $4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ im 2D-HN-Modell berücksichtigt. Die Darstellung in Abb. 109 zeigt, dass selbst eine sehr dichte Auenwaldflächeneinheit nicht zwingend zu einem signifikanten Wasserspiegelanstieg führen muss.

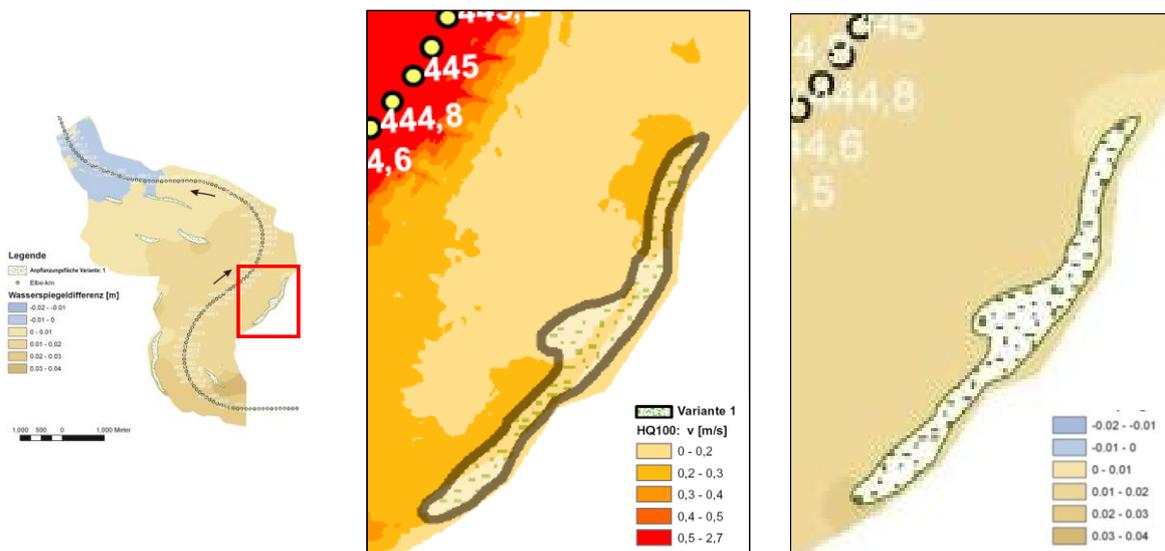


Abb. 109: Fließgeschwindigkeiten des HQ_{100,ref} und Wasserspiegeldifferenz jeweils überlagert mit der Lage der Auenfläche von 11,2 ha.

Fall 2: Fließgeschwindigkeit des Ist-Zustandes zwischen 0,2 und 0,4 m/s

Die 8,2 ha große Auenwaldfläche befindet sich hauptsächlich in einem Bereich mit Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 0,4 m/s. Lokal treten im unterstromigen Vegetationsbereich Fließgeschwindigkeiten von über 0,4 m/s auf. Das rechte Bild in Abb. 110 verdeutlicht den relativen Wasserspiegelanstieg. Die 8,2 ha große Auenwaldfläche bewirkt am unterstromigen Ende der Vegetationseinheit eine relative Wasserspiegelabsenkung von 1 cm und einen relativen Wasserspiegelanstieg von 2 cm am oberstromigen Ende der Vegetationseinheit.

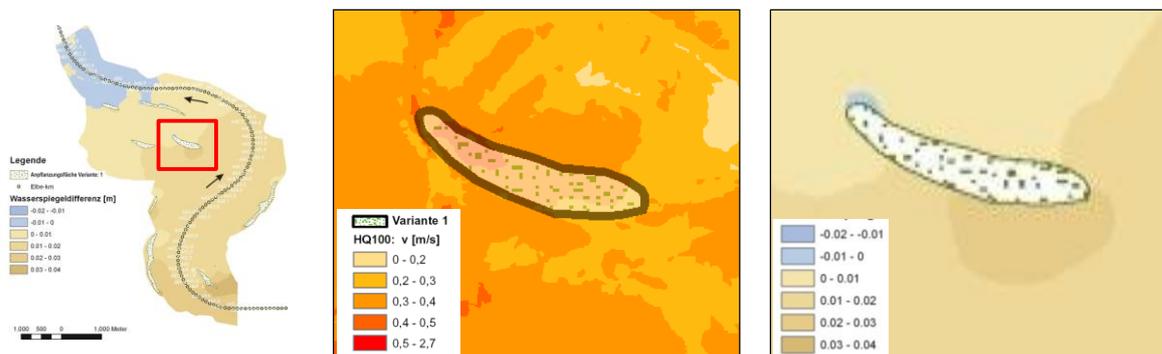


Abb. 110: Fließgeschwindigkeiten des $HQ_{100,ref}$ und Wasserspiegeldifferenz jeweils überlagert mit der Lage der Auenfläche von 8,2 ha.

Fall 3: Fließgeschwindigkeit des Ist-Zustandes > 0,4 m/s

Die 4,2 ha große Auenwaldfläche bewirkt ebenfalls am unterstromigen Ende der Vegetationseinheit eine lokale, relative Wasserspiegelabsenkung von 1 cm und einen relativen Wasserspiegelanstieg von lokal, insgesamt 4 cm am oberstromigen Ende der Vegetationseinheit (vgl. Abb. 111).

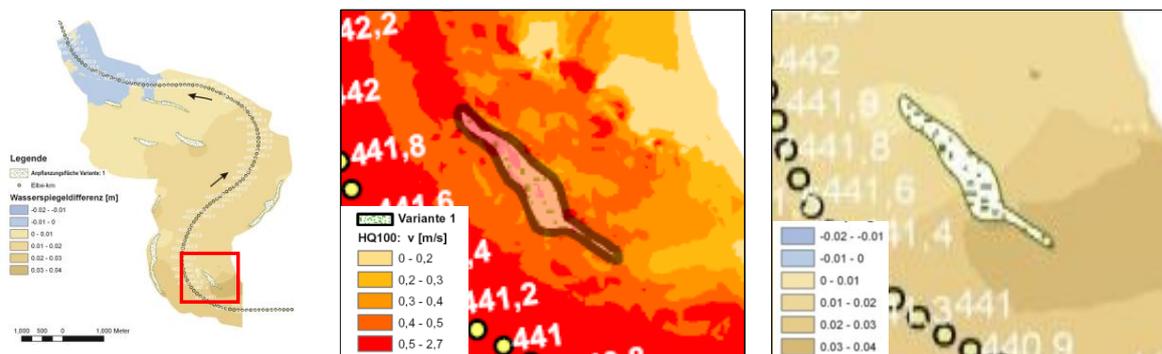


Abb. 111: Fließgeschwindigkeiten des $HQ_{100,ref}$ und Wasserspiegeldifferenz jeweils überlagert mit der Lage der Auenfläche von 4,2 ha.

Die drei dargestellten Beispiele veranschaulichen, dass nicht die Flächengröße der Auenwaldfläche für den Wasserspiegelanstieg sondern vor allem die vorherrschende mittlere Fließgeschwindigkeit des Ist-Zustandes verantwortlich ist. Der limitierende Faktor für die Flächengrößen geeigneter Auenwaldetablierungsstandorte bildet somit die Fließgeschwindigkeit des Ist-Zustandes, denn bei der in Fall 3 dargestellten Situation führt eine um fast zwei Drittel kleinere Fläche im Vergleich zu Fall 1 zu einem um ein Zentimeter höheren relativen Wasserspiegelanstieg.

8.2.3 Monitoring aus hydraulischer Sicht

Eine erfolgreiche Neuanpflanzung von Weichholzaunen, die auch noch nach Jahren die Hochwassersicherheit der hinter dem Deich liegenden Flächen nicht gefährdet, setzt ein durchdachtes, kosteneffizientes Monitoringkonzept voraus.

Die Implementierung von Weichholzaunen kann mit einer morphodynamischen Veränderung des Hauptgerinnes sowie der Vorländer einhergehen. Lokale Sedimentationsprozesse, vor allem innerhalb und unterstrom der Vegetationsbestände sowie Erosionsprozesse an den seitlichen Rändern der Vegetationsbestände, sind die Folge.

Auswertungen von SCHNEIDER et al. (2003 & 2006) haben gezeigt, dass das Ausbreiten der Vegetationsbestände gezielt verhindert werden kann, sofern bereits im Vorfeld ein Bestands- und Unterhaltungskonzept erarbeitet wurde.

Folgende Empfehlungen werden für ein aussagekräftiges, entscheidungsunterstützendes Monitoring abgeleitet:

- Querprofilvermessungspunkte fixieren: ansonsten ist kein Vergleich der Querprofile möglich
- Lage signifikanter Querprofile:
 - Ober- und unterhalb von Zuflüssen (Sedimentationsgefahr unterstrom bzw. oberstrom sowie innerhalb der Vegetationsbestände),
 - an Aufweitungsstrecken (Sedimentationsgefahr innerhalb der Vegetationsbestände),
 - an Engstellen (Erosionsgefahr an den Rändern der Vegetationsbestände),
 - an/auf Inseln (Sedimentationsgefahr innerhalb der Vegetationsbestände sowie Erosionsgefahr im Hauptfluss)
 - an Flusskrümmungen (Erosionsgefahr des Prallhangs).
- Vegetationsaufnahme, Fotodokumentation:

Fotos dokumentieren anschaulich die Vegetationsentwicklung über die Jahre. Dies setzt jedoch voraus, dass die Bilder immer an der gleichen Stelle aufgenommen werden. Zusätzlich sind die Bestandsbreite, die Entfernungen vom Ufer sowie die Vegetationsparameter zu bestimmen.
- Maximale Vegetationsbestandsentwicklung mit exakter Lagebeschreibung erarbeiten (vgl. Abb. 112):

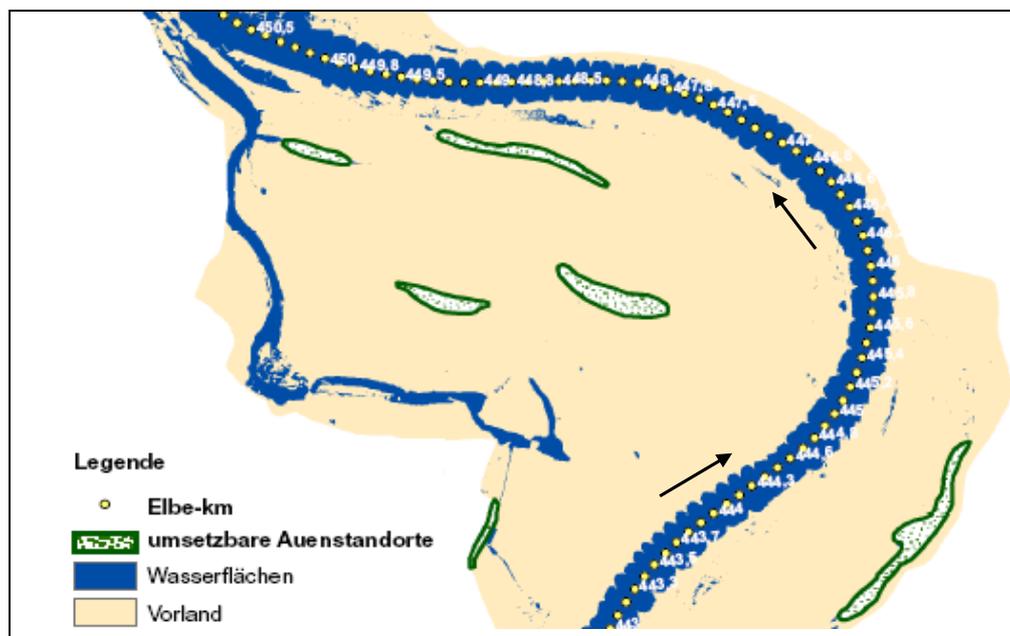


Abb. 112: Darstellung der umsetzbaren Auenstandorte aus biologischer und hydraulischer Sicht. Die exakte Lage der Flächen ergibt sich aus der georeferenzierten Darstellung im GIS.

Die erhobenen Daten werden in eine Datenbank, die direkt mit dem HN-Modell gekoppelt ist, eingegeben. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Überprüfung der aktuellen Abflussleistung des Gewässerabschnittes. Des Weiteren zwingt die Datenbankstruktur zu einer einheitlichen, systematisierten Datenaufnahme. Gleichzeitig werden Datenlücken und Fehlmessungen sofort sichtbar. Die Datensicherung sollte in digitaler und in ausgedruckter Form erfolgen, um Datenverlusten aufgrund von Softwareweiterentwicklung vorzubeugen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Auen nehmen lediglich 6 - 8 % der Landesfläche in Deutschland ein. Für fast zwei Drittel aller in Deutschland vorkommenden Faunaarten dient die Aue auch als Lebensraum. Heute zählen Auen jedoch zu den am stärksten bedrohten Lebensräumen in Europa. Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) und das Netz Natura 2000 schreiben den Auen daher besondere Entwicklungsbedürftigkeit zu. Demgegenüber steht die zum Teil immer noch vorherrschende Zurückhaltung seitens der genehmigenden Behörden bei der Implementierung bzw. Neuanpflanzung von Auen entlang der deutschen Fließgewässer. Diese Zurückhaltung wird oft fälschlicherweise damit begründet, dass Auenpflanzungen generell zu einer Gefährdung der Hochwassersicherheit führen.

Die vorliegende Arbeit richtet sich sowohl an Wasserbauingenieure als auch an Ökologen mit dem Ziel, ein interdisziplinäres Verständnis für die komplexen Interaktionsprozesse zwischen Strömung und holzigen Bewuchsbeständen zu schaffen.

Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt in der adäquaten Beschreibung des vegetativen Widerstandsbeiwertes von sukzessionsgeprägten Auen. Hierzu wurden Datenerhebungen im Gelände, sowie physikalische Laboruntersuchungen durchgeführt. Die an über 400 Stellen entlang der Elbe erhobenen Vegetationsparameter erweitern den bisher eher dürftigen Datenbestand der Literatur. Des Weiteren zeigt die Auswertung der im Gelände erhobenen Vegetationsparameter eine Zweiteilung der holzigen Auenpflanzen in die Klassen „strauchartiger“ und „baumartiger“ Bewuchs. Werden die Vegetationsparameter mittlerer Ast-/Stammabstand zu mittlerer Ast-/Stammdurchmesser gegeneinander aufgetragen, wird der unterschiedliche, jedoch jeweils typische Verlauf der Parameter bei zunehmendem Alter des Bestandes sichtbar.

Die durchgeführten physikalischen Laboruntersuchungen haben zum Ziel, den Einfluss unterschiedlicher Pflanzenarten, Anordnungen und Besatzdichten für durch- und überströmte Auenbestände zu quantifizieren. Hierzu wird das Verhalten von unbelaubten und belaubten Weiden sowie Hecken in einer großen Laborrinne (60,0 m x 2,5 m x 0,8 m) sowie in einer kleineren, neigbaren Rinne (20,0 m x 0,6 m x 0,7 m) untersucht.

Die Widerstandsbeiwerte werden sowohl für den dimensionsbehafteten k_{st} -Beiwert, als auch für den dimensionsreinen λ_{veg} -Beiwert bestimmt. Auentypische Habitate sind oft durch Pflanzenmischbestände gekennzeichnet. Aus diesem Grund sind die k_{st} -Werte in einer Entscheidungsmatrix dargestellt; in der Horizontalen ist die Pflanzenart nach ihrer stromlinienförmigen Anpassung und in der Vertikalen nach der jeweiligen Dichte des Bestandes aufgetragen. Dies ermöglicht ein einfaches Abgreifen der entsprechenden k_{st} -Werte. Dabei ist zu beachten, dass die jeweiligen k_{st} -Werte in Abhängigkeit von der Pflanzenart und -dichte, einen nahezu konstanten Verlauf annehmen und damit unabhängig von der Wassertiefe sind, sofern eine reine Durchströmung der Vegetation vorliegt. Sobald der Pflanzenbestand überströmt wird, erhöht sich der k_{st} -Beiwert mit steigender Überströmungshöhe.

Die Rückrechnung der λ_{veg} -Beiwerte nach der, in den Merkblättern von DVWK (1991) und BWK (2000) aufgeführten Formel ergab, dass diese nicht für die Beschreibung von flexib-

len, belaubten Pflanzenbeständen geeignet ist. Ursache ist die fehlende Berücksichtigung der sich ändernden hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit. Die Pflanzen richten sich infolge des Strömungsangriffs stromlinienförmig aus: Je höher die Fließgeschwindigkeit, desto größer ist die Flächenkontraktion der ursprünglichen, im trockenen Zustand, d.h. ohne Strömung ermittelten, hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Formel zur Berechnung des vegetativen λ -Beiwertes für holzige Bewuchsbestände basiert auf den Erkenntnissen aus den Labor- und Geländedaten. Die Formel ist eine Funktion des Bewuchsparameters (ω_P), des Korrekturfaktors des Bewuchsparameters (c_{fv}), des Gesamtwiderstandsbeiwertes (c_{WR}) und der Wassertiefe (h). Dabei beschreibt der Bewuchsparameter die Dichte eines Vegetationsbestandes. Diese Parameter können für unterschiedliche holzige Auenbestände aus den in dieser Arbeit dargestellten Tabellen entnommen oder direkt im Gelände bestimmt werden. Hierfür wird zum einen der Anteil der hydraulisch wirksamen Vegetationsfläche (n_v) im trockenen Zustand mittels Schwarz-Weiß-Rasterfoto, zum anderen der mittlere Vegetationsabstandsparameter (a_x) bestimmt. Der entsprechende Werte für den Korrekturfaktor des Bewuchsparameters (c_{fv}) sowie des Gesamtwiderstandsbeiwerts (c_{WR}) kann für lichte bis dichte, unbelaubte und belaubte Weiden und Hecken aus den Tabellen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, entnommen werden.

Das Wissen um die adäquate Beschreibung des vegetativen Widerstandsbeiwertes alleine reicht noch nicht aus, den Flächenanteil von Auenwald entlang der Fließgewässer nachhaltig zu erhöhen. Daher wird eine Handlungsmatrix entwickelt, die es dem Planer/HN-Modellierer ermöglicht, aus biologischer und hydraulischer Sicht optimale Standorte für die Neuetablierung von Auenwald zu identifizieren. Die Überprüfung der Belastbarkeit des Verfahrens erfolgte an einem 13 km langen Gewässerabschnitt an der Mittel-Elbe und lieferte zusätzliche praxisrelevante Empfehlungen für die Auswahl der Auenflächen.

Folgende Punkte wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht, konnten aber nicht vollständig geklärt werden. In den folgenden Bereichen besteht damit die Notwendigkeit weiterer Forschung:

- Bestimmung des Gesamtwiderstandsbeiwertes (c_{WR}) für holzige Bewuchsbestände:

Die Untersuchungen im Labor und die Rückrechnung der jeweiligen λ_{veg} -Widerstandsbeiwerte haben gezeigt, dass sich der Gesamtwiderstandsbeiwert (c_{WR}) in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Pflanzenhöhe zu Wassertiefe ändert. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten c_{WR} -Werte schwanken zwischen eins und sieben für durchströmte holzige Bewuchsbestände. Im Vergleich zur wissenschaftlichen Fachliteratur, mit Angaben zwischen 1,0 bis 1,5, ergibt sich damit eine deutlich höhere Spannbreite der Gesamtwiderstandsbeiwerte für flexibel, belaubte Pflanzen. Daraus leitet sich ein dringender Forschungsbedarf in diesem Bereich ab.

- Bestimmung der Fließgeschwindigkeitsprofile innerhalb der Vegetationsbestände:

Die aufgenommenen Geschwindigkeitsprofile zeigen für durchströmte Vegetation einen vom klassischen, logarithmischen Geschwindigkeitsprofil abweichenden Verlauf. Forschungsbedarf besteht damit vor allem in der korrekten Beschreibung der Geschwindigkeitsprofile in 2- bzw. 3-dimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellen (2D- / 3D-HN-Modellen). Die Streubreite der Daten im Bezug auf den Verlauf des mittleren Geschwindigkeitsprofils der durchströmten Vegetation veranschaulicht die Heterogenität des Auen-Abflusssystems und die damit verbundene Schwierigkeit bei der Bestimmung des „wahren“ mittleren Geschwindigkeitsverlaufs über die Tiefe. Aus diesem Grund setzt eine aussagekräftige Ermittlung der Geschwindigkeitsprofile sowohl im Gelände als auch im Labor Vielpunktmessungen voraus. Die Hinterlegung mit hochaufgelösten Messdaten ist ein Punkt, der bisher in der Fachliteratur noch nicht ausreichend diskutiert wird. Des Weiteren wird der Heterogenität des Auensystems und der damit verbundenen Streubreite der Geschwindigkeitswerte bei den bisherigen Berechnungen noch unzureichend Rechnung getragen.

Die morphodynamische Entwicklung des Flusssystemes kann infolge einer Auenwaldetablierung nachhaltig verändert werden. Je nach Art, Zusammensetzung und Größe des Auenwaldbestandes wird die Geschwindigkeitsverteilung des gesamten Flusssystemes sowohl im Hauptgerinne als auch auf den Vorländern verändert. Aufgrund der zum Teil erheblichen Reduktion der Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Vegetationsbestandes entstehen Bereiche mit höheren Fließgeschwindigkeiten und damit einhergehenden höheren Sohlschubspannungen. Die veränderten Fließgeschwindigkeitsverteilungen können lokale Sedimentations- und Erosionsprozesse auslösen. Die Vision bzw. das weitere Forschungspotential besteht nun in der Herausforderung Sträucher und Bäume gezielt als Strömunglenker im Gelände einzusetzen. Ein positiver Nebeneffekt dieses Ansatzes wäre eine gleichzeitige Erhöhung der Strauch- und Heckenbestände mit den damit verbundenen Lebensräumen.

10 Literatur

- Amlin N. A. and S. B. Rood. 2001. Inundation tolerances of riparian willows and cottonwoods. *Journal of the American Water Resources Association*, 37:1709-1720.
- Amlin N. M. and S. B. Rood. 2002. Comparative tolerances of riparian willows and cottonwoods to water-table decline. *Wetlands*, 22:338-346.
- Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich Wasserpolitik. („EU-Wasserrahmenrichtlinie“). Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L327/1 vom 22.11.2000.
- Baumeister, S. (2007): Widerstandsbeiwerte von Weiden bei Hochwasser. Diplomarbeit am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Bernoulli, D. (1738): Hydrodynamik oder Kommentare über die Kräfte und Bewegungen der Flüssigkeiten : Akadem. Arbeit. Strassburg, Dulsecker, 1738 / Daniel Bernoulli. Übers. u. mit Anm. vers. von Karl Flierl; Forschungsinst. d. Dt. Museums f.d. Geschichte d. Naturwissenschaften u.d. Technik, München.
- Bollrich, G. (1989): Technische Hydromechanik Band 2. 2.Aufl., Berlin: VEB Verlag für Bauwesen
- Bollrich, G. (2000): Technische Hydromechanik Band 1. 5.Aufl., Berlin: Verlag Bauwesen
- Brahms, A (1767): Anfangs-Gründe der Deich- und Wasserbaukunst, Teil 1 und 2, Unveränderter Nachdruck der Ausgabe Aurich, 1767; Verlag Schuster, 1989, Leer.
- Bretschneider, H. & Schulz, A.(1985): Anwendung von Fließformeln bei naturnahem Gewässerausbau. - Schriftenreihe des DWWK, Heft 72, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- BWK (2000): Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern – Teil 2, Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK e.V.), Pfullingen.
- Carollo F., Ferro V. (2002): Flow Velocity Measurements in Vegetated Channels; ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, p 664-673
- Chow, V.T. (1959): Open-channel Hydraulics. In: McGraw-Hill, London.
- Dister E. 1981. Zur Hochwassertoleranz von Auwaldbäumen an lehmigen Standorten. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*, **10**:325-336.
- Colebrook, C.F, White, C.M (1937): Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, Vol. 161, pp. 367-387.
- Dittrich, A. 1998: Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Heft 198, Universität Karlsruhe.

- DORER; H (1984): ÄHNLICHKEIT BEI FLUSSBAULICHEN MODELLEN. MITTEILUNGSBLATT DER BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU NR. 54, KARLSRUHE
- DVG 2007: Auen leben. Schriftenreihe der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz, Band 70, Bonn.
- DVG 2008: Ökologische Bewertung von Fließgewässern. Schriftenreihe der Vereinigung Deutscher Gewässerschutz, Band 64, Bonn.
- DVWK (1991): Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Merkblätter Heft 220, Hamburg.
- DVWK (1999): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, DVWK-Schriften, GFA.
- Einstein, H.A. (1934: Der hydraulische oder Porfil-Radius. Schweizerische Bauzeitung. Band 103, Nr. 8, pp. 89-91.
- Ellenberg (1986): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen, 4. Auflage, Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart.
- Fathi-Maghadam M., Kouwen N. (1997): Nongrid, nonsubmerged, vegetative roughness of floodplains. Journal of Hydraulic Engineering-ASCE 123, pp. 51-57.
- Fischenich, Craig (2000): Resistance due to vegetation. EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-07), U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Fischenich, J.C.; Copeland R.R (2001): Environmental Considerations for Vegetation in Flood Control Channels. Engineer Research and Development Center Vicksburg MS Costal and Hydraulicslab; Vicksburg.
- Freeman et al. (2000): Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation. Technical Report ERDC/CHL TR-00-25, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS
- Gröngröft, A., Schwartz, R., Mielich, G. (1997): Verbreitung und Eigenschaften der Auenböden in dem geplanten Rückdeichungsgebiet Lenzen - erste Ergebnisse. - Auenreport 3, S. 58-65
- Habersack (2009): Zusammenstellung von k_{st} -Rauheitsbeiwerten, BOKU Wien. http://iwhw.boku.ac.at/LVA816332/Flie%E1widerstand_Einheit_5.pdf
- Hartlieb, A., (2006): Modellversuche zur Rauheit durch- bzw. überströmter Maisfelder. In Wasserwirtschaft Nr. 3/2006, pp. 38 bis 41.
- Henrichfreise, A. (1996): Uferwälder und Wasserhaushalt der Mittelelbe in Gefahr. Natur und Landschaft 71: 246-248.
- James (2004): Flow resistance of emergent vegetation. J. Hydr. Research Vol. 42, No4, pp. 390-398

- Järvelä J. (2002): Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. *Journal of Hydrology*, Vol. 269, p. 44-54
- Järvelä, J. (2004). Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation. *International Journal of River Basin Management* 2(1): 61-70.
- Keulegan, G. H. (1938): Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 21, Research Paper RP1151, pp. 707-741.
- Kobus, H., ABRAHAM, G.(1978): Wasserbauliches Versuchswesen. DVWW Mitteilungsheft Nr. 4, Essen.
- Könemann (1981): Der wechselseitige Einfluss von Vorland und Flussbett auf das Widerstandsverhalten offener Gerinne mit gegliederten Querschnitten, Technischer Bericht Nr. 25 des Instituts für Hydromechanik und Hydrologie, TU Damstadt
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2002): Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 1: Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. Karlsruhe (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Heft 74).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2007): Biotope in Baden-Württemberg 13 „Naturnahe Uferbereiche und Flachwasserzonen des Bodensees“. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- Lehmann, B., Schneider, S., Nestmann, F. (2004): Naturnahe Gewässer – Grundlagen, Planungen, Maßnahmen. Kursbegleitendes Skript. Karlsruhe.
- Lehmann, B. (2005) Empfehlungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Raum – unter Berücksichtigung der Hochwassersicherheit -. Heft 230. Mitteilung des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruhe
- Lehmann B., Schneider S., Bernhart H. H. (2005): Hydraulics of Nature-orientated Rivers – Recommendations for a Nature-orientated River Restoration in Urban Areas under Consideration of the Flood Water Risk Management, Urban River Rehabilitation, Proceedings, International Conference on Urban River Rehabilitation URRC 05, S. 210-214, Dresden.
- Lewandowski, J. A. (1993): Vegetation Resistance and Circulation Modeling in a Tidal Wetland. Dissertation, University of California, Berkeley (unveröffentlicht).
- Lindner, K. (1982): Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen. Mitteilung des Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Heft 75, Braunschweig.
- Leyer, I. (2002) Auengrünland der Mittelelbe-Niederung: Vegetationskundliche und -ökologische Untersuchungen in der rezenten Aue, der Altaue und am Auenrand der Elbe, *Dissertationes Botanicae*, Band 363
- Lüttge, U., Kluge, M., Bauer, G. (1999): Botanik, 3. Auflage, Wiley-VCH Weinheim.
- Morris H.M. (1955): Flow in rough conduits. *ASCE Transactions*, Vol. 120, Paper No. 2745, pp. 373-410.

- Mosner, E., Schneider, S., Lehmann, B. & Leyer, I. (2009): Restoration of riparian soft-wood forests - the role of interactions in determining the optimum habitat. *River Research and Applications*, John Wiley & Sons (submitted)
- Naudascher (1992): *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*, 2. Auflage. Springer-Verlag, Wien.
- Nepf H.M., Vivioni E. (2000): Flow structure in depth-limited vegetated flow. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105 (C12), p. 28547-28557.
- Oplatka, M. (1998): Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern. Zürich. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Heft 156, Zürich.
- Pasche (1984) Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeit ihrer mathematische Erfassung. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft RWTH, Heft 24, Universität Aachen.
- Patt H., Jürging, P., Krauss, W. (2004): *Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern*. Berlin.
- Petryk, Bosmajian (1975) Analysis of flow through vegetation. *J. Hydr. Div. ASCE*, 101(7), p. 871-884
- Petts G. E. 1989. *Historical change of large alluvial rivers*, 1. edition. John Wiley & Sons.
- Rickert, K. et al. (1980): Der Einfluss biologischer Maßnahmen auf den Abflusswiderstand und die Abflussgeometrie offener Gerinne. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlicher Wasserbau, Universität Hannover (unveröffentlicht).
- Riecken, U., Ries, U., Ssymank, A. (1994): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe Landschaftspflege und Naturschutz 41.
- Rouvé (1987): *Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- Scheffer & Schachtschabel 1998: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schlichting, H. (2006) *Grenzschichttheorie*, G. Braun, Karlsruhe.
- Schloten, M., Anlauf, A., Büchele, B., Faulhaber P., Henle, K., Kofalk, S., Leyer, I., Meyerhoff, J., Purps, J., Rast, G., Scholz M. (2005): The River Elbe in Germany - present state, conflicting goals, and perspectives of rehabilitation. *Large Rivers*, 15: 579-602.
- Schnauder, I. (2004): Strömungsstrukturen und Impulsaustausch in gegliederten Gerinnen mit Vorlandvegetation. Heft 224, Mitteilung des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (TH).
- Schneider, K.-J. [Hrsg.] (2001): *Bautabellen für Ingenieure*, 14. Aufl., Werner-Verlag, Düsseldorf.

