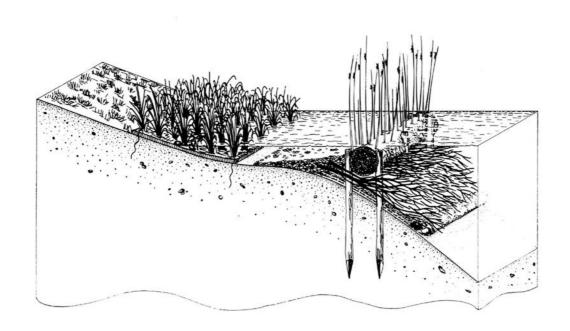
Ingenieurbiologische Ufersicherungen an Bundeswasserstraßen –

Methoden, Versuche, Ideen und ein Konzept für die Untere Havel-Wasserstraße zwischen Ketzin und Brandenburg (UHW-km 32,610 – 54,250)



Vertieferarbeit

Holger Schillinger

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe Institut für Hydromechanik Universität Karlsruhe (TH)

Betreuer:

Dr.-Ing. R. Soyeaux (BAW)

Dr.-Ing. C. Lang (IfH)

Oktober 2001

Symbol verzeichn is

Symbol	Einheit	Bedeutung
b	[m]	Breite
$b_{ m Sp}$	[m]	Wasserspiegelbreite
$b_{ m So}$	[m]	Sohlenbreite
c	[m]	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
c_0	[m]	Stauwellengeschwindigkeit
$c_{ m D}$	[-]	Widerstandsbeiwert
$d_{ m k}$	[mm]	Korngröße
$d_{ m D}$	[cm,m]	Einbaudicke der Schüttsteine
f	[-]	Formbeiwert zur Ermittlung von λ
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
$\overset{\circ}{h}$	[m]	Wassertiefe
$h_{ m m}$	[m]	mittlere Wassertiefe
$h_{ m A}$	[m]	Wellenauflaufhöhe
$k_{ m s}$	[mm]	äquivalente Sandrauheit
$k_{ m St}$	$[m^{1/3}/s]$	Strickler-Beiwert
l_u	[m]	benetzter Umfang
1:n	[-]	Neigung
n-Wert	[-]	Verhältnis zwischen Fließquerschnitt und eingetauch-
		tem Schiffsquerschnitt
$r_{ m hy}$	[m]	hydraulischer Radius
t	[m]	(Ausbau-)Fahrrinnentiefe
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
$v_{ m S}$	[m/s]	Schiffsgeschwindigkeit
$v_{ m m}$	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit
v^*	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit an der Sohle
$v_{ m crit}$	[m/s]	kritische Geschwindigkeit
$v_{ m r\ddot{u}ck}$	[m/s]	Rückströmungsgeschwindigkeit
A	$[m^2]$	Fließquerschnitt des Gerinnes; angeströmte Fläche
$A_{ m M}$	$[m^2]$	eingetauchter Schiffsquerschnitt (Hauptspantquer-
		schnitt)
B_1	[m]	Fahrspurbreite
$B_{ m B}'$	[-]	Beiwert zur Berechnung des Schüttsteindurchmessers
$B_{ m E}$	[m]	Einflussbreite des Schiffes
$B_{ m S}$	[m]	Schiffsbreite
C	$[m^{1/2}/s]$	<i>Chezy-</i> Beiwert
D	[m]	hydraulischer Durchmesser; Durchmesser
$D_{ m n50}$	[cm,m]	mittlerer Schüttsteindurchmesser
D^*	[-]	sedimentologischer Durchmesser
Fr^*	[-]	Feststoff-Froudezahl
$Fr_{ m nh}$	[-]	Tiefen-Froudezahl
G	[N]	Gewichtskraft

Symbol	Einheit	Bedeutung
H	[m]	Wellenhöhe
$H_{ m B}$	[m]	Bemessungswellenhöhe
$H_{ m BF}$	[m]	Wellenhöhe über Böschungsfußpunkt
$H_{ m sek}$	[m]	Sekundärwellenhöhe
$I_{ m So}$	[-]	Sohlengefälle
I_{Sp}	[-]	Wasserspiegelgefälle
$I_{ m E}$	[-]	Energiehöhengefälle
L	[m]	Wellenlänge
$L_{ m S}$	[m]	Schiffslänge
Re^*	[-]	Feststoff-Reynoldszahl
$S_{ m A}$	[m]	Sicherheitsabstand zwischen den Fahrspuren
$S_{ m U}$	[m]	Sicherheits- und Sichtabstand zum Ufer
$S_{ m W}$	[KN]	Strömungskraft
T	[s]	Wellenperiode
W	[N]	Widerstandskraft
Q	$[m^3/s]$	Durchfluss, Abfluss
α	[°]	Neigungswinkel
$lpha_{ m i}$	[-]	Beladungskoeffizient
Δx	[m]	Länge des betrachteten Abschnitts
η	$[kg/(m \cdot s)]$	dynamische Viskosität
λ	[-]	Widerstandsbeiwert
ν	$[m^2/s]$	kinematische Viskosität
ho	$[kg/m^3]$	Dichte
ho'	[-]	relative Feststoffdichte
$ ho_{ m K}$	$[kg/m^3]$	Dichte des Korns
$ ho_{ m S}$	$[kg/m^3]$	Dichte der Steine
$ ho_{ m W}$	$[kg/m^3]$	Dichte des Wassers
au	$[N/m^2]$	Schubspannnung
$ au_0$	$[N/m^2]$	Sohlenschubspannnung
$ au_{ m crit}$	$[N/m^2]$	kritische Schubspannung oder Schleppspannung
$ au^*$	[-]	dimensionslose Sohlenschubspannung
ξ	[-]	Steilheit der Welle (Brecherindex)

1	Einl	leitung		1
	1.1		rgründe und Notwendigkeit des Ausbaus bestehender Schiffwege	1
	1.2		lassung zur Themenstellung	2
	1.3		und Gliederung	3
2	The	oretisc	he Grundlagen	5
	2.1	Allge	mein	5
	2.2	Fließg	geschwindigkeit	5
		2.2.1	Fließformeln	5
		2.2.2	Ufervegetation	7
		2.2.3	Einfluss des Bewuchses auf die Fließgeschwindigkeit	9
		2.2.4	Gliederung des Fließquerschnitts	9
		2.2.5	Geschwindigkeitsverteilung	12
	2.3	Schub	spannung	15
		2.3.1	Schleppspannungsmodell	15
		2.3.2	Schubspannungsverteilung	17
		2.3.3	Stabilität von Gerinnewandungen ohne Bewuchs	21
		2.3.4	Stabilität bewachsener Gerinnewandungen	26
	2.4	Welle	nbelastung auf Uferbefestigungen an Binnenwasserstraßen	31
		2.4.1	Einflussbereich des Schiffes	31
		2.4.2	Das Wellensystem eines Schiffes	32
		2.4.3	Wellenausbreitung und Wellengeschwindigkeit	34
		2.4.4	Kritische Schiffsgeschwindigkeit	35
		2.4.5	Das Brechen der Welle	37
		2.4.6	Belastungen der Ufer in Abhängigkeit von der Fahrwasserbegrenzung	38
		2.4.7	Windwellen	41
		2.4.8	Standsicherheit von Böschungsufern	42
3	Met	hoden	zur Ufersicherung	45
	3.1	Einfül	hrung	45
	3.2	Der B	egriff Ingenieurbiologie	45
	3.3	Gewä	ssertypische Uferbereiche	46

	3.4	Sicher	ungsverfahren und ihre Anwendung	48
		3.4.1	Totbau/Klassische Deckwerke	49
		3.4.2	Lebendbau	53
		3.4.3	Kombinierte Bauweisen	54
	3.5	Biotec	hnische Eigenschaften der Ufervegetation	55
	3.6	Pflanz	en als lebende Baumaterialien	57
		3.6.1	Begriffe und Definitionen	57
		3.6.2	Rasenflächen	60
		3.6.3	Röhrichte	62
		3.6.4	Gehölze	64
4	Übe	rblick i	über ingenieurbiologische Bauweisen	68
	4.1	Allgen	neine Maßnahmen der ingenieurbiologischen Ufersicherung	68
		4.1.1	Faschinenwalze	68
		4.1.2	Senkwalze	71
		4.1.3	Rauhbaum	72
		4.1.4	Weidenwippe	74
		4.1.5	Steckholzbesatz	77
		4.1.6	Weidenspreitlage	79
		4.1.7	Reisiglage/Fichtenspreitlage	82
		4.1.8	Buschlagenbau	84
		4.1.9	Packwerk	86
		4.1.10	Gitterbuschbauwerk	88
		4.1.11	Holz-Krainerwand	91
		4.1.12	Steinschüttung mit Weidensteckhölzern bzw. Buschlagen	94
		4.1.13	Vegetatives Deckwerk	97
		4.1.14	Flechtzaun	100
		4.1.15	Erosionsschutzmatte	102
		4.1.16	Röhrichtwalze/Vegetationsfaschine	105
		4.1.17	Reisiglahnung	107
		4.1.18	Böschungsrasen	109
		4.1.19	Röhrichtpflanzungen	112
		4.1.20	"Bauweise Null"	114
	42	Finteil	ung der ingenieurhiologischen Bauweisen	115

5				chungen zur Belastbarkeit ingenieurbiologische	
		weisen			120
	5.1			stimmung der maximalen Belastbarkeit	120
	5.2			erbauungen	121
		5.2.1		and	121
		5.2.2	Strömungsbelas	stung auf Weidenverbauungen	122
	5.3	Ergebi	nisse und Erfahri	ungen der Umgestaltung der Enz/Pforzheim	124
		5.3.1	Hydraulische U	ntersuchungen	125
		5.3.2	Naturnahe Bau	weisen im Umgestaltungsbereich	125
		5.3.3	Beurteilung der	Belastbarkeit der Ufersicherungsmaßnahmen	126
	5.4	Ingeni	eurbiologische V	ersuchsstrecke am Wienfluss (Österreich)	128
		5.4.1	Ergebnisse der l	Flutungen der Versuchsstrecke	128
	5.5		0 1	präsentativer Werte zur Belastbarkeit ingenieurn	131
6	Aus	führun	gen ingenieurbi	ologischer Bauweisen an Bundeswasserstraßen	133
	6.1	Einfül	nrung		133
	6.2	Telefo	nische Umfrage z	zur Erfassung ingenieurbiologischer Bauweisen .	134
	6.3	Projek	te im Bereich dei	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost	136
		6.3.1	Beispiel 1:	Untere Havel-Wasserstraße	137
		6.3.2	Beispiel 2:	Havelkanal	143
		6.3.3	Beispiel 3:	Potsdamer Havel	148
		6.3.4	Beispiel 4:	Obere Havel-Wasserstraße	152
		6.3.5	Beispiel 5:	Obere-Havel-Wasserstraße	154
	6.4	Projek	te im Bereich dei	· Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest	156
		6.4.1	Beispiel 6:	Saar	157
		6.4.2	Beispiel 7:	Neckar	158
		6.4.3	Beispiel 8:	Neckar	160
	6.5	Projek	te im Bereich dei	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest	165
		6.5.1	Beispiel 9:	Weser	165
	6.6	Projek	te im Bereich dei	Wasser- und Schifffahrtsdirektion West	168
		6.6.1	Beispiel 10:	Rhein	169
	6.7	Projek	te im Bereich dei	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte	173
		6.7.1	Beispiel 11:	Aller	174
	6.8	Projek	te im Bereich dei	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord	178

		6.8.1	Beispiel 12: Oste	179
7		ndlage serstraf	n und Vorüberlegungen zum Ausbau der Unteren Have ße	l- 180
	7.1		nurichtlinien im ökologisch wertvollen Gebiet der UHW zwischen am und Brandenburg	180
	7.2		suchung der hydraulischen Belastung der Ufer zwischen UHW-,600 und km 38,000 (Bauabschnitt 1)	183
		7.2.1	Grundsätze	183
		7.2.2	Bestimmung des rechnerischen Ersatzquerschnitts	185
		7.2.3	Rückströmungsgeschwindigkeiten	
		7.2.4	Primär- und Sekundärwellen	190
		7.2.5	Wasserwechselbereich	195
		7.2.6	Sohlenstabilität	196
8	Ufeı	schutz	konzept für UHW-Abschnitt km 32,600 bis km 38,000	200
	8.1	Ermitt	tlung der kritischen Uferbereiche	200
		8.1.1	Erforderliche Querschnittsverbreiterungen bei unveränderter Lage der Fahrspurachse	200
		8.1.2	Erforderliche Querschnittsverbreiterungen durch Verlegung der Fahrspur in Richtung einer Uferseite	202
		8.1.3	Beidseitige Verlegung der Fahrspurachse	206
	8.2	Ufersi	cherung durch ingenieurbiologische Maßnahmen	210
		8.2.1	Ufersicherung im Bereich 1:	214
		8.2.2	Ufersicherung im Bereich 2:	217
		8.2.3	Ufersicherung im Bereich 3:	218
9	Zusa	ammen	afassung	22 1
10	Anla	agen		228
	10.1	Bösch	ungsneigungen an Dämmen oder Einschnitten nach DIN $4084 \ldots$	228
	10.2	Tote B	aumaterialien im naturnahen Wasserbau	229
		10.2.1	Übersicht - Tote Baumaterialien	229
		10.2.2	Verwendung von toten Baumaterialien	229
	10.3	Belastl	barkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen	232
	10.4	Ergebi	nisse der Wellenberechnung	233
	10.5	Wertet	tabellen zu Querschnittsverbreiterungen	235

10.6	Wertetabelle der Ausbauprofile	 										 238

1	dener Transportmittel	2
2	Formbeiwert	7
3	Klassifizierung der Ufervegetation	8
4	Makroturbulenz	ç
5	Hydrodynamische Einflussbereiche	10
6	Interaktionsbereiche eines idealisierten Fließquerschnitts	11
7	Geschwindigkeitsverteilung in einem Fließgewässer	12
8	Geschwindigkeitsverteilung mit und ohne Weidenbewuchs	13
9	Prozentuale Verminderung der Fließgeschwindigkeit bei Weidenbewuchs	13
10	Einfluss von Sohlenbreite und Böschungsneigung auf Abflussleistung .	14
11	Herleitung der Schleppspannungsformel	15
12	Sohlenliniengefälle, Wasserspiegelgefälle und Energieliniengefälle	16
13	Gleichgewichtsbedingung an der Gerinnesohle	16
14	Diagramme zur Ermittlung der Schubspannungsmaxima an Böschung und Sohle eines Trapezgerinnes nach <i>Chow</i>	18
15	Theoretische Schubspannungsverteilung breiter Trapezgerinne nach Krüger	19
16	Vertikale Geschwindigkeitsverteilung	20
17	Hjulström-Diagramm	23
18	Shields-Diagramm	25
19	Vegetationsabhängiger Schleppkraftdeckungswert nach <i>Johannsen</i>	28
20	Bauweisenabhängiger Schleppkraftdeckungswert nach <i>Johannsen</i>	30
21	Absunkbereich eines Schiffes	33
22	Sekundärwellensystem	33
23	Überlagerung des Primär- und Sekundärwellensystems	34
24	Propulsionsdiagramm	36
25	Rollbrecher	38
26	Hydraulische Belastungen einer Wasserstraße	39
27	Schadensmechanismen an Böschungsufern	42
28	Belastungs- und Vegetationszonen	47
29	Baumaterialien im Wasserbau	48
30	Regeldeckwerke nach MAR	52

31	Entwicklung der Stabilität ingenieurbiologischer Bauweisen	53
32	Ökologische Wertigkeit unterschiedlicher Ufersicherungen	55
33	Biotechnische Eigenschaften der Pflanzen	56
34	Adventivwurzelbildung von Weidenarten	57
35	Ausbreitungsbereich von Röhrichten	62
36	Wuchsform von Weiden	65
37	Formen ausschlagsfähiger Gehölze	66
38	Faschinenwalze	69
39	Senkwalze	71
40	Rauhbäume	73
41	Weidenwippe	75
42	Querschnitt Weidenwippe	76
43	Steckholzbesatz	77
44	Querschnitt Steckholzbesatz	78
45	Weidenspreitlage	80
46	Fichtenspreitlage	82
47	Detail Fichtenspreitlage	83
48	Buschlage	85
49	Querschnitt Packwerk	87
50	Querschnitt Gitterbuschbauwerk	89
51	Detailansicht Gitterbuschbauwerk	90
52	Holz-Krainerwand	91
53	Aufbau Holz-Krainerwand	93
54	Steinschüttung mit Weidensteckhölzern	95
55	Querschnitt Steinschüttung mit Weidensteckhölzern	96
56	Vegetatives Deckwerk	98
57	Flechtzaun	101
58	Erosionsschutzmatte	103
59	Böschung mit Erosionsschutzmatte	104
60	Röhrichtwalze	105
61	Reisiglahnung	108
62	Böschungsrasen	110
63	Ballenpflanzung	113
64	Kontraktion von Weiden	123

65	Ubersichtskarte Ausführungsbeispiele	135
66	Maßnahmen im Bereich der WSD-Ost	136
67	Einbau des Vegetativen Deckwerks an der UHW	137
68	Planskizze der Teststrecke an der UHW	138
69	Lose Steinschüttung an der UHW (Bereich G)	139
70	Vegetatives Deckwerk an der UHW (Bereich C)	140
71	Versuchsstrecke bei UHW-km 35,700	142
72	Planskizze der Versuchsstrecke I mit Vegetativem Deckwerk am Havelkanal	143
73		144
74		145
75		147
76		148
77		149
78		150
79	-	151
80		151
81	Pfahlreihen mit Faschinen 1998	153
82	Pfahlreihen mit Faschinen 2000	153
83	Einbau der Faschinen am Kammerkanal	154
84	Bodenhinterfüllung am Kammerkanal	155
85	Maßnahmen im Bereich der WSD-Südwest	156
86	Uferausbildung der Saar bei Völklingen	158
87	Neckarhäuser Insel	159
88	Pfahlreihen Neckarhäuser Insel	159
89	Uferrandstreifen am Neckar	160
90	Lageplan FND "Schilfgebiet" Eberbach	161
91	Ansicht der Doppelpfahlreihe	162
92	Planskizze zum Aufbau der Pfahlreihen	162
93	Blick auf das Schilfgebiet in der Bauphase	163
94	Schilfgebiet Eberbach heute	164
95	Maßnahmen im Bereich der WSD-Nordwest	165
96	Buschleitdamm an der Weser	166
97	Buschleitdamm nach Sandvorspülung	167

98	Maßnahmen im Bereich der WSD-West
99	Gesamtmaßnahme Parallelwerk Walsum-Stapp
100	Querschnitt eines Hochpunktes
101	Fertiggestelltes Parallelwerk
102	Maßnahmen im Bereich der WSD-Mitte
103	Herstellung eines Sinkstückes
104	Verlegen der Faschinen am Leitwerk
105	Einschwemmen des Sinkstücks
106	Faschinenmatten zur Sicherung im Buhnenfeld
107	Maßnahmen im Bereich der WSD-Nord
108	Regelprofil
109	Karte der UHW zwischen Potsdam und Brandenburg
110	Kartenausschnitt der UHW bei Ketzin
111	Begrenzung der Schiffsgeschwindigkeiten
112	Maßgebende zulässige Schiffsgeschwindigkeiten
113	Skizzen zur Ersatzquerschnittsberechnung
114	Darstellung der Ersatzquerschnitte
115	Wasserspiegelbreiten
116	Rückströmungsgeschwindigkeiten
117	Zeitlicher Verlauf der Wasserspiegelabsenkung
118	Primärwellenhöhen
119	Lage des Fahrwassers bezüglich linker und rechter Uferlinie 193
120	Sekundärwellenhöhen
121	Stellen der berechneten Sekundärwellen
122	Überlagerung der Wellensysteme
123	Wasserwechselbereiche
124	Schubspannungen
125	Erforderliche mittlere Steindurchmesser
126	Erforderliche Einbaudicken der Schüttsteine
127	Darstellung der erforderlichen Ausbauprofile
128	Stellen notwendiger Gewässerverbreiterung 202
129	Verbreiterungen am linken Ufer für $n=3$
130	Verbreiterungen am linken Ufer für $n=5$
131	Kritische Querschnitte bei linksseitiger Verbreiterung

132	Verbreiterungen am rechten Ufer für $n=3$	205
133	Verbreiterungen am rechten Ufer für $n=5$	205
134	Kritische Querschnitte bei rechtsseitiger Verbreiterung	206
135	Maßgebender Verlauf des Ausbauprofils 1:3	207
136	Maßgebender Verlauf des Ausbauprofils 1:5	208
137	Bereiche maßgebender Verbreiterungen	209
138	Maximale Schiffswellenhöhen	211
139	Überlagerung der Wellensysteme	211
140	Sekundärwellenhöhen an der linken Uferseite	213
141	Sekundärwellenhöhen an der rechten Uferseite	214
142	Ingenieurbiologisches Wirkungsschema	222
143	Belastungs- und Widerstandsfaktoren	223

Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1	Kritische Schubspannungen	22
2	Korrekturfaktoren zur Ermittlung der vegetationsabhängigen Schlepp-kraft nach <i>Johannsen</i>	29
3	Hydraulische Belastungen aus Schifffahrt	40
4	Größenklassen für Wasserbausteine	51
5	Heimische Gehölzarten an Fließgewässern	67
6	Wippe und Faschinenwalze	70
7	Funktion und Wirkungsweise ingenieurbiologischer Bauweisen	116
8	Tabellarische Übersicht ingenieurbiologischer Bauweisen	118
9	Kombinationsmöglichkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen	119
10	Grenzbeanspruchungen der Ufersicherungen an der Enz	127
11	Ergebnisse der Flutungen am Wienfluss	129
12	Richtwerte zur Belastbarkeit der Bauweisen am Wienfluss	130
13	Zusammenstellung von Grenzwerten	132
14	Charakteristische Abflüsse der Saar	157
15	Planungsgrundsätze	185
16	Böschungsneigungen an Dämmen oder Einschnitten nach DIN 4084 2	228
17	Veröffentlichungen über Belastbarkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen?	232
18	Primär- und Sekundärwellenhöhen	233
19	Maximale Schiffswellenhöhen	234
20	Wertetabelle zur beidseitigen Verbreiterung der Querschnitte	235
21	Wertetabelle zur einseitigen Verbreiterung der Querschnitte	236
22	Wertetabelle zur Gewässerverbreiterung unter Eingriffsminimierung $$. $$	237
23	Wertetabelle zu Abmessungen der Ausbauprofile	238

1 Einleitung

1.1 Hintergründe und Notwendigkeit des Ausbaus bestehender Schifffahrtswege

Das Verkehrsaufkommen in der Bundesrepublik Deutschland hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. In den westlichen Bundesländern zeichnete sich besonders auf der Straße ein überproportionales Verkehrswachstum ab. Durch die Wiedervereinigung Deutschlands stieg die Nachfrage nach Verkehrsleistungen ständig an, wodurch sich auch in den neuen Bundesländern der Güterverkehr überwiegend auf den LKW verlagerte. Die Öffnung Osteuropas und die Vollendung des EU-Binnenmarktes sowie wirtschaftliches Wachstum in Deutschland und Europa werden auch künftig weitere Verkehrszunahmen mit sich bringen. Die Verkehrsprognosen gehen deshalb insbesondere im Transitverkehr von einer deutlichen Steigerung des Verkehrsaufkommens in der West-Ost-Relation aus.

Im Bundesverkehrswegeplan 1992 wurde ein gesamtdeutsches Verkehrskonzept entwickelt, das die umweltverträglichen Verkehrsträger Bahn und Binnenschifffahrt stärker als in der Vergangenheit am Verkehrswachstum beteiligen soll. Dieses Konzept beinhaltet die "Verkehrsprojekte Deutsche Einheit" zur Verbesserung der Infrastruktur in den fünf neuen Bundesländern. Neben neun Schienen- und sieben Straßenprojekten ist darin auch ein Vorhaben für die Binnenschifffahrt - das "Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 17" - enthalten (Bundesministerium für Verkehr, 1997).

Das "Projekt 17" beinhaltet den Ausbau der Wasserstraßenverbindung zwischen Hannover und Berlin zu einer leistungsfähigen europäischen Wasserstraße¹ auf einer Gesamtlänge von rund 260 km. Durch diesen Ausbau können künftig Großmotorgüterschiffe mit 110 m Länge, 11,4 m Breite und 2,8 m Abladetiefe sowie Schubverbände mit 185 m Länge bei gleicher Breite und Abladetiefe auf der gesamten Strecke verkehren. Dies bedeutet, dass in Zukunft zwischen den Nordseehäfen, den westdeutschen Industriezentren und den Regionen Magdeburg und Berlin Güter verstärkt von modernen Binnenschiffen befördert werden², wodurch die Straßen entlastet werden. Die moderne Binnenschifffahrt zeichnet sich nicht nur durch die Größe der Schiffe aus, sondern auch durch ihre Wirtschaftlichkeit bei der Beförderung von Massengütern, Container- und Speziallasten. Bei idealer Auslastung der Ladefläche eines Schiffes kann über den Wasserweg wesentlich kostengünstiger, umweltfreundlicher und energiesparender transportiert werden als mit Bahn und LKW (vgl. Abb. 1).

Ein 2000-t-Motorgüterschiff befördert mit einer Schiffsladung genauso viele Güter wie 67 LKW. Voraussetzung dafür sind entsprechend ausgebaute Wasserstraßen, die den uneingeschränkten Begegnungsverkehr für Großmotorgüterschiffe (GMS) und Schubverbände (SV) zulassen und somit eine wirtschaftliche Schifffahrt erlauben.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ist es notwendig, einige bauliche Anpas-

¹Ausbau als Wasserstraßenklasse Vb

²Europaschiffe können aufgrund der Fahrinnentiefe bislang Berliner Häfen nur mit Teillast und mit reduziertem Ladungstiefgang anlaufen.

sungen vorzunehmen. Die erforderlichen Eingriffe müssen sowohl den ökonomischen Anforderungen gerecht werden, als auch im Einklang mit der Gewässerökologie stehen (Bundesministerium für Verkehr, 1997).





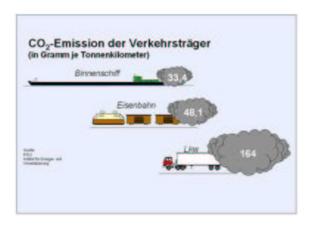


Abbildung 1: Vergleich zwischen den wichtigsten Gütertransportmitteln Binnenschiff, Bahn und LKW bezüglich Transportweiten, Primärenergiebedarf und Schadstoffausstoß (WSV, 2001)

1.2 Veranlassung zur Themenstellung

Die Untere Havel-Wasserstraße (UHW) zwischen Ketzin und Brandenburg ist eine Teilstrecke des Projekts 17. Dieser Flussabschnitt gilt als ökologisch besonders wertvoll, dessen Landschaftsbild geprägt ist von aneinandergereihten Flusswindungen, seenartigen Aufweitungen und kleinen Inseln. In den weiten, ausgedeichten Niederungen überwiegen Wiesen und Weiden. Die höheren Lagen (ab ca. 30 m üNN) werden zum Großteil landwirtschaftlich genutzt. Ziel der geplanten Ausbaumaßnahme ist - neben der Anpassung des Wasserwegs an die moderne Binnenschifffahrt - der Erhalt dieser alten Kulturlandschaft mit ihrer naturnahen Gewässerstruktur (vgl. Kap. 7.1).

Die Fahrwasserbemessung und neue Trassierung der UHW zwischen Ketzin und Brandenburg wird von der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat W4 der Bundes-

anstalt für Wasserbau, Karlsruhe, durchgeführt. In diesem Zusammenhang soll auch die Belastung der Ufer durch Schiffswellen abgeschätzt und erforderliche Uferschutzmaßnahmen auf der Grundlage der gültigen Ausbaurichtlinien vorgeschlagen werden. Aus den Richtlinien geht hervor, dass die baulichen Eingriffe zu minimieren und neue Ufer bzw. gefährdete und geschädigte Ufer mit umweltverträglichem Deckwerk zu sichern sind. Außerdem sollen die zahlreich vorhandenen Naturschutzgebiete entlang der Havel von Ausbaumaßnahmen weitgehend verschont bleiben und erforderliche Uferabgrabungen sich auf eine Uferseite beschränken. Diese Faktoren gaben Anlass zur Themenstellung dieser Arbeit.

1.3 Inhalt und Gliederung

Die Ufer von Bundeswasserstraßen sind überwiegend mit hartem Deckwerk gesichert. Selten sind ingenieurbiologische Ufersicherungsmaßnahmen an Schifffahrtstraßen vorhanden, was sicherlich mit der mangelnden Kenntnis über das Widerstandsverhalten der Bauweisen bzw. über die Zerstörungsprozesse und deren auslösende Größen zu tun hat.

Das Wirkungsprinzip ingenieurbiologischer Maßnahmen beruht darauf, dass lebende Baumaterialien mit toten kombiniert werden und sich daraus positive synergische Effekte ergeben (GERSTGRASER, 2000). Die Ausführungen in dieser Arbeit sollen dazu dienen, die Wirkungsweise ingenieurbiologischer Bauweisen besser zu verstehen und verschiedene Ufersicherungsmaßnahmen unter Verwendung umweltverträglicher Baumaterialien aufzuzeigen. Dadurch sollen diese alternativen, "neuen" Möglichkeiten der Ufersicherung bestärkt werden.

In Kapitel 2 werden zunächst für natürliche Fließgewässer die hydraulischen Belastungsgrößen Strömungsgeschwindigkeit und Schubspannung sowie deren Einflüsse auf die Gewässerberandung erläutert. Desweiteren werden die grundlegenden hydrodynamischen Vorgänge bei der Fahrt eines Schiffes und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Ufersicherheit vorgestellt.

Nach der Begriffsdefinition der Ingenieurbiologie in Kapitel 3 werden die unterschiedlichen Sicherungsverfahren Lebend- und Totbauweise beschrieben und die Verwendung von Pflanzen als lebende Baumaterialien veranschaulicht. Dabei gilt der vorteilhaften Kombination toter Baumaterialien mit Pflanzen besonderes Augenmerk. Unter Berücksichtigung der Standortfaktoren kann aufgrund der günstigen biotechnischen Eigenschaften von Pflanzen ein optimaler Schutz der Böschungsoberfläche erzielt werden. Neben der Erläuterung verschiedener Verwendungsmöglichkeiten des Baustoffes "Pflanze" werden speziell die Weiden als ideales Ufergehölz sowie die wichtigsten Pflanzen der Röhrichtzone näher erläutert und eine Übersicht standortgerechter heimischer Strauch- und Baumarten an Fließgewässern gegeben.

Kapitel 4 gibt einen allgemeinen Überblick über die wichtigsten ingenieurbiologischen Bauweisen zur naturnahen Ufersicherung. Dabei werden Angaben zu Anwendungsbereich, Herstellung und Baumaterialien der einzelnen Bauweisen gemacht und die Eignung hinsichtlich des Einsatzes an Bundeswasserstraßen beurteilt.

Um den Einsatz naturnaher Bauweisen auch aus wissenschaftlicher Sicht zu untermauern, sind in Kapitel 5 die Ergebnisse der jüngsten Forschungsprojekte bezüglich der

Belastung und des Widerstandsverhaltens naturnaher Uferbauweisen dokumentiert. In diesem Zusammenhang wird gleichzeitig auf die Probleme bei der Beurteilung der Stabilität hingewiesen. Die in diesem Kapitel aufgeführten Teststrecken und Untersuchungen repräsentieren den aktuellen Stand wissenschaftlicher Untersuchungen. Die Angaben zur Beanspruchbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen stammen aus eigenen Messungen der Autoren bzw. der Forschungsgruppen. Zusätzlich ist in Tabelle 17 (Anlagen) eine generelle Übersicht der im Bearbeitungszeitraum ausfindig gemachten Veröffentlichungen über Belastungsgrenzen naturnaher Bauweisen zusammengestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Telefonumfrage durchgeführt, um Ausführungsbeispiele bzw. Teststrecken an Bundeswasserstraßen zu ermitteln, an denen ingenieurbiologische Bauweisen bereits zum Einsatz kamen oder noch getestet werden. Die Ergebnisse der Umfrage sind in Kapitel 6 zusammengestellt. Diese insgesamt 12 dokumentierten Beispiele aus unterschiedlichen Gewässerzuständigkeitsgebieten der Bundesrepublik liefern wertvolle Aspekte was Einbau, Erfahrungen im Umgang mit Pflanzen, Verbesserungsvorschläge sowie Erkenntnisse hinsichtlich der Eignung als Ufersicherungsmaßnahme unter den Belastungsbedingungen von Bundeswasserstraßen betrifft. Unter Beachtung der jeweiligen Standortfaktoren und der Belastungsbedingungen können sie wegweisend für zukünftige Einsätze an Schifffahrtsstraßen sein. Besonders interessant im Hinblick auf den geplanten Ausbau der Unteren Havel-Wasserstraße sind die Ergebnisse der im Oktober 1993 eingerichteten Teststrecke bei UHW-km 35,700 (Kap. 6.3.1).

Die Ausführungen in Kapitel 7 und Kapitel 8 beziehen sich auf den UHW-Abschnitt km 32,600 – 38,000 und dienen der Aufstellung eines konkreten Ideenkonzepts zur Sicherung gefährdeter Uferstellen. In Kapitel 7 werden die wichtigsten Ausbaugrundlagen erläutert und die Vorgehensweise bei den von der BAW durchgeführten Berechnungen zur Ermittlung der maßgebenden Belastungsgrößen beschrieben. Die Ergebnisse werden im Anschluss daran ausgewertet und graphisch dargestellt. Nach der Ermittlung der kritischen Uferstellen wird dann in Kapitel 8 unter Berücksichtigung der maßgebenden Belastungen ein Uferschutzkonzept mit Hilfe geeigneter ingenieurbiologischer Bauweisen erarbeitet.

Langfristiges Ziel des ingenieurbiologischen Uferschutzes muss neben seiner erfolgreichen Schutzwirkung eine möglichst lückenlose Einbindung der Maßnahmen in die Ökologie des Gewässers und des Gewässerrandstreifens sein.

Die Idealvorstellung ist dabei das Erreichen eines natürlichen Gleichgewichtzustands zwischen auftretenden Belastungen und Widerstandsverhalten bzw. Regenerationsfähigkeit der lebenden Ufersicherung.

Aus eigenen Kräften wird dieser Zustand nur an Gewässern mit geringen erosiven Wasserkräften erreicht, was u.a. wesentlich von der Gewässerstrukur und der Intensität des Schiffsverkehrs abhängig ist. An Bundeswasserstraßen ist aufgrund der starken Ufererosion durch Schiffswellen und Rückströmungen gerade an schmalen Gewässerabschnitten ein aktiver Uferschutz notwendig. Besonders erosionsgefährdete Bereiche wie der Wasserwechselbereich müssen vor diesen Angriffen geschützt werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Allgemein

Natürliche Fließgewässer sind offene Gerinne, deren Form durch Bewuchs und große Unregelmäßigkeiten gekennzeichnet ist. Sie unterliegen einer Dynamik und somit einer ständigen Veränderung, wodurch ihre hydraulische Berechnung zusätzlich erschwert wird.

Charakteristisch für natürliche Fließgewässer sind instationäre und ungleichförmige Strömungsverhältnisse, d.h. die Strömung unterliegt einer zeitlichen und räumlichen Veränderung sowohl in Fließrichtung als auch senkrecht dazu. Diese dreidimensionalen Fließvorgänge lassen sich nur durch aufwendige Modelle und Geräte im Labor erfassen, welche jedoch meist zu teuer und für den Einsatz vor Ort schlecht geeignet sind (GERSTGRASER, 2000). Aus diesem Grund bauen die meisten hydraulischen Berechnungsansätze auf idealisierten Modellen und Bedingungen auf und setzen stationäre, gleichförmige Strömungsverhältnisse voraus.

Das fließende Wasser erzeugt eine Kraft, deren Größe vom Abfluss (Q) sowie von den Gerinneparametern abhängt. Die wichtigsten Gerinneparameter sind dabei die Wassertiefe (h), die Querschnittsform und -größe (A), das Sohlgefälle (I_{So}) und die Sohlbzw. Böschungsrauheit (k_{S}, k_{St}) . Die Fließgeschwindigkeit (v) und die Schubspannung (τ) sind die zwei maßgebenden hydraulischen Größen, die die Kräfte des fließenden Wassers in natürlichen Gerinnen charakterisieren. Sie werden in den Kapiteln 2.2 und 2.3 näher betrachtet. In Kapitel 2.4 wird dann auf die hydraulischen Belastungen aufgrund der Schifffahrt eingegangen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf turbulente Strömungsvorgänge, wie sie bei der Mehrzahl der praktischen Anwendungen in Fließgewässern vorzufinden sind.

2.2 Fließgeschwindigkeit

2.2.1 Fließformeln

Die bekanntesten Fließformeln für die hydraulische Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit sind die Gleichung von *de Chezy* (1) und die zur Bestimmung des *C*–Wertes entwickelten Formeln von *Darcy-Weisbach* (2) und *Gauckler-Manning-Strickler* (3).

de Chezy (1755):

$$v_{\rm m} = C \cdot \sqrt{r_{\rm hy} \cdot I_{\rm E}} \tag{1}$$

universelles Fließgesetz nach Darcy-Weisbach (1858):

$$v_{\rm m} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{\rm hy} \cdot I_{\rm E}} \tag{2}$$

Gauckler-Manning-Strickler (1923):

$$v_{\rm m} = k_{\rm St} \cdot r_{\rm hv}^{2/3} \cdot I_{\rm E}^{1/2}$$
 (3)

Aufgrund ihrer einfachen Handhabung und der zahlreichen Erfahrungen zur Abschätzung des Widerstandsbeiwertes ($k_{\rm St}$) ist die empirische Formel von *Gauckler-Manning-Strickler* am Weitesten verbreitet. Ein Nachteil dieses Fließgesetzes liegt allerdings darin, dass der Strickler-Wert ($k_{\rm St}$) nicht dimensionsrein ist und die physikalischen Verhältnisse dadurch nicht immer korrekt wiedergegeben werden (PASCHE, 1984).

Im DVWK-Merkblatt 220 (1991) wird daher für die Abflussberechnung das universelle Fließgesetz nach Darcy-Weisbach (2) empfohlen, wobei für den Widerstandsbeiwert (λ), der sich nicht theoretisch herleiten lässt, das Gesetz von Colebrook-White zu Grunde gelegt wird. In der Rohrhydraulik lautet das Widerstandsgesetz der voll ausgebildeten Rauheitsströmung:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{k_{\rm s}/D}{3,71}\right) \tag{4}$$

Bezieht man Gleichung (4) auf den Gerinneabfluss mit freiem Wasserspiegel, so wird als Rohrdurchmesser (D) ein wirksamer, hydraulischer Radius $D = f \cdot 4 \cdot r_{\rm hy}$ eingesetzt. Der darin enthaltene Formbeiwert (f) ist nur von der Form des Querschnitts abhängig und wird nicht von Re oder $k_{\rm s}/r_{\rm hy}$ beeinflusst. Das Widerstandsgesetz für den vorliegenden, vollkommen rauhen Bereich lautet somit unter Berücksichtigung der Querschnittsform:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k_{\rm s}}{14,84 \cdot f \cdot r_{\rm hy}} \right) \tag{5}$$

In Abbildung 2 sind die Formbeiwerte von *Bock* für hydraulisch glatte Trapezgerinne aufgetragen. Sie sind um die von *Hey* ausgewerteten Daten nach *Keulegan* ergänzt (mit x in Abb. 2 dargestellt). Die Ergebnisse von *Bock* liegen wesentlich unter den Werten von *Keulegan*, was auf unterschiedliche Annahmen bei den Messbedingungen zurückzuführen ist (DITTRICH, 1998).

Über diese Ergebnisse hinaus sind Ansätze für den Formbeiwert unregelmäßiger Querschnittsformen, wie sie bei naturnahen Gewässern auftreten, noch nicht bekannt. Daher darf in der Praxis bei der Berechnung von Fließgewässern der Formbeiwert entfallen und zur Berechnung Gleichung (6) angesetzt werden (HEINEMANN et al., 1998).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k_{\rm s}}{14,84 \cdot r_{\rm hy}} \right) \tag{6}$$

Heute wird zur Berechnung von naturnah ausgebauten Gerinnen die Methode von *Darcy-Weisbach* (2) der Fließformel von *Gauckler-Manning-Strickler* (3) vorgezogen, da sie eine eindeutigere Formulierung der Rauheiten und eine bessere Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverteilung beinhaltet.

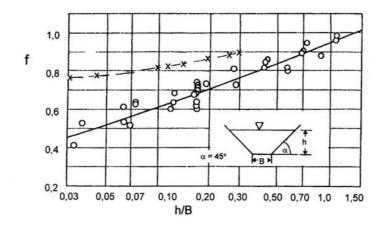


Abbildung 2: Formbeiwert *f* als Funktion des Verhältnisses von Wassertiefe (*h*) zu Sohlbreite (hier: *B*) für das Trapezgerinne (Daten von *Bock, 1966* und *Hey, 1979*) (DITTRICH, 1998)

Die Anwendung von Gleichung (6) bezieht sich auf einfache, geometrische Querschnitte (Rechteck, Trapez, Parabel etc.), da nur bei diesen Formen die Mittelung der Geschwindigkeit zu einem Wert $v_{\rm m}$ zutrifft. Gegliederte Querschnitte müssen entsprechend unterteilt werden. Zudem werden stationärer Abfluss und eindimensionale Strömungszustände vorausgesetzt, Sohlenverformungen werden nicht berücksichtigt (ebene Sohle), und es wird von quasi-hydrostatischer Druckverteilung ausgegangen (PATT et al., 1998).

2.2.2 Ufervegetation

Die Bewegung des Wassers in offenen Gerinnen ist stets mit Verlusten an innerer Energie verbunden, die zu einem großen Teil auf die Reibung an der Wandung zurückzuführen sind. Die Größe dieser Reibungsverluste wird dabei maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit der Wandung, d.h. von der Ufervegetation, bestimmt. Nach BRETSCHNEIDER et al. (1982) ist das Verhältnis zwischen Höhe des Bewuchses und Wassertiefe maßgebend für eine Klassifizierung der Vegetation entlang des Fließgewässers, bzw. um differenzierte Angaben über die Fließwiderstände machen zu können.

Da die Fließformeln zur Berechnung des Abflusses sich überwiegend auf die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt beziehen oder von einer bestimmten Geschwindigkeitsverteilung ausgehen, ist es sinnvoll, sich bei der Einteilung des Bewuchses an den zu erwartenden unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilungen zu orientieren. Diese hängen wesentlich davon ab, ob der Bewuchs überströmt oder durchströmt wird. Deshalb und aufgrund der Vielfalt der Vegetation nehmen *Bretschneider et al.* eine Klassifizierung in Klein-, Mittel- und Großbewuchs vor, was sich auch in der Literatur durchgesetzt hat.

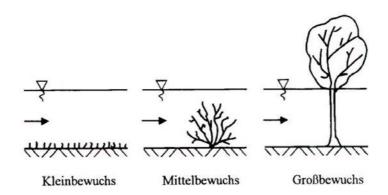


Abbildung 3: Einteilung der Ufervegetation in Klein-, Mittel- und Großbewuchs in Abhängigkeit vom Verhältnis der Pflanzenhöhe zur Wassertiefe (BRETSCHNEI-DER et al., 1982)

• Kleinbewuchs:

Dies ist Vegetation, deren Höhe im Vergleich zur Wassertiefe so klein ist, dass sie als Wandrauheit angesehen werden kann. Kleinbewuchs wird vollkommen überströmt. Er wird in der Regel mit der äquivalenten Rauheit (k_s) charakterisiert.

• Mittelbewuchs:

Bei Mittelbewuchs handelt es sich um Vegetation, deren Höhe die gleiche Größenordnung wie die Wassertiefe erreicht und sowohl durchströmt als auch überströmt werden kann. Durch vollständiges Umlegen kann Mittelbewuchs auch zu Kleinbewuchs werden.

Die Vorgänge beim Überströmen von Pflanzenbeständen sind noch unzureichend erfasst. Da für die praktische Anwendung keine ausreichend erprobten Berechnungsverfahren für flexiblen Mittelbewuchs vorhanden sind, wird empfohlen, den durch diesen Bewuchs erzeugten Widerstand in Form des $k_{\rm s}$ -Wertes zu berücksichtigen. Alternativ kann wie bei Großbewuchs vorgegangen werden.

• Großbewuchs:

Ist die Pflanzenhöhe größer als die Wassertiefe, so spricht man von Großbewuchs. Die Fließgeschwindigkeit über die Tiefe ist nahezu konstant. Über Anströmfläche, Anströmgeschwindigkeit und geometrisch messbare Größen des Bewuchses (Baum-/Buschabstände und -durchmesser) wird die Widerstandskraft, die der Bewuchs der Strömung entgegensetzt, bestimmt. Dabei ist der durchströmte Bewuchs als starr anzusehen. Im DVWK-Merkblatt 220 (1991) ist das Verfahren zur Ermittlung des Widerstandsbeiwerts eines durchströmten Pflanzenkollektivs beschrieben.

Werden Pflanzen von Wasser um- oder überströmt, dann wird auf die Pflanze eine Kraft ausgeübt. Während sie bei kleineren Geschwindigkeiten bzw. Abflusstiefen noch umströmt wird, neigt sich die Pflanze mit zunehmender Geschwindigkeit oder Wassertiefe immer mehr in Strömungsrichtung, bis sie schließlich untertaucht. Oplatka führte

in der Schweiz Untersuchungen durch, um das Verhalten von Weiden in der Strömung besser beschreiben zu können. Auf seine Versuche und Erkenntnisse wird in Kapitel 5.2 eingegangen.

2.2.3 Einfluss des Bewuchses auf die Fließgeschwindigkeit

Aus Modelluntersuchungen im Rahmen eines Forschungsschwerpunktes der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* ging hervor, dass an Bewuchsrändern von Fließgewässern mit baum- oder strauchartiger Vegetation (Großbewuchs) ausgeprägte Wirbel- und Walzenströmungen (Makroturbulenzen) mit einem intensiven Massen- und Impulsaustausch vorhanden sind (vgl. Abb. 4). Die gleichen Vorgänge wurden auch in der Natur beobachtet.

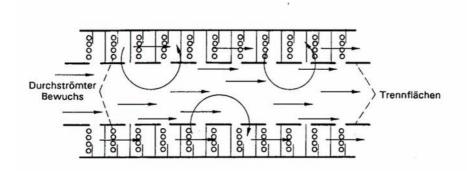


Abbildung 4: Prinzipskizze zu den Austauschvorgängen an den Bewuchsrändern von Fließgewässern. Im Bereich der Trennflächen sorgen Verwirbelungen für intensiven Massen- und Impulsaustausch (DVWK, 1991).

Infolge dieser Makroturbulenzen gelangt einerseits langsam fließendes Wasser aus den Bewuchszonen in den bewuchsfreien Querschnitt und bremst die Hauptströmung ab. Andererseits fließt Wasser aus der Hauptströmung in den bewachsenen Bereich, beschleunigt jedoch den Abfluss im Bewuchs aufgrund der großen Fließwiderstände kaum. Dieser Austauschvorgang (Interaktion) ist verantwortlich für die Wirbelströmungen, welche den inneren Fließwiderstand erheblich vergrößern und zur Reduktion der Fließgeschwindigkeit führen (DVWK, 1991).

2.2.4 Gliederung des Fließquerschnitts

Für natürliche Fließgewässer wie auch für gegliederte Gewässerquerschnitte existiert noch keine allgemein gültige Formel zur Berechnung des Abflusses. Die Annahme einer mittleren Fließgeschwindigkeit für den Gesamtquerschnitt ist nicht zulässig. Es wird daher empfohlen, den Querschnitt durch vertikale, fiktive Trennflächen aufzuteilen und die Einzelabflüsse getrennt zu berechnen. Die Summe der Teilabflüsse ergibt dann den Gesamtabfluss.

In den unterschiedlich strukturierten Querschnittsteilen liegen unterschiedliche Geschwindigkeiten vor, an deren Übergangsbereich Diskontinuitäten entstehen

(vgl. Kap. 2.2.3). Diese Interaktionsvorgänge sind aber nicht über den gesamten Abflussquerschnitt gleich stark ausgeprägt, sondern finden vor allem an der Grenze zwischen bewuchsfreiem Querschnitt und Uferbewuchs statt (vgl. Abb. 5).

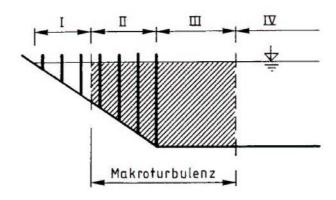


Abbildung 5: Hydrodynamische Einflussbereiche in Gerinnen mit Uferbewuchs (DVWK, 1991)

Die Strömungsvorgänge in Gerinnen mit Uferbewuchs lassen sich generell in vier Einflussbereiche unterteilen. Im Bereich I wird das Abflussgeschehen nur von den Fließwiderständen des Bewuchses und der Sohle bestimmt. In den Bereichen II und III kommen die oben erwähnten Widerstände aus den Makroturbulenzen hinzu. Der Bereich IV, der sich offensichtlich nur bei geringem Bewuchs oder in relativ breiten Gerinnen einstellt, bleibt von den Austauschvorgängen unbeeinflusst. Für jeden dieser Teilbereiche ist das Fließgesetz (2) mit dem individuell ermittelten Widerstandsbeiwert (λ) anzusetzen (DVWK, 1991).

Pasche konnte Erkenntnisse (PASCHE, 1984) über die Intensität der Interaktionsmechanismen in den verschiedenen Rauheitsbereichen gewinnen (vgl. Abb. 6). Der stärkste Rückgang der Interaktionsvorgänge findet am unmittelbaren Übergang zwischen Bewuchs und Hauptströmung (Bereiche II–IIIa) statt. Der Energiegehalt der Makroturbulenzen im restlichen Vorlandbereich ändert sich nur geringfügig. Im Hauptgerinne reduziert sich der Einfluss der Austauschbewegung mit zunehmender Entfernung von der Böschung und erreicht sein Minimum am Ort des Geschwindigkeitsmaximums. Die Interaktionsvorgänge, die vom Uferbewuchs verursacht werden, vergrößern den Fließwiderstand und verringern dadurch die Fließgeschwindigkeit und die Abflussleistung eines Gerinnes.

Durch die Unterteilung des Querschnitts entstehen fiktive Trennflächen (Bereichsgrenzen) zwischen den bewachsenen und den gehölzfreien Gerinneabschnitten, die in dieser Weise nur im theoretischen Modell existieren. In der Praxis gehen die verschiedenen Bereiche fließend ineinander über. Deshalb wird für die Trennfläche am gehölzfreien Querschnittsteil eine Scheinschubspannung angesetzt, die durch einen Widerstandsbeiwert bzw. eine Rauheit ausgedrückt wird.

Dieser Ansatz ist sehr wichtig, da durch den zusätzlichen Widerstand der Abfluss we-

sentlich reduziert wird, so dass es zu falschen Bemessungen kommen kann. Die Größe des interaktionsbedingten Widerstandsbeiwertes oder der Trennflächenrauheit kann durch das Verfahren von *Mertens* bzw. nach *Pasche* abgeschätzt werden (DVWK, 1991). Auf Einzelheiten dieser Berechnungsverfahren wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen.

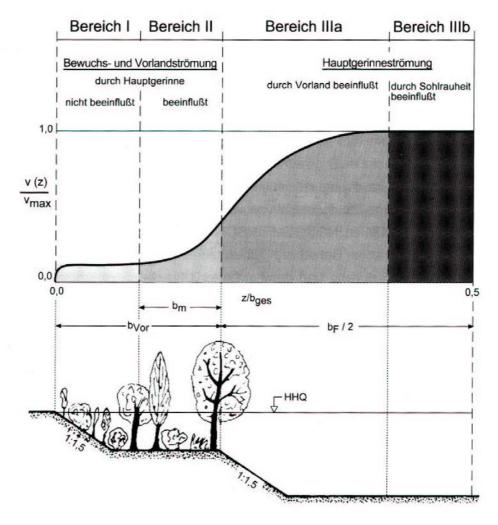


Abbildung 6: Interaktionsbereiche eines idealisierten Fließquerschnitts nach *Pasche* (GERST-GRASER, 2000)

Bereich I : vom Austauschvorgang unbeeinflusster Bereich

in der Gehölzzone

Bereich II : Interaktionsbereich in der Gehölzzone

Bereich IIIa : Interaktionsbereich im freien Abflussquerschnitt Bereich IIIb : vom Austauschvorgang unbeeinflusster Bereich

im freien Abflussquerschnitt

2.2.5 Geschwindigkeitsverteilung

Die Geschwindigkeitsverteilung in einem natürlichen Gerinne ist sehr ungleichförmig. Die Darstellung der Isotachen (Linien gleicher Geschwindigkeiten) zeigt, dass die maximalen Werte im Bereich der größten Fließtiefe nahe der Wasseroberfläche auftreten. In Nähe der Berandungen nehmen die Geschwindigkeiten ab (vgl. Abb. 7).

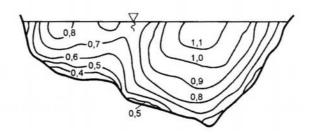


Abbildung 7: Beispiel zur Geschwindigkeitsverteilung in einem natürlichen Gewässerquerschnitt (PATT et al., 1998)

Als einer der Ersten untersuchte *Felkel* von 1958 bis 1960 in der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, das Abflussverhalten weidenbewachsener Gerinne (FELKEL, 1960). Er führte in drei je 15 m langen Versuchsrinnen Durchfluss- und Geschwindigkeitsmessungen mit einseitigem und beidseitigem Weidenbewuchs durch, wobei er zur Simulation des Uferbewuchses ca. 10 mm starke Ruten in die mit Magerbeton befestigten Böschungen steckte.

"Weiden nehmen mit ihren für den Uferschutz vorteilhaften Eigenschaften einen wichtigen Platz ein. Rasches Wachstum, Elastizität, Anspruchslosigkeit, Regenerationsfähigkeit sowie weitere für die Ansiedlung am Wasser günstige Eigenschaften machen diese einheimischen Strauch- bzw. Baumarten als Bepflanzung im Lebendverbau so wertvoll. Trotz der zahlreichen mit Weiden ausgeführten Uferbauten steht der entwerfende Ingenieur immer wieder vor der schwierigen Frage nach dem Einfluss des Weidenbewuchses auf den Abfluss, ohne sie klar beantworten zu können." (Karl Felkel)

Seine Ergebnisse erhielt er durch den Vergleich von Gerinnen ohne Bewuchs mit Gerinnen, deren Böschungsufer unterschiedliche Bewuchsvarianten aufwiesen. Hierbei untersuchte er das Fließverhalten belaubter bzw. unbelaubter, vier-monatiger bzw. einjähriger Weidenbestände unterschiedlicher Anzahl und Anordnung im Uferbereich. Aus *Felkels* Durchflussmessungen geht hervor, dass der Weidenbestand den Abfluss abhängig von der Wassertiefe zum Teil erheblich (um 30 bis 70 %) mindert, was auf die Vorgänge des Massen- und Impulsaustausches zurückzuführen ist (vgl. Kap. 2.2.3). Mit zunehmender Wassertiefe wächst die Abminderung. Das Alter der Weiden hat ebenso wie die Belaubung keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Durch Geschwindigkeitsmessungen mit dem Ott'schen Flügel konnte Felkel für die Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Gerinneachse die Auswirkung von Weidenbewuchs auf die örtlichen Geschwindigkeiten erfassen (vgl. Abb. 8).

Isotachenpläne

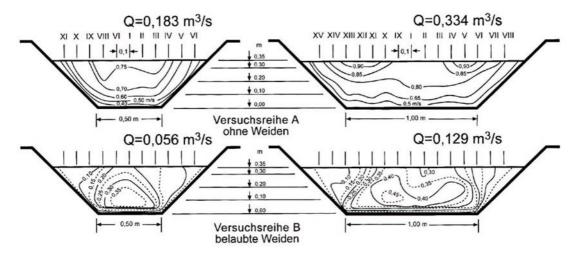


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverteilungen ohne Weidenbewuchs (Versuch A) und mit Weidenbewuchs (Versuch B) nach *Felkel* (GESTGRASER, 2000)

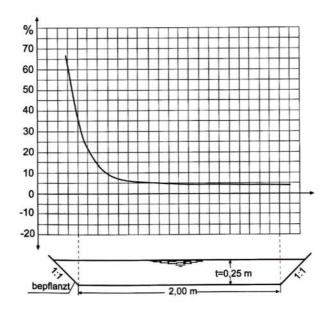


Abbildung 9: Verminderung der Fließgeschwindigkeit bei Weidenbewuchs auf nur einer Böschungsseite prozentual zur Geschwindigkeit im unbepflanzten Gerinne nach *Felkel* (GERSTGRASER, 2000)

In der Zone unmittelbar über den Böschungen, die von den Weiden eingenommen wurde, ist die Strömungsgeschwindigkeit auf ein Minimum zurückgegangen. Auf die Oberfläche gestreute Papierschnipsel ließen an vielen Stellen kleine, drehende Wasserwalzen mit örtlichen Rückströmungen erkennen, was auf starke Turbulenzen hinweist. Im Vergleich zum unbewachsenen Gerinne, wo die Isotachen annähernd parallel zur Gerinnebegrenzung verlaufen, werden sie durch den Bewuchs stark von den Böschungen fortgedrängt. Aus Abbildung 8 ist ersichtlich, dass nicht nur im Bewuchsbereich sondern auch im gehölzfreien Mittelquerschnitt die Fließgeschwindigkeiten um mehr als 50 % reduziert werden. Die maximale Geschwindigkeit wird nicht mehr in der Nähe des Wasserspiegels sondern in der unteren Querschnittshälfte angetroffen. Die maßgebende Reduktion der Fließgeschwindigkeit (ca. 60 bis 10 %) findet im unmittelbaren Böschungsbereich statt (vgl. Abb. 9). Eine geringe Geschwindigkeitsreduktion ist noch in einiger Entfernung von der Böschung vorhanden (FELKEL, 1960).

Rickert untersuchte den Einfluss der Sohlenbreite und der Böschungsneigung auf die Abflussleistung eines Trapezgerinnes mit beidseitigem Gehölzbewuchs (PATT et al., 1998). Er fand heraus, dass der Einfluss des Bewuchses mit zunehmender Gewässerbreite und sinkender Wassertiefe abnimmt. Bei breiten Gerinnen (ab ca. 10 m) sind die Fließgeschwindigkeiten in Gerinnemitte von den Vorgängen im Uferbereich nahezu unbeeinflusst. Während die Leistungsminderung bei 3 m Wassertiefe im Extremfall 75 % betragen kann, ist bei breiten Gewässern (ab ca. 10 m) und 1,5 m Wassertiefe eine geringere Beeinflussung der Gerinneleistungsfähigkeit zu erwarten (vgl. Abb. 10).

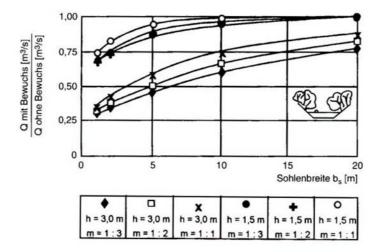


Abbildung 10: Einfluss der Sohlenbreite $b_{\rm s}$ und der Böschungsneigung (hier: m) auf die Abflussleistung eines Trapezquerschnittes mit beidseitigem Gehölzbewuchs und einer Sohlenneigung $I_{\rm So}=0,1\,\%$ nach *Rickert* (PATT et al., 1998)

2.3 Schubspannung

2.3.1 Schleppspannungsmodell

Die Herleitung der am benetzten Gerinneumfang auftretenden Kräfte kann analog zur Ermittlung der Reibungskraft eines gleitenden Körpers auf einer schiefen Ebene erfolgen. Für die folgende Betrachtung wird von einem stationär–gleichförmigen Strömungszustand ausgegangen.

In Abbildung 11 ist ein idealisiertes Flüssigkeitsteilchen dargestellt, auf das die Erdbeschleunigung (g) wirkt. Die Erdbeschleunigung kann in zwei Komponenten aufgeteilt werden, in eine Komponente senkrecht zur Fließrichtung (g_y) und in eine Komponente in Fließrichtung (g_x) .

$$g_{\rm x} = g \cdot \sin \alpha \approx g \cdot \tan \alpha = g \cdot I_{\rm So}$$
 (7)

Für kleine Winkel α kann vereinfacht $sin\alpha \approx tan\alpha \approx I_{So}$ angenommen werden.

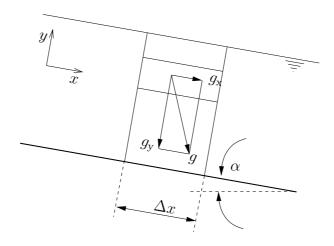


Abbildung 11: Aufteilung der Erdbeschleunigung in Komponenten parallel und normal zur Fließrichtung

Die in Fließrichtung wirkende Komponente (g_x) ist die Beschleunigungskomponente der Schwerkraft. Wie aus Gleichung (7) hervorgeht, ist die Gravitationskraft bzw. die Sohlneigung (I_{So}) der maßgebende Faktor für die Flüssigkeitsbewegung.

Für die Berechnung der Schubspannung müsste eigentlich das Energiehöhengefälle $(I_{\rm E})$ herangezogen werden, welches nach dem Gesetz von Bernoulli um den Betrag $v^2/2g$ über dem Wasserspiegel liegt. Für den gleichförmigen Abfluss darf das Energiehöhengefälle $(I_{\rm E})$ mit dem Sohlengefälle $(I_{\rm So})$ und dem Wasserspiegelgefälle $(I_{\rm Sp})$ gleichgesetzt werden (vgl. Abb. 12).

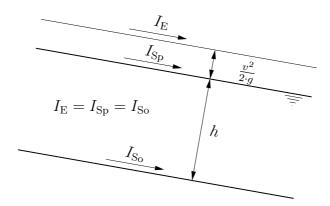


Abbildung 12: Darstellung von Sohlengefälle (I_{So}), Wasserspiegelgefälle (I_{Sp}) und Energiehöhengefälle (I_{E}) für stationär gleichförmige Fließbewegung

Schleppkraft:

Die Größe der an der Gewässersohle wirkenden Schleppkraft kann mit dem in Abbildung 13 dargestellten idealisierten Wasserkörper verdeutlicht werden.

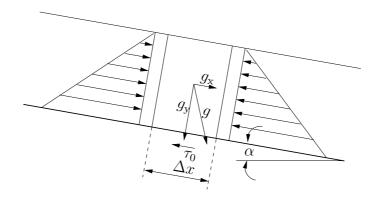


Abbildung 13: Gleichgewichtsbedingung zur Definition der Sohlenschubspannung

Die Gewichtskraft (*G*) der Wassersäule setzt sich aus der Dichte der Flüssigkeit und deren Volumen zusammen:

$$G = \rho_{\mathbf{W}} \cdot g \cdot A \cdot \Delta x \tag{8}$$

Die treibende Komponente der Gewichtskraft (G_x) beträgt

$$G_{\rm x} = G \cdot \sin\alpha \approx G \cdot I_{\rm So} \tag{9}$$

Mit Gleichung (8) ergibt sich die Schleppkraft (G_x) zu

$$G_{\rm x} = \rho_{\rm W} \cdot g \cdot A \cdot \Delta x \cdot I_{\rm So} \tag{10}$$

Gerinnewiderstand:

Die Widerstandskraft (*W*) an der Gerinnesohle beträgt:

$$W = \tau_0 \cdot \Delta x \cdot l_u \tag{11}$$

Sohlenschubspannung:

Aus dem Gleichgewicht der Kräfte in Abbildung 13 (Summe aller Kräfte in x–Richtung gleich null) ergibt sich mit (10) und (11)

$$W = G_{x}$$

$$\tau_{0} \cdot \Delta x \cdot l_{u} = \rho_{W} \cdot g \cdot A \cdot \Delta x \cdot I_{So}$$

$$\tau_{0} = \rho_{W} \cdot g \cdot \frac{A}{l_{u}} \cdot I_{So}$$

Die Größe τ_0 wird im Wasserbau als *Sohlenschubspannung* bezeichnet. Durch das Verhältnis der Querschnittsfläche (A) zum benetzten Umfang $(l_{\rm u})$ wird der hydraulische Radius des Gerinnes ausgedrückt. Für breite Gerinne kann an Stelle des hydraulischen Radius $(r_{\rm hy})$ die Wassertiefe (h) eingesetzt werden.

schmales Gerinne:
$$B < 30 \cdot r_{\rm hy}$$
 mit $r_{\rm hy} = \frac{A}{l_{\rm u}}$ breites Gerinne: $B \ge 30 \cdot r_{\rm hy}$ mit $r_{\rm hy} = h$

Somit ergibt sich folgende Formel für die mittlere Schubspannung (τ_0) an der Gerinnesohle:

$$\tau_0 = \rho_{\rm W} \cdot g \cdot r_{\rm hy} \cdot I_{\rm So} \quad [N/m^2]$$
 (12)

2.3.2 Schubspannungsverteilung

Während für einige Probleme wie die Durchflussberechnung (Fließformeln) oder die ebene Geschwindigkeitsverteilung theoretisch fundierte und ausreichend mit Messwerten belegte Lösungen angeboten werden, weist insbesondere die Frage nach der Schubspannungsverteilung entlang der Böschung und deren Beeinflussung durch die Querschnittsform bzw. unterschiedliche Rauheitsverhältnisse noch erhebliche Unklarheiten und Widersprüche auf.

Insbesondere die Kenntnis über die Verteilung der Schubspannung an der Gerinnewandung ist von Bedeutung, um Aussagen über die Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen machen zu können. Es sind Ansätze hinsichtlich dieser Problematik in der Literatur zu finden, die teilweise sehr unterschiedlich sind, oder nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich aufweisen und nicht allgemein anwendbar sind. Nachfolgend werden beispielhaft einige dieser Ansätze erläutert, sie beschränken sich im Rahmen dieser Arbeit allerdings auf Untersuchungen zu Schubspannungsverteilungen von Trapezgerinnen.