- Schneider S. (2003): Unterhaltungsstrategien für naturnahe Gewässer innerhalb von Ortslagen unter Berücksichtigung morphologischer Entwicklungen am Beispiel der Naturnessstrecke Enz/Pforzheim. Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe
- Schneider S., Nestmann F., Lehmann B. (2006): Interaction of vegetation, current and sedimentation. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, 6-8 Sept., River Flow, Vol.1, S. 647-653, Lisabon.
- Schneider, S., Läkemäker K., Lehmann B. & Nestmann F. (2007a): Hydraulik naturnaher Fließgewässer II Empfehlungen zur naturnahen Entwicklung ausgebauter Fließgewässer in Ortslagen unter besonderer Berücksichtigung des Hochwasserschutzes. FZKA-BWPLUS, <http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BWR25006SBer.pdf>
- Schneider, S. (2007b): Potentielle Weichholzauenstandorte an der Elbe. Beiträge zum Treffen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Wasserbauinstituten, 9. JuWi-Treffen, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, S.169-174, Kassel. Schröder, W. (1998): Wasserbau und Wasserwirtschaft, Abschn. 3.6: Gerinnehydraulik, Teils 13A in Schneider ,K.-J.: Bautabellen, 14. Aufl., Werner-Verlag, Düsseldorf.
- Scholz, M., Stab, S., Dziock, F., Henle, K. (2005): Lebensräume der Elbe und ihre Auen. In: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 4, Weißensee Verlag ökologie, Berlin.
- Schumacher, F. (1995): Zur Durchflussberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer. Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Heft 127, Universität Berlin.
- Ssymank, A., Hauke, U., Rückriem, C., Schröder, E. (1998): Das europäische Schutzgebietssystem NATURA 2000. BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (92/43/EWG) und der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG). Schriftenreihe Landschaftspflege und Naturschutz 53.
- Stephan, U. (2002): Zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation. Wiener Mitteilungen des Instituts für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Band 180, Technische Universität Wien.
- Tockner K. & J. A. Stanford (2002): Riverine flood plains: present state and future trends. Environmental Conservation, 29:308-330.
- Weisbach, J. (1850): Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik. Friedrich Vieweg und Sohn, 2. Auflage, Braunschweig.
- Wilson C.A.M.E., Stoesser T., Bates P.D., Batemann Pinzen A. (2003): Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. J. Hydraul. Eng. 129 (11), p. 847-853

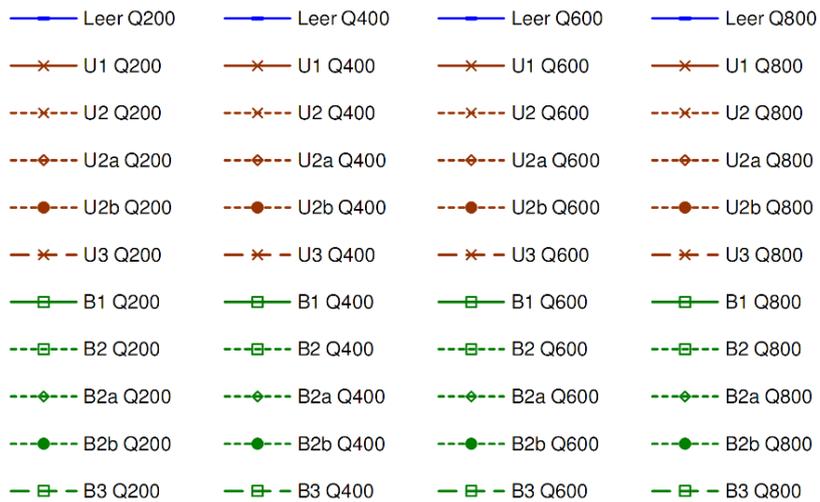
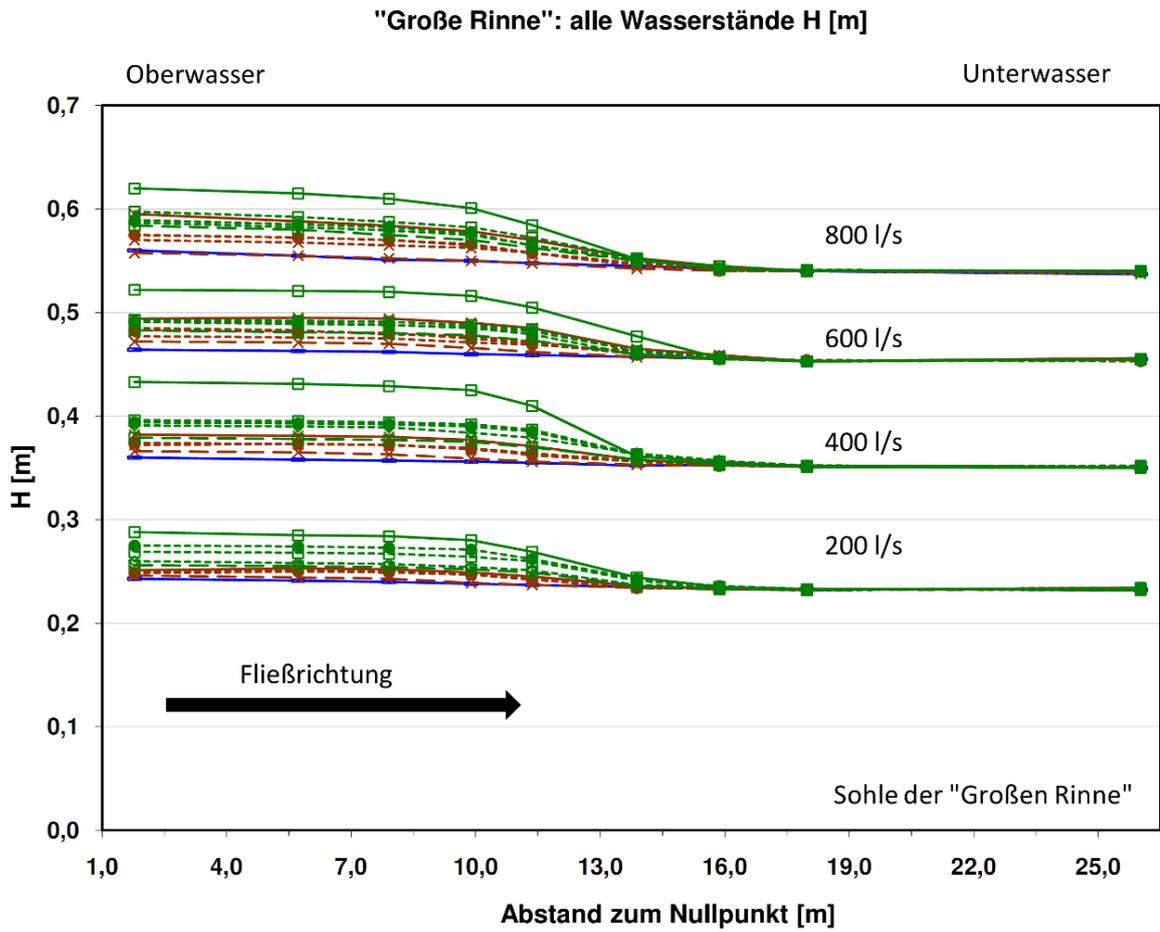
- Wilson C.A.M.E., Yagci O., Rauch H.P, Stoesser T. (2006): Application of the drag force approach to model the flow interaction of natural vegetation. *Journal of River Basin Management* 4 (2), p. 137-146.
- Wunder, S. (2008): Aufbau eines Versuchsstandes zur Bestimmung der Strömungskraftverteilung bei Weiden, Diplomarbeit am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Wunder et al. (2009): Measuring drag force of flexible vegetation directly: Development of an experimental methodology. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, 9. - 14. Aug. 2009, Vancouver, pp. 1483-1489.
- Yagci, O., Kabdasli, M. S. (2008): The impact of single natural vegetative elements on flow characteristics", *Hydrological Processes*, No. 22, p. 4310-4321

Anhang:

Anhang:

A 01: Wasserstände „Große Rinne“ und „Kleine Rinne“

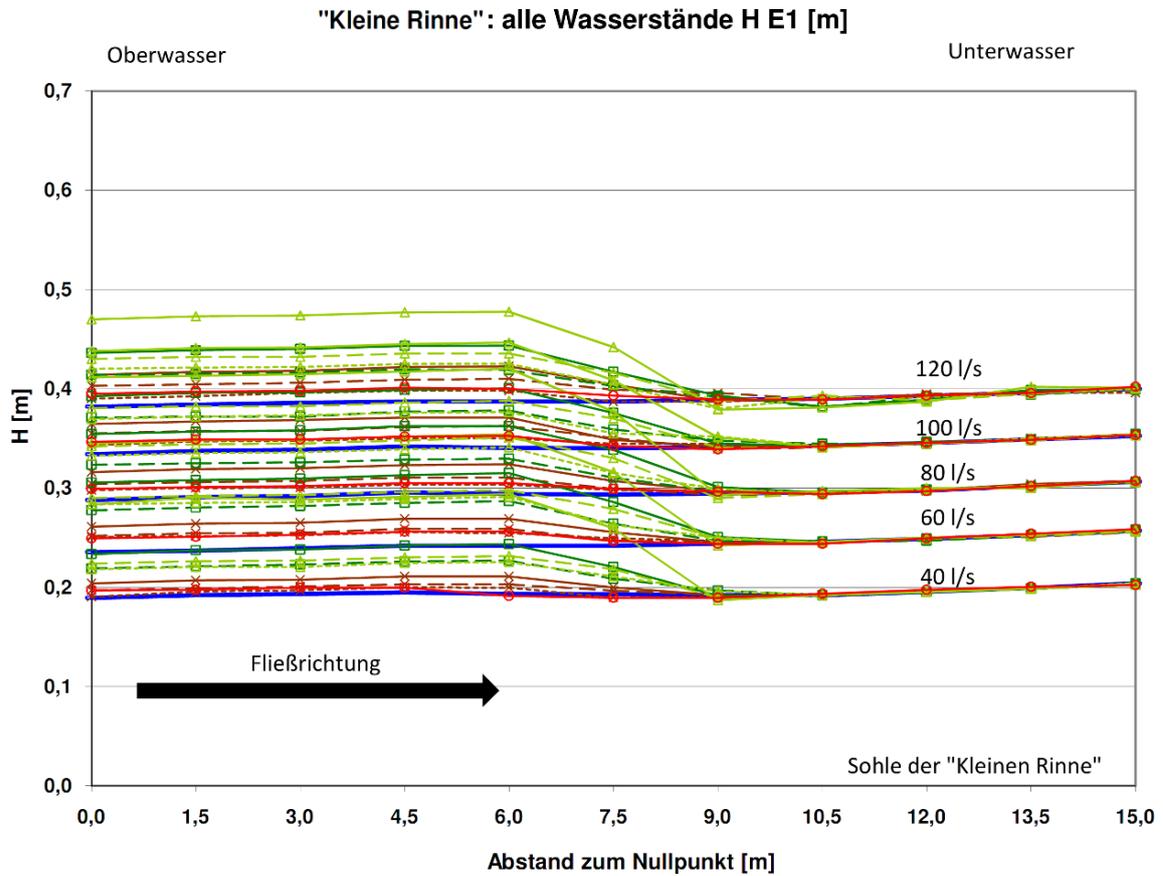
„Große Rinne“



Wasserstand H [m]

Lage der Messpunkte im Längsverlauf		1,78	5,72	7,91	9,89	11,36	13,88	15,87	17,98	26,02
Zustand	Durchfluss Q [l/s]	H [m]								
Leer	Q200	0,243	0,241	0,240	0,238	0,237	0,235	0,234	0,233	0,232
Leer	Q400	0,360	0,358	0,357	0,356	0,355	0,352	0,353	0,351	0,350
Leer	Q600	0,464	0,463	0,462	0,460	0,459	0,457	0,456	0,453	0,455
Leer	Q800	0,560	0,555	0,551	0,550	0,548	0,545	0,543	0,540	0,537
U1	Q200	0,251	0,253	0,252	0,249	0,245	0,236	0,233	0,232	0,234
U1	Q400	0,382	0,381	0,380	0,377	0,371	0,358	0,354	0,352	0,351
U1	Q600	0,494	0,495	0,494	0,490	0,485	0,465	0,459	0,453	0,456
U1	Q800	0,595	0,588	0,584	0,579	0,570	0,553	0,545	0,540	0,540
U2	Q200	0,250	0,252	0,251	0,249	0,245	0,235	0,233	0,232	0,233
U2	Q400	0,372	0,373	0,372	0,369	0,362	0,356	0,353	0,352	0,351
U2	Q600	0,485	0,483	0,479	0,477	0,472	0,460	0,456	0,453	0,455
U2	Q800	0,570	0,568	0,565	0,563	0,558	0,545	0,542	0,540	0,538
U2a	Q200	0,249	0,251	0,250	0,247	0,243	0,234	0,233	0,232	0,234
U2a	Q400	0,374	0,373	0,372	0,369	0,364	0,357	0,354	0,352	0,351
U2a	Q600	0,477	0,476	0,475	0,471	0,469	0,463	0,458	0,453	0,455
U2a	Q800	0,575	0,573	0,570	0,565	0,558	0,548	0,543	0,540	0,539
U2b	Q200	0,248	0,250	0,249	0,247	0,242	0,234	0,234	0,233	0,232
U2b	Q400	0,374	0,373	0,372	0,368	0,363	0,356	0,352	0,351	0,350
U2b	Q600	0,483	0,482	0,480	0,475	0,470	0,460	0,455	0,454	0,453
U2b	Q800	0,575	0,573	0,570	0,566	0,558	0,548	0,541	0,540	0,540
U3	Q200	0,246	0,244	0,243	0,239	0,237	0,234	0,233	0,233	0,232
U3	Q400	0,366	0,365	0,363	0,359	0,356	0,353	0,352	0,352	0,351
U3	Q600	0,472	0,471	0,470	0,466	0,462	0,457	0,455	0,453	0,454
U3	Q800	0,558	0,555	0,553	0,550	0,548	0,543	0,541	0,540	0,540
B1	Q200	0,288	0,285	0,284	0,280	0,269	0,244	0,235	0,233	0,232
B1	Q400	0,433	0,431	0,429	0,425	0,410	0,361	0,356	0,351	0,350
B1	Q600	0,522	0,521	0,520	0,516	0,505	0,477	0,456	0,453	0,455
B1	Q800	0,620	0,615	0,610	0,601	0,585	0,552	0,542	0,541	0,540
B2	Q200	0,269	0,268	0,267	0,264	0,260	0,241	0,235	0,232	0,234
B2	Q400	0,396	0,395	0,394	0,392	0,387	0,363	0,356	0,351	0,352
B2	Q600	0,493	0,492	0,491	0,488	0,484	0,463	0,457	0,453	0,455
B2	Q800	0,598	0,593	0,588	0,583	0,573	0,553	0,543	0,541	0,540
B2a	Q200	0,260	0,258	0,257	0,254	0,251	0,237	0,235	0,232	0,234
B2a	Q400	0,391	0,390	0,389	0,384	0,379	0,364	0,357	0,352	0,351
B2a	Q600	0,491	0,489	0,488	0,485	0,479	0,459	0,455	0,453	0,455
B2a	Q800	0,587	0,583	0,580	0,575	0,565	0,553	0,543	0,540	0,540
B2b	Q200	0,275	0,274	0,273	0,271	0,262	0,243	0,236	0,233	0,232
B2b	Q400	0,394	0,393	0,392	0,390	0,385	0,362	0,354	0,351	0,350
B2b	Q600	0,491	0,490	0,488	0,486	0,482	0,463	0,456	0,453	0,454
B2b	Q800	0,590	0,585	0,583	0,577	0,565	0,550	0,543	0,541	0,540
B3	Q200	0,256	0,255	0,254	0,252	0,249	0,236	0,233	0,232	0,233
B3	Q400	0,379	0,378	0,377	0,375	0,370	0,358	0,353	0,352	0,351
B3	Q600	0,483	0,481	0,480	0,478	0,473	0,460	0,456	0,453	0,455
B3	Q800	0,584	0,580	0,575	0,570	0,563	0,550	0,545	0,540	0,541

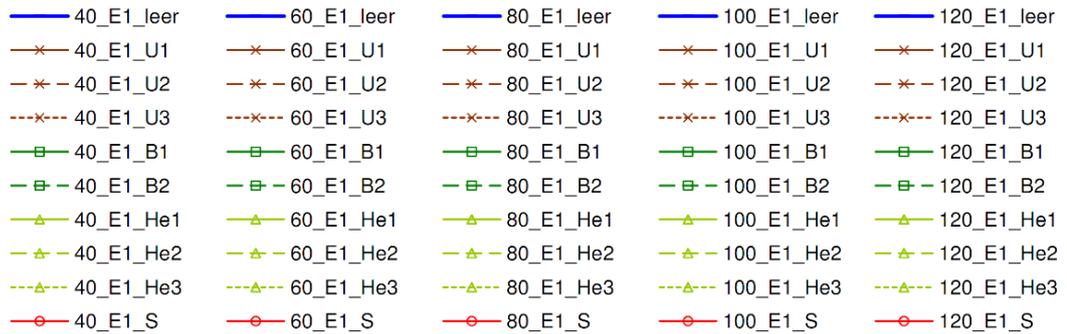
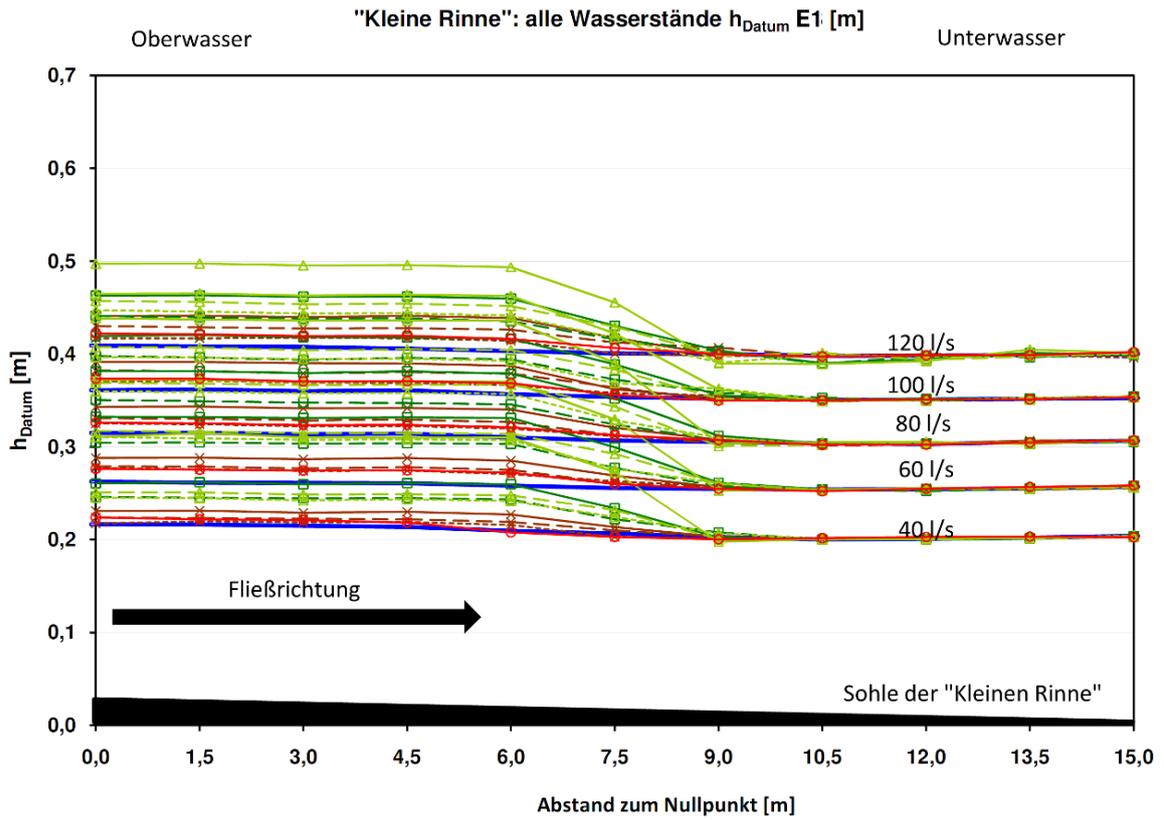
„Kleine Rinne“



- | | | | | |
|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| — 40_E1_leer | — 60_E1_leer | — 80_E1_leer | — 100_E1_leer | — 120_E1_leer |
| -x- 40_E1_U1 | -x- 60_E1_U1 | -x- 80_E1_U1 | -x- 100_E1_U1 | -x- 120_E1_U1 |
| -x- 40_E1_U2 | -x- 60_E1_U2 | -x- 80_E1_U2 | -x- 100_E1_U2 | -x- 120_E1_U2 |
| -x- 40_E1_U3 | -x- 60_E1_U3 | -x- 80_E1_U3 | -x- 100_E1_U3 | -x- 120_E1_U3 |
| -□- 40_E1_B1 | -□- 60_E1_B1 | -□- 80_E1_B1 | -□- 100_E1_B1 | -□- 120_E1_B1 |
| -□- 40_E1_B2 | -□- 60_E1_B2 | -□- 80_E1_B2 | -□- 100_E1_B2 | -□- 120_E1_B2 |
| -△- 40_E1_He1 | -△- 60_E1_He1 | -△- 80_E1_He1 | -△- 100_E1_He1 | -△- 120_E1_He1 |
| -△- 40_E1_He2 | -△- 60_E1_He2 | -△- 80_E1_He2 | -△- 100_E1_He2 | -△- 120_E1_He2 |
| -△- 40_E1_He3 | -△- 60_E1_He3 | -△- 80_E1_He3 | -△- 100_E1_He3 | -△- 120_E1_He3 |
| -○- 40_E1_S | -○- 60_E1_S | -○- 80_E1_S | -○- 100_E1_S | -○- 120_E1_S |

E1: H [m]

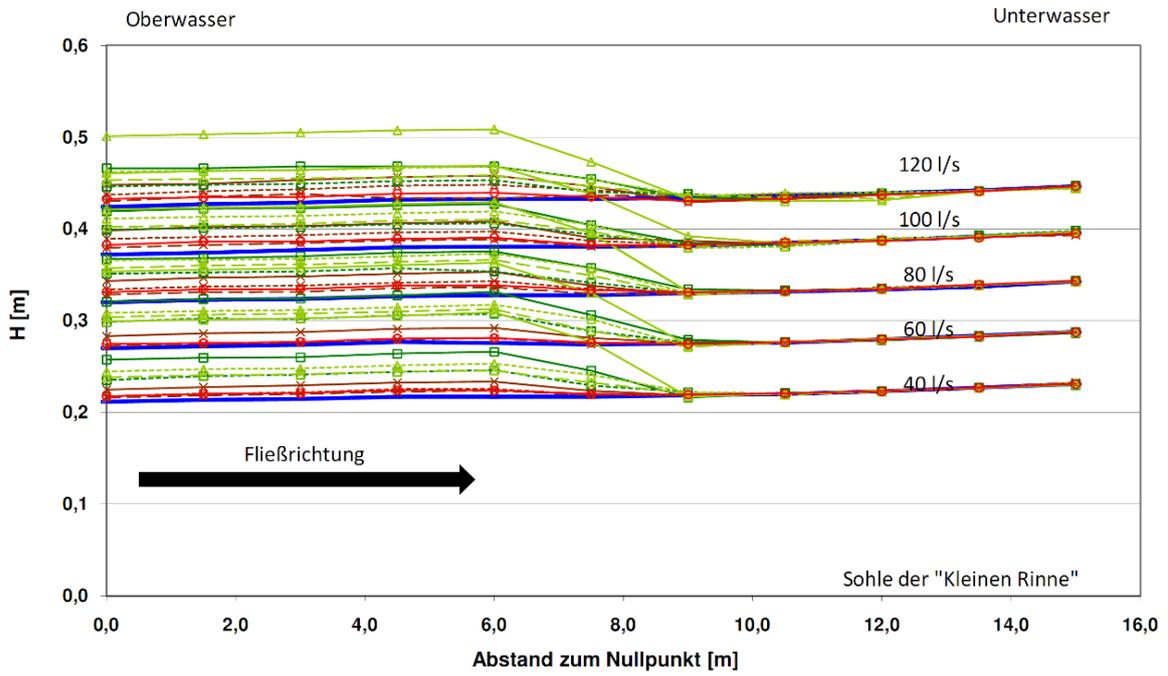
		P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
		[m]										
Lage der Messpunkte im Längsverlauf		15,0	13,5	12,0	10,5	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0,0
Zustand	Durchfluss Q [l/s]	H [m]										
Leer	40	0,204	0,200	0,196	0,192	0,192	0,193	0,194	0,195	0,194	0,192	0,190
Leer	60	0,257	0,253	0,249	0,246	0,244	0,242	0,242	0,242	0,240	0,237	0,236
Leer	80	0,307	0,303	0,298	0,296	0,295	0,294	0,294	0,296	0,292	0,291	0,288
Leer	100	0,353	0,349	0,346	0,343	0,341	0,340	0,341	0,342	0,339	0,338	0,334
Leer	120	0,400	0,396	0,393	0,390	0,389	0,387	0,387	0,387	0,386	0,384	0,382
U1	40	0,204	0,200	0,196	0,193	0,192	0,200	0,211	0,211	0,208	0,207	0,204
U1	60	0,257	0,253	0,250	0,246	0,246	0,256	0,269	0,269	0,265	0,264	0,261
U1	80	0,307	0,304	0,298	0,294	0,297	0,307	0,324	0,323	0,320	0,319	0,316
U1	100	0,355	0,349	0,345	0,343	0,342	0,349	0,371	0,371	0,369	0,367	0,365
U1	120	0,400	0,396	0,394	0,390	0,388	0,404	0,423	0,422	0,418	0,417	0,414
U2	40	0,204	0,199	0,196	0,192	0,193	0,197	0,203	0,203	0,201	0,199	0,197
U2	60	0,256	0,251	0,249	0,246	0,246	0,247	0,259	0,259	0,255	0,255	0,252
U2	80	0,306	0,303	0,297	0,294	0,293	0,299	0,311	0,311	0,307	0,306	0,304
U2	100	0,354	0,350	0,346	0,341	0,340	0,351	0,363	0,362	0,358	0,358	0,355
U2	120	0,399	0,396	0,395	0,389	0,396	0,399	0,410	0,409	0,406	0,405	0,403
U3	40	0,204	0,200	0,196	0,192	0,191	0,190	0,200	0,200	0,197	0,196	0,191
U3	60	0,258	0,253	0,250	0,245	0,247	0,250	0,255	0,256	0,253	0,252	0,251
U3	80	0,306	0,303	0,298	0,296	0,297	0,298	0,304	0,304	0,301	0,300	0,298
U3	100	0,355	0,349	0,347	0,341	0,345	0,345	0,350	0,350	0,348	0,347	0,343
U3	120	0,396	0,396	0,393	0,390	0,387	0,387	0,398	0,398	0,396	0,393	0,390
B1	40	0,204	0,199	0,195	0,192	0,192	0,221	0,244	0,242	0,238	0,238	0,234
B1	60	0,257	0,253	0,249	0,246	0,251	0,286	0,315	0,313	0,310	0,308	0,306
B1	80	0,306	0,302	0,299	0,296	0,301	0,339	0,363	0,363	0,358	0,357	0,355
B1	100	0,354	0,349	0,347	0,343	0,345	0,376	0,401	0,399	0,397	0,396	0,393
B1	120	0,399	0,399	0,389	0,382	0,393	0,417	0,444	0,443	0,440	0,439	0,436
B2	40	0,203	0,199	0,195	0,192	0,197	0,209	0,227	0,226	0,223	0,221	0,219
B2	60	0,258	0,252	0,247	0,246	0,247	0,264	0,287	0,285	0,282	0,281	0,278
B2	80	0,306	0,301	0,298	0,296	0,297	0,311	0,330	0,329	0,326	0,325	0,324
B2	100	0,355	0,349	0,345	0,345	0,348	0,359	0,378	0,377	0,372	0,372	0,371
B2	120	0,400	0,394	0,393	0,382	0,392	0,403	0,419	0,420	0,417	0,415	0,414
He1	40	0,204	0,199	0,195	0,193	0,187	0,260	0,294	0,291	0,289	0,291	0,284
He1	60	0,258	0,253	0,250	0,246	0,242	0,316	0,354	0,352	0,349	0,348	0,345
He1	80	0,308	0,300	0,300	0,297	0,293	0,377	0,420	0,417	0,415	0,413	0,412
He1	100	0,354	0,349	0,345	0,341	0,351	0,409	0,447	0,445	0,442	0,441	0,438
He1	120	0,401	0,402	0,387	0,381	0,379	0,442	0,478	0,477	0,474	0,473	0,470
He2	40	0,203	0,199	0,196	0,192	0,190	0,219	0,232	0,230	0,227	0,227	0,224
He2	60	0,256	0,252	0,249	0,245	0,250	0,279	0,298	0,296	0,293	0,292	0,290
He2	80	0,306	0,303	0,299	0,294	0,290	0,330	0,351	0,348	0,345	0,344	0,342
He2	100	0,353	0,348	0,345	0,341	0,341	0,370	0,388	0,386	0,383	0,383	0,381
He2	120	0,401	0,395	0,388	0,393	0,388	0,416	0,436	0,436	0,432	0,432	0,430
He3	40	0,205	0,199	0,196	0,193	0,196	0,211	0,226	0,225	0,221	0,221	0,218
He3	60	0,257	0,253	0,249	0,245	0,250	0,263	0,291	0,289	0,286	0,285	0,284
He3	80	0,307	0,302	0,298	0,295	0,299	0,315	0,341	0,339	0,336	0,335	0,333
He3	100	0,354	0,350	0,345	0,342	0,352	0,355	0,377	0,376	0,373	0,372	0,370
He3	120	0,400	0,395	0,392	0,391	0,380	0,404	0,425	0,425	0,422	0,422	0,420
S	40	0,203	0,201	0,198	0,194	0,190	0,190	0,192	0,200	0,200	0,198	0,197
S	60	0,259	0,254	0,250	0,244	0,244	0,247	0,256	0,256	0,253	0,251	0,250
S	80	0,307	0,302	0,297	0,294	0,297	0,299	0,305	0,305	0,302	0,301	0,299
S	100	0,354	0,349	0,346	0,342	0,339	0,343	0,353	0,352	0,349	0,349	0,347
S	120	0,402	0,396	0,393	0,389	0,389	0,393	0,400	0,401	0,398	0,397	0,395



E1: h_{Datum} [m]

	P 1 [m]	P 2 [m]	P 3 [m]	P 4 [m]	P 5 [m]	P 6 [m]	P 7 [m]	P 8 [m]	P 9 [m]	P 10 [m]	P 11 [m]
Lage der Messpunkte im Längsverlauf	15,0	13,5	12,0	10,5	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0,0
Zustand	Durchfluss Q [l/s]		h_{Datum} [m]								
40_E1_leer	0,204	0,202	0,201	0,200	0,203	0,207	0,210	0,214	0,215	0,216	0,217
60_E1_leer	0,257	0,255	0,254	0,254	0,255	0,256	0,258	0,261	0,261	0,261	0,263
80_E1_leer	0,307	0,305	0,303	0,304	0,305	0,307	0,310	0,314	0,314	0,315	0,315
100_E1_leer	0,353	0,352	0,351	0,351	0,352	0,354	0,357	0,361	0,360	0,362	0,361
120_E1_leer	0,400	0,399	0,398	0,398	0,400	0,401	0,403	0,406	0,408	0,408	0,409
40_E1_U1	0,204	0,202	0,201	0,201	0,203	0,214	0,227	0,230	0,229	0,231	0,231
60_E1_U1	0,257	0,256	0,255	0,254	0,256	0,269	0,285	0,288	0,287	0,288	0,288
80_E1_U1	0,307	0,307	0,303	0,302	0,308	0,321	0,340	0,342	0,342	0,343	0,343
100_E1_U1	0,355	0,352	0,350	0,351	0,352	0,362	0,387	0,390	0,390	0,391	0,392
120_E1_U1	0,400	0,399	0,399	0,398	0,399	0,418	0,439	0,441	0,440	0,441	0,441
40_E1_U2	0,204	0,202	0,201	0,200	0,203	0,210	0,219	0,222	0,223	0,223	0,224
60_E1_U2	0,256	0,254	0,254	0,254	0,257	0,261	0,275	0,278	0,277	0,279	0,279
80_E1_U2	0,306	0,305	0,302	0,302	0,304	0,313	0,327	0,329	0,329	0,330	0,331
100_E1_U2	0,354	0,353	0,351	0,349	0,350	0,364	0,379	0,380	0,379	0,382	0,382
120_E1_U2	0,399	0,399	0,400	0,397	0,407	0,413	0,426	0,428	0,428	0,429	0,430
40_E1_U3	0,204	0,202	0,201	0,200	0,201	0,203	0,216	0,219	0,219	0,220	0,218
60_E1_U3	0,258	0,255	0,255	0,253	0,258	0,263	0,271	0,274	0,274	0,276	0,278
80_E1_U3	0,306	0,305	0,303	0,304	0,307	0,312	0,320	0,322	0,322	0,324	0,325
100_E1_U3	0,355	0,352	0,352	0,349	0,355	0,358	0,366	0,369	0,369	0,371	0,370
120_E1_U3	0,396	0,399	0,398	0,398	0,398	0,401	0,414	0,417	0,418	0,417	0,417
40_E1_B1	0,204	0,201	0,200	0,200	0,202	0,234	0,260	0,261	0,260	0,262	0,261
60_E1_B1	0,257	0,255	0,254	0,254	0,261	0,300	0,331	0,332	0,331	0,332	0,333
80_E1_B1	0,306	0,305	0,304	0,304	0,312	0,352	0,379	0,381	0,380	0,381	0,382
100_E1_B1	0,354	0,352	0,352	0,351	0,356	0,389	0,417	0,418	0,418	0,420	0,420
120_E1_B1	0,399	0,401	0,394	0,390	0,404	0,431	0,460	0,462	0,462	0,463	0,463
40_E1_B2	0,203	0,201	0,200	0,200	0,208	0,222	0,243	0,245	0,245	0,245	0,246
60_E1_B2	0,258	0,255	0,252	0,254	0,257	0,278	0,303	0,304	0,304	0,305	0,305
80_E1_B2	0,306	0,304	0,303	0,304	0,307	0,324	0,346	0,347	0,348	0,349	0,351
100_E1_B2	0,355	0,352	0,350	0,353	0,358	0,373	0,394	0,396	0,394	0,396	0,398
120_E1_B2	0,400	0,397	0,398	0,390	0,403	0,416	0,435	0,438	0,438	0,439	0,441
40_E1_He1	0,204	0,202	0,200	0,201	0,198	0,273	0,310	0,310	0,310	0,315	0,311
60_E1_He1	0,258	0,256	0,255	0,254	0,253	0,330	0,370	0,371	0,370	0,372	0,372
80_E1_He1	0,308	0,303	0,305	0,305	0,304	0,391	0,436	0,436	0,436	0,437	0,439
100_E1_He1	0,354	0,351	0,350	0,349	0,362	0,422	0,463	0,464	0,463	0,465	0,465
120_E1_He1	0,401	0,405	0,392	0,389	0,390	0,456	0,494	0,496	0,496	0,497	0,497
40_E1_He2	0,203	0,201	0,201	0,200	0,200	0,232	0,248	0,249	0,249	0,251	0,251
60_E1_He2	0,256	0,255	0,254	0,253	0,260	0,293	0,314	0,315	0,315	0,316	0,317
80_E1_He2	0,306	0,305	0,304	0,302	0,301	0,344	0,367	0,367	0,367	0,368	0,369
100_E1_He2	0,353	0,351	0,350	0,349	0,352	0,384	0,404	0,405	0,404	0,407	0,408
120_E1_He2	0,401	0,398	0,394	0,401	0,398	0,430	0,452	0,454	0,454	0,456	0,457
40_E1_He3	0,205	0,201	0,201	0,201	0,207	0,225	0,242	0,243	0,242	0,245	0,245
60_E1_He3	0,257	0,256	0,254	0,253	0,261	0,277	0,307	0,308	0,308	0,309	0,311
80_E1_He3	0,307	0,305	0,303	0,303	0,310	0,329	0,357	0,358	0,358	0,359	0,360
100_E1_He3	0,354	0,353	0,350	0,350	0,363	0,369	0,393	0,395	0,395	0,396	0,397
120_E1_He3	0,400	0,398	0,397	0,399	0,391	0,418	0,441	0,444	0,444	0,446	0,447
40_E1_S	0,203	0,203	0,203	0,202	0,200	0,203	0,208	0,218	0,221	0,222	0,224
60_E1_S	0,259	0,257	0,255	0,252	0,255	0,260	0,272	0,275	0,275	0,275	0,277
80_E1_S	0,307	0,305	0,302	0,302	0,307	0,313	0,321	0,324	0,324	0,325	0,326
100_E1_S	0,354	0,351	0,351	0,350	0,350	0,356	0,369	0,371	0,371	0,373	0,374
120_E1_S	0,402	0,399	0,398	0,397	0,400	0,407	0,416	0,420	0,420	0,421	0,422

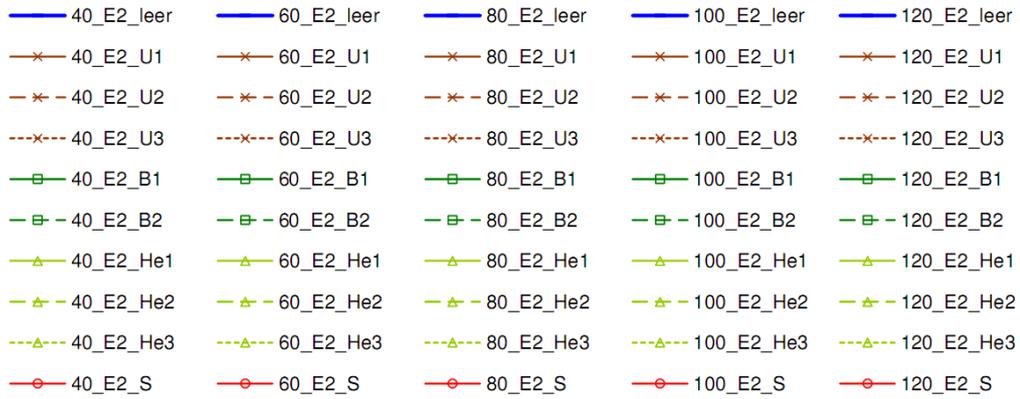
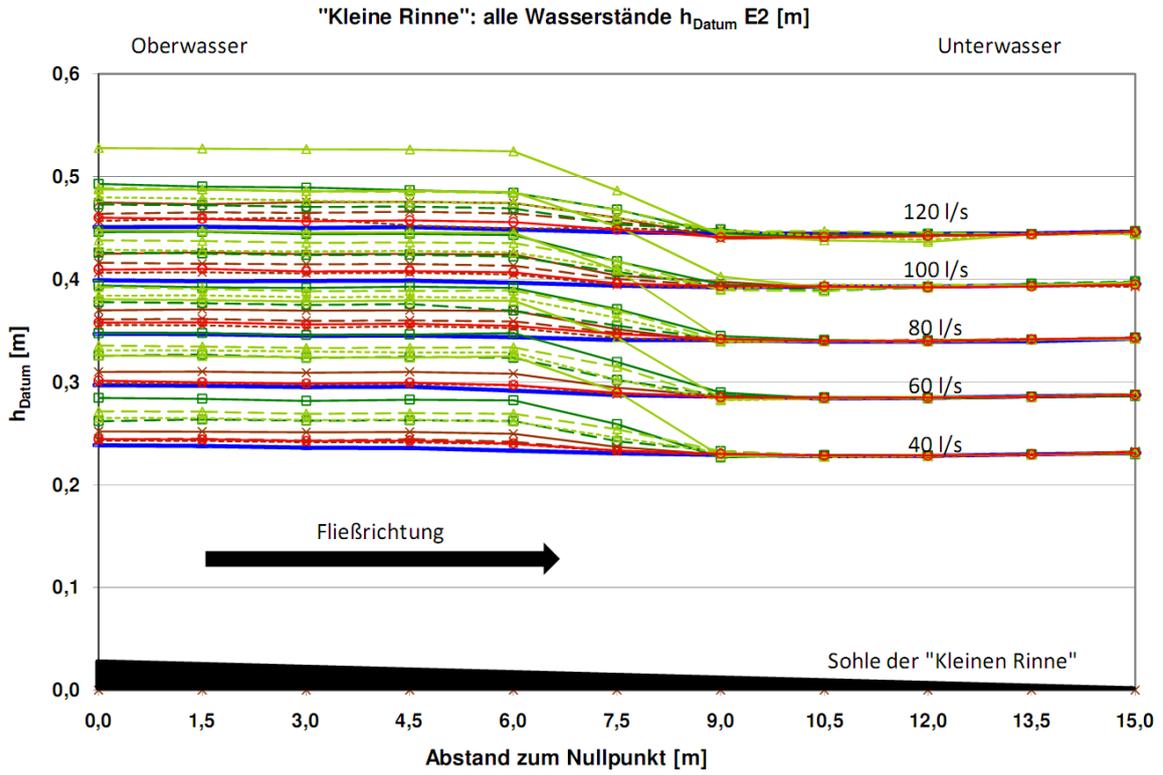
"Kleine Rinne": alle Wasserstände H E2 [m]



- 40_E2_leer — 60_E2_leer — 80_E2_leer — 100_E2_leer — 120_E2_leer
- x- 40_E2_U1 -x- 60_E2_U1 -x- 80_E2_U1 -x- 100_E2_U1 -x- 120_E2_U1
- *- 40_E2_U2 -*- 80_E2_U2 -*- 100_E2_U2 -*- 120_E2_U2 -x- 40_E2_U3
- * 60_E2_U3 -* 80_E2_U3 -* 100_E2_U3 -* 120_E2_U3 -□- 40_E2_B1
- 60_E2_B1 -□- 80_E2_B1 -□- 100_E2_B1 -□- 120_E2_B1 -□- 40_E2_B2
- 60_E2_B2 -□- 80_E2_B2 -□- 100_E2_B2 -□- 120_E2_B2 -△- 40_E2_He1
- △- 60_E2_He1 -△- 80_E2_He1 -△- 100_E2_He1 -△- 120_E2_He1 -△- 40_E2_He2
- △- 60_E2_He2 -△- 80_E2_He2 -△- 100_E2_He2 -△- 120_E2_He2 -△- 40_E2_He3
- △- 60_E2_He3 -△- 80_E2_He3 -△- 100_E2_He3 -△- 120_E2_He3 -○- 40_E2_S
- 60_E2_S -○- 80_E2_S -○- 100_E2_S -○- 120_E2_S

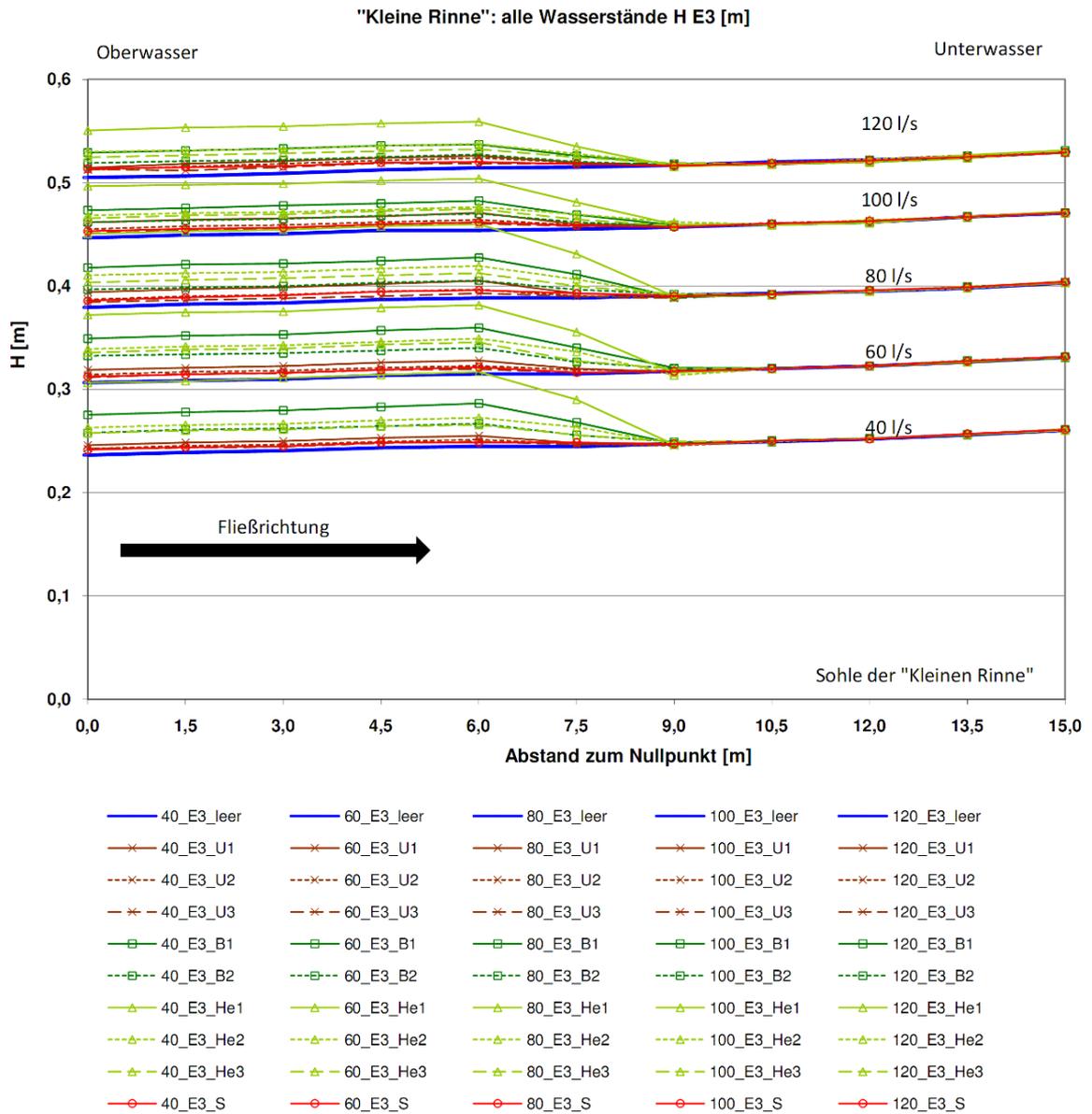
E2: H [m]

		P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
		[m]	[m]									
Lage der Messpunkte im Längsverlauf		15,0	13,5	12,0	10,5	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0,0
Zustand	Durchfluss Q [l/s]	H [m]										
40_E2_leer	0,231	0,227	0,223	0,220	0,219	0,217	0,217	0,215	0,214	0,212		
60_E2_leer	0,288	0,284	0,280	0,276	0,275	0,274	0,276	0,277	0,274	0,272		
80_E2_leer	0,343	0,337	0,334	0,332	0,330	0,328	0,328	0,327	0,324	0,323		
100_E2_leer	0,396	0,392	0,388	0,385	0,382	0,381	0,380	0,377	0,374	0,372		
120_E2_leer	0,447	0,442	0,439	0,437	0,434	0,433	0,433	0,432	0,429	0,427	0,424	
40_E2_U1	0,233	0,227	0,223	0,220	0,219	0,224	0,234	0,233	0,230	0,228	0,225	
60_E2_U1	0,288	0,283	0,279	0,277	0,276	0,281	0,292	0,291	0,288	0,286	0,283	
80_E2_U1	0,343	0,338	0,334	0,332	0,328	0,338	0,353	0,351	0,348	0,347	0,343	
100_E2_U1	0,397	0,392	0,387	0,384	0,387	0,390	0,408	0,406	0,403	0,402	0,398	
120_E2_U1	0,446	0,441	0,437	0,433	0,429	0,447	0,458	0,457	0,454	0,449	0,448	
40_E2_U2	0,231	0,227	0,222	0,220	0,218	0,220	0,226	0,226	0,222	0,221	0,218	
60_E2_U2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80_E2_U2	0,344	0,339	0,336	0,332	0,331	0,335	0,343	0,341	0,338	0,337	0,334	
100_E2_U2	0,395	0,392	0,387	0,385	0,383	0,387	0,397	0,396	0,393	0,391	0,389	
120_E2_U2	0,447	0,442	0,438	0,436	0,437	0,442	0,448	0,447	0,443	0,441	0,437	
40_E2_U3	0,232	0,227	0,224	0,219	0,219	0,224	0,223	0,220	0,219	0,219	0,216	
60_E2_U3	0,288	0,283	0,279	0,277	0,276	0,275	0,281	0,280	0,277	0,275	0,272	
80_E2_U3	0,343	0,340	0,335	0,332	0,329	0,330	0,337	0,336	0,332	0,331	0,329	
100_E2_U3	0,393	0,391	0,388	0,385	0,381	0,381	0,389	0,388	0,385	0,383	0,380	
120_E2_U3	0,447	0,442	0,437	0,436	0,436	0,437	0,434	0,434	0,438	0,435	0,430	
40_E2_B1	0,231	0,227	0,223	0,221	0,216	0,246	0,266	0,264	0,260	0,260	0,258	
60_E2_B1	0,287	0,283	0,279	0,276	0,279	0,306	0,332	0,328	0,324	0,324	0,321	
80_E2_B1	0,343	0,339	0,335	0,333	0,334	0,358	0,376	0,374	0,370	0,368	0,367	
100_E2_B1	0,397	0,392	0,388	0,384	0,385	0,404	0,427	0,426	0,423	0,422	0,419	
120_E2_B1	0,445	0,441	0,439	0,434	0,434	0,455	0,468	0,468	0,468	0,466	0,466	
40_E2_B2	0,230	0,227	0,223	0,220	0,222	0,229	0,246	0,244	0,241	0,240	0,235	
60_E2_B2	0,288	0,284	0,280	0,277	0,277	0,289	0,308	0,306	0,302	0,303	0,299	
80_E2_B2	0,344	0,339	0,335	0,333	0,331	0,342	0,354	0,357	0,354	0,353	0,351	
100_E2_B2	0,398	0,393	0,387	0,381	0,383	0,394	0,406	0,405	0,402	0,401	0,399	
120_E2_B2	0,447	0,441	0,438	0,433	0,438	0,440	0,453	0,452	0,449	0,448	0,446	
40_E2_He1	0,231	0,227	0,224	0,221	0,217	0,277	0,309	0,305	0,303	0,301	0,299	
60_E2_He1	0,288	0,284	0,281	0,277	0,274	0,330	0,363	0,361	0,357	0,356	0,354	
80_E2_He1	0,342	0,339	0,335	0,332	0,332	0,396	0,429	0,427	0,424	0,423	0,421	
100_E2_He1	0,397	0,392	0,387	0,384	0,392	0,438	0,469	0,468	0,464	0,463	0,461	
120_E2_He1	0,446	0,441	0,431	0,430	0,433	0,473	0,509	0,508	0,505	0,503	0,501	
40_E2_He2	0,232	0,227	0,223	0,220	0,222	0,241	0,253	0,251	0,248	0,247	0,245	
60_E2_He2	0,288	0,284	0,279	0,276	0,272	0,302	0,318	0,315	0,312	0,311	0,309	
80_E2_He2	0,343	0,339	0,334	0,332	0,330	0,357	0,373	0,370	0,367	0,367	0,366	
100_E2_He2	0,398	0,392	0,390	0,381	0,379	0,405	0,419	0,417	0,414	0,413	0,411	
120_E2_He2	0,444	0,441	0,440	0,439	0,436	0,454	0,468	0,467	0,464	0,464	0,462	
40_E2_He3	0,231	0,227	0,223	0,219	0,221	0,233	0,246	0,245	0,242	0,241	0,238	
60_E2_He3	0,288	0,283	0,280	0,276	0,272	0,289	0,313	0,310	0,308	0,307	0,304	
80_E2_He3	0,344	0,339	0,335	0,332	0,329	0,349	0,366	0,364	0,361	0,360	0,357	
100_E2_He3	0,396	0,391	0,388	0,387	0,380	0,397	0,410	0,409	0,406	0,404	0,402	
120_E2_He3	0,444	0,442	0,433	0,434	0,437	0,446	0,459	0,456	0,455	0,455	0,453	
40_E2_S	0,231	0,227	0,223	0,221	0,220	0,220	0,224	0,224	0,221	0,220	0,218	
60_E2_S	0,288	0,283	0,280	0,277	0,275	0,276	0,281	0,281	0,277	0,276	0,275	
80_E2_S	0,343	0,339	0,335	0,332	0,331	0,334	0,339	0,338	0,335	0,334	0,331	
100_E2_S	0,395	0,391	0,387	0,385	0,383	0,383	0,391	0,389	0,386	0,386	0,383	
120_E2_S	0,447	0,441	0,437	0,433	0,431	0,435	0,440	0,439	0,435	0,435	0,433	



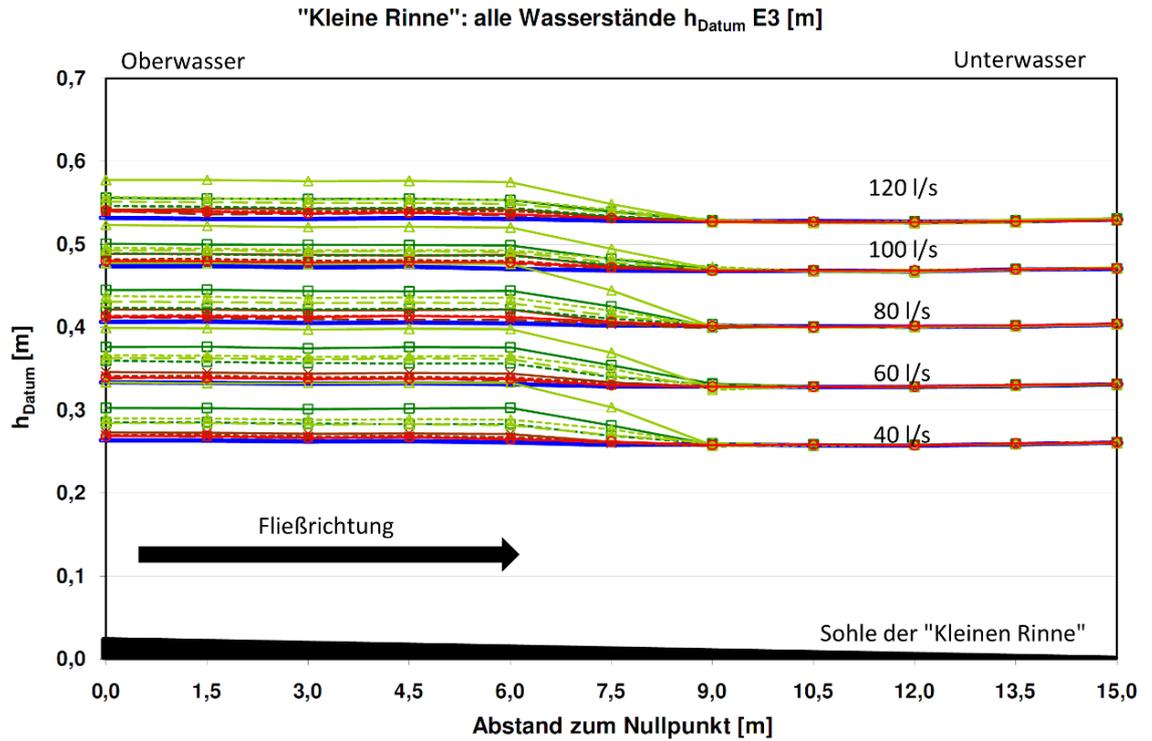
E2: h_{Datum} [m]

		P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Lage der Messpunkte im Längsverlauf		15,0	13,5	12,0	10,5	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0,0
Zustand	Durchfluss Q [l/s]	h_{Datum} [m]										
Leer	40	0,231	0,230	0,228	0,228	0,229	0,231	0,233	0,236	0,236	0,238	0,239
Leer	60	0,288	0,286	0,285	0,284	0,286	0,288	0,292	0,295	0,295	0,296	0,297
Leer	80	0,343	0,340	0,339	0,340	0,341	0,341	0,344	0,345	0,345	0,347	0,347
Leer	100	0,396	0,394	0,393	0,393	0,392	0,394	0,397	0,399	0,399	0,398	0,399
Leer	120	0,447	0,445	0,444	0,445	0,445	0,446	0,449	0,451	0,450	0,451	0,451
U1	40	0,233	0,229	0,228	0,228	0,229	0,237	0,250	0,251	0,251	0,252	0,252
U1	60	0,288	0,285	0,284	0,285	0,286	0,295	0,308	0,310	0,309	0,310	0,310
U1	80	0,343	0,341	0,339	0,340	0,339	0,352	0,369	0,370	0,370	0,371	0,370
U1	100	0,397	0,395	0,392	0,392	0,398	0,404	0,424	0,425	0,425	0,426	0,425
U1	120	0,446	0,444	0,442	0,441	0,440	0,460	0,474	0,475	0,475	0,473	0,475
U2	40	0,231	0,229	0,227	0,228	0,229	0,233	0,242	0,244	0,243	0,245	0,245
U2	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U2	80	0,344	0,342	0,341	0,340	0,342	0,348	0,359	0,360	0,360	0,361	0,361
U2	100	0,395	0,395	0,392	0,393	0,394	0,401	0,413	0,415	0,415	0,415	0,416
U2	120	0,447	0,445	0,443	0,444	0,448	0,456	0,464	0,466	0,465	0,465	0,464
U3	40	0,232	0,229	0,229	0,227	0,230	0,233	0,240	0,241	0,242	0,243	0,243
U3	60	0,288	0,286	0,284	0,285	0,287	0,288	0,297	0,298	0,298	0,299	0,299
U3	80	0,343	0,342	0,340	0,340	0,340	0,343	0,353	0,354	0,353	0,355	0,356
U3	100	0,393	0,394	0,393	0,393	0,391	0,395	0,405	0,406	0,406	0,407	0,407
U3	120	0,447	0,445	0,442	0,444	0,447	0,450	0,450	0,452	0,460	0,459	0,457
B1	40	0,231	0,230	0,228	0,229	0,227	0,259	0,282	0,283	0,282	0,284	0,285
B1	60	0,287	0,285	0,284	0,284	0,290	0,320	0,348	0,346	0,346	0,348	0,348
B1	80	0,343	0,341	0,340	0,341	0,345	0,371	0,392	0,393	0,392	0,392	0,394
B1	100	0,397	0,394	0,393	0,392	0,395	0,418	0,443	0,444	0,444	0,446	0,446
B1	120	0,445	0,444	0,444	0,442	0,444	0,468	0,484	0,487	0,490	0,490	0,493
B2	40	0,230	0,230	0,228	0,228	0,233	0,243	0,262	0,263	0,263	0,264	0,262
B2	60	0,288	0,286	0,285	0,285	0,287	0,302	0,324	0,325	0,324	0,327	0,326
B2	80	0,344	0,341	0,340	0,341	0,341	0,355	0,370	0,376	0,375	0,377	0,378
B2	100	0,398	0,396	0,392	0,389	0,394	0,407	0,422	0,424	0,424	0,425	0,426
B2	120	0,447	0,444	0,443	0,441	0,449	0,454	0,469	0,471	0,471	0,472	0,473
He1	40	0,231	0,229	0,229	0,229	0,228	0,291	0,325	0,324	0,324	0,325	0,326
He1	60	0,288	0,286	0,286	0,285	0,284	0,344	0,379	0,379	0,379	0,380	0,381
He1	80	0,342	0,342	0,340	0,340	0,342	0,409	0,445	0,446	0,446	0,447	0,448
He1	100	0,397	0,395	0,392	0,392	0,403	0,452	0,485	0,486	0,486	0,487	0,488
He1	120	0,446	0,444	0,436	0,438	0,443	0,487	0,525	0,526	0,527	0,527	0,528
He2	40	0,232	0,230	0,228	0,228	0,233	0,254	0,269	0,270	0,269	0,271	0,272
He2	60	0,288	0,286	0,284	0,284	0,283	0,315	0,334	0,333	0,333	0,335	0,336
He2	80	0,343	0,341	0,339	0,340	0,341	0,370	0,389	0,389	0,389	0,391	0,393
He2	100	0,398	0,394	0,395	0,389	0,390	0,418	0,435	0,436	0,436	0,437	0,438
He2	120	0,444	0,444	0,445	0,447	0,447	0,468	0,484	0,485	0,486	0,488	0,489
He3	40	0,231	0,230	0,228	0,227	0,231	0,246	0,262	0,263	0,263	0,265	0,265
He3	60	0,288	0,286	0,285	0,284	0,282	0,303	0,329	0,329	0,330	0,331	0,331
He3	80	0,344	0,342	0,340	0,340	0,339	0,363	0,382	0,383	0,383	0,384	0,384
He3	100	0,396	0,394	0,393	0,395	0,391	0,411	0,426	0,428	0,427	0,428	0,429
He3	120	0,444	0,445	0,438	0,442	0,448	0,460	0,475	0,475	0,477	0,479	0,480
S	40	0,231	0,230	0,228	0,229	0,230	0,234	0,240	0,243	0,243	0,244	0,245
S	60	0,288	0,286	0,285	0,285	0,285	0,290	0,297	0,299	0,299	0,300	0,302
S	80	0,343	0,342	0,340	0,340	0,342	0,347	0,355	0,357	0,356	0,358	0,358
S	100	0,395	0,393	0,392	0,393	0,393	0,396	0,407	0,408	0,408	0,410	0,410
S	120	0,447	0,444	0,442	0,441	0,441	0,449	0,456	0,457	0,457	0,459	0,460