Die auf das Gewässerbett wirkenden Schubspannungen sind als Folge unterschiedlicher Geschwindigkeitsverteilungen nicht gleichmäßig über den gesamten Fließquerschnitt verteilt. Abhängig vom Gerinneprofil bildet sich eine eigene Charakteristik aus, wobei man zwischen den Schubspannungen an den seitlichen Berandungen (Böschungen) und an der Gewässersohle unterscheidet. Die Schubspannung an der Böschung ist im Vergleich zur Sohlenschubspannung geringer, was rechnerisch durch eine prozentuale Abminderung berücksichtigt werden kann (PATT et al., 1998).

Zur Ermittlung der maximalen Schleppspannung an der Sohle und an der Böschung von Trapezgerinnen eignen sich die Diagramme von *Chow* (vgl. Abb. 14). Der hydraulische Radius ist darin durch die Wassertiefe ersetzt, sein Einfluss kommt aber in den unterschiedlichen Kurven zum Ausdruck³.

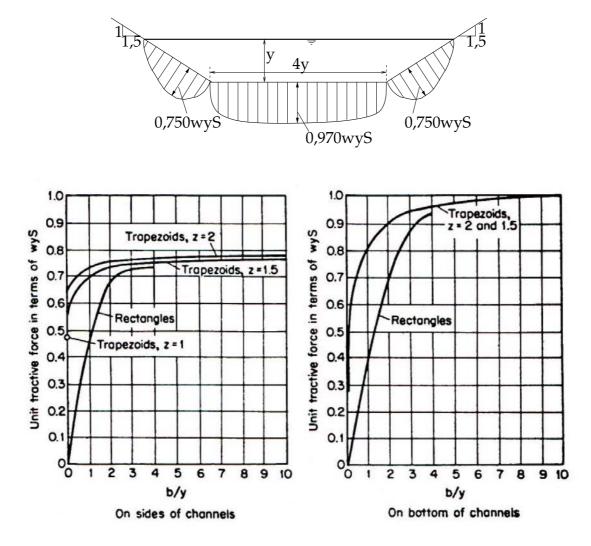


Abbildung 14: Ermittlung der Abminderungskonstanten zur Bestimmung der Maximalschubspannung an Böschung und Sohle eines breiten Trapezgerinnes mit flacher Böschung (CHOW, 1959)

 $^{^3}$ Die englischen Bezeichnungen entsprechen den Bezeichnungen nach DIN 4044 wie folgt: $y=h, w=\rho\cdot g, S=I_{So}, z=n, b=b_{So}$

Detaillierte Erkenntnisse über die Schubspannungsverteilung für laminare Strömung in Trapezgerinnen konnte *Krüger* in seiner Arbeit (KRÜGER, 1988) gewinnen. Er hat in umfangreichen Versuchen mit unterschiedlichen Geometrie- und Rauhigkeitsverhältnissen über 200 Schubspannungsverteilungen gemessen und analysiert. Für laminare Strömung ist die idealisierte Schubspannungsverteilung für ein Trapezgerinne in Abbildung 15 dargestellt⁴. Seiner Meinung nach ist diese Darstellung der Schubspannungsverteilung bei Gerinnen mit $b_{\rm So}/h \geq 4$ und Böschungsneigungen $n \geq 1$ ausreichend genau.

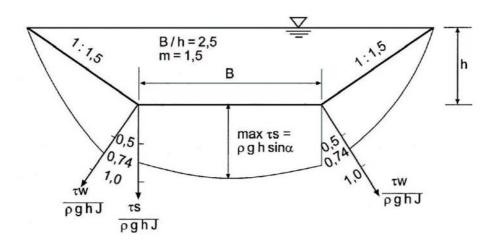


Abbildung 15: Theoretische Schubspannungsverteilung in breiten Trapezgerinnen (B/ $h \ge 4$) mit flach geneigten Böschungen ($n \ge 1$) nach Krüger (GERSTGRASER, 2000)

Nach $Kr\ddot{u}ger$ haben die Sohl- und Wandschubspannungen an den Übergängen Sohle-Böschung (Böschungsfuß) den gleichen Betrag, dort treten auch die maximalen Wandschubspannungen auf. Ein Schubspannungsnullpunkt an dieser Stelle tritt nur in Rechteck- und Dreiecksprofilen mit $n \leq 1$ auf. Die maximale Schubspannung des gesamten Querschnitts tritt an der Sohle in Gerinnemitte auf und errechnet sich nach Gleichung (12). Die Verteilung ist formabängig, d.h. eine Änderung des Gerinnequerschnitts verändert auch die Schubspannungsverteilung.

Für große $b_{\rm So}/h$ –Verhältnisse (breite Trapezgerinne mit $b_{\rm So}/h>4$) und flach geneigte Böschungen ($n\geq 1$ bzw. $\leq 45^{\circ}$) streben die Schubspannungswerte gegen folgende Grenzwerte:

```
maximale Sohlenschubspannung: max \tau_0 = \rho_{\mathrm{W}} \cdot g \cdot r_{\mathrm{hy}} \cdot I_{\mathrm{So}} maximale Wandschubspannung: max \tau_{\mathrm{W}} = 0,741 \cdot \rho_{\mathrm{W}} \cdot g \cdot r_{\mathrm{hy}} \cdot I_{\mathrm{So}} mittlere Wandschubspannung: \tau_{\mathrm{Wm}} = 0,543 \cdot \rho_{\mathrm{W}} \cdot g \cdot r_{\mathrm{hy}} \cdot I_{\mathrm{So}}
```

Im Vergleich zwischen gemessenen turbulenten und theoretisch laminaren Wandschubspannungen konnte *Krüger* bei gleicher Rauheit der Sohle und der Böschungen

 $^{^4}$ Die von Krüger gewählte Bezeichnung B entspricht b_{So} und τ_{S} entspricht τ_0 nach DIN 4044.

an einigen Stellen Differenzen von 30 % feststellen. Generell sind Bereiche mit größeren Rauheiten auch erhöhten turbulenten Schubspannungen ausgesetzt. Schubspannungen sind mit Fließwiderständen gleichzusetzen, weshalb sich der Fließwiderstand auch dort konzentriert, wo die größten Rauheiten auftreten, während die weniger rauhen Bereiche schubspannungsmäßig entlastet werden.

Eine genaue Verteilung der Schubspannungen bei turbulentem Abfluss kann nicht exakt vorhergesagt werden. Die Zähigkeitskräfte verlieren bei turbulentem Abfluss an Einfluss und werden von den turbulenten oder Scheinschubspannungskräften überlagert. Zusätzlich treten in natürlichen Gerinnen meist Rauheitsunterschiede auf, wodurch die Schubspannungsverteilungen beeinflusst werden (KRÜGER, 1988).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Schubspannungsverteilung wie in Abbildung 15 dargestellt dann angenommen werden darf, wenn das Trapezgerinne die folgenden Bedingungen erfüllt:

$$b_{\rm So}/h > 4$$
 für $n = 0, 5$ (63,4°)
 $b_{\rm So}/h > 2$ für $n = 1$ (45,0°)
 $b_{\rm So}/h > 1$ für $n = 2$ (26,6°)

Liegt ein bekanntes Geschwindigkeitsprofil vor, kann die lokale Schubspannung aus der Neigung des Geschwindigkeitsprofiles $(\delta v/\delta y)$ und der dynamischen Viskosität (η) an der Sohle mit der Beziehung

$$\tau = \eta \cdot \frac{\delta v}{\delta y} \tag{13}$$

berechnet werden (vgl. Abb. 16).

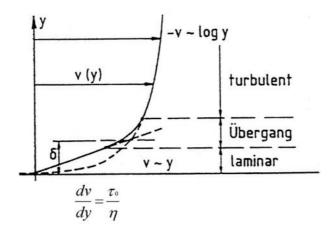


Abbildung 16: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung (IWK, 1992)

2.3.3 Stabilität von Gerinnewandungen ohne Bewuchs

Die morphodynamische Entwicklung eines Fließgewässers wird maßgeblich von den Feststofftransportvorgängen geprägt. Dabei ist das Bettmaterial ständig den Prozessen Erosion, Transport und Ablagerung ausgesetzt. Abhängig von Abfluss, Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Gefälle, Korngröße und Kornverteilung bilden sich aufgrund des Zusammenspiels von Strömung und Sedimentbewegung die vielfältigsten Strukturen aus. Man unterscheidet bei Transportvorgängen zwischen Geschiebe-, Schwebstoffund Schwimmstofftransport.

Geschiebe und Schwebstoffe sind ungelöste Stoffe. Sie stammen aus eingetragenem Material (Spülfracht) des Einzugsgebietes bzw. von seitlichen Gewässerzuflüssen oder aus Sohlen- und Ufersubstrat (Bettmaterial). Der Geschiebetransport spielt sich in den sohlnahen Bereichen ab und ist deshalb einer der wichtigsten Faktoren bei der Ausformung des Gewässerbettes.

Beim Schwebstofftransport bewegen sich die Feststoffteilchen ohne Sohlenkontakt in der Strömung mit. Die Sinkgeschwindigkeit der Feststoffe - bedingt durch Korndurchmesser, Korndichte, Kornform, Dichte des Wassers - und die Geschwindigkeitsverteilung sowie eventuelle Turbulenzen im Gerinne sind die maßgeblichen Einflussfaktoren dieser Transportart. In stehenden Gewässern und Bereichen mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten können durch Schwebstoffablagerungen beträchtliche Verlandungen entstehen.

Schwimmstoffe sind meist organischen Ursprungs (z.B. Laub, Äste, Bäume). Sie stammen vom Ufer- und Vorlandbewuchs und bewegen sich auf der Wasseroberfläche. Im Oberlauf eines Gewässers sind die organischen Materialien eine wichtige Nährstoffquelle und somit ein wichtiger Bestandteil der Nahrungskette. Eine große Gefahr liegt darin, dass sich Schwimmstoffe an einzelnen Bewuchselementen festsetzen und dadurch großflächige Auskolkungen verursachen können (vgl. Kap. 5.2). Nachfolgend wird der Bewegungsbeginn beim Geschiebetransport näher betrachtet.

A. Kritische Schubspannung

Die *kritische Schubspannung* (τ_{crit}), auch *Schleppspannung* genannt, ist ein Maß für die Erosionsbeständigkeit der Gerinnesohle, sofern sie nicht aus frisch abgelagerten Lockersedimenten, sondern aus älterem, ursprünglich vorhandenem Substrat besteht. Wird sie überschritten, so setzt an der Sohle im betrachteten Querschnitt die Bewegung der Bodenkörner ein.

Die Widerstandskraft der Gerinnewandung wird durch den Vergleich der vorhandenen, angreifenden Schubspannung ($\tau_{\rm vorh}$) mit einer kritischen Schubspannung ($\tau_{\rm crit}$) bestimmt. Bei Erreichen dieser kritischen Schubspannung ($\tau_{\rm crit}$) setzt sich das Sohlenmaterial in Bewegung. Ist $\tau_{\rm vorh} < \tau_{\rm crit}$ hält der Sohlenaufbau der Belastung stand und es kommt nicht zum Erosionsbeginn.

Die Stabilität des Gerinnebettes kann auch durch den Vergleich der vorhandenen Fließgeschwindigkeit ($v_{\rm vorh}$) mit der kritischen Fließgeschwindigkeit ($v_{\rm crit}$) erfasst werden. Dabei lässt sich die vorhandene Fließgeschwindigkeit mit einer der Fließformeln [Gleichung (1), (2) oder (3)] berechnen. Im Versuch liegt $v_{\rm crit}$ vor, wenn auch hier der

			Literatur									
Beschaffenheit der Sohle		Korngröße, Kantenlänge	BEGEMANN / SCHIECHTL	BOLLRICH		DIN 19661, T.2 (Lange, Lechner)		Rössert		SCHNEIDER-BT.		
		[mm]	τ_{krit} [N/m ²]	τ_{krit} [N/m ²]	v_{krit} [N/m ²]	τ_{krit} [N/m ²]	v _{krit} [N/m²]	τ _{krit} [N/m²]	v _{krit} [N/m²]	τ_{krit} [N/m ²]		
lehmiger Sand	kolloidal	-	-	2,0	-	2,0	-	-	-	-		
sandiger Lehm	kolloidal	-	-	-	0,4 - 0,6	-	0,4 - 0,6	10 - 12	0,3 - 0,5	-		
sandiger Lehm	nicht kolloida	I -	2,0	-	-	-	-	10 - 12	0,3 - 0,5	-		
lockerer Lehm	kolloidal	-	-	3,5	0,15 - 0,2	3,5	0,15 - 0,2	-	-	-		
steifer Lehm	sehr kolloidal	-	2,2	-	-	-	-	-	-	-		
gewöhnlicher Lehm		-	3,7	-	-	-	-	-	-	-		
lehmhaltige Ablagerungen nicht ko		I -	2,5	-	-	2,5	-	-	-	-		
festgelagerter Lehm, Ton bzw. Schlamm kolloidal		-	-	12,0	0,7 - 1,0	12,0	0,7 - 1,0	-	0,7 - 1,0	10 - 12,5		
fester Klei	kolloidal	-	-	-	-	-	0,90 - 1,30	-	2,0	-		
alluvialer Schlamm	kolloidal	-	2,2	-	-	-	-	-	-	-		
alluvialer Schlamm	nicht kolloida	l -	2,5	-	-	-	-	-	-	-		
lockerer Schlamm	kolloidal	-	-	2,5	0,1 - 0,15	2,5	0,1 - 0,15	-	-	-		
Einzelkorngefüge:												
Schluff		0,02 - 0,063	-	-	0,1 - 0,2	-	-	-	-	-		
Feinsand		0,063 - 0,2	-	0,5 - 1,0	0,2 - 0,35	1,0	0,2 - 0,35	-	-	-		
Mittelsand		0,2 - 0,63	-	1,0 - 2,0	0,35 - 0,45	2,0	0,35 - 0,45	-	-	-		
Quarzsand		0,2 - 0,4	1,8 - 2,0	-	-	-	-	1,8 - 2,0	0,2 - 0,3	-		
Quarzsand		0,4 - 1,0	2,5 - 3,0	-	-	-	-	2,5 - 3,0	0,3 - 0,6	-		
Grobsand		0,63 - 1,0	-	-	-	3,0	-	-	-	-		
Quarzsand		1,0 - 2,0	4,0	-	-	4,0	-	-	-	-		
Grobsand		0,63 - 2,0	-	3,0 - 6,0	0,45 - 0,6	6,0	0,45 - 0,60	6 - 10	-	-		
grobes Sandgemisch		<u>-</u>	6,0 - 7,0	-	-	-	-	-	-	-		
Kies-Sand-Gemisch, festgelagert		0,63 - 6,3	-	-	-	9,0 - 12,0	-	-	-	-		
Feinkies		2,0 - 6,3	-	8,0 - 12,0	0,6 - 0,8	-	0,6 - 0,8	-	-	8 - 10		
rundlicher Quarzkies		5,0 - 15,0	12,5	-	-	-	-	-	-	12,5 -15		
Mittelkies		6,3 - 20	-	15,0	0,8 - 1,25	15,0	0,8 - 1,25	15 - 20	0,6 - 1,0	15 - 20		
Grobkies		20 - 63	-	45,0	1,25 - 1,6	45,0	1,25 - 1,60	-	-	-		
lehmiger Kies		-	15,0		-	15,0 - 20,0	-	15,0 - 18,0	-	-		
plattiges Geschiebe	10 - 20 hoch	40 - 60 lang	-	-	-	50,0	-	-	-	-		
Flussschotter, Geröll		50 - 75	-	-	1,7 - 1,8	-	-	30 - 40	1,6 - 1,8	30 - 40		
Flussschotter, Geröll		75 - 100	-	-	1,9 - 2,0	-	-	60	-	40 - 60		
Steine		63 - 100	-	-	- 1	-	1,60 - 2,00	-	-	-		
grobes Quarzgeröll		80 - 150	40,0	-	-	-	-	-	-	-		

Tabelle 1: Zusammenstellung kritischer Schubspannungen und kritischer Geschwindigkeiten

Beginn des Feststofftransportes zu beobachten ist. Als Stabilitätskriterium gilt dann die Bedingung $v_{\rm vorh} < v_{\rm crit}$. Die kritische Fließgeschwindigkeit ($v_{\rm crit}$) nimmt bei gleicher Sohlenbeschaffenheit mit der Wassertiefe zu.

Die kritische Schubspannung ($\tau_{\rm crit}$) ist ebenso wie die kritische Fließgeschwindigkeit ($v_{\rm crit}$) eine aus hydraulischen Versuchen ermittelte Größe. In Tabelle 1 sind Werte zu kritischen Schubspannungen und kritischen Fließgeschwindigkeiten für unterschiedliche Sohlbeschaffenheiten angegeben.

Es gibt zahlreiche Ansätze zum Stabilitätsverhalten von Gewässersohlen, was auch heute noch immer Schwerpunkt von vielen wissenschaftlichen Arbeiten ist. Beispielhaft sollen nachfolgend die Ansätze von *Hjulström* (1935) und *Shields* (1936) zur Ermittlung des Bewegungsbeginns von Gewässersohlen betrachtet werden. Diese Ansätze werden in der Ingenieurpraxis immer wieder verwendet.

B. Der Ansatz von Hjulström

Hjulström entwickelte ein Bemessungsdiagramm, aus dem die Beziehung Strömungsangriff und Sohlenwiderstand von locker gelagertem, gleichförmigem Sohlenmaterial durch die mittlere Geschwindigkeit ($v_{\rm m}$) und den mittleren Korndurchmesser ($d_{\rm k}$) erfasst werden kann (vgl. Abb. 17).

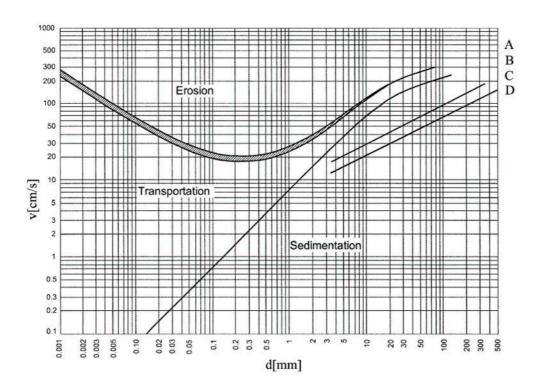


Abbildung 17: Erosion und Sedimentation von gleichförmigem Sohlenmaterial nach *Hjulström* (OEBIUS, 2000)

Bei der Erstellung seines Diagrammes ging er davon aus, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit um 20 % geringer als die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche und um 40 % größer als die Geschwindigkeit in Sohlennähe ist. Außerdem muss die mittlere Geschwindigkeit um 0,2 m/s erhöht werden, falls die Wassertiefe geringer als 30,5 cm (1 Fuß) ist.

Hjulström unterteilt sein Diagramm in die Bereiche *Erosion* (Bewegung nach dem Herauslösen der Partikel aus der Sohle), *Transport* und *Sedimentation*. Die Kurve A beschreibt die mittlere Geschwindigkeit, bei deren Erreichen Körner aus der Sohle gelöst werden. Das Sohlenmaterial setzt sich also gerade in Bewegung. Der Bereich zwischen Kurve A und Kurve B beinhaltet Geschwindigkeiten, die ausreichend sind, um bereits erodiertes Material einer bestimmten Korngröße d_k weiter zu transportieren, ohne das in Ruhe befindliche Sohlenmaterial herauszulösen. Die Kurve C beschreibt das Stabilitätsverhalten einer Sohle, die aus kleinen Korngrößen (d_k <0,2 mm) besteht und die beim Transport groben Materials über ihre Oberfläche gerade noch standhält. Zum Vergleich ist dieselbe von *Owen* ermittelte Beziehung aufgetragen (Kurve D).

Das Hjulström-Diagramm wird auf Grund der beiden einfach zu bestimmenden Grundgrößen Geschwindigkeit ($v_{\rm m}$) und Korndurchmesser ($d_{\rm k}$) häufig zur Abschätzung des Bewegungsbeginnes verwendet und auch vom DVWK (1988) empfohlen. Da der Ansatz von Hjulström viele für die Sohlenstabilität maßgebende hydraulische und sedimentologische Größen vernachlässigt, sollte er nur zu einer ersten groben Abschätzung des Bewegungsbeginns herangezogen werden (DITTRICH, 1998).

C. Der Ansatz von Shields

Der klassische Berechnungsansatz zur Bestimmung des Bewegungsbeginns eines in der Gewässersohle eingebetteten Einzelkorns geht von einer Kräftebilanz am Korn aus. Die Strömung übt auf das Korn eine Scherkraft aus (Strömungsangriff), der das Korn eine Widerstandskraft (Kornwiderstand) entgegensetzt⁵. Solange der Kornwiderstand größer ist als der Strömungsangriff, bleibt die Sohle in Ruhe. Wird ein bestimmter Wert (kritische Schleppspannung) überschritten, so gerät die Sohle in Bewegung. Dies hängt von vielen Parametern wie z.B. von der Dichte des Kornmaterials, Korngröße, Kornform, Sieblinie, Lagerung und von hydraulischen Größen wie Dichte und Zähigkeit des Wassers ab.

Shields hat die Kräftebilanz am Korn systematisch untersucht und in dimensionsloser Schreibweise in einem Diagramm dargestellt (vgl. Abb. 18).

⁵Auf die Herleitung der Kräfte wird in dieser Arbeit nicht eingegangen (vgl. dazu DITTRICH, 1998).

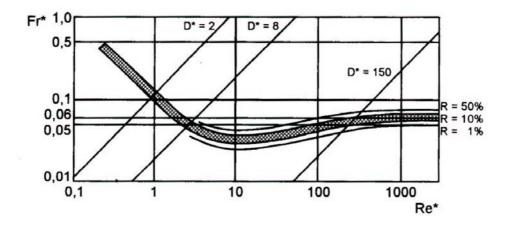


Abbildung 18: Bewegungsbeginn nach *Shields* mit Angabe des Bewegungsrisikos (R) nach *Zan- ke* (PATT et al., 1998)

Als Eingangsgrößen werden folgende Kennzahlen benötigt:

• Schubspannungsgeschwindigkeit:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_{\mathrm{W}}}} = \sqrt{g \cdot r_{\mathrm{hy}} \cdot I_{\mathrm{So}}}$$

• Feststoff-Reynoldszahl:

$$Re^* = \frac{v^* \cdot d_k}{\nu} \tag{14}$$

• Feststoff-Froudezahl:

$$Fr^* = \frac{v^{*2}}{\rho' \cdot g \cdot d_{\mathbf{k}}} \tag{15}$$

• Sedimentologischer Durchmesser:

$$D^* = \left(\frac{\rho' \cdot g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_{\mathbf{k}} = \left(\frac{Re^{*2}}{Fr^*}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{16}$$

• *Relative Feststoffdichte*:

$$\rho' = \frac{\rho_{\rm K} - \rho_{\rm W}}{\rho_{\rm W}}$$

Aus dem *Shields*-Diagramm kann die *dimensionslose Sohlenschubspannung* (τ^*), die oft auch als *Korn-Froudezahl* (Fr^*) bezeichnet wird, entnommen werden. Die Kurve für τ^*_{crit} ist als Funktion der *Korn-Reynoldszahl* (Re^*) aufgetragen und trennt den Bereich zwischen Bewegung und Ruhe des Korns voneinander ab. Die Feststellung, ob sich

eine Gewässersohle in Bewegung befindet, erfolgt durch Überprüfung folgender Ungleichung:

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\rho_K - \rho) \cdot g \cdot d} > \tau_{crit}^* \tag{17}$$

Zanke erweiterte das Shields-Diagramm (Abb. 18) mit Angaben über die Wahrscheinlichkeit des Bewegungsbeginns. Er griff dabei ein Konzept von Grass auf, das den Bewegungsbeginn als einen Zufallsprozess ansieht. Sowohl die Strömungskräfte auf die Körner als auch der Widerstand der Körner gegen die Bewegung ist - abhängig von ihrer zufälligen, momentanen Lage - infolge der Turbulenz örtlich und zeitlich gewissen Schwankungen unterworfen. Es existiert damit für die Gesamtheit der Körner ein bestimmtes Risiko (Wahrscheinlichkeit), bewegt zu werden. Der kritischen Schubspannung nach Shields wurde eine Bewegungswahrscheinlichkeit von 10 % zugeordnet. Das bedeutet, dass 10 % der Körner an der Gerinnesohle in Bewegung sind.

In den meisten Fällen hat man es nicht mit Gerinnensohlen zu tun, die aus Einkorngemischen bestehen, sondern aus ungleichförmigem Material. Kleinere Körner können im Strömungsschatten größerer liegen und dadurch einer größeren Schleppspannung Widerstand leisten. Ebenso ragen größere Körner aus der Sohle heraus und erfahren einen stärkeren Strömungsangriff, was sie bereits bei vergleichsweise kleineren Schleppspannungen bewegen lässt. Das hat zur Folge, dass in Gewässersohlen mit einem starken Ungleichförmigkeitsgrad die feinen Kornanteile ausgetragen werden, während die Grobanteile zurückbleiben.

2.3.4 Stabilität bewachsener Gerinnewandungen

Einfluss des Bewuchses auf die Sohlstabilität nach Johannsen (1980)

Ein "lebendes Deckwerk" besteht aus Pflanzen und durchwurzeltem Boden. Hierbei übernehmen die oberirdischen Pflanzenteile die Aufgabe der Strömungsverlangsamung, das Wurzelwerk dient der Böschungssicherung. Dieses lebende Uferdeckwerk erfüllt also eine statische Funktion, indem es die Kräfte, die bei der Abbremsung der Wasserströmung entstehen, in den Untergrund ableitet.

Die im konstruktiven Ingenieurbau übliche Systematik wird hier auf den Lebendbau übertragen. Der konstruktive Ingenieur schätzt bei statischen Problemen die angreifenden Kräfte nach Art und Größe ab, wählt ein geeignetes statisches System und dimensioniert die einzelnen Bauelemente des Tragwerkes nach den erforderlichen Schnittkräften.

Auf ein lebendes Uferdeckwerk angewendet heißt das:

 Abschätzen (Messen oder Berechnen) der angreifenden Kräfte aus der Wasserströmung

- Untersuchung des Ufersubstrates (Erosionsdisposition)
- Festlegung eines ausreichenden Deckwerksystems
- Dimensionierung der Bauelemente
- Auswahl der geeigneten Pflanzen

Aufnehmbare Schleppkraft eines lebenden Uferdeckwerks

Die Belastung der Ufer wird im Flussbau häufig nach der Schleppkraftformel (12) berechnet. Nach *Johannsen* ist die Anwendung dieser Formel bei naturnahen Fließgewässern mit wechselnden Querschnittsbreiten, flachen und tiefen Sohlabschnitten, Vorländern mit variablen Abmessungen, weiten und engen Kurven sowie Kiesbänken und Inseln unzulänglich und muss mit Korrekturparametern versehen werden. Der Einfluss der Pflanzenart, des Klimas oder des Bodens muss durch entsprechende Faktoren berücksichtigt werden.

Ein effektiver Uferschutz ist dann gegeben, wenn sofort-sichernde Bauweisen vernünftig mit geeigneter Vegetation kombiniert werden. Da es sich bei Pflanzen um lebende, sich im Laufe der Entwicklung verändernde Elemente handelt, gliedert *Johannsen* in seinem Bemessungsverfahren die aufnehmbare Schleppkraft eines Ufers in zwei voneinander unabhängige Komponenten $S_{\rm B}$ und $S_{\rm V}$.

 $S_{\rm B}$ stellt dabei denjenigen Anteil der Schleppkraft dar, der sofort nach der Fertigstellung der Maßnahme von dem Bauwerk bzw. von den harten Baustoffen aufgenommen werden kann. $S_{\rm V}$ ist die aufnehmbare Schleppkraft der Vegetation. Sie ist abhängig von der Pflanzenart, dem Entwicklungsstand sowie den pflanzensoziologischen Eigenschaften.

$$\overline{S} = S_{\rm B} + S_{\rm V} \tag{18}$$

 \overline{S} : aufnehmbare Schleppkraft eines Ufers

*S*_B: Schleppkraft, die rein vom Bauwerk direkt nach Fertigstellung aufgenommen werden kann (ohne Berücksichtigung der Vegetation)

 S_{V} : vegetationsabhängige Schleppkraft, die über Wurzeln und Triebe der Pflanzen aufgenommen wird

Das Bauelement Pflanze übernimmt mit zunehmendem Alter eine stärkere Sicherung. Direkt nach dem Einbau ist der Anteil von $S_{\rm V}$ sehr gering. Eine reine Gehölzpflanzung kann am Anfang so gut wie keine Schleppkraft aufnehmen und birgt daher ein großes Risiko. Durch das Ausbilden der Wurzeln wird der anstehende Boden zusammengehalten und in den darunter liegenden Schichten verankert. $S_{\rm V}$ steigt also mit der Zeit an und übernimmt nach ca. 3 – 4 Vegetationsperioden die komplette Schleppkraftdeckung. Dieser Vorgang ist von mehreren Faktoren abhängig, deshalb setzt sich $S_{\rm V}$ aus folgenden Parametern zusammen:

$$S_{\rm V} = S_{\rm VP} \cdot B \cdot K \cdot R$$

 S_{VP} : spezifischer Grundwert für Pflanzenart, Qualität, Alter und Anordnung

- B: Korrekturfaktor für den Boden. Dieser Faktor berücksichtigt Bodenart, Nährstoffversorgung, mögliche Schadstoffe, Lagerungsdichte, Wassergehalt und Bodenlebewesen.
- *K*: Korrekturfaktor für das Klima. Mit diesem Faktor werden die Temperatur-, Niederschlags- und Windverhältnisse berücksichtigt.
- R: Korrekturfaktor für sonstige Störfaktoren wie Wildverbiss und Krautschicht

Somit ergibt sich für die Schleppkraftberechnung des Uferbereichs:

$$\overline{\overline{S}} = S_{\rm B} + S_{\rm VP} \cdot B \cdot K \cdot R \tag{19}$$

In einigen speziellen Versuchen konnten erste Erkenntnisse über die die vegetative Schleppkraftdeckung beeinflussenden Faktoren gewonnen werden (vgl. Abb. 19). Bei günstigen Bedingungen wird die Widerstandskraft des lebenden Deckwerks innerhalb weniger Vegetationsperioden stark ansteigen und sich asymptotisch einem Endwert nähern. Dieser Endwert kann bei angemessener Pflege des Gehölzbestandes unbegrenzt beibehalten werden. Hierbei ist zu beachten, dass Maßnahmen in Form von Initialpflanzungen nach einer gewissen Zeit in ihrer Wirkung nachlassen. Dies kann dann durch Ergänzungspflanzungen und Überführung in eine standortgerechte Pflanzengesellschaft kompensiert werden.

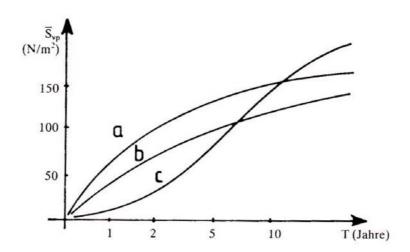


Abbildung 19: Darstellung des vegetationsabhängigen Schleppkraftdeckungswertes $S_{\rm VP}$ in Abhängigkeit von der Zeit (JOHANNSEN, 1980)

- a: Weidenspreitlage aus Korbweide, 2-jährig, 20 Stck/lfd.m
- b: Weidenkämme aus Korbweide, 3 cm Zopfstärke, 60 cm lang, 7 Stck/m²
- c: Pflanzung von leichten Heistern im Verband 1×1 m, Schwarzerle, Esche, Wasserschneeball

Um die Wachstumsdynamik der lebenden Baustoffe einschätzen zu können, bedarf es der Kenntnis der Standortfaktoren. Einflüsse wie Bodenart, Klima, Niederschlagshäufigkeit, Lage oder Lichtverhältnisse sind genauso entscheidend für einen Erfolg der Bauweise wie Art und Größe der mechanischen Belastungen (Wellenschlag, Strömung, Eisgang etc.).

Ausgehend von einem theoretischen, optimalen Wert der Schleppkraftdeckung ($S_{\rm VP}$) einer Bauweise wirken sich ungünstige Standortfaktoren und einwirkende Kräfte negativ auf die Schleppkraftaufnahme des Deckwerks aus. Dies ist von Fall zu Fall verschieden und führt zwangsläufig zu einer Abminderung des vegetationsabhängigen Anteils der aufnehmbaren Schleppkraft.

Beispielhaft sind in Tabelle 2 einige Korrekturfaktoren aufgeführt:

Bodentyp	Faktor B
Lehm, dicht gelagert	0,7
lehmiger Kiessand	0,8
Klima	Faktor K
rauhes Gebirgsklima, H=300 m üNN	0,8
Kaltluftstau durch Brücke, Südwesthang	0,7
Verkrautung	Faktor R
Verkrautungsansätze	0,9
belichtet, geringe Verkrautung	1,0

Tabelle 2: Korrekturfaktoren zur Ermittlung der vegetationsabhängigen Schleppkraft nach Untersuchungen von *Johannsen* (JOHANNSEN, 1980)

Der bauweisenabhängige Schleppkraftdeckungswert ($S_{\rm B}$) beschreibt den sofort wirksamen Widerstand der ingenieurbiologischen Maßnahme gegenüber Wasserangriffen. Diese Widerstandskraft wird überwiegend von den toten Baustoffen übernommen und überträgt sich aufgrund der Konstruktionsweise auf die gesamte Bauweise.

Der $S_{\rm B}$ -Wert ist dabei so definiert, dass er auch bei gutem Anwachsen der Vegetation abnimmt, was mit der Verwitterung und Verrotung der Baustoffe zu tun hat. Tote Baustoffe sind in der Regel nur begrenzt haltbar, besonders wenn Holz oder Reisig verwendet wird.

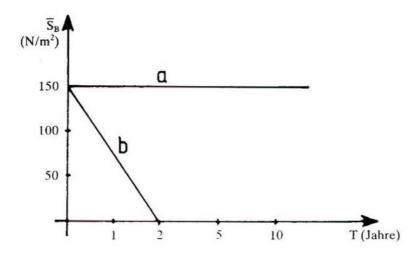


Abbildung 20: Bauweisenabhängiger Schleppkraftdeckungswert $S_{\rm B}$ in Abhängigkeit von der Zeit (JOHANNSEN, 1980)

a: Steinsatz aus Steinen von 300 mm Kantenlänge

b: tote oder lebende Spreitlage ohne Berücksichtigung des Ausschlags

Der reale Zuwachs an Widerstandskraft des Deckwerks im Laufe seiner Entwicklung ergibt sich aus der Superposition der Werte $S_{\rm B}$ und $S_{\rm V}$. Die Pflanzen müssen also in dem Zeitraum, in dem die Böschung nur durch die Bauweisen gesichert ist, so weit heranwachsen, dass sie den Sicherungsverlust mindestens ausgleichen und danach die Sicherung voll übernehmen können. Ist das nicht der Fall, kann es bei Bemessungshochwasser wieder zu Uferschäden kommen.

GERSTGRASER (2000) bewertet den Ansatz von *Johannsen* als "der heutigen Ingenieursphilosophie entsprechend", macht aber deutlich darauf aufmerksam, dass die Anwendung von Gleichung (19) eine große Kenntnis der oben genannten Korrekturparameter (B, K, R) voraussetzt. Die Erfassung dieser Faktoren ist seiner Meinung nach bislang nur durch Abschätzung aufgrund von Erfahrungen und einzelnen Untersuchungen möglich und birgt daher ein großes Risiko.

2.4 Wellenbelastung auf Uferbefestigungen an Binnenwasserstraßen

Die Auswirkungen der von der Schifffahrt erzeugten Wellen stellen die Hauptbelastungen der Uferbereiche an Binnenwasserstraßen dar. Kurzzeitige Wasserspiegelschwankungen und daraus resultierende, kontinuierlich wirkende Saug- und Schwallzugkräfte gefährden in Form von Uferabbrüchen und Ausspülungen die Standsicherheit der Uferböschung. Diese Einflüsse werden im Mündungsbereich von Binnenseen oder in breiten Gewässerabschnitten durch die Überlagerung mit Windwellen verstärkt. In kanalförmigen Gewässerabschnitten sind die schiffsbedingten hydraulischen Belastungen des Gewässerbetts besonders ausgeprägt. Hier entstehen aufgrund der beengten Verhältnisse diverse hydrodynamische Wechselbeziehungen zwischen dem fahrenden Schiff und dem Fahrwasser. In Kapitel 2.4.6 werden diese Beziehungen unter Berücksichtigung der Fahrwasserbegrenzung näher erläutert.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen einen Überblick über die Bildung und den Verlauf der Wellen geben und die daraus resultierenden Belastungen auf die Ufer aufzeigen. In Kapitel 2.4.7 wird die Bildung und der Einfluss von Windwellen an Binnenschifffahrtsstraßen angerissen, im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Windwellen aber nicht berücksichtigt.

Ausführliche Untersuchungen und Berechnungen zum Thema "Wellenentstehung, Wellenhöhe, Wellenbeanspruchung der Ufer" sowie eine "streckenorientierte Analyse im Hinblick auf die Gewässerhydraulik und Schifffahrt" wurden von WILDE (2000) und KLIMMER (2000) für die UHW zwischen Ketzin und Brandenburg (km 32,610 - 54,250) durchgeführt. Auf deren Ergebnisse und Berechnungen werden die Ausführungen in den Kapiteln 7 und 8 aufgebaut.

2.4.1 Einflussbereich des Schiffes

Die Bewegung des Schiffes durch einen Wasserkörper stellt eine Störung der ursprünglichen Wasserspiegellage bzw. des Strömungszustandes dar. Das vom Schiffskörper verdrängte Wasser strömt dabei nach unten und zu den Seiten ab und läuft hinter dem Verdrängungskörper zusammen, um die ursprüngliche ungestörte Wasserspiegellage wieder zu erreichen (Rückströmung oder Verdrängungsströmung). Dieser Vorgang ist - abhängig von der Schiffsform - mit einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit um den Schiffskörper verbunden, die sich im Absinken des Wasserspiegels erkennbar macht (Absunk).

Die Einflussbreite ($B_{\rm E}$) des Schiffes ist dabei von Bedeutung, um Aussagen über die Auswirkungen dieser Störung auf die Uferbereiche machen zu können. Es gibt verschiedene Ansätze für die Bestimmung der Einflussbreite eines Schiffes. In dieser Arbeit wird der Einflussbereich nach der in der BAW gebräuchlichen Formel (20) berechnet und ist alleine von den Schiffsabmessungen abhängig. Gleichzeitig ist die Einflussbreite das Kriterium, ob seitlich begrenzte Fahrwasserverhältnisse vorliegen oder nicht. Ein Gewässer gilt als seitlich begrenzt, wenn die Wasserspiegelbreite ($B_{\rm WSp}$)

kleiner als der Einflussbereich ($B_{\rm E}$) der Rückströmung ist.

$$B_{\rm E} = 1, 6 \cdot (L_{\rm S} + 1, 75 \cdot B_{\rm S}) \tag{20}$$

Fährt ein Schiff in tiefenmäßig beschränktem Wasser⁶, übt die Gewässerberandung einen zusätzlichen Widerstand auf die Unterströmung des Schiffes aus (Flachwassereffekt). Je geringer der Abstand zwischen Schiffsboden und Gewässersohle ist, desto mehr werden die Stromfäden der Rückströmung zusammengepresst und umso größer ist auch der zu überwindende Widerstand. Wird das Wasser zusätzlich noch seitlich beschränkt (enge Flüsse, Kanäle) wird auch der seitlich verfügbare Raum für das Umströmen eingeengt und dadurch ein zusätzlicher Widerstand aufgebaut.

Dieser *Blockageeffekt* wird gekennzeichnet durch den n-Wert, dem Verhältnis zwischen verfügbarem Wasserquerschnitt und eingetauchtem Schiffsquerschnitt⁷. Die Verdrängungsströmung wird an den seitlichen Berandungen gespiegelt, was bei einem Trapezprofil - aufgrund der Neigung des Uferbereichs - zusätzliche Strömungen und zusätzliches Absinken des Wasserspiegels am Ufer hervorruft (OEBIUS, 2000). Dadurch werden Schiffsmanöver komplizierter und die Einwirkungen der Schifffahrt auf die Uferbegrenzungen intensiver (KUHN, 1985).

2.4.2 Das Wellensystem eines Schiffes

Im Binnenwasserverkehr hat man es in der Regel mit Schifffahrt in seitlich und in der Tiefe begrenztem Fahrwasser zu tun (Kanalfahrt). Unter "Fahrt" wird die Bewegung des Schiffes relativ zum Wasser verstanden, das im Gegensatz zum liegendem Schiff der Einwirkung dynamischer Einflüsse unterliegt. Fährt das Schiff mit "unterkritischer" Geschwindigkeit, wird das vom Schiff verdrängte Wasser im strömenden Zustand entgegen der Fahrtrichtung am Schiff vorbeigeführt. Bei Überschreiten der "kritischen" Geschwindigkeit ist der Zustand instationär und die Rückströmung gerät ins Schießen (vgl. Kap. 2.4.4).

Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit wachsen die Widerstände auf das Schiff. Das Fahrtgebiet (seitlich bzw. tiefenmäßig beschränkt oder unbeschränkt) hat dabei entscheidenden Einfluss auf die Größenordnung des Widerstandes und die Art der Schiffsumströmung. Den Begriff des Schiffswiderstands kann man anhand eines Schiffes im Schleppzustand, das ohne eigenen Antrieb gezogen wird, verdeutlichen. Um das Schiff nach vorne zu bewegen, muss eine Zugkraft aufgebracht werden, die dem Widerstand des geschleppten Schiffes entspricht. Die bei der Bildung der Wellen - durch am Schiff vorbeiströmendes Wasser sowie durch Verwirbelungen bei der Ablösung im Hinterschiffsbereich - verbrauchte Energie entspricht dem Schiffswiderstand. Er setzt sich also aus den Anteilen Wellen-, Reibungs- und Ablösungswiderstand zusammen.

⁶Die Wassertiefe gilt als begrenzt, wenn sie kleiner ist als der 6-fache Schiffstiefgang (Verein für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, 1992).

 $^{^7}$ Der Wert n= $\frac{A}{A_{\mathrm{M}}}$ gibt das Verhältnis zwischen Fließquerschnitt (A) und eingetauchtem Schiffsquerschnitt (A_{M}) an. Dabei berechnet sich A_{M} aus der Breite und dem Tiefgang des Schiffes (Wasserverdrängungsfläche).

Das sichtbare Wellenbild eines Schiffes besteht aus dem *Primär*- und dem *Sekundärwellensystem* (vgl. Abb. 23). Die Bewegung des Schiffskörpers bewirkt, dass Wasser am Bug verdrängt wird, es weicht seitlich aus und fließt am Heck wieder zusammen. Durch diese Umströmung des Schiffes entsteht das *Primärwellensystem*.

An den Staupunkten am Bug und am Heck bilden sich Wellenberge aus (Überdruck). Am Bug lösen sich Stauwellen ab, die vor dem Schiff in Fahrtrichtung herlaufen. Die Wassergeschwindigkeit relativ zum Schiff ist hier annähernd null. Neben und unter dem Schiff beschleunigt sich das Wasser als Rückstrom vom Bug zum Heck. Durch diese Beschleunigung wird die Druckhöhe des Wassers beiderseits des Schiffes reduziert (Unterdruck), so dass sich eine Absenkung des Wasserspiegels einstellt und damit auch das Schiff abgesenkt wird. Bildlich lässt sich das *Primärwellensystem* als muldenartige Verformung der Wasseroberfläche um das fahrende Schiff beschreiben, ähnlich der Form eines Tellers (vgl. Abb. 21).

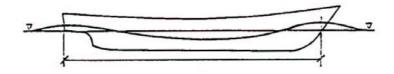


Abbildung 21: Absunkbereich eines Schiffes (Verein für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, 1992)

Ein Beobachter an Land kann die Wasserspiegelveränderung bei Fahrt eines Schiffes in Ufernähe direkt am Ufer erkennen:

Der Wasserspiegel steigt zunächst etwas an, wenn der Bug auf gleiche Höhe mit dem Beobachter ist. Kurze Zeit später fällt der Wasserspiegel (Absunk), was deutlich an den frei werdenden Ufereinfassungen zu sehen ist. Etwa beim Durchgang des Hecks steigt der Wasserspiegel wiederum an, um nach vollständiger Passage des Schiffes in die Ursprungslage zurückzufallen.

Das Sekundärwellensystem besteht aus Diagonal- und Querwellen, die sich mit Schiffsgeschwindigkeit entgegengesetzt der Fahrtrichtung bewegen (vgl. Abb. 22).

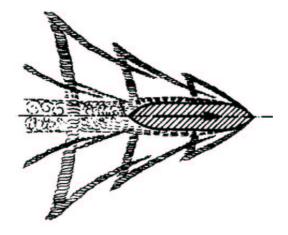


Abbildung 22: Schematische Darstellung des sekundären Wellensystems (KUHN,1985)

Die Diagonalwellen pflanzen sich ausgehend von Bug und Heck unter einem bestimmten Winkel keilförmig nach beiden Seiten des Schiffes fort. Dieser Ausbreitungswinkel beträgt bei unbegrenzter Wassertiefe 19,28° (*Kelvinscher Winkel*). Querwellen treten am Heck auf und laufen rechtwinklig zur Schiffsachse hinter dem Schiff her.

Durch die unterschiedliche Ausbreitungsrichtung der Quer- und Diagonalwellen kommt es in ihren Kreuzungspunkten zur Überlagerung. An diesen Punkten sind die Sekundärwellen am höchsten. Ihre Verbindungslinie bildet eine Wellenfront, die sich schräg vom Schiff in Richtung Ufer ausbreitet. In der Praxis sind *Primär*- und *Sekundärwellen* nur gleichzeitig zu sehen, d.h. es kommt immer zur Überlagerung dieser beiden Wellensysteme (vgl. Abb. 23).

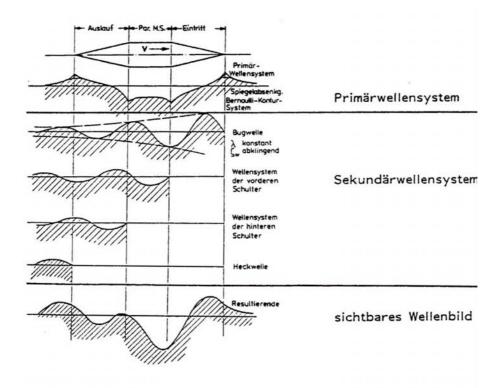


Abbildung 23: Die Überlagerung des Primär- und Sekundärwellensystems führt zum sichtbaren Wellenbild (Verein für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, 1992).

2.4.3 Wellenausbreitung und Wellengeschwindigkeit

Eine Welle wird nach der linearen Wellentheorie durch die Größen Wellenhöhe (H), Wellenlänge (L), Wellengeschwindigkeit (c), Wellenperiode (T) und Wassertiefe (h) charakterisiert.

Die Wellenbewegung (Ausbreitungsgeschwindigkeit) und ihre Wellenform (Länge, Höhe) werden in Fließgewässern stark von den Reibungseinflüssen des Gewässerbettes geprägt. Diese hängen in erster Linie von der Wassertiefe ab.

Anhand des Verhältnisses $mittlere~Wassertiefe^8~(h_{\rm m})$ zu Wellenlänge~(L) wird zwischen Flachwasser, Tiefwasser und einem Übergangsbereich unterschieden:

Flachwasser: $h_{\rm m}/L < 0,04$

Übergang: $0.5 > h_{\rm m}/L > 0.04$

Tiefwasser: $h_{\rm m}/L > 0, 5$

Unter Tiefwasserbedingungen ist die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (c) alleine von der Wellenlänge (L) abhängig:

$$c = 1, 25 \cdot \sqrt{L} \tag{21}$$

Nähert sich die Welle dem Ufer, so gelangt sie zunächst in die Zone zwischen Tiefund Flachwasser (Übergangsbereich), in dem ihre Charakteristik allmählich von der Gewässersohle beeinflusst wird. Mit abnehmender Wassertiefe (h) nimmt auch die Geschwindigkeit der Welle ab. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ist hierbei von der Wellenlänge und der Wassertiefe abhängig und errechnet sich wie folgt:

$$c = \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot L \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_{\rm m}}{L}\right)}$$
 (22)

Unter Flachwasserbedingungen wird die Wellengeschwindigkeit nur noch von der mittleren Wassertiefe bestimmt. Man spricht in diesem Fall auch von der Stauwellengeschwindigkeit c_0 :

$$c_0 = \sqrt{g \cdot h_{\rm m}} \tag{23}$$

Wellenfronten, die sich der Uferlinie schräg annähern, befinden sich teilweise schon im flachen Wasserbereich mit kleineren Ausbreitungsgeschwindigkeiten und teilweise noch im tieferen Bereich, wo sie sich mit höheren Geschwindigkeiten ausbreiten können. Aufgrund dieser unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilung wird die Wellenfront gekrümmt und erreicht das Ufer annähernd parallel zur Uferlinie (Refraktion).

2.4.4 Kritische Schiffsgeschwindigkeit

Die maximal erreichbare Schiffsgeschwindigkeit bei Fahrt eines Schiffes in allseitig begrenztem Fahrwasser ist außer von der Motorleistung auch von verschiedenen geometrischen Größen abhängig. Hierbei spielt der n-Wert, das Verhältnis Fließquerschnitt (A) zu eingetauchter Querschnittsfläche des Schiffes ($A_{\rm M}$), eine große Rolle. Mit abnehmendem n-Wert, d.h. mit größerem Schiffsquerschnitt oder kleinerem Gewässerquerschnitt, verringern sich die erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten.

 $^{^8}$ Die mittlere Wassertiefe erhält man aus dem Verhältnis Fließquerschnitt (A) zu Wasserspiegelbreite ($b_{\rm Sp}$): $h_{
m m}=rac{A}{b_{
m Sp}}$

Eine weitere wichtige Größe in diesem Zusammenhang ist die *Tiefen-Froudzahl* ($Fr_{\rm nh}$). Sie setzt sich aus der Schiffsgeschwindigkeit ($v_{\rm S}$) und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (c_0) in flachem Wasser zusammen:

Tiefen-Froudzahl:

$$Fr_{\rm nh} = \frac{v_{\rm S}}{c_0} = \frac{v_{\rm S}}{\sqrt{g \cdot h_{\rm m}}} \tag{24}$$

Die erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten hängen wesentlich von der Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit (c_0) ab. Das Widerstandsmaximum bei Fahrt eines Schiffes im allseitig begrenzten Kanalquerschnitt ist dann erreicht, wenn $v_{\rm S}=c_0$ ist. Das bedeutet, das Schiff fährt mit der gleichen Geschwindigkeit, mit der sich auch die Wellen im Kanal fortpflanzen $(Fr_{\rm nh}=1)$. Diese Schiffsgeschwindigkeit wird als kritische Schiffsgeschwindigkeit $(v_{\rm S,crit})$ bezeichnet.

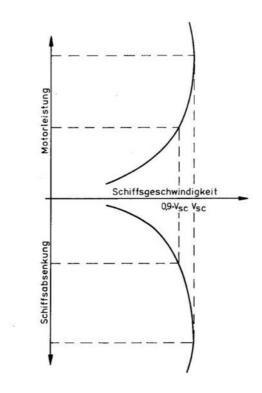


Abbildung 24: Propulsionsdiagramm: allgemeine Beziehung zwischen Schiffsgeschwindigkeit und Schiffsabsenkung auf allseitig begrenztem Fahrwasser (Verein für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, 1992)

Mit steigender Schiffsgeschwindigkeit erhöhen sich Schiffswiderstand, Rückströmung und Wellenbildung derart, dass eine weitere Steigerung der Motorleistung keine wesentliche Zunahme der Fahrgeschwindigkeit bewirkt, die Schiffsabsenkung jedoch überproportional zunimmt (vgl. Abb. 24). Es wird eine Grenze erreicht, bei der die zusätzliche Energie die Fahrt nicht mehr beschleunigt, sondern vollständig anderweitig verzehrt wird. Die kritische Schiffsgeschwindigkeit ($v_{S,crit}$) ist hiermit erreicht, die

Rückströmung gerät ins Schießen. Eine weitere Leistungssteigerung würde nun sogar zur Abnahme der Fahrgeschwindigkeit und die Schiffsabsenkung bis zur Grundberührung führen.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Sicherheit des Schiffes sowie der Ufer muss dieser kritische Zustand unbedingt vermieden werden. Dies bedeutet, dass die Schiffsgeschwindigkeit ($v_{\rm S}$) ein gewisses Maß unter der kritischen Geschwindigkeit ($v_{\rm S,crit}$) bleiben muss.

2.4.5 Das Brechen der Welle

Das Brechen der Welle kann nicht nach der Wellentheorie beschrieben werden, da die Wellenbewegung aufgrund der Reibungseinflüsse der Sohle keine Sinusform mehr beschreibt. Durch Bodenreibung verliert die Welle an Energie, was eine Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Wellenlänge zur Folge hat. Die Wellenhöhe hingegen nimmt zu. Überschreitet das Verhältnis H/L einen kritischen Wert, so bricht die Welle.

Bezüglich der Form des Brechens können drei verschiedene Brechertypen unterschieden werden. Abhängig von der Neigung der Böschung bzw. der Gewässersohle und dem Steilheitsgrad der Welle⁹ spricht man von *Schaumbrecher*, *Sturzbrecher* oder *Schwallbrecher*. Mit Hilfe eines Brecherindexes $(\xi)^{10}$, der den Zusammenhang von Böschungs- und Wellengeometrie erfasst, lassen sich die einzelnen Brecherarten für bestimmte Uferneigungen charakterisieren.

Wird am Wellenkamm eine höhere Geschwindigkeit als die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit erreicht, löst sich am Brechpunkt die sogenannte Brecherzunge aus dem Wellenkamm und stürzt in freiem Fall ins Wellental (*Sturzbrecher*).

Eine spezielle Form von brechender Welle entsteht durch die ins Schießen geratene Rückströmung des Schiffes. Durch Überlagerung der Diagonal- und Querwellen des Sekundärwellensystems des Schiffes entsteht eine Wellenfront, deren Höhe das Maximum der Sekundärwellen darstellt (vgl. Abb. 22). Diese Wellenfront läuft schräg auf die Ufer zu, wobei sie sich vom Schiff nach beiden Seiten ausbreitet. Durch abnehmende Wassertiefe im Einflussbereich der Böschung verliert die Wellenfront an Geschwindigkeit. Dadurch steigt die *Tiefen-Froudzahl* ($Fr_{\rm nh}$) an (vgl. Gl. 24). Die Wellen werden steiler und bei Erreichen des Wertes $Fr_{\rm nh}$ =1,2 kommt es zum Brechen der Wellenkämme. Als sogenannte *Rollbrecher* laufen diese Sekundärwellen dann mit Schiffsgeschwindigkeit am Ufer entlang (vgl. Abb. 26).

 $^{^9}$ Unter Steilheit einer Welle versteht man das Verhältnis Wellenhöhe zu Wellenlänge (H/L).

 $^{^{10} \}text{Brecherindex} \; \xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L}} \; \text{mit dem B\"{o}schungswinkel} \; \alpha$

2.4.6 Belastungen der Ufer in Abhängigkeit von der Fahrwasserbegrenzung

Tiefenmäßig und seitlich beschränktes Fahrwasser

Ist das Fahrwasser tiefenmäßig und seitlich begrenzt, so wird ein seitliches Ausweichen der Verdrängungsströmung durch die Gewässerberandung eingeschränkt. Die seitliche Begrenzung wirkt wie eine Spiegelebene, an der die Strömung reflektiert wird. Diese Reflexion (Spiegelung) ist umso stärker, je größer die Uferneigung ist. Das bedeutet, dass die Strömung in einem Kanal mit senkrechten Uferwänden nahezu vollständig reflektiert wird¹¹. Die Form der Berandung ist somit ausschlaggebend für die sich einstellende Strömungsverteilung im Gewässerquerschnitt. Wie die Strömungsverteilung im Einzelnen unter und seitlich des Schiffes aussieht, ist nicht genau vorhersehbar. Sie ist abhängig von der Form und Rauhigkeit der Begrenzung, der Fahrgeschwindigkeit und der Lage des Schiffes, dem n-Verhältnis, der Form des Unterbodens und der Morphologie der Gewässersohle. Eine exakte, allgemeingültige Vorausberechnung oder numerische Simulation der Umströmung des Schiffskörpers und der Strömungsverteilung ist unter diesen vielschichtig interagierenden Bedingungen sehr schwierig und experimentell nicht abgesichert (OEBIUS, 2000).

An geneigten Böschungen kann die Verdrängungsströmung nicht wie an senkrechten Wänden direkt gespiegelt werden. Aus der Entstehung des Primärwellensystems resultieren Strömungskomponenten, die sich in Richtung der Ufer und von ihnen weg bewegen. Dies äußert sich in Form einer Welle, die mit Schiffsgeschwindigkeit am Ufer entlang läuft.



Abbildung 25: Rollbrecher an der Potsdamer Havel

¹¹nach dem Gesetz "Einfallswinkel = Ausfallswinkel"

Besonders gefährlich für die Ufersicherheit ist eine Überlagerung der Primärwellen mit den Wellen des sekundären Wellensystems. Treffen beide Wellensysteme, das sekundäre divergente Wellenbild und die laterale Welle sowie der Auflauf der Rückströmung (Primärwellen), direkt in der Uferlinie zusammen, kann die Überlagerung zum "Aufsteilen" und Brechen der Welle führen. Dies äußert sich in Form eines *Rollbrechers*, dessen Energie auf kleinstem Raum umgesetzt wird und daher hohes Erosionspotenzial besitzt (vgl. Abb. 25).

Hierbei ist nicht der Wellenauflauf quer zur Böschung maßgebend, sondern der Lauf der Welle längs der Böschung, was schwer zu erfassen und bisher noch unzureichend erforscht ist (OEBIUS, 2000).

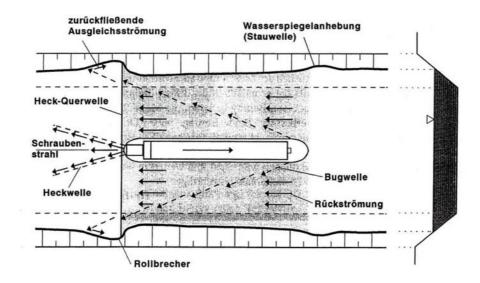


Abbildung 26: Äußere hydraulische Belastungen einer Wasserstraße durch das fahrende Schiff (SCHMIDT-VÖCKS et al., 1994)

Ein fahrendes Schiff erzeugt im seitlich und tiefenmäßig begrenzten Fahrwasser folgende mit ihm mitlaufende hydraulische Belastungen des Gewässerbettes (vgl. Abb. 26):

- Rückströmungen neben und unter dem Schiffskörper im Bereich zwischen Bug und Heck als Folge des schnellen Wasserspiegelabsunks
- schneller Absunk des Ruhewasserspiegels im Bereich zwischen Bug und Heck
- diagonal verlaufende Bug- und Heckwellen
- Heckquerwellen
- Propulsionsströmung (Schraubenstrahl)

Im Bereich wirtschaftlicher und risikoarmer Schiffsgeschwindigkeiten erzeugt ein Europaschiff oder ein Großmotorgüterschiff (GMS) bei einem Querschnittsverhältnis

n=5,2 die in Tabelle 3 angegebenen maßgebenden Belastungen, die sowohl für Einzelfahrt als auch für Überhol- und Begegnungsvorgänge gelten.

hydraulische Belastungsart	Freie Strecke	
	Böschung	Sohle
Absunk (m)	0,60	0,60
Absunkgeschwindigkeit (m/s)	0,10	nicht maßgebend
Rückströmung (m/s)	2,00	2,00
Höhe der Bug- und Heckwellen (m),	0,30	nicht maßgebend
bezogen auf den Ruhewasserspiegel		
Höhe der Heckquerwelle (m), bezogen	1,20	nicht maßgebend
auf den abgesenkten Wasserspiegel		
Geschwindigkeit des Schraubenstrahles (m/s)	2,50	2,50
bei Flottwasser < 1 m		

Tabelle 3: Maßgebende hydraulische Belastungen der Böschungen und der Sohle bei einem Querschnittsverhältnis n=5,2 in Anlehnung an MAR (BAW, 1993)

Die Größe des Absunks, der Absunkgeschwindigkeit und der Rückströmungen wird vom n-Verhältnis¹², vom Uferabstand und von der Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Ein schneller Wasserspiegelabsunk¹³ bewirkt im abgesenkten Bereich des Gewässerbettes Porenwasserüberdrücke, die Sickerströmungen aus dem Untergrund in das Gewässer zur Folge haben (vgl. Kap. 2.4.8). Diese Sickerströmungen können ebenso wie ein natürlicher Grundwasserzufluss bei nichtbindigen Böden eine Instabilität der Böschung erzeugen. Gleichzeitig kann ein schneller Wasserspiegelabsunk durch die Wirkung der Schleppspannung zur Erosion der Böschung bzw. der Sohle führen.

Die Höhe der Bug- und Heckwellen ist nur von der Fahrgeschwindigkeit und der Wassertiefe abhängig, nicht von der Schiffsgröße, d.h. Sportboote, Fahrgastschiffe oder Güterschiffe erzeugen bei gleicher Fahrgeschwindigkeit nahezu gleich große Wellen. Die Höhe der Heckquerwellen wird dagegen vom Verhältnis der Schiffslänge zur Wellenlänge und vom Vertrimmungsgrad beeinflusst.

Während die Heckquerwellen mit größer werdendem Abstand vom Schiff sehr schnell an Höhe verlieren und in einer Entfernung von mehr als 50 m bedeutungslos sind, laufen Bug- und Heckwellen mit gleichbleibender Höhe auch über große Entfernungen zum Ufer. Unter dem Einfluss der abnehmenden Wassertiefe wird die Wellenlänge kürzer und die Welle steiler und höher, bevor sie bei einem bestimmten Verhältnis Wellenhöhe zu Wassertiefe bricht.

Bei Fahrt eines Schiffes mit konstanter Geschwindigkeit wirkt sich der *Schraubenstrahl* bei einem Flottwasser¹⁴ von mehr als 1 m nicht auf die Kanalsohle aus, da er durch die Rückströmung nach oben abgelenkt wird. Bei Beschleunigungsmanövern nimmt sein

 $^{^{12}}$ n= $\frac{A}{A_{\rm M}}$

¹³ "Schnell" im Sinne des Merkblattes MAR (BAW, 1993) bedeutet, dass die Absinkgeschwindigkeit größer ist als die Wasserdurchlässigkeit (k-Wert) des Bodens.

¹⁴Als Flottwasser wird der - bedingt durch die Tauchtiefe (Summe aus Tiefgang und Einsinktiefe) - zwischen fahrendem Schiff und Gewässersohle verbleibende Abstand (Kielfreiheit) bezeichnet.

Einfluss mit abnehmendem Abstand zur Sohle exponentiell zu und wirkt gegenüber Lockergestein sehr erosiv (BAW, 1993).

Tiefenmäßig beschränktes und seitlich unbeschränktes Fahrwasser

Bei tiefenmäßig beschränktem aber seitlich unbeschränktem Fahrwasser sind nur die Strömungen aus dem primären Wellenbild und dem Schraubenstrahl von Bedeutung. Durch diese Strömungen findet in der Fahrspur eine Verlagerung des Sediments zu beiden Seiten statt. Bei einspurigem Schiffsverkehr bildet sich dadurch eine Vertiefung in der Hauptfahrrinne, bei zweispurigem Verkehr in jeder Fahrspur aus. Zwischen den beiden Fahrrinnen wird dabei das Sediment stärker abgelagert.

Unter der vereinfachten Annahme eines unendlich breiten, flachen Unterbodens des Schiffes kann von einer gleichmäßigen Verteilung der Strömung zwischen Gewässersohle und Schiffsboden ausgegangen werden. Die mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit des verdrängten Wassers kann dann annähernd proportional zur Schiffsgeschwindigkeit nur in entgegengesetzter Richtung angenommen werden.

In der Realität hat man es jedoch mit im Verhältnis zur Gewässerbreite schmalen Schiffsunterböden sowie mit unterschiedlichen Rauheiten an der Schiffsaußenhaut und an der Gewässersohle zu tun. Im Gegensatz zum Modell des unendlich breiten Schiffskörpers ist die Rückströmung nicht gezwungen, komplett unter dem Schiff entlangzuströmen. Die Stromfäden können auch seitlich ausweichen und somit den größeren Querschnitt ausnutzen. Dabei ist die Rückströmungsgeschwindigkeit nicht gleichmäßig über die Breite des Rückströmungsfeldes verteilt. Das Geschwindigkeitsmaximum liegt direkt an der Außenhaut des Schiffes und nimmt mit zunehmender Entfernung vom Schiff in Richtung Ufer ab (OEBIUS, 2000).

2.4.7 Windwellen

Windwellen entstehen durch tangentiale Schubspannungen, die vom Wind auf die Oberfläche des Wassers übertragen werden. Die Größe dieses Impulses und dadurch die Eigenschaft einer Windwelle hängt von vielen Faktoren wie z.B. der Dauer der Windeinwirkung (Ausreifzeit), der Streichlänge (Strecke, auf der Wind angreift) oder der Windgeschwindigkeit ab. Die Wellen werden umso größer, je stärker der Wind oder je länger seine Streichlänge ist.

In breitenbegrenzten Gewässerbereichen, wie es in der Binnenschifffahrt überwiegend der Fall ist, übernimmt eine ausgebildete Ufervegetation neben der Böschungssicherung noch zusätzlich die Aufgabe des Windschutzes. Baumreihen am Ufer halten Querwinde ab, die das Fahrverhalten von Schiffen erheblich beeinflussen können.

Der windstille Bereich, der sich auf der Leeseite der Baumreihen ausbildet, verkürzt die effektive Streichlänge um einen Betrag, der dem 20 bis 30-fachen der Baumhöhe entspricht. Je nach Höhe und Dichte des Windschutzstreifens und des Winkels, mit dem der Wind auf den Uferstreifen trifft, wird die Wellenbildung so stark reduziert, dass sie in diesem Bereich vernachlässigt werden kann.