E3: H [m]

Lage der Messpunkte im Längsverlauf	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
	[m]										
Zustand	15,0	13,5	12,0	10,5	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0,0
Durchfluss Q [l/s]	H [m]										
40_E3_leer	0,261	0,256	0,252	0,250	0,248	0,245	0,245	0,244	0,241	0,239	0,237
60_E3_leer	0,331	0,327	0,323	0,320	0,318	0,315	0,315	0,314	0,310	0,309	0,307
80_E3_leer	0,403	0,398	0,395	0,393	0,391	0,389	0,389	0,387	0,384	0,383	0,380
100_E3_leer	0,471	0,467	0,462	0,460	0,457	0,455	0,454	0,454	0,451	0,450	0,447
120_E3_leer	0,530	0,525	0,522	0,520	0,517	0,515	0,515	0,513	0,509	0,507	0,505
40_E3_U1	0,260	0,256	0,252	0,250	0,247	0,248	0,255	0,253	0,250	0,249	0,246
60_E3_U1	0,331	0,326	0,322	0,320	0,317	0,320	0,328	0,326	0,323	0,321	0,319
80_E3_U1	0,405	0,399	0,395	0,392	0,391	0,393	0,405	0,402	0,399	0,397	0,394
100_E3_U1	0,472	0,467	0,463	0,460	0,460	0,460	0,471	0,468	0,466	0,464	0,462
120_E3_U1	0,530	0,525	0,521	0,518	0,516	0,520	0,526	0,524	0,521	0,519	0,515
40_E3_U2	0,262	0,257	0,252	0,250	0,246	0,247	0,252	0,250	0,247	0,246	0,243
60_E3_U2	0,331	0,327	0,323	0,320	0,318	0,319	0,323	0,321	0,318	0,317	0,314
80_E3_U2	0,404	0,399	0,396	0,393	0,389	0,391	0,397	0,395	0,392	0,390	0,387
100_E3_U2	0,472	0,466	0,463	0,461	0,458	0,459	0,464	0,462	0,459	0,458	0,455
120_E3_U2	0,531	0,527	0,523	0,520	0,517	0,520	0,524	0,522	0,519	0,516	0,513
40_E3_U3	0,261	0,257	0,253	0,250	0,247	0,247	0,250	0,248	0,245	0,244	0,243
60_E3_U3	0,331	0,327	0,323	0,320	0,317	0,317	0,320	0,319	0,316	0,315	0,312
80_E3_U3	0,403	0,399	0,395	0,393	0,388	0,390	0,393	0,390	0,388	0,387	0,385
100_E3_U3	0,471	0,467	0,462	0,461	0,459	0,458	0,461	0,459	0,456	0,454	0,451
120_E3_U3	0,530	0,526	0,522	0,519	0,519	0,519	0,519	0,519	0,515	0,512	0,513
40_E3_B1	0,261	0,257	0,253	0,251	0,248	0,268	0,287	0,283	0,280	0,278	0,276
60_E3_B1	0,331	0,327	0,323	0,321	0,321	0,341	0,360	0,357	0,353	0,352	0,349
80_E3_B1	0,404	0,399	0,395	0,391	0,389	0,411	0,428	0,424	0,422	0,421	0,418
100_E3_B1	0,471	0,468	0,461	0,460	0,459	0,469	0,483	0,480	0,478	0,476	0,474
120_E3_B1	0,529	0,524	0,520	0,518	0,518	0,526	0,537	0,536	0,533	0,531	0,529
40_E3_B2	0,261	0,256	0,253	0,249	0,249	0,256	0,267	0,265	0,262	0,261	0,258
60_E3_B2	0,332	0,328	0,323	0,320	0,320	0,327	0,340	0,338	0,335	0,334	0,333
80_E3_B2	0,404	0,400	0,396	0,393	0,393	0,397	0,406	0,404	0,400	0,399	0,397
100_E3_B2	0,471	0,467	0,462	0,459	0,458	0,462	0,470	0,468	0,465	0,464	0,462
120_E3_B2	0,531	0,526	0,522	0,518	0,517	0,521	0,528	0,525	0,522	0,521	0,519
40_E3_He1	0,261	0,257	0,253	0,250	0,247	0,290	0,317	0,314	0,311	0,308	0,307
60_E3_He1	0,332	0,327	0,323	0,320	0,316	0,356	0,382	0,379	0,376	0,375	0,372
80_E3_He1	0,403	0,399	0,396	0,392	0,390	0,431	0,460	0,458	0,455	0,453	0,451
100_E3_He1	0,472	0,468	0,461	0,459	0,460	0,481	0,504	0,502	0,499	0,498	0,497
120_E3_He1	0,532	0,527	0,521	0,518	0,516	0,535	0,559	0,558	0,555	0,554	0,551
40_E3_He2	0,262	0,257	0,253	0,250	0,247	0,264	0,273	0,270	0,267	0,266	0,263
60_E3_He2	0,332	0,327	0,323	0,320	0,314	0,337	0,349	0,346	0,343	0,342	0,339
80_E3_He2	0,404	0,398	0,395	0,392	0,391	0,407	0,420	0,417	0,414	0,413	0,411
100_E3_He2	0,471	0,467	0,464	0,460	0,462	0,470	0,477	0,474	0,472	0,471	0,469
120_E3_He2	0,532	0,526	0,523	0,518	0,519	0,528	0,538	0,536	0,533	0,532	0,530
40_E3_He3	0,260	0,257	0,253	0,250	0,250	0,256	0,266	0,264	0,261	0,260	0,258
60_E3_He3	0,331	0,328	0,323	0,320	0,320	0,328	0,346	0,344	0,340	0,339	0,336
80_E3_He3	0,404	0,400	0,395	0,392	0,392	0,400	0,413	0,411	0,408	0,406	0,404
100_E3_He3	0,472	0,467	0,464	0,460	0,459	0,465	0,475	0,473	0,470	0,469	0,466
120_E3_He3	0,531	0,524	0,520	0,519	0,519	0,525	0,533	0,531	0,529	0,527	0,525
40_E3_S	0,261	0,257	0,252	0,250	0,247	0,249	0,249	0,249	0,245	0,244	0,242
60_E3_S	0,332	0,328	0,323	0,320	0,318	0,317	0,322	0,319	0,316	0,315	0,313
80_E3_S	0,404	0,399	0,396	0,392	0,391	0,393	0,396	0,395	0,391	0,389	0,386
100_E3_S	0,471	0,467	0,463	0,461	0,457	0,459	0,462	0,460	0,457	0,456	0,453
120_E3_S	0,529	0,525	0,522	0,519	0,517	0,518	0,520	0,520	0,516	0,515	0,514



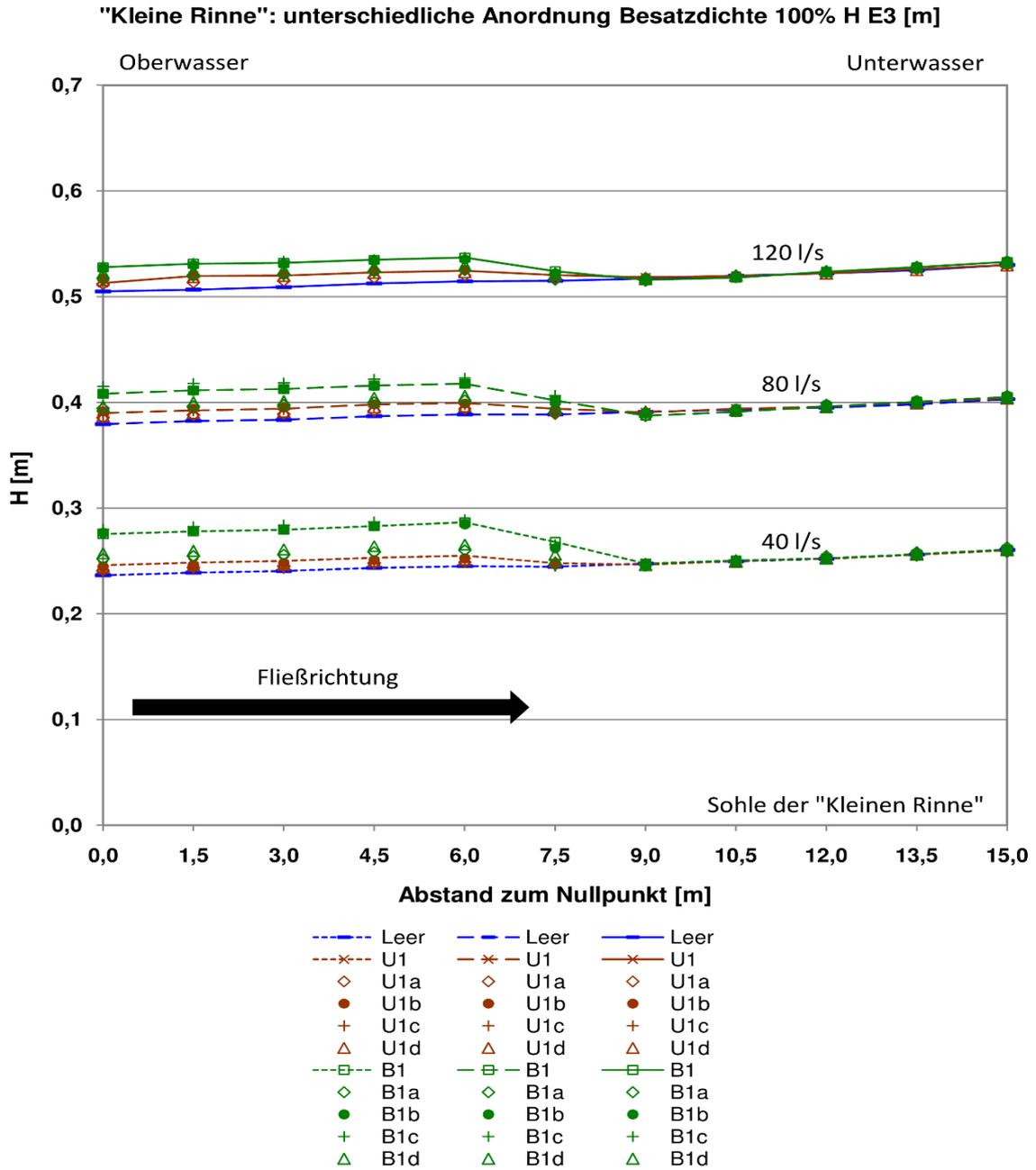
- | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| — 40_E3_leer | — 60_E3_leer | — 80_E3_leer | — 100_E3_leer | — 120_E3_leer |
| -x- 40_E3_U1 | -x- 60_E3_U1 | -x- 80_E3_U1 | -x- 100_E3_U1 | -x- 120_E3_U1 |
| -.- 40_E3_U2 | -.- 60_E3_U2 | -.- 80_E3_U2 | -.- 100_E3_U2 | -.- 120_E3_U2 |
| -* 40_E3_U3 | -* 60_E3_U3 | -* 80_E3_U3 | -* 100_E3_U3 | -* 120_E3_U3 |
| -□ 40_E3_B1 | -□ 60_E3_B1 | -□ 80_E3_B1 | -□ 100_E3_B1 | -□ 120_E3_B1 |
| -.-□ 40_E3_B2 | -.-□ 60_E3_B2 | -.-□ 80_E3_B2 | -.-□ 100_E3_B2 | -.-□ 120_E3_B2 |
| -△ 40_E3_He1 | -△ 60_E3_He1 | -△ 80_E3_He1 | -△ 100_E3_He1 | -△ 120_E3_He1 |
| -.-△ 40_E3_He2 | -.-△ 60_E3_He2 | -.-△ 80_E3_He2 | -.-△ 100_E3_He2 | -.-△ 120_E3_He2 |
| -△ 40_E3_He3 | -△ 60_E3_He3 | -△ 80_E3_He3 | -△ 100_E3_He3 | -△ 120_E3_He3 |
| -○ 40_E3_S | -○ 60_E3_S | -○ 80_E3_S | -○ 100_E3_S | -○ 120_E3_S |

E3: h_{Datum} [m]

		P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Lage der Messpunkte im Längsverlauf		15,0	13,5	12,0	10,5	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0,0
Zustand	Durchfluss Q [l/s]	h_{Datum} [m]										
Leer	40	0,261	0,259	0,257	0,258	0,258	0,258	0,261	0,262	0,262	0,263	0,264
Leer	60	0,331	0,329	0,328	0,328	0,328	0,329	0,331	0,332	0,332	0,333	0,334
Leer	80	0,403	0,401	0,400	0,401	0,402	0,402	0,405	0,406	0,405	0,407	0,407
Leer	100	0,471	0,470	0,467	0,468	0,468	0,469	0,470	0,473	0,472	0,474	0,474
Leer	120	0,530	0,528	0,527	0,528	0,528	0,529	0,531	0,531	0,531	0,531	0,532
U1	40	0,260	0,259	0,257	0,258	0,257	0,262	0,271	0,272	0,272	0,273	0,273
U1	60	0,331	0,329	0,327	0,328	0,328	0,334	0,344	0,345	0,344	0,345	0,346
U1	80	0,405	0,402	0,400	0,400	0,402	0,407	0,421	0,421	0,421	0,421	0,421
U1	100	0,472	0,469	0,468	0,468	0,470	0,474	0,487	0,486	0,487	0,488	0,489
U1	120	0,530	0,527	0,526	0,526	0,527	0,533	0,542	0,543	0,543	0,543	0,542
U2	40	0,262	0,259	0,257	0,258	0,256	0,261	0,268	0,268	0,268	0,270	0,270
U2	60	0,331	0,329	0,328	0,328	0,329	0,333	0,339	0,340	0,340	0,341	0,341
U2	80	0,404	0,401	0,401	0,401	0,400	0,404	0,413	0,414	0,413	0,414	0,414
U2	100	0,472	0,469	0,468	0,469	0,469	0,473	0,480	0,481	0,481	0,482	0,482
U2	120	0,531	0,529	0,528	0,528	0,528	0,533	0,540	0,540	0,540	0,540	0,540
U3	40	0,261	0,259	0,258	0,258	0,258	0,260	0,266	0,267	0,266	0,268	0,270
U3	60	0,331	0,330	0,328	0,328	0,328	0,330	0,336	0,338	0,337	0,339	0,339
U3	80	0,403	0,401	0,400	0,401	0,399	0,404	0,409	0,409	0,410	0,411	0,412
U3	100	0,471	0,469	0,467	0,469	0,469	0,472	0,477	0,477	0,477	0,478	0,478
U3	120	0,530	0,528	0,527	0,527	0,530	0,532	0,535	0,538	0,537	0,536	0,540
B1	40	0,261	0,259	0,258	0,259	0,258	0,282	0,303	0,302	0,301	0,302	0,303
B1	60	0,331	0,329	0,328	0,329	0,332	0,354	0,376	0,376	0,375	0,376	0,376
B1	80	0,404	0,402	0,400	0,399	0,400	0,425	0,444	0,443	0,443	0,445	0,445
B1	100	0,471	0,470	0,466	0,468	0,470	0,483	0,499	0,499	0,500	0,500	0,501
B1	120	0,529	0,527	0,525	0,526	0,529	0,540	0,553	0,555	0,555	0,555	0,556
B2	40	0,261	0,259	0,258	0,257	0,260	0,269	0,283	0,283	0,284	0,285	0,285
B2	60	0,332	0,331	0,328	0,328	0,331	0,340	0,356	0,356	0,357	0,358	0,360
B2	80	0,404	0,402	0,401	0,401	0,403	0,410	0,422	0,422	0,422	0,423	0,424
B2	100	0,471	0,469	0,467	0,467	0,469	0,476	0,486	0,487	0,487	0,488	0,489
B2	120	0,531	0,529	0,527	0,526	0,528	0,534	0,544	0,544	0,544	0,545	0,546
He1	40	0,261	0,259	0,258	0,258	0,257	0,304	0,333	0,333	0,333	0,332	0,334
He1	60	0,332	0,329	0,328	0,328	0,327	0,369	0,398	0,398	0,397	0,399	0,399
He1	80	0,403	0,401	0,401	0,400	0,401	0,445	0,476	0,477	0,476	0,477	0,478
He1	100	0,472	0,470	0,466	0,467	0,470	0,495	0,520	0,521	0,521	0,522	0,524
He1	120	0,532	0,530	0,526	0,526	0,526	0,549	0,575	0,576	0,576	0,578	0,578
He2	40	0,262	0,259	0,258	0,258	0,258	0,277	0,289	0,289	0,288	0,290	0,290
He2	60	0,332	0,330	0,328	0,328	0,324	0,350	0,365	0,365	0,364	0,366	0,366
He2	80	0,404	0,401	0,400	0,400	0,401	0,420	0,436	0,436	0,435	0,437	0,438
He2	100	0,471	0,470	0,469	0,468	0,473	0,483	0,493	0,493	0,493	0,495	0,496
He2	120	0,532	0,528	0,528	0,526	0,529	0,542	0,554	0,554	0,554	0,556	0,557
He3	40	0,260	0,259	0,258	0,258	0,260	0,270	0,282	0,283	0,283	0,284	0,285
He3	60	0,331	0,330	0,328	0,328	0,331	0,341	0,362	0,362	0,361	0,363	0,363
He3	80	0,404	0,402	0,400	0,400	0,403	0,414	0,429	0,429	0,429	0,430	0,431
He3	100	0,472	0,469	0,469	0,468	0,469	0,478	0,491	0,491	0,491	0,493	0,493
He3	120	0,531	0,526	0,525	0,527	0,529	0,538	0,549	0,549	0,550	0,551	0,552
S	40	0,261	0,260	0,257	0,258	0,258	0,262	0,265	0,267	0,267	0,268	0,269
S	60	0,332	0,330	0,328	0,328	0,328	0,330	0,338	0,338	0,338	0,339	0,340
S	80	0,404	0,402	0,401	0,400	0,401	0,407	0,412	0,413	0,413	0,413	0,413
S	100	0,471	0,470	0,468	0,469	0,468	0,472	0,478	0,479	0,478	0,480	0,480
S	120	0,529	0,528	0,527	0,527	0,527	0,532	0,536	0,538	0,538	0,539	0,541

A 02: Unterschiedliche Besatzdichte

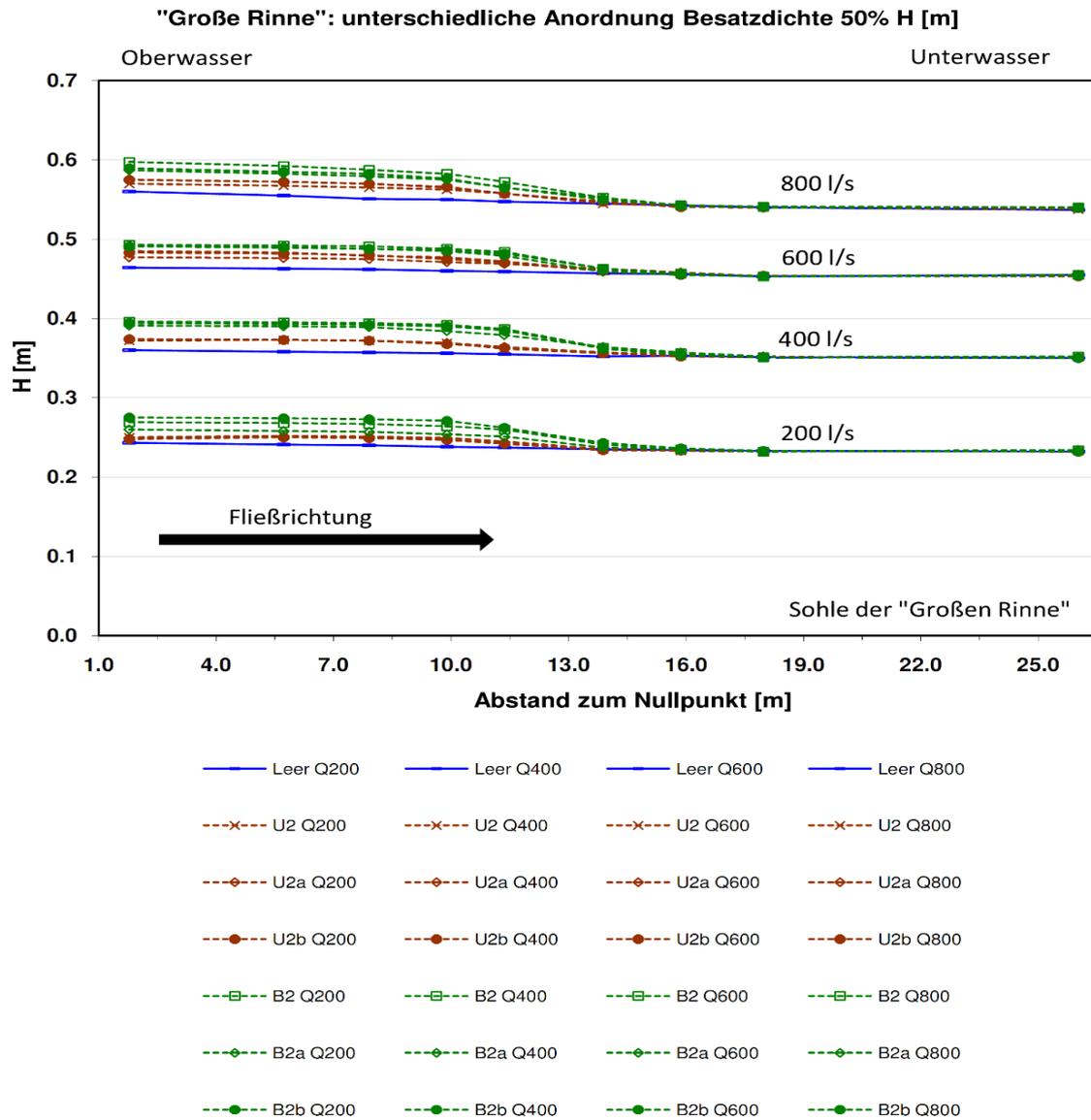
Besatzdichte 100%:



E3: H [m]

		P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Lage der Messpunkte im Längsverlauf		15.0	13.5	12.0	10.5	9.0	7.5	6.0	4.5	3.0	1.5	0.0
Zustand	Durchfluss Q [l/s]	H [m]										
Leer	40	0.261	0.256	0.252	0.250	0.248	0.245	0.245	0.244	0.241	0.239	0.237
Leer	80	0.403	0.398	0.395	0.393	0.391	0.389	0.389	0.387	0.384	0.383	0.380
Leer	120	0.530	0.525	0.522	0.520	0.517	0.515	0.515	0.513	0.509	0.507	0.505
U1	40	0.260	0.256	0.252	0.250	0.247	0.248	0.255	0.253	0.250	0.249	0.246
U1	80	0.404	0.400	0.396	0.394	0.391	0.394	0.400	0.398	0.394	0.393	0.390
U1	120	0.530	0.526	0.522	0.520	0.519	0.521	0.525	0.523	0.520	0.520	0.513
U1a	40	0.259	0.255	0.252	0.250	0.247	0.247	0.249	0.248	0.245	0.244	0.241
U1a	80	0.404	0.400	0.396	0.393	0.390	0.389	0.394	0.392	0.389	0.388	0.386
U1a	120	0.530	0.526	0.523	0.519	0.517	0.518	0.520	0.518	0.515	0.514	0.512
U1b	40	0.260	0.256	0.252	0.250	0.247	0.249	0.253	0.251	0.248	0.247	0.245
U1b	80	0.403	0.399	0.396	0.393	0.391	0.394	0.399	0.398	0.395	0.394	0.392
U1b	120	0.531	0.526	0.523	0.520	0.518	0.520	0.526	0.524	0.521	0.520	0.517
U1c	40	0.262	0.256	0.252	0.249	0.245	0.245	0.249	0.247	0.243	0.242	0.240
U1c	80	0.404	0.400	0.396	0.393	0.391	0.392	0.398	0.396	0.393	0.392	0.388
U1c	120	0.531	0.526	0.523	0.520	0.517	0.520	0.525	0.524	0.520	0.518	0.516
U1d	40	0.261	0.257	0.253	0.250	0.246	0.249	0.251	0.250	0.247	0.246	0.244
U1d	80	0.404	0.399	0.396	0.393	0.392	0.394	0.396	0.395	0.391	0.390	0.387
U1d	120	0.530	0.525	0.522	0.520	0.517	0.521	0.523	0.523	0.520	0.519	0.516
B1	40	0.261	0.257	0.253	0.251	0.248	0.268	0.287	0.283	0.280	0.278	0.276
B1	80	0.405	0.401	0.396	0.391	0.388	0.402	0.418	0.416	0.413	0.412	0.408
B1	120	0.533	0.528	0.524	0.518	0.516	0.524	0.537	0.535	0.532	0.531	0.528
B1a	40	0.263	0.259	0.255	0.251	0.247	0.247	0.260	0.259	0.256	0.255	0.252
B1a	80	0.405	0.401	0.396	0.392	0.387	0.391	0.402	0.400	0.398	0.397	0.395
B1a	120	0.532	0.528	0.524	0.520	0.515	0.516	0.525	0.524	0.521	0.521	0.518
B1b	40	0.260	0.256	0.252	0.250	0.246	0.262	0.285	0.283	0.280	0.279	0.277
B1b	80	0.407	0.402	0.398	0.394	0.390	0.402	0.418	0.416	0.413	0.411	0.408
B1b	120	0.534	0.529	0.523	0.519	0.515	0.522	0.536	0.534	0.531	0.530	0.527
B1c	40	0.260	0.256	0.253	0.250	0.245	0.266	0.289	0.287	0.284	0.283	0.280
B1c	80	0.407	0.402	0.399	0.393	0.389	0.407	0.423	0.422	0.419	0.418	0.415
B1c	120	0.534	0.529	0.523	0.518	0.515	0.523	0.538	0.535	0.534	0.532	0.529
B1d	40	0.260	0.256	0.252	0.249	0.246	0.256	0.266	0.264	0.261	0.260	0.257
B1d	80	0.405	0.400	0.396	0.393	0.391	0.396	0.406	0.405	0.401	0.400	0.397
B1d	120	0.533	0.528	0.524	0.521	0.518	0.521	0.530	0.528	0.526	0.524	0.522

Besatzdichte 50%

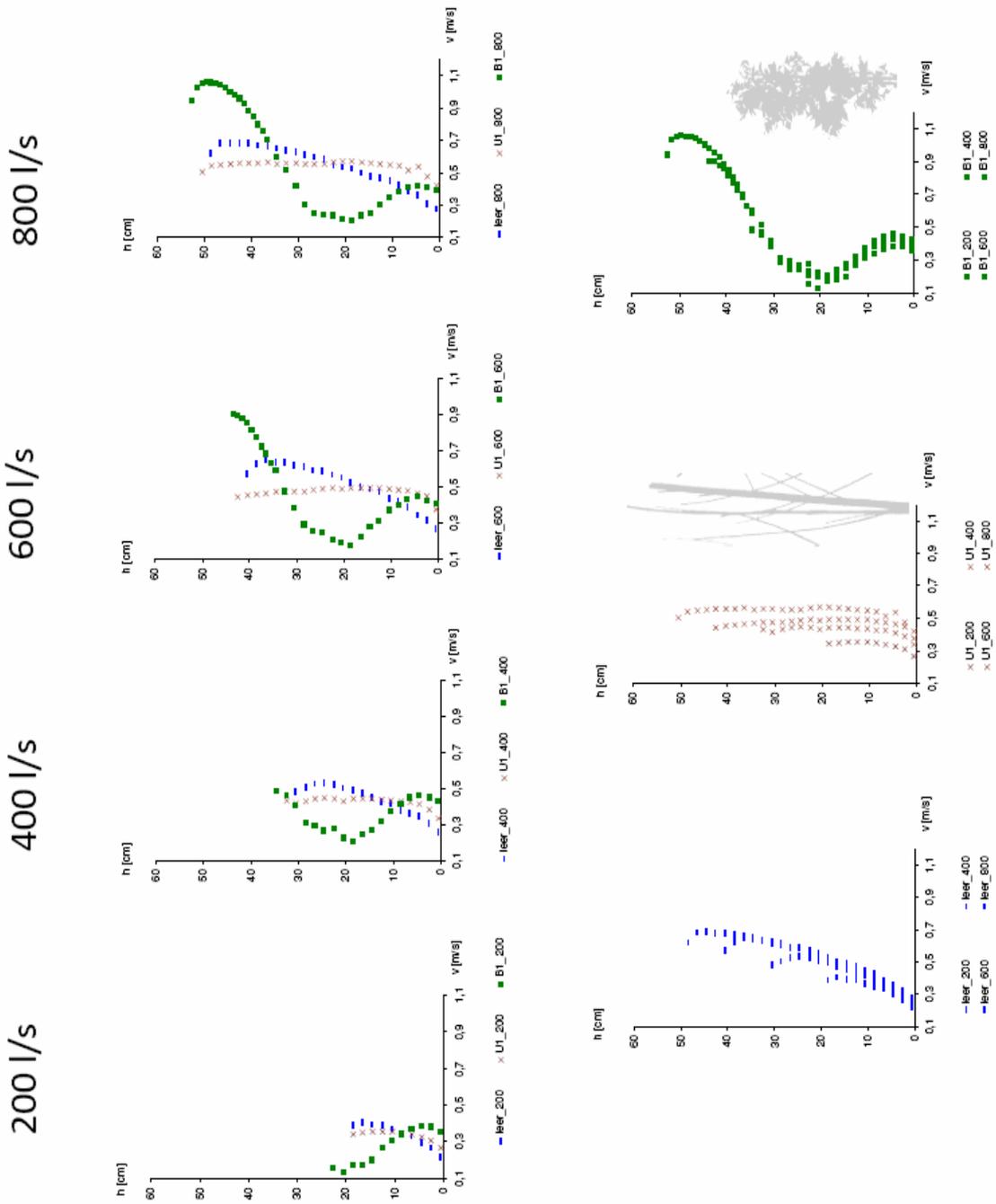


Wasserstand H [m]

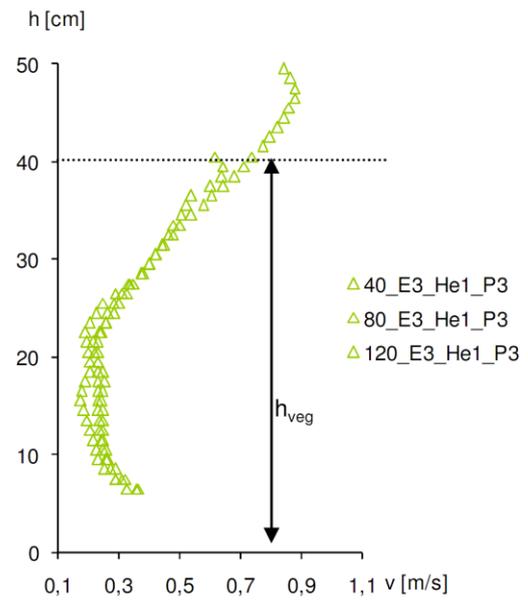
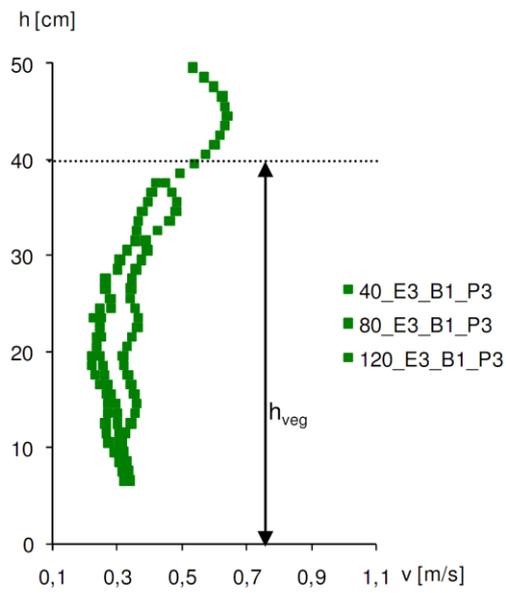
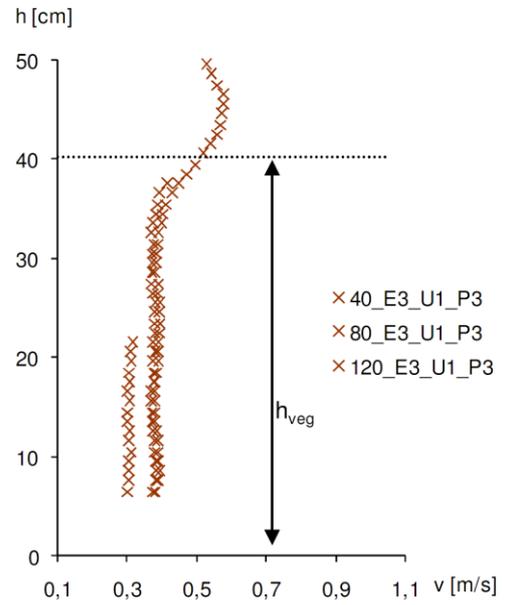
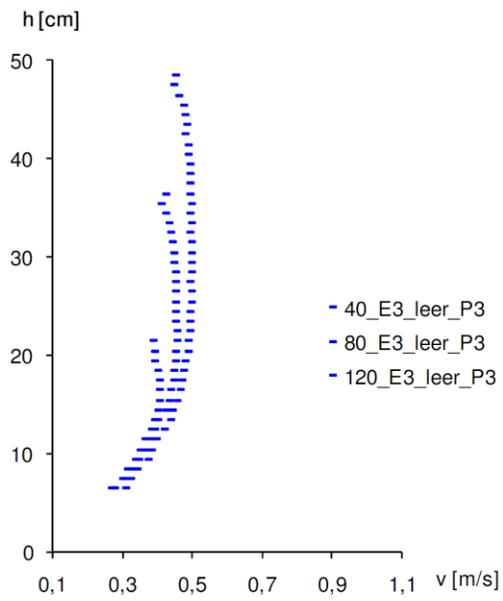
Lage der Messpunkte im Längsverlauf		1.78	5.72	7.91	9.89	11.36	13.88	15.87	17.98	26.02
Zustand	Durchfluss Q [l/s]	H [m]								
Leer	Q200	0.243	0.241	0.240	0.238	0.237	0.235	0.234	0.233	0.232
Leer	Q400	0.360	0.358	0.357	0.356	0.355	0.352	0.353	0.351	0.350
Leer	Q600	0.464	0.463	0.462	0.460	0.459	0.457	0.456	0.453	0.455
Leer	Q800	0.560	0.555	0.551	0.550	0.548	0.545	0.543	0.540	0.537
U2	Q200	0.250	0.252	0.251	0.249	0.245	0.235	0.233	0.232	0.233
U2	Q400	0.372	0.373	0.372	0.369	0.362	0.356	0.353	0.352	0.351
U2	Q600	0.485	0.483	0.479	0.477	0.472	0.460	0.456	0.453	0.455
U2	Q800	0.570	0.568	0.565	0.563	0.558	0.545	0.542	0.540	0.538
U2a	Q200	0.249	0.251	0.250	0.247	0.243	0.234	0.233	0.232	0.234
U2a	Q400	0.374	0.373	0.372	0.369	0.364	0.357	0.354	0.352	0.351
U2a	Q600	0.477	0.476	0.475	0.471	0.469	0.463	0.458	0.453	0.455
U2a	Q800	0.575	0.573	0.570	0.565	0.558	0.548	0.543	0.540	0.539
U2b	Q200	0.248	0.250	0.249	0.247	0.242	0.234	0.234	0.233	0.232
U2b	Q400	0.374	0.373	0.372	0.368	0.363	0.356	0.352	0.351	0.350
U2b	Q600	0.483	0.482	0.480	0.475	0.470	0.460	0.455	0.454	0.453
U2b	Q800	0.575	0.573	0.570	0.566	0.558	0.548	0.541	0.540	0.540
B2	Q200	0.269	0.268	0.267	0.264	0.260	0.241	0.235	0.232	0.234
B2	Q400	0.396	0.395	0.394	0.392	0.387	0.363	0.356	0.351	0.352
B2	Q600	0.493	0.492	0.491	0.488	0.484	0.463	0.457	0.453	0.455
B2	Q800	0.598	0.593	0.588	0.583	0.573	0.553	0.543	0.541	0.540
B2a	Q200	0.260	0.258	0.257	0.254	0.251	0.237	0.235	0.232	0.234
B2a	Q400	0.391	0.390	0.389	0.384	0.379	0.364	0.357	0.352	0.351
B2a	Q600	0.491	0.489	0.488	0.485	0.479	0.459	0.455	0.453	0.455
B2a	Q800	0.587	0.583	0.580	0.575	0.565	0.553	0.543	0.540	0.540
B2b	Q200	0.275	0.274	0.273	0.271	0.262	0.243	0.236	0.233	0.232
B2b	Q400	0.394	0.393	0.392	0.390	0.385	0.362	0.354	0.351	0.350
B2b	Q600	0.491	0.490	0.488	0.486	0.482	0.463	0.456	0.453	0.454
B2b	Q800	0.590	0.585	0.583	0.577	0.565	0.550	0.543	0.541	0.540

A 03: gemittelte Geschwindigkeitsprofile

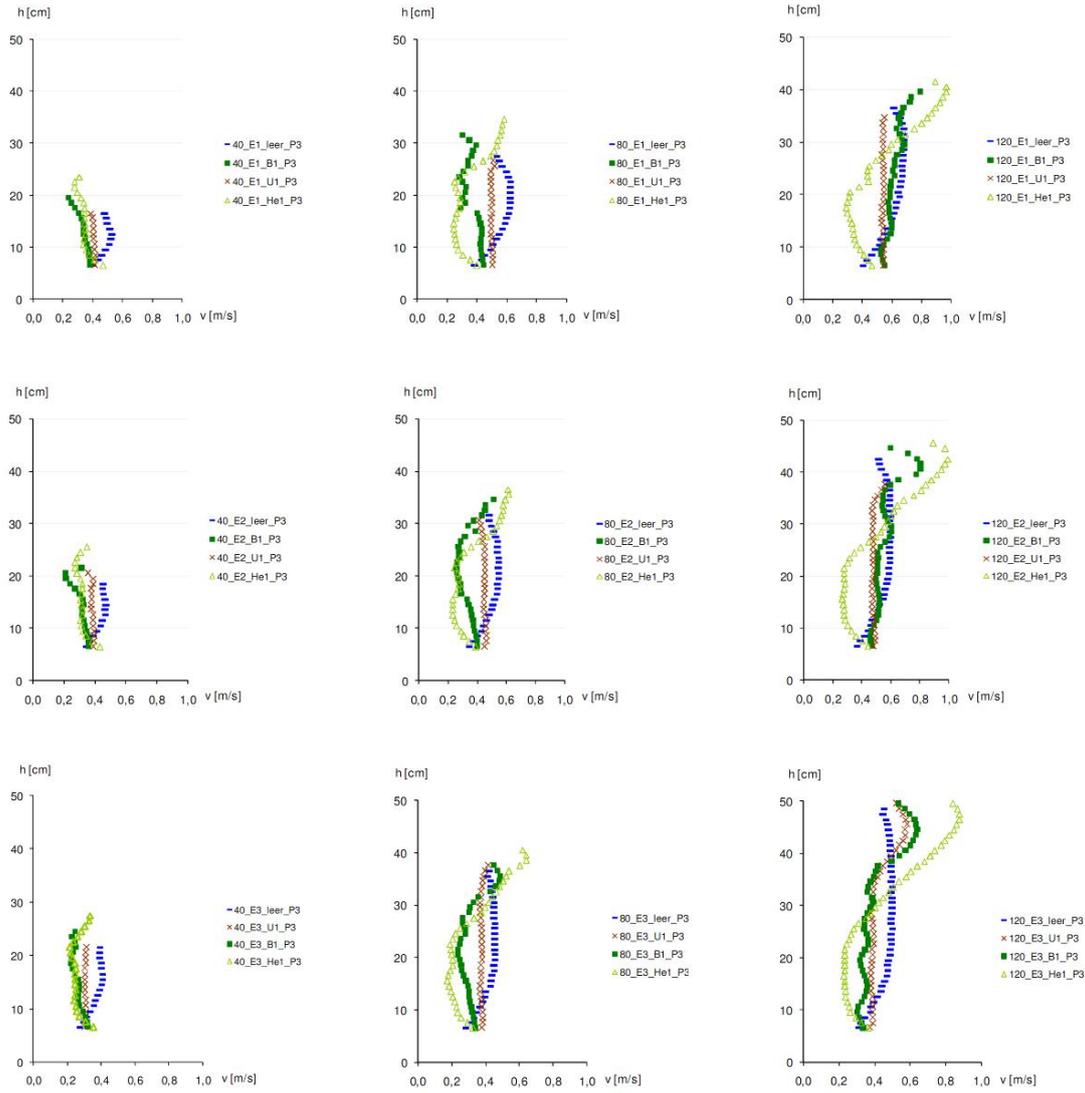
„Große Rinne“



„Kleine Rinne“



A 03: gemittelte Geschwindigkeitsprofile



A 04: Widerstandsbeiwerte, Fließgeschwindigkeiten, HN-Berechnungswerte

„Große Rinne“

"Große Rinne"							
	λ	k_{st}	k_{st} 1D-HN	v	H	Δh [m]	Δh [%]
200_leer	0.10	36		0.34	0.237		
400_leer	0.11	34	45	0.45	0.355		
600_leer	0.07	40		0.52	0.459		
800_leer	0.11	31		0.58	0.548		
200_U1	0.49	16		0.33	0.245	0.011	4.5
400_U1	0.57	14	14	0.43	0.371	0.022	6.2
600_U1	0.70	13		0.49	0.485	0.031	6.7
800_U1	0.63	13		0.56	0.570	0.032	5.9
200_U2	0.53	16		0.33	0.245	0.010	4.2
400_U2	0.37	18	17	0.44	0.362	0.014	3.8
600_U2	0.44	16		0.51	0.472	0.019	4.1
800_U2	0.40	16		0.57	0.558	0.012	2.2
200_U2a	0.48	17		0.33	0.243	0.009	3.6
400_U2a	0.34	19	17	0.44	0.364	0.014	4.0
600_U2a	0.20	23		0.51	0.469	0.013	2.7
800_U2a	0.40	16		0.57	0.558	0.017	3.0
200_U2b	0.47	17		0.33	0.242	0.008	3.3
400_U2b	0.34	19	17	0.44	0.363	0.014	3.9
600_U2b	0.39	17		0.51	0.470	0.018	3.8
800_U2b	0.42	16		0.57	0.558	0.017	3.0
200_U3	0.17	28		0.34	0.237	0.002	1.0
400_U3	0.16	27	24	0.45	0.356	0.005	1.5
600_U3	0.22	23		0.52	0.462	0.008	1.6
800_U3	0.16	26		0.58	0.548	0.000	0.0
200_B1	1.77	9		0.30	0.269	0.044	18.2
400_B1	2.55	7	8	0.39	0.410	0.072	20.1
600_B1	1.22	10		0.48	0.505	0.058	12.4
800_B1	1.29	9		0.55	0.585	0.057	10.4
200_B2	1.03	11		0.31	0.260	0.027	11.0
400_B2	0.98	11	10	0.41	0.387	0.037	10.2
600_B2	0.70	13		0.50	0.484	0.029	6.2
800_B2	0.74	12		0.56	0.573	0.036	6.5
200_B2a	0.69	14		0.32	0.251	0.017	7.0
400_B2a	0.64	14	13	0.42	0.379	0.031	8.6
600_B2a	0.70	13		0.50	0.479	0.026	5.6
800_B2a	0.54	14		0.57	0.565	0.027	4.9
200_B2b	1.28	10		0.31	0.262	0.033	13.6
400_B2b	0.94	11	11	0.42	0.385	0.035	9.6
600_B2b	0.63	13		0.50	0.482	0.027	5.7
800_B2b	0.63	13		0.57	0.565	0.029	5.3
200_B3	0.63	14		0.32	0.249	0.014	5.7
400_B3	0.51	15	15	0.43	0.370	0.020	5.5
600_B3	0.47	15		0.51	0.473	0.018	3.9
800_B3	0.47	15		0.57	0.563	0.023	4.2

„Kleine Rinne“

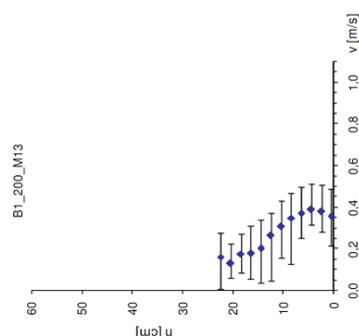
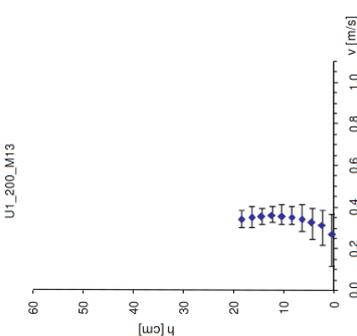
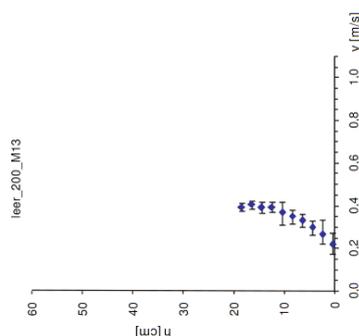
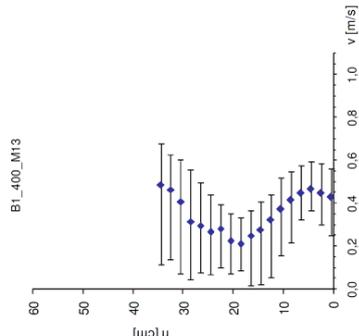
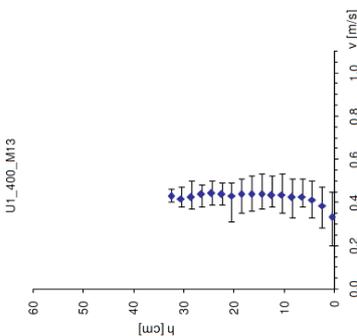
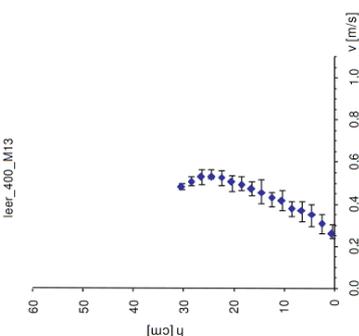
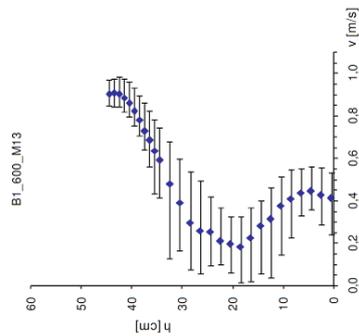
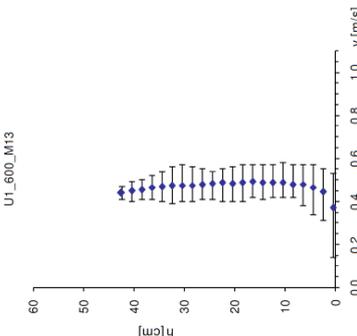
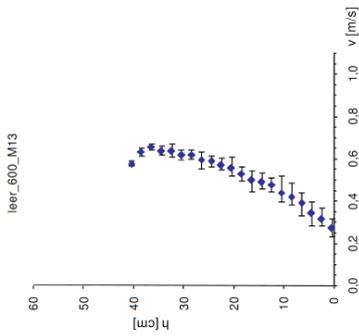
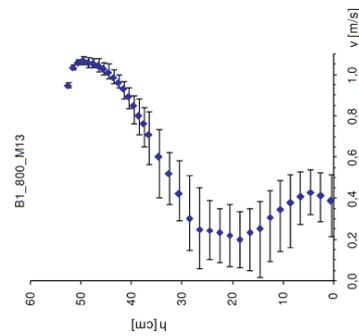
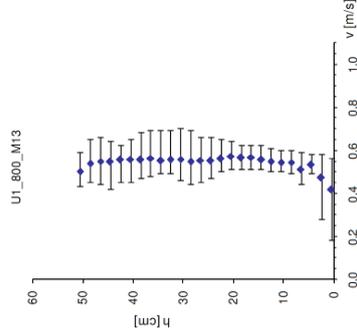
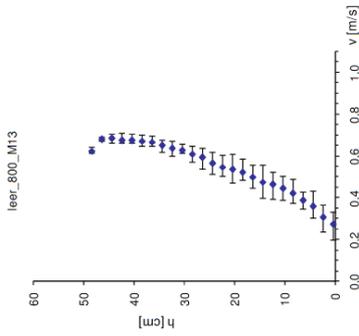
"Kleine Rinne" - E1								
	λ	k_{st}	k_{st} 1D-HN	v	H_M6	H/h _{veg}	Δh [m]	Δh [%]
40_leer	0.18	30	30	0.35	0.193	0.5		
60_leer	0.07	46		0.41	0.242	0.6		
80_leer	0.09	40	40	0.45	0.294	0.7		
100_leer	0.09	41		0.49	0.340	0.9		
120_leer	0.06	49	40	0.52	0.387	1.0		
40_U1	0.66	16	15	0.33	0.200	0.5	0.015	8.0
60_U1	0.65	15		0.39	0.256	0.6	0.026	11.0
80_U1	0.65	15	14	0.43	0.307	0.8	0.028	9.7
100_U1	0.61	15		0.48	0.349	0.9	0.030	8.8
120_U1	0.69	14	14	0.50	0.404	1.0	0.034	8.7
40_U2	0.41	20		0.34	0.197	0.5	0.008	4.1
60_U2	0.38	20		0.40	0.247	0.6	0.017	7.0
80_U2	0.43	19		0.45	0.299	0.7	0.016	5.3
100_U2	0.50	17		0.48	0.351	0.9	0.020	6.0
120_U2	0.33	21		0.50	0.399	1.0	0.021	5.5
40_U3	0.34	22		0.35	0.190	0.5	0.004	2.0
60_U3	0.28	24		0.40	0.250	0.6	0.014	5.7
80_U3	0.23	25		0.45	0.298	0.7	0.009	3.1
100_U3	0.19	28		0.48	0.345	0.9	0.009	2.7
120_U3	0.26	23		0.52	0.387	1.0	0.010	2.5
40_B1	2.00	9	9	0.30	0.221	0.6	0.046	24.0
60_B1	2.10	8		0.35	0.286	0.7	0.071	29.7
80_B1	1.71	9	9	0.39	0.339	0.8	0.067	22.9
100_B1	1.28	11		0.44	0.376	0.9	0.058	17.3
120_B1	1.05	12	11	0.48	0.417	1.0	0.055	14.3
40_B2	1.07	12		0.32	0.209	0.5	0.031	15.8
60_B2	1.12	12		0.38	0.264	0.7	0.043	18.1
80_B2	0.79	14		0.43	0.311	0.8	0.034	11.8
100_B2	0.68	15		0.46	0.359	0.9	0.036	10.5
120_B2	0.56	16		0.50	0.403	1.0	0.032	8.2
40_He1	5.99	5	5	0.26	0.260	0.6	0.097	50.2
60_He1	4.53	6		0.32	0.316	0.8	0.110	46.1
80_He1	4.44	6	6	0.35	0.377	0.9	0.123	42.2
100_He1	2.62	7		0.41	0.409	1.0	0.104	30.7
120_He1	2.25	8	8	0.45	0.442	1.1	0.089	23.1
40_He2	1.61	10		0.31	0.219	0.5	0.035	18.2
60_He2	1.51	10		0.36	0.279	0.7	0.055	22.8
80_He2	1.59	10		0.40	0.330	0.8	0.054	18.5
100_He2	1.06	12		0.45	0.370	0.9	0.045	13.4
120_He2	1.00	12		0.48	0.416	1.0	0.048	12.4
40_He3	1.09	12		0.32	0.211	0.5	0.029	15.1
60_He3	1.12	12		0.38	0.263	0.7	0.048	19.9
80_He3	1.01	12		0.42	0.315	0.8	0.045	15.3
100_He3	0.55	16		0.47	0.355	0.9	0.035	10.3
120_He3	0.87	13		0.50	0.404	1.0	0.038	9.7
40_S	0.18			0.35	0.190	0.5	0.004	2.2
60_S	0.36	21		0.41	0.247	0.6	0.014	5.8
80_S	0.26	24		0.45	0.299	0.7	0.010	3.5
100_S	0.32	21		0.49	0.343	0.9	0.011	3.3
120_S	0.27	23		0.51	0.393	1.0	0.013	3.4

"Kleine Rinne" - E2								
	λ	k_{st}	k_{st} 1D-HN	v	H_M6	H/h _{veg}	Δh [m]	Δh [%]
40_leer	0.14	30	30	0.31	0.217	0.5		
60_leer	0.17	30		0.36	0.274	0.7		
80_leer	0.07	44	40	0.41	0.328	0.8		
100_leer	0.10	37		0.44	0.381	1.0		
120_leer	0.09	40	40	0.46	0.433	1.1		
40_U1	0.75	14	14	0.30	0.224	0.6	0.015	6.9
60_U1	0.63	15		0.36	0.281	0.7	0.014	5.3
80_U1	0.78	14	13	0.39	0.338	0.8	0.024	7.5
100_U1	0.62	15		0.43	0.390	1.0	0.027	7.1
120_U1	0.77	13	14	0.45	0.447	1.1	0.024	5.6
40_U2	0.45	19		0.30	0.220	0.5	0.007	3.4
60_U2						0.0		
80_U2	0.44	18		0.40	0.335	0.8	0.015	4.5
100_U2	0.45	18		0.43	0.387	1.0	0.017	4.4
120_U2	0.36	20		0.45	0.442	1.1	0.014	3.4
40_U3	0.35	21		0.30	0.219	0.5	0.005	2.5
60_U3	0.27	23		0.36	0.275	0.7	0.003	1.1
80_U3	0.31	22		0.40	0.330	0.8	0.009	2.7
100_U3	0.30	22		0.44	0.381	1.0	0.008	2.1
120_U3	0.07	46		0.46	0.437	1.1	0.005	1.2
40_B1	2.57	8	8	0.27	0.246	0.6	0.047	21.7
60_B1	2.08	8		0.33	0.306	0.8	0.052	19.0
80_B1	1.39	10	10	0.37	0.358	0.9	0.047	14.5
100_B1	1.22	11		0.41	0.404	1.0	0.047	12.3
120_B1	0.94	12	12	0.44	0.455	1.1	0.038	9.0
40_B2	1.14	12		0.29	0.229	0.6	0.026	12.3
60_B2	1.12	11		0.35	0.289	0.7	0.030	10.9
80_B2	0.75	14		0.39	0.342	0.9	0.030	9.1
100_B2	0.68	14		0.42	0.394	1.0	0.026	6.9
120_B2	0.45	18		0.45	0.440	1.1	0.021	4.9
40_He1	6.18	5	5	0.24	0.277	0.7	0.089	41.3
60_He1	4.12	6		0.30	0.330	0.8	0.084	30.9
80_He1	3.91	6	6	0.34	0.396	1.0	0.101	31.1
100_He1	2.56	7		0.38	0.438	1.1	0.088	23.4
120_He1	2.11	8	8	0.42	0.473	1.2	0.076	17.8
40_He2	1.61	10		0.28	0.241	0.6	0.034	15.8
60_He2	1.75	9		0.33	0.302	0.8	0.039	14.3
80_He2	1.42	10		0.37	0.357	0.9	0.044	13.7
100_He2	1.16	11		0.41	0.405	1.0	0.038	10.1
120_He2	0.88	13		0.44	0.454	1.1	0.036	8.4
40_He3	1.23	11		0.29	0.233	0.6	0.027	12.7
60_He3	1.44	10		0.35	0.289	0.7	0.035	12.7
80_He3	1.19	11		0.38	0.349	0.9	0.038	11.6
100_He3	0.86	13		0.42	0.397	1.0	0.029	7.8
120_He3	0.60	15		0.45	0.446	1.1	0.027	6.2
40_S	0.35	21		0.30	0.220	0.6	0.007	3.1
60_S	0.33	21		0.36	0.276	0.7	0.004	1.5
80_S	0.32	21		0.40	0.334	0.8	0.011	3.5
100_S	0.30	22		0.44	0.383	1.0	0.010	2.7
120_S	0.31	21		0.46	0.435	1.1	0.007	1.7

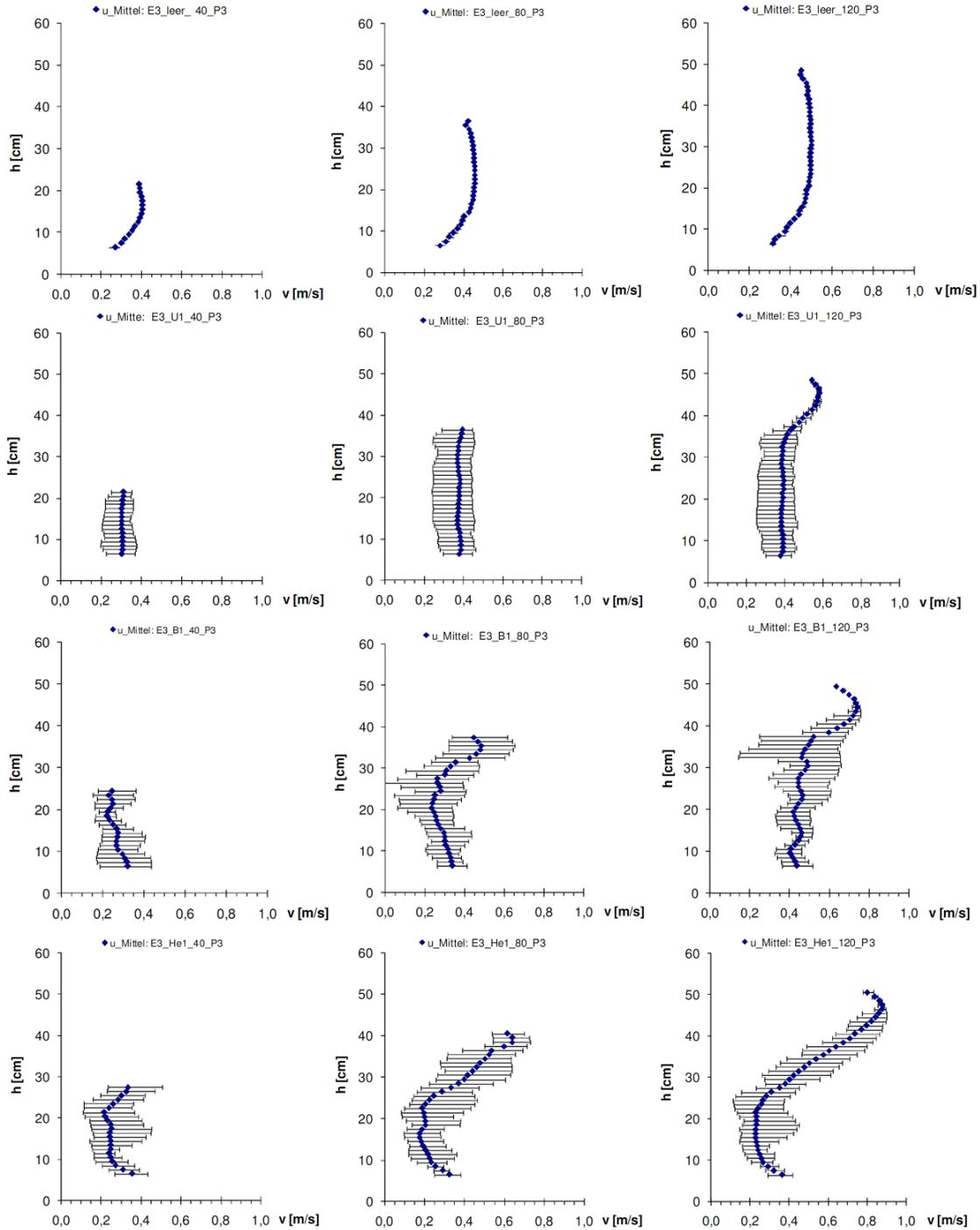
"Kleine Rinne" - E3								
	λ	k_{st}	k_{st} 1D-HN	v	H_M6	H/h _{veg}	Δh [m]	Δh [%]
40_leer	0.14	33	40	0.27	0.245	0.6		
60_leer	0.12	35		0.32	0.315	0.8		
80_leer	0.11	36	40	0.34	0.389	1.0		
100_leer	0.09	40		0.37	0.455	1.1		
120_leer	0.10	37	40	0.39	0.515	1.3		
40_U1	0.67	15	15	0.27	0.248	0.6	0.010	4.0
60_U1	0.67	15		0.31	0.320	0.8	0.013	4.1
80_U1	0.73	14	14	0.34	0.393	1.0	0.015	4.0
100_U1	0.60	15		0.36	0.460	1.2	0.015	3.3
120_U1	0.51	16	16	0.38	0.520	1.3	0.011	2.2
40_U2	0.55	17		0.27	0.247	0.6	0.006	2.6
60_U2	0.42	19		0.31	0.319	0.8	0.008	2.5
80_U2	0.48	17		0.34	0.391	1.0	0.008	2.0
100_U2	0.40	19		0.36	0.459	1.1	0.009	1.9
120_U2	0.41	18		0.38	0.520	1.3	0.009	1.7
40_U3	0.38	20		0.27	0.247	0.6	0.005	2.0
60_U3	0.32	22		0.32	0.317	0.8	0.005	1.7
80_U3	0.39	19		0.34	0.390	1.0	0.004	1.1
100_U3	0.26	23		0.36	0.458	1.1	0.005	1.1
120_U3	0.16	29		0.39	0.519	1.3	0.006	1.2
40_B1	2.60	8	8	0.25	0.268	0.7	0.040	16.4
60_B1	2.08	8		0.29	0.341	0.9	0.043	14.0
80_B1	1.85	9	9	0.32	0.411	1.0	0.038	10.0
100_B1	1.07	11		0.36	0.469	1.2	0.027	6.0
120_B1	0.83	13	12	0.38	0.526	1.3	0.024	4.7
40_B2	1.22	11		0.26	0.256	0.6	0.022	9.0
60_B2	1.08	12		0.31	0.327	0.8	0.025	8.1
80_B2	0.71	14		0.34	0.397	1.0	0.017	4.3
100_B2	0.62	15		0.36	0.462	1.2	0.015	3.3
120_B2	0.53	16		0.38	0.521	1.3	0.013	2.6
40_He1	5.43	5	5	0.23	0.290	0.7	0.070	29.2
60_He1	3.73	6		0.28	0.356	0.9	0.066	21.2
80_He1	3.56	6	6	0.31	0.431	1.1	0.071	18.5
100_He1	1.96	8		0.35	0.481	1.2	0.049	10.9
120_He1	1.72	9	9	0.37	0.535	1.3	0.046	8.9
40_He2	1.73	9		0.25	0.264	0.7	0.027	11.0
60_He2	1.87	9		0.30	0.337	0.8	0.033	10.6
80_He2	1.41	10		0.33	0.407	1.0	0.030	7.9
100_He2	0.74	14		0.35	0.470	1.2	0.021	4.7
120_He2	0.83	13		0.38	0.528	1.3	0.024	4.7
40_He3	1.12	12		0.26	0.256	0.6	0.021	8.6
60_He3	1.33	10		0.31	0.328	0.8	0.030	9.6
80_He3	1.02	12		0.33	0.400	1.0	0.024	6.2
100_He3	0.78	13		0.36	0.465	1.2	0.019	4.3
120_He3	0.65	14		0.38	0.525	1.3	0.019	3.7
40_S	0.34	21		0.27	0.249	0.6	0.005	1.9
60_S	0.37	20		0.32	0.317	0.8	0.006	1.9
80_S	0.42	18		0.34	0.393	1.0	0.007	1.8
100_S	0.37	19		0.36	0.459	1.1	0.006	1.4
120_S	0.29	22		0.39	0.518	1.3	0.007	1.4