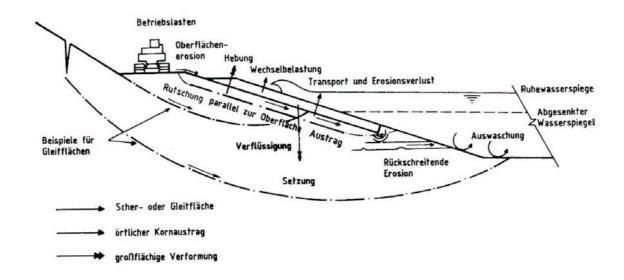


Abbildung 27: Schadensmechanismen an wasserbelasteten Böschungen (KÖHLER, 2000)

Anders sieht es im Bereich von Binnenseen aus. Hier können sich aufgrund der großen Wasserflächen durchaus hinreichend lange Ausreifzeiten und Streichlängen ergeben, so dass die daraus resultierende Wellenbildung berücksichtigt werden muss. Ergebnisse zu Bildung und Einfluss von Windwellen an der Unteren Havel-Wasserstraße sind in WILDE (2000) gegeben.

2.4.8 Standsicherheit von Böschungsufern

Werden Bodenschichten über-, unter- oder durchströmt, können Transportprozesse sowohl im Porenraum des Bodens als auch an Bodengrenzflächen ausgelöst werden. Auswaschungen und Bodenstrukturänderungen führen dabei zu schädlichen Deformationen bis hin zum völligen Bodengefügebruch. Durchströmte Uferböschungen sind nicht nur aufgrund des Strömungsdrucks des fließenden Wassers gefährdet, sie können auch durch innere und äußere Erosionsprozesse zerstört werden, wenn z.B. Schutzschichten fehlen und maßgebliche Filterkriterien zwischen unterschiedlichen Bodenschichten nicht eingehalten sind.

Abbildung 27 beschreibt verschiedene Bruchmechanismen im Böschungsuntergrund, die von Rutschungen auf potentiellen Gleitzonen bis zu großflächigen Verformungen und örtlichem Bodenaustrag reichen. Setzungen, Hebungen, aber auch Verflüssigungen des Bodens sind möglich. Letzteres gilt insbesondere für extern einwirkende, schnelle Druckänderungen (Absunkerscheinungen).

Der Boden als Dreiphasensystem

In der Ingenieurspraxis werden Böden, die dauernd unter Wasser liegen, als wassergesättigt angenommen. Dieser Zustand beschreibt den Boden als Zweiphasensystem, bestehend aus Feststoff- und Porenwasseranteil. Die Poren dieser Böden sind vollständig mit Wasser gefüllt, enthalten aber natürliche Anteile von fein verteilten Gaspartikeln. Schon geringe Gasanteile verändern die physikalischen Eigenschaften der Porenflüssigkeit, was bei extern einwirkenden Druckänderungen erhebliche Auswirkungen auf das Verformungs- und Stabilitätsverhalten solcher Böden hat.

Es konnte nachgewiesen werden, dass das Porenwasser einen beachtlichen Anteil von Luft in der Größenordnung von 5 – 15 % enthält, der, die Interaktion zwischen Wasser und Boden betreffend, nicht außer Acht gelassen werden darf (KÖHLER, 2000). Dies führte zur Einführung des Modells eines Dreiphasensystems, bestehend aus Wasser, Bodenpartikel und Luftgehalt im Porenwasser.

Bodenmechanische Vorgänge durch Wellenbelastung der Ufer

Wasserspiegeländerungen, die durch Schiffsabsunk, Schiffswellen oder Windwellen verursacht werden, sowie schnell einwirkende, statische oder dynamische Lasten wie Wellenauflauf oder Rollbrecher stellen für die Uferböschung zeitlich und örtlich veränderliche Belastungen dar, durch die wechselnd wirkende Porenwasserdrücke im unter Wasser liegenden Boden entstehen. Die Druckausbreitung wird wesentlich durch die im Untergrund wirkenden Spannungszustände und durch die maßgeblichen Bodenkennwerte wie Wasserdurchlässigkeit, Porenvolumen, Sättigungsgrad, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl bestimmt. Mit zunehmender Bodentiefe wird der Porenwasserdruck zeitlich verzögert abgebaut. Diese Verzögerung wird als *Porendruckdämpfung* bezeichnet.

Verantwortlich für die Druckdämpfung im Boden ist der Gehalt von fein verteilten, im Porenwasser eingeschlossenen Luftblasen. Diese Luftblasen reagieren bei extern einwirkenden Druckänderungen mit entsprechenden Volumenänderungen, die lokale Fließvorgänge im Porenwasser auslösen (instationärer Porenwasserfluss). Werden die Fließvorgänge infolge geringer Wasserdurchlässigkeit des Bodens behindert, führt dies zu Verformungen im unter Wasser liegenden Boden. Vor allem böschungsparallele Rutschungen in potentiellen Gleitflächen sind häufig die Folge von Wasserspiegelveränderungen aus Absunkerscheinungen und Wellenbelastungen.

Die beiden Hauptbelastungskomponenten, die auf die Uferböschung durch Wellenkräfte einwirken, sind der Wellenauflauf und der Brecherstoß (Druckschlag). Die Höhe des Wellenauflaufs am Ufer ist von vielen Faktoren abhängig wie z.B. von der Wellenhöhe, der Wellenlänge, der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, der Böschungsneigung, der Wassertiefe am Böschungsfuß sowie der Sohlneigung vor der Böschung. Mit steigender Wellenhöhe und steiler werdender Böschung nimmt das Auflaufen der Welle zu.

Läuft ein *Rollbrecher* am Ufer entlang oder brechen Windwellen beim Auftreffen, so kommt es beim Aufprall auf die Uferböschung zum Druckschlag. Die gesamte kinetische Energie der Wassermasse wird im Moment des Auftreffens in potentielle Energie umgewandelt. Dies hat zur Folge, dass sich sehr große Druckspannungen aufbauen, die ein Vielfaches der Belastung durch Wellenauflauf betragen können. Für wassergefüllte Risse oder Fugen stellt der Druckschlag eine große Sprenggefahr dar.

Im Bereich der Wasserwechselzone wirken turbulente Auf- und Ablaufströmungen des Sturzbrechers erosiv auf den Böschungsbereich. Prallt die Brecherzunge auf das Rücklaufwasser, so wird der Druckschlag in seiner Größe erheblich reduziert. Dieser Effekt wird beispielsweise durch Ausbildung der Böschungsneigung mit 1:6 oder flacher erreicht. Besonders betroffen von dieser Belastung sind Uferbefestigungen entlang von Schifffahrtsstraßen, wo hauptsächlich schnelle, kurzzeitig wirkende Wasserspiegeländerungen die oben beschriebenen Vorgänge hervorrufen. Sohl- und Uferschutzkonstruktionen sollten daher ausreichend stabil gegen Abgleiten, Abheben, Verformung und Erosion gebaut sein und darüber hinaus einen ausreichend sicheren, möglichst langfristigen Filterschutz gegen Ausspülen und Auswaschen des Untergrundes gewähren (KÖHLER, 2000).

3 Methoden zur Ufersicherung

3.1 Einführung

Seit Bestehen der Menschheit kommt den Fließgewässern nicht nur wegen der Trinkwasserversorgung großes Interesse zu. Flusstäler boten schon immer ideale Standorte für Siedlungen, und in Gewässernähe bzw. im Hinterland waren fruchtbare Böden für Ackerbau und Viehzucht vorhanden. Die Menschen lernten im Laufe der Geschichte die Wasserkraft zu nutzen, und Flüsse gewannen gerade als Transportweg für Güter mehr und mehr an Bedeutung.

Ständige Veränderungen des Flussbettes durch zahlreiche Flussarme, häufige Überflutungen der Talräume und anschließende Versumpfungen mit den damit verbundenen negativen wirtschaftlichen, hygienischen und gesundheitlichen Folgen gaben Anlass zu technischen Eingriffen in die Flussgestalt. Die Folge war der schrittweise Ausbau der Gewässer in geometrischen Regelprofilen unter weitgehender Beseitigung der natürlichen morphologischen Strukturen. Es wurden Deiche zum Schutz gegen Hochwasser gebaut, Kanäle entstanden und die vom Fluss abgetrennten und trockengelegten Auen wurden überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Folglich traten Veränderungen des Abflussverhaltens und der Ökologie der Fließgewässer auf. Die Hochwassergefahr nahm zu und die einstige Artenvielfalt der Pflanzen- und Tierwelt verringerte sich drastisch.

Erst in den Achtzigerjahren des letzten Jahrhunderts setzte langsam ein Umdenkungsprozess ein. Maßnahmen zur Reinigung der Gewässer und Verbesserung der Wassergüte sowie naturorientierte Umgestaltungen waren der Ausdruck eines neuen Umweltbewusstseins, gestärkt durch gesetzliche Neuregelungen der Gewässerunterhaltung und -entwicklung Mitte der Neunzigerjahre.¹⁵

Heute wird versucht durch die Renaturierung und den Einsatz von natürlichen Sohlund Uferbauweisen möglichst naturnahe Gewässerstrukturen und eine artenreiche Flora und Fauna zu erhalten, die sich bei ausreichendem Raum frei entwickeln kann.

3.2 Der Begriff Ingenieurbiologie

Das gestiegene Umweltbewusstsein hat im Wasserbau in den letzten Jahren einen Wandel bewirkt, der die Ingenieurbiologie aufblühen ließ. Unter Ingenieurbiologie versteht man die Lehre von den Zusammenhängen zwischen Ingenieurwesen und Biologie (PFLUG, 1995). Die meisten der heute üblichen bzw. weiterentwickelten ingenieurbiologischen Bauweisen haben ihre Ursprünge in der jüngeren Vergangenheit. Wesentlich geprägt wurde die Ingenieurbiologie dabei von *Freiherr von Kruedener*, der als Forstdirektor auf diesem Gebiet tätig war und in den Dreißiger- und Vierzigerjahren des 20. Jahrhunderts in Deutschland die Grundlagen für die Anerkennung dieser Wissenschaft legte. *Von Kruedener* verstand darunter eine Bautechnik, die sich biologischer Er-

¹⁵Naturnahe Gestaltung und Bewirtschaftung des Gewässerbettes und der Ufer nach Neuregelung des Wassergesetzes vom 1.1.1996, (WG §7,8,9,9a);

Wasserhaushaltsgesetz (WHG §28,29,30,31) und Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG, 1998).

kenntnisse bei der Errichtung von Erd- und Wasserbauten und bei der Sicherung instabiler Hänge und Ufer bedient. Kennzeichnend dafür sind Pflanzen und Pflanzenteile, die so eingesetzt werden, dass sie als lebende Baumaterialien im Laufe ihrer Entwicklung eventuell in Verbindung mit toten Baumaterialien eine dauerhafte Sicherung der baulichen Maßnahmen bewirken. Die Ingenieurbiologie sollte nicht als Ersatz, sondern als notwendige und sinnvolle Ergänzung zu rein technischen Bauweisen verstanden werden (SCHIECHTL et al., 1994).

In Anlehnung daran und unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Weiterentwicklung der biologischen bzw. ökologischen, planerischen und technischen Grundlagen wird der Begriff Ingenieurbiologie wie folgt definiert:

Die Ingenieurbiologie ist ein Arbeitsgebiet des Naturschutzes und der Landschaftspflege mit der Zielsetzung, durch Bauverfahren mit Pflanzen als lebende Baumaterialien Nutzungen zu fördern und sie im Sinne der Naturschutzgesetzgebung umweltverträglich zu gestalten. (IGG, 1997)

Wie schon der Begriff "Ingenieur-Biologie" sagt, handelt es sich hierbei um das Zusammenspiel von zwei konträren Wissenschaften: Technik und Biologie. Allein diese Tatsache zeigt schon die Komplexität des Gebietes. Zur Erstellung von ingenieurbiologischen Wasserbauten werden lebende Baumaterialien (Samen, Pflanzen, Pflanzenteile) verwendet. Da diese lebenden Baumaterialien nach der Baufertigstellung alleine aber nicht in der Lage sind, den angreifenden Kräften des Wassers standzuhalten, werden sie häufig mit toten Baumaterialien (Holz, Stein, Geotextilien) kombiniert. Dies hat den Vorteil, dass die Pflanzen in den ersten Vegetationsperioden soweit geschützt sind, dass sie ausreichend Wurzeln und Sprosse bilden können, um später selbst die Böschung zu stabilisieren.

Für die praktische Umsetzung ist der Mangel an exakten Werten zur Belastbarkeit von ingenieurbiologischen Bauweisen das zentrale Problem. Das Zusammenspiel zwischen den dynamischen Kräften des Wassers und der stabilisierenden Wirkung der Vegetation ist bis heute noch unzureichend erforscht. Die Wirkung und Verträglichkeit der lebenden Baumaterialien ist von vielen Faktoren abhängig und verändert sich ständig, sodass Erkenntnisse meist nur unter groben Vereinfachungen gewonnen und nicht verallgemeinert werden können. Man ist sehr stark auf die Erfahrung und Berichte anderer Ingenieure angewiesen (GERSTGRASER, 2000).

3.3 Gewässertypische Uferbereiche

Jedes Gewässer hat bestimmte Eigenschaften was Nährstoff- und Sauerstoffgehalt, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit sowie Höhe, Dauer und zeitliche Verteilung der Wasserstände betrifft. Diese unterschiedlichen Standortfaktoren führen zu einer spezifischen Artenzusammensetzung der natürlichen Gewässervegetation. Aus pflanzensoziologischer Sicht entwickeln sich deshalb an jedem Gewässer unterschiedliche Pflanzengesellschaften. Betrachtet man aber die Ufervegetation aus dem Blickwinkel der Ingenieurbiologie, so lässt sich diese Artenvielfalt in wenige Vegetationszonen einteilen, die alle von speziellen Wasserstandsverhältnissen abhängig sind (vgl. Abb. 28).

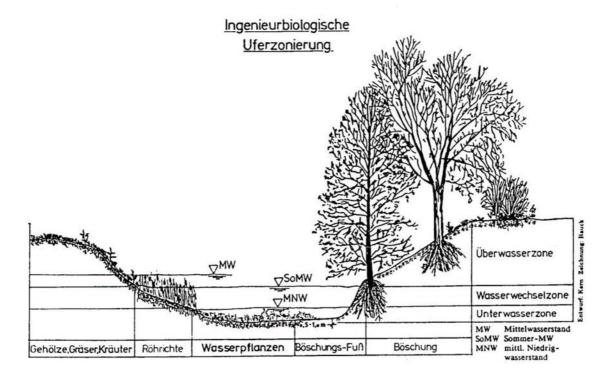


Abbildung 28: Beispiel zur Einteilung des Gewässerprofils in Belastungs- und Vegetationszonen (IWK, 1991)

Je nach Unter- oder Überschreitungsdauer bestimmter Wasserstände wird das Gewässerprofil in unterschiedliche Zonen eingeteilt und bekommt gewässertypische Pflanzenbereiche zugewiesen (SCHLÜTER, 1986):

 $Unterwasserzone \qquad \Leftrightarrow \quad Laichkraut- \ oder \ Schwimmblattzone$

Wasserwechselzone ⇔ Röhricht- und Weichholzzone

Überwasserzone ⇔ Hartholzzone

Die Laichkrautzone ist ständig mit Wasser überstaut. Sie erstreckt sich von ca. 3 m Wassertiefe bis zum Niedrigwasserstand und ist überwiegend mit Wasserpflanzen und im Boden wurzelnden Schwimmblattpflanzen bewachsen. Nach ihr folgt die Wasserwechselzone, die sich aus Röhricht- und Weichholzzone zusammensetzt. Die Röhrichtzone ist mit verschiedenen Seggen- und Röhrichtarten besiedelt und wird an ca. 150 bis 365 Tagen im Jahr überstaut. Mit der Weichholzzone beginnt derjenige Uferbereich, der jährlich nur etwa 30 bis 150 Tage überflutet wird. Zwischen Mittelwasser- und mittlerer Hochwasserlinie überwiegen Kräuter- und Gräsergesellschaften sowie Weidenbüsche und Weichholzauenwälder. Nach der Weichholzzone erstreckt sich die Hartholzzone, die weniger als 30 Tage überstaut wird, vom mittleren Hochwasserstand bis zum Bemessungswasserspiegel. Hier werden naturgemäß Gehölze wie Erle, Esche, Ahorn, Buche oder Wildkirsche vorgefunden (BRETSCHNEIDER et al., 1982).

3.4 Sicherungsverfahren und ihre Anwendung

Die Sicherung der Gewässer kann durch tote und lebende Baumaterialien erfolgen. Oft ist es zweckmäßig und notwendig, in einer kombinierten Bauweise die Vorteile beider Baumaterialien zu vereinen (vgl. Abb. 29).

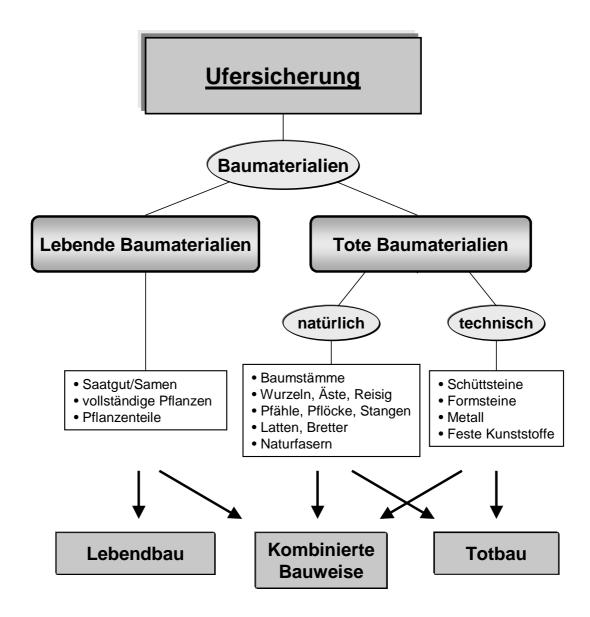


Abbildung 29: Baumaterialien und deren Verwendung zur Ufersicherung

In der Unterwasserzone ist es schwierig, mit Lebendbauweisen als Uferschutzmaßnahmen zu arbeiten, da dieser Abschnitt ständigen Veränderungen unterliegt und aufgrund der dauerhaften Überstauung den am stärksten belasteten Uferbereich darstellt. Besonders erosionsgefährdet sind die Böschungsfüße (hohe Schleppspannungen). Aber auch im Kontaktbereich des Wasserspiegels mit der Böschung kommt es fast immer zu Ausspülungen und Abbrüchen. Deshalb erfolgt die Sicherung der Unterwasserzone meist mit Totbauweisen, obwohl der Einsatz von Wasserpflanzen auch hier aus biologischen Gründen zu begrüßen wäre.

Im Bereich der Röhrichtzone wird die Ufersicherung oft mit kombinierten Methoden aus lebenden und toten Baumaterialien vorgenommen, da ein rein biologischer Schutz den starken Angriffen des Wassers meist nicht standhalten würde. Deshalb vereint man durch Kombinationsbauweisen die Schutzwirkung beider Baumaterialien zu einem aus ökologischer und ingenieurtechnischer Sicht langfristig optimalen, einheitlichen Verbund. Durch wechselseitige Sicherungswirkung der Baumaterialien kann der Böschungsbereich gegen die Wellen- und Strömungsbelastung gesichert werden.

Die Überwasserzone ist ausschließlich durch naturgemäße Maßnahmen zu sichern. Ein technischer Verbau (Deckwerk) ist in diesem Bereich aus ökologischen Gründen grundsätzlich abzulehnen. (BRETSCHNEIDER et al., 1982)

3.4.1 Totbau/Klassische Deckwerke

Unter *Totbau* versteht man einen ingenieurtechnischen Verbau mit rein technischwirtschaftlicher Zielsetzung (BRETSCHNEIDER et al., 1982). Profilsicherungen mit toten Baustoffen benötigen wenig Platz, da sie auch für steile und senkrechte Böschungen anwendbar sind und bei großen Beanspruchungen eingesetzt werden können. Tote Baustoffe sollten aus ästhetischen und ökologischen Gründen nur dann eingebaut werden, wenn die Erosion nicht oder nicht ausschließlich durch Lebendbaumaßnahmen verhindert werden kann. Dies ist u.a. der Fall, wenn die Schleppspannung und die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers die Widerstandskraft des anstehenden Sohlmaterials überwinden. Deshalb sind Totbauverfahren überwiegend in der Unterwasserzone, insbesondere im Bereich des Böschungsfußes zu finden oder dort, wo nicht genügend Raum für naturnahe Ausführungen vorhanden ist (z.B. in Ortslagen). Anlage 10.2.1 enthält eine Übersicht toter Baumaterialien, die auch in Kombination mit ingenieurbiologischen Bauweisen verwendet werden können.

Klassische Deckwerke

Durch die zunehmende Schifffahrt und die daraus resultierende Belastung der Ufer besonders in engen Gewässerbereichen kann oft auf hartes Deckwerk nicht verzichtet werden. Unter *Deckwerk* versteht man eine rein technische Sicherungsmethode unter Verwendung toter Baustoffe, die vor allem in der Vergangenheit in ausgebauten Gewässerprofilen zum flächigen Uferschutz gebaut wurde. Sie ist stärker ausgebildet als biologische Methoden und daher widerstandsfähiger gegen äußere Angriffe. Deckschichten von Deckwerken bestehen aus erosionsfesten Belägen, Steinmatten, Steinschüttungen oder Pflasterungen aus Wasserbau- bzw. Betonformsteinen (Harter Verbau). Um ein Ausspülen feiner Bodenteilchen durch die Wasserbewegung zu vermeiden, wird eine Filterschicht (Kiesschicht, Geotextil) als Trennlage zwischen

Deckschicht und Baugrund eingebaut. Eine zusätzliche Stabilität der Steine (Lagestabilität) kann durch eine Verklammerung mit Mörtel erfolgen. Der Böschungsaufbau muss durch eine geeignete Fußsicherung gegen Abrutschen gesichert werden.

Deckwerke können undurchlässig oder durchlässig ausgeführt werden, je nach Lage des Grundwasserspiegels zum Kanalwasserspiegel. Dichte Deckwerke sind notwendig, wenn der Wasserstand im Gewässer höher ist als der Grundwasserspiegel und damit ein Verlust von Wasser möglich ist. Deckwerke sind je nach Ausführung unterschiedlich aufgebaut und lassen sich in Deckwerks-Regelbauweisen einteilen. Die Bezeichnungen der nachfolgenden Deckwerksbauweisen erfolgen in Anlehnung an das Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR) der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, 1993).

Ausführungen dichter Deckschichten (vgl. Abb. 30):

- dichter, erosionsfester Belag aus Asphaltbeton, Gießasphalt oder zementgebundenem Material; Geotextil als Trennlage (D4a)
- geschüttete Wasserbausteine (Kl. II) mit Vollverguss aus dichtem Vergussstoff; Geotextil als Trennlage (D3b)
- durchlässige Deckschicht auf Ton (Weichdichtung) mit Geotextil oder Bentonitmatte als Zwischenlage (D1, D2, D3a, D4b)

Dort, wo der Grundwasserstand auf gleicher Höhe oder höher als der Wasserstand im Gewässer ist, wird ein durchlässiges Deckwerk gebaut, bestehend aus einer durchlässigen Deckschicht auf einer Filterschicht (Geotextil oder Kornfilter).

Ausführungen durchlässiger Deckschichten (vgl. Abb. 30):

- geschüttete Wasserbausteine (Kl. II oder III) auf Geotextil oder Kornfilter (D1)
- geschüttete Wasserbausteine (Kl. II) mit Teilverguss aus dichtem Vergussstoff auf Geotextil oder Kornfilter (D2)
- geschüttete Wasserbausteine (Kl. II) mit Vollverguss aus durchlässigem Vergussstoff auf Geotextil (D3a)
- durchlässiger, erosionsfester Belag (Betonverbundsteine mit Entwässerungsöffnungen oder breiten Entwässerungsfugen, Säulenpflaster, Drahtschottermatten) auf Geotextil oder Kornfilter (D4b)

Größenklassen für Wasserbausteine (Schüttsteine) nach TLW¹⁶:

Größenklasse	Abmessungen [cm]
0	5 – 15
I	10 - 20
II	10 – 30
III	15 - 45
IV	20 - 60
V	35 - 100

- Die angegebenen Grenzwerte einer Klasse gelten für die jeweils größte Steinlänge.
- Klasse V gilt nur für Schüttsteine aus Felsgestein.

Tabelle 4: Größenklassen für Wasserbausteine (Schüttsteine) nach TLW (BAW, 1993)

Aus heutiger Sicht sollten klassische Deckwerke nur noch dort eingesetzt werden, wo Böschungsabschnitte durch Strömung, Wellenschlag oder Gezeiteneinfluss besonders gefährdet sind und keine anderen Möglichkeiten zur Sicherung bestehen. Zudem sollte dann das Deckwerk im sichtbaren Bereich durch biologische Maßnahmen unterstützt und ergänzt werden. In Abbildung 30 sind einige Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen aufgeführt.

¹⁶Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW)

Regelbauweisen für Böschungsund Sohlensicherungen

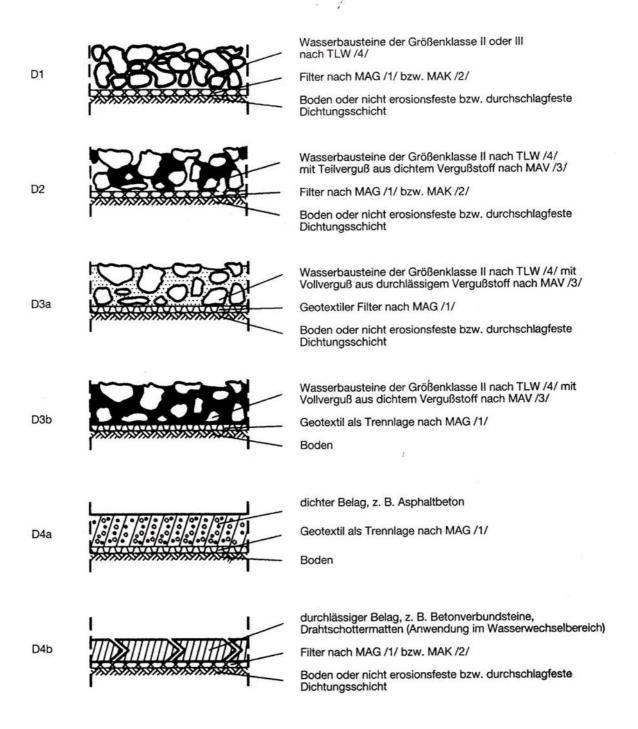


Abbildung 30: Regelbauweisen für Deckwerke (BAW, 1993)

3.4.2 Lebendbau

Mit *Lebendbau* bezeichnet man Bauweisen, bei denen wuchsfähige Pflanzenteile oder ganze Pflanzen als Baumaterialien verwendet werden (BRETSCHNEIDER et al., 1982). Durch den Lebendbau an Gewässern soll eine Pflanzendecke erhalten oder hergestellt werden, die nicht nur Uferböschungen und Vorländer vor Erosion sichert, sondern auch ökologisch in das Landschaftsbild passt und wertvolle Lebensräume für zahlreiche Tier- und Pflanzenarten schafft. Die Wirksamkeit des Lebendbaus als Profilsicherung liegt in der fortlaufenden Durchwurzelung und Festigung des Bodens, in seinem flächendeckenden Schutz der Böschungen und in der Selbstregeneration (LANGE et al., 1989).

Nach ihrer Fertigstellung sind Lebendbauten nicht - wie ein großer Teil der Totbauten - der Verwitterung und der Abnützung ausgesetzt, sondern werden im Laufe ihrer Entwicklung zunehmend stabiler. Sie bleiben nachhaltig funktionsfähig, da sie in der Lage sind, kleinere Beschädigungen selbstständig auszugleichen (Regeneration), sich veränderten Bedingungen in gewissem Maße anzupassen und sich schließlich zu ausgedehnten, wirksamen und stabilen Systemen weiterzuentwickeln (vgl. Kap. 3.5). Dies hat den Nachteil, dass der lebende Baustoff Pflanze zunächst nur geringe Schutzwirkung aufweist, die allmählich zunimmt und nicht selten erst nach mehreren Jahren ihr Optimum erreicht (vgl. Abb. 31). Eine erfolgreiche Durchwurzelung und Pflanzenentwicklung kann nur erwartet werden, wenn die Standortverhältnisse (Bodenart, Klimaverhältnisse, Artenvorkommen, Wasserstände) gründlich untersucht wurden, damit standortgerechte, langlebige Pflanzenbestände zum Einsatz kommen können. Es sollen, soweit möglich, immer einheimische, örtlich vorhandene Pflanzenarten verwendet werden, wobei auch auf eine gewisse Artenkombination zu achten ist, da sich sonst Monokulturen ausbilden können. Der Lebenszyklus der Pflanzen, also ihr Entwicklungsrythmus, bestimmt den Zeitpunkt der Bauausführung. Aussaaten werden in der Vegetationszeit ausgeführt, Arbeiten mit Gehölzen während der Vegetationsruhe im Winter (Institut für Konstruktiven Wasserbau in Zusammenarbeit mit dem ÖWAV, 1995).

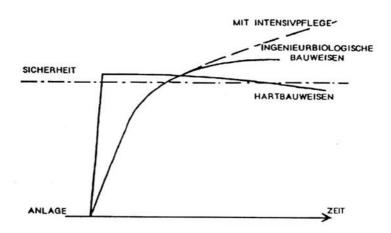


Abbildung 31: Zeitlicher Verlauf von Sicherheit und Risiko ingenieurbiologischer Bauweisen im Vergleich zu Hartbauweisen (STERN, 1993)

3.4.3 Kombinierte Bauweisen

Werden neben den Pflanzen und Pflanzenteilen tote Baumaterialien verwendet, die die Pflanzen zeitweilig stützen oder bei großen Beanspruchungen schützen, so spricht man von kombinierten Bauweisen oder von *ingenieurbiologischer Ufersicherung*. Sowohl Lebendbau- als auch Totbauverfahren weisen Vor- und Nachteile auf, so dass es nahe liegt, beide Bauweisen so einzusetzen, dass ihre jeweiligen Vorteile ausgenutzt werden. Dem toten Material wird also die wichtige Funktion als Hilfsstoff zum Sofortschutz übertragen, damit sich die Pflanzen gerade in den ersten Vegetationsperioden ausreichend entwickeln können. Während die Vegetation mit zunehmendem Alter durch Verwurzelung und Vermehrung immer mehr an Festigkeit und Standsicherheit gegenüber Belastungen gewinnt, verlieren die toten Baumaterialien ab dem Tage der Baufertigstellung an Festigkeit, da sie der ständigen Verwitterung und Alterung ausgesetzt sind und sich selbst nicht regenerieren können. Aber nicht nur zur Anfangssicherung werden tote Baumaterialien eingesetzt. Sie sind auch in den Bereichen unverzichtbar, in denen die Belastungen zu groß sind, um die Ufer alleine durch Pflanzen ausreichend zu schützen.

Tote Baumaterialien im Sinne der Ingenieurbiologie sind "bodenbürtige" Materialien, die in der Natur bereits vorhanden sind und aus der betreffenden Landschaft stammen. Folgende tote Baumaterialien kommen für die Verwendung in ingenieurbiologischen Bauweisen in Frage (BEGEMANN et al., 1994) (vgl. Abb. 29):

- Totholz im Sinne von nicht bewurzelungs- bzw. nicht ausschlagsfähigem Holz wie z.B. ganze Bäume (Nadelbäume), Pflanzenteile (Stämme, Wurzeln, Äste, Zweige, Ruten) sowie unbehandeltes, bearbeitetes Holz (Pfähle, Pflöcke, Latten, Bretter, Stangen)
- Naturfasergewebe, die sich nach gewisser Zeit vollständig zersetzen (z.B. Kokos, Jute, Hanf)
- Natursteine (Geröll, Blöcke, Schotter, Kies)

SCHLÜTER (1986) nennt außer den oben aufgeführten, natürlichen Materialien auch noch folgende künstliche Materialien für eine Verwendung in ingenieurbiologischen Bauweisen (vgl. Abb. 29):

- Kunststeine (z.B. Vollsteine, Lochsteine, Hohlblocksteine aus Materialien wie Ton, Kalksandstein oder Beton)
- Metall (Rohre, Stäbe, Drahtgeflecht, Draht, Nägel, Schrauben usw.)
- feste Kunststoffe (Bahnen, Gewebe)

Nicht alle toten Baumaterialien sind gleichermaßen für eine Kombination mit lebenden Baumaterialien geeignet. Verwendbar sind nur diejenigen Baustoffe, die ein Pflanzenwachstum zulassen und mit den lebenden Baumaterialien einen engen Verbund bilden. Dabei sollte das tote Material im Boden oder an der Bodenoberfläche ein festigendes Gerüst bilden, dessen Zwischenräume von Pflanzen ausgefüllt und von Pflanzenwurzeln durchwachsen werden kann, und sich somit eine optimale Verflechtung von totem mit lebendem Material zum Schutz des Gewässerprofils ergeben kann. Tot- und Lebendbaumaßnahmen sind bereits bei der Planung aufeinander abzustimmen, um eine Behinderung der Pflanzenentwicklung zu vermeiden.

Es ist nicht einfach, eine klare Grenze zu ziehen, ab wann eine Maßnahme unter Verwendung toter Baumaterialien noch als ingenieurbiologisch bezeichnet werden kann. Eine klare Abgrenzung des Begriffes ingenieurbiologische Bauweise hinsichtlich der zugelassenen Baumaterialien ist in der Literatur nicht zu finden. Einigkeit besteht jedoch darüber, dass tote Materialien und lebende Baumaterialien prinzipiell miteinander kombiniert werden können, sofern die Baumaßnahme naturgemäß und der Ökologie des Flusses angepasst ist. Abbildung 32 zeigt eine Bewertung verschiedener Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich der Ökologie.



Abbildung 32: Ökologische Wertung unterschiedlicher Ufersicherungen nach *Kollt* (SCHMIDT-VÖCKS, 1998)

3.5 Biotechnische Eigenschaften der Ufervegetation

Pflanzen besitzen bestimmte vererbbare, biotechnische Eigenschaften (vgl. Abb. 33). Sie reagieren auf äußere Reize wie z.B. Last- oder Krafteinwirkungen mit entsprechend veränderten Wuchsformen. So ist z.B. ein Baum bei geringem Windeinfluss auf seiner windbelasteten Seite mit Zugwurzeln verankert, bei stärkeren Windbelastungen bildet er zusätzlich leeseitige Stützwurzeln aus. Vergleicht man unterschiedliche geologische Standorte, tendieren Bäume, die an Böschungen wachsen, mit zunehmendem Reibungswinkel des Bodens zur Ausbildung von hangaufwärtsgerichteten Wurzeln (MATTHECK, 1997). Einige Pflanzenarten (Weiden, Erlen) sind in der Lage, bei Übererdung aus Adventivknospen Wurzeln auszubilden oder im Wasser völlig andere Wurzelsysteme zu entwickeln als im Erdreich.

Solche und weitere biotechnische oder biomechanische Eigenschaften sind in verschiedenen Pflanzengruppen unterschiedlich ausgeprägt und treten ohne äußere Reizung oft nicht in Erscheinung. Bei der Ausführung ingenieurbiologischer Bauweisen macht man sich diese teilweise noch versteckten Eigenschaften zu Nutze. Der Baustoff Pflanze unterliegt, sofern man ihm die erforderlichen Lebensbedingungen bietet, einer ständigen Entwicklung und Adaption an seine Umgebung. Für die Böschung bedeutet dies einen äußeren Schutz durch flächige Bedeckung, eine intensive innere Verwurzelung, die durch Bodenverfestigung die Aufnahme von Zugspannungen in der oberen Bodenschicht bewirkt, und gleichzeitig auch die Schaffung eines ökologischen Lebensraums für viele Arten (BEGEMANN et al., 1994).

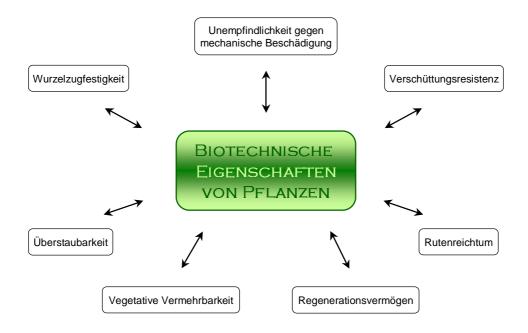


Abbildung 33: Biotechnische Eigenschaften der Pflanze

Pflanzen und Pflanzenteile mit wichtigen biotechnischen Eigenschaften sind wie jede Pflanzenart an einen gewissen Standort gebunden. Da sie jedoch in Form von ingenieurbiologischen Bauweisen schnell Wirkung zeigen sollen und um im Einklang mit der natürlichen Vegetationsentwicklung zu stehen, ist eine ausführliche Untersuchung ihres Standortes von großer Bedeutung. Außer der geographischen Lage sind dabei Bodenart, Niederschlags- und Temperaturverhältnisse, Gewässerstruktur sowie biologische und hydraulische Aspekte zu berücksichtigen.

Weiden besitzen aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften eine Sonderstellung unter den Ufergehölzen und werden neben den Erlen als "das" Gehölz der Ufer bezeichnet (IWK, 1992). Sie besitzen die Fähigkeit, aus ihren Knospen sowohl Wurzeln als auch Triebe entwickeln zu können. Diese adventive Eigenschaft wird beim Einbau von Steckhölzern und Stecklingen ausgenutzt (vgl. Abb. 34). Es entwickelt sich schon bald ein Weidensaum, dessen Ruten beweglich und flexibel sind und sich beim Überfluten

über die Böschung in das Strömungsfeld legen. Durch wedelnde Bewegungen in der Strömung wandeln sie Energien um und schützen das Ufer vor Strömungsangriffen. Die Fähigkeit Adventivwurzeln auszubilden ist die Voraussetzung für eine vegetative Vermehrung der Pflanzen.

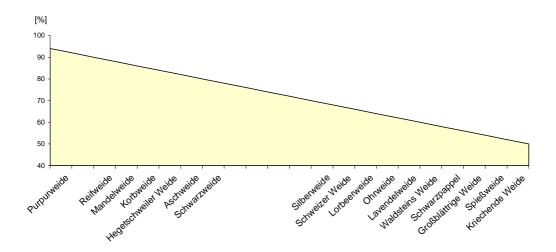


Abbildung 34: Fähigkeit verschiedener Weidenarten Adventivwurzeln auszubilden in Anlehnung an STERN, 1993

3.6 Pflanzen als lebende Baumaterialien

Die nachfolgende Zusammenstellung der wichtigsten Baumaterialien, ihre Definitionen sowie die Ausführungen zu ihrem Einsatz im Schutz-Wasserbau erfolgen in Anlehnung an DIN 19657 Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen (1973) und DIN 18918 Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen (1973 bzw. 1990).

3.6.1 Begriffe und Definitionen

Pflanzen als lebende Baumaterialien kommen in Form von Einzel-Bauelementen oder zusammengesetzten Bauelementen zum Einsatz. Kommt eine Verwendung als Einzel-Element in Betracht, dann werden die Pflanzen erst auf der Baustelle nach der Planvorgabe der Bauweise verpflanzt (z.B. Initialpflanzung). Werden sie im Voraus als Vegetationsmatte in Aufzuchtbecken herangezogen, anschließend in dieser Form zur Baustelle gebracht und dort eingebaut, dann spricht man von zusammengesetzten Bauelementen.

Folgende lebende Einzel-Bauelemente werden dafür verwendet:

• Vollständige Pflanzen:

- Pflanze: vollständige, d.h. aus Spross und Wurzeln bestehende,

verholzte oder krautige Pflanzen, die zum Teil auch in Behältern, die das Wurzelwerk umfassen, herangezogen

werden

- Pflanzballen: Etwa 20×20 cm bis 30×30 cm großer, würfelförmiger

Ballen aus der obersten Bodenschicht.

Er besteht aus mehreren vollständigen Pflanzen einer oder

mehrerer Arten mit durchwurzeltenm Boden.

- Fertigrasen: fest zusammenhängende, dichtnarbige Rasenstücke, die

vorwiegend aus vollständigen Graspflanzen mit der obersten Schicht des von ihnen durchwurzelten Bodens

bestehen

Rasensoden: $30 \times 30 \text{ cm}$ Dicke: 3 - 4 cm Rollrasen: $30 \times 167 \text{ cm}$ Dicke: 2 - 3 cm

• Bewurzelungsfähige Pflanzenteile:

- Steckholz: bewurzelungsfähiger, unverzweigter Teil eines verholzten,

ein- oder mehrjährigen Triebes

Länge: 25 – 40 (80) cm Durchmesser: 1 – 5 cm

- Setzpflock: bewurzelungsfähiger, unverzweigter Teil eines verholzten,

geraden, oberirdischen Sprosses

Länge: 50 – 120 cm Durchmesser: mind. 3 cm

- Setzstange: bewurzelungsfähiger, gerader und wenig verzweigter

Teil eines dickeren, verholzten, oberirdischen Triebes Länge: 100 – 250 cm Durchmesser: 4 – 6 cm

Lange. 100 250 cm Durchinesser. 4 0 cm

- Rute: bewurzelungsfähiger, unverzweigter oder wenig verzweigter

Teil eines biegsamen, verholzten, oberirdischen Triebes

Länge: 120 m und länger

Methoden zur Ufersicherung

- Zweige/Äste: bewurzelungsfähiger, verzweigter Teil eines verholzten,

oberirdischen Triebes

Länge: mind. 100 cm, für Buschlagen mind. 160 cm

- Busch: Gemisch aus bewurzelungsfähigen Zweigen und Ästen einer

oder mehrerer Gehölzarten

Länge: 25 – 40 cm Durchmesser: mind. 1 cm

- Halmsteckling: bewurzelungsfähiger, in der Regel unverzweigter Teil

eines nicht verholzten Sprosses

- Sprössling: im Boden aufwärts wachsender Jungspross

- Wurzelstück: ausschlagsfähiger Teil einer verholzten oder

unverholzten Wurzel

- Rhizom: Teil von Ausläufern (Sprossen), die unterirdisch

waagerecht wachsen und die mindestens ein bis zwei

unversehrte Internodien besitzen

• Saatgut:

- Saatverfahren: Trockensaatverfahren, Nasssaatverfahren, Auslegen von

Fruchtständen

- Samen: handelsübliches Saatgut von Gräsern und Kräutern sowie

Samenträger wie Früchte, Fruchtstände, Fruchthüllen

Zusammengesetzte Bauelemente werden unterteilt in:

• Faschine: besteht aus austriebsfähigen, verholzten, dünnen,

biegsamen, elastischen, möglichst wenig

verzweigten Ruten oder Zweigen, die zu Bündeln

zusammengebunden sind

Länge: 2 – 4 m Durchmesser: 10 – 15 cm

• Ballen, Sode: 30×30 cm großes Stück einer Pflanzengemeinschaft

Dicke: 2-4 cm

• Saatgutmatte: aus organischer Substanz bestehendes, großes,

teppichartiges Stück mit ein- oder aufgearbeitetem

Saatgut

3.6.2 Rasenflächen

Auf vegetationslosen Bodenoberflächen wie z.B. auf neu angelegten Dämmen oder Uferböschungen wird Saatgut meist großflächig ausgebracht, um schnellen Bewuchs und rasche Stabilisierung gegen Erosion zu erreichen. Dazu werden fertige Samenmischungen von Gräsern und Kräutern nach DIN 18917 bzw. Saatgutmischungsverordnung verwendet. Es sollte darauf geachtet werden, dass keine speziell gezüchteten Zierrasensamen ausgesät werden, da die Berasung später nicht permanent gedüngt, bewässert oder gemäht werden kann.

Nach Erfahrungen von *Begemann et al.* haben sich für den ingenieurbiologischen Einsatz Samenmischungen bestehend aus Samen zahlreicher Arten erfolgreich bewährt. Bei der Wahl ihrer Zusammensetzung sollten außer der Zielsetzung auch die ökologischen Verhältnisse berücksichtigt werden (BEGEMANN et al., 1994).

Rasen ist eine einfache und preiswerte Bauweise. Nach etwa einem Jahr hat er seine schützende Wirkung erreicht. Die Schutzfunktion kann durch das Einwandern von Neophyten (z.B. Indisches Springkraut, Herkulesstaude) geschwächt werden. Diese Pflanzen vermehren sich schnell und unterdrücken das Rasenwachstum durch Lichtentzug. Durch regelmäßiges Mähen vor dem Ausreifen der Samen kann man die Neophyten bekämpfen (PATT et al., 1998).

Je nach Standort und Zielsetzung werden verschiedene Saatverfahren angewendet. Nachstehend sind die einzelnen Verfahren und ihre Eigenschaften kurz beschrieben (PATT et al., 1998).

Trockensaat:

Auf der vorbereiteten standfesten Böschung werden im Frühjahr zu Beginn der Vegetationsperiode Rasensamen ausgebracht. Die ersten Wochen nach der Aussaat und die Anwachsphase sind entscheidend für eine erfolgreiche Entwicklung des Böschungsrasens. Treten in diesem Zeitraum z.B. durch Regenfälle verursachte Oberflächenabflüsse auf, werden die Samen ausgewaschen. Auch in der Zeit nach dem Austreiben, wenn die Keimlinge erst leicht verwurzelt sind, läuft der gesamte Oberboden Gefahr, weggespült zu werden. Bei starker Sonneneinstrahlung hingegen besteht die Gefahr, dass die Samen vertrocknen und gar nicht zum Keimen kommen. Diese Schäden sollten von vorne herein als Nachbesserungsarbeiten einkalkuliert werden.

• Mulchsaat:

Die eingesäte Fläche wird mit einer ca. 5 cm starken Mulchschicht, z.B. aus gehäckseltem Stroh, abgedeckt. Dadurch wird das Risiko, dass die Samen weggeschwemmt werden, stark vermindert. Bei Regen bildet sich in der Mulchschicht

ein feuchtes, warmes Klima, das die Keimzeit beschleunigt und die Keimlinge zusätzlich vor dem Austrocknen schützt. Die Mulchschicht verrottet mit der Zeit und verbessert somit die Humusbildung.

Nasssaat:

Die Nasssaat, auch *Hydro*- oder *Spritzbegrünung* genannt, ist eine Mixtur aus Samen, Dünger, Kleber, Mulchsubstrat und Wasser, die mit Hilfe eines Druckfasses und einer Stahlrohrdüse auf die Böschungsfläche aufgespritzt wird.

Anwendbar ist dieses Saatverfahren nur, wenn innerhalb des Spritzradius eine standfeste Baustrasse liegt, auf der die relativ schweren Fahrzeuge fahren können.

• Rasensoden oder Fertigrasen:

Ist die Erosionsgefahr besonders hoch oder kommen aus zeitlichen Gründen die oben genannten Saatverfahren nicht in Frage, dann kann Fertig- oder Rollrasen verlegt werden. Aus angezüchteten Rasenflächen werden Grasnarben herausgeschnitten und stückweise auf einer 3 bis 8 cm dicken Schicht aus Mutterboden verlegt. Wichtig ist, dass der Fertigrasen gut gegen Austrocknen geschützt wird und mittels Pflöcken oder einem Naturfasergewebe auf der Böschung gesichert wird. Nach ca. 6 – 8 Wochen ist er ausreichend mit dem Untergrund verwurzelt und übernimmt dann wie ein mehrjähriger Rasen seine volle Schutzfunktion.

- Rasensoden: ca. $30\times30\,\mathrm{cm}$, Stärke $3-4\,\mathrm{cm}$ - Rollrasen: Bahnen zu $30\times167\,\mathrm{cm}$, Stärke $2-3\,\mathrm{cm}$

• Vegetationsmatten:

Vegetationsmatten sind Geotextilien aus verrottbarem Material, in deren Fasern verschiedene Samen eingearbeitet sind. Sie werden auf der Böschung ausgelegt und mit Pflöcken befestigt. In der Austrieb- und Anwachsphase müssen sie regelmäßig gewässert werden, damit ein optimales feuchtwarmes Mikroklima entsteht. Vegetationsmatten besitzen im Vergleich zur Mulchsaat den Vorteil, dass die Böschungsoberfläche sofort nach dem Aufbringen der Matten vor mechanischen Angriffen geschützt ist. Später übernimmt dann ein dichter Böschungsrasen diese Sicherung.

• Heublumensaat:

Samenreiche Bestände natürlich vorhandener Wildgräser und Kräutergesellschaften werden abgemäht und das Mähgut auf der neuen Böschung ausgebracht (Heublumensaat). Diese Art der Böschungsbegrünung ist sehr arbeitsintensiv und lohnt sich nur, wenn in der Nähe der Baustelle bereits Wildrasenkulturen vorhanden sind. Aufgrund der hohen Erosionsanfälligkeit entwickeln sich nicht immer alle Gräserarten, und es entstehen oft Fehlstellen.

• Sukzession:

Besteht kein dringender Erosionsschutz, so kann man der natürlichen Entwicklung freien Lauf lassen. Nach einiger Zeit findet eine Selbstbegrünung aus den

örtlich vorhandenen Pflanzenbeständen statt. Die natürliche Sukzession läuft besonders erfolgreich ab, wenn in der Umgebung eine große Artenvielfalt vorhanden ist.

3.6.3 Röhrichte

Röhrichte sind wichtige Bestandteile des Uferschutzes in der Wasserwechselzone von Fließgewässern. Ihr Vorkommen wirkt sich auf ein Gewässer stets positiv aus. Sie schützen die Uferböschung mit ihren abdeckenden Blättern und Trieben und vergrößern dabei die Rauheit im Bereich zwischen Wasseroberfläche und Uferboden. Mit ihren Wurzeln und Rhizomen vernetzen sie die Böschungsoberfläche und verfestigen den Boden. Zusätzlich reichern sie das Wasser mit Sauerstoff an und bieten Lebensraum für viele Kleinstlebewesen, die wiederum dazu beitragen, dass Schmutzstoffe im Wasser abgebaut werden. Durch einen Röhrichtgürtel wird also das Selbstreinigungsvermögen eines Gewässers vergrößert (LANGE et al., 1989).

Am Besten entwickeln sich Röhrichte an Ufern mit ausreichender Wasserüberdeckung und sind somit im oberen Böschungsbereich fehl am Platz. Durch Aussaat, Ballen-bzw. Rhizompflanzungen oder in Form von Halmstecklingen können die Pflanzen am Ufer angesiedelt werden. Der Pflanzbereich liegt bei ca. 30 – 35 cm unter Mittelwasser. In tideabhängigen Gewässern sind Pflanzungen auch unterhalb dieses Bereichs möglich (BESTMANN, 1991). Ihre Entwicklung ist geprägt von einer Reihe einwirkender Parameter wie Strömung, Sedimentation, Böschungsneigung, Licht und Nährstoffen. Je flacher die Uferneigung ist, in desto größere Wassertiefen dringen sie dabei vor (vgl. Abb. 35).

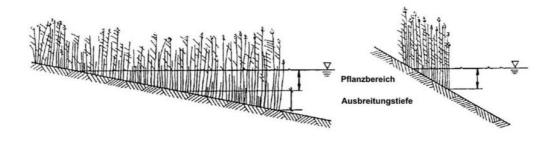


Abbildung 35: Wuchsbereiche und Ausbreitungstendenz von Röhricht bei unterschiedlichen Böschungsneigungen (BESTMANN, 1991)

Für einen schnell erforderlichen Schutz werden vorgefertigte Vegetationsmatten oder -walzen eingebaut. Artenreiche Röhrichte erfüllen die ingenieurbiologischen Aufgaben meist besser als artengleiche Bestände, da sie bei Ausfall einer Pflanzenart automatisch deren Standort besiedeln. Nachstehend sind die wichtigsten Seggen- und Röhrichtarten des Lebendbaus aufgeführt.

• Rohrglanzgras:

Rohrglanzgras eignet sich gut für die Ansiedlung an schnell fließenden Gewässern mit stark schwankendem Wasserstand. Es dringt kaum über Wassertiefen von 30 cm vor und bleibt daher auf einen engen Uferstreifen begrenzt. Schon eine leichte Strömung im Gewässer genügt den Pflanzen, um sich zu entwickeln. In Bereichen großer Wasserschwankungen mit längeren Trockenzeiten und stärkeren Überflutungen setzen sie sich erfolgreich gegen andere Röhrichtarten durch.

Das Rohrglanzgras besitzt im Gegensatz zu anderen Arten die Fähigkeit, auch in verschmutztem Wasser lebensfähig zu sein und gibt sich durchaus mit einem Halbschattenplatz zufrieden. Daher siedelt es sich auch etwas oberhalb der Wasserspiegellage gut an und schafft im Bereich des Mittelwassers einen gesicherten Übergang zu einer Rasenböschung oder zu einer Gehölzzone. Mit seinem kräftigen Wurzelwerk armiert es das Ufer, legt sich bei Überströmen auf die Böschungsoberfläche und richtet sich danach wieder selbstständig auf.

• Schilf:

Schilf dringt bis in 1,5 m Wassertiefe vor und bildet dadurch eine hervorragende Pufferzone gegen den Wellenschlag von Schiffen aus. Es verträgt niedrige bis mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und ist wohl die bekannteste Uferschutzpflanze an Strömen, Flüssen, Kanälen und Seen.

Flachwassergebiete sind bevorzugte Standorte von Schilf, das mit seinem intensiven Geflecht aus Wurzeln und Rhizomen fest im Unterwasserboden verankert ist und mit unzähligen Halmen einen dichten, vor dem Ufer gelagerten Pflanzenstreifen ausbildet. Je flacher die Böschungsneigung dabei ist, desto breiter bildet sich der Schilfsaum aus (vgl. Abb. 35).

Wie eine vorgelagerte Pfahlreihe oder vergleichbar mit der Wirkung eines Wellenbrechers schützt Schilf die Uferböschung vor Strömungsangriffen und Schiffswellen. Die ankommenden Wellen brechen beim Auftreffen auf den Schilfsaum und verlieren ihre Zerstörungskraft. Durch die vielen Schilfhalme kommt es zu Verwirbelungen, so dass die Strömungsgeschwindigkeit im Uferbereich auf ein Minimum reduziert wird.

Ist die Strömung allerdings zu stark, dann besteht die Gefahr, dass die Halme abbrechen. Da die Wurzeln nur durch die oberirdischen Teile mit Luft versorgt werden, hätte ein Wassereintritt durch den Halm das Verfaulen des Wurzelwerks und somit das Absterben der Pflanze zur Folge.

Unterhaltungsarbeiten müssen vorsichtig und ganz bewusst getätigt werden, denn wo die Schilfhalme beseitigt werden, ersticken die unterirdischen Teile und der Nachwuchs wird dezimiert.

Schlanksegge:

Die Schlanksegge ist unempfindlich und robust und deshalb ein geradezu idealer Ersatz für Schilf. Aufgrund ihrer Bescheidenheit hat sie von allen Seggenarten die größte Bedeutung für den Uferschutz. Sie siedelt bevorzugt an stehenden bis langsam fließenden Gewässern, kann aber überall eingesetzt werden, wo Bedingungen vorhanden sind, die eine Ansiedlung von Schilf ausschließen (starke Strömung, erheblicher Wasserstandswechsel, Unterhaltungsarbeiten).

• Wasserschwaden:

Dies ist eine hochwüchsige Röhrichtart, die natürlicherweise an stehenden oder langsam fließenden Gewässern mit stark schwankenden Wasserständen zu finden ist. Ähnlich dem Rohrglanzgras dringen auch Wasserschwaden bis ca. 30 – 50 cm Wassertiefe vor und vertragen leichte Wasserverschmutzungen.

• Flechtbinse:

Binsen sind aufgrund ihres enormen Tiefenwachstums, das bis zu 4 m beträgt, und der damit verbundenen Abflussbehinderung nicht für kleinere Gewässer geeignet. Sie wachsen bevorzugt in Verlandungszonen von stehenden oder langsam fließenden Gewässern und sind von allen Röhrichtarten am besten in der Lage, das Gewässer mit Sauerstoff anzureichern und dem Wasser sowohl organische als auch anorganische Verbindungen zu entziehen.

• Rohrkolben:

Ähnlich den Binsenarten fördert auch der Rohrkolben durch sein Tiefenwachstum (bis 2 m) die Verlandung. Er wird oft in Kombination mit Schilf vorgelagert und weist in etwa die gleichen Eigenschaften auf wie die Flechtbinse.

3.6.4 Gehölze

Bäume und Sträucher sind wichtige Strukturelemente entlang unserer Fließgewässer. Sie schützen die Ufer, beschatten das Gewässer, dienen als Lebensraum für viele Tierarten und lockern das Landschaftsbild auf. Einer Ansiedlung standortgerechter langlebiger Gehölze kommt nicht nur aus Sicht der Ökologie und Biologie große Bedeutung zu, sondern ihre tiefen und breiten Wurzelsysteme, die den Böschungsbereich ausreichend durchziehen, sind auch die Voraussetzung für den Dauererfolg ingenieurbiologischer Ufersicherungen.

Bei der Auswahl geeigneter Pflanzen sollte man sich an den heimischen Beständen und deren Eigenschaften orientieren. Die Zusammenstellung der standortgerechten Arten wird durch die Bodenverhältnisse, die Wasserstände, die Überflutungsdauer und die Funktion des Gewässers bestimmt. Weiden und Erlen bilden in der Regel die Weichholzzone, weiter landeinwärts folgen typische Arten der Hartholzzone. Die Artenzusammensetzung sollte sorgfältig vorgenommen werden, denn die Gehölzart, ihre Anordnung am Ufer sowie die Bestandsdichte und ihre Höhe haben einen wesentlichen Einfluss auf die Beschattung des Gewässers. Hohe und lichte Baumbestände in einzeiliger Anordnung schränken die Sonneneinstrahlung und damit das Wachstum der Laichkräuter und Gräser kaum ein. Sind dagegen auf der Südseite des Gewässers Gehölze mehrreihig mit zwischengepflanzten Sträuchern angelegt, so ist eine weitgehende Beschattung gewährleistet. Dies vermindert die Verkrautung des Gewässers, die Leistungsfähigkeit des Abflussquerschnittes bleibt erhalten und der Unterhaltungsaufwand ist geringer. Abbildung 36 gibt eine Übersicht über unterschiedliche Wuchshöhen verbreiteter Weidenarten entlang der Gewässerufer.

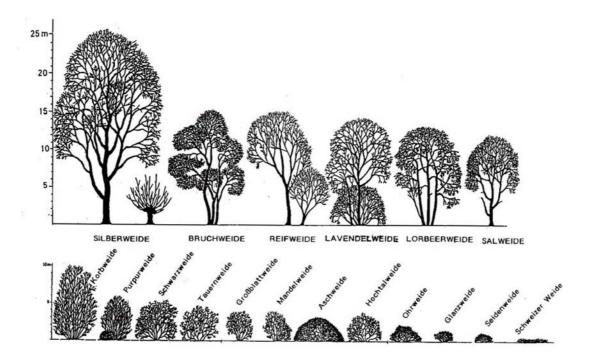


Abbildung 36: Wuchsform und -größe von ausgewachsenen, europäischen, wildwachsenden Baum- und Strauchweiden (SCHIECHTL et al., 1994)

Gehölze werden in der Regel gepflanzt oder als Steckhölzer eingebracht. Eine Aussaat kommt aufgrund der langen Entwicklungszeit meist nicht in Frage.

• Gehölzbepflanzung:

Die Jungpflanzen werden hauptsächlich aus Aufzuchten in Baumschulen gewonnen, da oft nicht genügend Bestände in der Natur vorhanden sind, die verpflanzt werden können. Dabei müssen Arten- und Pflanzenwahl immer dem Standort angepasst sein. Wichtig ist auch, dass die Pflanzen kräftig sind und ein gut ausgebildetes Wurzelwerk besitzen, denn dann wachsen sie schnell über die sie umgebende Vegetation hinaus.

Die beste Pflanzzeit ist die Vegetationsruhe, jedoch nicht während der Frostperiode. Um Anwuchsrisiken zu vermeiden, sollten größere Pflanzen fachgerecht an Pflöcken gesichert werden. Draht- oder Kunststoffmanschetten schützen die jungen Stämme vor eventuellem Wildverbiss, da die Rinden der Gehölze gerade bei länger anhaltender Schneelage gerne abgefressen werden.

Steckhölzer:

Für viele ingenieurbiologische Arbeiten eignen sich ausschlag- und bewurzelungsfähige Gehölzteile zur Neuansiedlung von Baum- und Strauchkulturen (vgl. Abb. 37). In unseren mitteleuropäischen Gebieten sind dazu fast alle heimischen Weidenarten, Schwarzpappeln, Goldregen und Liguster geeignet. Für einen Besatz an Fließgewässern verwendet man überwiegend Baum- und Strauchweiden. Es gibt aber neben den oben genannten natürlichen Arten noch zahlreiche Zuchtweiden, die in Baumschulen bzw. Weidenhegerbetrieben erhältlich sind (BEGEMANN et al., 1994).





(a) Ruten aus einem Weidenaufzuchtbetrieb

(b) von links nach rechts: Ruten, Steckhölzer, Setzstangen

Abbildung 37: Formen ausschlagsfähiger Gehölze für ingenieurbiologische Bauweisen (BEGE-MANN et al., 1994)

Nach DIN 18918 (1990) werden ausschlagsfähige Gehölzteile in Ruten, Steckhölzer, Pflöcke, Äste bzw. Astwerk und Setzstangen unterteilt. Sie werden alle aus verholzten, ein- oder mehrjährigen Trieben gewonnen. Das Ausschlagund Bewurzelungsvermögen sowie die Zuwachsleistung nehmen mit dem Volumen der Gehölzteile zu. Als Buschwerk verwendet man alle vorhandenen Altersund Stärkeklassen, obwohl die dünnen und insbesondere die unverholzten Triebe meistens vertrocknen und deshalb nicht anwachsen können. Bei der Pflanzung ist zu beachten, dass die Pflanzen in Wuchsrichtung eingesteckt werden und mindestens 3–4 Knospen über dem Boden aufweisen.

In der folgenden Tabelle (Tab. 5) sind die wichtigsten Bäume und Sträucher der Uferzone entsprechend ihrer Wuchsformen und Hauptverbreitung an Fließgewässern zusammengestellt.

		Höhe Breite [m] [m]		Hauptverbreitung der Gehölze * ¹			
Schwarzpappel	(Populus nigra)	35	20	W			
Zitterpappel	(Populus tremula)	35	15			S	
Bergulme	(Ulmus glabra)	30	20			S	E
Flatterulme	(Ulmus laevis)	30	20		Н		E
Silberpappel	(Populus laevis)	30	20		Н		
Sommerlinde	(Tilia platyphyllus)	30	20				E
Stieleiche	(Quercus robur)	30	20		Н	S	E
Bergahorn	(Acer pseudoplantus)	30	15		Н		E
Gemeine Esche	(Fraxinus excelsior)	30	15		Н	S	E
Graupappel	(Populus canescens)	30	10	W		_	
Winterlinde	(Tilia cordata)	25	25	• •	Н		Е
Silberweide	(Salix alba)	25	20	W	• • •	S	-
Rotweide	(Salix rubens)	25	15	W		Ü	
Spitzahorn	(Acer platanoides)	25	15	• •	Н		E
Schwarzerle	(Alnus glutinosa)	25	10		H	S	•
Feldulme	(Ulmus minor)	20	15		H	S	
Hainbuche	(Carpinus betulus)	20	15		H	3	E
Vogelkirsche	(Prunus avium)	20	10		H	S	E
9	(Salix fragilis)	20 15	_	W	п	S	
Bruchweide			10	VV		S	
Eberesche	(Sorbus aucuparia)	15	8	147		5	
Grauerle	(Alnus incana)	15	8	W		•	E
Gewöhnliche Traubenkirsche	(Prunus padus)	10	10		Н	S	E
Feldahorn	(Acer campestre)	10	8		Н		E
Lavendelweide	(Salix elaeagnos)	10	7	W			
Wildbirne	(Pyrus pyraster)	10	5		Н	_	
Hasel	(Corylus avellana)	8	6		Н	S	E
Holzapfel	(Malus sylvestris)	8	6		Н	_	
Zweigriffeliger Wießdorn	(Crataegus oxyacantha)	8	5		Н	S	E
Korbweide	(Salix viminalis)	8	4	W			
Eingriffeliger Wießdorn	(Crataegus viminalis)	7	5		Н		E
Schwarzer Hollunder	(Sambucus nigra)	7	5		Н	S	
Pfaffenhütchen	(Euonymus europaeus)	7	3		Н	S	E
Mandelweide	(Salix triandra)	6	5	W			
Roter Hartriegel	(Cornus sanguinea)	6	4		Н		E
Grauweide	(Salix cinerae)	5	6			S	
Schwarzweide	(Salix nigricans)	5	4	W		S	
Sanddorn	(Hippophae rhamnoides)	5	3	W			
Faulbaum	(Rhamnus frangula)	5	3		Н	S	
Liguster	(Ligustrum vulgare)	5	3		Н		
Purpurweide	(Salix purpurea)	5	3	W			
Rote Heckenkirsche	(Lonicera xylosteum)	4	3		Н		
Schneeball	(Viburnum opulus)	4	3		н	S	

^{*1} Hauptverbreitung der Gehölze in außeralpinen, naturnahen Wäldern an Fließgewässern:

Tabelle 5: Mittlere Höhen und Breiten der wichtigsten, standortgerechten und heimischen Gehölzarten an Fließgewässern in Anlehnung an PATT et al., 1998

W = Weichholzaue (Überflutungen an 30 bis 150 Tagen im Jahr)

H = Hartholzaue (Überflutungen an bis zu 30 Tagen im Jahr)

S = Wälder in Auen mit hoch anstehendem Grundwasser und regelmäßigen, aber nur kurz andauernden Überschwemmungen, vorwiegend im Frühjahr (z.B. Schwarzerlen-Eschen-Auenwald)

E = Wälder an Fließgewässern ohne ausgeprägte Aue und weitgehend fehlenden bzw. nur kurz andauernden Überschwemmungen (z.B. Erlen-Eschenwälder oder Ahorn-Eschenschluchtwälder)

4 Überblick über ingenieurbiologische Bauweisen

Wenn bestehende Ufer vor Unterspülungen, Abbrüchen und Einrissen oder neu angelegte Ufer vor einsetzender Erosion geschützt werden müssen, so sollten, sofern die Belastung nicht zu groß ist, naturnahe oder ingenieurbiologische Ufer- und Böschungsfußsicherungen vorgesehen werden. Diese bestehen aus einem für die Sicherung des Böschungsfußes verantwortlichen Teil (Stützkörper) und aus einer flächengreifenden Böschungssicherung. Der Stützkörper sichert die ständig unter Wasser liegenden Teile des Böschungsufers und leitet die Ufersicherung in die Gewässersohle ein. Die Ufersicherung hat die Aufgabe, das Ufer gegen die Reibungsund Druckkräfte des strömenden Wassers sowie gegen die Angriffe durch Wellen, Geschiebe, Treibgut und Eis zu schützen. Ingenieurbiologische Maßnahmen werden überwiegend in der Röhricht- und Weichholzzone vorgenommen (vgl. Kap. 3.3).