A 05: u-Schwankungen

„Große Rinne“

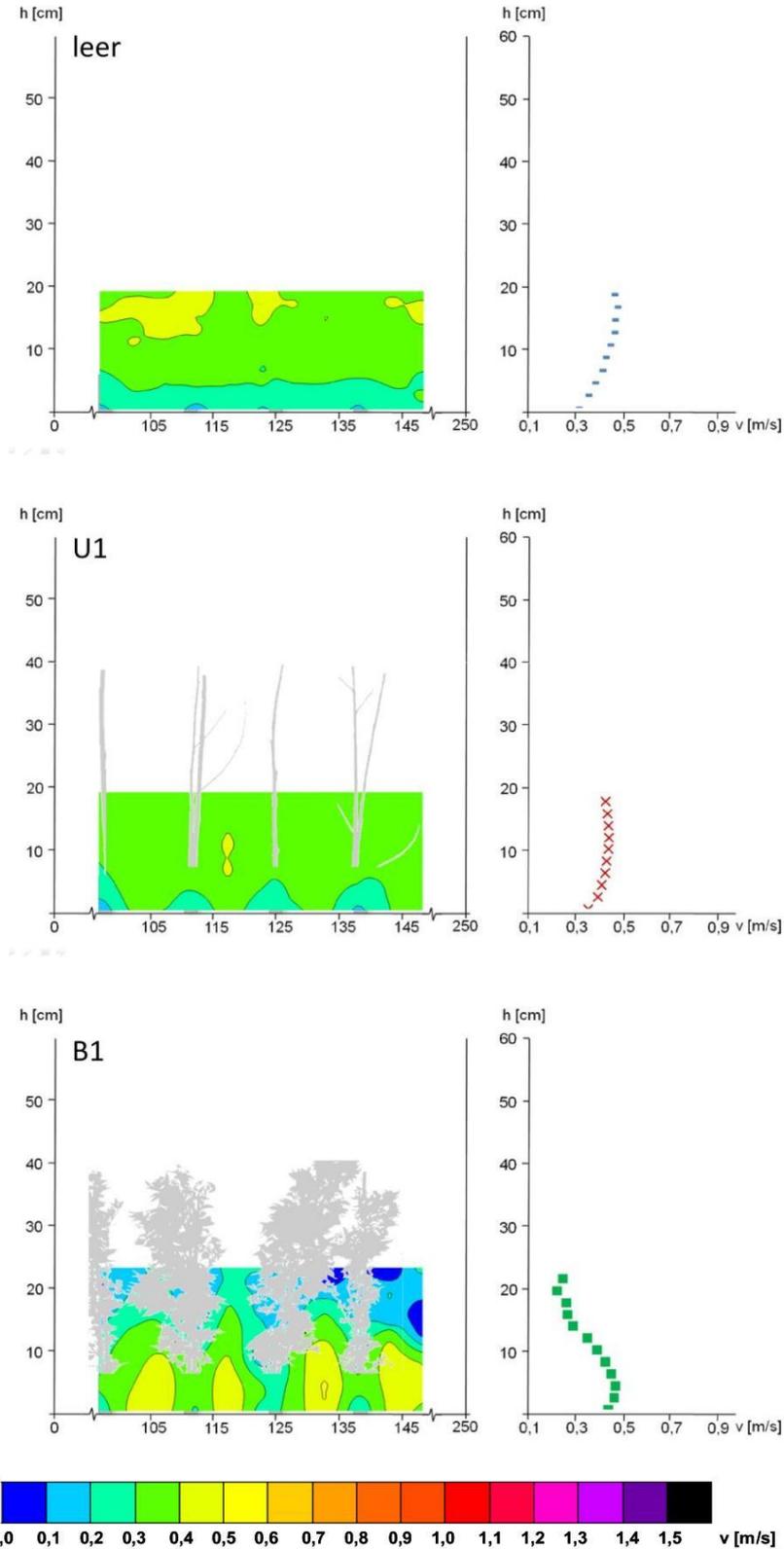


„Kleine Rinne“



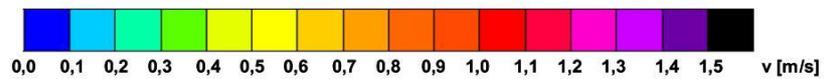
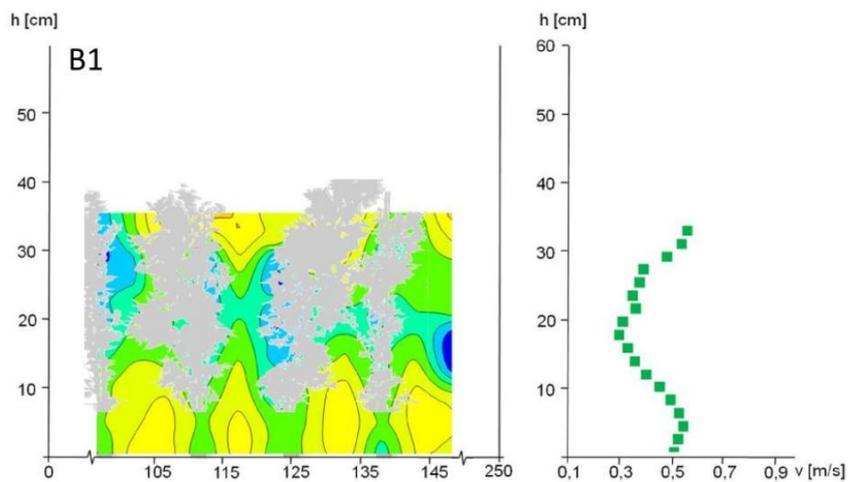
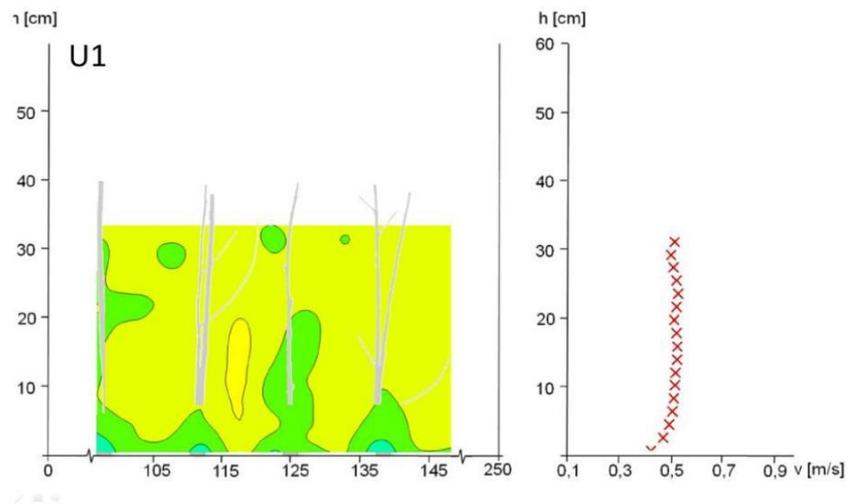
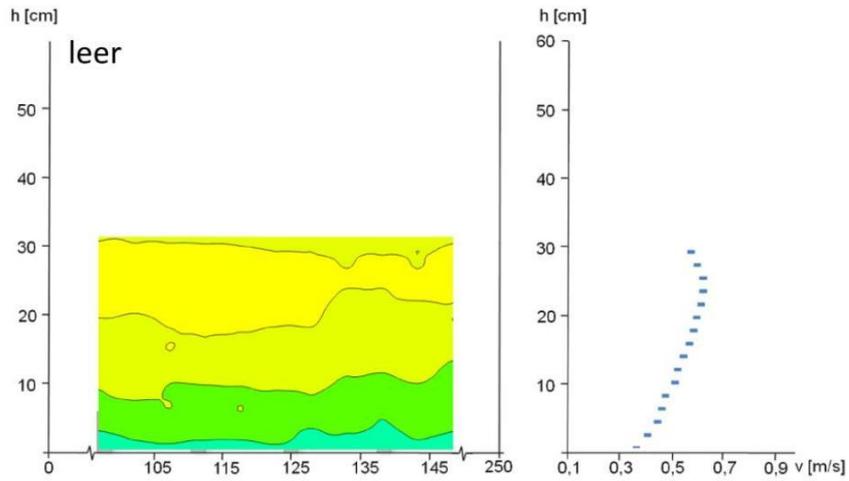
A 06: Geschwindigkeitsisotachendiagramme

„Große Rinne“ 200 Liter



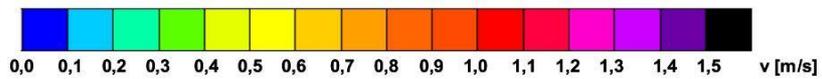
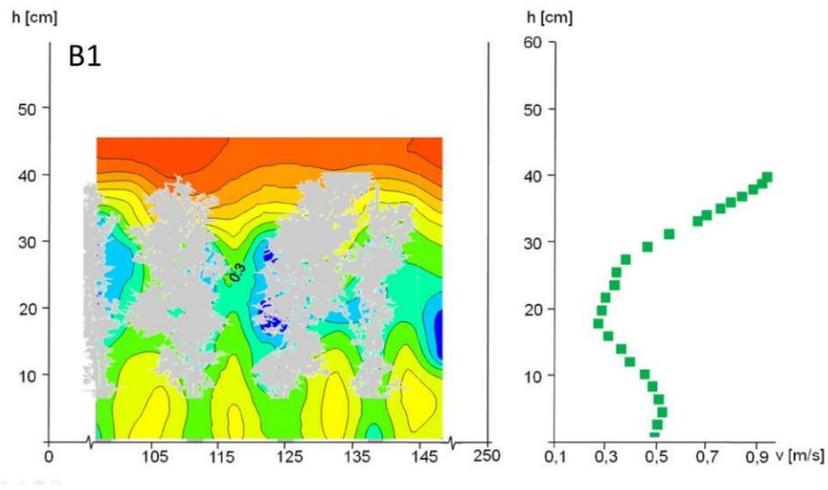
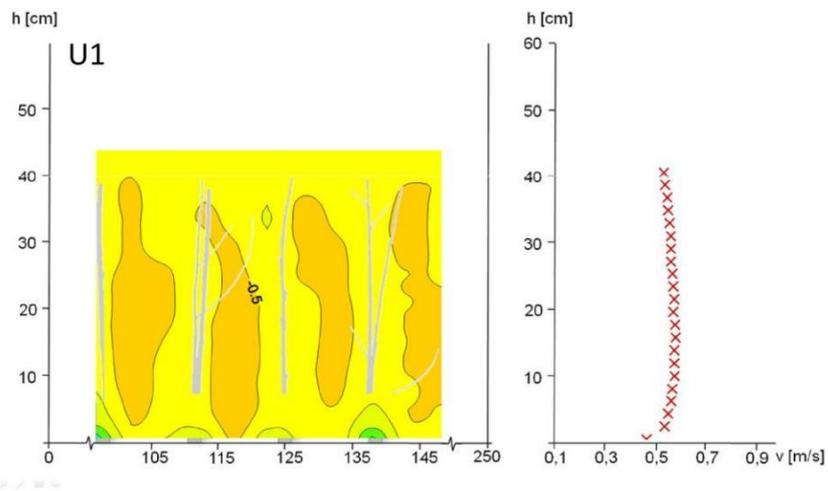
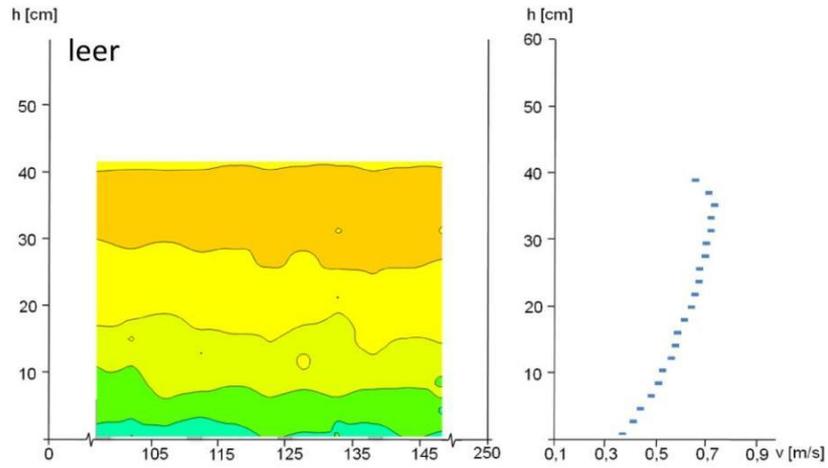
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Große Rinne“ 400 Liter



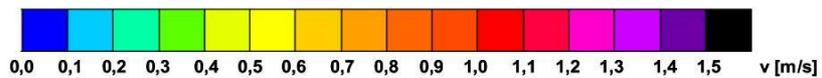
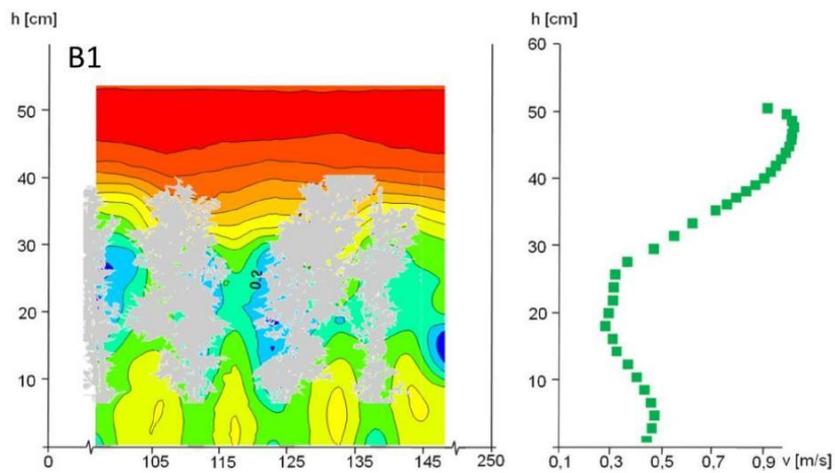
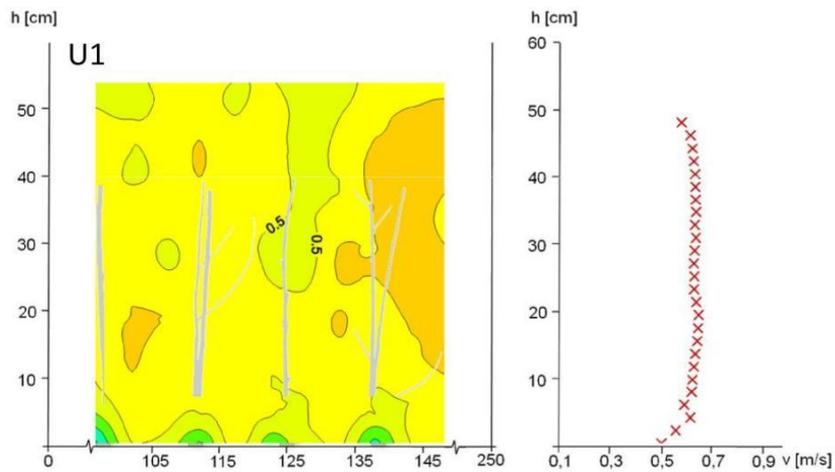
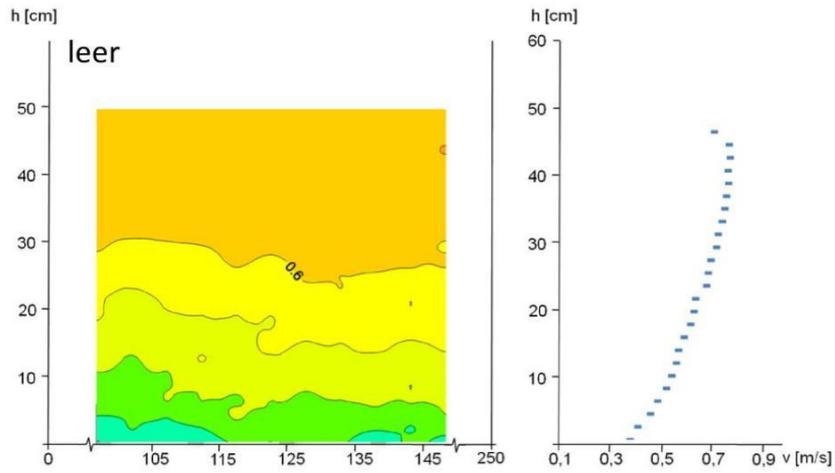
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Große Rinne“ 600 Liter



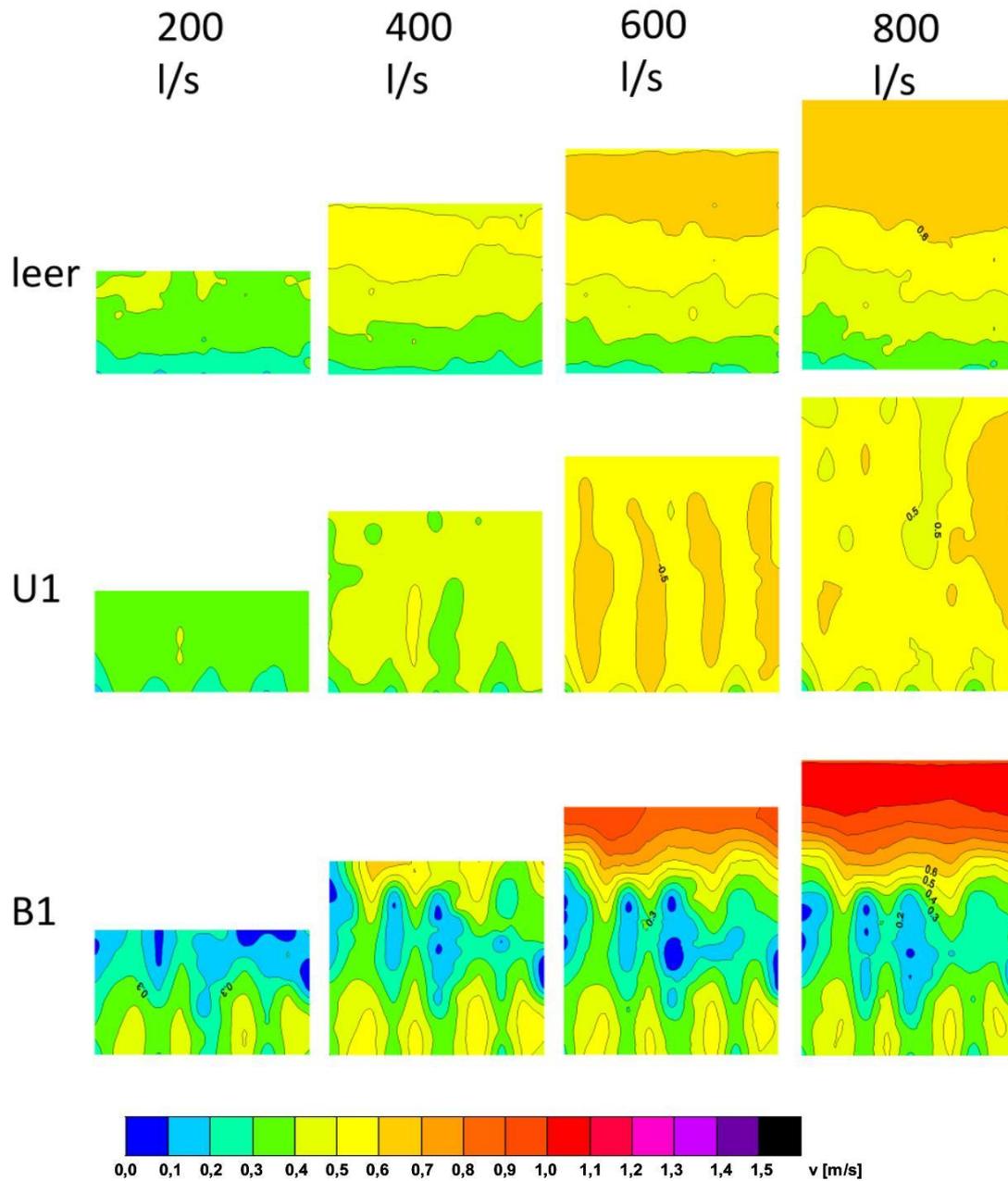
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Große Rinne“ 800 Liter



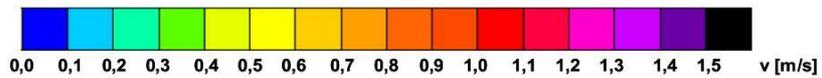
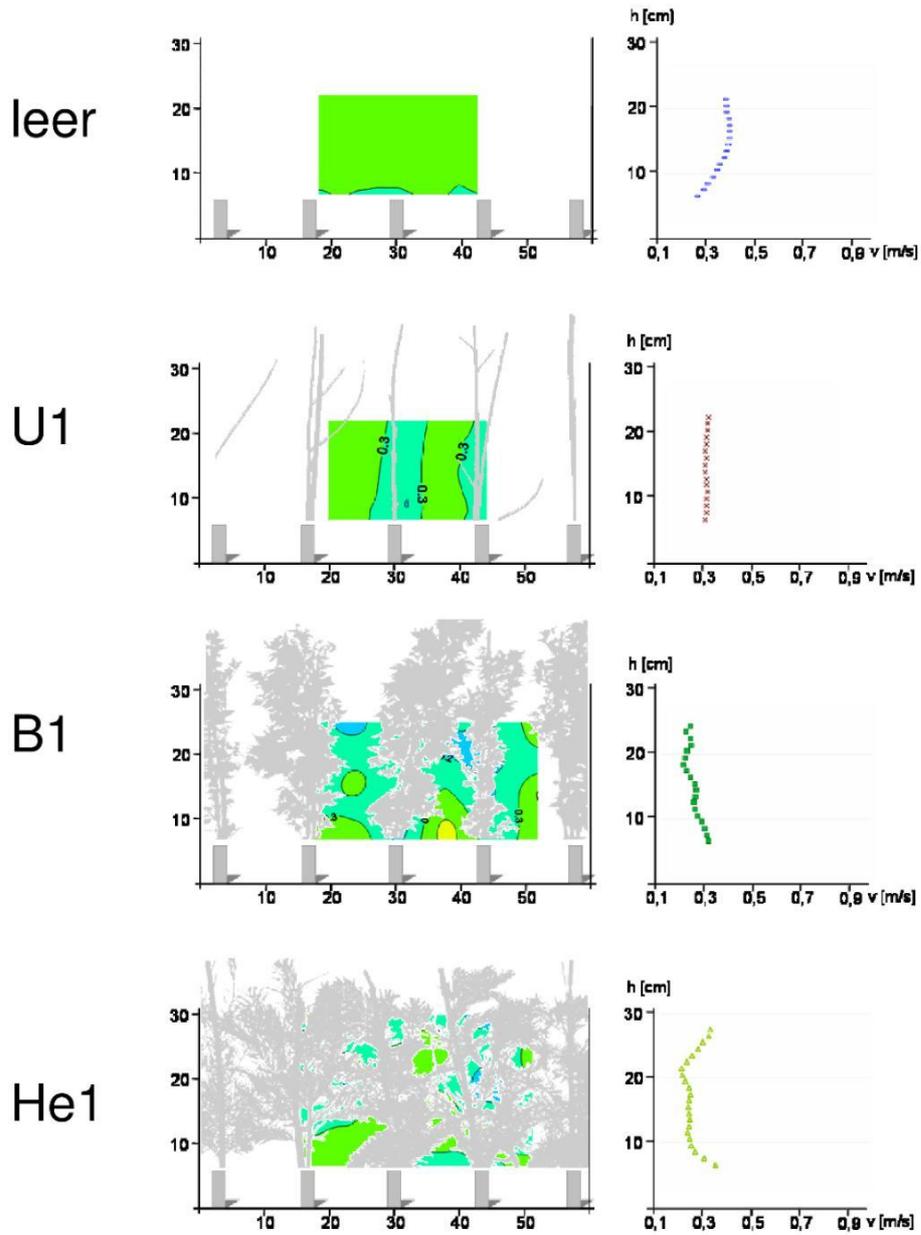
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Große Rinne“ alle



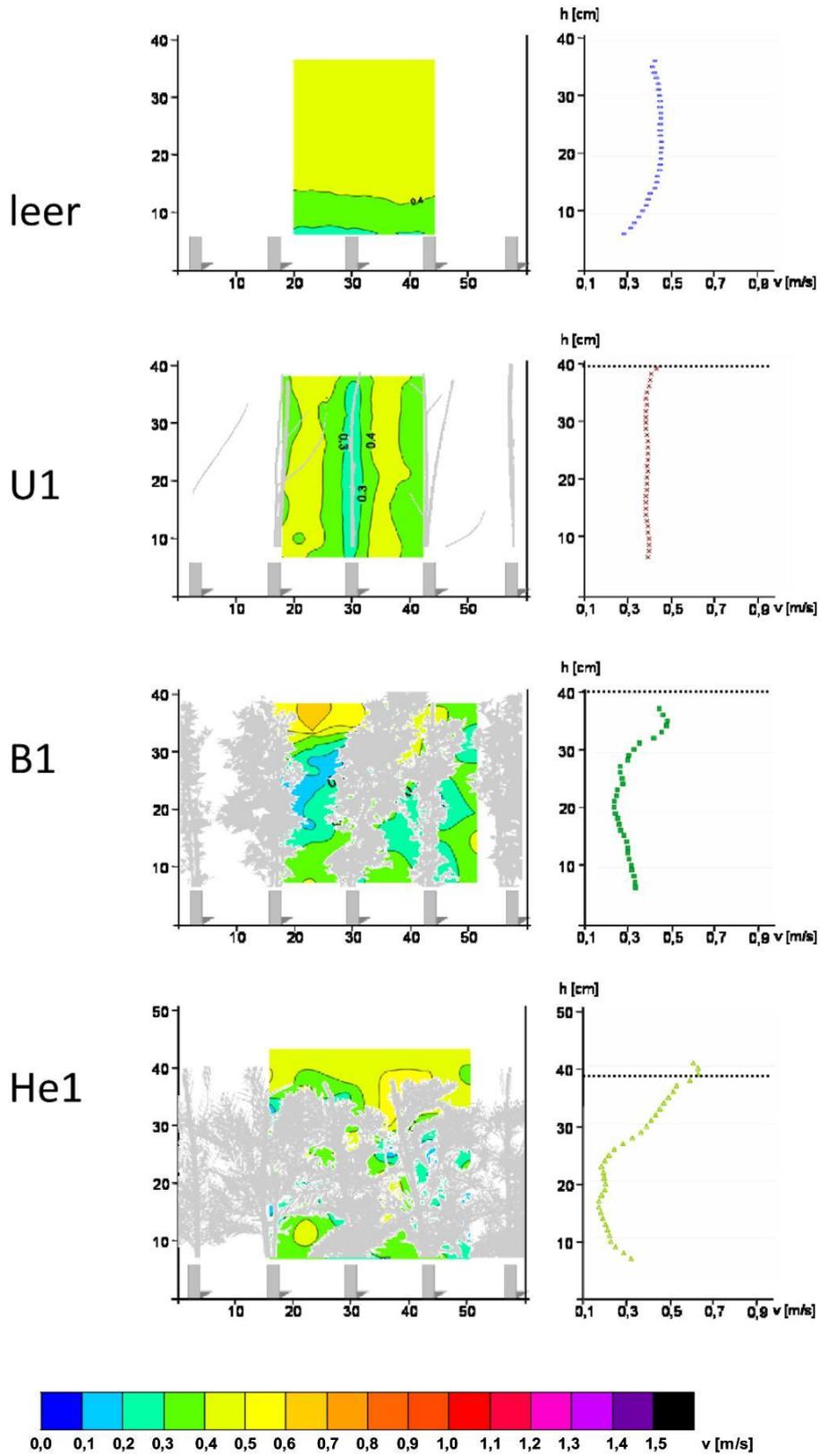
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Kleine Rinne“ E3_40 Liter