In diesem Kapitel werden die gängigsten Bauweisen naturnaher Ufersicherungen vorgestellt. Unter "Bauweise" ist die Art und Weise der Verwendung von lebenden Baumaterialien in Kombination mit toten Materialien zu verstehen (vgl. Kap. 3.4). Dabei können auch verschiedene Pflanzenarten miteinander kombiniert werden.

Durch Beschreiben der Bauschritte, der Baumaterialien und einer Abschätzung des Arbeitsaufwandes bzw. der zu erwartenden Kosten soll die Anwendung und Wirkungsweise ingenieurbiologischer Bauweisen durchsichtig gemacht werden. Anschließend wird versucht, eine Beurteilung abzugeben, welche Methoden für einen Einsatz an Bundeswasserstraßen geeignet erscheinen.

4.1 Allgemeine Maßnahmen der ingenieurbiologischen Ufersicherung

4.1.1 Faschinenwalze

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Faschinenwalzen, auch Faschinenbündel oder Wippen genannt (vgl. Tab. 6), sind zylindrische Körper, die zur Sicherung des Böschungsfußes bzw. der Uferlinie im Mittelwasserbereich eingesetzt werden (vgl. Abb. 38). Sofort nach dem Einbau bieten sie der Böschung Schutz gegen mechanische Einwirkungen. Für den Bau der Faschinenwalzen werden standortgerechte, ausschlagsfähige Weidenruten und -äste verwendet. Daraus entwickelt sich ein Saum aus Buschwerk, der mit zunehmender Durchwurzelung des Untergrundes langfristig die Ufersicherung übernimmt. Bei Überströmung legen sich die jungen, biegsamen Weidenruten leicht um und schützen die Oberfläche vor Erosion. Faschinenwalzen kommen vor allem in Kombination mit flächigen Böschungssicherungen wie z.B. Weiden- oder Fichtenspreitlagen zum Einsatz. Zwischen den Zweigen und Ruten bleiben stets genügend Hohlräume, die einer Vielzahl von Lebewesen Unterschlupf bieten.

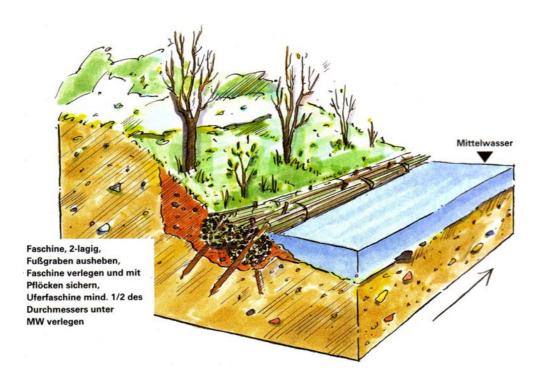


Abbildung 38: Faschinenwalzen (LfU, 1998)

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Faschinen anzuordnen:

- Durch großflächiges Verlegen der Faschinenbündel erhält man eine sogenannte Faschinenmatte.
- Versenkt man die Faschinenmatte und sichert sie mit Steinen und Kies gegen Auftrieb, so spricht man von einem *Sinkstück*. Da sich das Sinkstück fast ausschließlich im Unterwasserbereich befindet, wird es aus unverwitterten, toten Ästen und Ruten von Laub- und Nadelhölzern (Totfaschinen) hergestellt und bietet aufgrund der Verwitterung nur vorübergehenden Schutz (4-5 Jahre).
- Werden verschiedene Wippen quer über die Faschinenmatten gebunden, so entsteht eine kastenartige, räumliche Konstruktion (*Packfaschinat*). Dieser räumliche Körper ist sehr stabil und kann als massives Uferschutzbauwerk vielseitig eingesetzt werden.

Ausführung:

Faschinenwalzen werden aus ca. 3,5 – 4 m langen, daumendicken Weidenruten bzw. Astwerk mit Draht auf der sogenannten *Wippenbank* zu 20 – 40 cm starken Bündeln zusammengebunden. Das obere Drittel der Faschine besteht dabei aus ausschlagsfähigen Weidenruten (lebende Faschine), während im unteren Bereich tote Reisigäste eingelegt werden können. Wird der gesamte Faschinenkörper aus totem Astwerk hergestellt, spricht man von einer *Totfaschine*.

Faschinenwalzen werden im Bereich der Mittelwasserlinie mit dem dickeren Ende

nach oberstrom verlegt. Dabei sind die Walzen so in den Untergrund einzubinden, dass etwa die Hälfte bis maximal zwei Drittel des Durchmessers im Boden bzw. unter Wasser eingebaut ist. Werden Faschinen aneinander gesetzt, müssen diese mit den Enden fest ineinander gestoßen werden und ca. 20 – 25 cm überlappen. Die überlappenden Stöße der einzelnen Bündel sind stets Angriffspunkte für das Wasser. Deshalb ist es günstig, die Faschinen "endlos" zu verarbeiten und einzubauen. Im Abstand von ca. einem Meter werden Pflöcke schräg durch die Faschinen eingeschlagen, um sie mit dem Untergrund zu verkeilen.

Die Walzen werden mit Erdreich bedeckt, so dass sich die Hohlräume zwischen den Ästen verfüllen. Dadurch werden die Faschinen feuchtgehalten und gleichzeitig ihr Eigengewicht vergrößert. Je nach Wasserstand können auch mehrere Faschinenwalzen nebeneinander angeordnet werden.

	Wippen	Faschinenwalzen
Länge Durchmesser Abstand der Drahtbindungen	10 – 20 m 10 – 15 cm 20 cm	4 – 20 m 25 – 40 cm 30 – 60 cm
Pfähle: Länge Dicke Abstand	100 cm 4 – 5 cm 80 cm	100 cm 8 cm 80 cm

Tabelle 6: Maße von Wippen und Faschinenwalzen nach DIN 19657 (1973) *Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen* modifiziert nach SCHLÜTER, 1986

Materialbedarf:

- standortgerechte, ausschlagsfähige, 3 4 jährige Weidenruten Länge: 4 – 6 m Durchmesser: 1 – 2 cm
- Astwerk von Laub- und Nadelhölzern Länge: 4 – 6 m Durchmesser: 1 – 8 cm
- geglühter Eisendraht Durchmesser: 3 mm
- Pflöcke aus Nadelholz oder eingekerbte Dachlatten Länge: ca. 1 m Durchmesser: 4 – 7 cm alternativ in kiesigem Untergrund: Stahlstäbe

• Oberboden aus örtlicher Gewinnung

Zeitaufwand und Kosten:

• Herstellung und Einbau der Faschinenwalze: 50 – 100 DM/lfd.m

Herstellung und Einbau inkl. erforderlicher Erdarbeiten:
 60 min/lfd.m

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Sicherung stark belasteter Uferbereiche in der Wasserwechselzone.

4.1.2 Senkwalze

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Senkwalzen oder Senkfaschinen sind mit Steinen gefüllte Faschinenbündel. Diese Bauweise wird überwiegend zum Schutz der Böschung im Unterwasserbereich sowie zur Sicherung des Böschungsfußes gegen Anbrüche verwendet.

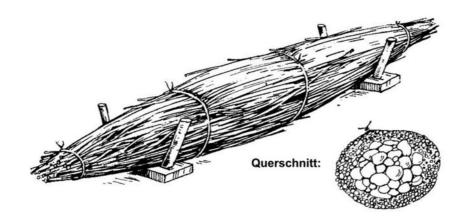


Abbildung 39: Senkwalze (PATT et al., 1998)

Ausführung:

Senkwalzen sind walzenförmige Körper mit 0,6 – 1,2 m Durchmesser und 4 – 6 m Länge. Ihre Herstellung ähnelt der Herstellung von Faschinenwalzen (vgl. Kap. 4.1.1), zusätzlich werden jedoch Reisigäste als 15 – 20 cm dicke Hülle muldenförmig ausgelegt und mit Flusskies oder Schotter bis zur vorgesehenen Größe der Faschine aufgefüllt (vgl. Abb. 39). Weitere Äste und Ruten werden über das Beschwerungsmaterial gelegt, damit die Füllung vollständig von den Gehölzen umhüllt ist. An den Enden wird die

Walze im Abstand von etwa 30 – 50 cm mit Draht zusammengebunden. Durch ihr hohes Eigengewicht müssen Senkwalzen nicht zusätzlich gegen Auftrieb gesichert werden.

Befinden sie sich ständig unter Wasser, können nicht austriebsfähige Zweige und Ruten verwendet werden, da ein Austreiben aufgrund des Sauerstoffmangels nicht möglich ist. Werden sie jedoch in der Wasserwechselzone eingebaut, so verwendet man austriebsfähige Ruten.

Materialbedarf:

Für eine Senkfaschine von 5 m Länge und 60 cm Durchmesser werden ca. 2 m³ Faschinen und 0,5 m³ Füllmaterial benötigt. Als Baumaterial wird verwendet (analog Faschinenwalzen):

• standortgerechte, ausschlagsfähige Weidenruten, falls eine lebende Ausführung angestrebt wird

Länge: 4-6 m Durchmesser: 1-2 cm

- Astwerk von Laub- und Nadelhölzern Länge: 4 – 6 m Durchmesser: 1 – 2 cm
- geglühter Eisendraht Durchmesser: 3 mm
- örtlich vorhandenes Füllmaterial aus Flusskies, Steinen oder Schotter

Zeitaufwand und Kosten:

keine Angaben

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Aufgrund des hohen Eigengewichts geeignet als massive Bauweise zur Sicherung stark belasteter Uferbereiche in der Unterwasser- und Wasserwechselzone.

4.1.3 Rauhbaum

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Rauhbäume sind am Ufer befestigte Nadelbäume, die sofort nach ihrem Einbau vorübergehenden Schutz gegen Uferanrisse geben. Langfristig bieten sie nur dann Schutz, wenn der dahinterliegende Böschungsbereich mit zusätzlichen Maßnahmen wie z.B. mit Steckhölzern oder Bepflanzungen bestückt wird, die später den eigentlichen Uferschutz übernehmen.

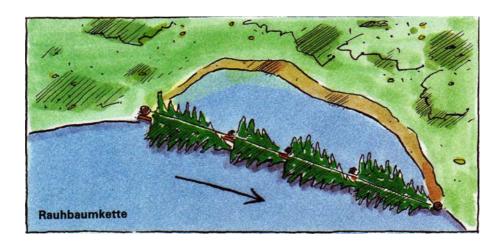


Abbildung 40: Anordnung mehrerer Rauhbäume zu einer Rauhbaumkette (LfU, 1998)

An Bächen und kleineren Flüssen mit hohem Sedimenttransport werden Rauhbäume zur Sicherung von Uferabbrüchen und zur Verlandung von Kolken eingebaut. Dabei wirken sie als Böschungsfußsicherung und übernehmen gleichzeitig die Lenkung des Stromstrichs. An größeren Gewässern kommen sie in der Wasserwechselzone zum Einsatz und werden dort parallel zur Uferlinie vor dem zu schützenden Bereich der Böschung befestigt. Die Hauptströmung fließt also nicht mehr direkt am Uferanriss entlang, sondern wird zur Mitte des Gewässers hin abgelenkt.

Der Vorteil von Nadelhölzern im Vergleich zu Laubbäumen besteht vor allem in ihrem dichten, rauhen Wipfelbereich, der das Ufer optimal gegen die angreifende Strömung sichert. Gleichzeitig werden feste Stoffe aus dem Wasser filtriert, die wiederum durch Sedimentation das Ufer stabilisieren. Die Nadeln und Zweige verwittern im Wasser sehr langsam und bleiben lange Zeit flexibel. Äste und Zweige von Laubbäumen werden schneller starr, brechen dadurch leichter ab und verlieren somit ihre sichernde Wirkung.

Ausführung:

Als Ausgangsmaterial für Rauhbäume werden kleine Fichten oder Tannen verwendet (ca. 4 m lang). Stehen nur große Bäume zur Verfügung, so verwendet man deren Wipfelbereich. Aus praktischen Gründen sollte möglichst ein starker Wurzel- bzw. Astkranz am Stamm belassen bleiben, damit der Rauhbaum mit einem Seil besser befestigt werden kann (angehängter Rauhbaum). Er wird mit der Spitze in Fließrichtung verlegt, der Stamm oder Wurzelstock zeigt dabei nach oberstrom. Links und rechts des Stammes werden jeweils im Abstand von 0,6–1,0 m Pflöcke so eingeschlagen, dass der Rauhbaum fest zwischen den Pfählen eingespannt ist (Rauhbaum mit Pfahlreihen). Ein Stahlseil oder eine Kette wird mehrfach fest um den Wurzel- bzw. Astkranz am Stamm geschlungen und an den Pflöcken verankert. Dabei gibt die Stammachse des Rauhbaumes an Uferanrissen die Richtung der gewünschten Uferlinie vor.

Um längere Uferbereiche zu sichern, können auch mehrere Rauhbäume nacheinander, übereinander oder in Reihe angeordnet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass sie gegenseitig überlappt werden, um eine durchgehende Rauhbaumkette zu bilden (vgl.

Abb. 40). Die einzelnen Bäume sind dann an einem Führungsseil zusätzlich miteinander verbunden.

Bei starker Strömung oder starken Wasserspiegelschwankungen ist es sinnvoll, die Wipfel zusätzlich mit großen Steinen zu beschweren, damit sie in der gewünschten Lage bleiben und beim Überfluten nicht aufschwimmen können.

Die Lebensdauer des Rauhbaums ist durch seine Lage in der Wasserwechselzone zeitlich auf ca. 10-15 Jahre begrenzt. Erst durch Bepflanzung des geschützten Bereichs hinter dem Rauhbaum ist eine dauerhafte Sicherung der Uferlinie gegeben, da sie später nach der Verrotung der Nadeln zusammen mit dem natürlichen Totholz die eigentliche Aufgabe des Uferschutzes übernehmen wird.

Materialbedarf:

- dicht benadelte, möglichst frisch gefällte, astreiche Nadelbäume oder Baumkronen von Fichten oder Tannen
 Länge: je nach Verwendungszweck 3 10 m
- Pfähle aus Nadelholz
 Länge: ca. 1,2 1,5 m
 Durchmesser: 8 12 cm
- Draht-/Stahlseil Durchmesser: 3 – 5 mm

Zeitaufwand und Kosten:

- Gewinnung, Transport und Einbau je nach Ausführung: 20 50 DM/lfd.m (abgehängte Rauhbäume oder Pfahlreihen)
- Verlegen von Rauhbäumen in Pfahlreihen: 60 min/lfd.m

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Die Verwendung von *Rauhbäumen* zum Schutz vor Uferabbrüchen und zur Wiederherstellung der ursprünglichen Uferlinie ist eine Maßnahme, die für einzelne Schadstellen an kleineren Gewässern anwendbar ist. Unter den Belastungsbedingungen an Bundeswasserstraßen und zur Sicherung ganzer Gewässerabschnitte ist die Anordnung von Rauhbäumen uneffektiv und dadurch nicht geeignet.

4.1.4 Weidenwippe

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Diese Kombination aus Buschlagenbau (vgl. Kap. 4.1.8) und Faschinenbau (vgl. Kap. 4.1.1 und 4.1.2) wird für den gesamten Böschungsbereich unterhalb und oberhalb der Mittelwasserlinie eingesetzt. Durch die mehrlagige Anordnung von Faschi-

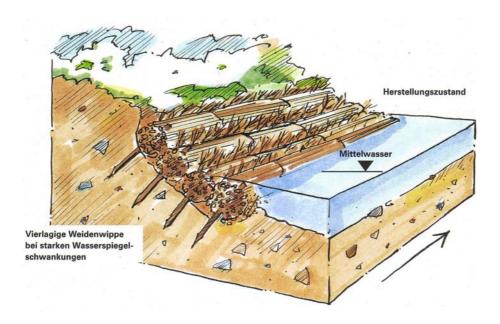


Abbildung 41: Weidenwippe (LfU, 1998)

nenwalzen stellt die *Weidenwippe* einen massiven Böschungsschutz des Unterwasserund Wasserwechselbereichs dar (vgl. Abb. 41). Sie wird sowohl als Fußsicherung als auch zur Böschungssicherung an erosionsgefährdeten Ufern oder an Uferanbrüchen eingesetzt. In welcher Ausführung die Faschinenwalzen zum Einsatz kommen, hängt von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten und Belastungen ab (vgl. dazu Kap. 4.1.1). Weidenwippen sind sofort nach ihrem Einbau eine wirkungsvolle Maßnahme zur Ufersicherung. Durch die Verwendung lebender Faschinenwalzen in Kombination mit Buschlagen wird ein dauerhafter, je nach Anzahl der Walzenlagen durchaus flächiger Schutz der Böschung erreicht. Zusätzlich entwickelt sich ein dichter Weidensaum entlang des Ufers. Hierbei sollte mittelfristig eine Bestandsumwandlung zu einer Mischkultur angestrebt werden.

Ausführung:

Im Unterwasserbereich bzw. zur Böschungsfußsicherung werden aufgrund des höheren Eigengewichts überwiegend Senkwalzen eingesetzt. Im Wasserwechselbereich verwendet man Faschinen aus ausschlagsfähigen Weidenruten. Nachdem eine Lage Faschinenwalzen eingebaut und durch Pflöcke mit dem Untergrund vernagelt ist, wird der Bereich hinter der Faschine mit Erde aufgefüllt und eine Terrasse mit ca. 10° Innenneigung ausgeformt. Darauf wird die Buschlage aus kreuzweise verlegten Weidenästen ausgebildet, übererdet und die nächste Lage Faschinenwalzen leicht nach hinten versetzt eingebettet. Dies wird bis zur erwünschten Anzahl der Faschinen-bzw. Buschlagen weitergeführt (vgl. Abb. 42). Im Unterwasserbereich kann als Buschlagenmaterial auch Totholz verwendet werden.

Bei Über- bzw. Durchströmung der Buschlagen führen kreisförmige Bewegungen der Einzelruten zu Verwirbelungen. Dadurch kommt es zur Energieumwandlung und zu stark reduzierten Fließgeschwindigkeiten. Die in die Böschung eingebauten

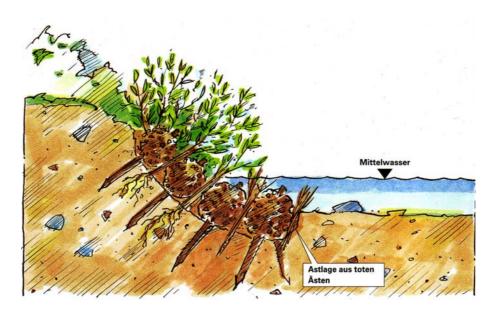


Abbildung 42: Querschnitt Weidenwippe (LfU, 1998)

Faschinenwalzen schützen dabei die Oberfläche vor Erosion. Die Herstellung von Weidenwippen ist sehr arbeitsintensiv und setzt für langfristige, erfolgreiche Wirkung eine exakte Bauausführung voraus.

Materialbedarf:

- bewurzelungsfähige Äste und Zweige von standortgerechten Weiden für Buschlagen
 Länge: mindestens 0,7 – 1,0 m
- totes und lebendes Astwerk von Laub- und Nadelhölzern für Faschinenherstellung
 Länge: 1,5 – 5 m Durchmesser: 1 – 8 cm
- geglühter Eisendraht Durchmesser: 3 mm
- Pflöcke aus Nadelholz
 Länge: 0,6 1,0 m Durchmesser: 4 7 cm
 alternativ in kiesigem Untergrund: Stahlstäbe
 Länge: 0,6 1,0 m Durchmesser: 1,0 1,4 cm
- Verfüllmaterial aus Kies, Geröll und Boden aus örtlicher Gewinnung

Zeitaufwand und Kosten:

• keine Angaben zu Kosten

• 1-lagige Weidenwippe herstellen und einbauen inkl. aller erforderlichen Erdarbeiten:

70 min/lfd.m

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Aufgrund des hohen Eigengewichts geeignet als massive Bauweise zur Sicherung stark belasteter Uferbereiche in der Unterwasser- und Wasserwechselzone.

4.1.5 Steckholzbesatz

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Steckhölzer können an fast allen durchwurzelbaren Gewässerböschungen oberhalb der Mittelwasserlinie zur Böschungssicherung angeordnet werden (vgl. Abb. 43). Dazu verwendet man ausschlagsfähige, unverzweigte Aststücke von Strauch- und Baumweiden. Nachdem mit Hilfe zusätzlicher Maßnahmen (z.B. Spreitlage, Geotextil) die Initialphase überbrückt worden ist, führt ein Steckholzbesatz langfristig zu einem vegetativen Deckwerk auf der Böschungsoberfläche. Ein großer Vorteil dieser Bauweise liegt darin, dass ein Steckholzbesatz auch nachträglich durchgeführt werden kann.

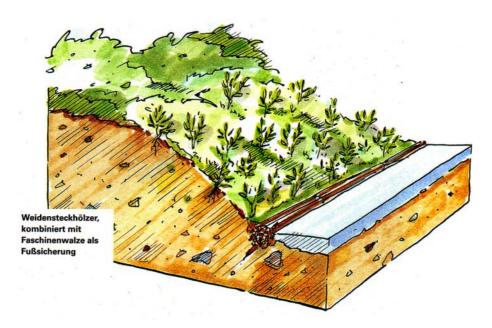


Abbildung 43: Steckholzbesatz (LfU, 1998)

An kleineren Gewässern ist hinsichtlich des Durchflussquerschnitts zu beachten, dass der Abfluss - je nach Wuchshöhe und Ausbreitung der Weiden und verglichen mit einer grasbewachsenen Böschung - um 20 bis 70 % vermindert werden kann und dadurch eventuell ein regelmäßiger Rückschnitt der Weiden notwendig wird. Aufgrund des starken Wachstums der Weiden sollte man auch vorsichtig sein, größere Flächen

rein mit Weidenstecklingen zu bepflanzen, da sich schnell eine Monokultur ausbilden kann. Eine Bestandsumstellung zu Erlen- bzw. Baumweiden ist daher zu empfehlen.

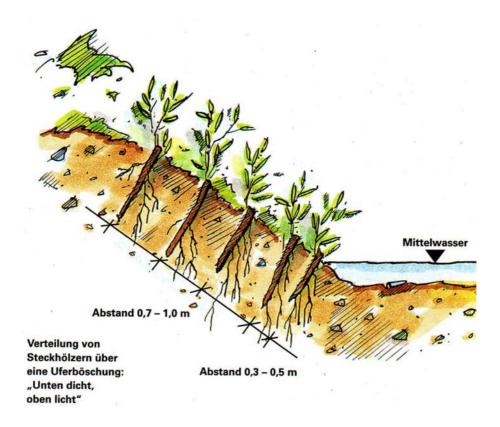


Abbildung 44: Querschnitt Steckholzbesatz (LfU, 1998)

Ausführung:

Die Steckhölzer werden wurzelseitig angespitzt und dann senkrecht zur Böschungsoberfläche eingesteckt bzw. eingeschlagen. In schweren und steinigen Böden müssen die Stecklöcher mit einem Locheisen vorgebohrt werden, um die Rinde beim Einbringen nicht unnötig zu verletzen. Nach dem Setzen muss das Steckholz allseitig fest angetreten und eventuell mit Erde angefüllt werden, um vorhandene Hohlräume zu entfernen. Die Stecklinge werden etwa 10 – 15 cm tief in den Boden gesteckt, so dass auf jeden Fall zwei bis vier Augen (Knospen) sichtbar bleiben. Mehr sollte nicht aus dem Boden herausragen, da das Steckholz sonst austrocknet. Der Abstand zwischen den Stecklingen sollte ungefähr 30 – 50 cm betragen, wobei sich die Pflanzabstände vergrößern, je weiter man sich der Böschungsoberkante nähert (vgl. Abb. 44).

Als Richtwerte dienen: - von Mittelwasserlinie bis Böschungsmitte

ca. 3 – 5 Steckhölzer/m² anordnen

- von Böschungsmitte bis Böschungsoberkante

ca. 1 – 3 Steckhölzer/m² anordnen

Dieser enge Verband ist notwendig, damit eventuelle Ausfälle keine allzu großen Lücken entstehen lassen und eine schnelle Bodendurchwurzelung zu Stande kommen kann. Der Steckholzbesatz wird meist mit anderen Bauweisen kombiniert, da die Stecklinge am Anfang leicht ausgespült werden können. Mit Netzen aus Kunststoff oder Pflanzenfasern (z.B. Hanf, Jute, Kokos) und Matten bzw. Geotextilien (*Geotextilbauweise, Vegetationswalze*) wird die Böschung abgedeckt und so die Oberfläche vor Angriffen geschützt (vgl. Kap. 4.1.15).

Weitere Varianten des Steckholzbesatzes sind die *Spreitlage mit Stecklingen* oder die *Steinschüttung mit Stecklingen*, wobei bei letzterem die Steckhölzer je nach Dicke der Steinschüttung länger sein müssen (0,5 – 1,0 m).

Materialbedarf:

 ausschlagsfähige Stecklinge von standorttypischen Strauch- oder Baumweiden

Länge: 0.4 - 0.6 m Durchmesser: 1 - 5 cm

Zeitaufwand und Kosten:

• Einzelpreis der Weidenstecklinge: 1,50 – 4,00 DM/Stück

• Zurichten und Stecken: ca. 2,5 min/Stück

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Die Maßnahme ist für gefährdete Böschungsbereiche oberhalb der Mittelwasserlinie in Kombination mit Spreitlagen oder Steinschüttungen geignet. Die zusätzliche Anordnung von Steckhölzern und Stecklingen verschiedener Baum- und Straucharten fördert die Durchwurzelung der Böschung. Wird keine Kombination mit anderen Bauweisen angestrebt, muss die Böschungsoberfläche zusätzlich mit einer Böschungsschutzmatte versehen werden, um der Erosion feiner Bodenpartikel entgegenzuwirken. Steckhölzer sind gut geeignet für eine nachträgliche Bestückung erosionsgefährdeter Böschungsbereiche und zur Begrünung bestehender Steindeckwerke.

4.1.6 Weidenspreitlage

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Weidenspreitlagen (vgl. Abb. 45) wirken an Ufern von Fließgewässern als reine Deckbauwerke. Sie sichern die Böschungsoberfläche oberhalb der Mittelwasserlinie und stellen einen sofortigen Schutz für bereits bewachsene und bei sorgfältigem Einbau auch für neu geschüttete Böschungen dar. Der Böschungsfuß muss allerdings in den meisten Fällen zusätzlich geschützt werden (z.B. durch Faschinenwalzen oder Steinwürfe). Die Weiden treiben dicht aus und bewurzeln die Böschung intensiv. In schmalen

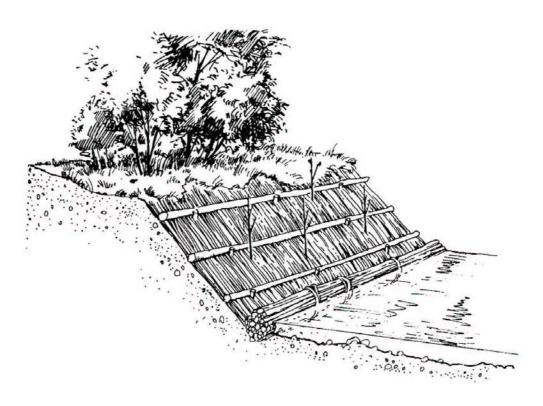


Abbildung 45: Weidenspreitlage (PATT et al., 1998)

Gewässerbereichen sollte die Reduzierung des Durchflussquerschnitts durch den Bewuchs beachtet werden.

Spreitlagen können an steilen Böschungen bis zu einer Uferneigung von etwa 1:1 verwendet werden. Bis die Weidensetzlinge verwurzelt sind und zur Festigung der Böschung beitragen, ist dabei die Standfestigkeit der Erdböschung zu prüfen.

Ausführung:

Zunächst wird die Böschung planiert und noch vorhandene verwurzelte Bodenpartien entfernt. Weiden sind empfindlich gegen Beschattung, deshalb sollte darauf geachtet werden, dass gerade in der Phase, in der die Weidenruten austreiben und Sprosse bilden, wachstumsbehindernde Unkräuter entfernt werden (BEGEMANN et al, 1994). Danach werden mehrere Holzpflöcke im Abstand von etwa einem Meter in zur Fließrichtung parallelen Reihen in den Boden geschlagen, dass sie noch ca. 20 cm herausschauen. Zur Herstellung der Spreitlagen verwendet man dünne, austriebsfähige, etwa 1 – 2,5 m lange Äste und Ruten von Strauchweiden. Dazu eignet sich z.B. die schmalblättrige Korbweide gut, da sie auch bei vollständiger Überströmung sehr flexibel und biegsam bleibt. Die Ruten werden flächendeckend senkrecht zur Fließrichtung und mit den Triebspitzen zur Oberkante zeigend auf der Böschung verlegt, so dass mindestens eine 50%ige Bodendeckung erreicht wird (DIN 18918). Über diesen Belag aus Weidenholz werden Holzstangen oder geglühter Spanndraht gespannt und mit den Pflöcken verbunden. Nach Fertigstellung der Abspannung

müssen die Pfähle so weit nachgeschlagen werden, dass die Ruten weitgehend ohne Hohlräume fest auf den Uferboden gepresst werden. Eine dauerhafte, gleichmäßige Durchwurzelung ist wesentlich davon abhängig, ob das Reisig guten Kontakt mit dem Boden hat oder in der Luft hängt.

Entscheidend für die Wirksamkeit der Maßnahme ist die Ausführung einer Fußsicherung für die Spreitlage. Dazu wird ein "Fußgraben" ausgehoben, der 20 – 30 cm unter die Mittelwasserlinie reicht und in den die unteren, dicken Zweige tief eingebunden werden. In flachen Gewässern müssen die Ruten in die Böschungsfußsicherung (z.B. Faschinenwalze, Steinschüttung) eingebaut werden, damit ein geschlossener Übergang von Böschung zu Sohle gewährt ist.

Ist die Spreitlage soweit gefertigt und gesichert, bedeckt man sie leicht mit Erde. Somit werden die Setzlinge bis zum Verwurzeln feucht gehalten und trocknen nicht gleich aus. Nach einiger Zeit entsteht ein dicht bewachsenes Weidendickicht entlang der Uferböschung, in das hin und wieder Lücken geschlagen werden sollten, damit sich auch andere Gehölzarten entwickeln können. Durch regelmäßiges "Auf-den-Stocksetzen" bildet sich ein dauerhaft elastischer Weidensaum aus. Um eine Bestandsumwandlung anzustreben, empfiehlt es sich, die Weidenspreitlage mit Bepflanzungen anderer Baum- oder Straucharten zu versehen (z.B. Erle).

Materialbedarf:

18918).

 ausschlagsfähige Zweige und Ruten von örtlich vorhandenen Strauch- oder Baumweiden wie z.B. Korbweide, Purpurweide, Bruchweide, Silberweide Länge: 1,5 – 2,5 m Durchmesser: 1 – 5 cm Menge: ungefähr 20 – 30 Stück/lfd.m Sind nicht genügend lebende Ruten vorhanden, können je nach Angriffskraft des Wassers auch totes Zweig- und Astmaterial (50 – 75%) beigemischt werden (DIN

Pflöcke aus Nadelholz
 Länge: 0,8 – 1,2 m Durchmesser: 7 – 9 cm

 Holzstangen aus Nadelholz oder Dachlatten Länge: 2 – 5 m Durchmesser: 4 – 7 cm alternativ Spanndraht bzw. galvanisierter Draht Durchmesser: 3 mm

Zeitaufwand und Kosten:

• Einbau der Spreitlage: 50 – 75 DM/m² (Fußsicherung wird extra abgerechnet)

• Herstellung der Spreitlage inkl. Erdarbeiten: 45 min/m²

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Lebendbauweise zur flächendeckenden Sicherung erosionsgefährdeter Böschungsbereiche oberhalb des Mittelwasserspiegels.

4.1.7 Reisiglage/Fichtenspreitlage

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Ähnlich wie die Weidenspreitlage wird die Reisiglage, auch Fichtenspreitlage genannt, als Böschungs-Flächen-Schutz in der Wasserwechsel- und Überwasserzone verwendet (vgl. Abb. 46). Hierbei erfolgt die flächenhafte Sicherung der Uferböschung allerdings durch eine Spreitlage aus nicht ausschlagsfähigem Material. Hergestellt wird die Spreitlage aus dichten Fichten- oder Tannenzweigen, die möglichst frisch geschnitten wurden und gut benadelt sind.

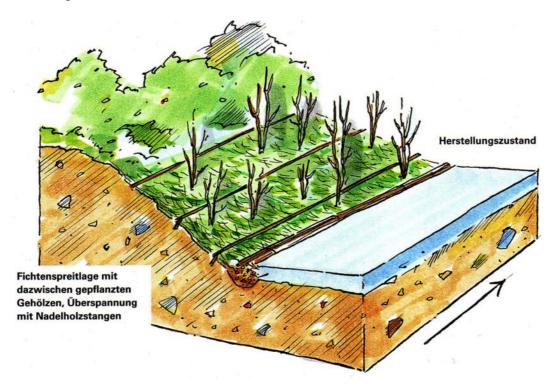


Abbildung 46: Fichtenspreitlage (LfU, 1998)

Das Nadelreisig bietet für ein paar Monate idealen Schutz vor Bodenerosion und fördert gleichzeitig die Anlandung von feinsten Sedimenten. Dadurch entsteht einerseits eine feste, mattenartige Deckschicht aus Reisig und Schwebstofffracht, andererseits ein sehr nährstoffreicher Untergrund zwischen den Zweigen. Eine schnelle, dauerhafte Begrünung durch natürliche Sukzession oder künstlich ausgebrachte Samen bzw. Bepflanzungen ist die Folge.

Beim Verlegen der Zweige ist eine dichte Bedeckung des Bodens sehr wichtig, damit

die Reisiglage auch nach dem Verlust der Nadeln ihre Schutzfunktion erfüllen kann, bis sie nach ca. 3 – 5 Jahren zersetzt ist. In diesem Zeitraum hat die natürliche Vegetation Zeit, sich zu entwickeln und die Böschung zu durchwurzeln.

Ausführung:

Die Böschung wird wie bei der Weidenspreitlage (vgl. Kap 4.1.6) eingeebnet und mit Pflöcken vorbereitet. Das Nadelreisig wird in zwei Lagen eingebaut, wobei die Zweigspitzen der unteren Lage 45° gegen die Fließrichtung zeigen und die obere Lage mit 45° in Fließrichtung verlegt wird, damit die Böschung vollständig bedeckt ist (vgl. Abb. 47). Die einzelnen Äste der oberen Lage werden schindelförmig mit dem Stromstrich verlegt, so dass das Wasser wie über Schuppen fließt und keine Angriffsstelle findet. Die Befestigung der Spreitlage erfolgt wie bei der Weidenspreitlage mit Pflöcken, die in regelmäßigen Abständen zu zwei Dritteln in den Boden geschlagen werden. Mit geglühtem Eisendraht wird das Reisig diagonal verspannt und das Deckwerk durch weiteres Einschlagen der Pfähle fest an den Untergrund gedrückt. Die Verspannung kann auch alternativ mit Fichtenstangen erfolgen. Auf Vorlandflächen und flach geneigten Böschungen können die Lagen auch mit großen Steinen beschwert werden.



Abbildung 47: Detail Fichtenspreitlage (LfU, 1998)

Es ist auch bei dieser Methode darauf zu achten, dass die Reisiglage bis ca. 10 cm unter die Mittelwasserlinie reicht bzw. die Zweige gut in den Fußgraben oder die Böschungsfußsicherung eingebunden sind. Bei einer Kombination der Reisiglage mit Zwischen-Pflanzungen sind zuerst die Pflanzungen durchzuführen, und danach zwischen den Pflanzen die Astlagen anzubringen.

Materialbedarf:

• dicht benadeltes, möglichst frisch geschnittenes Fichten-, Tannen- oder Douglasienreisig als Totholz

Länge: mind. 80 cm Menge: ca. 20 – 30 Stück/lfd.m

• Pflöcke aus Nadelholz

Länge: $0.8 - 1.2 \,\mathrm{m}$ Durchmesser: $7 - 9 \,\mathrm{cm}$

• Spanndraht bzw. geglühter Eisendraht

Durchmesser: 3 mm

alternativ Überspannung mit Stangen aus Nadelholz

• evtl. Ansaat von diversen Kräutern und Gräsern bzw. Initialbepflanzungen

Zeitaufwand und Kosten:

• Gewinnung, Transport und Einbau der Spreitlage: 40 – 60 DM/m² (Fußsicherung wird extra abgerechnet)

• Herstellung der Spreitlage (ohne Fußsicherung):

 $30 \quad \text{min/m}^2$

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Oberflächensicherung erosionsgefährdeter Böschungsbereiche oberhalb des Mittelwasserspiegels. Für dauerhaften Schutz sollte die Reisiglage mit Steckhölzern oder Pflanzungen kombiniert werden.

4.1.8 Buschlagenbau

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Steile Böschungen¹⁷ können mit Hilfe von *Buschlagen* langfristig gesichert werden. Stecklinge von standorttypischen Strauchweidenarten sind dabei geeignetes Material einer Bepflanzung. Sie sind schnellwüchsig und bleiben bei regelmäßigem Rückschnitt jahrelang flexibel und vital.

An Steilufern von Fließgewässern beschränkt sich der reine Buschlagenbau auf den oberen, trockenen Böschungsbereich. Soll die Böschung auch im Bereich der Wasserwechselzone mit Buschlagen geschützt werden, muss sie zusätzlich mit Sofortmaßnahmen des Oberflächenschutzes gesichert werden (z.B. Böschungsschutzmatte, Geotextil). Die erodierende Kraft der Strömung würde den Oberboden sonst ausspülen.

Buschlagen erreichen ihre Wirksamkeit mit zunehmender Durchwurzelung der Böschung. Durch diese "Armierung" erhöhen sie deren Standfestigkeit. Sie sind

¹⁷Neigung größer als 1:1,5

als Pioniervegetation zu sehen, die mit der Zeit durch tieferwurzelnde Gehölze umgewandelt werden sollte (z.B. Ahorn, Esche, Vogel- bzw. Traubenkirsche).

Ausführung:

Am Böschungsfuß angefangen werden Bermen ca. 50 cm tief mit leichtem Gefälle in den Hang gegraben. Der Abstand der nachfolgenden Bermenlage richtet sich jeweils nach der Standfestigkeit des Bodens oder der Böschungsneigung und liegt bei 2 – 4 m. Auf jede Berme werden 60 – 100 cm lange, austriebsfähige Weidenzweige mit dem dickeren Ende zur Böschung verlegt. Die Zweige werden dabei leicht überkreuzt und sollten ca. 20 cm aus der Böschung herausschauen, damit sie gut austreiben können. Der Aushub der nächsten Berme wird verwendet, um die Buschlage wieder mit Erdreich zuzuschütten (vgl. Abb. 48). Fortschreitend von unten nach oben entstehen somit Buschlagen, die im Laufe der Verwurzelung ihre volle Wirkung erreichen.

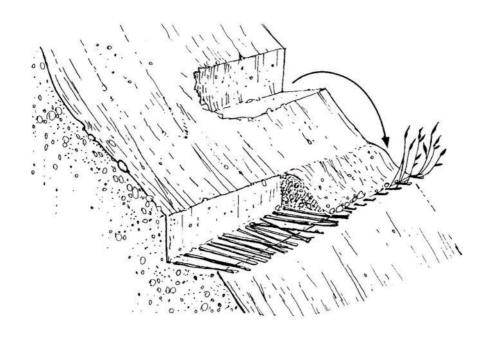


Abbildung 48: Buschlagenbau (Patt et al., 1998)

Sind sehr trockene Bodenverhältnisse vorhanden, so sollten die Bermen in Längsrichtung horizontal, d.h. ohne Längsgefälle ausgebildet werden. Einsickerndes Wasser kann dadurch gehalten und genutzt werden. In Nähe der Wasserwechselzone oder in durchfeuchteten Böschungsbereichen werden die Bermen mit einem Längsgefälle von 2 – 4% gegen die Fließrichtung des Gewässers versehen, damit die Bermen entwässern können und sich keine Wasserstellen bilden, die zu eventuellen Rutschungen entlang der Innenkante führen. Eine Längsneigung in Fließrichtung sollte vermieden werden, da das Wasser die Auffüllung leicht ausspülen könnte.

Materialbedarf:

• ausschlagsfähige Zweige und Ruten von standorttypischen Strauchweiden Länge: 60 – 100 cm Durchmesser: 1 – 5 cm

Zeitaufwand und Kosten:

keine Angaben

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Steile Uferböschungen - auch rollige Böden - werden im Überwasserbereich durch intensive Durchwurzelung gesichert.

4.1.9 Packwerk

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Ast- und Zweigpackungen werden in vielen Varianten ausgeführt und sind vor allem als *Rauhpackung*, *Rauhwehr* und *Buschmatratze* bekannt. Sie haben alle gemeinsam, dass eine oder mehrere Schichten lebender und toter Weidenäste und -zweige zur Beseitigung von Uferabbrüchen oder Kolken verwendet werden (vgl. Abb. 49). Packungen stellen sehr stabile Lebendbauweisen dar, die nicht nur einen sofortigen, guten Uferschutz gewährleisten, sondern auch im Verlauf der Entwicklung der Pflanzen ein neues, widerstandsfähiges Ufer schaffen. Sie können daher an stehenden, langsam und schnell fließenden Gewässern zur Böschungssicherung eingesetzt werden. In Verbindung mit Steinwürfen sind sie je nach Ausführung auch an Unterwasserböschungen geeignet. Die Wahl der Ausführungsvariante hängt vor allem von der Art der Schadstelle, den Strömungs- und Wasserstandsverhältnissen und der vorgesehenen Böschungsneigung ab.

Ausführung:

Unterhalb der Mittelwasserlinie muss zunächst eine Fußsicherung ausgeführt werden. Geläufige Methoden dazu sind Steinschüttungen oder Rauhbäume auf quer zur Fließrichtung verlegtem Astwerk. Das lose Erdmaterial des Uferabbruchs wird vorrübergehend ausgehoben, seitlich gelagert und später zum Auffüllen der Packlage wieder eingebaut.

Ist die Fußsicherung des Packwerks gefertigt, wird die Abbruchfläche mit dem Abräummaterial ca. 30 – 50 cm aufgeschüttet und die Fußsicherung so angefüllt, dass eine Terrasse mit etwa 10° Innenneigung entsteht. Auf diese Bodenschicht wird totes und lebendes Astwerk senkrecht zur Strömungsrichtung mit den Zweigspitzen zum Gewässer verlegt. Weitere Äste und Zweige werden leicht verschränkt, aber weiterhin

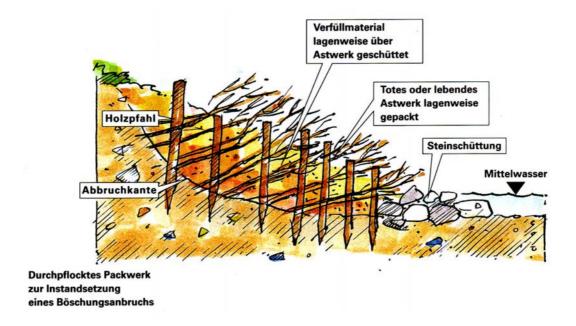


Abbildung 49: Querschnitt Packwerk (LfU, 1998)

quer zur Fließrichtung darüber gepackt, bis diese unterste Lage aus Gehölz ca. 10 – 20 cm stark ist. Die Astlagen sollten 30 – 50 cm zum Gewässer ragen. Die Hohlräume zwischen den Zweigen werden mit Bodenmaterial gut ausgefüllt und zusätzlich mit einer 30 – 50 cm dicken Lage bedeckt. Auf eine sorgfältige Verfüllung ist zu achten, um spätere Setzungen im Bauwerk zu vermeiden. Es können zum Beschweren der Astschichten auch Steine miteingebaut werden. Somit entsteht die zweite Terrasse, deren Oberfläche wiederum leicht geneigt zum Ufer eingeebnet werden sollte.

Abwechselnd werden auf diese Art und Weise Ast- und Erdlagen eingebaut, bis die Packung ihre fertige Böschungshöhe erreicht hat. Im 1-m-Raster fixiert man abschließend den Baukörper mit eingeschlagenen Holzpfählen. Zusätzlich kann das fertiggestellte Packwerk mit kräftigen, austriebsfähigen Weidenstecklingen (ca. 3 – 5 St./m²) bestückt werden, die bis in den Untergrund eingesteckt werden (vgl. Kap. 4.1.5). Die Wurzeln der Stecklinge "vernageln" den Baukörper dauerhaft, und nach außen entsteht dichtes Weidengebüsch, das weitere Sedimente ausfiltert.

An stark angeströmten Böschungen oder Prallufern sollte die oberste Lage kreuzweise mit Spanndraht abgespannt werden. Bei der Herstellung des Packwerks ist darauf zu achten, dass das Bauwerk mit der gleichen wasserseitigen Neigung hergestellt wird, wie sie das angrenzende Ufer aufweist, um einen hydraulisch günstigen Übergang zu erreichen.

Es gibt einige Ausführungsvarianten von Packlagen, die sich überwiegend durch die Anordnung der Astlagen unterscheiden:

- Die Äste werden unregelmäßig, ohne bestimmte Richtung aufeinander gepackt (*Rauhpackung*).
- Alle Äste werden waagerecht, mit den Spitzen zum Flussbett liegend, senkrecht zur Uferlinie gepackt (*waagerechte Astpackung in eine Richtung*).

- Waagerechte, senkrecht zur Uferlinie verlegte Astpackungen werden lagenweise mit Erdfüllung und quer gepackten zwischenliegenden Faschinenwalzen kombiniert (waagerechte Astpackung mit zwischengelagerten Faschinen).

Materialbedarf:

- austriebsfähige Äste von örtlich vorhandenen Strauchweidenarten Länge: mind. 1,5 m Durchmesser: 5 10 cm
- unverwitterte, tote Zweige und Astwerk von Laub- und Nadelhölzern Ihre Länge entspricht dem Abstand von Abbruchkante bis zur Vorderkante der neuen Böschung, mindestens aber 1,5 m, zuzüglich 30 50 cm Überhang.
- Holzpfähle aus Nadelholz
 Länge: 1,5 3,0 m Durchmesser: 9 18 cm (je nach Packwerkhöhe)
- evtl. Spanndraht oder geglühter Eisendraht als Abspannung Durchmesser: 3 mm
- Rauhbaum oder Steinschüttung als Fußsicherung
- Verfüllmaterial aus örtlichen Kiesen, Geröllen und gröberen Blöcken mit genügend Feinanteilen

Zeitaufwand und Kosten:

- keine Angaben zu Kosten
- Herstellung von Packwerk mit 1,0 m Höhe und 1,5 m Tiefe: 200 min/lfd.m

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

In Gewässern mit starkem Gezeiteneinfluss und im Mündungsbereich zur See kommen in den meist breiten, sehr flach ausgebildeten Gewässerrandbereichen (1:7 bis 1:10) aufgrund hoher Wasserspiegelschwankungen und der damit verbundenen starken Oberflächenerosion vorgelagerte *Buschbau*- und *Packwerke* als Uferschutzmaßnahmen zum Einsatz. Diese Bauwerke können auch in schmalen Gewässerabschnitten zur Wiederherstellung der Uferlinie bzw. zum Kolkschutz verwendet werden.

4.1.10 Gitterbuschbauwerk

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Der Gitterbuschbau (vgl. Abb. 50) ist eine alte Bauweise aus dem Wildbachverbau, um Uferanbrüche und Kolke auszugleichen und gehört zu der Familie der Ast- und Zweigpackungen. An schnell fließenden Gewässern mit starken Wasserspiegelschwankun-



Abbildung 50: Querschnitt Gitterbuschbauwerk (LfU, 1998)

gen und Geschiebetransport dient diese Bauweise der Wiederherstellung der Uferlinie (Lenkung des Stromstrichs) und der Verlandung angerissener Uferbereiche. Das Gitterbuschbauwerk ist aufgrund seines lagenweisen Aufbaus aus Buschwerk und steinigem Erdmaterial ein sehr stabiles Bauwerk, das sofort nach dem Einbau voll wirksam ist. Wird eine langfristige Schutzwirkung angestrebt, so sollten neben der Verwendung von Weidenästen auch Pflanzungen mit anderen Baum- oder Straucharten in Betracht gezogen werden.

Der Gitterbuschbau ist sehr arbeitsintensiv und verbraucht viel Material, deshalb wird bei großflächigen Uferbereichen nicht der gesamte Anbruch durch Gitterbuschbau verbaut. In der Regel reicht es aus, den stromaufwärts gelegenen Anfang des Uferabbruches mit Gitterbuschbauwerk zu schützen, um die Anlandung von Sedimenten einzuleiten. Stromabwärts können dann andere Methoden zum Einsatz kommen (z.B. Rauhbäume, Buschbautraversen etc.).

Ausführung:

Entlang der geplanten Uferlinie werden Holzpfähle (Piloten) im Abstand von ca. 1 – 2 m standfest eingeschlagen. Danach werden auch auf der durch die Piloten und das Abbruchufer gebildeten Fläche bis zur Abbruchkante rasterartig Pfähle im gleichen Abstand eingeschlagen. Zwischen den Holzpfählen werden über die gesamte Abbruchfläche mehrere Lagen Astwerk eingelegt. Die unterste Lage wird immer quer zur Fließrichtung verlegt (vgl. Abb. 51). Bei tieferen Auskolkungen können kleinere Bäume, Stämme und weiteres grobes, totes Astmaterial eingebaut werden, bis die Astlage ungefähr 10 – 20 cm Höhe erreicht hat. In jeder Querlage müssen die Astenden zum Ufer weisen und die Spitzen etwa 50 cm über die Pfahlreihe ins Gewässer hinaus ragen. Auf diese Astschicht (unterste Lage) wird steiniges Erdmaterial aufgeschüttet,

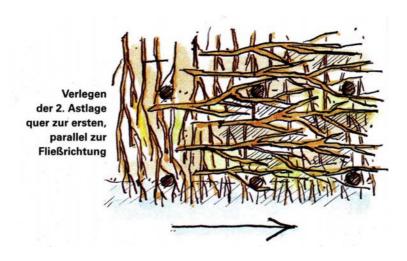


Abbildung 51: Detailansicht Gitterbuschbauwerk (LfU, 1998)

bis die Hohlräume zwischen den Ästen und Zweigen genügend verfüllt sind. Die nächste Astlage (zweite Lage) wird quer zur ersten Lage, also parallel zur Fließrichtung verlegt. Hierbei müssen die Astspitzen nach unterstrom zeigen. Auch diese Schicht wird wieder 10 – 20 cm hoch gepackt und anschließend mit Erdreich verfüllt. Mit wachsender Schichtung sollte zunehmend lebendes, ausschlagsfähiges Astmaterial verwendet werden.

Dieser lagenweise überkreuzte Aufbau aus Buschwerk und Füllmaterial wird bis zur Mittelwasserlinie weitergeführt. Die oberste Lage wird in Fließrichtung verlegt und anschließend mit gebietstypischem Erdreich bzw. Steinblöcken überdeckt und beschwert. Alternativ kann der Gitterbuschkörper auch mit Draht abgespannt werden. Er sollte nach seiner Fertigstellung eine Höhe von ca. 0,5 – 1,0 m aufweisen. Das Überkreuzen der einzelnen Astlagen wirkt wie ein Gittergerüst, das durch die Erdfüllung zu einem homogenen, massiven Baukörper stabilisiert wird. Auch hier wird das fertiggestellte Gitterbuschwerk mit ausschlagsfähigen Weidenstecklingen bestückt (vgl. Kap. 4.1.9).

Materialbedarf:

- austriebsfähige Äste von örtlich vorhandenen Strauchweidenarten Länge: 1,5 – 4,0 m
- Unverwitterte, tote Zweige und Astwerk von Laub- und Nadelhölzern, die überwiegend als Querlage gegen die Strömungsrichtung eingebaut werden. Ihre Länge entspricht dem Abstand von Abbruchkante bis zur Pilotreihe, mindestens aber 1,5 m, zuzüglich 50 cm Überhang.
- evtl. Spanndraht oder geglühter Eisendraht als Abspannung Durchmesser: 3 mm

• Verfüllmaterial aus örtlichem steinigen Erdreich und Steinen

Zeitaufwand und Kosten:

- keine Angaben zu Kosten
- Gewinnung, Materiallieferung und Herstellung von Gitterbuschbauwerk mit Aufbaustärke 50 cm:

 $30 - 60 \, \text{min/m}^2$

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

vgl. Packwerk

4.1.11 Holz-Krainerwand

Zu den Krainerwänden zählen die *Holz-Krainerwand* (vgl. Abb. 52), auch *Holz-grünschwelle* genannt, und die *Beton-Krainerwand*. Auf die Beton-Krainerwand wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen.

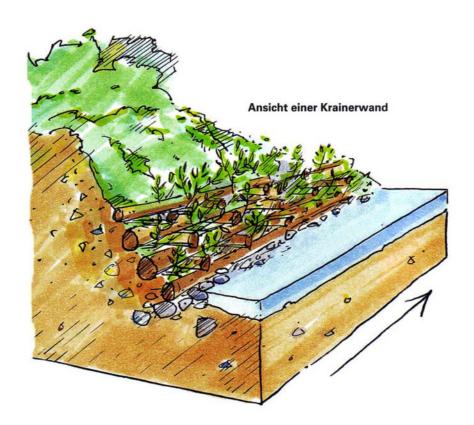


Abbildung 52: Holz-Krainerwand (LfU, 1998)

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Holz-Krainerwände sind aufwendige, massive Holzkonstruktionen, die mit Pflanzen begrünt sind. Sie werden überwiegend zur Abstützung von bis ins Wasser reichenden, rutschungsgefährdeten Böschungen oder Steilhängen verwendet und dienen als tragende Konstruktionen für gewässerbegleitende Wege entlang des Unterhaltungsstreifens. Außerdem werden sie eingesetzt, um Schadstellen wie Uferabbrüche auszugleichen und Prallufer zu stabilisieren. Die Krainerwand ist bei sorgfältiger Ausführung eine langlebige, stabile Bauweise. Kräftige Rundhölzer¹⁸ übernehmen sofortige statische Funktion zur Aufnahme des Erddrucks und leiten diese Kräfte über kraftschlüssige Verbindungen untereinander in den Boden ab. Durch den Holzverband sind die in den Nischen eingebrachten Bepflanzungen in der Anwuchsphase gut geschützt und übernehmen mit fortschreitender Durchwurzelung der Böschung langfristig die tragende Funktion des alternden Holzes.

Bei Verwendung von Fichte und Tanne geht man von 8 - 10 Lebensjahren der statischen Holzkonstruktion aus. Soll sie ihre tragende Funktion länger behalten, so empfiehlt sich, gut verkernte Blockhölzer von Douglasie, Lärche oder Kiefer zu verwenden (Haltbarkeit 15 – 25 Jahre).

Ausführung:

Diese Bauweise besteht aus geschälten Rundhölzern (Blockhölzer), die als Verbund aus Längshölzern ("Läufern") und in der Böschung rückverankerten Querhölzern ("Bindern") Verwendung finden (vgl. Abb. 53). Krainerwände können ein- oder doppelwandig hergestellt werden. Dabei ist immer darauf zu achten, dass sie gegenüber der Lotrechten mit $10-15^\circ$ Neigung nach hinten gebaut werden (Innenneigung). Ein Unterbau ist in der Regel bei den Holzkrainerwänden nicht erforderlich. Der Arbeitsbereich sollte für den Einbau der ersten Lage vorübergehend durch einen wasserseitigen Damm oder Ähnliches trockengelegt werden.

Ungefähr 30 – 50 cm unter Mittelwasserniveau wird ein Planum mit $10 – 15^{\circ}$ Neigung vom Gewässer weg errichtet. Auf diese Auflagefläche wird die erste Längsholzlage in etwa 1,0 – 1,5 m Entfernung parallel zur Uferböschung ausgelegt. Je nach Stützweite werden einzelne Läufer aneinander gesetzt und mit Balkenverbindern¹⁹ scherfest verbunden ("verblatten").

Quer zu dieser Längsholzlage werden angespitzte Binder im Abstand von 1 – 2m ebenfalls unter 10 – 15° Innenneigung senkrecht zum Böschungsverlauf im gewachsenen Hang verankert. Der Binder sollte mindestens zur Hälfte in den gewachsenen Boden der Böschung eingetrieben werden, dann wirkt er wie ein Zuganker und leitet die Kraft in den Boden ab. Der Kraftschluss zwischen Binder und Läufer wird durch Nägel hergestellt. Horizontale Kräfte können so das Blockholz nicht mehr aus seiner Lage drücken. Die unterste Holzlage wird durch wasserseitig leicht schräg eingeschlagene Pflöcke gegen Gleiten gesichert. Ihr Anzahl richtet sich nach der Größe der er-

 $^{^{18}\}mbox{Der}$ statische Nachweis der tragenden Elemente ist im Vorfeld zu erbringen.

¹⁹Spezialdübel in Form von Stahlplatten, die auf jeder Seite mit einem Stahlzapfenkranz versehen sind. Verbindungen dieser Form sind sowohl auf Zug als auch auf horizontale Biegung belastbar.

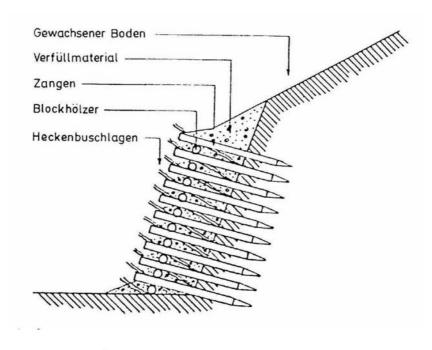


Abbildung 53: Aufbau der Holz-Krainerwand (BEGEMANN et al., 1994)

warteten treibenden Kräfte. Zusätzlich kann ein Steinwurf am Fuße der Krainerwand gegen Unter- und Ausspülung nützlich sein.

Die zweite Längsholzlage ist einen halben bis ganzen Stammdurchmesser nach innen versetzt auszulegen und in die zuvor ausgeblatteten Querhölzer einzupassen. Auch diese Lagen werden miteinander vernagelt. Nach diesem Schema werden nach und nach weitere Lagen Binder und Läufer eingebaut, bis die gewünschte Höhe erreicht ist. Der Hohlraum zwischen Krainerwand und vorhandener Böschung wird lagenweise mit Aushub oder örtlich gewonnenem Erdreich verfüllt. Im Bereich bis zum Mittelwasser können alternativ dazu auch Kies- und Steinschüttungen verwendet werden. In die Nischen zwischen den einzelnen Längsholzlagen werden während des Verfüllens Buschlagen eingebaut. Unter der Mittelwasserlinie kann dabei totes Astwerk verwendet werden, oberhalb steckt man bewurzelungsfähige Ruten oder Zweige von Strauchweiden in die Zwischenräume. Die Stecklinge sollten mit ca. 30 – 40° Innenneigung dicht an dicht zu ungefähr zwei Dritteln ihrer Länge eingebunden werden und ca. 30 – 50 cm über die Außenseite der Krainerwand stehen. Sobald die eingesteckten Pflanzen das Füllmaterial voll durchwurzelt haben, entsteht ein massiver Verbund aus Holzgerüst und Verklammerung, der in seiner Wirkung einer Stützmauer nahe kommt.

Materialbedarf:

• bewurzelungsfähige, lebende Äste von Strauchweidenarten mit allen Seitenzweigen

Länge: 1,0 – 1,5 m

• unverwitterte, tote Zweige und Astwerk von Laub- und Nadelhölzern Länge: $1,0-1,5\,\mathrm{m}$

 Rundhölzer ohne Rinde von Fichte, Tanne, Douglasie, Lärche oder Kiefer als Längshölzer

Länge: 4 – 5 m Durchmesser: 12 – 24 cm

 Rundhölzer ohne Rinde von Fichte, Tanne, Douglasie, Lärche oder Kiefer als Querhölzer einseitig angespitzt

Länge: ca. 2,5 m Durchmesser: 12 – 28 cm

- Sparrennägel (260 mm) und Balkenverbinder
- Verfüllmaterial aus örtlichem Erdreich und eventuell Steinschüttung

Zeitaufwand und Kosten:

Gewinnung, Materiallieferung und Herstellung einer Krainerwand aus Nadelrundhölzern (Durchmesser: 12 – 24 cm) mit 5 Läuferlagen, Binderabstand 1,5 – 2,0 m inkl. Herstellen der Buschlage:

– einwandige Ausführung:	300 - 350	DM/lfd.m
 doppelwandige Ausführung: 	450 - 600	DM/lfd.m
Herstellung einer einwandigen Krainerwand:	100 min	/lfd.m Lage

(pro Läuferlage)

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Der Böschungsschutz in Form einer *Krainerwand* stellt eine massive Stützkonstruktion für steile Uferböschungen dar. Sie ist in der Herstellung sehr aufwendig und wird sich als Sicherungsmaßnahme an Gewässern nur dort durchsetzen können, wo es aufgrund beengter Verhältnisse (z.B. innerstädtische Gebiete) stellenweise der Ausbildung einer steilen Böschung bedarf und wenn das Stützbauwerk gleichzeitig eine statische Funktion (z.B. Sicherung von Betriebswegen) übernehmen muss. Für einen großflächigen Einsatz an Bundeswasserstraßen werden Krainerwände als unrentabel eingestuft.

4.1.12 Steinschüttung mit Weidensteckhölzern bzw. Buschlagen

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Diese Bauweise versucht, durch die Kombination der Baumaterialien Stein und Pflanze deren jeweilige Vorteile auszunutzen und somit einen optimalen Schutz zu erreichen. Dabei handelt es sich um eine sehr stabile Bauweise, die abhängig von der Steingröße auch stärksten Belastungen ausreichend Widerstand entgegensetzt und direkt nach der Herstellung einen sehr guten Uferschutz bietet.

Durch die lose, unregelmäßige Steinschüttung und die herausragenden Äste (vgl. Abb.54) besitzt das Deckwerk eine große Rauhigkeit und verhindert die Erosion der



Abbildung 54: Steinschüttung mit Weidensteckhölzern (PATT et al., 1998)

Böschungsoberfläche. Die Stabilität wird durch gute Durchwurzelung der Steinlagen und des Untergrundes weiter erhöht. Der Steckholzbesatz beschränkt sich dabei auf den Bereich der Wasserwechselzone und oberhalb davon, so dass die Sauerstoffversorgung der Pflanzen gewährleistet ist.

Die Steine nehmen die angreifenden Kräfte auf und schützen die Pflanzen vor Herausreißen und Ausschwemmen. Wie bei einer Spreitlage erzeugen die einzelnen Zweige und Äste durch ihre kreisende Bewegung Energieumwandlungen. Diese Wirkung beginnt sofort nach der Bauausführung und verstärkt sich mit der Entwicklung der Pflanzen. Die Strömung wird dadurch erheblich abgebremst. Eine anhaltende Sedimentation in den Fugen der Steine fördert die Ansiedlung verschiedener Vegetationsarten und mit der Zeit eine dauerhafte Begrünung der Uferböschung.

Aus diesen Gründen eignet sich die "lebende Steinschüttung" für den Einsatz an schnell fließenden Gewässern mit starken Wasserspiegelschwankungen, Geschiebetrieb und Eisgang als dauerhafter Schutz für Flach- und Steilufer oder Dammböschungen. Eingebaut wird die Steinschüttung vom Böschungsfuß bis zur Höhe des Mittelwasserspiegels, wobei die Steine lagenweise einzubringen und sofort mit Feinmaterial zu verfüllen sind. Dadurch werden die Fugen zwischen den einzelnen Steinen dicht geschlossen, und aus der eigentlich losen Schüttung entwickelt sich durch gegenseitige Verspannung ein wirksamer Verbund.

Der erforderliche mittlere Steindurchmesser lässt sich für Bundeswasserstraßen nach dem *Merkblatt für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen (MBB)* (BAW, 1999) bemessen. Danach soll die Schüttstärke mindestens das 1,5 – 2,0-fache des mittleren Steindurchmessers betragen (vgl. Kap. 7.2.6).

Ausführung:

Das Steinmaterial ist lagenweise in seiner erforderlichen Größe auf der Böschung aufzubringen und am Böschungsfuß je nach Schichtdicke ca. 20 – 60 cm unter Sohlniveau einzubinden. Bei Verwendung eines breiten Kornmischungsbandes mit etwa 30 %igem Größtkornanteil kann in der Regel auf den Einbau einer Filterschicht verzichtet werden. Zur dauerhaften Sicherung wird das Größtkorn so gewählt, dass es beim Bemessungshochwasser gerade nicht verfrachtet wird. Durch die Verwendung von mit den Jahren verwitternden, nicht frostbeständigen Steinen kann auch ganz bewusst der Verbund von Pflanze und Stein gefördert werden. Langfristig übernimmt dann das Wurzelgeflecht der Pflanzen die Sicherungsfunktion. Einzelne Lagen von sehr grobkörnigen Schüttungen werden zusätzlich mit Feinmaterial verfüllt.

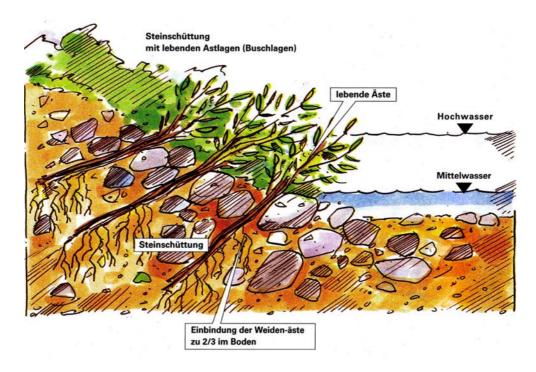


Abbildung 55: Querschnitt der Steinschüttung mit Weidensteckhölzern (LfU, 1998)

Die Anordnung der Pflanzen kann in Form von Steckholzbesatz oder Buschlagen erfolgen. Bevor eine zweite Steinlage geschüttet wird, werden die Steckhölzer vom Bereich leicht unterhalb des Mittelwasserspiegels bis nach oben eingebracht (vgl. Abb. 55). Je nach Stärke der Steinschüttung ist auf eine ausreichende Länge der Steckhölzer zu achten, denn sie müssen mindestens zur Hälfte im Uferboden stehen. Dabei sollte die Längsachse der Hölzer teilweise schräg in Fließrichtung und teilweise schräg gegen die Fließrichtung verlaufen. Die Pflanzen sind gleichmäßig über das Profil zu verteilen (im unteren Bereich mit 3 – 5 St./m² und nach oben etwas dünner mit 1 – 3 St./m²). Alle Steckhölzer sind gut zwischen den Steinen zu verklemmen bzw. mit Steinen seitlich zu befestigen (vgl. Kap. 4.1.5).

Wird die Steinschüttung mit Buschlagen ausgeführt, dann baut man zunächst die Steinschüttung in ihrer kompletten Aufbaustärke vom Böschungsfuß bis zur Mittelwasserlinie fertig ein. Auf Höhe der Mittelwasserlinie wird eine Terrasse angelegt, die ungefähr 30 - 50 cm tief mit 10° Innenneigung in die gewachsene Böschung reicht. Auf diese Terrasse wird eine 10 - 20 cm hohe Buschlage aus Weidenästen gepackt, so dass sie 30 - 50 cm über die Schüttung hervorsteht. Mit dem Aushub wird die Astlage wieder verfüllt und nach oben kann mit der Steinschüttung um 1,0 - 1,5 m fortgefahren werden, ehe die nächste Terrasse bzw. Buschlage angelegt wird (vgl. Kap. 4.1.8).

Materialbedarf:

- lebende Weidenäste mit allen Seitenzweigen von bewurzelungsfähigen Weiden für Buschlage
 - Länge: 1,0 1,5 m
- ausschlagsfähige Stecklinge von standorttypischen Strauch- oder Baumweiden Länge: 0,4 0,6 m Durchmesser: 3 8 cm
- evtl. bewurzelte Erlensetzlinge für Zwischenpflanzungen
- Verfüllmaterial aus sandig-kiesigen Substraten, humusarmem oder schwach humosem Boden (Humusgehalt unter 2%)

Zeitaufwand und Kosten:

Die Kosten bzw. der Arbeitsaufwand für die Baumaßnahme sind je nach Planungsgrundlagen und örtlichen Verhältnissen für den Einzelfall zu bestimmen und lassen sich nicht verallgemeinern. Folgende Positionen sind dabei zu berücksichtigen:

- Liefern von Steinmaterial, evtl. spezielle Sieblinie erforderlich (Gewinnung, Laden, Transport)
- Liefern von Steckhölzern oder Astwerk für Buschlagen (Gewinnung, Vorbereitung für Einbau, Transport)
- Herstellen der Baumaßnahme (Einbau der Steinschüttung und der Pflanzungen, evtl. Maschinenkosten)

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Bauweise zur Sicherung stark belasteter Uferbereiche in der Wasserwechselzone.

4.1.13 Vegetatives Deckwerk

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Das Vegetative Deckwerk ist eine von der Firma Bestmann in den 90er Jahren entwickelte Bauweise, um einen effektiven Schutz mechanisch stark beanspruchter Ufer unter

weitgehender Berücksichtigung der ökologischen Belange zu gewährleisten. Sie ist als technisch-biologische Bauweise zu sehen, in der die Vorteile des traditionellen Deckwerkbaus mit den biotechnischen Eigenschaften des Baustoffes Pflanze vereint sind. Vegetatives Deckwerk besteht aus großflächigen Einzelelementen von 3 bzw. 6 m Länge und 2 m Breite. Die Schichtdicke variiert zwischen 15 und 20 cm. Das Gerüst bilden Wasserbausteine (kornabgestuftes Gesteinsmaterial der Körnung 5 – 15 cm, d.h. WBSt-Kl. 0, Dichte ca. 2,3 – 4,0 kg/dm³), deren Zwischenräume mit feinkörniger Lava ausgefüllt sind (vgl. Abb. 56). Nach unten wird der Aufbau durch ein Filtervlies und nach oben durch ein Wirrvlies abgeschlossen. Der gesamte Aufbau ist lagestabil in eine Ummantelung aus einem hochfesten, grobmaschigen Netz aus Polyethylen (PE) eingebunden. Somit ergibt sich bei 18 cm Schichtdicke ein Gesamtgewicht ohne Bewuchs von ca. 400 kg/m² (Dichte ca. 3,5 kg/dm³).

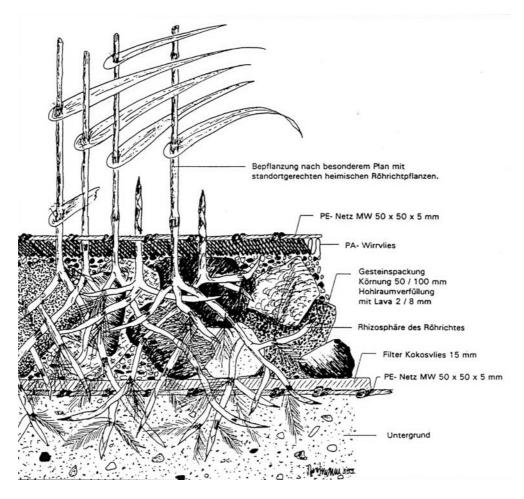


Abbildung 56: Aufbau des Vegetativen Deckwerks System Bestmann (Bestmann GmbH, 1994)

Dieser Kornaufbau und die Verfüllung der Hohlräume bieten für Pflanzen gute Möglichkeiten, sich auszubreiten und sich zu entwickeln. Dabei wirkt der Aufbau über seine gesamte Dicke als effektiver Filter gegen das unterliegende Substrat. Das Vegetative Deckwerk wird mit heimischen Pflanzen der Ufer- und Röhrichtzone besetzt (z.B. Schwertlilie, Segge) und über einen Zeitraum von ca. 1 – 2 Vegetationsperioden in einem Aufzuchtbecken herangezogen. Die Artenauswahl erfolgt nach einer Analyse der

Standortbedingungen. Im Laufe der Zeit durchwurzeln die Pflanzen das eigentliche Deckwerk und durchdringen nach der Verlegung mit Wurzeln und Rhizomen die darunter liegende Substratschicht. Dadurch bewirken sie eine intensive Verklammerung und Verankerung mit dem Untergrund. Das Vegetative Deckwerk stellt einen idealen Lebensraum für die Ansiedlung von Pflanzen und Tieren dar.

Eingesetzt wird Vegetatives Deckwerk an Standorten, an denen bisher leichte bis mittelschwere, klassische Deckwerke Verwendung fanden. Dies sind vorrangig Schifffahrtskanäle, tideabhängige Flussufer und erosionsgefährdete Ufer von Talsperren (Bestmann GmbH, 1994). Auch in innerstädtischen Gebieten hat das Deckwerk viele Vorteile gegenüber herkömmlichen Varianten.

Um hinsichtlich der Belastungskriterien Strömung, Absunk und Wellenhöhe die gleiche Stabilität wie bei einer losen Steinschüttung zu erreichen, wird nur etwa ein Drittel der Deckwerksstärke benötigt²⁰. Die geringere Dicke wirkt sich auf den Erdabtrag der zu befestigenden Böschung aus, d.h., es sind weniger Massen zu transportieren. Während traditionelle Ausführungen als Schwergewichtsbauwerke den hydraulischen Belastungen widerstehen, basiert der Belastungswiderstand des Vegetativen Deckwerks auf dem Zusammenhalt des Verbundkörpers.

Ausführung:

Die vorgezüchteten Vegetationsmatten werden zweckmäßigerweise meist über den Wasserweg zur Einbaustelle transportiert und mit einem Hebegerät und untergehängter Rahmentraverse auf der vorbereiteten, fein planierten Böschung ausgelegt. Die Standsicherheit der Böschung aus bodenmechanischer Sicht muss dabei vorausgesetzt werden. Die Böschungsneigung sollte nicht größer als 1:3 sein.

Die untere und obere Kante des Vegetativen Deckwerks wird jeweils in die Böschung eingebunden und das gesamte Element durch eingeschlagene Holzpflöcke fixiert. Seitens des Herstellers wird empfohlen, das Deckwerk oberhalb der Wasserwechselzone bis zur vollständigen Anwurzelung zu bewässern. Die großformatigen Elemente gestatten einen zügigen Arbeitsablauf mit geringer manueller Tätigkeit. Unter die Längsund Querstöße können eventuell Filtermatten gelegt werden. Innerhalb kurzer Zeit verwachsen die Pflanzen der jeweils angrenzenden Deckwerksmatten untereinander und verbinden somit die Einzelelemente zu einer homogenen, durchwurzelten Matratze, die sich auch mit der benachbarten Vegetation durchmischt und mittelfristig ins Landschaftsbild integriert wird.

Zusammensetzung des Vegetativen Deckwerks:

- PE-Netz (Durchmesser 5 mm) mit Maschenweite 50 × 50 als Hülle
- PA-Wirrvlies (oben)

²⁰Vergleich zwischen Vegetativem Deckwerk aus Metallhüttenschlacke und Lava (3,46 kg/dm³) mit Steinschüttung aus Basalt (2,8 kg/dm³) unter Berücksichtigung der Trockenrohdichte und des Hohlraums

- Filter-Kokosvlies (unten)
- Bepflanzung mit heimischen, standortgerechten Röhrichtpflanzen:

- Schilf (Phragmites communis)

– Sumpfschwertlilie (Iris pseudacorus)

Kalmus (Acorus calamus)Sumpfsegge (Carex acutiformis)

- Schlanksegge (Carex gracilis)

Rohrglanzglas (Phalaris arundinacea)
 Rohrschwingel (Festuca arundinacea)
 Waldsimse (Scirpus sylvaticus)

 Metallhüttenschlacke als mineralischer Kern (Wasserbausteinklasse 0, Durchmesser: 5 – 15 cm)

• Lava der Körnung 2 – 8 mm als Hohlraumverfüllung

Zeitaufwand und Kosten:

• keine Angaben

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Technisch-biologische Lösung zur Sicherung stark belasteter Uferbereiche in der Wasserwechselzone von Bundeswasserstraßen. Durch die Ausbildung ausgeprägter Röhrichtbestände wird zusätzlicher Schutz vor Wellen- und Strömungsangriffen erreicht.

4.1.14 Flechtzaun

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

In ruhigen Gewässern mit kleinen Fließgeschwindigkeiten, geringen Geschiebevorgängen und auch geringen Wasserspiegelschwankungen stellt der *Flechtzaun* eine weitere Variante der Böschungssicherung dar, er schützt Uferanbrüche vor weiteren Bodenausschwemmungen. Sein Einsatz beschränkt sich dabei auf den Wasserwechselbereich, das bedeutet bei Gewässern mit niedrigem Wasserstand auf den unteren Böschungsbereich bzw. -fuß. Sind hohe Uferböschungen zu sichern oder stärkere Geschiebevorgänge im Gewässer vorhanden, ist diese Bauart nicht geeignet. Durch seine Konstruktionsweise sichert der Flechtzaun die Böschung gegen Abrutschen, und durch die dicht verflochtenen Ruten wirkt er wie ein engmaschiges Sieb, das das hinterliegende feine Bodenmaterial (z.B. Mutterboden) zurückhält. Gleichzeitig stellt er die frühere

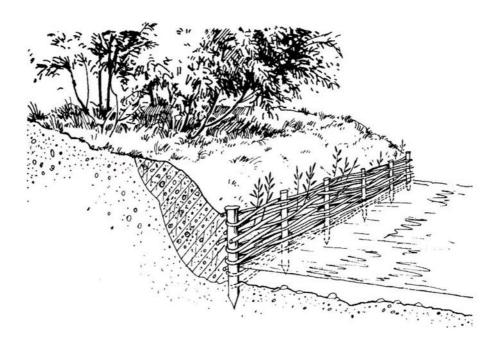


Abbildung 57: Flechtzaun (PATT et al., 1998)

Uferlinie des Abbruches wieder her (vgl. Abb. 57).

Nach dem Ausschlagen und Anwachsen der Weidenruten erhöht sich die Festigkeit und die Wirksamkeit des Zaunes, und es entsteht entlang der Böschung ein Weidensaum, der das Ufer vor weiteren Wassserangriffen schützt. Die Lebensdauer des Geflechts ist allerdings auf 10 – 15 Jahre begrenzt. Deshalb sollte auch der Bereich der Hinterfüllung bepflanzt werden, damit er durch das Wurzelwerk stabilisiert wird.

Ausführung:

Zunächst wird ein ca. 30 cm tiefer Graben ausgehoben, um die unterste Flechtlage gut in den Boden einzubinden. Als Gerüst werden Pflöcke im Abstand von einem Meter ca. 50 cm tief entlang der gewünschten Uferlinie eingeschlagen. Dazwischen, etwa in den Drittelpunkten, werden weitere, schwächere Pflöcke (Spieker) in den Untergrund gerammt, die den entstehenden Zaun zusätzlich stabilisieren. Um den Zaun herzustellen, werden Weidenruten mit dem dickeren Ende in Fließrichtung um die Pflöcke und Spieker geflochten, wobei der Flechtvorgang gegen die Strömungsrichtung läuft. Flechtwerke können als Parallel-, Längs- oder Rautengeflechte ausgeführt werden. Mit Draht fixiert man die geflochtenen Ruten an den Hölzern. Ist der Flechtzaun bis zur gewünschten Höhe fertiggestellt, dann wird er bis zum Mittelwasserniveau mit Erdreich hinterfüllt. Es muss darauf geachtet werden, dass ein enges Weidengeflecht entsteht, da sonst Bodenmaterial durch die Lücken ausgespült wird.

Materialbedarf:

• austriebsfähige, biegsame Ruten von Strauchweidenarten (ungefähr fingerdick) Länge: 1,5 – 3,0 m

Holzpfähle aus Nadelholz
 Länge: 0,6 – 1,0 m Durchmesser: 3 – 10 cm alternativ: lebende Weidenpflöcke

Spieker aus Nadelholz
 Länge: 0,4 – 0,6 m Durchmesser: 1 – 3 cm alternativ: lebende Weidensteckhölzer

• geglühter Eisendraht Durchmesser: 3 mm

• Hinterfüllmaterial aus örtlichem Mutterboden

Zeitaufwand und Kosten:

• keine Angaben

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Flechtzäune sind Sicherungsmaßnahmen, die an Gewässern mit geringen Belastungen anwendbar sind. Für den Einsatz unter den Belastungsbedingungen an Bundeswasserstraßen ist die Anordnung von Flechtzäunen zu instabil und daher nicht geeignet.

4.1.15 Erosionsschutzmatte

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Neu angelegte Böschungen, Auffüllungen oder Oberbodenandeckungen (Rasen-bzw. Kräutersaaten) sind besonders erosionsgefährdet, solange sie ohne schützende Vegetationsdecke sind. Um diese leicht erodierbaren Oberflächen zu sichern, werden *Erosionsschutzmatten (Geotextilien)* eingebaut, die einen sofort wirksamen, mechanischen Oberflächenschutz der Uferbereiche gegen Ausspülen und Abschwemmen der Saat bzw. der Jungpflanzen übernehmen (vgl. Abb. 58).

Herkömmliche Geotextilien, die z.B. als Filter im Deckwerksbau, im Straßenbau oder bei Entwässerungen Anwendung finden, sind für den Einsatz in der ingenieurbiologischen Ufersicherung nicht geeignet. Geotextilien, die im Erosionsschutz verwendet werden, müssen begrünbar und damit durchwuchs- und durchwurzelbar sein. Für naturgemäße Bauweisen kommen daher nur Gewebe aus Naturfasern wie Jute, Kokos, Hanf oder Ramie (Bastfaser) in Frage. Das sind biologisch abbaubare, nachwachsende Rohstoffe, mit denen aus Einzelfasern oder Zwirnen Gewebe und Netze unterschiedlicher Maschenweite hergestellt werden. Naturfasergewebe sind elastisch, was-



Abbildung 58: Erosionsschutzmatte (GERSTGRASER, 2000)

serdurchlässig und verrotten im Laufe der Zeit vollständig. Sie übernehmen den Schutz der Uferböschung, bis die Pflanzendecke sich ausreichend entwickelt hat und durch eine intensive Begrünung und Durchwurzelung (3 – 5 Jahre) diese Sicherungsfunktion selbst übernimmt. Durch ihre Fähigkeit, große Zugkräfte aufnehmen zu können, geben sie der Oberfläche Halt und schützen sie vor Oberflächenrutschungen.

Naturfaser-Geotextilien finden viele Anwendungsmöglichkeiten wie z.B. zur Sicherung von Felsböschungen und Hängen im alpinen Bereich oder an Uferböschungen evtl. in Verbindung mit Begrünungsverfahren (verschiedene Trocken- und Nasssaatverfahren). Dabei ist die Materialauswahl von den vorhandenen Belastungen oder Witterungsbedingungen und den Bodenverhältnissen abhängig, da davon der Netzdurchmesser des Gewebes, die Reißfestigkeit und nicht zuletzt die Lebensdauer der Maßnahme abhängt.

Ausführung:

Das Erosionsschutzgewebe wird auf den vorbereiteten Flächen parallel zur Fließrichtung ausgelegt. Es ist darauf zu achten, dass das Gewebe allen Geländeunebenheiten folgt und flach auf dem Boden aufliegt. Der obere Bereich der Matte wird in die Böschung, der untere Bereich tief unter die Böschungsfußsicherung eingebunden und die gesamte Abdeckung durch eingeschlagene Holzpflöcke fixiert (vgl. Abb. 59). Dabei sind die Pflöcke so anzuordnen, dass das Gewebe möglichst überall vollflächig anliegt. Sind die Matten zum Bepflanzen aufgeschnitten worden, so muss nach dem Setzen der Pflanzen das Gewebe unbedingt wieder verknotet werden.

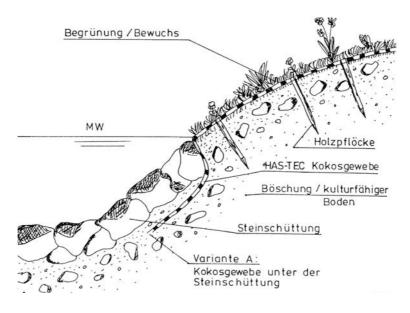


Abbildung 59: Aufbau der Böschungssicherung mit Kokosmatte (IGG, 1997)

Materialbedarf:

• Erosionsschutzmatte aus Naturfasergewebe, unterschiedliche Maschenweite erhältlich (5 – 50 mm)

Lieferform: meist auf Rollen mit $2,0/4,0 \times 50 \,\mathrm{m}$

angespitzte Holzpflöcke

Länge: $30 - 50 \, \text{cm}$ Durchmesser: $4 - 6 \, \text{cm}$

alternativ: Agraffen aus Baustahl, U-förmig, Länge: 22 cm

Zeitaufwand und Kosten:

• Erosionsschutzmatte liefern und verlegen: 12 – 18 DM/m²

• Erosionsschutzmatte verlegen: 10 min/m²

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Erosionsschutzmatten schützen die Böschungsoberfläche vor dem Ausschwemmen feiner Bodenpartikel und sind gerade an Bundeswasserstraßen für neu angelegte, noch unbewachsene Böschungen unverzichtbar, sofern keine andere Oberflächensicherung angeordnet ist.

4.1.16 Röhrichtwalze/Vegetationsfaschine

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Röhrichtwalzen, auch Ufer- bzw. Vegetationsfaschinen genannt, werden an langsam fließenden Gewässern mit geringen Wasserspiegelschwankungen im Bereich der Mittelwasserlinie eingebaut (vgl. Abb. 60). Sie schützen das Ufer und die Pflanzen in der Röhrichtzone gegen Strömung und Wellenschlag. Die Röhrichtwalzen bestehen aus einer steinigen Füllung in den unteren zwei Dritteln und aus Pflanzungen bzw. Pflanzballen standortgerechter Vegetation der Röhrichtzone im oberen Drittel. Das Ganze wird umhüllt von einem Naturfasergewebe und am Einsatzort mit Holzpflöcken befestigt. Die einzelnen Pflanzungen werden dadurch in der Walze zusammengehalten und so vor einem Abtrag geschützt.

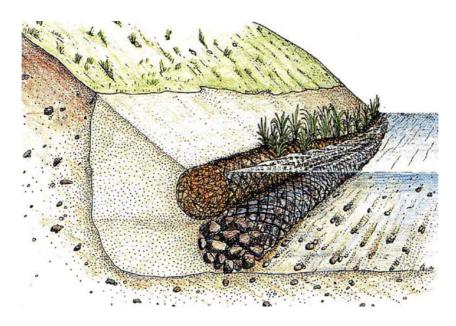


Abbildung 60: Röhrichtwalze (Bestmann GmbH, 1994)

Eine alternative Variante ist die Kokoswalze, die als schlauchförmiges Netz aus Kokoszwirn komplett mit aufbereiteten Kokosfasern gefüllt und zu einer Walze geformt ist. Sie kann als Senkwalze im Unterwasserbereich eingesetzt werden, der obere Rand kann aber auch mit Rhizomen der Ufer- und Röhrichtpflanzen besetzt werden und in der Mittelwasserlinie eingebaut werden. Die Kokoswalze wird von unterschiedlichen Herstellern in verschiedenen Längen und Durchmessern vorgefertigt angeboten. Der Einbau der Röhrichtwalzen bewirkt einen Sofortschutz des Ufers vor Erosion bzw. die Reparatur von Auskolkungen und von unterspülten Verbauungen oder Ufergehölzen.

Ausführung:

Entlang der Uferlinie werden im Abstand von einem Meter Holzpflöcke zur Befestigung der Faschinenwalze geschlagen und uferseitig davon ein Graben ca. 50 cm breit und ca. 40 cm tief ausgehoben. Der Graben wird eventuell mit einer Reisiglage ausgelegt, die mit ihren Spitzen ca. 50 cm senkrecht in die Strömung hineinreicht und durch Energieabbau ein Unterspülen der Walze verhindert.²¹ In diesen vorbereiteten Graben wird das Naturfasergewebe in Längsrichtung eingelegt. Als nächstes wird Auffüllmaterial aus Kies, Schotter oder Geröll eingebracht. Bei der Verwendung einer Reisigunterlage kann auch der Grabenaushub dazu verwendet werden. Das Füllmaterial wird anschließend mit Pflanzballen auf die gewünschte Höhe der Röhrichtwalze gebracht. Zur Ausbildung einer Walze werden die Gewebeseiten nach oben umgeschlagen und straff miteinander verbunden, sodass sich die Walze gut mit Draht oder Zwirn schließen lässt.

Es können auch mehrere Walzen übereinander, hintereinander oder in Kombination mit Kokosgewebe, vergleichbar der Bauart einer Weidenwippe (vgl. Kap. 4.1.4), verlegt werden, um größere Bereiche zu sichern. Nach der Fertigstellung wird die Röhrichtwalze mit Erdreich angefüllt, sodass sie ungefähr noch 5 – 7 cm herausragt, und die Pflöcke werden bis auf Höhe der Walzenoberfläche eingeschlagen.

Materialbedarf:

- Erosionsschutzmatte aus Naturfasergewebe (vgl. Kap. 4.1.15)
- Reisiglage aus Laubholz und evtl. aus ausschlagsfähigen Weiden Länge: 60 – 100 cm Durchmesser: 1 – 5 cm
- Holzpflöcke angespitzt für Pfahlreihe Länge: 0,8 – 1,5 m Durchmesser: 5 – 10 cm
- durchwurzelbares, steiniges Füllmaterial aus Schotter, Kies, Geröll
- Pflanzballen von standorttypischen Pflanzen der Röhrichtzone (vgl. Kap. 4.1.13)

Zeitaufwand und Kosten:

- Herstellen einer Röhrichtwalze (Durchmesser: 40 cm): 90 150 DM/lfd.m (Pflanzenstückzahl wird extra abgerechnet)
- Herstellen einer Röhrichtwalze (Durchmesser: 40 cm): ca. 60 min/lfd.m

²¹Bei Fließgewässern mit einer Fließgeschwindigkeit >0,7 m/s sind alle Walzenbauarten auf quer zur Strömungsrichtung verlegtes Reisig zu betten, um Energieumwandlungen zu bewirken (BEGE-MANN et al., 1994).

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Sind nicht allzugroße Wellen- und Absunkerscheinungen zu erwarten, können Röhrichtwalzen in Kombination mit Sofortschutzmaßnahmen wie Faschinen, Senkwalzen, Weidenwippen oder Steinen zum Schutz der Ufer eingebaut werden. Die Pflanzen übernehmen bereits nach der ersten Vegetationsperiode durch die Ausbildung eines ausgeprägten Röhrichtgürtels eine zusätzliche Funktion der Wellendämpfung und bieten durch die intensive Verwurzelung guten Erosionsschutz in der Wasserwechselzone.

4.1.17 Reisiglahnung

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Lahnungen werden als vorgelagerte Schutzbauwerke der dahinterliegenden Uferbereiche gebaut. Ursprünglich wurden sie zur Landgewinnung entlang der Gewässer eingesetzt. Vereinzelt finden Reisiglahnungen, auch Buschlahnungen genannt, an Binnenwasserstraßen Verwendung, da sie Wellen brechen und eine beruhigte Wasserzone bis zum Uferbereich ausbilden. Hinter den Lahnungen sind Röhrichte wie z.B. Schilf zu finden, die sich selbst angesiedelt haben oder auch angepflanzt wurden. Geschützt vor mechanischen Angriffen finden sie hier gute Lebensbedingungen und stabilisieren die Unterwasserböschung (vgl. Kap. 3.6.3).

Ausführung:

Das Gerüst der Reisiglahnung wird von Pfählen gebildet, die als Doppelpfahlreihe mit einem Pärchenabstand von 40 - 80 cm auf einer vorher festgelegten Linie vor dem Gewässerufer eingerammt werden. Die Pflöcke sind bis auf das Niveau des Mittelwassers einzuschlagen, was auch der Endhöhe der Buschlahnung entspricht. Ihr Abstand in Laufrichtung sollte 50 – 70 cm betragen, und die Einbindetiefe muss statisch berechnet werden. Ist diese Doppelpfahlreihe gesetzt, wird eine Reisiglage quer zum Verlauf der Pfahlreihen auf der Sohle ausgelegt und mit Steinmaterial beschwert (vgl. Abb. 61). Das Reisig sollte mit seinen Spitzen ungefähr 50 cm weit in die Strömung zur Gewässermitte hin zeigen. Diese Reisiglage dient dem Schutz vor Auskolkungen am Fuße des Bauwerks, da es die Strömung mit seinen Ruten abbremst und zu Energieumwandlungen führt. Mit weiteren Reisiglagen, die in Laufrichtung der Lahnung verlegt werden, werden die Doppelpfahlreihen gefüllt. Das Reisig ist in Form von vorgefertigter Faschinen einzubringen bzw. immer wieder lagenweise mit Draht zusammenzubinden. Um die Gehölze gegen Auftrieb zu sichern, werden Steinschüttungen als Zwischenlagen eingebracht. Alternativ kann man die Reisiglagen nach unten hin verpflocken.

Hat das Reisigpackwerk seine erwünschte Höhe erreicht, wird es nach unten gedrückt und mit Draht von einem Pfahl zum gegenüberliegenden Pfahl abgespannt. Dadurch werden gleichzeitig die Pfähle gegenseitig verspannt und die Buschlagen sind an ihrer Einbaustelle fixiert. Ist eine lebende Buschlahnung erwünscht, so verwendet

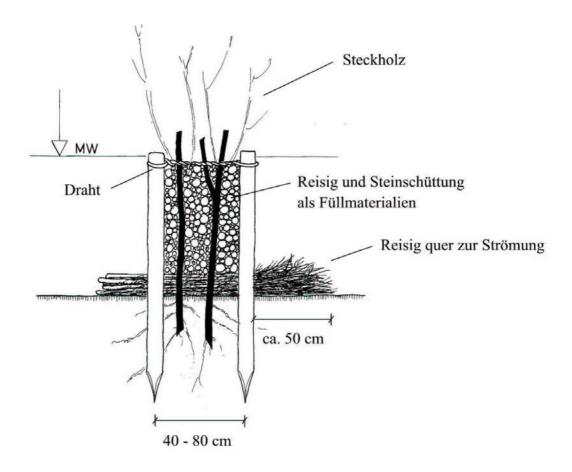


Abbildung 61: Aufbau einer Reisiglahnung mit Steckholzbesatz (SCHIECHTL et al., 1994)

man für die oberen Reisiglagen lebende Weidenruten und bestückt das Reisigpackwerk zusätzlich mit vertikal nach unten eingebrachten Stecklingen. Da die Ruten bis in die Gewässersohle gesteckt werden müssen, ist ein Stecklingsbesatz stark von der vorhandenen Wassertiefe im Bereich der Einbaustelle abhängig.

Durch die zahlreichen Öffnungen der Reisigpackungen im Unterwasserbereich findet ein ständiger Wasseraustausch mit der dahinterliegenden Zone statt. Die Energie der auflaufenden Wellen bzw. der Strömung wird beim Auftreffen auf das Hindernis umgewandelt. Die Reisiglahnung ist eine wirksame, vorgelagerte Schutzbauweise, die eine aus ökologisch-biologischer Sicht sehr wertvolle Stillwasserzone bis zum Ufer ausbildet.

Materialbedarf:

- Reisiglage aus totem Astwerk als Kolkschutz
 Länge: 1 2 m Durchmesser: 1 5 cm
- Packlagen aus Astwerk und Zweigen von Laubhölzern bzw. ausschlagsfähigen Weiden

Länge: $1.5 - 5 \,\mathrm{m}$ Durchmesser: $1 - 5 \,\mathrm{cm}$

- Holzpfähle für Doppel-Pfahlreihe
 Länge: 3 4 m Durchmesser: 10 20 cm
- Pflöcke aus Nadelholz oder eingekerbte Dachlatten Länge: ca. 1 m Durchmesser: 4 – 7 cm
- geglühter Eisendraht Durchmesser: 3 mm
- Steinmaterial aus Schotter, Kies, Geröll sowie Steinblöcke als Füllung

Zeitaufwand und Kosten:

• keine Angaben

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

In Gewässerabschnitten mit langgezogenen, flachen Uferbereichen oder im Tidegebiet schützen vorgelagerte Lahnungen bestehend aus Doppel-Pfahlreihen mit Faschinen (Reisiglahnungen) die Uferbereiche gegen Wellen- und Strömungsangriffe. Diese Bauweise stellt eine effektive Uferschutzmaßnahme an Bundeswasserstraßen dar. Sie fördert gleichzeitig die Verlandung und die Ausbildung einer beruhigten Wasserzone mit Biotopcharakter.

4.1.18 Böschungsrasen

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Der Böschungsrasen kommt als einfache und preiswerte Bauweise zum Schutz von Uferböschungen zum Einsatz (vgl. Abb. 62). Im Gegensatz zu Gehölzentwicklungen entlang der Gewässerufer, die den Durchflussquerschnitt erheblich reduzieren können, beeinflusst Rasen die Abflussmenge nicht und wird daher häufig zur Böschungssicherung verwendet. Besonders an wenig beanspruchten Ufern, die für den Hochwasserabfluss freigehalten werden müssen, oder auf Vorländern, Deichen und Dämmen werden Rasenflächen angelegt. Dabei sollte gerade am Anfang regelmäßig gemäht werden, um das Gras immer kurzzuhalten, damit sich die Wurzeln gut entwickeln können. Die Art und die Zusammensetzung der Gräser und Kräuter, die entlang des Gewässers angesiedelt werden, muss an die Standortverhältnisse angepasst werden.

Häufiges Mähen ist allerdings arbeits- und kostenintensiv. Nachteilig wirkt sich eine reine Rasendecke auch hinsichtlich der Beschattung des Gewässers aus, da durch den Wegfall des Ufergehölzsaums die Sonneneinstrahlung intensiver wird. Dies führt zu einem stärkeren Wachstum der Wasserpflanzen und fördert die Verkrautung des Gewässers. Kleinere Gewässer müssen somit regelmäßig entkrautet werden. Bei stärkeren oder dauerhaften Wasserangriffen sollten andere Sicherungsmaßnahmen



Abbildung 62: Böschungsrasen (LfU, 1995)

in Erwägung gezogen werden, da die Rasendecke nur etwa 10 – 15 cm der oberen Bodenschicht durchwurzelt und leicht zerstört werden kann.

Rasen kann unterschiedlich entwickelt werden. Am verbreitetsten sind Saatverfahren wie z.B. Trockensaat, Mulchsaat, Nasssaat, aber auch Fertigrasen in Form von Rollrasen und Rasensoden werden zum Neuanlegen von Rasenflächen verwendet. Rasenansaaten benötigen, um ihre schützende Wirkung zu entwickeln, 6 bis 12 Monate, während Soden oder Fertigrasen aus einjährigen Beständen mit Hilfe einer guten Fixierung am Untergrund schnell anwachsen und sofort wirken. Nähere Ausführungen zu den verschiedenen Rasensaatverfahren sind Kapitel 3.6.2 zu entnehmen.

Oftmals wird am Böschungsufer oberhalb der Mittelwasserlinie eine Zwischenberme mit einem begrünten Unterhaltungsweg aus Schotterrasen angelegt. Er ist mit Maschinen befahrbar, um die Unterhaltungsbereiche z.B. zum Mähen zu erreichen.

Ausführung:

• Rasenflächen:

Die Böschung wird mit Mutterboden ca. $20 - 30 \, \mathrm{cm}$ angedeckt und eingeebnet. Mit der gewünschten Saatmischung wird die Böschung eingesät, leicht abgewalzt und falls erforderlich nachgesät. Die eingesäte Oberfläche muss eventuell mit einer Erosionsschutzmatte aus Naturfasergewebe abgedeckt und mit Pflöcken befestigt werden (Pflockabstand ca. $1,0-1,5 \, \mathrm{m}$).

• Rasensoden:

Rasensoden werden als Platten fertig angeliefert, auf der planierten Böschung

verlegt und mit Pflöcken befestigt. Auch hier sollte eine Mutterbodenschicht (5 cm stark) aufgebracht werden, um das Anwachsen zu begünstigen.

• Schotterrasen:

Der anstehende Oberboden ist ca. 30 – 40 cm abzutragen und seitlich zu lagern. Danach wird ein Erdplanum für den Weg mit 2% Quergefälle zum Gewässer hergestellt und abgewalzt. Als Unterbau des Weges ist Schotter der Körnung 16/45 mm einzubauen und auf eine Schichtstärke von 15 cm zu verdichten. Aus Schotter der Körnung 8/45 mm und dem Bodenabtrag wird ein Gemisch hergestellt (80% Schotter, 20% Mutterboden), das in einer Stärke von 10 cm als Deckschicht eingebaut wird. Die Schotter-Humus-Fläche wird mit Grasmischung eingesät und mit leichtem Gerät abgewalzt.

Materialbedarf:

- Grasmischung nach DIN 18917 bzw. Saatgutmischungsverordnung
- Grassoden, meist 30×30 cm, Stärke 3 8 cm, abhängig von der Jahreszeit
- Schotter der Körnung 16/45 mm und 8/45 mm
- Mutterboden aus örtlicher Gewinnung
- Naturfasergewebe, Maschenweite < 20 mm
- Pflöcke aus Nadelholz, Astgabeln oder Dachlatten Länge: ca. 30 cm Durchmesser: 3 – 4 cm

Zeitaufwand und Kosten:

•	Herstellen von Böschungsrasen durch Einsaat: (inkl. Abdeckung)	20 – 25	DM/m ²
•	Herstellen von Böschungsrasen aus Rasensoden:	10 – 15	DM/m^2
•	Herstellen von Schotterrasen inkl. Saatgut: (Schottermaterial wird extra abgerechnet)	25	DM/m^2

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Aus Gründen des Hochwasserschutzes ist es oftmals notwendig, Uferböschungen und Dämme frei von Gehölzen zu halten. Die Oberfläche wird dann als Böschungsrasen ausgebildet, wofür verschiedene Gras- und Kräutersaatverfahren benutzt werden.

4.1.19 Röhrichtpflanzungen

Anwendungsbereich und Wirkungsweise:

Die Röhrichtzone ist aufgrund ihrer Vegetation wichtiger Bestandteil der Ufersicherung in der Wasserwechselzone. Ein ausgeprägter Röhrichtgürtel besitzt die Fähigkeit, von der Schifffahrt verursachte Wellen zu brechen und wird daher gerne an schiffbaren Gewässern verwendet. Auch an kleineren, schnell fließenden Wasserläufen dienen Röhrichte dem Schutz vor Erosion, besonders an Prallufern. Es sollte beachtet werden, dass eine flache Böschungsneigung (n > 3) Voraussetzung einer erfolgreichen Ausbildung der Bestände ist.

Ein Röhrichtgürtel setzt sich hauptsächlich aus Schilf, Rohrglanzgras, Wasserschwaden sowie verschiedenen Binsen- und Seggenarten zusammen. Die Entwicklung der Röhrichtpflanzen ist sehr lichtabhängig. Ideale Standorte sind sonnige Bereiche wie z.B. Süd- und Westufer, während eine Beschattung durch Gehölzbestände ihr Wachstum stark herabsetzt.

Der Röhrichtbesatz sollte unterhalb der Mittelwasserlinie angesetzt werden. Durch ihre abdeckende Wirkung schützen die Pflanzen die Böschungsoberfläche, ihre Triebe und Blätter brechen die Energie des Wassers und mindern somit die Strömung und den Wellenschlag. Durch intensive Verwurzelung und Rhizombildung verfestigt sich gleichzeitig der Boden in der Röhrichtzone und wird vor Unterspülungen gesichert. Zusätzlich besitzen Röhrichtpflanzen die Eigenschaft, durch industrielle und häusliche Abwässer verschmutztes Wasser zu reinigen, sie bilden einen hervorragenden Lebensraum für viele Tierarten und verbessern optisch das Landschaftsbild.

Röhricht- und Seggengürtel entwickeln sich schnell und erreichen bereits nach ein bis zwei Vegetationsperioden ihre volle Wirksamkeit. Dabei sind sie gerade in der Anfangsphase sehr empfindlich gegen Ausspülen und sollten durch tote Baumaterialien (z.B. Steinwürfe) geschützt werden.

Ausführung:

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einen Röhrichtgürtel anzusiedeln. Meist werden Pflanzungen in Form von Sprösslingen, Stecklingen, Ballen oder Rhizomen vorgenommen. Dabei sollte man sich zuerst immer an der natürlich vorhandenen Vegetation orientieren und aus diesen die entsprechenden Gesellschaften für einen Besatz verwenden.

• Ballenpflanzung (vgl. Abb. 63):

Die oberirdischen Pflanzenteile aus Röhrichten oder Seggenbeständen werden abgemäht und aus dem Erd-Wurzelballen quadratische oder abgerundete Stücke, Soden bzw. Ballen mit einem Durchmesser und einer Stärke von ca. 30 cm als Pflanzgut gewonnen. Die Wurzelballen werden je nach Anzahl des zur Verfügung stehenden Pflanzgutes dicht an dicht oder in einem Abstand von bis zu 50 cm an der Einbaustelle verpflanzt. Ballen mit frischen Trieben müssen direkt nach ihrer Gewinnung wieder eingebracht werden. Dazu werden am Ufer

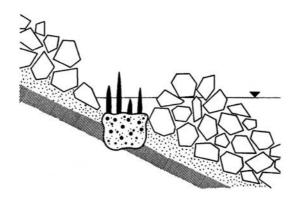


Abbildung 63: Ballenpflanzung (SCHLÜTER, 1986)

Gräben oder einzelne Pflanzlöcher vorbereitet und die Ballen so tief eingesetzt, dass ihre Sprosse gerade herausschauen.

• Rhizompflanzung:

Die Rhizome werden aus vorhandenen Beständen gewonnen. Dazu werden die Röhrichte abgemäht und ihre waagerecht wachsenden Rhizome vom anstehenden Boden getrennt. Diese müssen mindestens aus einem unverletzten Rhizomstück mit zwei Knoten bestehen, da sonst Fäulnis auftreten kann. Die Rhizomstücke werden an der Einbaustelle in 20 – 30 cm tiefe Gräben eingelegt, die anschließend wieder mit Erde verfüllt werden.

• Sprösslingspflanzung:

Analog der Rhizompflanzung werden hierbei junge, senkrecht wachsende Halmsprosse gewonnen und in Abständen von etwa 20 – 50 cm senkrecht oder schräg eingesetzt. Die obere Triebspitze sollte dabei etwas über die Bodenoberfläche ragen.

• Halmpflanzung:

Manche Röhrichtarten (z.B. Schilf) besitzen die Fähigkeit, an ihren Halmknoten Adventivwurzeln (vgl. Kap. 3.5) auszubilden. Diese Eigenschaft macht man sich beim Halmstecklingsbesatz zunutze. Dazu werden junge, kräftige ca. 80 – 120 cm lange Halme dicht unter der Erdoberfläche abgestochen. Es ist darauf zu achten, dass sie mindestens zwei bis drei entfaltete Blätter aufweisen. Mit einem Pflanzeisen werden Halmbündel (3 – 5 Halme) in Reihen bis zur Hälfte ihrer Länge in den Boden gesteckt.

An schiffbaren Gewässern sollten die Halmstecklinge nicht senkrecht sondern schräg zur Böschung eingebracht werden. Dadurch wird die Gefahr eines Abknickens durch Wellenbelastung reduziert und gleichzeitig die Bildung der Adventivwurzeln gefördert.

Alle beschriebenen Pflanzverfahren können an unbefestigten Ufern mit nicht zu großer Strömungsbelastung ausgeführt werden. Sie eignen sich auch zur Kombination mit Steinschüttungen, die den Jungpflanzen gerade in der ersten Vegetationsphase idealen Schutz vor Ausspülung bieten. Dabei sollten die Pflanzstellen leicht mit Steinen abgedeckt werden. Die günstigste Pflanzzeit ist vor dem Austrieb im Frühjahr, nach dem Rückgang der Frühjahrshochwasser, also ungefähr zwischen März und April.

Pflanzenbedarf:

• Ballenbesatz: Seggen- und Binsenarten, Wasserschwaden,

Rohrglanzgras, Schilf, Rohrkolben

• Rhizombesatz: Seggen- und Binsenarten, Wasserschwaden,

Rohrglanzgras, Schilf, Rohrkolben

• Sprößlingsbesatz: vor allem Schilf und Teichbinse

• Halmstecklingsbesatz: Schilf

Zeitaufwand und Kosten:

 Röhrichtpflanzung bei Lieferung der Röhrichtballen aus Anzuchtbetrieben:

50 DM/m²

Eignung für den Einsatz an Bundeswasserstraßen:

Einzelpflanzungen verschiedener Röhrichtarten sind in Kombination mit Steinwürfen eine geeignete Maßnahme zum Uferschutz im Wasserwechselbereich an Bundeswasserstraßen. Die Steine bieten den Pflanzungen in ihrer Anwuchsphase Schutz vor Ausspülung, damit die Röhrichte durch intensive Wurzel- und Rhizombildung das Deckwerk und den Untergrund verklammern können. Röhrichte dämpfen die Wellenangriffe, bewegen sich mit der Strömung und legen sich bei Überströmung mit ihren Blättern schützend über die Böschungsoberfläche.

4.1.20 "Bauweise Null"

Unter dem Begriff "Bauweise Null" wird der vollständige Verzicht auf Sanierungsmaßnahmen an Schadstellen entlang der Gewässerberandung verstanden. Dabei wird das Ziel verfolgt, einer naturnahen Ufergestaltung bzw. der Entfaltung der naturnahen Gewässerdynamik gerecht zu werden.

Seit Mitte der Neunziger Jahre wird diese Bauweise, die eigentlich gar keine ist, verstärkt angewendet, da hinsichtlich der Gewässerunterhaltung neue rechtliche Bestimmungen in Kraft traten (Wassergesetz 1995). Uferbereiche, die nicht unbedingt geschützt werden müssen, da keine wirtschaftlichen Schäden wie z.B. die Gefährdung der Schifffahrt oder eine Hochwassergefahr für angrenzende Gebiete zu erwarten sind, sollen der natürlichen Sukzession überlassen werden. Dies bedeutet, dass kleinere

Schadstellen wie Uferabbrüche, Auskolkungen, Unterspülungen oder Neuverlandungen und die damit verbundenen Auswirkungen und Veränderungen des Gewässers gewollt sind, solange gewährleistet ist, dass dadurch mittel- und langfristig keine Gefahr für die Unterlieger besteht.

Das Konzept, den Gewässerrandstreifen nicht mehr zu unterhalten, um dem Fluss freien Lauf für eine eigendynamische Entwicklung zu geben, setzt eine hohe Flächenverfügbarkeit voraus. Das Gewässer wird sich langfristig in die Breite dehnen, um seinen mäandrierenden, natürlichen Verlauf wieder zu erhalten und bedient sich dabei der Gebiete links und rechts seines Gewässerbettes. Nicht selten geht dies auch auf Kosten von landwirtschaftlichen Nutzflächen. Bevor nun aufwendige und teure Schutz- bzw. Sanierungsmaßnahmen gegen diese Gewässerentwicklung gebaut werden, ist es oftmals günstiger, benachbarte Landstreifen aufzukaufen und dem Gewässer Gestaltungsmöglichkeiten zu geben ("Lassen statt Machen").

Mit diesen Vorgängen verbunden sind die Neubildung und Ausbildung von Flachwasserzonen und weiteren, ökologisch wertvollen Uferbereichen, die ideale Lebensbedingungen für eine artenreiche Flora und Fauna aufweisen.

An Bundeswasserstraßen sollte der Verzicht auf Sanierungsmaßnahmen an allen Uferstellen angestrebt werden, an denen die Wellen- und Absunkerscheinungen der Schifffahrt keine Gefährdung der Ufer bedeuten. Dies ist z.B. in seenartigen Gewässerabschnitten bzw. an flachen, im Verhältnis 1:7 geneigten Ufern der Fall. Der natürliche Bewuchs sorgt dabei für einen Gleichgewichtszustand zwischen auftretenden Belastungen und Widerstandsverhalten bzw. Regenerationsfähigkeit der lebenden Ufersicherung.

4.2 Einteilung der ingenieurbiologischen Bauweisen

In LfU (1998) wird eine Einteilung der ingenieurbiologischen Bauweisen nach den Entwicklungszielen eines Gewässers vorgenommen. Abhängig von der Wirkung der Maßnahme und ihren Auswirkungen auf das Gewässer bzw. auf den Gewässerrandbereich lassen sich im naturnahen Wasserbau die drei Zielperspektiven "entwickeln", "sichern bzw. wiederherstellen" und "sich selbst überlassen" unterscheiden.

Aus den Entwicklungszielen "entwickeln" und "sichern bzw. wiederherstellen" ergibt sich eine Gruppierung der ingenieurbiologischen Bauweisen in *Entwicklungsbauweisen* und *Sicherungsbauweisen*. Unter "Uferbereiche sich selbst überlassen" wird die *Bauweise Null* verstanden, die eigentlich keine bauliche Maßnahme zur Ufersicherung ist. Sie wird in der weiteren Betrachtung jedoch aufgrund der flächigen Sicherungswirkung der natürlichen Sukzession unter den Bauweisen aufgeführt. Tabelle 7 gibt einen Überblick über Funktion und Wirkungsweise ingenieurbiologischer Bauweisen.

Als **Entwicklungsbauweisen** bezeichnet man ingenieurbiologische Bauweisen, mit denen die "Entwicklung" eines Gewässers gesteuert wird, d.h. durch deren Anordnung der Stromstrich eines Fließgewässers umgelenkt werden kann (*Leitwerk*). In kleinen Gewässern kann durch die geschickte Anordnung dieser Bauweisen eine

		Sicherungs	sbauweisen	Entwicklungsbauweisen
	Ingenieurbiologische Bauweisen	Flächige Sicherung der Böschung und des Vorlandes (Deckbauwerk)	Sicherung im Wasserwechselbereich (Längsbauwerk)	Lenkung des Stromstrichs (Leitwerk)
1	Faschinenwalze		X	
2	Senkwalze		X	
3	Rauhbaum		Х	Х
4	Weidenwippe		Х	
5	Steckholzbesatz	Х		
6	Weidenspreitlage	Х		
7	Reisiglage / Fichtenspreitlage	Х		
8	Buschlagenbau	Х		
9	Packwerk	Х	X	
10	Gitterbuschbauwerk	Х	X	X
11	Holz-Krainerwand	Х	X	
12	Steinschüttung mit Weidensteckhölzern / Buschlagen	Χ	X	
13	Vegetatives Deckwerk	Χ		
14	Flechtzaun	Χ	X	
15	Erosionsschutzmatte	X	-	
16	Röhrichtwalze / Vegetationsfaschine		X	
17	Reisiglahnung		-	X
18	Böschungsrasen	Χ		
19	Röhrichtpflanzung	Χ		
20	Bauweise NULL	Χ		

Tabelle 7: Übersicht über Funktion und Wirkungsweise der in Kapitel 4.1 beschriebenen ingenieurbiologischen Bauweisen in Anlehnung an Angaben in LfU (1998)

Gewässerbettverlagerung erreicht werden, durch die sich dann mit der Zeit aus einem gestreckten Flusslauf eine gewundene Laufform entwickelt. Voraussetzung dafür sind gewisse Randbedingungen²² und das Vorhandensein ausreichender Flächen links und rechts des Gewässers, die ein Mäandrieren des Flusses ermöglichen. Findet aufgrund fehlender eigendynamischer Prozesse eine solche Laufveränderung nicht statt oder ist eine Beeinflussung des Stromlaufs aus Gründen des Hochwasserschutzes und der Schiffbarkeit an ausgebauten Wasserstraßen ausgeschlossen, übernehmen Entwicklungsbauweisen den Schutz von gefährdeten Stellen wie Uferabbrüchen durch Umlenkung der Strömung und Einleitung der Verlandung.

An Bundeswasserstraßen kommen Entwicklungsbauweisen in Form von Parallelwerken (Leitwerken) zum Einsatz (vgl. Kap. 6.6.1). Sie werden annähernd parallel zum Stromstrich in der Regelungsstreichlinie (Begrenzungslinie des künftigen Mittelwasserbettes) angelegt. Leitwerke haben u.a. die Aufgabe, überbreite, flache Flussquerschnitte auf eine vorgesehene Regelungsbreite einzuengen. Sie werden in einiger Entfernung vom ursprünglichen Ufer angelegt, wodurch sie dieses schützen und gleichzeitig einen ökologisch wertvollen, beruhigten Gewässerbereich zwischen

²²Je nach Erodierbarkeit der Uferbereiche, der Strömungsleistung und der vorherrschenden Abflussdynamik können sich Gewässerläufe sehr schnell verlagern oder einen nahezu statischen Lauf aufweisen. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten, starkem Sohlgefälle und ausreichendem Sedimenttransport neigt das Gewässer zu einer eigendynamischen Laufentwicklung, für die oft nur ein gewisser Impuls, z.B. eine Strömungslenkung, benötigt wird (SCHERLE, 1999).

Parallelwerk und ursprünglicher Uferlinie schaffen. Die Frontseite muss in der Regel mit hartem Verbau gegen die starken Belastungen der Strömung gesichert werden. Der Angriff des Wassers auf den rückwärtigen Böschungsbereich des Leitwerks ist stark abgemindert und bietet mit fortschreitender Verlandung Spielraum für die Ansiedlung artenreicher Vegetation.

Aus der Zielperspektive "sichern und wiederherstellen" resultieren die Sicherungsbauweisen, die die Böschungsufer vor drohender Erosion schützen und vorhandene Schadstellen stabilisieren bzw. wiederherstellen. Dabei werden die ingenieurbiologischen Bauweisen hinsichtlich ihres Einsatzgebietes in *Deckbauwerke* (flächige Deckwerkssicherung im Überwasserbereich) und *Längsbauwerke* (Böschungssicherung im Wasserwechselbereich) unterschieden. Meist werden tote Materialien mit Pflanzen kombiniert und kommen in der Röhricht- und Weichholzzone zum Einsatz. Die toten Baumaterialien sorgen für die Gewährleistung der Anfangssicherung, die nach einigen Vegetationsperioden von den Pflanzen übernommen wird. Durch gute Bedeckung und Durchwurzelung der Böschung wird die Oberfläche befestigt und vor den Angriffen des Wassers geschützt.

In Tabelle 8 sind stichwortartig alle in diesem Kapitel vorgestellten ingenieurbiologischen Bauweisen zusammengefasst. In der Praxis kommt selten nur eine einzige Bauweise zum Einsatz, sondern meist werden verschiedene Maßnahmen miteinander kombiniert. Die geläufigsten Kombinationsmöglichkeiten der genannten ingenieurbiologischen Bauweisen sind in Tabelle 9 dargestellt.

Name der Bauweise	Synonym	Ausführung	Anwendu	ngsbereich und Wirkungsweise	Kosten	Zeitaufwand	Einsatz an BWS ¹
1 Faschinenwalze	Uferfaschine, Faschinenbündel, Wippe	Tot- oder Lebendfaschine	UWZ / WWZ	Sicherung der Uferlinie bzw. des Böschungsfußes	50 -100 [DM / lfm]	60 [min / lfm]	geeignet
2 Senkwalze	Senkfaschine	Mit Steinen gefüllte Totfaschine	UWZ	Sicherung des Böschungsfußes bzw. Schutz der Unterwasserböschung	70 - 90 [DM / lfm]	-	geeignet
3 Rauhbaum		Nadelbäume	WWZ	Schutz vor Uferabbrüchen / -anrissen, Verlandung von Kolken, Leitwerk	20 - 50 [DM / lfm]	60 [min / lfm]	-
4 Weidenwippe	Kombinierter Buschlagen- und Faschinenbau	Mehrlagig Tot- oder Lebendfaschinenwalzen mit oder ohne lebenden Buschlagen	UWZ / WWZ	Massiver Böschungsschutz , Fußsicherung, Schutz vor Abbrüchen	-	70 [min / lfm / Lage]	geeignet
5 Steckholzbesatz	Stecklinge	Ausschlagfähige, unverzweigte Aststücke von Strauchund Baumweiden	WWZ / ÜWZ	Flächige Böschungssicherung nach Anwuchsphase	1,50 - 4,00 [DM / Stck]	2,5 [min / Stck]	geeignet
6 Weidenspreitlage		Ausschlagfähige Zweige und Ruten von Strauch- und Baumweiden unter Beimischung von totem Astmaterial	WWZ / ÜWZ	Flächiges Deckbauwerk, auch an steilen Böschungen	50 - 75 [DM / m²]	45 [min / m²]	geeignet
7 Reisiglage / Fichtenspreitlage		Spreitlage aus nicht ausschlagfähigem Material (meist Nadelholz)	WWZ / ÜWZ	Böschungsoberflächenschutz	40 - 60 [DM / m²]	30 [min / m²]	geeignet
8 Buschlagenbau	Buschbauweise	Ausschlagfähige Stecklinge von Strauchweiden	ÜWZ	Sicherung der Böschung und Erhöhung der Standfestigkeit nach Durchwurzelung	-	-	geeignet
9 Packwerk	Rauhpackung, Rauhwehr, Buschmatratze	Mehrere Schichten lebender und toter Weidenäste und -zweige, Bodenmaterial als Auffüllung	WWZ	Beseitigung von Uferabbrüchen und Kolken	-	200 [min / lfm]	geeignet
10 Gitterbuschbau	Gitterbuschbauwerk	Totes oder lebendes Astwerk	WWZ	Beseitigung von Uferabbrüchen und Kolken, Wiederherstellung der Uferlinie	-	30 - 60 [min / m²]	geeignet
11 Holz-Krainerwand	Holzgrünschwelle	Massive Holzkonstruktion, die mit Pflanzen begrünt wird	WWZ / ÜWZ	Abstützung von ins Wasser reichenden Steilhängen, Schutz vor Abbrüchen	300 - 600 [DM / lfm 5-lagig]	100 [min / lfm / Lage]	-
12 Steinschüttung mit Weiden- steckhölzern / Buschlagen	begrünte Steinschüttung	Steinschüttung vom Böschungsfuß bis MW, Steck- holzbesatz im Bereich der WWZ und oberhalb	WWZ / ÜWZ	Böschungsschutz an Gewässern mit starken Wasserspiegelschwankungen	-	-	geeignet
13 Vegetatives Deckwerk	Vegetatives Deckwerk, Vegetationsmatte	System BESTMANN	WWZ	Technisch-biologischer Böschungsschutz an stark beanspruchten Uferbereichen	-	-	geeignet
14 Flechtzaun		Enges Flechtwerk aus ausschlagfähigen Weidenruten	WWZ	Sicherung von niederen Böschungen und Anbrüchen in ruhigen Gewässern	-	-	-
15 Erosionsschutzmatte	Geotextilbauweise, Böschungsschutzmatte	Geotextil, Jutegewebe, Kokosmatte	ÜWZ	Oberflächenschutz des Uferbereichs gegen Ausspülen und Abschwemmen	12 - 18 [DM / m²]	10 [min / m²]	geeignet
16 Röhrichtwalze / Vegetationsfaschine	Kokoswalze	Mit Pflanzen bestückte, schwere Walze aus gepressten Kokosfasern oder Steinen mit Mutterboden	WWZ	Schutz der Uferlinie gegen Strömung und Wellenangriffe	80 - 150 [DM / lfm]	60 [min / lfm]	geeignet
17 Reisiglahnung	Buschlahnung	Pfahlreihen mit Ast- und Geröllpackung an breiten Gewässerabschnitten	UWZ / WWZ	Vorgelagertes Schutzbauwerk, Ausbildung beruhigter Wasserzonen	-	-	geeignet
18 Böschungsrasen	Gras- oder Kräutersaat, Rasensoden, Fertigrasen		ÜWZ	Schutz von Böschungsoberflächen an weniger beanspruchten Ufern	5 - 25 [DM / m²]	-	geeignet
19 Röhrichtpflanzung	Ballen-, Rhizom-, Halm-, Sprösslingspflanzung	Röhrichtpflanzungen an flachen Böschungen	WWZ	Ausbildung eines dichten Röhrichtgürtels auch an wellenbelasteten Gewässern	20 - 60 [DM / m²]	-	geeignet
20 Bauweise NULL	Natürliche Sukzession	Vollständiger Verzicht auf Sanierungsmaßnahmen, natürliche Begrünung und Überwucherung	ÜWZ	Uferbereiche, die nicht unbedingt geschützt werden müssen	-	-	geeignet

MW: Mittelwasser WWZ: Wasserwechselzone
UWZ: Unterwasserzone ÜWZ: Überwasserzone

1: Bundeswasserstraßen

 Tabelle 8: Übersicht der in Kapitel 4.1 beschriebenen ingenieurbiologischen Bauweisen

L		,
Ξ		,
ζ	-	

Ingenieurbiologische Bauweisen	40	Schilenwi	A Le Republic	Juli auri	Steening	a Hodine	sat pei	ade hi	icherest particular pa	Struck City	ki k	alunet Statute State Sta	weight weight with the state of	de de la	de d	a de la consecución del consecución de la consec	thricheast Rei	Vegeta isidahun	d schurger	ser brichtold
1 Faschinenwalze		Х		Х	Х	Х	Х									Х			Х	
2 Senkwalze	Х			Х	Х	Х	Х						Х			Х			Х	
3 Rauhbaum						Х	Х		Х	Х										
4 Weidenwippe	Х	Х			Х															
5 Steckholzbesatz	Х	Х		Х		Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х		Х	Х			Х	
6 Weidenspreitlage	Х	Х	Х		Х										Х					
7 Reisiglage / Fichtenspreitlage	Х	Х	Х		Х															
8 Buschlagenbau					Х										Х					
9 Packwerk			Х		Х															
10 Gitterbuschbauwerk			Х		Х															
11 Holz-Krainerwand					Х															
12 Steinschüttung mit Weidensteckhölzern					Х															
13 Vegetatives Deckwerk		Х			Х														Х	
14 Flechtzaun																				
15 Erosionsschutzmatte					Х	Х		Х										Х	Х	
16 Röhrichtwalze / Vegetationsfaschine	Х	Х			Х															
17 Reisiglahnung																				
18 Böschungsrasen															Х					
19 Röhrichtpflanzung	Х	Х			Х								Х		Х					
20 Bauweise NULL																				

Tabelle 9: Sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten ingenieurbiologischer Uferschutzmaßnahmen in Anlehnung an LfU (1998)

5 Wissenschaftliche Untersuchungen zur Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen

5.1 Problematik bei der Bestimmung der maximalen Belastbarkeit

In diesem Kapitel wird versucht, Aussagen über die Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen zu machen. Dazu werden anhand der Arbeiten von *Gerstgraser* und *Oplatka* sowie am Beispiel der naturnahen Umgestaltung der Enz in Pforzheim die jüngsten wissenschaftlichen Untersuchungen erläutert und ihre Ergebnisse zusammengefasst. Die Erkenntnisse aus den aufgeführten Beispielen gelten, was den momentanen Wissensstand zu Stabilität und Belastbarkeit naturnaher Bauweisen betrifft, als repräsentativ und bilden mit den in Tabelle 17 (Anlagen) angegebenen Werten die Grundlage für die heutige Bemessung ingenieurbiologischer Bauwerke (OPLATKA, 1998).

In der Literatur sind stark voneinander abweichende Angaben zu Belastungsgrenzen zu finden, die sich außerdem auf keine einheitliche Belastungsgröße beziehen. Einige Autoren beschreiben die zulässigen Belastbarkeiten über die Schleppspannung in N/mm², andere über die Fließgeschwindigkeit in m/s. Die Gründe für die großen Abweichungen sind in der Ermittlung der Werte zu suchen. Ein Großteil wurde nach Hochwasserereignissen mit Hilfe der Schubspannungsformel (Gl. 12) rechnerisch als Grenzwert ermittelt und nicht durch Messungen bestimmt. Der Begriff "Grenzwert" ist in diesem Zusammenhang nicht korrekt, da ein Grenzwert nur dann angegeben werden kann, wenn nachgewiesen wird, dass bei Überschreiten tatsächlich eine Beschädigung eintritt. Meist werden Hochwasserereignisse herangezogen, bei denen keine größeren Schäden an den Baumaßnahmen auftraten. Somit repräsentieren die daraus berechneten Schubspannungen keine Grenzwerte, sondern Werte, die einer bestimmten Belastung standgehalten haben.

Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang stellen mangelnde Aussagen über den Zustand der ingenieurbiologischen Bauweisen dar. Naturnahe Bauweisen sind lebende Bauweisen, bei denen Pflanzen verwendet werden. Deshalb sollten auch Informationen über Alter, Bestandsdichte und Stärke der verwendeten Materialien oder über die Zusammensetzung des Bodens gegeben werden, um unterschiedliche Werte miteinander vergleichen zu können.

Die tatsächlich an der Böschung auftretenden Kräfte hängen maßgeblich von der Gerinnegeometrie, den Interaktionsvorgängen und dem Böschungsbewuchs ab. Wird die Belastbarkeit in Form der Schubspannung (τ) angegeben, so geht von den drei maßgeblichen Größen (Gerinnegeometrie, Interaktionsvorgänge, Böschungsbewuchs) nur die Gerinnegeometrie ein. Die tatsächlichen Schubspannungen an den Böschungen sind aber geringer, deshalb wird in der Literatur häufig ein Reduktionsfaktor zur Ermittlung der maximalen Wandschubspannung eingeführt (vgl. Kap. 2.3.2).

In neueren Veröffentlichungen wird als Maß für die Belastbarkeit auch die Fließgeschwindigkeit (v) angeführt. Dies ist auf die Entwicklung von Computer unterstützten Abflussmodellen zurückzuführen, wodurch eine genauere Berechnung der Fließge-

schwindigkeiten ermöglicht wurde (LfU, 1996). Als Wert für die maximale Belastbarkeit der Böschungssicherung wird dabei im Allgemeinen die mittlere Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne angegeben. Diese Angabe spiegelt aber nicht die tatsächlich vorhandenen Geschwindigkeiten auf bewachsenen Uferböschungen wieder, da die Fließgeschwindigkeit durch den Bewuchs stark reduziert wird (GERSTGRASER, 2000).

Aufgrund der vielen noch weitgehend unbekannten Faktoren sollte nach Erkenntnissen aus der Umgestaltungsmaßnahme der Enz/Pforzheim als Richtwert für eine Abschätzung der maximalen Belastbarkeit von ingenieurbiologischen Bauweisen sowohl (τ) als auch (v) herangezogen werden. Diesbezüglich ist nicht nur ein einzelner Wert sondern ein ganzer Wertebereich anzugeben, damit Unterschiede hinsichtlich Zustand und Ausführung der Bauweisen berücksichtigt werden. Außerdem ist der Winkel, unter dem die Hauptströmung auf die Böschung trifft, entscheidend für die Stabilität von ingenieurbiologischen Bauweisen. Je größer dieser Anströmwinkel ist, desto stärker wird das Ufer belastet, wovon besonders exponierte Stellen oder Prallhänge an Außenkurven betroffen sind. Die Angabe des Anströmwinkels zur Böschung ist also wichtiger Bestandteil für die richtige Einschätzung der Stabilität naturnaher Ufersicherungen, unabhängig davon, über welche der beiden Größen $(\tau \text{ oder } v)$ die Beanspruchbarkeit ausgedrückt wird (LfU, 1996).

5.2 Stabilität von Weidenverbauungen

Die bisherige Forschung an ingenieurbiologischen Ufersicherungen im Flussbau konzentrierte sich auf den Einfluss der Vegetation auf die Abflusskapazität und nicht auf die Uferstabilität. Deshalb ist noch wenig über die Zerstörungsprozesse und das Widerstandsverhalten von Ufersicherungen bekannt. Man behilft sich mit Erfahrungswerten, die auf Beobachtungen basieren und nicht zwingend mit den eigentlichen Grenzwerten identisch sind (OPLATKA, 1998). Die maßgebende Gefährdung für Ufersicherungen mit Steckhölzern ist nach *Oplatka* eine Kombination aus Erosion und in der Pflanze hängen gebliebenem Geschwemmsel. Daraus ergibt sich als maßgebende Beanspruchung auf die Pflanze die Strömungskraft und nicht die oft verwendete Schleppspannung. Die Schleppspannung stellt die maßgebende Beanspruchung auf den Boden dar und sollte nur bei einem großen Verhältnis von Abflusstiefe zu Bewuchshöhe, wie es bei Kleinbewuchs (vgl. Kap. 2.2.2) der Fall ist, verwendet werden (OPLATKA, 1998).