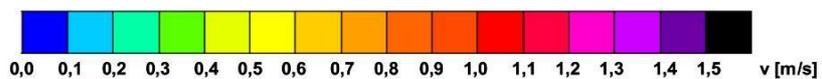
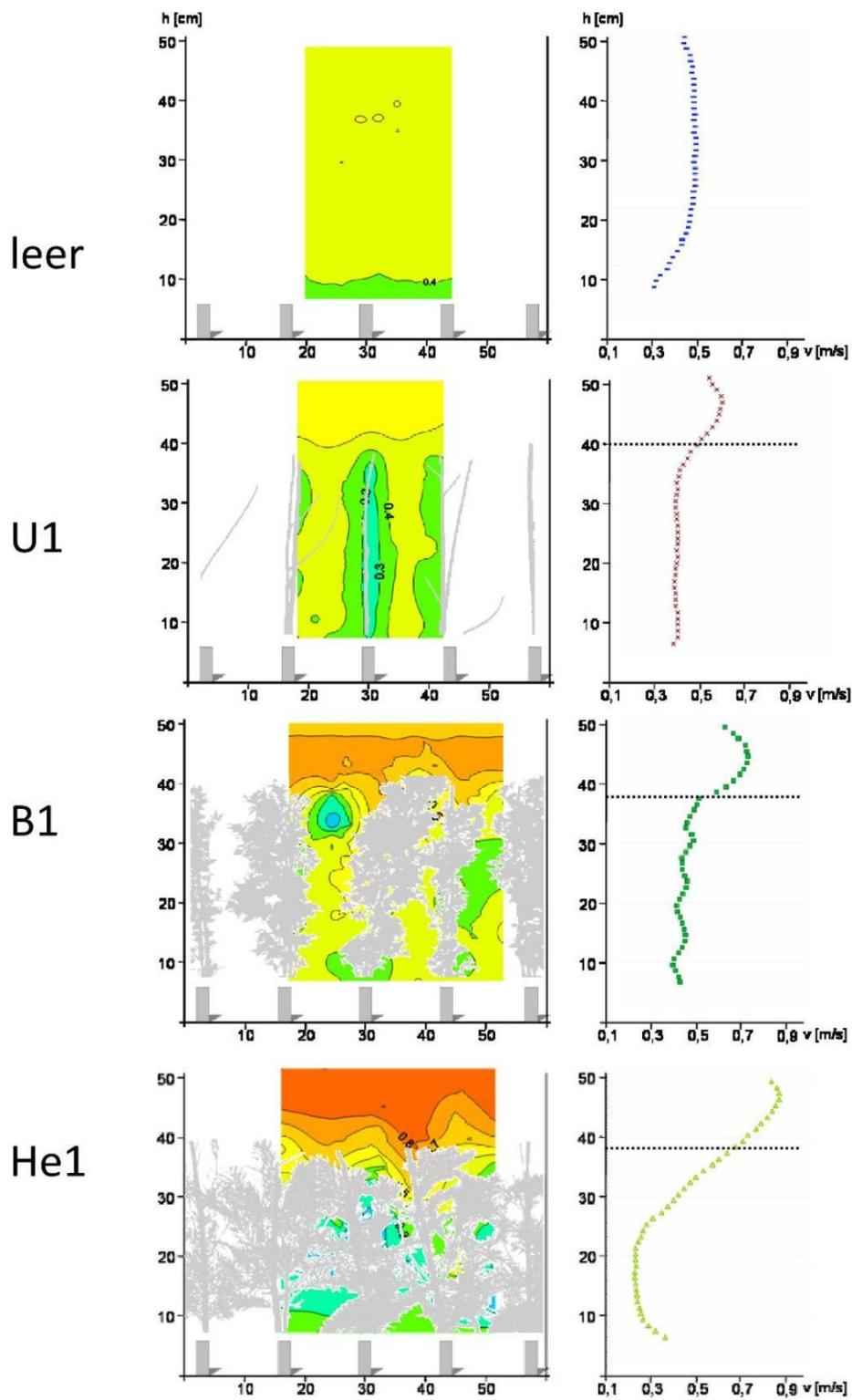
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Kleine Rinne“ E3_80 Liter



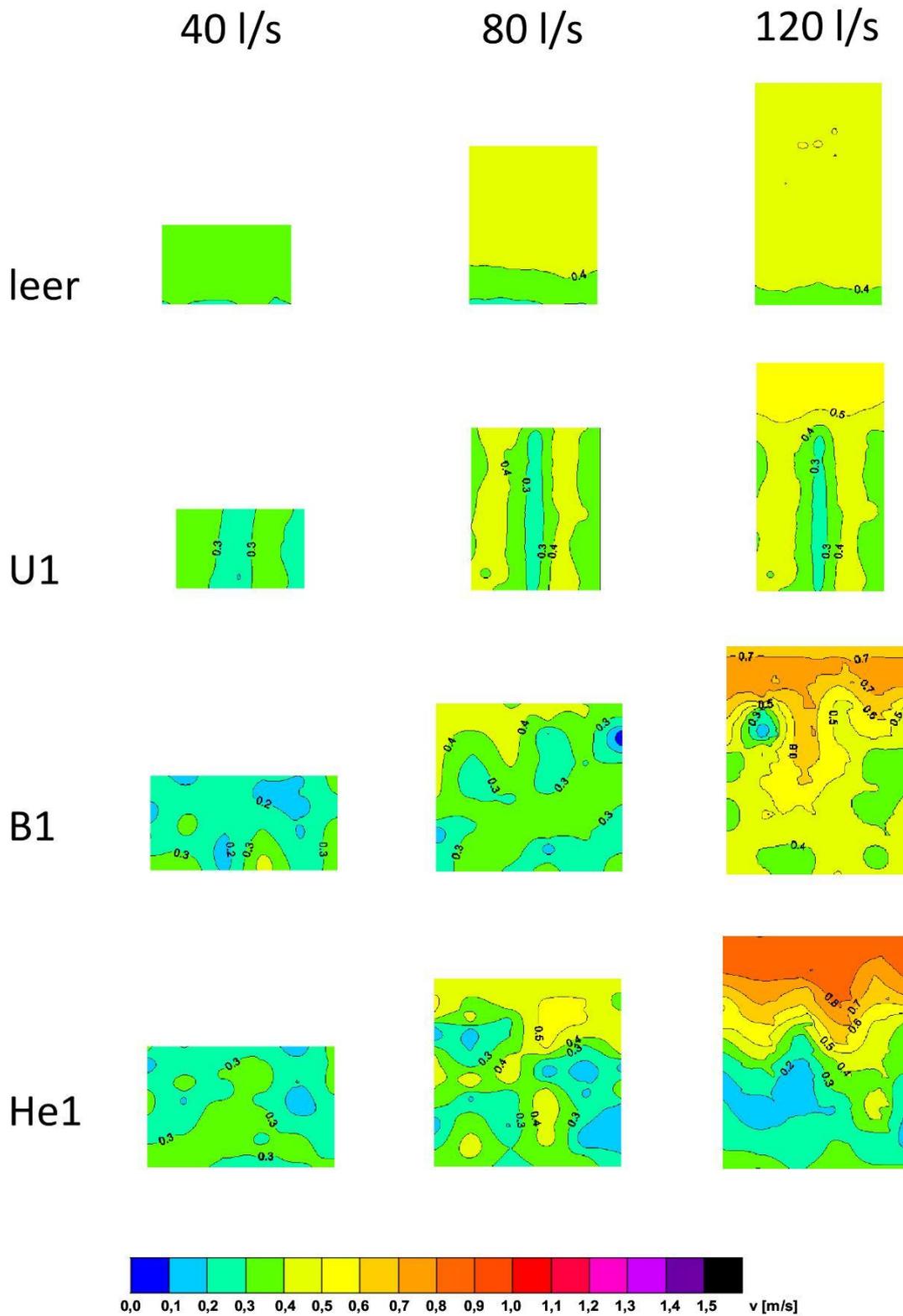
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Kleine Rinne“ E3_120 Liter



Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

„Kleine Rinne“ E3_alle



Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

A 07: Längsschnitte

„Große Rinne“

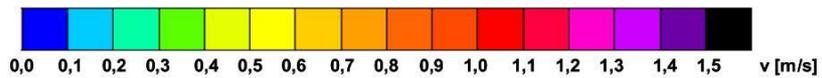
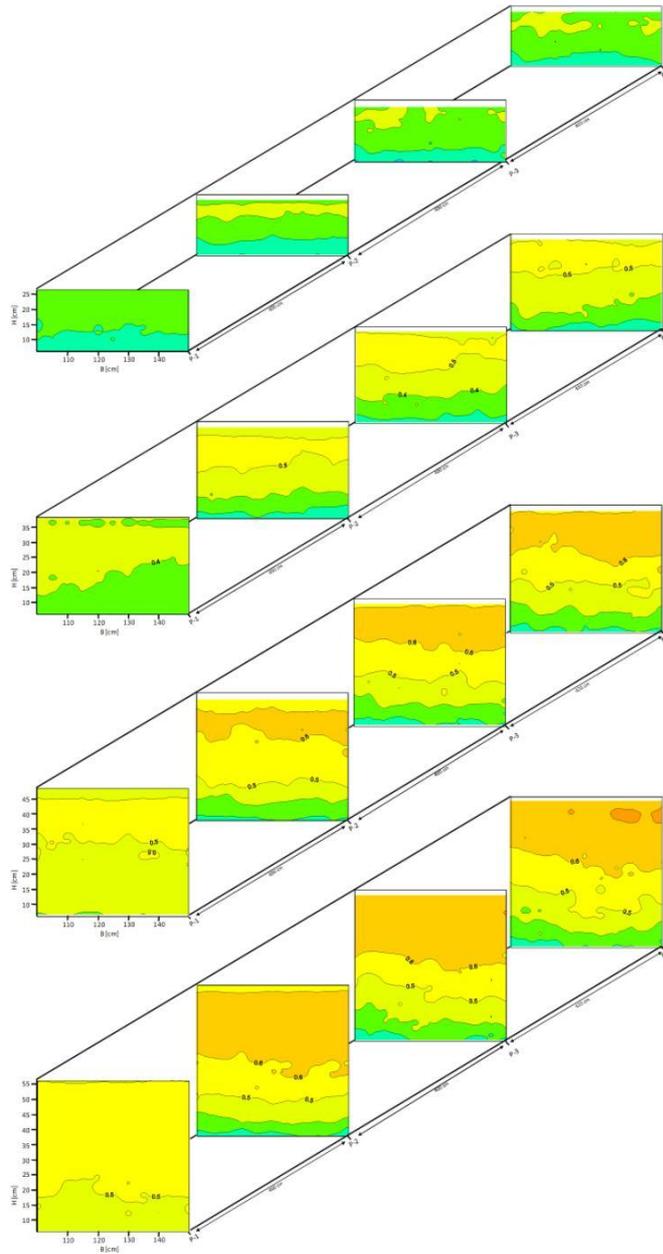
GR_leer

200 l/s

400 l/s

600 l/s

800 l/s



Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

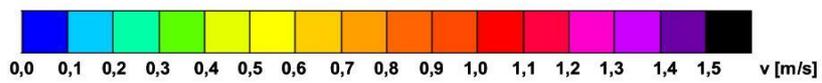
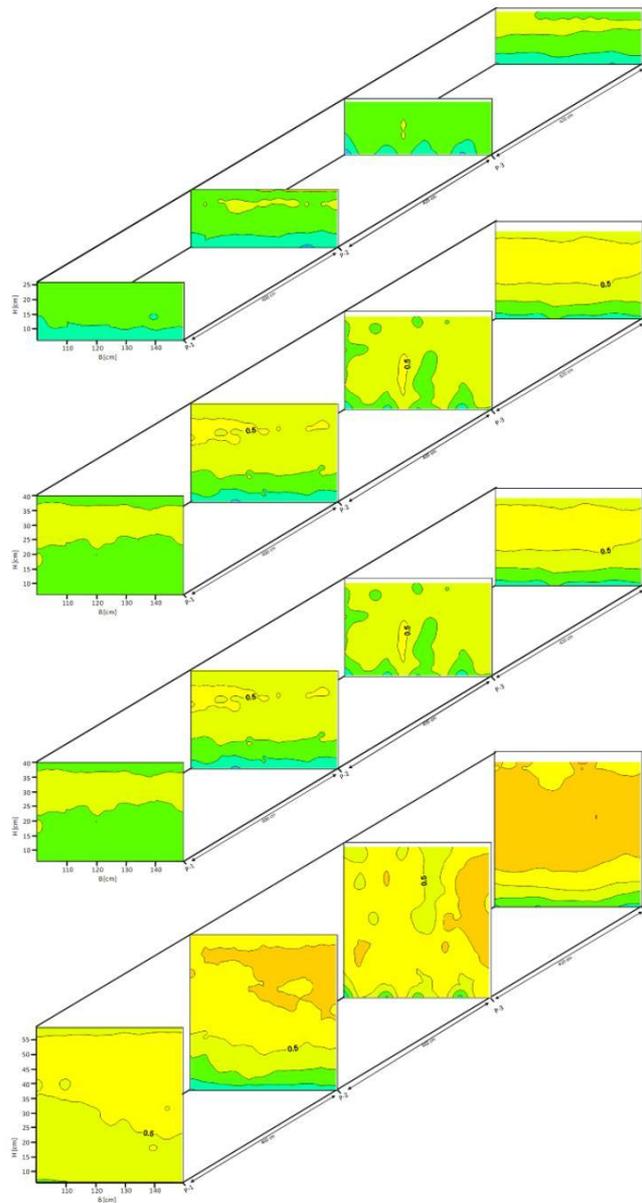
GR_U1

200 l/s

400 l/s

600 l/s

800 l/s



Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

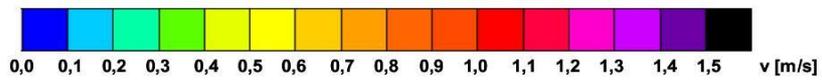
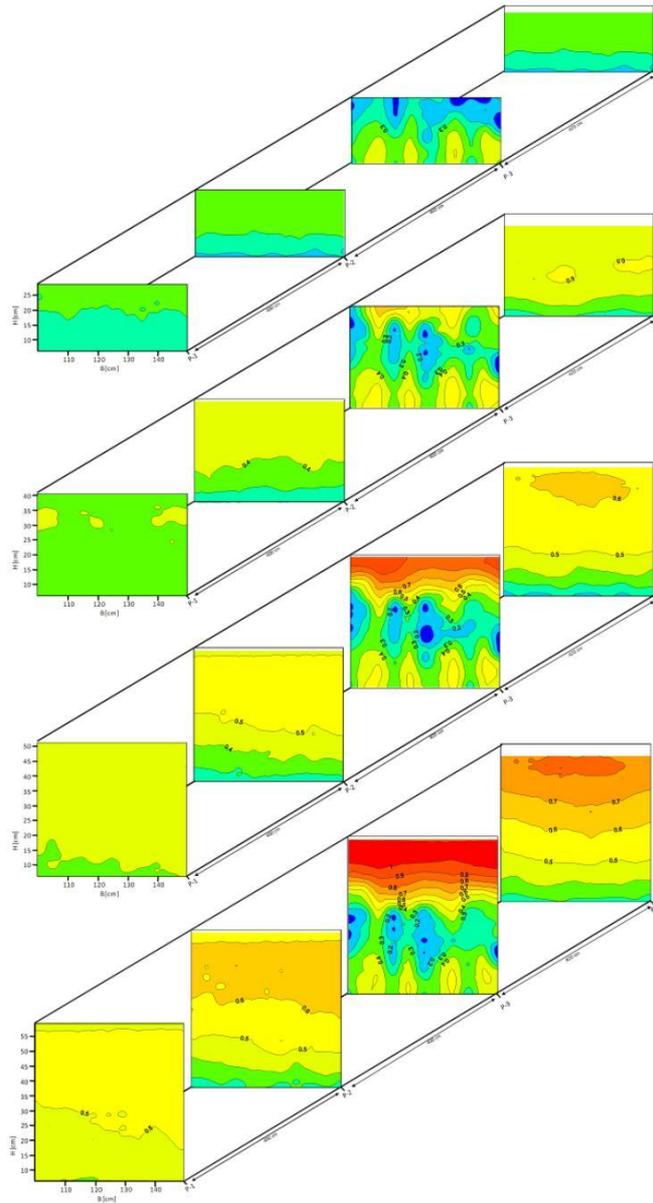
GR_B1

200 l/s

400 l/s

600 l/s

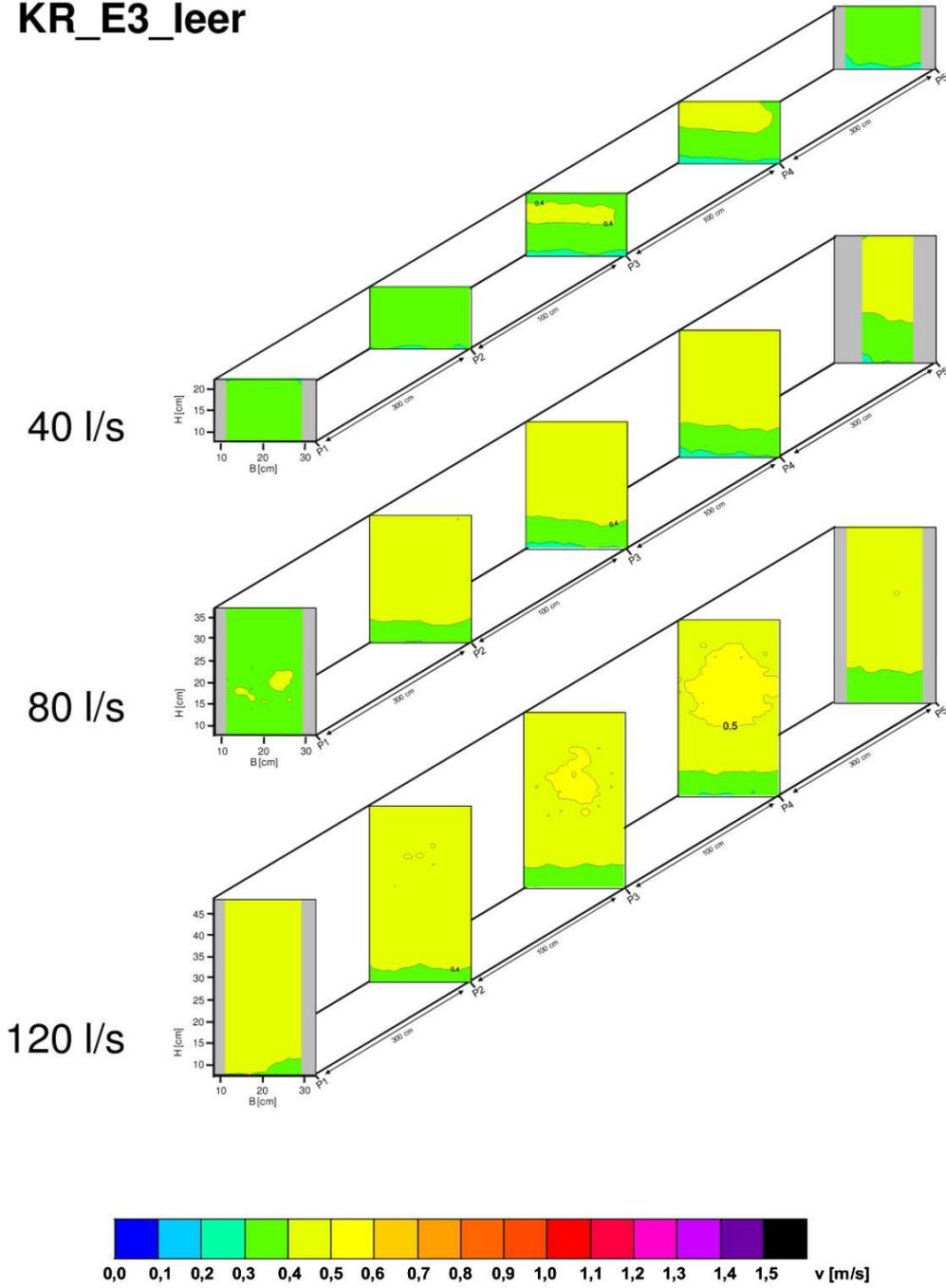
800 l/s



Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

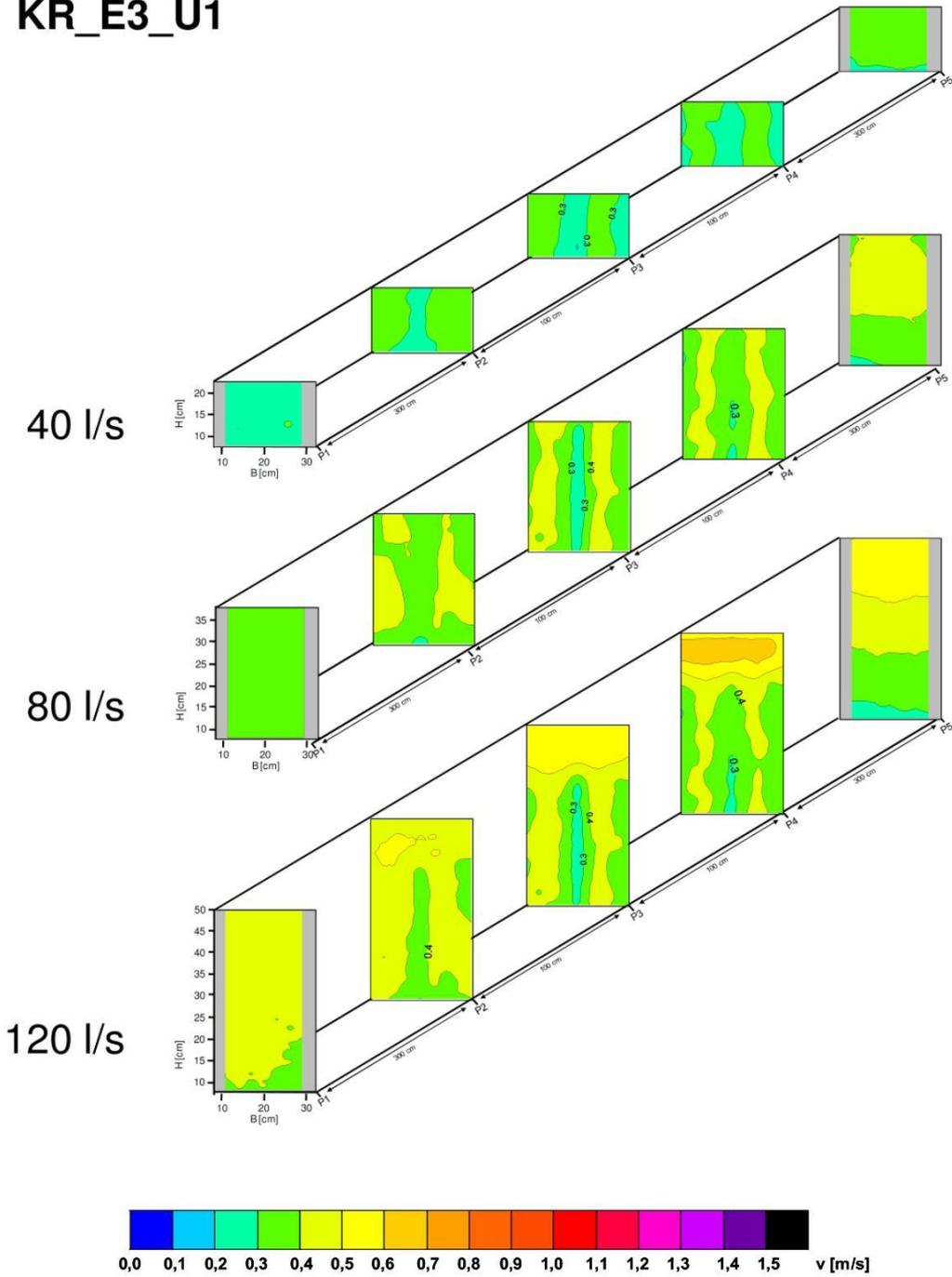
“Kleine Rinne“

KR_E3_leer



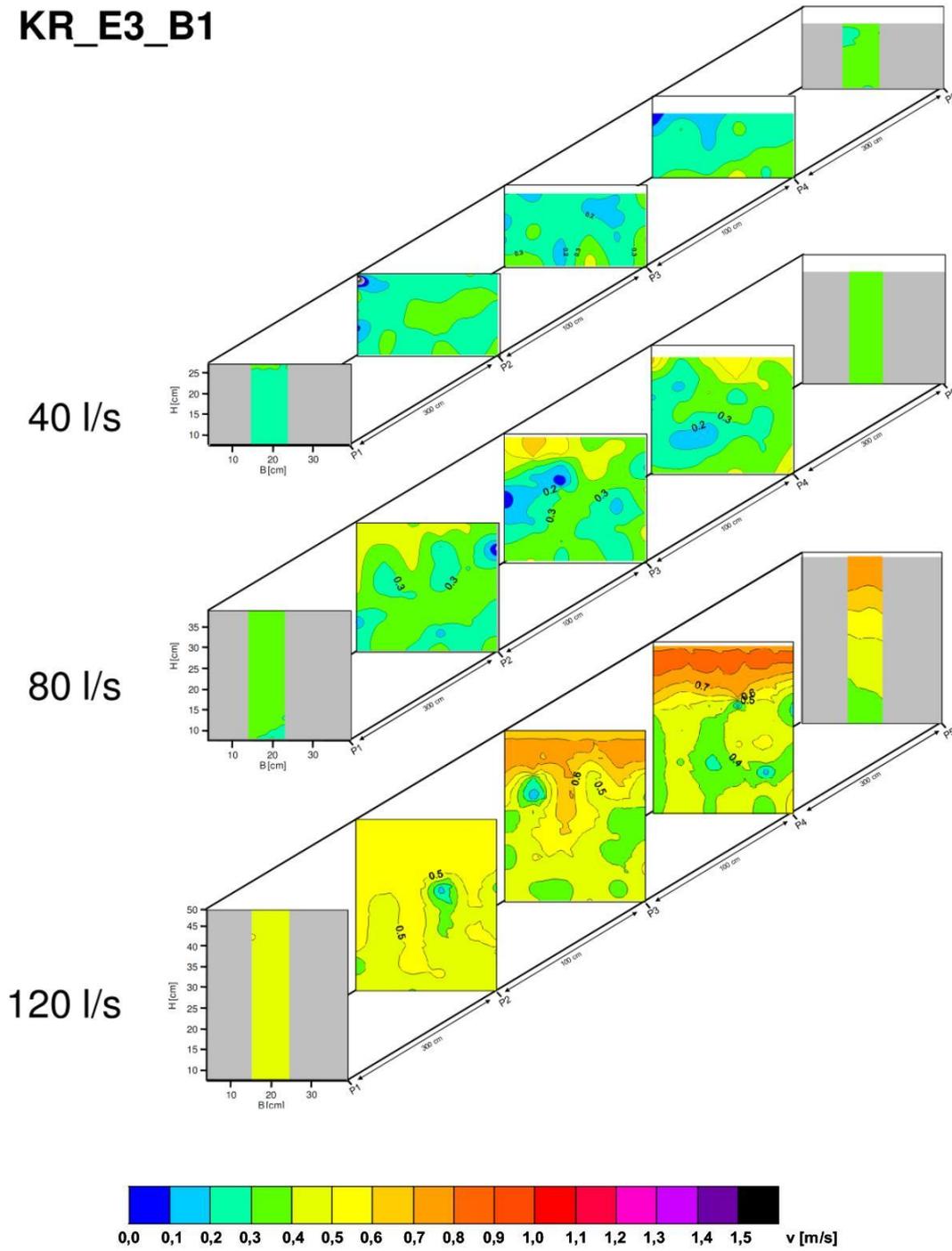
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

KR_E3_U1



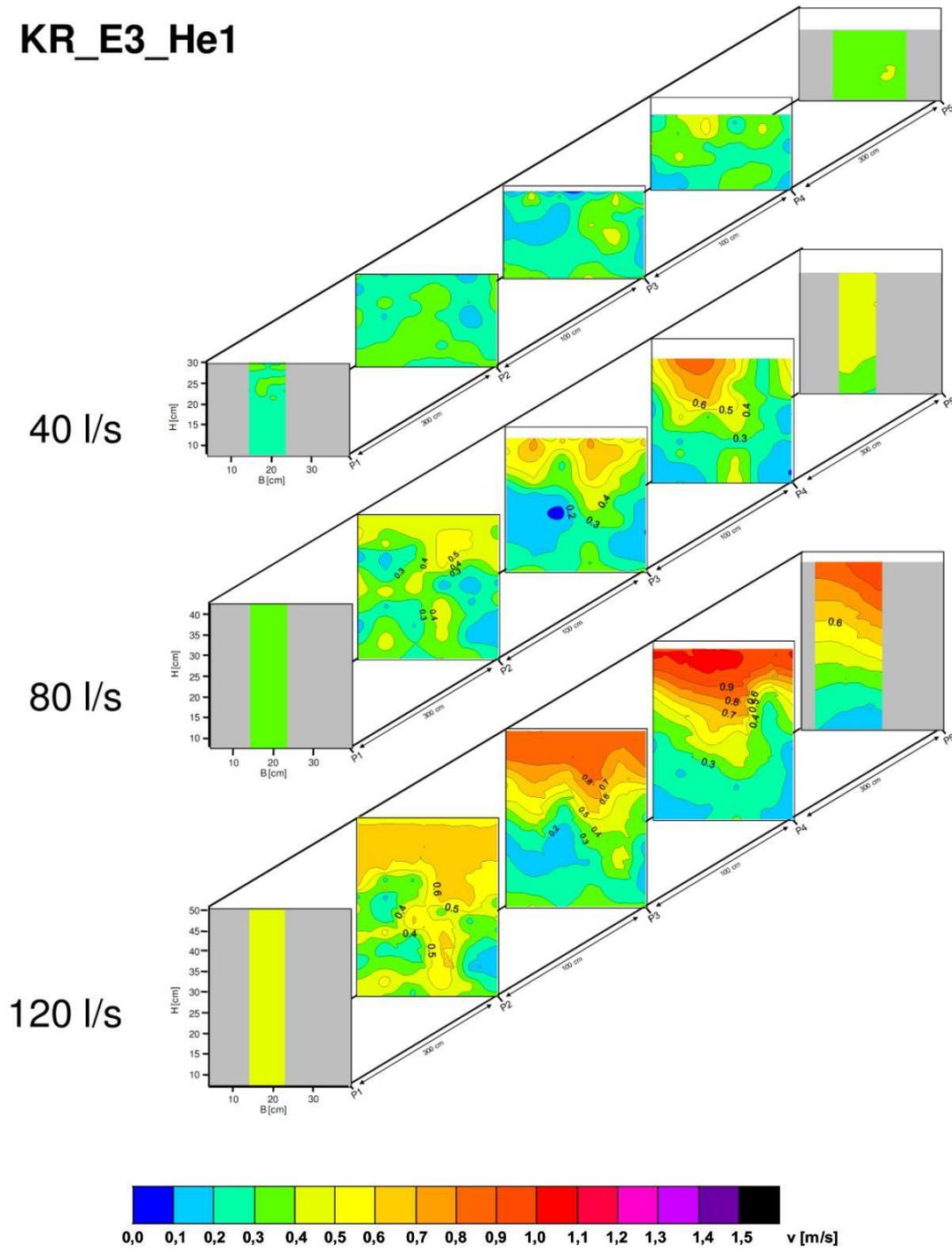
Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

KR_E3_B1



Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

KR_E3_He1



Die Fließrichtung der Isotachendiagramme zeigt in die Zeichenebene.