5.2.1 Ausreißwiderstand

Um Näheres über das Verhalten von Büschen und Sträuchern in der Strömung sowie deren Widerstandsverhalten zu erfahren, untersuchte *Oplatka* die Stabilität von Weidenverbauungen. Mit Hilfe von zahlreichen Ausreißversuchen an Weiden, welche als Steckhölzer gepflanzt waren, konnten Widerstandswerte im Feld gemessen werden. Die dabei gemessene Ausreißkraft kann als Indikator gelten, wie gut eine Weide im Boden verankert ist.

Aus den Versuchen Oplatkas lässt sich zusammenfassen, dass der Widerstand von drei-

bis sechsjährigen Weidensteckhölzern, welche in Kiesrohböden oder Kiesböden mit einer überlagerten Siltschicht aufwuchsen, zwischen 4 und 10 kN liegt. Eine Erhöhung des Widerstands erfolgt mit zunehmendem Steckholzdurchmesser und zunehmender Einbindetiefe im Boden sowie mit dem Alter der Pflanze. Steckhölzer, die in einem Steinwurf verkeilt sind, weisen die höchsten Widerstände auf. Es zeigte sich auch, dass durch Verwendung von dicken und langen Steckhölzern der Widerstand von Weiden in den ersten Jahren massiv gesteigert werden kann. Ihr Widerstand gegen Strömungsangriffe setzt sich zum einen aus dem Steckholz und zum anderen aus den Wurzeln, die sich im Laufe der Zeit entwickeln, zusammen. Bei den von *Oplatka* untersuchten drei- bis sechsjährigen Weiden betrug der Anteil des Steckholzes am Gesamtwiderstand noch 30 bis 70 %.

Das Wurzelbild einer Pflanze wird wesentlich durch den Bodenaufbau und den Wasserhaushalt bestimmt. Dabei spielen vor allem die Korngrößenverteilung und die Böschungsneigung eine Rolle, denn die Wurzeln tragen nur bei Feinböden zu einer Erhöhung des Widerstandes bei. *Oplatka* entwickelte ein Berechnungsverfahren, mit dem die Ausreißwiderstände von Steckhölzern und Wurzeln nachgerechnet werden können.

5.2.2 Strömungsbelastung auf Weidenverbauungen

Junge, in ingenieurbiologischen Bauweisen sich entwickelnde Pflanzen sind der Charakteristik nach dem Mittelbewuchs zuzuordnen (GERSTGRASER, 2000). Werden Pflanzen vom Wasser um- oder überströmt, dann wird auf die Pflanze eine Kraft ausgeübt. Mit zunehmenden Abflusstiefen oder Geschwindigkeiten neigt sich dabei die Pflanze immer mehr zum Wasser und taucht schließlich unter. Die Vorgänge beim Überströmen von Pflanzenbeständen sind jedoch noch unvollständig erfasst. Vor allem für flexiblen Mittelbewuchs sind für die praktische Anwendung keine ausreichend erprobten Berechnungsverfahren vorhanden (DVWK, 1991).

Elastische Körper (Pflanzen) verändern im Vergleich zu starren Objekten mit zunehmender Geschwindigkeit ihre Fläche und besitzen daher keine mathematisch beschreibbare angeströmte Querschnittsfläche wie beispielsweise ein Brückenpfeiler. Aus diesem Anlass untersuchte *Oplatka* das Kontraktionsverhalten von Weiden unter der Wirkung von Strömungskräften in einem 140 m langen, 4 m breiten und 1,9 m tiefen Schleppkanal. Dabei verwendete er bis zu 4,5 m hohe, aufrecht stehende Weiden, die mit einer Geschwindigkeit von bis zu 4 m/s durch den Kanal gezogen wurden. Unter der Kontraktion der Weiden wird die Tendenz der Pflanze verstanden, mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ihre angeströmte Fläche zu verkleinern. Die Pflanze versucht der Strömung eine geringe Angriffsfläche zu bieten, indem sie sich umlegt und zusätzlich ihre Breite verschmälert. Dieser Vorgang wird mit ansteigender Fließgeschwindigkeit verstärkt. In Abbildung 64 ist die typische Verformung einer Weide in horizontaler und vertikaler Richtung bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten dargestellt.

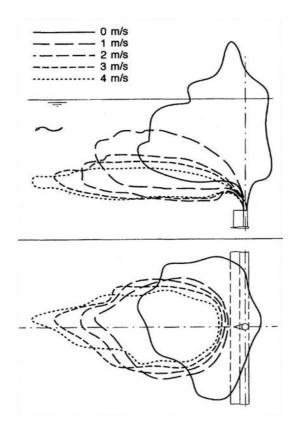


Abbildung 64: Typische Verformung einer vollständig untergetauchten Weide bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten in Aufriss und Grundriss (OPLATKA, 1998)

Die Untersuchungen von *Oplatka* ergaben, dass bereits bei einer Geschwindigkeitszunahme von 0 auf 1 m/s die Höhe bzw. die Breite einer Weide um 40 – 60 % ihrer ursprünglichen Form zurückgeht. Bei 1 m/s reduziert sich die angeströmte Fläche auf ein Viertel bis ein Fünftel und bei Erreichen der Fließgeschwindigkeit 4 m/s beträgt sie nur noch 2,5 – 5% der ursprünglichen Fläche. In der Natur dürfte dieses Verhalten noch ausgeprägter sein, da die Weiden dann nicht so starr eingespannt sind, wie es im Versuchskanal der Fall war. *Oplatka* macht darauf aufmerksam, dass das Kontraktionsverhalten der Weiden in den heutigen Modellierungen berücksichtigt werden sollte, da die Gerinne bei der Annahme, die Vegetation verhalte sich wie starre Zylinder, überdimensioniert werden (OPLATKA, 1998).

Überträgt man *Oplatkas* Ergebnisse auf ein ingenieurbiologisch gesichertes Ufer, so bedeutet dies, dass junge, flexible Ufervegetation wesentlich weniger Raum im Abflussprofil einnimmt als bisher angenommen. Aus dem Blickwinkel der Ufersicherheit ist vor allem die Breitenkontraktion der Pflanzen von Bedeutung, da mit zunehmender Geschwindigkeit die Strömungskraft steigt und die Uferböschung stärkeren Belastungen ausgesetzt ist. Die Pflanze legt sich über die Böschung und übernimmt den Schutz der Oberfläche. Aufgrund der Breitenkontraktion nimmt allerdings die Fläche, die von der Pflanze geschützt werden kann, mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ab (GERSTGRASER, 2000).

Solange eine Weide nicht untergetaucht ist, verhält sie sich wie ein starrer Körper. Die auf sie einwirkende Kraft kann nach dem *Newton'schen* Widerstandsgesetz als Strömungskraft (S_W) eines starren Zylinders in einer turbulenten Strömung beschrieben werden:

$$S_{\rm W} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_{\rm D} \cdot A \cdot v^2 \tag{25}$$

Bei nicht untergetauchten Weiden treten, bedingt durch die geringere Angriffsfläche, kleinere Strömungskräfte als bei vollkommen untergetauchten Weiden auf. *Oplatka* konnte nachweisen, dass die Strömungskraft auf untergetauchte Weiden nicht mehr im Quadrat sondern aufgrund der Flächenkontraktion annähernd linear zunimmt. Als maximale Strömungskraft, die bei einer Fließgeschwindigkeit von 4 m/s auf eine Weide wirkt, konnte eine Kraft von 1,2 kN gemessen gewerden. Zusätzlich erhöht sich die Strömungskraft durch diverse Geschwemmsel, wobei die Biegesteifigkeit der Schwimmstoffe ausschlaggebend ist. Kleine Äste, Plastiksäcke etc. legen sich stromlinienförmig um die Weiden und erhöhen dadurch die Belastung nur gering, während steifes Geschwemmsel wie z.B. längere Äste die Strömungskraft erheblich vergrößern.

Oplatka folgert aus seinen Ergebnissen, dass es immer zu Erosion kommen muss, bevor eine Ufersicherung mit Steckhölzern versagt, da die Pflanze einen Widerstand aufweist, der dem Drei- bis Achtfachen der Strömungsbelastung bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s entspricht. Die Hauptwirkung ingenieurbiologischer Ufersicherungen liegt in der Reduktion der Fließgeschwindigkeit unmittelbar oberhalb des Uferbodens und somit in der Verminderung der Beanspruchung des Bodens. Aus diesem Grund sind Ufersicherungen so zu gestalten, dass sie die Zone mit den großen Fließgeschwindigkeitsgradienten und intensiver Wirbelbildung von der Bodenoberfläche fern halten (OPLATKA, 1998).

5.3 Ergebnisse und Erfahrungen der Umgestaltung der Enz/Pforzheim

In den Jahren 1990/91 wurde die Enz im Rahmen der Landesgartenschau in Pforzheim (1992) auf einer Länge von 1800 m naturnah umgestaltet. Diese Umgestaltungsmaßnahme im Stadtgebiet von Pforzheim gilt als Pilotprojekt in Baden-Württemberg, aus dem nach einem außergewöhnlichen Hochwasser im Jahr 1993 ²³ wichtige Erkenntnisse zur Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen gewonnen werden konnten.

 $NQ (1934) = 2.32 [m^3/s]$

 $MQ = 17 [m^3/s]$

MHQ= $158 [m^3/s]$

 $HQ_{100} = 525 [m^3/s]$

²³Der Hochwasserabfluss im Dezember 1993 betrug 554 [m³/s]. Zum Vergleich einige charakteristische Abflussdaten der Enz am Pegel Pforzheim-Kläranlage:

5.3.1 Hydraulische Untersuchungen

Die Umgestaltungsmaßnahme wurde vom Institut für Wasserbau und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe, das im Vorfeld zahlreiche Modellversuche durchgeführt hat, sowie von der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU), welche die Entwicklung der naturnahen Bauweisen dokumentierte, begleitet. Die während des Hochwasserereignisses aufgetretenen Belastungen der Ufersicherungsmaßnahmen wurden von *Dittrich* und Kollegen (IWK) untersucht. Dazu wurden die lokal wirksamen Schubspannungen mittels eines eindimensionalen Berechnungsprogramms, das auf Gleichung (12) (Schubspannungsformel) beruht, berechnet. Die lokalen Schubspannungen im Bereich der ingenieurbiologischen Bauweisen variierten während des Hochwassers zwischen 30 N/m² und 150 N/m².

Mit einem zweidimensionalen Rechenmodell konnten zusätzlich die lokalen Geschwindigkeitsvektoren ermittelt werden. Der gesamte Untersuchungsabschnitt wurde mit einem Netz aus Dreiecken überzogen und für jedes Dreiecksfeld die Geschwindigkeit über die Tiefe gemittelt und der resultierende Geschwindigkeitsvektor bestimmt. Aus der Gesamtheit der Ergebnisse ergaben sich für die Umgebung der Ufersicherungsmaßnahmen typische Geschwindigkeitsvektoren, deren mittlere Geschwindigkeiten zwischen 2,5 m/s und 4 m/s lagen. Dabei verlief die Richtung der Vektoren überwiegend parallel zur Flussachse oder innerhalb eines maximalen Öffnungswinkels von $\pm 15^\circ$, an den Ufervorsprüngen dagegen traf die Strömung teilweise unter Winkeln von bis zu 40° auf die Uferlinie (LfU, 1996).

5.3.2 Naturnahe Bauweisen im Umgestaltungsbereich

Die Böschung wurde im Untersuchungsabschnitt vom Böschungsfuß bis zur Mittelwasserlinie mit Steinwürfen bzw. Rollierungen verschiedener Größen gesichert. Im Bereich der Mittelwasserlinie kamen nachfolgend aufgeführte ingenieurbiologische Uferund Inselsicherungsmaßnahmen zum Einsatz.

- lebende Uferfaschine (Faschinenwalze)
- Totfaschine
- Spreitlage
- Röhrichtwalze / Röhrichtpflanzung
- Rollierung (Kies 0 40 mm)
- Steinwurf
- Rauhpackwerk mit Rollierung
- Steinwurf mit Weidenstecklingen
- Schotterrasen
- Grassaat
- Grassoden
- Naturfasermatten und Geotextilien

Gerade Abschnitte wurden überwiegend mit Faschinenwalzen gesichert und an exponierten Stellen wurden meist Steinwürfe mit Weidenstecklingen eingebaut. Die exakte

Anordnung und Ausführung der einzelnen Bauarten ist LfU (1991) und LfU (1996) zu entnehmen.

5.3.3 Beurteilung der Belastbarkeit der Ufersicherungsmaßnahmen

Nach dem Jahrhunderthochwasser am 21. Dezember 1993 mit einem HQ=554 m³/s - der Bemessungsabfluss für die neue Ufergestaltung betrug HQ=540 m³/s - konnte eine erste Bilanz gezogen werden. Zu diesem Zeitpunkt hatten die oben aufgeführten Ufersicherungsmethoden ein Alter von 5 Jahren.

Bei der Auswertung der Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen ergab sich, dass eine Bewertung der naturnahen Bauweisen nur gesamtanschaulich unter Berücksichtigung von Linienführung, Bauausführung, Entwicklung des Bewuchses und hydraulischer Belastung der Bauweisen erfolgen kann. Diese Einzelfaktoren sind wesentlich für die Stabilität der Maßnahmen verantwortlich. Durch einen Vergleich des umgestalteten Bereichs mit dem unveränderten, alten Gewässerabschnitt oberhalb der Umbaustrecke wurde deutlich, dass der neue Enzabschnitt mit den wechselnden Böschungsneigungen empfindlicher gegen Strömungsangriffe reagiert als der gestreckte Bereich. Am gestreckten Gewässerabschnitt erfolgte bei Schubspannungen von ca. 80 N/m² und Fließgeschwindigkeiten von 3,5 m/s die Entwicklung der Vegetation normal, und das Hochwasser 1993 hinterließ keine Schäden. Bei gleichen Schubspannungen und Geschwindigkeiten entwickelte sich die Vegetation im Umbaubereich nur mangelhaft, und es bildeten sich besonders an Ufervorsprüngen durch das Hochwasser Schadstellen aus. Hauptsächlich dafür verantwortlich gemacht werden die extremen Belastungen durch die angreifenden Fließgeschwindigkeiten, die aufgrund der unregelmäßigen Ufer- und Inselstruktur teilweise unter einem Winkel von 40° auf die Uferlinie treffen (LfU, 1996). Schwachstellen fanden sich auch bei den Übergängen von einer zur anderen Bauweise sowie bei den daran anschließenden Böschungsübergängen.

Als Ergebnis der Umbaumaßnahme der Enz kann festgehalten werden, dass die einzelnen Bauweisen untereinander und miteinander verbunden werden müssen, um der Strömung keine gefährlichen Angriffsstellen zu bieten. Dies bedeutet beispielsweise für die Sicherung mit Faschinen, dass die Ruten "endlos" zu verlegen sind und die Enden in die Böschung integriert werden müssen. Das uferseitige Hinterspülen der Faschinen kann durch Ausläufer von Weidenruten, die im Abstand von 3 bis 5 m senkrecht zur Uferfalllinie in den Ufer- oder Böschungsbereich eingebunden werden, verhindert werden. Durch eine unregelmäßige Bewuchslinie kann der Erosion an den Übergängen zwischen Bauweise und Böschung begegnet werden. Unterschiedlich lange, ausschlagsfähige Ruten, die in gewissen Abständen in die Böschung eingebunden werden, oder Bepflanzungen mit verschiedenen Busch-, Straucharten oder Röhrichtballen wirken gleichermaßen einer linienförmigen Erosion entgegen und fördern eine unregelmäßige Bewuchslinie.

Beim Übergang zwischen Steinwurf und Grasböschung ist ein abrupter Rauhigkeitswechsel zu vermeiden. Eine Abstufung des Steinwurfs zur Böschung hin und zusätzliche Pflanzungen bzw. Steckhölzer können wesentlich zur Sicherheit der Böschung beitragen. Das Ende und der Anfang der Gestaltungsstrecke mit naturnahen Bauweisen sollte in einer geraden Gerinnestrecke gewählt und zusätzlich mit Steinwürfen gesichert werden (LfU, 1996).

Die Untersuchungen nach dem Hochwasser im Dezember 1993 zeigen, dass hohe Schubspannungen und durchschnittliche, mittlere Geschwindigkeiten die gleichen Auswirkungen zeigen wie durchschnittliche Schubspannungen und hohe mittlere Geschwindigkeiten. Es wird deutlich, dass keiner der Faktoren Schubspannung, mittlere Geschwindigkeit und deren Winkel in Bezug auf die Uferlinie alleine für Schäden verantwortlich ist. Nur die Berücksichtigung all dieser Faktoren sowie die Beachtung der Standort- und Randbedingungen macht bei der Beurteilung der Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen Sinn (LfU, 1996).

Die nachfolgend angegebenen Werte zur Belastung der Ufersicherungen (Tab. 10) sind als lokale Schubspannungen (τ) im Bereich der einzelnen Bauweisen und als mittlere Fließgeschwindigkeiten $(v_{\rm m})$ zu verstehen. Die höheren Werte gelten für gerade Fließabschnitte, die niederen Werte für hydraulisch stark belastete Gewässerstrecken wie Ufervorsprünge, Inselköpfe oder Prallufer.

Ufersicherungsmaßnahme	aufnehmbare lokale Schubspannung τ [N/m²]	aufnehmbare mittlere Geschwindigkeit v _m [m/s]
Faschinenwalze mit ausschlagfähigen Weiden	100 - 150	3,0 - 3,5
Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigen Ruten	70 - 100	2,5 - 3,0
Spreitlage	keine Angabe	keine Angabe
Röhrichtwalze und Röhrichtpflanzungen	55 - 65	2,0 - 2,5
Rollierung (Kies 0 - 40 mm),	70 - 100	2,5 - 3,2
Steinwurf,	100 - 150	3,5 - 4,0
großer Steinwurf	> 150	> 4,0
Rauhpackwerk mit Rollierung	bis 150	3,5 - 4,0
Steinwurf mit Weidenstecklingen / -steckhölzern	100 - 150	3,0 - 3,5
Schotterrasen,	30	1,5
Grassaat,	40	1,8
Grassoden	> 60	> 3,5
Naturfasermatte und Geotextilien	keine Angabe	keine Angabe

Tabelle 10: Zusammenstellung der Beanspruchungen der ingenieurbiologischen Bauweisen an der Enz in Pforzheim nach den Auswertungen des Hochwassers im Dezember 1993 (LfU, 1996)

5.4 Ingenieurbiologische Versuchsstrecke am Wienfluss (Österreich)

Im Frühjahr 1996 wurde von der Stadt Wien am Wienfluss eine ingenieurbiologische Versuchsstrecke für Naturversuche eingerichtet. Diese Strecke hat eine Gesamtlänge von 170 m und befindet sich am Fuße eines Hochwasserrückhaltebeckens, dessen Aufstau für die Flutung der Versuchsstrecke benutzt wird. Dadurch können in der Versuchsstrecke maximale Spitzenabflüsse von 50 m³/s über eine Dauer von ca. 15 Minuten erzielt werden. Die Ufer wurden vom Arbeitsbereich Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur (BoKu) in Wien, deren Mitarbeiter auch die Untersuchungen und Flutungen dokumentieren und überwachen, mit verschiedenen ingenieurbiologischen Bautypen gesichert:

- Weidenspreitlage
- Wand aus Faschinen- und Senkwalzen
- Geotextil (Kokosfaser) mit Steckhölzern
- Faschinen auf Buschlagen
- Geotextilpackungen auf Buschlagen
- Flechtzaun
- Faschinenreihe
- Wurzelstockreihe

Die Anordnung und Ausführung der Bauweisen sowie die aufgetretenen Schäden nach den einzelnen Flutungen (Juli 1996, Oktober 1996, Juni 1997) sowie nach einem Hochwasserereignis (Juli 1997) sind in GERSTGRASER (2000) ausführlich dokumentiert. Im nachfolgenden Abschnitt (Kap. 5.4.1) sind die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen an der Versuchsstrecke Wienfluss sowie die daraus abgeleiteten Erkenntnisse über das Versagen bzw. die Stabilität ingenieurbiologischer Bauweisen erläutert.

5.4.1 Ergebnisse der Flutungen der Versuchsstrecke

Bezüglich der Wirkungsweise ingenieurbiologischer Bauweisen können die Untersuchungen am Wienfluss die Erkenntnisse aus den Ausreißversuchen von *Oplatka* (vgl. Kap. 5.2) untermauern: Schäden an ingenieurbiologischen Bauweisen entstehen nicht durch das Ausreißen von einzelnen Pflanzen, sondern durch die Erosion des Bodens (GERSTGRASER, 2000). Aus Fließgeschwindigkeitsmessungen im Gerinnequerschnitt wurde deutlich, dass die Schutzwirkung einer Bauweise wesentlich von der Geschwindigkeitsreduktion an der Bodenoberfläche durch die Vegetation abhängt. Durch das Überströmen junger, elastischer Pflanzen legen sich diese ab einer gewissen Wassertiefe schützend über die Böschung, wodurch die Fließgeschwindigkeiten in Bodennähe stark zurückgehen. Aus den Messungen konnte gefolgert werden, dass Pflanzendichte, Alter und Elastizität eine große Rolle spielen. In welchem Umfang diese Parameter die Reduktion der Geschwindigkeit beeinflussen, konnte bei den Versuchen am Wienfluss nicht herausgefunden werden. Solange der Bewuchs elastisch bleibt, ist mit zunehmendem Alter auch mit einer zunehmenden geschwindigkeitsreduzierenden Wirkung der Pflanzen zu rechnen. Verlieren die Pflanzen allerdings

an Elastizität und werden starr, dann wird die Strömungsgeschwindigkeit weniger abgebremst. Eine strömungsumlenkende Wirkung nimmt dadurch zu.

Vegetationsaufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gaben Aufschlüsse über die Entwicklung der Pflanzen und deren Bedeutung für die Schutzwirkung der Bauweise. Flächige Bauweisen wie z.B. die Weidenspreitlage bieten den wirkungsvollsten Schutz, da die Ruten dicht aneinander stehen und dem Boden trotz der Breitenkontraktion der Pflanzen bei Überstauung noch ausreichend Schutz bieten. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Bestandsdichte entsprechend hoch ist.

Beim Bau der Sicherungsmaßnahmen ist auf die Versorgung der Pflanzen mit Licht und Wasser zu achten. Nur durch die richtige Ausführung kann die Entwicklung der Pflanzen und eine langjährige Funktionsfähigkeit der Bauweise gewährleistet werden. Deshalb ist es meist notwendig, die jungen Vegetationsbestände unmittelbar nach Fertigstellung mit Hilfsstoffen wie z.B. Steinen, Holz oder Geotextilien zu kombinieren. Um die maximalen Belastungen zu ermitteln, wurden die in den Flutungsversuchen gemessenen Wasserspiegellagen und Durchflüsse herangezogen und zusammen mit Werten aus Modellversuchen ein bordvoller Abfluss berechnet. Die Ergebnisse aus bordvollem Abfluss wurden zur Abschätzung der maximalen Belastbarkeiten der Uferbereiche benutzt. Die Abschätzung der im Hauptgerinne aufgetretenen mittleren Fließgeschwindigkeiten erfolgte in einzelnen Profilen über die Kontinuitätsgleichung und wurde mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen (GERSTGRASER, 2000). Mit der Schleppspannungsformel (Gl. 12) erfolgte dann die Ermittlung der mittleren und maximalen Schubspannungen. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Nachrechnung in Anlehnung an Ausführungen in GERSTGRASER (2000) dargestellt.

Ufersicherungsmaßnahme	Flutung bzw.	V _m	V _{max}	h	r _{hy}	Ι _Ε	τ_{m}	$ au_{\text{max}}$
Oler Sicher drigsmasharime	Hochwasser	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[%]	[N/m²]	[N/m²]
Weidenspreitlage	6 / 1997	1,77	2,1-2,3	3,10	0,97	0,5	48	152
weidenspreitlage	bordvoll	2,20	2,8-2,9	3,95	1,20	0,5	59	193
Wand aus Faschinen- und	6/1997	2,20	2,8-2,9	2,80	0,94	0,7	65	192
Senkwalzen	bordvoll	3,15	3,5-4,0	3,85	1,35	0,7	93	264
Faschinen auf Buschlagen	6 / 1997	2,30	3,0-3,2	2,37	1,07	1,3	136	302
rascrilleri aur buscrilageri	bordvoll	3,60	3,5-4,0	3,60	1,45	1,3	185	460
Geotextilpackungen auf Buschlagen	6 / 1997	2,30	3,0-3,2	2,25	1,02	0,8	185 4 80 1 111 2	176
Geolexiiipackurigeri aur Buschlageri	bordvoll	3,20	3,5-4,0	3,25	1,42	0,8	111	255
	10 / 1996	1,07	1,2-1,4	2,82	1,35	0,05	7	14
Flechtzaun	bordvoll	1,55	2,0	3,70	1,94	0,05	10	18
	HQ=265 [m³/s]	3,20	-	4,70	-	0,3	-	138
	10 / 1996	1,33	1,7-1,9	2,74	1,35	0,13	17	35
Faschinenreihe	bordvoll	1,85	2,2-2,5	3,60	1,81	0,13	23	46
	HQ=265 [m³/s]	3,50	=	4,50	-	0,35	-	155
Wurzelstockreihe	10 / 1996	1,80	2,2-2,4	2,42	1,09	0,5	53	119
vvuizeisiookielile	bordvoll	2,80	3,4-3,6	3,70	1,46	0,5	75	181

Tabelle 11: Zusammenstellung der Belastungen der ingenieurbiologischen Uferbauweisen während der Flutungen der Versuchsstrecke am Wienfluss (GERSTGRASER, 2000)

Nach GERSTGRASER (2000) sind diese Werte nur als Richtwerte zu verstehen, da eine exakte Bestimmung der Belastbarkeiten nicht durch Berechnungen, sondern durch umfangreiche Messungen erfolgen müsste. Dennoch sind sie Orientierungswerte, die allerdings nicht blind übernommen werden dürfen, da die Belastbarkeit einer Bauweise von vielen Faktoren wie Anströmwinkel, unterschiedlicher Rauhigkeit, Ausführung etc. abhängt.

Gerstgraser macht bei der Analyse der Ergebnisse auf Ungenauigkeiten in den Messungen und Vereinfachungen im Ansatz des bordvollen Abflusses aufmerksam, so dass einige Abweichungen möglich sind, was sich z.B. in teilweise stark voneinander abweichenden Schubspannungen $\tau_{\rm m}$ und $\tau_{\rm max}$ äußert. Dies ist auf die Gerinnegeometrie zurückzuführen, denn je schmäler das Gerinne wird, desto kleiner wird der hydraulische Radius. Zur Berechnung der mittleren Schubspannung ($\tau_{\rm m}$) wurde der hydraulische Radius eingesetzt, während für die maximale Schubspannung die Wassertiefe (h) verwendet wurde. Deshalb ist bei schmalen Gerinnen der Wandeinfluss sehr hoch, und die Verwendung von $\tau_{\rm m}$ unterschätzt die an den Böschungen tatsächlich auftretenden Schubspannungen. Ein weiteres Problem bei der Berechnung der Schubspannungen stellt das Energieliniengefälle ($I_{\rm E}$) dar, da es linear in die Berechnung eingeht. Außerdem lag der Wasserspiegel während des maximalen Abflusses bei Hochwasser wesentlich über dem Wasserstand, der der Berechnung des bordvollen Abflusses zu Grunde liegt.

Nach einer Überarbeitung der Untersuchungsergebnisse unter Berücksichtigung der Beobachtungen während des Hochwassers (Juli 1997) werden in GERSTGRASER (2000) nachstehende Richtwerte (vgl. Tab. 12) als mittlere Geschwindigkeit im Hauptgerinne ($v_{\rm m}$) und als maximale Sohlenschubspannung (max τ_0) für die Ufersicherungsmaßnahmen am Wienfluss angegeben.

Ufersicherungsmaßnahme	Alter [Monate]	v _m [m/s]	max τ ₀ [N/m²]
Weidenspreitlage	3 - 7	3,2 - 3,5	200 - 300
Wand aus Faschinen- u. Senkwalzen mit Holzpfählen	15	3,5 - 4,0	180 - 240
Geotextil (Kokosfaser) mit Steckhölzern	15	2,2 - 2,8	80 - 120
Faschinen auf Buschlagen	15	2,0 - 2,5	120 - 150
Geotextilpackungen auf Buschlagen	15	3,0 - 3,5	120 - 160
Flechtzaun	15	3,2 - 3,5	100 - 120
Faschinenreihe	15	3,3 - 3,8	150 - 200
Wurzelstockreihe	-	1,5 - 2,0	50 - 80

Tabelle 12: Richtwerte zur Belastbarkeit der Ufersicherungsmaßnahmen am Wienfluss aufgrund der Auswertungen der Flutungen (GERSTGRASER, 2000)

5.5 Zusammenstellung repräsentativer Werte zur Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen

In Kapitel 5.1 wurden bereits die Probleme, die bei der Angabe der Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen entstehen, angesprochen. Ein Großteil der Werte, die von Autoren in der Literatur angegeben werden, stammen nicht aus eigenen Messungen, sondern sind aus anderen Werken übernommen, und die zugehörige Primärliteratur ist oft nicht bekannt.

Gerstgraser hat in seiner Arbeit (GERSTGRASER, 2000) versucht, aufgrund dieser Problematik einen Großteil der in der Fachliteratur publizierten Daten zu erheben und zu analysieren. Damit die Werte auch vergleichbar sind, hat er einen Fragebogen ausgearbeitet, um detaillierte Antworten und Informationen über die Entstehung der Werte zu erhalten. Dieser Fragebogen wurde an 49 maßgebliche Autoren aus 11 Ländern versendet. So fern es möglich war, wurden nur Werte aus Originalliteratur oder Ergebnisse aus eigenen Messungen, die nachvollziehbar waren und aus denen deutlich wurde, wie sie entstanden sind, zur Analyse verwendet. Nach einer Auswertung der erhaltenen Angaben zu verschiedenen Bautypen stellte er die in Tabelle 13 angegebenen maximalen Belastbarkeiten für die wichtigsten ingenieurbiologischen Bauweisen zusammen. Diese Werte können nach Gerstgraser als repräsentativ²⁴ angesehen werden.

Erläuterungen zu den Angaben in Tabelle 13 (GERSTGRASER, 2000):

- Florineth ist einer der Wenigen, der Untersuchungen über die Belastbarkeit von Spreitlagen durchgeführt hat. Seine Ergebnisse beruhen auf Nachrechnungen von Hochwasserereignissen mit der Schleppspannungsformel an der Passer bzw. am Zangenbach/Südtirol.
- Steiger ist der Erste, der Angaben über die Belastbarkeit eines Flechtzaunes veröffentlicht hat. Wie seine Werte zustande kamen, konnte von Gerstgraser aber nicht exakt nachvollzogen werden.
- Die Ergebnisse der LfU beruhen auf einer umfangreichen Untersuchung des naturnahen Umbaus der Enz bei Pforzheim (vgl. Kap. 5.3). Die Werte wurden aufgrund eines Jahrhunderthochwassers im Jahre 1993 mit ein- bzw. zweidimensionalen Berechnungsmodellen ermittelt.
- Witzig hat eine Vielzahl eigener Beobachtungen nachgerechnet. Er stellte fest, dass Rasen einer Schleppspannung von 80 100 N/m² bei einer Böschungsneigung von 1:2 bis 1:3 standhält. Die Erhaltung einer widerstandsfähigen Grasnarbe setzt eine regelmäßige Pflege voraus. Da eine solche Pflege aber häufig nicht stattfindet, legt Witzig die Schleppspannung mit 50 N/m² fest.

²⁴Als repräsentativ wurde ein Wert dann eingestuft, wenn ein Berechnungsverfahren zu Grunde lag oder wenn es sich um Erstveröffentlichungen von Erfahrungswerten des Autors handelte.

Ingenieurbiologische Bauweise	Literatur / Autor	$ au$ [N/m 2]	$v_{ m m}$ [m/s]
Weidenspreitlage	FLORINETH (1982) FLORINETH (1995)	195 – 218 309	_ _
Flechtzaun	STEIGER (1918)	50	_
Totfaschine	LfU (1996)	70 – 100	2,5 – 3,0
Faschine	LfU (1996)	100 – 150	3,0 – 3,5
Weidensteckhölzer	WITZIG (1970) LfU (1996)	165 100 – 150	- 3,0 - 3,5
Weidengebüsch	WITZIG (1970)	100	_
Rasen	WITZIG (1970)	50 - (100)	_
Grassaat	LfU (1996)	40	1,8
Grassoden	LfU (1996)	> 60	> 3, 5

Tabelle 13: Repräsentative Grenzwerte über Belastbarkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen nach *Gerstgraser* (GERSTGRASER, 2000)

Des Weiteren ist in Tabelle 17 (Anlagen) eine allgemeine Zusammenstellung der im Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit ausfindig gemachten Veröffentlichungen über Belastungsgrenzen naturnaher Bauweisen dargestellt. Diese Übersicht fasst die in OPLATKA (1998) und GERSTGRASER (2000) gemachten Aufstellungen zusammen und ist um weitere, in der Fachliteratur angegebene Werte ergänzt.

6 Ausführungen ingenieurbiologischer Bauweisen an Bundeswasserstraßen

6.1 Einführung

Aus den vorangehenden Kapiteln wurde deutlich, dass der Einsatz ingenieurbiologischer Bauweisen zur Ufersicherung von Bundeswasserstraßen ein sehr junges, komplexes und noch unzureichend erforschtes Aufgabengebiet des modernen Wasserbaus ist. Dieses Aufgabengebiet wirft eine Menge Fragen bezüglich Eignung und Wirkungsweise der Bauweisen auf. Es müssen viele Einflussfaktoren hinsichtlich der Auswahl einer Bauweise berücksichtigt werden, damit eine langfristige Schutzwirkung erreicht wird und die Standfestigkeit der Uferböschung gewährt ist.

Der Mangel an exakten Werten über die Belastbarkeit der Bauweisen ist das zentrale Problem der Ingenieurbiologie. Es sind viele Daten in der Literatur vorhanden, die allerdings für ein und dieselbe Bauweise erheblich voneinander abweichen (vgl. Kap. 5.1) und es gibt keine einheitliche Größe, mit der die Belastbarkeit quantifiziert wird (GERSTGRASER, 2000). Die Mehrzahl der Autoren bezieht sich bei der Angabe der zulässigen Belastbarkeit auf die *Schleppspannung*, andere auf die *Fließgeschwindigkeit*. *Dittrich* hat aus seinen Untersuchungen an der Enz/Pforzheim (LfU, 1998) die Erkenntnis gewonnen, dass realistische Aussagen zu Belastungsgrenzen nur durch die Angabe beider Parameter unter zusätzlicher Berücksichtigung des Anströmwinkels gemacht werden können.

An Bundeswasserstraßen wirken neben den hydraulischen Belastungen aus den natürlichen Fließvorgängen zusätzlich noch aus der Schifffahrt resultierende Rückströmungen, Absunkerscheinungen und Wellenkräfte. Das Wechselspiel zwischen Krafteinwirkung und Erosionswiderstand der Uferbefestigung ist schwer zu erfassen. In der Literatur sind keine Berechnungsverfahren für ingenieurbiologische Ufersicherungen an Bundeswasserstraßen zu finden, was auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass Schifffahrtsstraßen bisher überwiegend mit konventionellen Deckbauwerken gesichert wurden. Um so wichtiger ist es, Anwendungsbeispiele aus der Praxis zu finden, aus denen Rückschlüsse über den Einsatz und die Wirkung unterschiedlicher Bauweisen in Bezug auf die Schifffahrt gemacht werden können. Diese können dann auf andere Gewässerabschnitte übertragen werden, und Rückschlüsse bezüglich der Gestaltung bevorstehender Neubau- oder Umbauprojekte können gezogen werden. Erkenntnisse dieser Art sind als Vergleichswerte aufzufassen, die für eine erste Abschätzung nützlich sind. Sie müssen auf die speziellen Randbedingungen eines Gewässers wie z.B. Gewässermorphologie, Standortverhältnisse oder Belastungsart und -größe neu abgestimmt werden.

6.2 Telefonische Umfrage zur Erfassung ingenieurbiologischer Bauweisen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine telefonische Umfrage durchgeführt, um Strecken ausfindig zu machen, an denen ingenieurbiologische Ufersicherungsmethoden an Bundeswasserstraßen zum Einsatz kommen. Ziel der Aktion war es herauszufinden, wo überall Uferschutz in Form von ingenieurbiologischen Bauweisen vorgenommen wird und welche Bauarten dabei Verwendung finden. Um das Schifffahrtsnetz der BRD möglichst großflächig abzudecken, wurde mit den Wasser- und Schifffahrtsdirektionen bzw. -ämtern und Außenstellen im gesamten Bundesgebiet, einigen Mitarbeitern der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) sowie einzelnen Ingenieurbüros und Stadtverwaltungen Kontakt aufgenommen.

Die Thematik "ingenieurbiologische Ufersicherung" ist bei den Behörden in den meisten Fällen auf großes Interesse gestoßen und wurde weitgehend durch die Bereitstellung von Informationsmaterialien unterstützt. Aus den Gesprächen mit den zuständigen Personen ist die Tendenz zu einer ökologischen und naturnahen Umgestaltung zu erkennen, sie konnte sich bislang jedoch in den meisten Fällen aufgrund bestehender Zweifel hinsichtlich der Gewährleistung des Uferschutzes noch nicht endgültig durchsetzen. Somit beschränkt sich der Einsatz ingenieurbiologischer Maßnahmen im Moment noch auf einzelne Test- und Versuchsstrecken von meist geringer Länge.

Der Großteil der Binnenschifffahrtsstraßen, insbesondere kanalförmige Gewässerabschnitte, sind mit harten Deckwerken unterschiedlicher Ausführungsarten gesichert und weisen keine oder nur geringe naturnahe Strukturen auf. Gewässer, auf denen die Berufsschifffahrt stark zurückging und auf denen überwiegend nur noch Fahrgastschiffe und Sportboote verkehren (z.B. Aller, Leine oder Obere Havel-Wasserstraße), werden zunehmend nur noch dort unterhalten, wo es für die Sicherheit der Bootsfahrt und der Gewässeranlieger unbedingt notwendig ist.

Die Ergebnisse dieser Umfrage sind stark von der Kooperation der zuständigen Ämter und der Bereitstellung aktueller (Zwischen-)Berichte sowie von Dokumentations- und Bildmaterial, sofern solches vorhanden ist, abhängig. Informationsmaterial, welches aus dem Blickwinkel dieser Arbeit unpassend war sowie undetailliert dokumentierte Maßnahmen wurden aussortiert, so dass letztendlich eine Übersicht bestehend aus 12 Anwendungsbeispielen ingenieurbiologischer Ufersicherungen an Bundeswasserstraßen entstand (vgl. Abb. 65). Angaben über das Widerstandsverhalten ingenieurbiologischer Bauweisen in Form von zulässigen hydraulischen Grenzbelastungen konnten bei der Umfrage nicht erhalten werden. Es liegen jedoch Informationen über Erfolg oder Misserfolg der ausgeführten Baumaßnahmen vor, aus denen wichtige Schlüsse für weitere praktische Anwendungen gezogen werden können.

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Zusammenstellung nicht der Gesamtheit der im Bundesgebiet an Schifffahrtsstraßen vorhandenen, ingenieurbiologischen Bauweisen entsprechen muss, sondern nur die im zeitlichen Rahmen der Untersuchung ausfindig gemachten Maßnahmen darstellt.

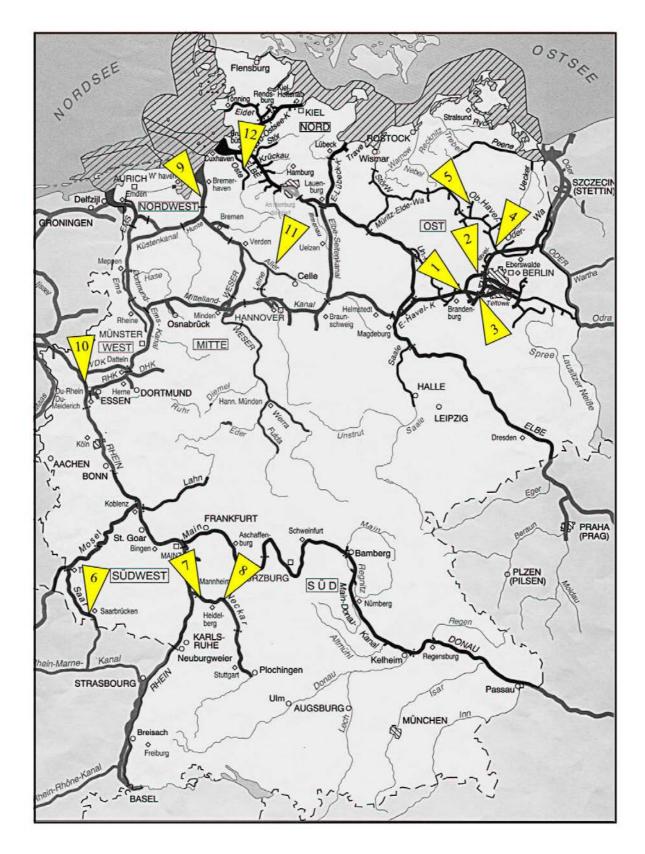


Abbildung 65: Ausführungsbeispiele an Bundeswasserstraßen, an denen ingenieurbiologische Maßnahmen zur Ufersicherung eingesetzt werden.

6.3 Projekte im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost

Im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Ost kommen die in Abbildung 66 dargestellten praktischen Ausführungen (Beispiele 1 – 5) ingenieurbiologischer Bauweisen zur Sicherung von Uferbereichen an Bundeswasserstraßen zum Einsatz. Nachfolgend werden die einzelnen Maßnahmen dokumentiert und, sofern Ergebnisse bezüglich ihrer Eignung an Schifffahrtsstraßen vorhanden sind bzw. Informationen diesbezüglich zur Verfügung standen, hinsichtlich ihres Erfolgs bzw. Misserfolgs analysiert.

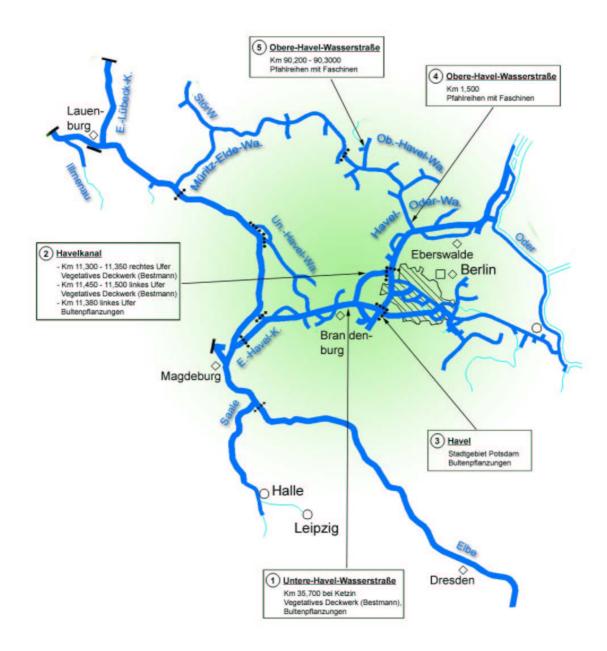


Abbildung 66: Anwendungsbeispiele ingenieurbiologischer Ufersicherungsmaßnahmen im Bereich der WSD-Ost

6.3.1 Beispiel 1: Untere Havel-Wasserstraße

Zuständigkeit: Wasser- u. Schifffahrtsamt (WSA) Brandenburg, BfG Koblenz

Gewässer: Untere Havel-Wasserstraße (UHW)

Gewässerabschnitt: km 35,700 bei Ketzin

Maßnahme: Vegetatives Deckwerk (Bestmann)

Bultenpflanzung

Im Rahmen des Verkehrsprojektes Deutsche Einheit ist als Teil des Projektes 17 der Ausbau der Fluss- und Kanalstrecken von Magdeburg nach Berlin als uneingeschränkte Wasserstraße der Klasse Vb vorgesehen. Um die Eignung verschiedener biologischer Bauweisen zur Uferbefestigung in diesem Gebiet zu ermitteln, wurde an der UHW bei Ketzin (km 35,700) eine Versuchsstrecke eingerichtet. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, Koblenz) wurde beauftragt, in Zusammenarbeit mit dem WSA Brandenburg die fachliche Begleitung zu übernehmen.

Die Versuchsstrecke befindet sich auf einer ca. 300 m langen Insel von 20 – 30 m Breite. Auf einer Länge von ca. 70 m wurden im Oktober 1993 insgesamt 30 Deckwerksmatten (Vegetatives Deckwerk, System Bestmann) in verschiedenen Varianten sowie Bultenpflanzungen in vorhandenes Deckwerk vorgenommen.

Vegetatives Deckwerk besteht aus großflächigen Einzelelementen von 3 m Länge, 2 m Breite und ca. 20 cm Dicke. Der detaillierte Aufbau der Deckwerksmatten ist Kapitel 4.1.13 zu entnehmen.



Abbildung 67: Verlegen des Vegetativen Deckwerks mittels Rahmentraverse (WSA Brandenburg)

Im Zuge des Einbaus der Vegetativen Deckwerke musste auf der Inselkuppe ein Planum hergestellt und die dort vorhandene Vegetation (überwiegend Weidengebüsch und Schilf) abgedeckt werden. Deckwerksmatten mit Lava-Füllung oder mit NA-Schlacke²⁵ wurden gemäß Abbildung 68 unterschiedlich auf dem Planum verlegt (Bereiche C, D, E, F). Eine vom Hersteller empfohlene Bewässerung der Matten im Bereich oberhalb der Wasserwechselzone wurde nicht vorgenommen. Die von den Vegetativen Deckwerken nicht bedeckten Böschungsbereiche und die Seitenbereiche der Teststrecke wurden mit Schlackesteinen bzw. Wasserbausteinen abgedeckt (Bereiche A, G).

D

Α

В

e2: auf 4m Breite (doppelt)

f1: auf 4m Breite (doppelt)

f2: auf 2m Breite

F: Deckwerksmatten (NA-Schlacke) auf Sand

F

E

G

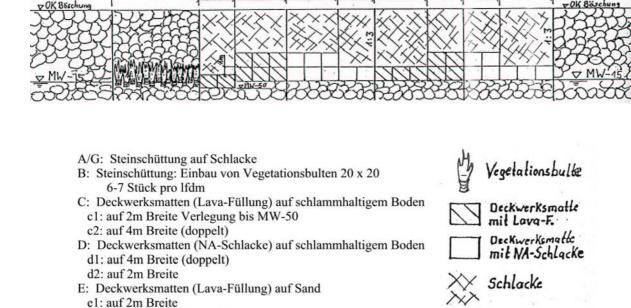


Abbildung 68: Lageskizze der unterschiedlichen Anordnung Vegetativen Deckwerks sowie Bultenpflanzungen an der Versuchsstrecke bei Ketzin, UHW-km 35,700 (WSA Brandenburg)

Um die Entwicklung der Versuchsstrecke zu überprüfen, wurden von der BfG Vegetationsaufnahmen durchgeführt. Im Beobachtungszeitraum von 1993 bis 1996 entwickelten sich die Pflanzen auf den Vegetativen Deckwerken gut, so dass die Vegetationsaufnahme 1997 eine "artenreiche Entwicklung der Ufervegetation" bestätigte. Es wurde

²⁵Eisensilikatschlacke der Norddeutschen Affinerie (NA). NA-Schlacke gehört zur Gruppe der Metallhüttenschlacken (MHS), die u.a. durch Schmelzen von Kupfer aus ihren Erzen gewonnen werden und als Schlackensteine im Wasserbau Verwendung finden (TITTIZER, 1997).

festgestellt, dass sich in den Bereichen oberhalb der Wasserwechselzone trockene Stellen ausgebildet haben, was Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Vegetation hat, während sich im Wasserbereich ein Saum entwickelt hat, der überwiegend aus Wasserschwertlilien besteht.

Ergebnisse des Zwischenberichts (BfG, 1997):

• Bereiche A, G: lose Steinschüttung

Die im September 1993 angelegte lose Steinschüttung im Bereich A war im Jahr 1994 fast nicht mit Pflanzen besiedelt. In den darauffolgenden Jahren 1995 und 1996 breitete sich spärlicher Bewuchs auf der Steinschüttung aus, bis zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme ein Gesamtdeckungsgrad von ca. 70 % ausgemacht wurde. Dieser Bereich wich hinsichtlich Deckungsgrad und Dominanz der Pflanzen erheblich von den Bereichen mit Vegetativem Deckwerk ab.

Die lose Steinschüttung in Bereich G blieb im Zeitraum 1993 – 1996 fast ohne Bewuchs. Als mögliche Ursachen für das Nichtbewachsen der Schüttung werden im Zwischenbericht die Stärke des Wellenschlags, die Dicke des Deckwerks und die Größe der Schüttsteine genannt.

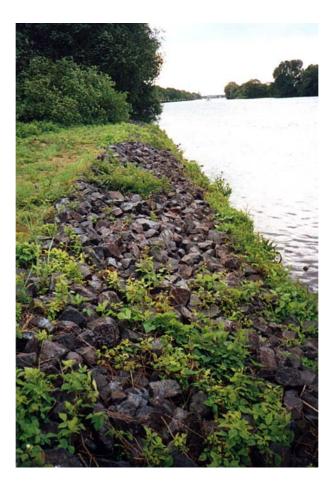


Abbildung 69: Lose Steinschüttung in Bereich G der Versuchsstrecke an der UHW. Der schwache Deckungsgrad des Bewuchses ist deutlich zu sehen (Mai 2001).

• Bereich B: lose Steinschüttung mit Vegetationsbulten

Die zwischen die lose Steinschüttung eingebrachten Einzelpflanzungen (Vegetationsbulten), bestehend aus verschiedenen Pflanzen der Röhrichtzone, entwickelten sich gut und bildeten in der Wasserwechselzone einen dichten Saum aus, der sich aus Seggen, Gelben Schwertlilien und Schilf zusammensetzt. In den Bereichen oberhalb der Wasserwechselzone war auch nach mehreren Jahren (1993 – 1996) kein Bewuchs vorhanden.

 Bereich C: Vegetatives Deckwerk mit Lava-Füllung auf schlammhaltigem Baggerboden

Für die Deckwerke des Bereichs C2 wurde beim Einbau eine Grasuntersaat angelegt und die Anzahl der Röhrichtpflanzen reduziert. Diese Deckwerksmatten waren bereits im Sommer 1994 stark ausgetrocknet. Die schlechte Entwicklung war noch in der Vegetationsperiode 1996 anhand eines Deckungsgrades von nur 20 % und geringer Artenzahl erkennbar.

Die wassernahen Vegetativen Deckwerke lagen während eines Hochwassers im März/April 1994 unter Wasser, was keinen negativen Einfluss auf die Vegetationsentwicklung hatte. Im Bereich C bildete sich eine für die Vegetation an Gewässerufern typische Zonierung der Vegetation in wassernahe und wasserferne Bereiche mit jeweils feuchtigkeits- bzw. trockenheitsliebenden Pflanzenarten aus.



Abbildung 70: Vegetatives Deckwerk in Bereich C der Versuchsstrecke an der UHW. In wasserfernen Bereichen der Böschung entwickelte sich der Bewuchs der Matten nur lückenhaft (Mai 2001).

• Bereich D: Vegetatives Deckwerk mit NA-Schlacke auf schlammhaltigem Baggerboden

In diesem Bereich hat sich die Vegetation gut entwickelt, lediglich im ersten Sommer nach dem Einbau waren die wasserfernen Deckwerke mit ihren Pflanzen leicht ausgetrocknet. In den weiteren Jahren differenzierte sich die Vegetation auf den weiter oberhalb liegenden Deckwerksmatten in einen mit Schilf durchmischten Seggenbestand und einen mit Gelben Schwertlilien, Seggen, Blut-Weiderich und anderen feuchtigkeitsliebenden Arten ausgeprägten Bereich in Wassernähe.

• Bereich E: Vegetatives Deckwerk mit Lava-Füllung auf Sand

In Bereich E wurde teilweise eine Grasuntersaat, vergleichbar Bereich C, angelegt. Diese Teile wiesen noch in späteren Jahren eine weniger dichte Vegetation auf als die Deckwerke mit einer geringeren Grasuntersaat. Eine Trennung in feuchtigkeitsliebende Arten und Pflanzen, die Trockenheit bevorzugen, war auch hier erkennbar.

Bereich F: Vegetatives Deckwerk mit NA-Schlacke auf Sand
 Bereits im Frühjahr nach dem Einbau der Deckwerke entwickelte sich im Bereich F die Vegetation positiv und bildete eine Zonierung aus. Zusätzlich wanderten zu der angesiedelten Vegetation Arten aus der Umgebung zu.

Charakteristisch für die Versuchsstrecke sind folgende Arten, die in unterschiedlichen Uferzonen zu finden sind (BfG, 1997):

gewässernah:	gewässerfern:
Segge	Große Brennnessel
Gelbe Schwertlilie	Segge
Blut-Weiderich	Acker-Kratzdistel
Ufer-Wolfstrapp	Wasserdost
Graue Seebinse	Schwingel
Steifes Barbara-Kraut	Schilfrohr
Schilfrohr	
Sumpf-Vergissmeinnicht	

Im Februar 1995 wurde bei den Vegetativen Deckwerken die Durchwurzelung des Untergrunds kontrolliert. Dazu wurden die Vegetationsmatten mit einem Kran angehoben. Die Pflanzen der Deckwerke waren sehr gut mit dem Untergrund verwurzelt. Es bedurfte großer Kraftanstrengungen, die Vegetativen Deckwerke vom Untergrund zu lösen (BfG, 1997).



Abbildung 71: Blick auf die Versuchsstrecke bei UHW-km 35,700. Die Sicherungsmaßnahmen sind vollständig in den Uferstreifen integriert (Mai 2001).

Betrachtet man die Versuchsstrecke heute, fast 8 Jahre nach dem Einbau der Deckwerksmatten, so ist auf den ersten Blick kein Unterschied zu anderen, unverbauten Uferbereichen festzustellen. Lediglich die Bereiche A und G - die angrenzenden Bereiche loser Steinschüttungen - heben sich negativ von dem sonst üppigen Uferbewuchs der Insel ab. Natürlich vorhandene Vegetation wie Schilf, Weidenbüsche und diverse Röhricht- und Grasarten haben sich besonders im wassernahen Bereich mit den Pflanzen der Vegetativen Deckwerke gut durchmischt und einen durchgängigen, artenreichen Uferbewuchs ausgebildet. Die Steine boten den Bultenpflanzungen guten Schutz zum Anwachsen. Durch intensive Spross- und Rhizombildung vermehrten sich die Pflanzen und verklammerten sich gut mit dem Untergrund und den Steinen. Die Vegetation der Deckwerke, die im oberen Böschungsbereich verlegt wurden und während des Beobachtungszeitraums unterentwickelte, trockene Stellen aufwiesen, konnte sich nur lückenhaft entwickeln und wurde im Laufe der Jahre von lokalen Pflanzengesellschaften zurückgedrängt.

6.3.2 Beispiel 2: Havelkanal

Zuständigkeit: WSA Brandenburg, BfG Koblenz

Gewässer: Havelkanal

Gewässerabschnitt: km 11,300 – 11,350 (rechtes Ufer)

km 11,450 – 11,500 (linkes Ufer)

km 11,380 (linkes Ufer)

Maßnahme: Vegetatives Deckwerk (Fa. Bestmann, Wedel)

Bultenpflanzung (Fa. Würfel, Edewecht)

Weitere Versuchsstrecken wurden am Havelkanal eingerichtet, um die Eignung biologischer Bauweisen zur Ufersicherung im Rahmen des Gewässerausbaus Projekt 17 zu ermitteln. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) übernahm zusammen mit dem WSA Brandenburg die fachliche Betreuung der Versuchsstrecken.

km 11,300 - 11,350

In Versuchsstrecke I wurden zwischen Havelkanal-km 11,300 und km 11,350 insgesamt 20 Deckwerksmatten (Vegetatives Deckwerk, System Bestmann), bestehend aus den Füllmaterialien Lavagestein und NA-Schlacke, längs und quer zur Uferlinie eingebaut (Bereiche a, d bzw. b, c in Abb. 72). Auf der 1:3 geneigten Böschung wurde ein Planum aus Mittelsand und vereinzelten Steineinlagerungen (Deckwerksreste) hergestellt. Die Vegetativen Deckwerke wurden im voll durchwurzelten Zustand angeliefert und eingebaut (vgl. Abb. 73). Nach Aussage des Herstellers waren sie zuvor mindestens eine volle Vegetationsperiode im Anzuchtbecken verblieben und erhielten sechs Monate vor Auslieferung eine Grasuntersaat (BfG, 1997).

Das Umfeld der Einbaustrecke setzt sich im unmittelbaren Kanaluferbereich aus Rohrglanzgras, Hollunder, Weiden und jungen Stiel-Eichen zusammen. Dieser Gehölzstreifen musste beim Anlegen der Teststrecke teilweise beseitigt werden. Die Vegetativen Deckwerke wurden gemäß Planskizze (Abb. 72) im November 1992 mit ihrer Vorderkante 12 cm unter Mittelwasserstand eingebaut.

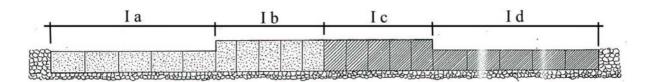


Abbildung 72: Lageskizze zur Anordnung Vegetativen Deckwerks an der Versuchsstrecke I bei Havelkanal-km 11,300–11,350 (BfG, 1997)



Abbildung 73: Vegetationsbestand der vorgezüchteten Deckwerksmatten beim Einbau an der Teststrecke I am Havelkanal (Bestmann GmbH, 1993)

Die folgenden Pflanzen wurden im Vegetativen Deckwerk integriert:

- Schlanksegge
- Sumpfsegge
- Waldsimse
- Rohrglanzgras
- Schilf
- Kalmus
- Sumpfschwertlilie

Die Matten der Bereiche a und b bestanden aus Lava-Füllung und unterschieden sich lediglich in der Verlegerichtung. Ihr Röhrichtbesatz wuchs gut an und wies bereits im Mai 1993 kräftige Pflanzen auf, deren Größe sich von 20 cm im Frühjahr 1993 bis hin zu 80 cm im Sommer 1994 entwickelte.

Aus einer Bestandsaufnahme 1996 ergab sich ein Deckungsgrad von 100 % bei einer Artenzahl von 26 Arten, die dominiert war von Seggen, begleitet von Bittersüßem-Nachtschatten, Zaun-Winde, Rohrglanzgras und anderen Arten. In den

gewässerfernen Bereichen traten die ruderalen (weniger feuchtigkeitsliebenden) Arten in den Vordergrund, was auf den Standort, die Einwanderung aus umliegenden Ackerbereichen und den sandigen Untergrund zurückzuführen ist.

Der Vegetationsbestand der im Mai 1993 verlegten Deckwerke der Abschnitte c und d war von Beginn an lückenhafter und auch die Pflanzen waren nicht so stark entwickelt wie in den Abschnitten a und b. Diese Fehlstellen konnten auch in den darauffolgenden Vegetationsperioden nicht vollständig geschlossen werden. Die Pflanzen selbst entwickelten sich aber normal.

Die an den Rändern der Versuchsstrecke angelegten herkömmlichen Schüttsteindeckwerke waren erst in der zweiten Vegetationsperiode mit Rohrglanzgras besiedelt. Im Frühjahr 1994 lagerte sich aufgrund erhöhter Wasserstände auf allen vier Bereichen Treibgut aus abgestorbenen, holzigen Pflanzenteilen ab, was zur Düngung der Pflanzenbestände beitrug und sich nicht negativ auf die Pflanzendichte auswirkte.

Zwei Jahre nach dem Einbau der Deckwerke wurden zwei Deckwerksmatten mittels Kran und Traverse angehoben, um die Durchwurzelung der Pflanzen mit dem Untergrund zu kontrollieren. Dabei wurde ein relativ geringer Durchwurzelungsgrad festgestellt. Im Zwischenbericht der BfG werden als mögliche Ursachen Verrutschungen zwischen den Vegetativen Deckwerken und dem Untergrund bedingt durch Schifffahrtsbelastungen genannt. An den unter Wasser liegenden Teilen der Deckwerke wurden Algenwatten festgestellt.



Abbildung 74: Verlegen des Vegetativen Deckwerks an der Versuchsstrecke I mittels Kran und Rahmentraverse im Herbst 1992. Der Transport der Matten erfolgte auf dem Wasserweg (Bestmann GmbH, 1993).

km 11,450 – 11,500

Versuchsstrecke II besteht aus acht Deckwerksmatten mit Lava-Füllung (Vegetatives Deckwerk, System Bestmann), die in der Variante "Berme" verlegt wurden. In der Wasserwechselzone wurde dazu eine 0,5 m breite Berme angelegt. Diese Teststrecke wies nach zwei Vegetationsperioden eine Verbreiterung der aktiven Wuchszone um ca. 0,5 m auf (BfG, 1997). Ansonsten decken sich die Erkenntnisse grundsätzlich mit den Feststellungen in Versuchsstrecke Ia, b.

Unterschiede zu der Entwicklung des Vegetationsbestandes der Strecke I waren nicht festzustellen, so dass man davon ausgehen kann, dass die Ausbildung einer Berme keine wesentlichen Auswirkungen auf die Entwicklung der Vegetativen Deckwerke unter den Bedingungen des Havelkanals hat (BfG, 1997). Aus der Vegetationsaufnahme im September 1996 ergab sich ein Bestand von 17 Pflanzen bei einem Deckungsgrad von 100 %.

km 11,380

Auf ca. 25 m Länge sind in diesem Abschnitt in die Reste eines Schlackedeckwerks ca. 100 Vegetationsbulte eingebaut worden. Der Einbau erfolgte im Oktober 1992 in nach Arten gegliederten Pflanzgruppen auf einem Pflanzstreifen von 1,0 – 1,5 m Breite in unmittelbarer Wassernähe. Das Schlackedeckwerk wurde für den Einbau mit bindigem Boden duchsetzt.

Die Vegetationsbulten (vgl. Abb. 75) bestanden aus Seggen, Schilf, Rohrglanzgras, Rohrkolben, Kalmus, Wasserschwaden und Sumpfschwertlillen, die im Wurzelbereich mehrlagig mit Stroh- und Kokosfasern ummantelt waren. Ihr Einbau erfolgte in Abständen von 30×30 cm in die Zwischenräume der Schüttsteine.

In der Anfangsphase waren Pflanzenverluste zu verzeichnen, was vermutlich auf Wasservögel oder Zertreten durch Angler zurückzuführen ist. Ein geringer Teil der Bulten wurde durch Wellenschlag aus der Böschung herausgelöst und abgeschwemmt. In den darauf folgenden Vegetationsperioden entwickelten sich die noch vorhandenen Pflanzen gut, und es entstand ein dichter Vegetationsverband. Besonders gut hatte sich das Rohrglanzgras, das auch an den übrigen Schüttsteindeckwerken am Havelkanal vorherrscht, entwickelt (BfG, 1997).

Ergebnisse der Zwischenberichte

Die Vegetativen Deckwerke sollten mindestens eine volle Vegetationsperiode im Aufzuchtbecken verblieben sein, bevor ein Ausbringen vor Ort erfolgt, da sonst die Gefahr besteht, dass die Füllung aufgrund ungenügender Durchwurzelung ausgespült wird. Da sich die Wuchsintensität gerade in unmittelbarer Wassernähe deutlich von wasserfernen Bereichen abgehoben hat, genügt ein ca. 2 m breiter Verlegestreifen. Dieser Mattenstreifen sollte so angelegt werden, dass eine ständige Benetzung durch auflaufende Wellen gewährt ist. Der obere Bereich ist laut den Beobachtungen am



Abbildung 75: Über mehrere Jahre angezüchteter, voll entwickelter Vegetationsbult. Der Wurzelbereich ist mit Stroh- und Kokosfasern ummantelt (Bestmann GmbH, 1993).

Havelkanal mit weniger feuchtigkeitsliebenden Pflanzen zu bestücken. Das unterschiedliche Wasserangebot an der Uferböschung muss bei der Auswahl der Pflanzen und deren Lage auf dem Deckwerk berücksichtigt werden. Stark wasserabhängige Pflanzen wie Kalmus, Schilf, Wasserschwaden, Seggen oder Flechtbinsen sind im unteren Böschungsbereich einzusetzen. Ein Einbau der Deckwerke im Spätjahr hatte am Havelkanal keine negativen Einflüsse auf die Entwicklung der Pflanzenbestände. Vor dem Einbau ist immer ein durchgehendes Planum als Auflagefläche der Deckwerksmatten herzustellen. Eine vegetationsfreundliche Aufbereitung der Böschung wie z.B. Auflockerung des Untergrundes oder Zugabe von nährstoffreichem Boden wirkt sich dabei positiv auf die Pflanzenentwicklung aus.

Was den Einbau der Vegetationsbulte betrifft, kann festgehalten werden, dass die Bestandsdichte erhöht werden sollte, um eine schnelle Ausbreitung des Wurzelsystems in horizontaler Richtung zu erzielen. Dies kann durch engere Pflanzabstände oder mit einer zusätzlichen Untersaat erreicht werden. Liegt der Einbauort in einem der Öffentlichkeit gut zugänglichen Gebiet, dann sollten Vorkehrungen getroffen werden, damit die Setzlinge in der Anwuchsphase vor Zerstörung durch Zertreten geschützt sind.

6.3.3 Beispiel 3: Potsdamer Havel

Zuständigkeit: Stadtverwaltung Potsdam

WSA Brandenburg - Außenbezirk 1 Potsdam

Gewässer: Potsdamer Havel

Gewässerabschnitt: Potsdamer Havel - Freundschaftsinsel

Jungfernsee Potsdam

Maßnahme: diverse Gehölz- und Röhrichtpflanzungen

Lahnung aus Holz-Palisaden

Potsdamer Havel - Freundschaftsinsel

Die Freundschaftsinsel befindet sich im Stadtgebiet Potsdams und wird von der *Alten Fahrt* und *Neuen Fahrt* (Potsdamer Havel) umströmt (vgl. Abb. 76). Die Ufer der gesamten Insel wurden 1998 auf einer Strecke von insgesamt ca. 3 km Länge mit ingenieurbiologischen Bauweisen neu angelegt. Abschnittsweise sind auch am gegenüberliegenden Ufer, das teilweise noch aus alten Betondeckwerken besteht, einige umweltverträglichen Maßnahmen zum Einsatz gekommen.



Abbildung 76: Potsdamer Havel - Freundschaftsinsel

Der Gewässerquerschnitt der Potsdamer Havel ist im Bereich der Freundschaftsinsel aufgrund der beengten Verhältnisse überwiegend im kombinierten Rechteck-Trapez-Profil ausgebildet. Im Unterwasserbereich ist das Ufer durch Spundwände gesichert, an die sich das sichtbare Böschungsufer, das überwiegend aus losen Steinschüttungen besteht, anschließt. Die Zwischenräume der Steine wurden wassernah mit Röhrichtpflanzungen und weiter oberhalb mit Weidenstecklingen besetzt.

Dabei kamen in der Wasserwechselzone Röhrichtarten wie z.B. Gelbe Schwertlilien, Seggenarten oder Rohrglanzgras zum Einsatz, die bis ca. 15 cm unter Mittelwasserniveau eingepflanzt wurden.

Um die Böschung vor Erosion durch Schiffswellen und die Pflanzen vor Ausspülungen zu schützen, wurden Böschungsschutzmatten in den Untergrund eingebaut. Im Schutz der Steine konnte sich die Vegetation entwickeln. Weitere Stabilität wird nach intensiver Durchwurzelung des Untergrundes und somit natürlicher Verklammerung der Steine durch die Pflanzen erreicht.

Im Wasserwechselbereich wurden an einigen Stellen Vegetationsfaschinen (Röhrichtwalzen) zur Sicherung der Böschung eingebaut. Sie bestehen aus gepresstem, organischem Fasermaterial (z.B. Kokos) und schützen durch ihre filterartige Wirkung den Untergrund vor Erosion feinster Bodenteilchen. Aufgrund ihrer hohen Dichte stellen sie durchaus eine Alternative zu massivem Steinverbau dar und fördern die Entwicklung einer naturnahen Böschungsstabilisierung durch Pflanzen (Bestmann GmbH, 1993).



Abbildung 77: Ufergestaltung entlang der Alten Fahrt (Freundschaftsinsel) im Stadtgebiet Potsdam (Mai 2001)

Drei Jahre nach der Umbaumaßnahme lässt sich festhalten, dass sich entlang des Ufers der Freundschaftsinsel, trotz der aus hydraulischer Sicht notwendigen, teilweise "harten" Sicherungsmaßnahmen, ein grüner Pflanzenstreifen ausgebildet hat, der das Steindeckwerk fast vollständig unter sich versteckt hat.

Lahnung aus Holz-Palisaden

Der Jungfernsee stellt als Wasserstraßenkreuzung bei Potsdam das "Tor" nach Berlin dar und verbindet den Sacrow-Paretzer-Kanal mit der Berliner Südtrasse (Teltowkanal) und der Berliner Nordtrasse (UHW). Die Ufer des Jungfernsees sind über weite Strecken mit breiten Schilfbeständen bewachsen, die vielerorts von vorgelagerten Lahnungen aus Holz-Palisaden geschützt werden (vgl. Abb. 78).

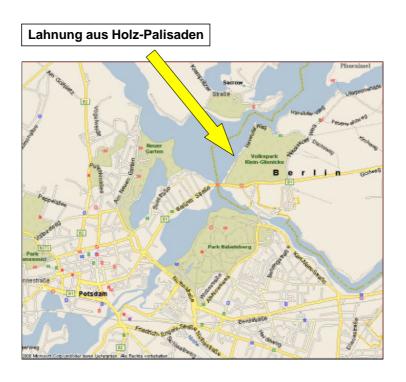


Abbildung 78: Große Uferbereiche des Jungfernsees sind durch Palisaden-Lahnungen geschützt

Die vorgelagerten Lahnungen brechen die von Wind und Schiffen verursachten Wellen und bremsen ihre Bewegung in Richtung der Ufer ab. Zusätzlich stellt der Schilfsaum einen guten Schutz vor Wellen dar. Er ist elastisch und bewegt sich mit der Strömung mit, die dadurch weiter abgebremst wird. Die Lahnungen am Jungfernsee verlaufen nicht geradlinig parallel zur Uferlinie, sondern sind leicht wellenförmig, teilweise in 20 – 30 m Abstand vom Ufer ausgeführt (vgl. Abb. 79). Sie simulieren dadurch eine natürlichere Uferform mit kleinen Buchten und Vorsprüngen. Hinter den Palisaden entsteht eine beruhigte Wasserzone, die einen sehr wertvollen Lebensraum für Tiere und einen idealen Laichplatz für Fische darstellt. Durch Auflandungen in dieser Zone bilden sich stellenweise Flachwasserbereiche aus, die wiederum die Ausbreitung der Schilfbestände fördern.



Abbildung 79: Vorgelagerte Lahnung aus Holz-Palisaden zum Schutz des Uferbereichs entlang des Jungfernsees (Mai 2001)



Abbildung 80: Im Schutz der Palisaden-Lahnungen entwickeln sich dichte Schilfbestände (Mai 2001).

6.3.4 Beispiel 4: Obere Havel-Wasserstraße

Zuständigkeit: WSA Eberswalde - Außenbezirk Canow

Gewässer: Obere Havel-Wasserstraße (OHW)

Gewässerabschnitt: km 1,500

Maßnahme: Pfahlreihen mit Faschinen (Faschinenlängsverbau)

Im Zuständigkeitsbereich des Außenbezirks (AB) Canow wird die Obere-Havel-Wasserstraße kaum noch von der Berufsschifffahrt befahren. Die auftretenden Uferbelastungen werden überwiegend von der Sportboot- und Fahrgastschifffahrt verursacht. Im AB-Canow werden für Ufersanierungsmaßnahmen wie z.B. Steinschüttungen für Kolkverbau oder Hinterfüllung von Pfahlreihen jährlich bis zu 500 t Schüttsteine und 200 t Splitt verbaut. Es kamen in der Vergangenheit auch ingenieurbiologische Uferschutzbauweisen in Form von Vegetationsfaschinen (Fa. Bestmann) zur Anwendung, deren Einsatz sich aus Sicht der Schutzwirkung bewährt hatte. Aus Kostengründen ist man aber von dieser Bauweise an der OHW abgekommen. Innerhalb von vier bis fünf Jahren waren die Vegetationsfaschinen von der örtlichen Ufervegetation überwuchert. Die Pflanzen der Faschinen wurden zurückgedrängt und die Einbaustellen konnten nur noch schwer von den angrenzenden Bereichen unterschieden werden. Aufgrund der natürlichen Schnellwüchsigkeit wird der Uferstreifen seither der natürlichen Sukzession überlassen, sofern kein dringender Eingriff aus Gründen der Sicherheit erforderlich ist.

OHW-km 1,500

Eine alte, naturgemäße Maßnahme, die an der Oberen Havel-Wasserstraße seit über 100 Jahren erfolgreich zum Schutz der Ufer praktiziert wird, ist der Faschinenlängsverbau. Im Sommer 1998 wurde unterhalb Bredereiche bei OHW-km 1,500 (linkes Ufer) ein Uferabschnitt in dieser Bauweise gesichert. Dabei konnte auf Erkenntnisse der Versuchsstrecke am Kammerkanal (vgl. Kap. 6.3.5), die zwei Jahre zuvor eingerichtet wurde, zurückgegriffen werden.

Parallel zur Uferlinie eingerammte Doppel-Pfahlreihen, die mit Totfaschinen ausgefüllt werden, bilden das Gerüst des Faschinenlängsverbaus (vgl. Abb. 83). Zur Herstellung der Faschinen werden dünne Kiefernstämme von ca. 6 – 7 m Länge verwendet. Das Holz stammt aus Beständen der örtlichen Forstwirtschaft und wird in Handarbeit mit Draht zu Bündeln von 20 cm zusammengebunden. Nachdem die Faschinen am Einbauort zwischen den vorgerammten Pfahlreihen eingebracht sind, werden die wasserseitigen Pfähle mit Drahtschlingen rückwärtig in der Uferböschung verankert. Der Hohlraum zwischen Längsverbau und bestehendem Ufer kann anschließend mit Erdreich aufgefüllt werden (vgl. Abb. 84). Ein hinter den Faschinen angeordnetes Bauvlies trennt die Faschinen und den Bereich zur Böschung hin ab und schützt die Auffüllung vor Ausspülungen. In regelmäßigen Abständen werden Wildausstiege in den sonst

durchlaufenden Faschinenverbau eingebaut.

Abbildung 81 zeigt den Faschinenlängsverbau während der Bauphase. In Abbildung 82 ist der Uferstreifen zwei Jahre nach Fertigstellung der ingenieurbiologischen Maßnahme zu sehen.



Abbildung 81: Faschinenlängsverbau an der OHW bei Bredereiche in Form von Pfahlreihen mit Faschinen während der Bauphase im Sommer 1998 (WSA Eberswalde)



Abbildung 82: Zwei Jahre nach Herstellung des Längsverbaus (Sommer 2000) ist eine intensive Begrünung des Gewässerrandstreifens vorhanden (WSA Eberswalde).

6.3.5 Beispiel 5: Obere-Havel-Wasserstraße

Zuständigkeit: WSA Eberswalde - Außenbezirk Canow

Gewässer: Obere-Havel-Wasserstraße (Kammerkanal)

Gewässerabschnitt: km 90,200 – 90,300

Maßnahme: Pfahlreihen mit Faschinen

OHW-km 90,200 - 90,300 Kammerkanal

Am Kammerkanal wurde im Jahr 1996 auf einer Länge von 100 m eine Versuchsstrecke der Bauweise Pfahlreihen mit Faschinen eingerichtet. Die Einbaumethode und Vorgehensweise ist mit den in Kapitel 6.3.4 gemachten Angaben identisch. Um eine intensive Durchwurzelung der Hinterfüllung zu erreichen und einen besseren Erosionsschutz zu gewähren, wurden am Kammerkanal Vegetationsfaschinen (Bestmann) direkt hinter dem Faschinenverbau angeordnet (vgl. Abb. 84). Die Entwicklung des Bewuchses nach einigen Vegetationsperioden hat gezeigt, dass diese zusätzliche Maßnahme aufgrund der Schnellwüchsigkeit der Ufervegetation am Kammerkanal nicht notwendig ist.



Abbildung 83: Entladen und Verlegen der Faschinen an der Einbaustrecke am Kammerkanal (Mai 1996). Weiter hinten wird das Bauvlies als Trennlage verlegt (WSA Eberswalde).



Abbildung 84: Wasserseitig sind die eingebauten Röhrichtwalzen zu sehen (Mai 1996). Abschließend wird das Faschinenpackwerk mit Bodenmaterial hinterfüllt (WSA Eberswalde).

Aus den Erfahrungen des AB-Canow lässt sich zusammenfassen, dass die Ufersicherung durch Faschinenlängsverbau an den beschriebenen Gewässerabschnitten der OHW (Beispiele 4 und 5) eine erfolgreiche ingenieurbiologische Maßnahme darstellt. Die neugestalteten Uferbereiche der Versuchsstrecken entwickelten sich in relativ kurzer Zeit zu einem gut durchwurzelten Röhricht- und Gehölzsaum, der mit Hilfe der Totfaschinen gegen Wellen- und Strömungsangriffe der Schifffahrt guten Schutz bietet.

Der Faschinenlängsverbau ist eine sehr arbeits- und somit sehr lohnkostenintensive Bauweise, da fast alle Arbeitsschritte in Handarbeit getätigt werden müssen (z.B. Forstarbeiten, Binden der Faschinen bzw. Einbau). Um eine langfristige Sicherung der Uferbereiche zu gewährleisten, müssen die Faschinen nach ca. 7 Jahren nachgepackt werden, da das Holz stark der Verrottung ausgesetzt ist. Hinsichtlich der begrenzten Haltbarkeit von ohnehin nur 12 – 15 Jahren bedeutet dies einen hohen Unterhaltungsaufwand. Aus Gesprächen mit Veranwortlichen der WSA Eberswalde war eine zukünftige Tendenz zu kosten- und unterhaltungsgünstigeren Bauweisen wie z.B. Steinschüttungen zu erkennen.

6.4 Projekte im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest

Im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest kommen die in Abbildung 85 dargestellten praktischen Ausführungen (Beispiele 6 – 8) ingenieurbiologischer Bauweisen zur Sicherung von Uferbereichen an Bundeswasserstraßen zum Einsatz. Nachfolgend werden die einzelnen Maßnahmen dokumentiert und, sofern Ergebnisse bezüglich ihrer Eignung an Schifffahrtsstraßen vorhanden sind bzw. Informationen diesbezüglich zur Verfügung standen, hinsichtlich ihres Erfolgs bzw. Misserfolgs analysiert.



Abbildung 85: Anwendungsbeispiele ingenieurbiologischer Ufersicherungsmaßnahmen, die im Bereich der WSD-Südwest zum Einsatz kommen

6.4.1 Beispiel 6: Saar

Zuständigkeit: WSA Saarbrücken

Gewässer: Saar

Gewässerabschnitt: km 76,900 – 80,200 bei Völklingen

Maßnahme: Weidenspreitlage

Die Saar ist ein Mittelgebirgsfluss mit rasch wechselnden Wasserständen, die stark von lokalen Witterungseinflüssen bestimmt werden können. In Tabelle 14 sind charakteristische Abflüsse der Saar aufgeführt. Die bei höchstem schiffbarem Abfluss (HSQ) auftretende mittlere Fließgeschwindigkeit erreicht im betrachteten Gewässerabschnitt den maximalen Wert von 1,5 m/s (km 77,100).

Die Ufer der Saar sind über weite Strecken mit hartem Deckwerk befestigt. An vielen Stellen liegt die Oberkante der Böschung lediglich 1 m über Stauwasserspiegel, was bedingt durch die Böschungsneigung (1:2) nach Aussagen des WSA Saarbrücken bisher keine alternativen Ufersicherungsmethoden zuließ.

Tabelle 14: Charakteristische Abflüsse der Saar (WSA Saarbrücken)

Im Rahmen des Ausbaus der Saar (Teilstrecke Hostenbach-Luisenthal) wurden aufgrund der neuen Regelbauverordnung die bestehenden Ufer (Neigung 1:2) umgestaltet und mit Neigungen zwischen 1:2,5 und 1:3 ausgebildet. Auf einer Länge von ca. 3 km entlang der Gemarkung Völklingen wurden im Zuge dieser Neugestaltung Weidenspreitlagen oberhalb des Stauwasserspiegels angeordnet. Die Anfertigung der Spreitlagen entspricht der in Kapitel 4.1.6 beschriebenen Vorgehensweise. Die Ausbildung der Ufer bei Vorschüttung erfolgte nach Abbildung 86.

Erkenntnisse über die Vegetationsentwicklung und die Stabilität der Weidenspreitlagen sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorhanden, da die Baumaßnahme erst zum Jahreswechsel 2000/2001 in dem beschriebenen Teilabschnitt fertiggestellt wurde.

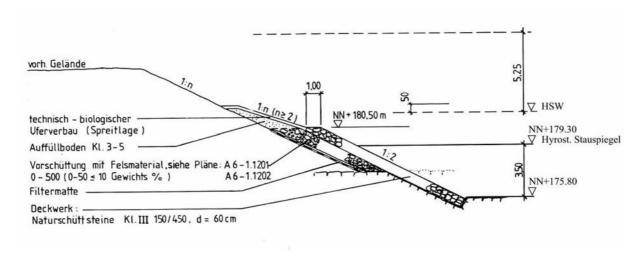


Abbildung 86: Regelquerschnitt des neugestalteten Böschungsufers bei Vorschüttung (WSA Saarbrücken, 1997)

6.4.2 Beispiel 7: Neckar

Zuständigkeit: WSA Heidelberg

Gewässer: Neckar

Gewässerabschnitt: km 12,800 bei Neckarhausen

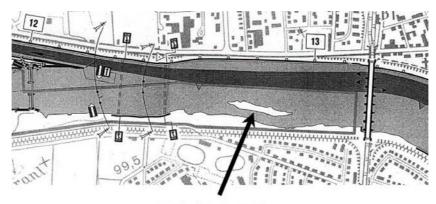
Maßnahme: Pfahlreihen mit Packwerk - Neckarhäuser Insel

Unter Aufsicht des WSA Heidelberg wurden im Zuständigkeitsgebiet der WSA in der Vergangenheit immer wieder verschiedene ingenieurbiologische Bauweisen wie z.B. Flechtzäune, Vegetationsmatten oder Pfahlreihen in Zusammenarbeit mit der BAW und der BfG an kleineren Gewässerabschnitten getestet. Meist befinden sich diese Versuchsstrecken allerdings an Neckaraltarmen oder Nebenflüssen und wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Erwähnenswert ist eine 2 – 3 km lange Teststrecke zur "Bauweise Null" (vgl. Kap. 4.1.20) in der Nähe des Kernkraftwerkes Obrigheim. In diesem Bereich war das Neckarufer ursprünglich mit drahtummantelten Steinmatratzen befestigt. Durch die moderne, ökologisch orientierte Denkweise "Lassen statt Machen" wurde der Kauf von Ackerland als Ufervorland vorangetrieben, was aus finanzieller Sicht nur einen Bruchteil der Kosten für die Erneuerung des Deckwerks ausmachte. Im weiteren Zuge wurde die Drahtummantelung der Steine entfernt und der natürlichen Überwucherung freien Lauf gelassen. Nach jüngsten Beobachtungen konnte eine erfolgreiche Ansiedlung verschiedener Pflanzenarten in den flachen Uferbereichen festgestellt werden (WSA Heidelberg).

Pfahlreihen mit Packwerk - Neckarhäuser Insel

Das der Fahrspur zugewandte Ufer der ca. 200 m langen Neckarhäuser Insel wurde durch vorgelagerte Doppelpfahlreihen mit Packwerk gesichert. Der Zwischenraum der Holz-Pfahlreihen ist mit Reisig und Steinschüttung bis knapp über den Mittelwasserspiegel aufgefüllt. Als Filterschicht zum Schutz vor Ausspülungen des dahinterliegenden Flachwasserbereichs wurden Jute- bzw. Kokosmatten eingebaut. Weitere Details zum Aufbau der Pfahlreihen können dem Projekt bei Ebersbach (vgl. Kap. 6.4.3) entnommen werden.



Neckarhäuser Insel

Abbildung 87: Neckarhäuser Insel bei Neckar-km 12,800 (WSA Heidelberg)

Die Pfahlkonstruktion bricht die von den vorbeifahrenden Schiffen verursachten Wellen und verzögert die auf die Ufer auflaufende Strömung. Zusätzlich entsteht dadurch eine ausgeprägte, beruhigte Wasserzone mit Biotopcharakter, die vielen Tieren und Pflanzenarten optimalen Lebensraum bietet.



Abbildung 88: Pfahlreihen mit Packwerk zum Schutz der Neckarhäuser Insel vor Schiffswellen (WSA Heidelberg)

6.4.3 Beispiel 8: Neckar

Zuständigkeit: Stadt Eberbach, WSA Heidelberg,

Naturschutzbund Eberbach (NABU)

Gewässer: Neckar

Gewässerabschnitt: km 57,800, Flächenhaftes Naturdenkmal "Schilfgebiet"

Maßnahme: Pfahlreihen mit Packwerk

Vegetationsmatten (Fa. Bestmann, Wedel)

Die Fließstrecke des Neckars innerhalb der Gemarkung Eberbachs umfasst eine Strecke von ca. 13 km. Bereits in den 80er Jahren erfolgten auf Initiative des örtlichen Naturschutzbundes, unterstützt von der Stadt Eberbach und dem WSA Heidelberg, an verschiedenen Abschnitten des Neckarufers zahlreiche Pflanzungen mit auetypischen Gebüschen. Dadurch sollte dem Neckarufer so viel an Natürlichkeit zurückgegeben werden, wie es unter den Bedingungen einer Bundeswasserstraße möglich ist. Gleichzeitig wurden Ufergrundstücke gekauft oder langfristig angepachtet, um die notwendigen Maßnahmen durchführen zu können. Durch diesen Einsatz konnten fast 4 km der insgesamt 26 km umfassenden Uferlinie der Gemarkung Eberbach entlang des Neckars in Uferrandstreifen mit 4 – 10 m Breite umgewandelt werden (NABU Eberbach, 2000).



Abbildung 89: Üppig bewachsener Uferstreifen mit vorgelagerter Flachwasserzone am Beispiel des "Schilfgebietes" in Eberbach (Stadt Eberbach)

Flächenhaftes Naturdenkmal "Schilfgebiet" - km 57,800

Bereits im Jahr 1980 wurde der Röhrichtbestand am linken Ufer unter- und oberhalb der Eberbacher Neckarbrücke (km 57,800) vom Landratsamt des Rhein-Neckar-Kreises als Flächenhaftes Naturdenkmal (FND) ausgewiesen. Das insgsamt ca. 0,8 ha große Gebiet galt als Restbestand eines naturnahen Uferbereichs, dessen Vegetation, bestehend aus Flussröhrichten, Schilfbeständen, Schwimmblattgesellschaften, und dessen stark bedrohte Vogelfauna geschützt werden sollten.

Im Laufe der nachfolgenden Jahre war ein zunehmender Rückgang der Röhrichtbestände und der einst einzigartigen Vogelbestände zu beobachten. Diese Entwicklung führte bis zur Bedrohung der Artenbestände, denn der Röhrichtgürtel war auf kleinste Reste zusammengeschmolzen und die charakteristischen Vogelarten waren verschwunden.

Die möglichen Ursachen dieser Entwicklung sind breit gefächert und sind wohl in der zunehmenden Schifffahrt und den Hochwasserereignissen der Jahre 1993/94 zu suchen. Dauerhafter Wellenschlag der vorbeifahrenden Schiffe nagte wasserseitig am Naturdenkmal und landseitig führte jedes Hochwasser zu neuen Geländeauflandungen. Durch den mitgeführten Schlamm wurde das Wachstum von Stauden und Gebüsch begünstigt und unerwünschte Neophyten (gebietsfremde Pflanzen) drangen in den Naturhaushalt ein und bedrohten den Schilfbestand. Diese gravierenden Veränderungen gaben den Verantwortlichen Anlass, Schutzmaßnahmen für das Schilfgebiet zu ergreifen.

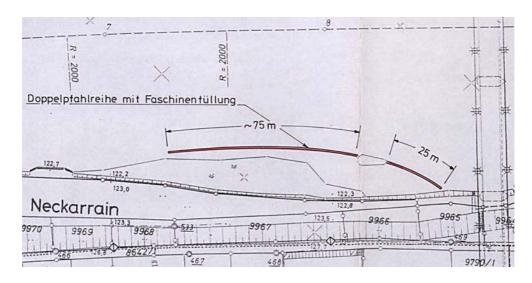


Abbildung 90: Planvorlage zur Uferschutzmaßnahme des Flächenhaften Naturdenkmals "Schilfgebiet" bei der Neckarbrücke im Stadtgebiet Eberbach, Neckarkm 57,800 (Stadt Eberbach)

Als Lösungsvariante kam eine Doppelpfahlreihe aus Eichenstämmen in Betracht, die vergleichbar einer Lahnung dem Uferbereich vorgelagert wurde (vgl. Abb. 90 und 93). Uferschutz durch Pfahlreihen ist eine alte Bauweise, die am Neckar schon vor Jahrzehnten angewendet wurde.

1996 wurden auf einer Länge von 100 m Pfähle eingerammt und mit einer Packung bestehend aus Schüttsteinen, Kies, Ufermaterial und eingebundenen Weidenruten bis ungefähr 30 cm über Mittelwasserniveau aufgefüllt (vgl. Abb. 91). Ein Querschnitt der Doppelpfahlreihen ist in Abbildung 92 dargestellt. Der Bereich zwischen den Pfahlreihen und der Uferlinie ist 1997 bis ca. 10 cm unter die Wasserlinie mit Neckarsubstrat aufgefüllt worden. Dadurch erhielt der Gewässerabschnitt Flachwassercharakter.



Abbildung 91: Pfahlreihen zum Schutz des Schilfgebietes in Eberbach (Stadt Eberbach)

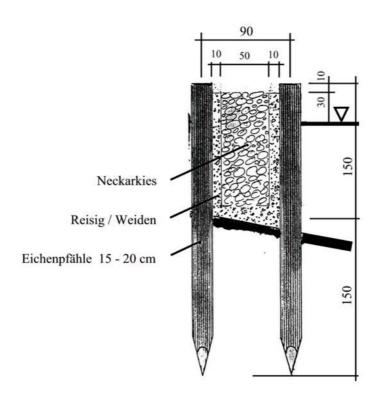


Abbildung 92: Aufbau der Doppelpfahlreihen mit Zwischenfüllung (Stadt Eberbach)



Abbildung 93: Blick von der Neckarbrücke auf das Schilfgebiet Eberbach während der Einbauphase des Packwerks. Das Material wurde wasserseitig angeliefert (Stadt Eberbach).

Die norddeutsche Firma *Bestmann GmbH, Ingenieurbiologie* hatte zwei Jahre zuvor Saatgut und Rhizome vom Unteren Neckar geerntet, um standortgerechte Gesellschaften anzüchten zu können. Die Gefahr der Artenverfälschung der Schilfbestände war damit auf ein Minimum reduziert. Das Schilf wurde auf Kokosmatten vorgezogen und im Sommer 1997 auf einer Fläche von 288 m² Matte an Matte in der Flachwasserzone eingebaut. Durch Abspannungen mit verrottbaren Sisalseilen bekamen die 1 m² großen Vegetationsmatten auf dem aufgeschütteten Substrat ihren Halt. Die bepflanzte Fläche beschränkt sich auf den westlichen Bereich des Schutzgebietes, um die Ausbreitung anderer Pflanzen bzw. ein Vermischen mit anderen Pflanzenarten wie z.B. Binsen oder Teichrosen in der noch verbliebenen, freien Wasserfläche zu ermöglichen.

Das Projekt "Schilfgebiet Eberbach" hat, was die Sicherung der Ufer durch ingenieurbiologische Maßnahmen und den Einbau von Vegetationsmatten betrifft, Pioniercharakter am Neckar. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit von Schilf, bei dem bereits das Abknicken der Halme zum Absterben führen kann, war der Transport und der Einbau der Matten äußerst schwierig (BERNECKER, 1999).



Abbildung 94: Im Einbaubereich der Vegetationsmatten hat sich ein dichter Schilfgürtel ausgebildet, während der Bereich in Nähe der Brücke Freiraum für weitere Artenansiedlungen bietet. Setzungen der Faschinen-Füllung erfordern ein Nachpacken zwischen den Pfahlreihen (Stadt Eberbach).

Fazit

Heute, ungefähr 4 Jahre nach Fertigstellung der Pfahlreihen, lässt sich ein äußerst positives Fazit ziehen. Die vorgelagerte Doppelpfahlreihe ist am Neckar eine effektive Maßnahme zum Schutz des Uferbereichs vor Wellen- und Strömungsangriffen.

Auch der Besatz mit vorgezüchteten Vegetationsmatten aus Schilf hat sich bewährt. Die Schilfbestände entwickelten sich im Schutz der Pfahlreihen ohne größeren Ausfall gut und kräftigen die Flachwasserzone mit ihren Wurzeln.

Aus mehreren Bestandsaufnahmen wurde deutlich, dass in den Folgejahren der Umgestaltung wieder viele seltene Tierarten wie z.B. Teichrohrsänger, Eisvogel, Rohrammer oder Wasserfrösche im FND "Schilfgebiet" heimisch wurden. Der dichte Röhrichtsaum bietet den Tieren Lebensraum und Nistmöglichkeiten.

Über den Widerstand gegen Hochwasserereignisse konnte zum Zeitpunkt der Recherche noch keine Aussage gemacht werden. Es bleibt abzuwarten, wie sich erhöhte Wasserstände auf das "Schilfgebiet" auswirken werden (BERNECKER, 1999).

6.5 Projekte im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest

Im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest kommen entlang der Weser abschnittsweise ingenieurbiologische Bauweisen zur Sicherung der Uferbereiche zum Einsatz (vgl. Abb. 95). Nachfolgend wird die Situation an der Weser erläutert und soweit Informationen zur Verfügung standen werden die entsprechenden Schutzmaßnahmen beschrieben (Beispiel 9).

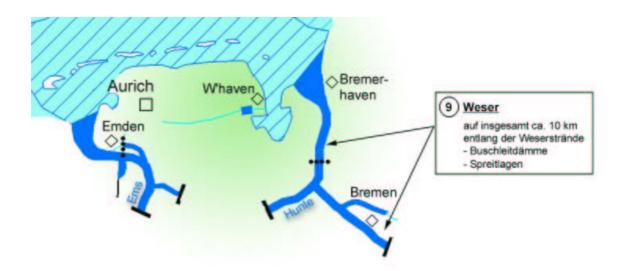


Abbildung 95: Anwendungsbeispiele ingenieurbiologischer Ufersicherungsmaßnahmen, die im Bereich der WSD-Nordwest zum Einsatz kommen

6.5.1 Beispiel 9: Weser

Zuständigkeit: WSA Bremen, Außenbezirk (AB) Habenhausen

Gewässer: Unterweser

Gewässerabschnitt: Strandbereiche im gesamten Zuständigkeitsgebiet

z.B. Stadtgebiet Bremen (beidseitig), Brake

Maßnahme: Buschleitdämme

Spreitlagen

Die Unterweser steht stark unter dem Einfluss der Gezeiten. An vielen Stellen können Wasserstandsunterschiede von 3 bis 4m (Tidehub) auftreten, die Geschwindigkeitsänderungen, Porendruckdifferenzen im Boden sowie Sog- und Schwallwellen mit sich bringen. Diese Vorgänge überlagern sich an schmalen Gewässerabschnitten mit zusätzlichen Belastungen aus der Schifffahrt.

An den Ufern der Unterweser, vor allem im Wasserwechselbereich, sind deshalb

überwiegend nur Schüttsteine zur Ufersicherung zu finden. Es gibt für diese Bereiche noch keine alternativen Schutzmaßnahmen, die die ständig wechselnde, enorme Unter- und Überstauung dauerhaft aushalten würden (WSA Bremen).

Ingenieurbiologische Ufersicherungsmaßnahmen sind nach Mitteilungen des WSA Bremen an der Unterweser nur dort möglich, wo die Uferbereiche weit genug vom Fahrwasser entfernt sind, so dass die Schifffahrt keinen Einfluss mehr auf die Ufer hat. Dies ist z.B. an den meist flachen Ufern der Fall (Neigung 1:10), zu deren Sicherung vorgelagerte Buschleitdämme parallel zur Uferlinie angeordnet werden. Die oberen Strandabschnitte werden durch mehrere Spreitlagen aus totem Astwerk gegen Erosion geschützt.

Im Zuständigkeitsgebiet des Außenbezirks Habenhausen lassen sich die Weserufer grob in Schüttsteindeckwerk (ca. 70%) und Strände (ca. 30%) unterscheiden. Von den Strandbereichen sind insgesamt 10km mit Buschleitdämmen gesichert. Diese Maßnahmen sind sehr arbeitsaufwendig und sehr lohnkostenintensiv, da fast alles in Handarbeit gemacht werden muss. Belastungen durch Eisgang im Winter oder Sturmfluten setzen den Buschdämmen besonders zu, so dass regelmäßig nachgepackt oder sogar erneuert werden muss (vgl. Abb. 96).



Abbildung 96: Nachgepackter Buschleitdamm zur Sicherung der Weserufer in Strandbereichen (WSA Bremen)

Buschleitdämme bestehen aus mehreren Packlagen Astwerk oder Faschinen und werden im Niedrigwasserbereich verlegt. Sie werden wie eine Spreitlage mit Pfählen im Untergrund befestigt (8 – 10 St./m²) und mit Draht verspannt. Die Buschleitdämme erreichen eine Breite von 2 bis 5 m und werden sowohl zum Schutz einzelner Stellen als auch zur weitläufigen Sicherung ganzer Strandbereiche eingesetzt und sind teilweise mehrere hundert Meter lang.

In den oberen Bereichen der Uferstrände werden Spreitlagen zum flächigen Schutz der Sandböschungen ausgelegt. Zwischen den einzelnen Ruten können Pflanzen durchwachsen und so im Laufe ihrer Entwicklung dem sandigen Untergrund Schutz vor Wasser- und Winderosion bieten.

Nach 3 bis 8 Jahren werden künstliche Ufervorspülungen vorgenommen, um der Ufererosion entgegenzuwirken und die Buschdämme wieder mit Sand zu überdecken. So erhalten sie eine 30 – 50 cm hohe Sanddeckschicht, die sie anfangs vor Angriffen schützt. Nach einiger Zeit wird der Sand allerdings nach und nach abgetragen und die Buschlagen werden freigelegt (vgl. Abb. 97). Die "eingegrabenen" Buschlagen erreichen eine Aufbauhöhe von ca. 2 m.



Abbildung 97: Übersandeter Buschleitdamm (WSA Bremen)

6.6 Projekte im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion West

Im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion West wurde am Rhein ein Parallelwerk unter Verwendung ingenieurbiologischer Bauweisen errichtet (vgl. Abb. 98). Nachfolgend wird der Bau des Parallelwerks in groben Zügen erläutert, wobei der Schwerpunkt auf den ingenieurbiologischen Sicherungsmaßnahmen liegt (Beispiel 10). Diese werden, soweit Informationen zur Verfügung standen, dokumentiert und erste Erkenntnisse im Umgang mit den Baumaterialien beschrieben.

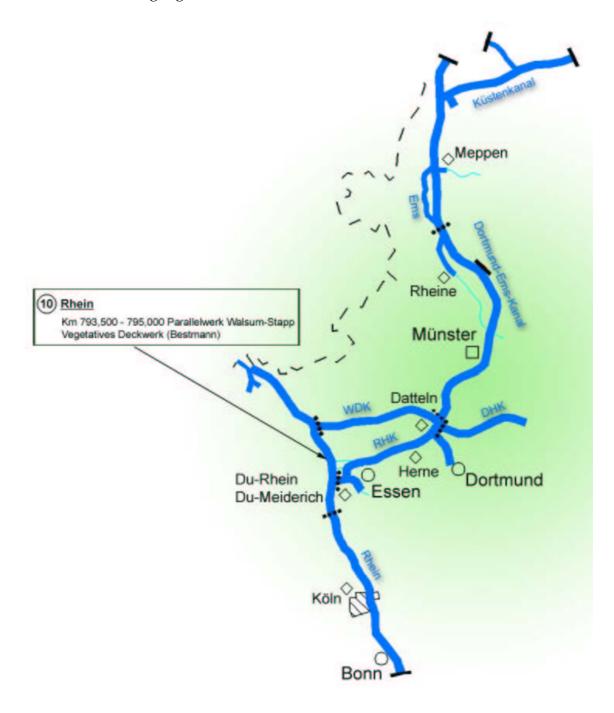


Abbildung 98: Anwendungsbeispiele ingenieurbiologischer Ufersicherungsmaßnahmen, die im Bereich der WSD-West zum Einsatz kommen

6.6.1 Beispiel 10: Rhein

Zuständigkeit: WSA Duisburg-Rhein, Außenstelle Wesel

Gewässer: Rhein

Gewässerabschnitt: km 793,500 – 795,000

Maßnahme: Vegetatives Deckwerk (Fa. Bestmann, Wedel)

Initialbepflanzung (Fa. LBN, Mönchengladbach)

Natürliche Sukzession

Durch die Eingriffe und durch die Veränderungen der Morphologie des Rheins in den letzten 100 Jahren ist das Abflussverhalten nachhaltig beeinflusst worden. Dies zeigte sich in Form von tieferen Einkerbungen der Gewässersohle, Erosion sowie Sedimentation an den Böschungen und der Sohle. Der Geschiebetransport geriet ins Ungleichgewicht. Mit dem Bau des Parallelwerks Walsum-Stapp soll erreicht werden, dass sich die Strömungsverhältnisse stabilisieren und sich letztlich ein Gleichgewicht zwischen Erosion und Sedimentation einstellt. Dadurch sollen künftig aufwendige Bagger- und Unterhaltungsmaßnahmen weitgehendst überflüssig und die Schifffahrt auf dem Rhein ohne Behinderung ermöglicht werden. Das Projekt sollte eine wasserbauliche Maßnahme darstellen, bei der die hydraulischen Aspekte in gleichem Maße wie ökologische Erfordernisse berücksichtigt werden.

Parallelwerk Walsum-Stapp, km 793,500 – 795,000

Der Bau des Parallelwerks Walsum-Stapp ist Bestandteil des Sohlenstabilisierungsprogramms "Wiederherstellung und Erhaltung eines beständigen Gewässerbettes am Niederrhein". Im Bereich von Rhein-km 793,500 bis 795,000 bildeten sich in den letzten Jahrzehnten immer wieder Untiefen und Fehlbreiten bis zu 35 m in der rechten Fahrrinne, so dass die Sicherheit des intensiven Schiffsverkehrs beeinträchtigt wurde. Aus hydraulischen Untersuchungen sowie ein- bzw. zweidimensionalen Strömungssimulationen wurde die angestrebte Verbesserung und Stetigkeit der Abflussverhältnisse im Mittelwasserbett durch den Bau eines Parallelwerks bestätigt. Ein Parallelwerk als wasserbauliche Lösung erhielt den Vorzug vor Buhnen, da Buhnen als Regulierungsinstrumente in diesem Gewässerabschnitt zu einer unerwünschten Kolkbildung führen würden und sich durch den von ihnen verursachten Querschnittsverlust hier nicht hochwasserneutral verhalten würden. Parallelwerke gewährleisten eine über die Breite gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung ohne Ablösung und Querströmung und führen bei der Mittelwasserregulierung den Stromstrich sicher, insbesondere an den Außenufern und Krümmungen.

Der Bau des Parallelwerks wurde in den Jahren 1996 (1. Bauabschnitt) und 1997 (2. Bauabschnitt) schrittweise umgesetzt. Durch die unterschiedliche Morphologie mit

wechselnden Böschungsneigungen, Hoch- und Tiefpunkten ergeben sich variantenreiche Standorte mit der Möglichkeit zur Entwicklung artenreicher Biozenösen. Das Parallelwerk Walsum-Stapp kann als langgestrecktes, lineares, aquatisches Biotop angesehen werden (BESTMANN, 1998).

Es besteht aus einem ca. 1,5 km langen, dem Ufer vorgelagerten, gegliederten Damm (4 Bauwerke) mit 7 Hochpunkten zwischen 17,90 m üNN und 19,90 m üNN (vgl. Abb. 99). Herrschen Niedrigwasserverhältnisse vor, dann stellt das Parallelwerk einen durchlaufenden Damm dar, der hinterflossen wird. Auf der Höhe von 16,50 m üNN sind Flutmulden zwischen den einzelnen Bauwerken errichtet, so dass bei höheren Wasserständen lediglich die Hochpunkte in Form von Inseln über den Wasserspiegel ragen. Auf jeden Fall folgt eine je nach Wasserstand mehr oder minder starke Durchströmung der Flutrinne zwischen Ufer und Parallelwerk.

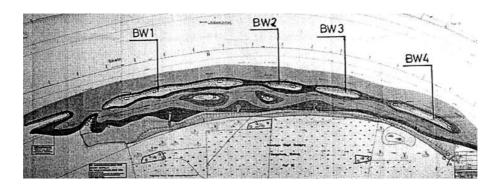


Abbildung 99: Gesamtes Parallelwerk mit dem Landanschlussdamm (linker Bildrand), den vier Bauwerken (BW) sowie zwei Kiesinseln im Bereich der Flutrinne in der strömungsberuhigten Zone des Parallelwerks (WSA Duisburg-Rhein)

Die konstruktive Ausbildung des Bauwerks wurde durch eine mehrlagig aufgeschüttete Unterwasserböschung mit einer zur Strommitte einheitlichen Böschungsneigung von 1:3 und landseitig variierend von 1:2 bis 1:6 ausgeführt. Die Böschungen des technischen Bauwerks wurden auf beiden Seiten mit Wasserbausteinen der Klasse III (Basaltgestein) gesichert und 1 m unterhalb der vorhandenen Sohle eingebunden, damit die Stabilität des Bauwerks bei möglichen Sohlenveränderungen garantiert ist.

In der Wasserwechselzone und über Wasser wurde anstelle der Schüttsteine Vegetatives Deckwerk (System Bestmann) auf insgesamt 3600 m² eingebaut und Teilbereiche der Inseloberflächen zusätzlich mit Einzelpflanzungen besetzt. In den Bereichen, in denen die Vegetativen Deckwerke zum Einsatz kamen, wurde die Abdeckung mit Wasserbausteinen unterbrochen und durch einen Unterbau aus bewuchsfähigem Boden ersetzt (vgl. Abb. 100). Zusätzlich wurde zum Schutz vor Bodenerosion ein Geotextil eingebaut. Die maximale Höhe der Hochpunkte liegt 2 m über AMW 90²⁶.

²⁶ "Ausbau-Mittelwasserstand 1990". Bei dem AMW 90 handelt es sich um eine künstlich konstruierte Wasserspiegellinie unter Beibehaltung der bis 1965 gemessenen mittleren Abflussmenge und eines im Mai 1989 durchgeführten MW-Nivellements. Der AMW 90 dient ausschließlich als Instrument bei der Festlegung von Ausbauhöhen und löste den bis dahin gültigen MW 65 ab.

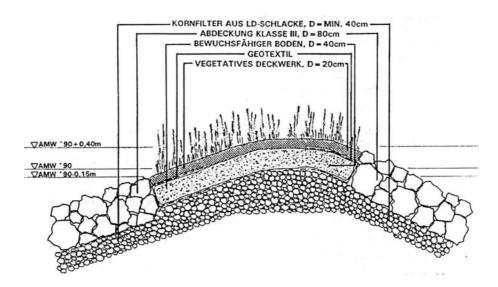


Abbildung 100: Querschnitt und Ausbildung eines Hochpunktes am Beispiel des Bauwerkes 2 (WSA Duisburg-Rhein)

Das Parallelwerk Walsum-Stapp liegt im Bereich der "Walsumer Rheinaue", die im Landschaftsplan der Stadt Duisburg als Naturschutzgebiet ausgewiesen ist. Aus diesem Grund wurde besonderen Wert auf eine naturnahe Gestaltung und optimale Einbindung in das landschaftliche Umfeld gelegt. Die Außenstelle Wesel entschloss sich, als ingenieurbiologische Gestaltungselemente die drei Maßnahmen Vegetatives Deckwerk - System Bestmann, Initialbepflanzungen und Bereiche natürlicher Sukzession zu verwenden.

Die Herstellung der Vegetativen Deckwerke erfolgte in einem eigens dafür angelegten Anzuchtbecken ca. 45 km von der Einbaustelle enfernt, um den Pflanzen möglichst die gleichen klimatischen Verhältnisse wie am Einsatzort zu bieten. Das Grundgerüst der Vegetationsmatten besteht aus Metallhüttenschlacke der Klasse 0 mit einer Rohdichte von ca. 3,5 kg/dm³ und Lavagranulat 2 – 8 mm, das in die Hohlräume gefüllt, verdichtet und nach unten und oben durch ein Kokosfiltervlies abgeschlossen wurde. Der Gesamtaufbau wurde lagestabil in eine Polyamid-Netzarmierung eingebunden. Mit standortgerechten und im Niederrheingebiet heimischen Röhrichtarten (Seggenarten, Sumpfiris, Schilf, Binsen) wurden die Matten im Juni 1996 bepflanzt und erhielten zusätzlich im Frühjahr 1997 eine Grasansaat. Im Oktober 1997, nach ungefähr 16 monatiger erfolgreicher Anzuchtzeit, wurden die insgesamt 300 Deckwerkselemente vom Anzuchtbecken über den Wasserweg zur Einbaustelle transportiert. Um einen guten Bodenanschluss zu gewährleisten, wurde eine vegetationsfreundliche Substratschicht eingebracht und Unebenheiten eingeebnet. Nachdem die Oberfläche fein profiliert war, wurden die Matten nach der Planvorgabe bündig verlegt und an den Stößen miteinander verrödelt. Durch starke Rhizombildung wachsen die Elemente zusammen und bilden eine flächige Einheit.

In Anlehnung an die Pflanzenarten des Vegetativen Deckwerks wurden parallel zum Einbau des Vegetativen Deckwerks Initialpflanzungen mit ca. 15000 Röhrichtpflanzen vorgenommen. Die Pflanzen wurden zuvor in einem erdfreien Anzuchtsystem (z.B. Kokosfasern) über mindestens 2 Jahre aufgezogen, damit der Pflanzballen vollständig

durchwurzelt ist. Zum größtmöglichen Schutz gegen Abtrieb bei Hochwasser wurde vor dem Einbau ein rund 50 cm langer Holzstab horizontal durch den Pflanzballen des Röhrichts geführt und anschließend gut mit den Wasserbausteinen verklammert.



Abbildung 101: Luftaufnahme von Rhein-km 793,500 – 795,000 nach Fertigstellung des Parallelwerks Walsum-Stapp im Herbst 1997 (WSA Duisburg-Rhein)

Als Erkenntnis hinsichtlich des Einbaus der ingenieurbiologischen Maßnahmen lässt sich festhalten, dass, was die Vegetativen Deckwerksmatten betrifft, die Einhaltung des vorgegebenen Verlegeschemas die größten Schwierigkeiten bereitet hat. Durch das mehrfache Anheben mit der Verlegetraverse trat eine geringfügige Längen- und Breitenverformung der Elemente auf. Dadurch entstanden beim Einbau der Deckwerksmatten stellenweise Lücken zwischen den einzelnen Elementen. Verstärkt wurde dieser Effekt zusätzlich noch durch die abgerundeten Oberflächen auf den Hochpunkten des Parallelwerks, wo teilweise bis zu 15 cm breite Fugen auftraten. Sie mussten nachträglich mit Wasserbausteinen gesichert werden, da zu große Spalten zwischen den Elementen gefährliche Angriffsstellen darstellen.

Was die Initialpflanzungen betrifft, so konnte dem Ausspülen feiner Sedimente zwischen den Wasserbausteinen nicht zufriedenstellend entgegengewirkt werden. Um dies zu verhindern, müsste ein Kokosgewebe eingearbeitet werden (WSA Duisburg-Rhein).

Aktuelle Ergebnisse der Vegetationsaufnahme bzw. Erkenntnisse über Belastungsgrenzen lagen zum Zeitpunkt der Umfrage noch nicht vor.

6.7 Projekte im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte

Im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte kommen entlang der Aller abschnittsweise ingenieurbiologische Bauweisen zur Sicherung der Ufer zum Einsatz (vgl. Abb. 102). Nachfolgend werden entsprechende Schutzmaßnahmen im Zuständigkeitsbereich des WSA Verden beschrieben (Beispiel 11).

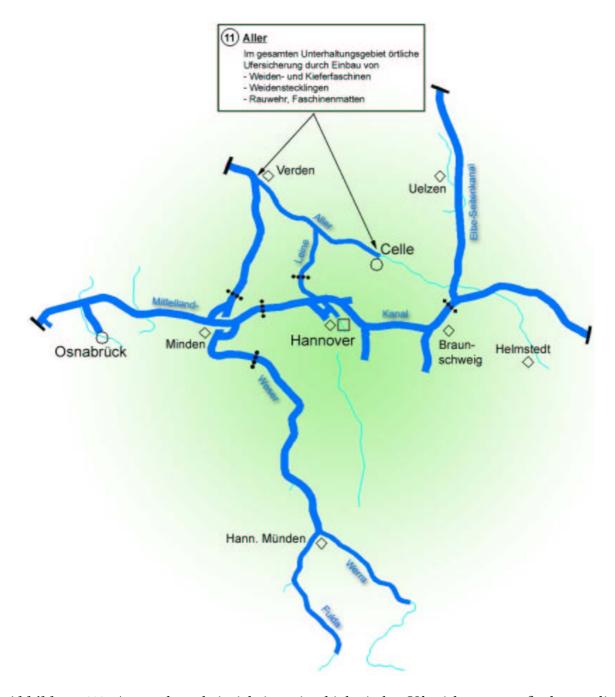


Abbildung 102: Anwendungsbeispiele ingenieurbiologischer Ufersicherungsmaßnahmen, die im Bereich der WSD-Mitte zum Einsatz kommen

6.7.1 Beispiel 11: Aller

Zuständigkeitsbereich: WSA Verden, AB Oldau

Gewässer: Aller

Gewässerabschnitt: gesamtes Gebiet bis zur Wesermündung

Maßnahme: Faschinenmatten

Weidenstecklinge

Sinkstücke Rauhwehr

Die Uferbefestigungen der Aller und der Leine im Zuständigkeitsgebiet des Außenbezirks Oldau sind zum Großteil fast 100 Jahre alt oder stammen teilweise sogar noch aus dem 19. Jahrhundert. Fast 70 % der Ufer an der Aller und ca. 40 % an der Leine sind mit harten Deckwerken ausgeführt. Die Deckwerke bestehen aus alten Steinschüttungen, die auf Faschinenmatten gelagert sind. Diese Bauweise wurde bis in die 70er Jahre an allen zu sichernden Ufern angewendet, ehe die Faschinen durch Geotextilmatten abgelöst wurden.

Durch den kompletten Rückgang der Berufsschifffahrt auf Aller und Leine (70er Jahre) werden die Ufer nicht mehr so stark belastet wie früher. Deshalb ist man heute bestrebt, nur noch das Nötigste an Schutzmaßnahmen durchzuführen und der freien Natur in einem gewissen Rahmen freien Lauf zu lassen. Während früher jeder Meter entlang der Aller verbaut wurde, gibt es nun Bereiche, an denen in den letzten 10 Jahren nichts mehr gemacht wurde oder Gewässerunterhaltung nur mit einfachen Mitteln betrieben wurde wie z.B. durch Stecklingsbesatz oder durch "Auf-den-Stock-setzen" vorhandener Weidenbüsche.

Häufig werden biologische Bauweisen durch Vieh zerstört (Zertreten, Verbiss), da Viehweiden ohne Zäune bis direkt an das Gewässer reichen. In diesen Bereichen wird mittlerweile von Maßnahmen abgesehen. Erfahrungen haben gezeigt, dass entlang der Aller die natürliche Sukzession oftmals die beste Ufersicherung darstellt. Die vorhandene Ufervegetation hat somit an vielen Stellen aus eigener Kraft eine natürliche Uferbegrünung geschaffen, indem sie die alten Steindeckwerke bewachsen und überwuchert hat. Besonders ausgeprägt ist diese Begrünung an den Uferbereichen zwischen Celle und Oldau, Aller-km 0,0 bis ca. 20,0 (WSA Verden).

Heute kommen im Zuständigkeitsgebiet des AB Oldau, das die Unterhaltung von ca. 90 Ufer-km an der Aller und etwa 40 Ufer-km an der Leine beinhaltet, überwiegend Maßnahmen wie Faschinen, Senkfaschinen, Mutterbodenabdeckungen und Stecklingsbesatz mit Erlen, Weiden oder Birken zum Einsatz. Diese traditionellen Bauweisen haben sich in der Vergangenheit gut bewährt und kommen auch weiterhin zur Ufersanierung in Frage. In den vergangenen 10 Jahren wurden an der Aller immer wieder Uferbereiche von 30 bis 200 m Länge mit verschiedenen ingenieurbiologischen Maßnahmen gesichert. Die Herstellungs- bzw. Unterhaltungsmaßnahmen erfordern

viel Handarbeit, da für die meisten Arbeitsschritte (Schlagen, Binden, Einbauen der Faschinen) keine Maschinen verwendet werden können (vgl. Abb. 103). Diese naturgemäßen Bauwerke sind, was die Herstellung bzw. Unterhaltung betrifft, sowohl zeitlich als auch finanziell aufwendiger als konventionelle Deckbauwerke (AB Oldau).



Abbildung 103: Herstellung eines Sinkstückes aus lagenweise versetzten Weidenfaschinen (1997). Mit Draht und Pflöcken wird die Konstruktion stabilisiert und zusammengehalten (AB Oldau).

Nachstehend sind einige der Baumaßnahmen der letzten Jahre aufgeführt.

• 1991, Aller-km 33,200 – 33,700:

Das linke Ufer wurde mit Weiden- und Kieferfaschinen gesichert. Die Faschinen wurden mit Boden abgedeckt und später zusätzlich mit Weidenstecklingen bestückt.

• 1992, Aller-km 35,000:

Auf einer Länge von ungefähr 100 m wurde ein Leitwerk zum Schutz des Hinterlandes neu errichtet. Das dammähnliche Längsbauwerk wurde in der für die Aller traditionellen Faschinenbauweise erstellt. Auf dem Dammkörper werden Faschinenmatten zum Schutz des Untergrundes angeordnet, die mit einer Bodendeckschicht und losen Wasserbausteinen abgedeckt werden (vgl. Abb. 104).



Abbildung 104: Einbau der Faschinen auf der Dammkrone (1992). Über den Wasserweg werden die Schüttsteine für die Abdeckung angeliefert (AB Oldau).

• 1997, Sinkstückeinbau als Kolkverbau am Wehr Bannetze:

Zum Schutz vor weiteren Auskolkungen am Wehr wurden massive Sinkstücke, bestehend aus Kiefern- und Weidenastwerk auf die Gewässersohle abgelassen und mit Schüttsteinen beschwert (vgl. Abb. 105). Die Sinkstücke wiesen dabei eine Stärke von bis zu 1 m auf.



Abbildung 105: Das Sinkstück wird schwimmend an seine Einsatzstelle gebracht und anschließend abgesenkt (AB Oldau, 1997).

• 1998, Aller-km 73,000 Bierde:

Ufersicherung im Buhnenfeld mit Faschinenmatten aus Weiden- und Kiefernholz (vgl. Abb. 106). Sie bestehen aus 5 – 7 m langen Ruten und Astwerk, die mehrlagig mit Draht zu einer Matte zusammengebunden sind.



Abbildung 106: Die landseitig in Handarbeit errichteten Faschinenmatten werden zu ihrem Bestimmungsort gebracht (AB Oldau, 1998).

6.8 Projekte im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord

Im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord kommen entlang der Oste vereinzelt ingenieurbiologische Bauweisen zur Sicherung der Uferbereiche zum Einsatz. Die entsprechenden Maßnahmen werden, soweit Informationen zur Verfügung standen, nachfolgend beschrieben (Beispiel 12).



Abbildung 107: Anwendungsbeispiele ingenieurbiologischer Ufersicherungsmaßnahmen, die im Bereich der WSD-Nord zum Einsatz kommen

6.8.1 Beispiel 12: Oste

Zuständigkeit: WSA Cuxhaven

Gewässer: Oste

Gewässerabschnitt: gesamtes Unterhaltungsgebiet bis zur Elbmündung

Maßnahme: Packwerk aus Buschfaschinen

Holzpfahlwände

Der Zuständigkeitsbereich des WSA Cuxhaven umfasst die Elbe im Mündungsbereich und die Oste auf ihrer gesamten Länge von 74 km bis Bremerförde (vgl. Abb. 107). Die Elbe ist durchgehend mit schwerem Deckwerk gesichert. Im Oberlauf der Oste findet keine Berufsschifffahrt statt, da die Oste hier nur eine geringe Gewässerbreite von ca. 10 m bei einer Wassertiefe von 1 m aufweist und von einigen Brücken überspannt wird. Die wesentliche Schifffahrt in diesem Bereich besteht aus Sport- und Freizeitbooten. Der Unterlauf ist bis Oste-km 50 schiffbar und unterliegt im Mündungsgebiet zur Elbe tidebedingten Wasserspiegelschwankungen von ca. 1,5 m.

Ingenieurbiologische Bauweisen zur Ufersicherung kommen beidseitig an der gesamten Fließstrecke der Oste zum Einsatz. Sie sind überwiegend als Buschdämme bestehend aus Faschinenwalzen, Holzpfahlwänden und Buschbuhnen ausgeführt.

Unter Buschbuhnen werden in diesem Beispiel kleine Stummelbuhnen verstanden, die ca. 2 m lang sind und sandwichartig mit Gabionen bzw. Steinschüttungen und Senkmatten mehrlagig aufgebaut sind. Sie werden mit Steckhölzern bestückt oder durch natürliche Pflanzen- und Gehölzansiedlungen bewachsen, so dass sie nach einigen Vegetationsperioden mit Buschwerk bewachsen sind. Jährlich werden im Unterhaltungsgebiet der Oste ca. 50 bis 80 solcher Stummelbuhnen gebaut.

Um den Strandbereichen Schutz vor Erosion zu bieten, werden vorgelagerte Buschdammkörper gebaut (vgl. Kap. 6.5.1). Dazu werden Faschinenwalzen mit ca. 30 cm Durchmesser lagenweise versetzt übereinander gepackt und mit Sand überdeckt. Das Packwerk ist etwa 2 m breit und erreicht eine Höhe von ungefähr 1,5 m. Die Unterhaltung dieser Buschdämme, die sich mit der Zeit selbst begrünen, ist durch ständiges Nachpacken relativ hoch, so dass sie nur an exponierten oder besonders kritischen Stellen eingebaut werden. Durch diese Bauweise werden deshalb lediglich ca. 50 – 100 m Ufer jährlich gesichert.

Eine weitere Maßnahme, um den Böschungsbereich in der Wasserwechselzone zu sichern, ist die Anordnung von Holzpfahlwänden. Dazu werden Pfähle mit 20 – 30 cm Durchmesser und einer Länge zwischen 6 und 12 m in den Untergrund geschlagen. Diese Parallelbauwerke werden überwiegend aus Tannen- und Fichtenholz hergestellt und besitzen eine Haltbarkeit von 20 – 30 Jahren. Jährlich werden etwa 8 – 9 km Holzpfahlwände von der WSA Cuxhaven hergestellt (WSA Cuxhaven).

Bildmaterial zu diesen Bauarten ist nicht vorhanden.

7 Grundlagen und Vorüberlegungen zum Ausbau der Unteren Havel-Wasserstraße

Mit einem Höhenunterschied von nur 40 m auf 340 km Länge ist die Havel auf ihrer gesamten Strecke ein typischer Flachlandfluss mit geringem Gefälle und niedrigen Fließgeschwindigkeiten. Sie ist charakterisiert durch eine häufig langanhaltende Niedrigwasserführung und nicht sehr ausgeprägte, aber länger andauernde Hochwasserereignisse. Schwere Hochwasser mit hohen Pegelständen sind untypisch für die Havel. Bei Niedrigwasser kann es fast zur vollständigen Ausspiegelung kommen, und selbst bei Hochwasser überschreiten mittlere Fließgeschwindigkeiten den Wert 0,5 m/s kaum, wodurch die Havel teilweise einem Stillgewässer gleicht.

Die Untere Havel-Wasserstraße (UHW) beginnt bei km 0,0 an der Einmündung der Spree im Nordwesten Berlins und endet mit km 148,5 bei Havelberg in der Elbe. Sie ist gekennzeichnet durch große Seenstrecken, wegverkürzende Kanäle und einer naturnahen Flussstrecke unterhalb Ketzins mit zahlreichen alten Flussschlingen, Durchstichen und einer Vielzahl von Inseln.

Das Wehr in Brandenburg bestimmt das Stauziel für den Bereich zwischen Potsdam und Brandenburg. Im Sommer liegt das Stauziel bei 29,20 m üNN, im Winter bei 29,28 m üNN. Wasserstandsänderungen zwischen Mittel- und Niedrigwasser treten in der Nähe des Wehres nicht auf und sind auch in anderen Bereichen relativ gering. So unterscheiden sich Mittel- und Niedrigwasser z.B. in Ketzin nur um etwa 20 cm und bei Potsdam um etwa 30 cm. Bei mittlerem Hochwasser liegen diese Werte dann bei ca. 50 cm (Ketzin) bzw. 70 cm (Potsdam) über dem Normalwasserstand. Die Abflussmengen schwanken zwischen 5 m³/s bei Niedrigwasser und 220 m³/s bei Hochwasser, der mittlere Abfluss beträgt bei Ketzin ca. 70 m³/s. Durch die Stauhaltung am Wehr Brandenburg beträgt das Gefälle zwischen Potsdam und Brandenburg bei Mittelwasser lediglich 5 mm/km und bei Hochwasser 17 mm/km (Bundesministerium für Verkehr, 1997).

7.1 Ausbaurichtlinien im ökologisch wertvollen Gebiet der UHW zwischen Potsdam und Brandenburg

Zwischen dem Jungfernsee bei Potsdam (km 16,4) und dem Abzweig des Elbe-Havel-Kanals im Plauer See (km 66,7) erstreckt sich in Ost-West-Richtung ein UHW-Abschnitt, der Teilvorhaben des Projekts 17 ist. Die UHW besteht in diesem Bereich aus Seen, seenartig erweiterten Flussabschnitten mit 15 kurzen Durchstichen sowie zwei Kanalstrecken.

Nach den Richtlinien für Regelprofile (1990) des Bundesverkehrsministeriums wurde für den Ausbau der UHW mit dem Schiffstyp Großmotorgüterschiff (GMS) als Bemessungsschiff für gerade Gewässerstrecken ein neues Trapezprofil mit 55 m Wasserspiegelbreite, 4 m Tiefe und einer Böschungsneigung von 1:3 als wirtschaftlicher

Mindestquerschnitt festgelegt²⁷ (vgl. Abb. 108). Für die Bemessung der Fahrspurbreite ist die Begegnung zweier Schubverbände maßgebend. In engen Bereichen kann unter Berücksichtigung besonderer Randbedingungen wie z.B. Gebäuden, Brücken oder Anlegestellen auf raumsparendere Querschnittsprofile mit senkrecht ausgebildeten Uferbereichen ausgewichen werden. In den seenartigen Abschnitten mit einer Wasserspiegelbreite von mehr als 185 m ist eine Fahrrinnentiefe von 3,50 m vorgesehen, während in den restlichen Abschnitten der Havel und in den Kanälen die Fahrrinne durchgehend auf 4,00 m zu vertiefen und mindestens auf 55 m zu verbreitern ist.

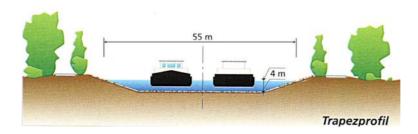


Abbildung 108: Trapezquerschnitt als Regelausbauprofil für den zweispurigen Schiffsverkehr auf der UHW (Bundesministerium für Verkehr, 1998)

Als Ausbaugrundsatz gilt die Verträglichkeit der Maßnahme mit Natur und Landschaft. Flüsse und Kanäle stellen Erholungsraum für Menschen dar, bereichern mit ihrer Ufervegetation die Landschaft und bieten in Form von wertvollen Feuchtbiotopen Lebensraum für zahlreiche Tier- und Pflanzenarten. Deshalb gilt es, die baulichen Eingriffe auf das Notwendigste zu beschränken (Eingriffsminimierung). Auswirkungen auf Mensch, Tier, Pflanze, Boden, Wasser sowie auf die Landschaft werden im Rahmen der Genehmigungsverfahren durch Umweltverträglichkeitsuntersuchungen geprüft.

Neu ausgebildete Ufer sowie gefährdete und bereits beschädigte Ufer sind mit umweltverträglichem Deckwerk zu sichern. Wo es ökologisch sinnvoll ist, wird angestrebt, bestehende Verwallungen und Deckwerke an den Kanalufern zu entfernen, um angrenzende Feuchtgebiete dem Einfluss der natürlichen Gewässerdynamik auszusetzen. In diesem Zusammenhang sollen im Bereich der Flusshavel naturnahe, unbefestigte Ufer erhalten bleiben und Uferbereiche, die bislang mit reinen Schüttsteinen gesichert sind, durch flachere Ufer ersetzt werden. Durch die Ausbaumaßnahmen werden auf der gesamten Strecke keine Stauziele verändert, so dass schädliche Auswirkungen auf die Grundwasserstände ausgeschlossen sind (Bundesministerium für Verkehr, 1997).

Als landschaftlich besonders attraktiv und ökologisch wertvoll gilt die UHW zwischen Brandenburg und Ketzin (vgl. Abb. 109). Im Bereich der Havelinseln und alter Flussschlingen sind vielfach naturnahe Abschnitte erhalten geblieben, die außer von Röhrichtgesellschaften auch von uferbegleitenden Bruch- und Sumpf-

²⁷Daraus ergibt sich mit dem Fließquerschnitt $A=172\,\mathrm{m}^2$ und dem Hauptspantquerschnitt $A_\mathrm{M}=31,92\,\mathrm{m}^2$ bei voller Abladung des GMS ein Querschnittsverhältnis von n=5,4.



Abbildung 109: Die UHW zwischen Potsdam und Brandenburg als Teilvorhaben des Projekts 17 (Bundesministerium für Verkehr, 1997)

waldsäumen, Weidengebüschen und Erlenwäldern besiedelt sind. Die Verlandungszonen der häufig naturnahen seenartigen Landschaft weisen eine Vielzahl verschiedenartiger Pflanzengesellschaften auf, die aufgrund ihrer Artenzusammensetzung, Seltenheit oder Gefährdung gesetzlich geschützt sind. So sind vielerorts vorgelagerte Röhrichtgürtel vorzufinden, die an breiteren Gewässerabschnitten stellenweise eine Ausdehnung bis zu hundert Metern erreichen. An wind- und wellengeschützten Ufern nehmen Schwimmblattgesellschaften aus See- und Teichrosen größere Bereiche ein. Durch die Eigenschaften eines Flachlandflusses bietet diese ausgeprägte Kulturlandschaft Lebensraum für viele Tierarten. Fischotter, Biber, zahlreiche seltene Vogelarten wie Eisvogel, Zwergrohrdommel oder Baumfalke sowie eines der wenigen landesweiten Vorkommen der europäischen Sumpfschildkröte sind an diesem Gewässerabschnitt vorzufinden. Zusätzlich stellen die Flusshavel, ihre Altarme und Teile der angrenzenden Niederungen bedeutende Durchzugs- und Überwinterungsgebiete für osteuropäische und nordische Zugvögel dar, so dass entlang der Ausbaustrecke viele Landschafts- und Naturschutzgebiete liegen, von denen einige als Flora-Fauna-Habitat (FFH) und Important-Bird-Areas (IBA) ausgewiesen sind. Diese Gewässerbereiche sollen, sofern es möglich ist, von Ausbaumaßnahmen weitgehend verschont bleiben und neue Uferbereiche mit ingenieurbiologischen Sicherungsmaßnahmen ökologisch verträglich gestaltet werden (Bundesministerium für Verkehr, 1997).