A 08: λ -Widerstandsbeiwert sowie Vegetationsparameter

	λ	v	H	H/h _{veg}	λ_0	λ_{veg}	ω	ω_p	c_w	ω	ω	a_z	u	c_n	cf_v	$a_x \cdot a_y$	ω_p	c_w
200_leer	0.10	0.34	0.237															
400_leer	0.11	0.45	0.355															
600_leer	0.07	0.52	0.459															
800_leer	0.11	0.58	0.548															
40_leer_E1	0.18	0.35	0.193															
60_leer_E1	0.07	0.41	0.242															
80_leer_E1	0.09	0.45	0.294															
100_leer_E1	0.09	0.49	0.340															
120_leer_E1	0.06	0.52	0.387															
40_leer_E2	0.14	0.31	0.217															
60_leer_E2	0.17	0.36	0.274															
80_leer_E2	0.07	0.41	0.328															
100_leer_E2	0.10	0.44	0.381															
120_leer_E2	0.09	0.46	0.433															
40_leer_E3	0.14	0.27	0.245															
60_leer_E3	0.12	0.32	0.315															
80_leer_E3	0.11	0.34	0.389															
100_leer_E3	0.09	0.37	0.455															
120_leer_E3	0.10	0.39	0.515															
200_U1	0.49	0.33	0.245	0.35	0.10	0.39			0.40			0.14	0.14	0.25	1.00	0.02	0.25	1.59
400_U1	0.57	0.43	0.371	0.53	0.10	0.47	0.50		0.32	0.32		0.14	0.14	0.25	1.00	0.02	0.24	1.30
600_U1	0.70	0.49	0.485	0.69	0.10	0.60			0.31			0.14	0.13	0.25	1.00	0.02	0.24	1.31
800_U1	0.63	0.56	0.570	0.81	0.10	0.53			0.23			0.14	0.13	0.25	1.00	0.02	0.23	1.03
40_U1_E1	0.66	0.33	0.200	0.50	0.10	0.56			0.70			0.14	0.15	0.25	1.00	0.02	0.27	2.61
60_U1_E1	0.65	0.39	0.256	0.64	0.10	0.55			0.54			0.14	0.16	0.25	1.00	0.02	0.29	1.88
80_U1_E1	0.65	0.43	0.307	0.77	0.10	0.55	0.55		0.45	0.48		0.14	0.15	0.25	1.00	0.02	0.27	1.66
100_U1_E1	0.61	0.48	0.349	0.87	0.10	0.51			0.37			0.14	0.14	0.25	1.00	0.02	0.25	1.46
120_U1_E1	0.69	0.50	0.404	1.01	0.10	0.59			0.37			0.14	0.12	0.25	1.00	0.02	0.21	1.72
40_U1_E2	0.75	0.30	0.224	0.56	0.10	0.65	0.55		0.72	0.42		0.14	0.16	0.25	1.00	0.02	0.28	2.61
60_U1_E2	0.63	0.36	0.281	0.70	0.10	0.53			0.48			0.14	0.15	0.25	1.00	0.02	0.26	1.84
80_U1_E2	0.78	0.39	0.338	0.85	0.10	0.68	0.61		0.50	0.48		0.14	0.16	0.25	1.00	0.02	0.28	1.81
100_U1_E2	0.62	0.43	0.390	0.98	0.10	0.52			0.33			0.14	0.14	0.25	1.00	0.02	0.25	1.33
120_U1_E2	0.77	0.45	0.447	1.12	0.10	0.67			0.38			0.14	0.14	0.25	1.00	0.02	0.24	1.56
40_U1_E3	0.67	0.27	0.248	0.62	0.10	0.57			0.58			0.14	0.15	0.25	1.00	0.02	0.27	2.15
60_U1_E3	0.67	0.31	0.320	0.80	0.10	0.57			0.44			0.14	0.16	0.25	1.00	0.02	0.28	1.60
80_U1_E3	0.73	0.34	0.393	0.98	0.10	0.63	0.54		0.40	0.38		0.14	0.15	0.25	1.00	0.02	0.27	1.51
100_U1_E3	0.60	0.36	0.460	1.15	0.10	0.50			0.27			0.14	0.14	0.25	1.00	0.02	0.25	1.09
120_U1_E3	0.51	0.38	0.520	1.30	0.10	0.41			0.20			0.14	0.12	0.25	1.00	0.02	0.21	0.91
200_U2	0.53	0.33	0.245	0.35	0.10	0.43			0.44			0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	4.79
400_U2	0.37	0.44	0.362	0.52	0.10	0.27	0.33		0.18	0.23		0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	2.08
600_U2	0.44	0.51	0.472	0.67	0.10	0.34			0.18			0.28	0.09	0.25	1.00	0.05	0.08	2.23
800_U2	0.40	0.57	0.558	0.80	0.10	0.30			0.14			0.28	0.08	0.25	1.00	0.05	0.07	1.83
200_U2a	0.48	0.33	0.243	0.35	0.10	0.38			0.39			0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	4.45
400_U2a	0.34	0.44	0.364	0.52	0.10	0.24	0.26		0.17	0.19		0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	1.95
600_U2a	0.20	0.51	0.469	0.67	0.10	0.10			0.06			0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	0.65
800_U2a	0.40	0.57	0.558	0.80	0.10	0.30			0.14			0.28	0.08	0.25	1.00	0.05	0.07	1.89
200_U2b	0.47	0.33	0.242	0.35	0.10	0.37			0.39			0.28	0.12	0.25	1.00	0.05	0.10	3.72
400_U2b	0.34	0.44	0.363	0.52	0.10	0.24	0.31		0.17	0.21		0.28	0.11	0.25	1.00	0.05	0.10	1.67
600_U2b	0.39	0.51	0.470	0.67	0.10	0.29			0.15			0.28	0.11	0.25	1.00	0.05	0.09	1.60
800_U2b	0.42	0.57	0.558	0.80	0.10	0.32			0.15			0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	1.61
40_U2_E1	0.41	0.34	0.197	0.49	0.10	0.31	0.33		0.40	0.25		0.28	0.12	0.25	1.00	0.05	0.11	3.59
60_U2_E1	0.38	0.40	0.247	0.62	0.10	0.28			0.28			0.28	0.12	0.25	1.00	0.05	0.11	2.65
80_U2_E1	0.43	0.45	0.299	0.75	0.10	0.33	0.31		0.27	0.28		0.28	0.12	0.25	1.00	0.05	0.11	2.56
100_U2_E1	0.50	0.48	0.351	0.88	0.10	0.40			0.29			0.28	0.11	0.25	1.00	0.05	0.10	2.93
120_U2_E1	0.33	0.50	0.399	1.00	0.10	0.23			0.14			0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	1.62
40_U2_E2	0.45	0.30	0.220	0.55	0.10	0.35			0.40			0.28	0.12	0.25	1.00	0.05	0.11	3.75
60_U2_E2																		
80_U2_E2	0.44	0.40	0.335	0.84	0.10	0.34	0.32		0.25	0.26		0.28	0.12	0.25	1.00	0.05	0.11	2.36
100_U2_E2	0.45	0.43	0.387	0.97	0.10	0.35			0.22			0.28	0.11	0.25	1.00	0.05	0.10	2.28
120_U2_E2	0.36	0.45	0.442	1.11	0.10	0.26			0.15			0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	1.66
40_U2_E3	0.55	0.27	0.247	0.62	0.10	0.45			0.45			0.28	0.13	0.25	1.00	0.05	0.11	4.01
60_U2_E3	0.42	0.31	0.319	0.80	0.10	0.32			0.25			0.28	0.12	0.25	1.00	0.05	0.11	2.35
80_U2_E3	0.48	0.34	0.391	0.98	0.10	0.38	0.35		0.24	0.25		0.28	0.13	0.25	1.00	0.05	0.12	2.11
100_U2_E3	0.40	0.36	0.459	1.15	0.10	0.30			0.17			0.28	0.11	0.25	1.00	0.05	0.10	1.69
120_U2_E3	0.41	0.38	0.520	1.30	0.10	0.31			0.15			0.28	0.10	0.25	1.00	0.05	0.09	1.60
200_U3	0.17	0.34	0.237	0.34	0.10	0.07			0.08			0.42	0.12	0.25	1.00	0.07	0.07	1.03
400_U3	0.16	0.45	0.356	0.51	0.10	0.06	0.08		0.04	0.05		0.42	0.12	0.25	1.00	0.07	0.07	0.60
600_U3	0.22	0.52	0.462	0.66	0.10	0.12			0.07			0.42	0.12	0.25	1.00	0.07	0.07	0.94
800_U3	0.16	0.58	0.548	0.78	0.10	0.06			0.03			0.42	0.12	0.25	1.00	0.07	0.07	0.42
40_U3_E1	0.34	0.35	0.190	0.47	0.10	0.24			0.32			0.42	0.22	0.25	1.00	0.07	0.13	2.42
60_U3_E1	0.28	0.40	0.250	0.62	0.10	0.18			0.18			0.42	0.23	0.25	1.00	0.07	0.14	1.28
80_U3_E1	0.23	0.45	0.298	0.75	0.10	0.13	0.16		0.11	0.15		0.42	0.24	0.25	1.00	0.07	0.14	0.78
100_U3_E1	0.19	0.48	0.345	0.86	0.10	0.09			0.06			0.42	0.21	0.25	1.00	0.07	0.13	0.51
120_U3_E1	0.26	0.52	0.387	0.97	0.10	0.16			0.10			0.42	0.20	0.25	1.00	0.07	0.12	0.86
40_U3_E2	0.35	0.30	0.219	0.55	0.10	0.25	0.19		0.28	0.14		0.42	0.22	0.25	1.00	0.07	0.13	2.15
60_U3_E2	0.27	0.36	0.275	0.69	0.10	0.17			0.16			0.42	0.23	0.25	1.00	0.07	0.14	1.16
80_U3_E2	0.31	0.40	0.330	0.82	0.10	0.21	0.21		0.16	0.18		0.42	0.24	0.25	1.00	0.07	0.14	1.14
100_U3_E2	0.30	0.44	0.381	0.95	0.10	0.20			0.13			0.42	0.21	0.25	1.00	0.07	0.13	1.04
120_U3_E2																		
40_U3_E3	0.38	0.27	0.247	0.62	0.10	0.28			0.28			0.42	0.22	0.25	1.00	0.07	0.13	2.16
60_U3_E3	0.32	0.32	0.317	0.79	0.10	0.22			0.17			0.42	0.23	0.25	1.00	0.07	0.14	1.24
80_U3_E3	0.39	0.34	0.390	0.98	0.10	0.29	0.20		0.19	0.15		0.42	0.24	0.25	1.00	0.		

A 08: λ -Widerstandsbeiwert sowie Vegetationsparameter

	λ	v	H	H/h _{veg}	λ_0	λ_{veg}	σ	σ	$\sigma_p + c_w$	σ	σ	a_z	n	c_n	c_f	$a_x * a_y$	ω_p	c_w
200_B1	1.77	0.30	0.269	0.67	0.10	1.67			1.55			0.14	0.85	0.25	0.65	0.02	0.98	1.58
400_B1	2.55	0.39	0.410	1.03	0.10	2.45			1.49			0.14	0.67	0.25	0.79	0.02	0.94	1.59
600_B1	1.22	0.48	0.505	1.26	0.10	1.12		1.61	0.55	1.03		0.14	0.56	0.25	0.81	0.02	0.81	0.68
800_B1	1.29	0.55	0.585	1.46	0.10	1.19			0.51			0.14	0.48	0.25	0.85	0.02	0.72	0.70
40_B1_E1	2.00	0.30	0.221	0.55	0.10	1.90			2.16			0.14	0.65	0.25	0.63	0.02	0.73	2.95
60_B1_E1	2.10	0.35	0.286	0.72	0.10	2.00			1.75			0.14	0.71	0.25	0.79	0.02	1.00	1.74
80_B1_E1	1.71	0.39	0.339	0.85	0.10	1.61		1.53	1.19	1.29		0.14	0.72	0.25	0.82	0.02	1.05	1.13
100_B1_E1	1.28	0.44	0.376	0.94	0.10	1.18			0.79			0.14	0.70	0.25	0.75	0.02	0.94	0.84
120_B1_E1	1.05	0.48	0.417	1.04	0.10	0.95			0.57			0.14	0.69	0.25	0.71	0.02	0.87	0.65
40_B1_E2	2.57	0.27	0.246	0.61	0.10	2.47			2.52			0.14	0.63	0.25	0.79	0.02	0.89	2.83
60_B1_E2	2.08	0.33	0.306	0.77	0.10	1.98			1.62			0.14	0.71	0.25	0.82	0.02	1.04	1.55
80_B1_E2	1.39	0.37	0.358	0.89	0.10	1.29		1.54	0.90	1.24		0.14	0.72	0.25	0.85	0.02	1.09	0.82
100_B1_E2	1.22	0.41	0.404	1.01	0.10	1.12			0.69			0.14	0.70	0.25	0.77	0.02	0.96	0.72
120_B1_E2	0.94	0.44	0.455	1.14	0.10	0.84			0.46			0.14	0.69	0.25	0.73	0.02	0.90	0.51
40_B1_E3	2.60	0.25	0.268	0.67	0.10	2.50			2.33			0.14	0.63	0.25	0.73	0.02	0.82	2.84
60_B1_E3	2.08	0.29	0.341	0.85	0.10	1.98			1.45			0.14	0.71	0.25	0.84	0.02	1.07	1.36
80_B1_E3	1.85	0.32	0.411	1.03	0.10	1.75		1.58	1.06	1.14		0.14	0.72	0.25	0.87	0.02	1.12	0.95
100_B1_E3	1.07	0.36	0.469	1.17	0.10	0.97			0.52			0.14	0.70	0.25	0.79	0.02	0.99	0.52
120_B1_E3	0.83	0.38	0.526	1.32	0.10	0.73			0.34			0.14	0.69	0.25	0.75	0.02	0.92	0.37
200_B2	1.03	0.31	0.260	0.65	0.10	0.93			0.89			0.28	0.74	0.25	0.50	0.05	0.33	2.70
400_B2	0.98	0.41	0.387	0.97	0.10	0.88		0.76	0.57			0.28	0.61	0.25	0.56	0.05	0.31	1.87
600_B2	0.70	0.50	0.484	1.21	0.10	0.60			0.31	0.51		0.28	0.48	0.25	0.62	0.05	0.27	1.15
800_B2	0.74	0.56	0.573	1.43	0.10	0.64			0.28			0.28	0.40	0.25	0.68	0.05	0.24	1.15
200_B2a	0.69	0.32	0.251	0.63	0.10	0.59			0.58			0.28	0.62	0.25	0.48	0.05	0.27	2.19
400_B2a	0.64	0.42	0.379	0.95	0.10	0.54			0.36	0.36		0.28	0.49	0.25	0.50	0.05	0.22	1.65
600_B2a	0.70	0.50	0.479	1.20	0.10	0.60			0.32			0.28	0.39	0.25	0.60	0.05	0.21	1.50
800_B2a	0.54	0.57	0.565	1.41	0.10	0.44			0.19			0.28	0.33	0.25	0.65	0.05	0.19	1.00
200_B2b	1.28	0.31	0.262	0.66	0.10	1.18			1.12			0.28	0.62	0.25	0.51	0.05	0.28	3.99
400_B2b	0.94	0.42	0.385	0.96	0.10	0.84			0.54	0.54		0.28	0.54	0.25	0.56	0.05	0.27	2.04
600_B2b	0.63	0.50	0.482	1.21	0.10	0.53			0.28			0.28	0.44	0.25	0.62	0.05	0.24	1.13
800_B2b	0.63	0.57	0.565	1.41	0.10	0.53			0.23			0.28	0.37	0.25	0.67	0.05	0.22	1.06
40_B2_E1	1.07	0.32	0.209	0.52	0.10	0.97			1.16			0.28	0.53	0.25	0.49	0.05	0.23	5.01
60_B2_E1	1.12	0.38	0.264	0.66	0.10	1.02			0.96	0.75		0.28	0.61	0.25	0.55	0.05	0.30	3.22
80_B2_E1	0.79	0.43	0.311	0.78	0.10	0.69		0.74	0.55	0.67		0.28	0.62	0.25	0.58	0.05	0.32	1.73
100_B2_E1	0.68	0.46	0.359	0.90	0.10	0.58			0.40			0.28	0.60	0.25	0.61	0.05	0.33	1.23
120_B2_E1	0.56	0.50	0.403	1.01	0.10	0.46			0.29			0.28	0.59	0.25	0.64	0.05	0.34	0.85
40_B2_E2	1.14	0.29	0.229	0.57	0.10	1.04			1.14			0.28	0.53	0.25	0.55	0.05	0.26	4.38
60_B2_E2	1.12	0.35	0.289	0.72	0.10	1.02			0.89			0.28	0.61	0.25	0.58	0.05	0.32	2.81
80_B2_E2	0.75	0.39	0.342	0.85	0.10	0.65		0.73	0.48	0.61		0.28	0.62	0.25	0.60	0.05	0.33	1.43
100_B2_E2	0.68	0.42	0.394	0.98	0.10	0.58			0.37			0.28	0.60	0.25	0.63	0.05	0.34	1.09
120_B2_E2	0.45	0.45	0.440	1.10	0.10	0.35			0.20			0.28	0.59	0.25	0.66	0.05	0.35	0.56
40_B2_E3	1.22	0.26	0.256	0.64	0.10	1.12			1.09			0.28	0.53	0.25	0.62	0.05	0.29	3.72
60_B2_E3	1.08	0.31	0.327	0.82	0.10	0.98			0.75			0.28	0.61	0.25	0.63	0.05	0.34	2.19
80_B2_E3	0.71	0.34	0.397	0.99	0.10	0.61		0.73	0.39	0.54		0.28	0.62	0.25	0.64	0.05	0.35	1.09
100_B2_E3	0.62	0.36	0.462	1.16	0.10	0.52			0.28			0.28	0.60	0.25	0.66	0.05	0.35	0.80
120_B2_E3	0.53	0.38	0.521	1.30	0.10	0.43			0.20			0.28	0.59	0.25	0.70	0.05	0.37	0.55
200_B3	0.63	0.32	0.249	0.62	0.10	0.53			0.53			0.42	0.65	0.25	0.55	0.07	0.21	2.52
400_B3	0.51	0.43	0.370	0.93	0.10	0.41			0.28	0.29		0.42	0.66	0.25	0.61	0.07	0.24	1.15
600_B3	0.47	0.51	0.473	1.18	0.10	0.37		0.42	0.20			0.42	0.56	0.25	0.66	0.07	0.22	0.90
800_B3	0.47	0.57	0.563	1.41	0.10	0.37			0.16			0.42	0.46	0.25	0.72	0.07	0.20	0.83
40_He1_E1	5.99	0.26	0.260	0.65	0.10	5.89			5.67			0.14	0.59	0.25	0.75	0.02	0.79	7.18
60_He1_E1	4.53	0.32	0.316	0.79	0.10	4.43			3.51			0.14	0.59	0.25	0.82	0.02	0.86	4.06
80_He1_E1	4.44	0.35	0.377	0.94	0.10	4.34		3.87	2.88	2.96		0.14	0.59	0.25	0.78	0.02	0.82	3.50
100_He1_E1	2.62	0.41	0.409	1.02	0.10	2.52			1.54			0.14	0.59	0.25	0.80	0.02	0.84	1.83
120_He1_E1	2.25	0.45	0.442	1.11	0.10	2.15			1.22			0.14	0.57	0.25	0.76	0.02	0.77	1.57
40_He1_E2	6.18	0.24	0.277	0.69	0.10	6.08			5.48			0.14	0.59	0.25	0.79	0.02	0.83	6.59
60_He1_E2	4.12	0.30	0.330	0.83	0.10	4.02			3.04			0.14	0.58	0.25	0.80	0.02	0.83	3.67
80_He1_E2	3.91	0.34	0.396	0.99	0.10	3.81		3.67	2.41	2.68		0.14	0.58	0.25	0.79	0.02	0.82	2.94
100_He1_E2	2.56	0.38	0.438	1.10	0.10	2.46			1.40			0.14	0.55	0.25	0.79	0.02	0.78	1.81
120_He1_E2	2.11	0.42	0.473	1.18	0.10	2.01			1.06			0.14	0.53	0.25	0.78	0.02	0.74	1.44
40_He1_E3	5.43	0.23	0.290	0.73	0.10	5.33			4.60			0.14	0.59	0.25	0.82	0.02	0.86	5.32
60_He1_E3	3.73	0.28	0.356	0.89	0.10	3.63			2.55			0.14	0.59	0.25	0.84	0.02	0.89	2.88
80_He1_E3	3.56	0.31	0.431	1.08	0.10	3.46		3.18	2.01	2.18		0.14	0.55	0.25	0.81	0.02	0.80	2.53
100_He1_E3	1.96	0.35	0.481	1.20	0.10	1.86			0.97			0.14	0.55	0.25	0.82	0.02	0.81	1.20
120_He1_E3	1.72	0.37	0.535	1.34	0.10	1.62			0.76			0.14	0.54	0.25	0.77	0.02	0.74	1.02
40_He2_E1	1.61	0.31	0.219	0.55	0.10	1.51			1.73			0.28	0.55	0.25	0.72	0.05	0.35	4.89
60_He2_E1	1.51	0.36	0.279	0.70	0.10	1.41			1.27			0.28	0.56	0.25	0.79	0.05	0.39	3.22
80_He2_E1	1.59	0.40	0.330	0.83	0.10	1.49		1.25	1.13	1.06		0.28	0.56	0.25	0.75	0.05	0.37	3.01
100_He2_E1	1.06	0.45	0.370	0.93	0.10	0.96			0.65			0.28	0.51	0.25	0.77	0.05	0.35	1.85
120_He2_E1	1.00	0.48	0.416	1.04	0.10	0.90			0.54			0.28	0.49	0.25	0.73	0.05	0.32	1.69
40_He2_E2	1.61	0.28	0.241	0.60	0.10	1.51			1.57			0.28	0.56	0.25	0.76	0.05	0.38	4.13
60_He2_E2	1.75	0.33	0.302	0.75	0.10	1.65			1.37			0.28	0.57	0.25	0.77	0.05	0.39	3.51
80_He2_E2	1.42	0.37	0.357	0.89	0.10	1.32		1.26	0.93	0.99		0.28	0.58	0.25	0.76	0.05	0.39	2.36
100_He2_E2	1.16	0.41	0.405	1.01	0.10	1.06			0.65			0.28	0.53	0.25	0.76	0.05	0.36	1.82
120_He2_E2	0.88	0.44	0.454	1.14	0.10	0.78			0.43			0.28	0.50					

A 09: Bedeckungsdichte

Bildname	Bedeckungs- dichte ohneWasser [%]	Bedeckungs- dichte durchströmt [%]	Bedeckungs- dichte durchströmt/ ohneWasser [%]	P6 Rinne leer h [m]	P6 Rinne leer v [m/s]	$\frac{h_{veg,angeströmt}}{h_{veg,gesamt}}$ [%]	= $\frac{v_{E1}}{v_{E3}}$ bzw. $\frac{v_{E2} \cdot 100}{v_{E3}}$ [%]
Reihe1_oxoxo							
oxoxo_leer_2Pflz	35.11			-	-		
oxoxo_E1_40	23.18	16.31	0.70	0.185	0.360	0.463	127 %
oxoxo_E1_80	35.41	21.07	0.60	0.298	0.448	0.744	131 %
oxoxo_E1_120	34.82	19.16	0.55	0.387	0.517	0.968	133 %
oxoxo_E2_40	25.89	17.68	0.68	0.212	0.314	0.530	111 %
oxoxo_E2_80	35.25	21.74	0.62	0.336	0.397	0.840	116 %
oxoxo_E2_120	33.49	19.45	0.58	0.442	0.453	1.104	117 %
oxoxo_E3_40	27.62	20.29	0.73	0.235	0.284	0.586	100 %
oxoxo_E3_80	34.90	22.34	0.64	0.389	0.343	0.971	100 %
oxoxo_E3_120	32.41	20.40	0.63	0.515	0.388	1.288	100 %
Reihe1_xoxox							
xoxox_leer_3Pflz	48.21			-	-		
xoxox_E1_40	35.47	17.48	0.49	0.185	0.360	0.463	127 %
xoxox_E1_80	41.55	24.27	0.58	0.298	0.448	0.744	131 %
xoxox_E1_120	43.25	27.71	0.64	0.387	0.517	0.968	133 %
xoxox_E2_40	-	-	-	0.212	0.314	0.530	111 %
xoxox_E2_80	-	-	-	0.336	0.397	0.840	116 %
xoxox_E2_120	-	-	-	0.442	0.453	1.104	117 %
xoxox_E3_40	39.19	24.32	0.62	0.235	0.284	0.586	100 %
xoxox_E3_80	43.26	27.72	0.64	0.389	0.343	0.971	100 %
xoxox_E3_120	42.27	29.68	0.70	0.515	0.388	1.288	100 %
Reihe1_XOXOX							
Reihe2_oxoxo							
XO_ox_leer_5Pflz	62.87			-	-		
XO_ox_E1_40	50.09	34.34	0.69	0.185	0.360	0.463	127 %
XO_ox_E1_80	61.36	41.42	0.68	0.298	0.448	0.744	131 %
XO_ox_E1_120	60.52	41.66	0.69	0.387	0.517	0.968	133 %
XO_ox_E2_40	53.49	38.11	0.71	0.212	0.314	0.530	111 %
XO_ox_E2_80	61.58	44.83	0.73	0.336	0.397	0.840	116 %
XO_ox_E2_120	58.57	41.49	0.71	0.442	0.453	1.104	117 %
XO_ox_E3_40	55.62	41.95	0.75	0.235	0.284	0.586	100 %
XO_ox_E3_80	61.81	38.39	0.62	0.389	0.343	0.971	100 %
XO_ox_E3_120	57.94	40.57	0.70	0.515	0.388	1.288	100 %
Reihe1_xxxxx							
xxxxx_leer_2Pflz	74.18			-	-		
xxxxx_E1_40	62.66	30.01	0.48	0.185	0.360	0.463	127 %
xxxxx_E1_80	69.49	35.96	0.52	0.298	0.448	0.744	131 %
xxxxx_E1_120	72.23	36.89	0.51	0.387	0.517	0.968	133 %
xxxxx_E2_40	-	-	-	0.212	0.314	0.530	111 %
xxxxx_E2_80	-	-	-	0.336	0.397	0.840	116 %
xxxxx_E2_120	-	-	-	0.442	0.453	1.104	117 %
xxxxx_E3_40	65.81	37.95	0.58	0.235	0.284	0.586	100 %
xxxxx_E3_80	72.37	41.46	0.57	0.389	0.343	0.971	100 %
xxxxx_E3_120	72.58	39.80	0.55	0.515	0.388	1.288	100 %
Reihe1_xxxxx_He							
xxxxx_T_leer_2Pflz	57.38			-	-		
xxxxx_T_E1_40	58.76	44.35	0.75	0.185	0.360	0.463	127 %
xxxxx_T_E1_60	58.54	47.81	0.82	0.282	0.355	0.705	116 %
xxxxx_T_E1_80	58.61	45.59	0.78	0.298	0.448	0.744	131 %
xxxxx_T_E1_100	59.10	47.29	0.80	0.290	0.575	0.725	160 %
xxxxx_T_E1_120	56.67	43.22	0.76	0.387	0.517	0.968	133 %
xxxxx_T_E2_40	59.01	46.66	0.79	0.212	0.314	0.530	111 %
xxxxx_T_E2_60	58.36	46.96	0.80	0.298	0.336	0.744	110 %
xxxxx_T_E2_80	57.68	45.51	0.79	0.336	0.397	0.840	116 %
xxxxx_T_E2_100	55.08	43.65	0.79	0.387	0.431	0.968	120 %
xxxxx_T_E2_120	52.51	40.85	0.78	0.442	0.453	1.104	117 %
xxxxx_T_E3_40	59.05	48.16	0.82	0.235	0.284	0.586	100 %
xxxxx_T_E3_60	58.69	49.49	0.84	0.328	0.305	0.820	100 %
xxxxx_T_E3_80	54.51	44.30	0.81	0.389	0.343	0.971	100 %
xxxxx_T_E3_100	55.14	45.11	0.82	0.465	0.358	1.163	100 %
xxxxx_T_E3_120	54.51	42.01	0.77	0.515	0.388	1.288	100 %

A 09: Bedeckungsdichte

Bildname	Bedeckungs- dichte ohneWasser [%]	Bedeckungs- dichte durchströmt [%]	Bedeckungs- dichte durchströmt/ ohneWasser [%]	P6 Rinne leer h [m]	P6 Rinne leer v [m/s]	$\frac{h_{veg,angest\ddot{o}mt}}{h_{veg,gesamt}}$ [%]	$= v_{E1}$ bzw. $v_{E2} \cdot 100 / v_{E3}$ [%]
Reihe1_6xxxxx							
6xxxxx_leer_2Pflz	74.91			-	-		
6xxxxx_E1_40	67.55	42.60	0.63	0.227	0.294	0.568	120 %
6xxxxx_E1_80	70.95	59.61	0.84	0.338	0.394	0.845	122 %
6xxxxx_E1_120	67.80	51.67	0.76	0.417	0.480	1.043	125 %
6xxxxx_E2_40	69.07	44.88	0.65	0.242	0.276	0.604	113 %
6xxxxx_E2_80	71.76	59.24	0.83	0.371	0.359	0.928	111 %
6xxxxx_E2_120	65.71	51.16	0.78	0.458	0.437	1.144	114 %
6xxxxx_E3_40	70.57	51.74	0.73	0.272	0.245	0.680	100 %
6xxxxx_E3_80	71.91	59.14	0.82	0.411	0.324	1.028	100 %
6xxxxx_E3_120	63.80	51.05	0.80	0.521	0.384	1.303	100 %