7.2 Untersuchung der hydraulischen Belastung der Ufer zwischen UHW-km 32,600 und km 38,000 (Bauabschnitt 1)

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse der Schifffahrt auf die Uferbereiche am Beispiel der UHW zwischen km 32,600 und km 38,000 untersucht. Unter Berücksichtigung der Ausbaurichtlinien werden nachfolgend für die zukünftige neue Flotte, bestehend aus Großmotorgüterschiffen (GMS) und Schubverbänden (SV), die erforderlichen Fahrspurbreiten ermittelt und die daraus resultierenden Uferausbaubereiche bestimmt. Die zu erwartenden Belastungen aus Schiffswellen, Absunkerscheinungen und Rückströmungen basieren auf Berechnungen der Bundesanstalt für Wasserbau zu Ufer- und Sohlbelastungen (BAW, 2001). Aufbauend auf die Ergebnisse in Kapitel 4 bis 6 wird dann in Kapitel 8 ein ingenieurbiologisches Ideenkonzept für gefährdete Uferbereiche erarbeitet.

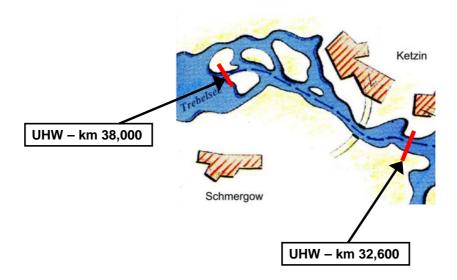


Abbildung 110: Die UHW im untersuchten Abschnitt zwischen km 32,600 und km 38,000 (Bundesministerium für Verkehr, 1997)

7.2.1 Grundsätze

Als Berechnungsgrundlage für die Fahrwasserbemessung wurde vom Wasserstraßen-Neubauamt (WNA) Berlin für den gesamten Bauabschnitt 1 eine Ausbautiefe von 4,0 m und eine Mindestwasserspiegelbreite von 55 m festgelegt. Aus der Vorgabe des Regel-Trapezprofils (vgl. Abb. 108) ergibt sich eine Sohlbreite von 31 m, die auf der gesamten Ausbaustrecke mindestens gewährt sein muss. In einer Voruntersuchung der BAW wurde durch einen Vergleich zwischen GMS und SV - bezüglich der maximal auftretenden Belastungen des Gewässerbetts bei mittiger oder außermittiger Fahrt - der maßgebende Schiffstyp in der jeweils ausschlaggebenden Fahrlage bestimmt. Daraus ergab sich, dass für die Bestimmung der erforderlichen Fahrspurbreite die Begegnung zweier Schubverbände maßgebend ist, während für die maßgebenden hydraulischen Belastungen (Sekundärwellensystem, Absunk, Rückströmungsgeschwindigkeiten) das GMS Ausschlag gibt.

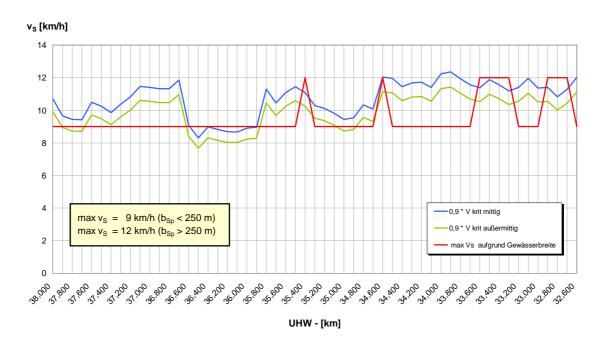


Abbildung 111: Vorgaben bezüglich der maximal zulässigen Schiffsgeschwindigkeiten

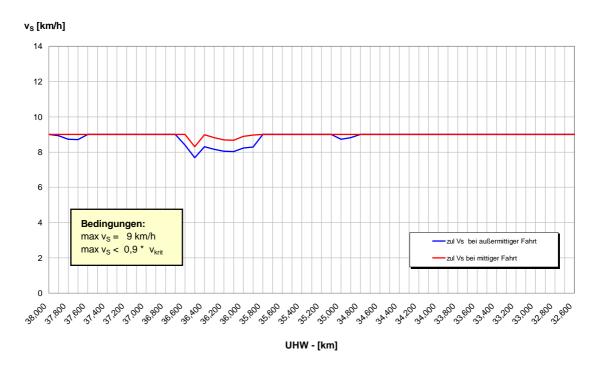


Abbildung 112: Maßgebende, zulässige Schiffsgeschwindigkeiten aus der Betrachtung der kritischen Geschwindigkeiten sowie der Geschwindigkeitsbegrenzung auf 9 km/h

Für die Ermittlung der Schiffsgeschwindigkeiten, mit denen zwischen UHW-km 32,600 und km 38,000 (Bauabschnitt 1) gefahren werden darf, muss sowohl die Geschwindigkeitsbegrenzung aufgrund der Gewässerbreite als auch die kritische Schiffsgeschwin-

digkeit bei mittiger bzw. außermittiger Fahrt herangezogen werden. Aus der Planungsvorgabe geht eine zulässige Schiffsgeschwindigkeit von 9 km/h in Gewässerbereichen mit weniger als 250 m Wasserspiegelbreite hervor. In breiteren Abschnitten dürfen maximale Geschwindigkeiten von 12 km/h gefahren werden.

Abbildung 111 macht deutlich, dass selbst unter Vernachlässigung der kritischen Schiffsgeschwindigkeiten nur in vier kurzen Gewässerbereichen mit der Höchstgeschwindigkeit von 12 km/h gefahren werden könnte. Aus diesem Grund wurde die maximal zulässige Geschwindigkeit für den gesamten ersten Bauabschnitt auf 9 km/h reduziert.

In Abbildung 112 ist der Verlauf der für die folgenden Betrachtungen maßgebenden, maximal zulässigen Schiffsgeschwindigkeiten für das GMS aufgetragen. Als weitere Grundlage für die hydraulischen Berechnungen wurde die Einflussbreite des GMS zu Grunde gelegt. Die Einflussbreite ($B_{\rm E}$) wird in dieser Arbeit nach der in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Formel (20) berechnet.

Tabelle 15 fasst die maßgebenden Planungsvorgaben und Berechnungsgrundlagen, auf denen die weiteren Ausführungen basieren, zusammen.

neue Flotte:	Abmessungen [m]	Einflussbreite	
GMS: SV:	110 x 11,40 x 2,80 185 x 11,40 x 2,80		208 [m] 328 [m]
Ausbaugrundsätze:			
minimale Wasserspiegelbreite: minimale Sohlbreite: Fahrrinnentiefe:		$ \begin{array}{ll} \text{min } b_{Sp} & = \\ \text{min } b_{So} & = \\ t & = \end{array} $	31 [m]
maximal zulässige Schiffsgeschwindigkeit:		V _S =	9 [km/h]

Tabelle 15: Übersicht über Grundlagen und Planungsvorgaben des Ausbaus der UHW-Strecke km 32,600 bis 38,000

7.2.2 Bestimmung des rechnerischen Ersatzquerschnitts

Die Berechnungen des Schiffswellensystems, der Rückströmungsgeschwindigkeiten und der Sohlenschubspannungen wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau auf den Grundlagen des Merkblatts für Böschungs- und Sohlensicherungen (MBB) durchgeführt (BAW, 2001). Da es sich bei dem vorliegenden Beispiel der UHW nicht um einen regelmäßigen Kanalquerschnitt handelt, sondern um einen abwechslungsreichen Gewässerabschnitt mit naturnahem Charakter, musste zunächst versucht werden, den realen Fließquerschnitt möglichst über einen flächengleichen, rechnerischen Ersatzquerschnitt anzunähern. Auf die Ersatzquerschnittsberechnung baut dann die weitere Berechnung der Wellenhöhen auf. Die Anwendung der Bemessungsgrundlagen auf

einen naturnahen Fließquerschnitt besitzt somit Pioniercharakter.

Nach dem momentanen Stand der Untersuchungen ist das Berechnungsverfahren als Vorberechnung zu verstehen. In der zukünftigen Planungsphase werden sicherlich weitere Berechnungsschritte folgen müssen, um detailliertere Aussagen über die Wellenentwicklung und Wellenbelastungen an der UHW machen zu können. Durch diese erste Untersuchung wird jedoch schon die Dimension der zu erwartenden Belastungen der Uferböschungen deutlich. Die Berechnungsansätze beinhalten die jeweils ungünstigste Fahrlage des Schiffes (mittige oder außermittige Fahrt), so dass die daraus resultierenden Wellen, Rückströmungsgeschwindigkeiten und Schubspannungen auf der sicheren Seite liegen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Schritte der Ersatzquerschnittsberechnung erläutert. Die drei Skizzen in Abbildung 113 sollen dabei die Vorgehensweise verdeutlichen.

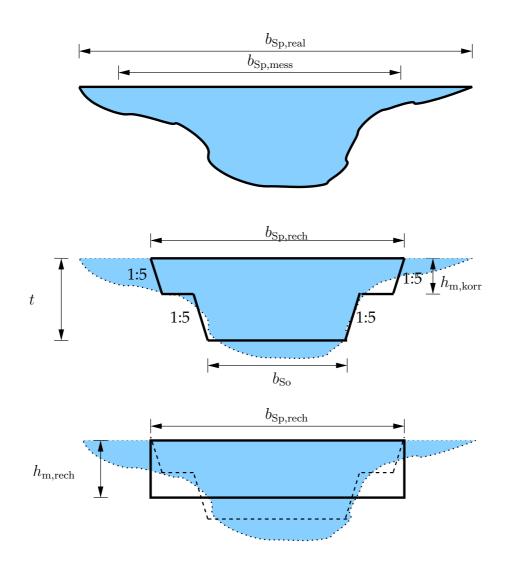


Abbildung 113: Skizzen zur Vorgehensweise bei der Ermittlung des rechnerischen Ersatzquerschnitts als Annäherung an den naturnahen Fließquerschnitt

1. Schritt:

Grundlage für die Berechnung sind Gewässerdaten (Ist-Zustand) in Form von Wasserspiegelbreiten ($b_{\rm Sp}$) und mittleren Gewässertiefen ($h_{\rm m}$). Diese Querschnittsprofile wurden im Abstand von 100 m aufgenommen. Ein Vergleich der gepeilten Wasserspiegelbreiten ($b_{\rm Sp,mess}$) mit Werten, die aus digitalen Karten ermittelt wurden ($b_{\rm Sp,real}$), ergibt Abweichungen, die zwischen 6 % und 58 % liegen (siehe Skizze 1 in Abb. 113).

Die Ursachen dafür sind stellenweise sehr ausgedehnte, flache Uferbereiche, weshalb das Peilboot für Messungen nicht bis ganz an das Ufer fahren kann. Dadurch kann der reale Fließquerschnitt nur annähernd bestimmt werden.

Aus den Peildaten ($b_{\text{Sp,mess}}$; $h_{\text{m,mess}}$) lässt sich der Fließquerschnitt (A_{mess}) nach Gleichung (26) bestimmen.

$$A_{\text{mess}} = b_{\text{Sp,mess}} \cdot h_{\text{m,mess}} \tag{26}$$

 $A_{
m mess}$ ist allerdings - bedingt durch die Abweichungen zwischen Peildaten und tatsächlichen Wasserspiegelbreiten - teilweise erheblich geringer als der reale Fließquerschnitt. Deshalb wurde $A_{
m mess}$ über die vereinfachte Annahme von Dreiecksflächen als Ersatz für die bei der Peilung unzugänglichen Uferbereiche ($A_{
m Ufer}$) um die Differenz der Wasserspiegelbreiten $b_{
m Sp,real}$ und $b_{
m Sp,mess}$ nach beiden Seiten linear bis zur Uferlinie vergrößert (Gl. 27).

$$A_{\text{Ufer}} = 0, 5 \cdot (b_{\text{Sp,real}} - b_{\text{Sp,mess}}) \cdot h_{\text{m,mess}}$$
(27)

Die neue Querschnittsfläche wird als realer Fließquerschnitt A_{real} angenommen und berechnet sich nach Gleichung (28).

$$A_{\text{real}} = A_{\text{mess}} + A_{\text{Ufer}} \tag{28}$$

Nach der Korrektur der Wassertiefe (Gl. 29)

$$A_{\text{real}}/b_{\text{Sp,real}} = h_{\text{m,korr}} \tag{29}$$

setzt sich der ermittelte, reale Fließquerschnitt ($A_{\rm real}$) aus der tatsächlichen Wasserspiegelbreite ($b_{\rm Sp,real}$) und der korrigierten, mittleren Wassertiefe ($h_{\rm m,korr}$) wie folgt zusammen:

$$A_{\text{real}} = b_{\text{Sp,real}} \cdot h_{\text{m,korr}} \tag{30}$$

2. Schritt:

Um dem naturnahen Gewässerprofil annähernd gerecht zu werden, wurde als rechnerischer Ersatzquerschnitt ein Doppeltrapezprofil ausgewählt (siehe Skizze 2 in Abb. 113). Die Neigung der Unterwasserböschung wurde mit 1:5 angenommen. Die Sohlbreite (b_{So}) und die Fahrrinnentiefe (t) waren durch die Ausbaurichtlinien mit

$$b_{\text{So}} \geq 31.0 \,\text{m}$$

 $t = 4.0 \,\text{m}$

festgelegt.

Da es sich im Bauabschnitt 1 nicht nur um seitlich und tiefenmäßig begrenztes Fahrwasser handelt, sondern auch einige seenartige Aufweitungen vorhanden sind (seitlich unbegrenztes Fahrwasser), wurde für die Ermittlung des Ersatzquerschnittes eine rechnerische Breite ($B_{\rm rech}$) eingeführt (Gl. 31). In seitlich unbegrenztem Fahrwasser ist die rechnerische Breite auf die Einflussbreite des Schiffes ($B_{\rm E}$) begrenzt, da sich die Auswirkungen des fahrenden Schiffes auf diesen Bereich beschränken. Dabei wurde den Berechnungen die Einflussbreite des GMS bei mittiger Fahrt mit $B_{\rm E}$ = 208 m zu Grunde gelegt. In seitlich begrenzten Gewässerabschnitten wird $b_{\rm Sp,real}$ als rechnerische Breite angesetzt.

$$B_{\text{rech}} = min\{B_{\text{E}}; b_{\text{Sp,real}}\}$$
(31)

Die Fläche des Doppeltrapezprofils ($A_{\rm DTr}$) errechnet sich dann als Funktion von Sohlbreite, Böschungsneigung, Fahrrinnentiefe und rechnerischer Breite (Gl. 32).

$$A_{\rm DTr} = f(b_{\rm So}, n, t, B_{\rm rech}) \tag{32}$$

3. Schritt:

Unter Berücksichtigung von Bedingung (31) ergibt sich der rechnerisch anzusetzende Ersatzquerschnitt (A_{rech}) nach Gleichung (33).

 $A_{\rm rech}$ berechnet sich für breite Gewässerabschnitte ($B_{\rm E} < b_{\rm Sp,real}$) aus der Fläche des rechnerischen Ersatz-Doppeltrapezprofils (Gl. 32) und für geringe Wasserspiegelbreiten ($B_{\rm E} > b_{\rm Sp,real}$) aus dem realen Fließquerschnitt nach Gleichung (28).

$$A_{\text{rech}} = min\{A_{\text{real}}; A_{\text{DTr}}\}$$
(33)

Für die weiter aufbauenden Berechnungen der Belastungsgrößen wird der rechnerische Ersatzquerschnitt ($A_{\rm rech}$) vereinfacht als flächengleicher Rechteckquerschnitt mit der Wasserspiegelbreite ($B_{\rm rech}$) und der mittleren rechnerischen Wassertiefe ($h_{\rm m,rech}$) dargestellt (siehe Skizze 3 in Abb. 113).

 $h_{\rm m,rech}$ errechnet sich dabei nach Gleichung (34).

$$A_{\text{rech}}/B_{\text{rech}} = h_{\text{m,rech}}$$
 (34)

In Abbildung 114 sind die rechnerischen Wasserspiegelbreiten und die erforderlichen Sohlbreiten der Ersatzquerschnitte bezogen auf die Gewässerachse graphisch dargestellt. In Gewässeraufweitungen mit $b_{\rm Sp,real} > B_{\rm E}$, wie es überwiegend zwischen km 32,600 und km 34,600 der Fall ist (vgl. Abb. 115), ist die Wasserspiegelbreite des Ersatzquerschnitts ($B_{\rm rech}$) durch die Einflussbreite des Schiffes ($B_{\rm E}$ =208 m) begrenzt, während in allen übrigen Bereichen die vorhandenen Gewässerbreiten maßgebend werden. Im beengten Bereich zwischen km 35,900 und km 36,400 wird aufgrund der Kurvenfahrt zweier Schubverbände eine Sohlbreite bis zu 73 m benötigt. Ausbaumaßnahmen werden daher in diesem Bereich erforderlich.

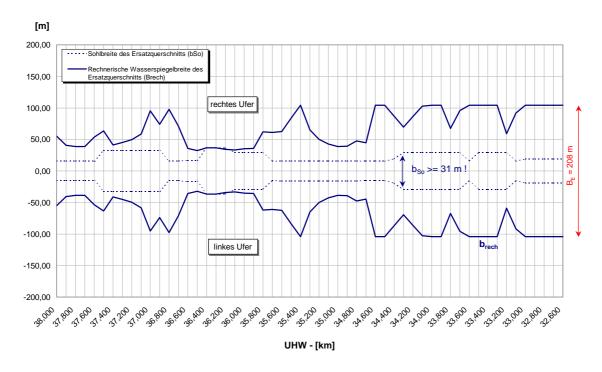


Abbildung 114: Darstellung der rechnerischen Ersatzquerschnitte des Untersuchungsabschnitts

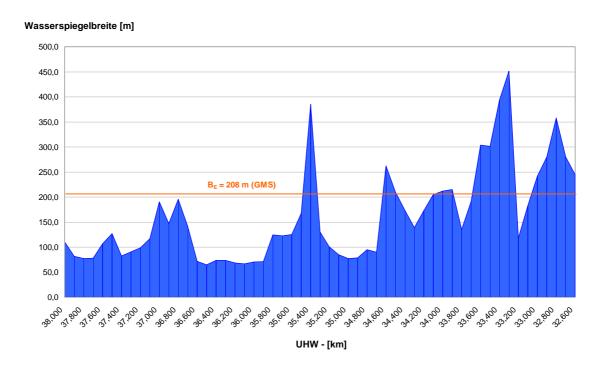


Abbildung 115: Darstellung der vorhandenen Wasserspiegelbreiten im Bauabschnitt 1

7.2.3 Rückströmungsgeschwindigkeiten

Die maximalen Rückströmungsgeschwindigkeiten ergeben sich durch Überlagerung der Fließgeschwindigkeit mit der Verdrängungsströmung des GMS bei Bergfahrt. Als Wirkungsbereich des Rückströmungsfeldes wird die Einflussbreite des Schiffes nach Gleichung (20) angesetzt. Die dafür rechnerisch ermittelten Rückströmungsgeschwindigkeiten sind als mittlere Geschwindigkeiten zu verstehen, die über den gesamten Einflussbereich gleichmäßig verteilt angenommen werden. Detaillierte Rechenansätze sowie Berechungsformeln zur Ermittlung der Rückströmungsgeschwindigkeiten werden in dieser Arbeit nicht erläutert, sie können KLIMMER (2000) sowie den Untersuchungen der BAW zu Ufer- und Sohlbelastungen an der UHW (BAW, 2001) entnommen werden. Abbildung 116 stellt die berechneten Rückströmungsgeschwindigkeiten für den Bauabschnitt 1 graphisch dar.

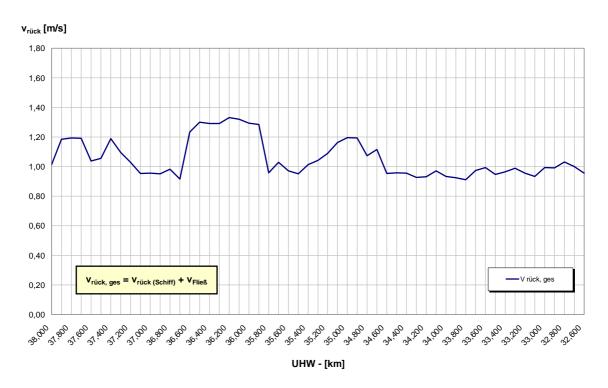


Abbildung 116: Zu erwartende Rückströmungsgeschwindigkeiten bei Fahrt eines GMS mit zulässiger Geschwindigkeit von maximal 9 km/h

7.2.4 Primär- und Sekundärwellen

Die Bemessungswerte des Primärwellensystems wurden für den Böschungsfußpunkt des rechnerischen Ersatzquerschnitts ermittelt. Die Wellenhöhe über dem Böschungsfuß ($H_{\rm BF}$) ist abhängig von der relativen Schiffsgeschwindigkeit und lässt sich durch die Höhe der Bugstauwelle (Δ $h_{\rm Bug}$) und durch den Wert des maximal abgesenkten Ruhewasserspiegels (Δh) darstellen (vgl. Abb. 117).

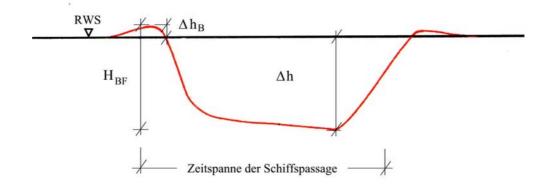


Abbildung 117: Verlauf der Wasserspiegelabsenkung bei der Passage eines Schiffes (WIL-DE, 2000)

Durch die Bewegung des Schiffes baut sich am Bug ein Wasserberg auf (Bugstauwelle), den das fahrende Schiff bei seiner Bewegung "vor sich her schiebt". Das aufgestaute Wasser wird unter dem Schiffskörper und seitlich um ihn herum abgeführt, was mit einem Absinken des Wasserspiegels verbunden ist (vgl. Kap. 2.4). Dieser Vorgang findet bei unterkritischer Schiffsgeschwindigkeit strömend und bei kritischer bzw. überkritischer Geschwindigkeit schießend statt. Nachfolgend wird nur der unterkritische Geschwindigkeitsbereich betrachtet.

Die Höhe der Bugstauwelle ($\Delta h_{\rm B}$) beträgt bei Fahrt des Schiffes mit unterkritischer Geschwindigkeit nach BAW (1999) ca. 1/10 der maximalen Niveauabsenkung²⁸ (Δh). Der Bemessungswert für die Primärwellenhöhe ($H_{\rm BF}$) über dem Böschungsfuß wird durch Gleichung (35) ausgedrückt.

$$H_{\rm BF} = \Delta h_{\rm B} + \Delta h \tag{35}$$

$$mit \quad \Delta h_{\rm B} = \frac{1}{10} \cdot \Delta h \tag{36}$$

Auf das Berechnungsverfahren und die Berechnungsformeln wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen. In KLIMMER (2000) ist das Verfahren von *Römisch*, das der Berechnung der Wellenhöhen zu Grunde liegt, ausführlich beschrieben. In Abbildung 118 sind die maximalen Wellenhöhen ($H_{\rm BF}$) über dem Böschungsfußpunkt aufgetragen. Dabei ist für die Werte zwischen km 36,000 und km 36,500 die mittige Fahrt des GMS maßgebend. In allen anderen Bereichen liefert die außermittige Fahrt die maximalen Werte.

²⁸Differenz zwischen ruhendem und maximal abgesenktem Wasserspiegel

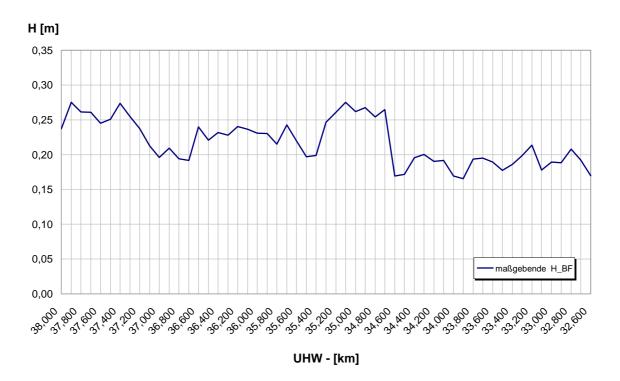


Abbildung 118: Maximale Primärwellenhöhen über dem Böschungsfußpunkt bei Fahrt eines GMS mit unterkritischer Geschwindigkeit

Die Sekundärwellenhöhen wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau nach Gleichung (37) berechnet (BAW, 2001). Für seitlich unbegrenzte Gewässerabschnitte wurden die Werte am Rand des Einflussbereichs ermittelt. Die Schiffsform sowie die Abladetiefe werden durch einen empirischen Beladungskoeffizienten (α_i) berücksichtigt. Als Wassertiefe wurde die mittlere Tiefe $h_{\rm m,rech}$ angesetzt, wodurch für das voll abgeladene GMS die Höhe der Sekundärwellen lediglich von der Fahrgeschwindigkeit und vom Abstand des Schiffbugs zum Ufer abhängig ist. Um die ungünstigste Fahrlage des Schiffes und somit die maximalen Wellenhöhen an der Uferlinie ermitteln zu können, wurde die jeweils maximal zulässige Geschwindigkeit $v_{\rm S}$ (vgl. Abb. 112) für mittige bzw. außermittige Fahrt des GMS herangezogen. Für außermittige Fahrweise, wie es bei Schiffsbegegnung oder Überholvorgängen der Fall ist, wurden die Wellenhöhen für beide Uferseiten getrennt berechnet. Dazu wurden die maßgebenden Uferabstände (s) aus der exzentrischen Fahrt zum linken Ufer sowie zum rechten Ufer ermittelt.

$$H_{\rm sek} = \alpha_{\rm i} \cdot h \cdot \left(\frac{s}{h}\right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{v^2}{gh} \tag{37}$$

Abbildung 119 verdeutlicht die Lage der bestehenden Fahrspurachse in Bezug auf die Gewässerbreite. Zur Veranschaulichung wurde dabei die Fahrspurachse linearisiert und ihre Abstände zum linken und rechten Ufer graphisch dargestellt. Die Sekundärwellenhöhen für volle Abladung des GMS sind in Abbildung 120 aufgetragen.

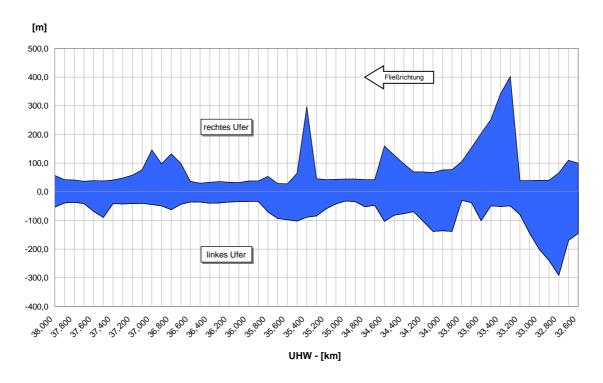


Abbildung 119: Darstellung der Fahrspurachse bezüglich ihrer Lage zum rechten und linken Ufer. Deutlich zu sehen sind die stark variierenden Wasserspiegelbreiten.

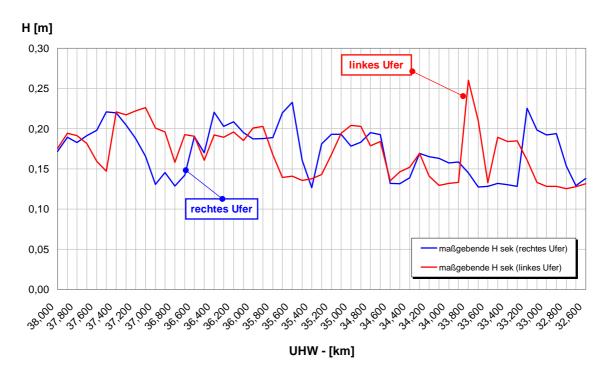


Abbildung 120: Sekundärwellenhöhen bei Fahrt des GMS mit maximal 9 km/h

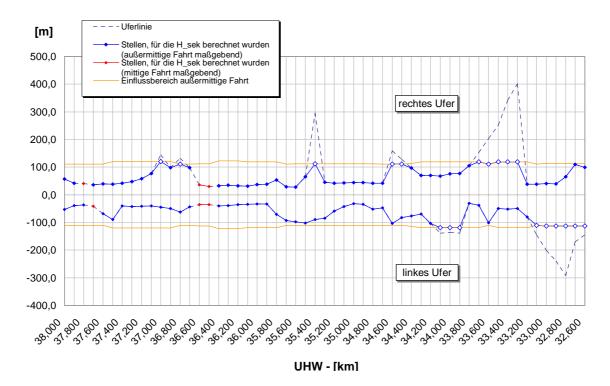


Abbildung 121: Darstellung der Stellen, für die die Sekundärwellenhöhen unter der maßgebenden Fahrt des GMS (mittig bzw. außermittig) berechnet wurden. An Gewässeraufweitungen sind die Wellenhöhen für den Rand des Einflussbereichs berechnet.

Aus der Berechnung der Wellenhöhen ging hervor, dass die maximalen Wellenhöhen nicht immer durch die außermittige Fahrt des Schiffes verursacht werden. Zwischen km 36,500 und 36,600 (beide Uferseiten) sowie bei km 37,700 (linkes Ufer) und km 37,800 (rechtes Ufer) liefert die mittige Fahrweise die größten Werte. Die Gründe dafür sind in der reduzierten Schiffsgeschwindigkeit bei außermittiger Fahrt und in der relativ geringen Exzentrizität, mit der im Vergleich zu anderen Querschnitten in diesen Bereichen gefahren werden darf, zu suchen. In Abbildung 121 sind diejenigen Stellen, für die die Sekundärwellenhöhen berechnet wurden, dargestellt. Fährt das GMS näher als seine halbe Einflussbreite ($B_{\rm E}/2$) am Ufer, so entsprechen die berechneten Werte den an der Uferlinie zu erwartenden Wellenhöhen. Ist die Distanz des Schiffes zum Ufer größer als $B_{\rm E}/2$, so beziehen sich die Wellenhöhen auf den Rand des Einflussbereichs.

In der Praxis kommt es bei seitlich begrenztem Fahrwasser immer zur Überlagerung des primären und sekundären Wellensystems. Ausgehend vom Bug des fahrenden Schiffes werden regelmäßig Sekundärwellen ausgelöst, die sich zum Ufer hin ausbreiten und sich mit der in Abbildung 117 dargestellten Wasserspiegelabsenkung überlagern. Die maximale Wasserspiegelschwankung über dem Böschungsfußpunkt entsteht dabei aus der Überlagerung der Sekundärwellen mit der Bugstauwelle sowie mit der maximalen Wasserspiegelabsenkung. Dieser Fall wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als maximale Schiffswellenhöhe ($H_{\rm ges}$) bezeichnet. Das angehobene Ni-

veau setzt sich dabei aus der Bugstauhöhe ($\Delta h_{\rm B}$) und der halben Sekundärwellenhöhe ($H_{\rm sek}/2$) zusammen. Die absolute Niveauabsenkung berechnet sich aus der maximalen Wasserspiegelabsenkung über dem Böschungsfuß (Δh) und der halben Sekundärwellenhöhe ($H_{\rm sek}/2$). Dadurch ergibt sich die maximale Schiffswellenhöhe ($H_{\rm ges}$) als Wasserspiegelschwankung über dem Böschungsfuß wie folgt:

$$H_{\text{ges}} = \Delta h_{\text{B}} + 0.5 \cdot H_{\text{sek}} + \Delta h + 0.5 \cdot H_{\text{sek}}$$

$$(38)$$

$$\Rightarrow H_{\rm ges} = H_{\rm BF} + H_{\rm sek} \tag{39}$$

Liegt das Ufer im Einflussbereich des Schiffes, so kommt es zur Überlagerung der Wellensysteme. Abbildung 122 zeigt die maximalen Wellenhöhen, die am linken und rechten Ufer durch Überlagerung von Primär- und Sekundärwellen entstehen. Für Uferbereiche, die sich außerhalb der Einflussbreite des Schiffes befinden, werden nur die Sekundärwellen relevant (vgl. Abb. 120).

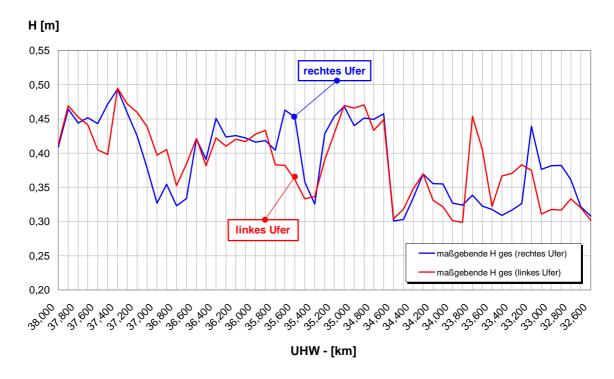


Abbildung 122: Maximale Schiffswellenhöhen aus der Überlagerung von Primär- und Sekundärwellen bei Fahrt eines GMS mit maximal zulässiger Geschwindigkeit. Die Wellenhöhen liegen zwischen 30 cm und 50 cm.

In Anlage 10.4 sind die Ergebnisse der Primär- und Sekundärwellenberechnungen tabellarisch zusammengestellt.

7.2.5 Wasserwechselbereich

Aufgrund der Überlagerung der Schiffswellensysteme kommt es zu Wasserspiegelschwankungen, die die Entwicklung der Ufervegetation im Wasserwechselbereich und

damit die Uferstabilität erheblich beeinflussen können. Für den Einsatz von ingenieurbiologischen Maßnahmen im Uferbereich ist deshalb die Kenntnis des zu erwartenden Wasserwechselbereichs sehr wichtig. Es können in diesem Bereich nur Pflanzenarten verwendet werden, die sowohl längeren Überstauungs- bzw. Trockenzeiträumen als auch ständigen Wasserspiegelschwankungen standhalten.

An der UHW zwischen Potsdam und Brandenburg resultieren die maßgebenden Wasserspiegelschwankungen überwiegend aus der Schifffahrt. Trägt man die maximalen Schiffswellenhöhen bezogen auf den oberen und unteren Bemessungswasserspiegel (BWo, BWu) auf, so erhält man die an den Ufern zu erwartenden Wasserwechselbereiche (vgl. Abb. 123).

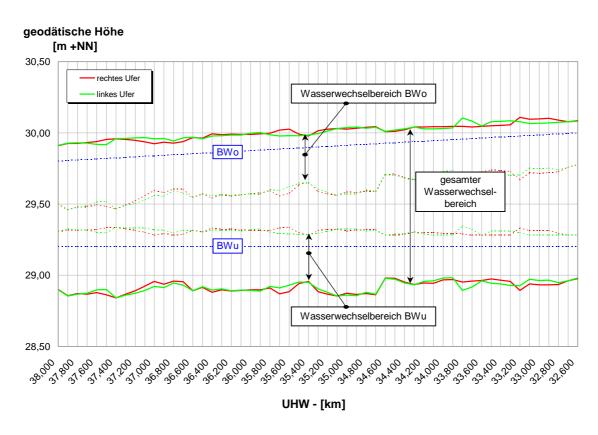


Abbildung 123: Darstellung der Wasserwechselbereiche am linken bzw. rechten Ufer bezogen auf den oberen und unteren Bemessungswasserspiegel. Die Wasserstandsdifferenzen des gesamten Wasserwechselbereichs betragen 1,00 – 1,21 m am linken Ufer und 0,97 – 1,22 m am rechten Ufer.

7.2.6 Sohlenstabilität

Durch Umformung des universellen Fließgesetzes (Gl. 2) und über die Schubspannungsformel (Gl. 12) erhält man Gleichung (40), nach der die Sohlenschubspannungen für den Bauabschnitt 1 berechnet wurden.

$$\tau_0 = \lambda \cdot \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot v_{\rm m}^2 \tag{40}$$

Der Widerstandsbeiwert (λ) wurde dabei über das Moody-Diagramm abgeschätzt. Die maximalen mittleren Geschwindigkeiten ($v_{\rm m}$) setzen sich aus der Überlagerung der Fließgeschwindigkeit und der Rückströmungsgeschwindigkeit (vgl. Abb. 116) zusammen. In Abbildung 124 sind die maximalen Schubspannungen dargestellt. Sie wurden aus dem Vergleich zwischen mittiger und außermittiger Fahrt des GMS ermittelt.

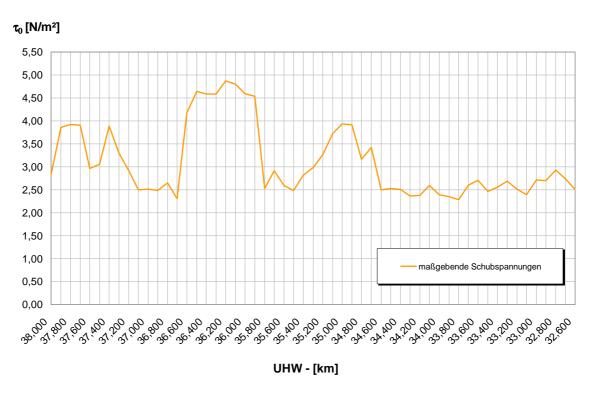


Abbildung 124: Mittlere Schubspannungen an der Gerinnesohle

Die erforderlichen Steingrößen sind nach dem *Merkblatt für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen (MBB)* (BAW, 1999) berechnet worden. Auf die Einzelheiten der Berechnung wird an dieser Stelle nicht weiter eingangen, es werden lediglich die wichtigsten Berechnungsformeln vorgestellt.

Der mittlere Steindurchmesser ($D_{\rm n50}$) lässt sich für den Bemessungswert der Wellenhöhe über dem Böschungsfußpunkt nach Gleichung (41) und für die Höhe der Wind- und Sekundärwelle nach Gleichung (42) berechnen.

$$D_{\rm n50} \ge \frac{H_{\rm BF}}{B_{\rm B}'\left(\frac{(\rho_{\rm S} - \rho)}{\rho}\right) n^{1/3}} \tag{41}$$

$$D_{\rm n50} \ge \frac{H_{\rm sek}\sqrt{\xi}}{2,25\left(\frac{(\rho_{\rm S}-\rho)}{\rho}\right)} \tag{42}$$

Nach den Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW) lässt sich der Bemessungswert des erforderlichen mittleren Steindurchmessers ($D_{\rm TLW}$) nach Gleichung (43) ermitteln.

$$D_{\text{TLW}} = 1, 6 \cdot D_{\text{n50}} \tag{43}$$

Die erforderliche Einbaudicke (d_D) der Schüttsteine ergibt sich aus Gleichung (44).

$$d_{\rm D} = 1, 5 \div 2, 0 \cdot D_{\rm n50} \tag{44}$$

In Abbildung 125 sind die erforderlichen Steingrößen für verschiedene Böschungsneigungen aufgezeigt. Abbildung 126 stellt die erforderlichen Einbaudicken dar.

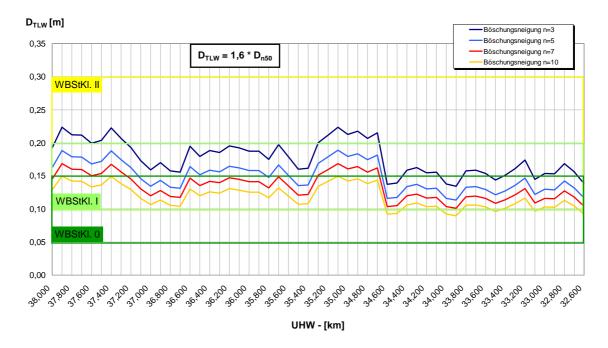


Abbildung 125: Darstellung der erforderlichen mittleren Steindurchmesser und der relevanten Wasserbausteinklassen

Aus Abbildung 125 wird ersichtlich, dass bei Ausbildung flacher Böschungen kleinere Wasserbausteine verwendet werden können. Während zwischen km 34,700 und km 35,300 sowie zwischen km 37,300 und km 37,900 bei einer Böschungsneigung n=3 Wasserbausteine der Klasse II zur Sohlsicherung benötigt werden, können in allen anderen Gewässerabschnitten Wasserbausteine der Klasse I verwendet werden. Durch Reduzierung der Böschungsneigung auf n=5 bzw. n=7 kann für viele Bereiche auf Wasserbausteinklasse 0 zugegriffen werden.

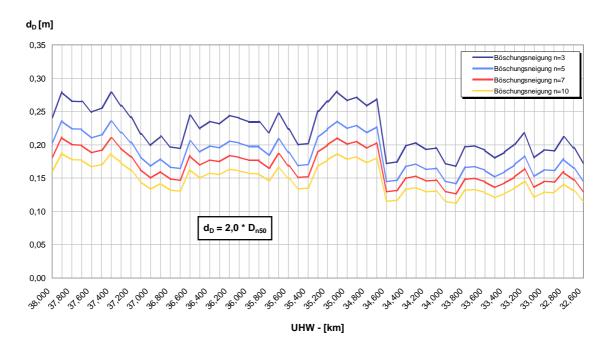


Abbildung 126: Darstellung der erforderlichen Einbaudicken der Wasserbausteine für verschiedene Böschungsneigungen

8 Uferschutzkonzept für UHW-Abschnitt km 32,600 bis km 38,000

Der Ausbau der UHW zur Wasserstraßenklasse Vb beinhaltet die Vertiefung und Verbreiterung des Fahrwassers für die moderne Binnenschifffahrt mit Großmotorgüterschiffen (GMS) und Schubverbänden (SV). Um den durchgängigen zweischiffigen Verkehr zu ermöglichen, ist es notwendig, an einigen Stellen Querschnittsverbreiterungen vorzunehmen.

In Kapitel 8.1 werden über die Betrachtung der erforderlichen Gewässerprofile diejenigen kritischen Uferstellen ermittelt, die verbreitert werden müssen. In Kapitel 8.2 wird dann unter Berücksichtigung der in Kapitel 7.2 beschriebenen Belastungsgrößen ein Sicherungskonzept erarbeitet, um von Ausbaumaßnahmen betroffene und gefährdete Uferstellen zu schützen. Dieses Konzept sieht die Ufersicherung durch ingenieurbiologische Bauweisen vor. Ein Einsatz von klassischen Deckwerken wird an der UHW ausgeschlossen.

8.1 Ermittlung der kritischen Uferbereiche

Zunächst werden die erforderlichen neuen Profilabmessungen auf die bestehende Fahrspurachse bezogen aufgetragen (Kap. 8.1.1). Daraus ist ersichtlich, in welchen Bereichen Uferabgrabungen notwendig werden. Unter Berücksichtigung der Vorgabe, Verbreiterungen möglichst nur an einer Uferseite vorzunehmen (Ausbaugrundsätze), wird dann die Lage der Fahrspurachse an den maßgebenden Stellen einerseits in Richtung des linken und andererseits in Richtung des rechten Ufers verlegt (Kap. 8.1.2). Anschließend wird aus diesen Fahrspurverläufen eine kombinierte Ausbauvariante vorgestellt, bei der die Eingriffe in die Gewässerrandbereiche beidseitig so gering wie möglich gehalten sind (Kap. 8.1.3).

Durch diese Darstellungen sollen kritische Uferbereiche im UHW-Abschnitt zwischen km 32,600 und km 38,000 aufgezeigt und das Ausmaß erforderlicher Verbreiterungen deutlich gemacht werden. Eine durch die Verlegung der Fahrspur zwangsweise erforderliche Neu-Trassierung der Gewässerstrecke war im Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit nicht möglich und ist in den folgenden Betrachtungen nicht enthalten.

8.1.1 Erforderliche Querschnittsverbreiterungen bei unveränderter Lage der Fahrspurachse

In Abbildung 127 ist der Verlauf der erforderlichen Ausbauprofile für die Böschungsneigung 1:3 und alternativ für die Neigung 1:5 dargestellt. Die Profile sind in Bezug auf die ursprüngliche Fahrspurachse aufgetragen. Anhand der Überlagerung der Ausbauprofile mit den vorhandenen Uferabständen können diejenigen Uferbereiche ermittelt werden, an denen Verbreiterungen erforderlich sind. Die betroffenen Stellen sind in Abbildung 128 gekennzeichnet.

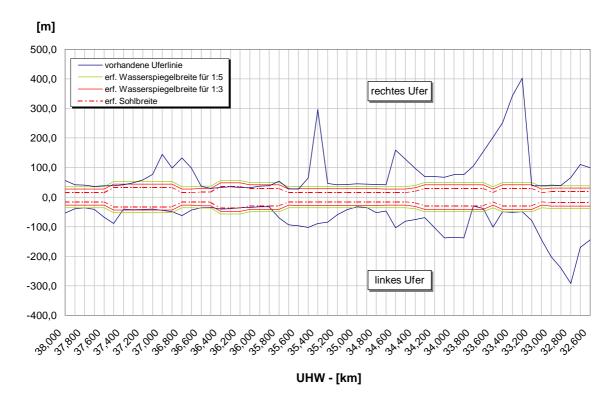


Abbildung 127: Erforderliche Sohl- und Wasserspiegelbreiten der Ausbauprofile bei der Begegnung zweier Schubverbände. Die Wasserspiegelbreiten der Trapezprofile sind für Böschungsneigungen 1:3 und 1:5 dargestellt.

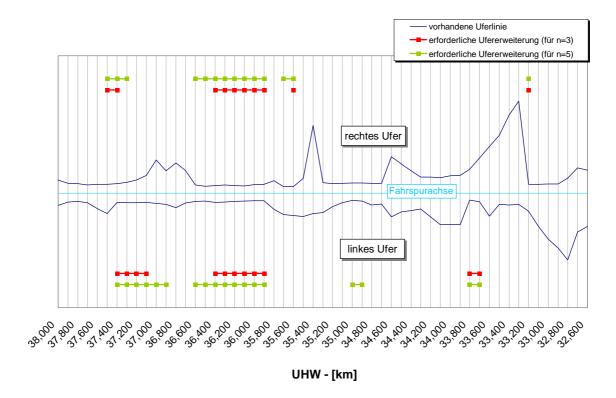


Abbildung 128: Uferbereiche, an denen bauliche Maßnahmen zur Verbreiterung des Gewässerprofils erforderlich werden (dargestellt für die Böschungsneigungen 1:3 und 1:5)

In Durchstichen und in Kurvenbereichen muss die Sohl- und Wasserspiegelbreite aufgrund der Begegnung zweier Schubverbände teilweise über längere Abschnitte vergrößert werden. Wird die Fahrspurachse z.B. im Dammgraben (km 35,900-36,650) nicht verlegt, so sind beidseitige Uferabgrabungen von jeweils $500-600\,\mathrm{m}$ Länge (Böschungsneigung 1:3) notwendig. Bei einer Gestaltung der Ufer mit der Neigung 1:5 erstrecken sich die erforderlichen Verbreiterungen über eine Länge von $700-800\,\mathrm{m}$ (vgl. Abb. 128). Die maximal notwendige Verbreiterung in diesem Bereich beträgt für die Neigung n=3 ausgehend von der Uferlinie ca. $16\,\mathrm{m}$ (km 36,200, rechtes Ufer) und für die Neigung n=5 ca. $24\,\mathrm{m}$ (km 36,200, rechtes Ufer) .

Durch die Ausbildung flacher Uferböschungen ($n \geq 3$) reduziert sich die Wellenbelastung des Uferbereichs. Außerdem können bei einer Böschungsneigung von 1:5 im gesamten Streckenabschnitt Wasserbausteine der Klasse I, stellenweise auch Klasse 0 verwendet werden (vgl. Abb. 125). Aus ökologischer Sicht ist die Ausbildung flacher Uferböschungen zu begrüßen, was allerdings einen höheren Flächenbedarf am Gewässerrand mit sich bringt. Die Energie einer auf das Ufer zulaufenden Welle wird umso besser abgebaut, je flacher die Unterwasserböschung ausgebildet ist (Flachwasserzone). Gleichzeitig wird dadurch auch die Entwicklung eines breiteren Röhrichtgürtels gefördert, der zusätzlichen Wellenschutz bietet. Vorteilhaft aus Sicht des Uferschutzes beeinflusst die Böschungsneigung auch die Wellenauflaufhöhe, die mit abnehmendem Winkel und steigender Rauhigkeit des Ufers vermindert wird (WILDE, 2000).

8.1.2 Erforderliche Querschnittsverbreiterungen durch Verlegung der Fahrspur in Richtung einer Uferseite

Aus den Ausbaurichtlinien für das Projekt 17 geht hervor, dass die Ausbaumaßnahmen im wesentlichen an der Eingriffsminimierung zu orientieren sind (vgl. Kap. 7.1). Die ausgeprägte Kulturlandschaft mit ihrer wertvollen Flora und Fauna entlang des Gewässers darf durch die baulichen Maßnahmen nicht beeinträchtigt werden. Nach Möglichkeit soll immer nur an einer Uferseite verbreitert werden, um auf der anderen Seite den vorhandenen Bewuchs zu erhalten und gleichzeitig Beeinträchtigungen des Schiffsverkehrs während der Bauzeit gering zu halten (Bundesministerium für Verkehr, 1997).

Verlegung der Fahrspurachse in Richtung linkes Ufer

Unter Berücksichtigung, dass der rechte Uferbereich des untersuchten Gewässerabschnitts über die gesamte Strecke der 5,4 km von Verbreiterungen unberührt bleibt, ist der Verlauf der erforderlichen Ausbauprofile für die Böschungsneigung 1:3 (vgl. Abb. 129) und für die Neigung 1:5 (vgl. Abb. 130) graphisch dargestellt. Dabei wird deutlich, dass an einigen Stellen von der ursprünglichen Fahrspurachse abgewichen und die Fahrspur in Richtung des linken Ufers verlegt werden muss, um den gegenüberliegenden Uferbereich von Uferabgrabungen verschonen zu können. Die Neu-Trassierung der Strecke ist in diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

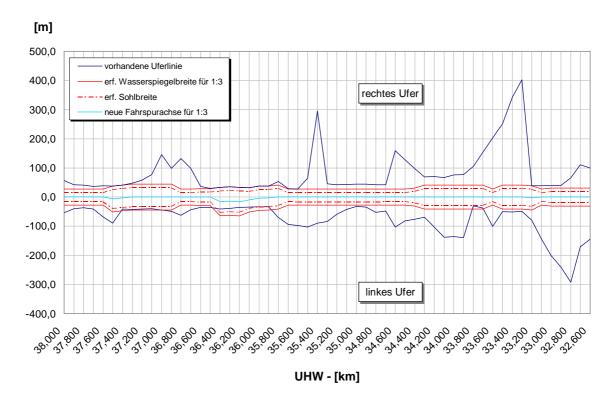


Abbildung 129: Verlauf der erforderlichen Ausbau-Trapezprofile mit der Neigung 1:3, unter der Bedingung, dass nur die linke Uferseite von erforderlichen Querschnittsverbreiterungen betroffen ist und das rechte Ufer unberührt bleibt

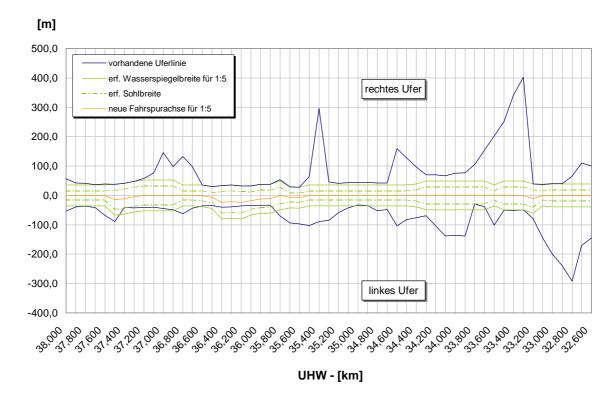


Abbildung 130: Verlauf der erforderlichen Ausbau-Trapezprofile mit der Neigung 1:5, unter der Bedingung, dass nur die linke Uferseite von erforderlichen Querschnittsverbreiterungen betroffen ist und das rechte Ufer unberührt bleibt

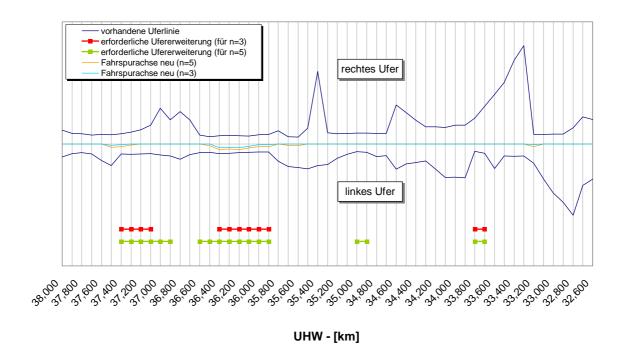


Abbildung 131: Kennzeichnung der Uferbereiche, an denen bauliche Maßnahmen zur Verbreiterung der Gewässerprofile erforderlich sind (dargestellt für den Verlauf der Ausbauprofile aus Abb. 129 und 130)

In Abbildung 131 sind die betroffenen Stellen und die verlegte Fahrspurachse gekennzeichnet. Die maximale Verlegung der Fahrspurachse findet im Querschnitt km 36,200 statt und beträgt für die Böschungsneigung 1:3 ca. 16 m und für die Neigung 1:5 ca. 24 m (vgl. dazu auch Anlage 10.5). Die erforderlichen Ausbauprofile wurden in den jeweiligen Querschnitten um den für die Gewährleistung der vorhandenen Uferstruktur minimal erforderlichen Betrag in Richtung der gegenüberliegenden Uferseite "verschoben". Daraus resultiert der teilweise neue Verlauf der Fahrspurachse. Aus der Überlagerung der Ausbauprofile mit den vorhandenen Uferlinien ergeben sich dann die Uferbereiche, an denen Baumaßnahmen vorzunehmen sind.

Verlegung der Fahrspurachse in Richtung rechtes Ufer

Analog zur Gewässerverbreiterung an der linken Uferseite ist in Abbildung 132 und 133 die Verlegung der Fahrspur zum rechten Ufer dargestellt. In diesem Fall soll der linke Uferbereich zwischen km 32,600 und km 38,000 von Verbreiterungen unberührt bleiben.

Auch hier wird eine durch die Fahrspurverlegung eigentlich erforderliche Neu-Trassierung nicht berücksichtigt.

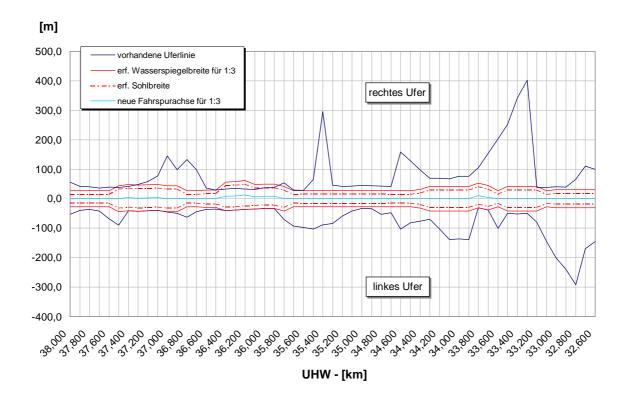


Abbildung 132: Verlauf der erforderlichen Ausbau-Trapezprofile mit der Neigung 1:3, unter der Bedingung, dass nur die rechte Uferseite von erforderlichen Querschnittsverbreiterungen betroffen ist und das linke Ufer unberührt bleibt

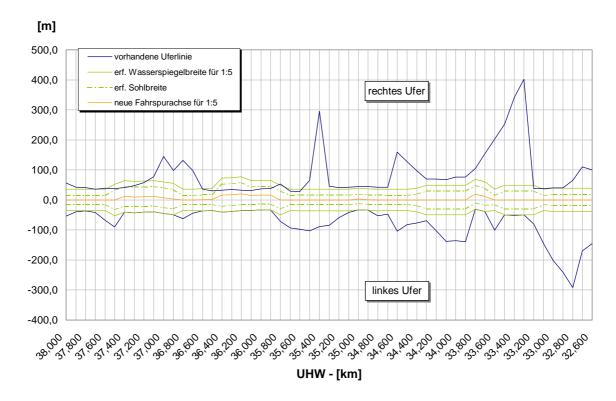


Abbildung 133: Verlauf der erforderlichen Ausbau-Trapezprofile mit der Neigung 1:5, unter der Bedingung, dass nur die rechte Uferseite von erforderlichen Querschnittsverbreiterungen betroffen ist und das linke Ufer unberührt bleibt

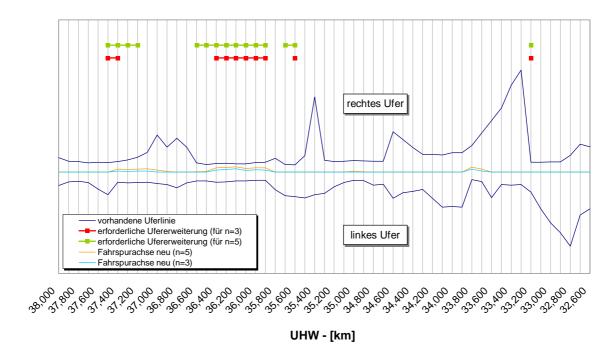


Abbildung 134: Kennzeichnung der Uferbereiche, an denen bauliche Maßnahmen zur Verbreiterung der Gewässerprofile erforderlich sind (dargestellt für den Verlauf der Ausbauprofile aus Abb. 132 und 133)

8.1.3 Beidseitige Verlegung der Fahrspurachse

Die vorangehenden Abbildungen haben gezeigt, dass die mit dem Ausbau der UHW verbundenen Eingriffe in die bestehende Uferstruktur in einigen Gewässerbereichen durch Verlegung der Fahrspurachse reduziert werden können. Das Fahrwasser verläuft besonders in Bereichen von Gewässeraufweitungen einseitig ufernah, so dass an einigen kritischen Stellen durch Verlegung der Fahrspur Baumaßnahmen auf Sohlvertiefungen beschränkt werden können. Begünstigt wird dies durch die im betrachteten UHW-Abschnitt natürlich vorhandenen, großen Wasserspiegelbreiten, die dem zweischiffigen Begegnungsverkehr an vielen Stellen ausreichend Platz bieten. Von Uferbaggerungen nicht verschont bleiben wird z.B. der Bereich des Dammgrabens, der aufgrund der geringen Wasserspiegelbreite und des Kurvenverlaufs verbreitert werden muss.

In diesem Kapitel wird nun durch Kombination der Darstellungen aus Kapitel 8.1.2 ein Ausbaukonzept entworfen, das sich auf minimal notwendige Verbreiterungen der bestehenden Ufer beschränkt, um die Pflanzen- und Tierwelt nicht zu beeinträchtigen (Eingriffsminimierung). Dabei wird nur auf die damit verbundene Ausbildung und Sicherung der Ufer für maßgebende Stellen des Wasserwechsel- und Überwasserbereichs eingegangen. Vertiefungen der Sohle sowie die Ausbildung der Unterwasserböschung unterliegen nicht dem Bearbeitungsgebiet dieser Arbeit.

Unter der Bedingung, dass innerhalb eines Querschnitts nur an einer Uferseite ausge-

baut wird²⁹, folgt der Verlauf der Ausbauprofile für die Böschungsneigung 1:3 nach Abbildung 135 und für 1:5 nach Abbildung 136. Die nachfolgend aufgeführten Uferbereiche wurden nach dem in Abbildungen 131 und 134 beschriebenen Fahrspurverlauf als von Verbreiterungsmaßnahmen betroffene Stellen bestimmt. Durch Änderung der Lage der Fahrspur können sie jedoch erhalten bleiben.

Verlegung der Fahrspurachse des Ausbauprofils mit einer Neigung n=3, wodurch folgende Verbreiterungen vermieden werden können:

- km 33,200 (rechtes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung linke Uferseite
- km 35,600 (rechtes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung linke Uferseite
- km 37,500 (rechtes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung linke Uferseite
- km 33,700 33,800 (linkes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung rechte Uferseite
- km 37,100 37,300 (linkes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung rechte Uferseite

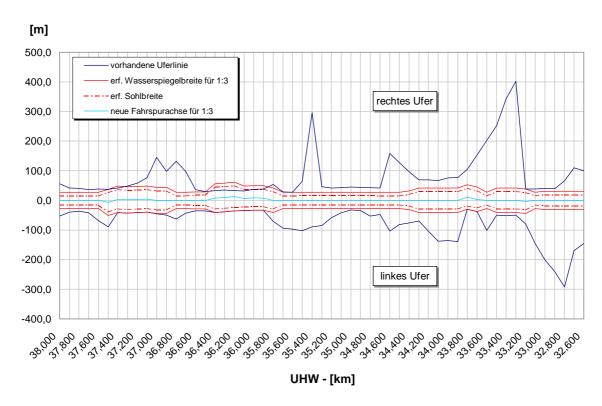


Abbildung 135: Maßgebender Verlauf der erforderlichen Ausbauprofile mit der Neigung 1:3 nach dem Grundsatz der Eingriffsminimierung

 $^{^{29} \}mathrm{Dieser}$ Arbeit liegen Querschnittsdaten im Abstand von $100\,\mathrm{m}$ zu Grunde.

Verlegung der Fahrspurachse des Ausbauprofils mit einer Neigung n=5, wodurch folgende Verbreiterungen vermieden werden können:

- km 33,200 (rechtes Ufer):
 Verlegung der Fahrspur in Richtung linke Uferseite
- km 35,600 35,700 (rechtes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung linke Uferseite
- km 37,500 (rechtes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung linke Uferseite
- km 33,700 33,800 (linkes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung rechte Uferseite
- km 34,900 35,000 (linkes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung rechte Uferseite
- km 36,900 37,100 (linkes Ufer): Verlegung der Fahrspur in Richtung rechte Uferseite

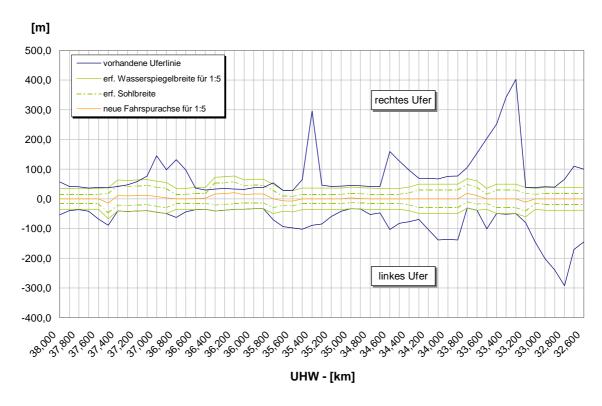


Abbildung 136: Maßgebender Verlauf der erforderlichen Ausbauprofile mit der Neigung 1:5 nach dem Grundsatz der Eingriffsminimierung

Im Bereich des Dammgrabens muss das Ufer einseitig auf der Strecke von km 35,900 bis km 36,400 (für n=3) bzw. von km 35,900 bis km 36,600 (für n=5) abgebaggert werden.

Die erforderlichen Verbreiterungen – ausgehend von der bestehenden Uferlinie – betragen $12-29\,\mathrm{m}$ für die Uferneigung n=3 bzw. $2-45\,\mathrm{m}$ für die Neigung n=5, unabhängig davon, an welcher Uferseite die Maßnahme durchgeführt wird (vgl. Anlage 10.5). Das gilt auch für km 37,400, wo bei einer Neigung von 1:3 eine Verbreiterung von $6,50\,\mathrm{m}$ (bzw. $22,50\,\mathrm{m}$ für 1:5) sowohl am rechten als auch am linken Ufer zu erwarten ist. Im Bereich von km 36,900-37,400 fließt das Gewässer als Linkskurve, wobei sich auf der rechten Seite ein Parallelwerk befindet. Nach dem Grundsatz der Eingriffsminimierung würden sich in diesem Gewässerabschnitt erforderliche Uferabtragungen an der rechten Uferseite auf km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. auf km 37,200-37,400 (Böschungsneigung 1:5) beschränken. Dies bedeutet, dass das Parallelwerk von Abgrabungen betroffen wäre (vgl. Abb. 137). Werden die Ausbauarbeiten auf die linke Uferseite beschränkt, so sind Uferabgrabungen zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsneigung 1:3) bzw. zwischen km 36,900 und km 37,400 (Böschungsnei

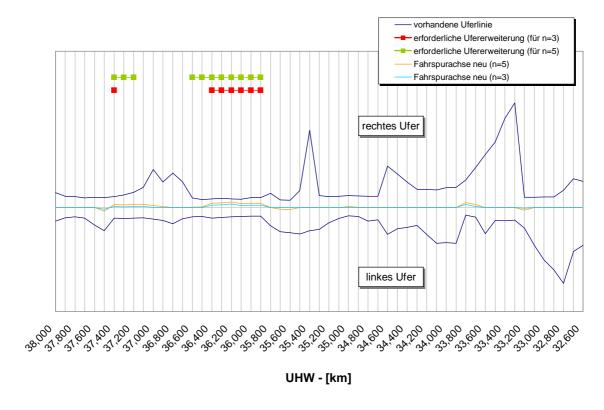


Abbildung 137: Dargestellt sind diejenigen Querschnitte, deren Ufer trotz des Grundsatzes der Eingriffsminimierung durch Verlegung der Fahrspurachse nicht von Verbreiterungsmaßnahmen verschont bleiben.

Die Angaben zu erforderlichen Verbreiterungsmaßnahmen resultieren aus der Ermittlung der benötigten Querschnittsprofile und deren Vergleich mit den vorhandenen Wasserspiegelbreiten. Sie berücksichtigen weder die Standortverhältnisse noch die Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Ausarbeitungen für den zukünftigen Verlauf des Fahrwassers

nicht Inhalt dieser Arbeit sind. Die Ansätze in diesem Kapitel dienen lediglich der Abschätzung der Auswirkungen des geplanten Ausbaus auf die bestehende Uferstruktur. Im weiteren Verlauf werden die erforderlichen Verbreiterungen wie in Abbildung 137 dargestellt angenommen.

8.2 Ufersicherung durch ingenieurbiologische Maßnahmen

Nach der Ermittlung der vom Ausbau betroffenen Uferstellen (vgl. Kap. 8.1) werden in diesem Kapitel ingenieurbiologische Maßnahmen zur Sicherung der gefährdeten Stellen erarbeitet. Dazu wird entsprechend der auftretenden Wellenhöhen eine Einteilung der Ufer in unterschiedliche Belastungsbereiche vorgenommen. Das Ausmaß der zu erwartenden Schiffswellenhöhen wurde in Kapitel 7.2.4 erläutert, wobei die in Abbildung 122 dargestellten maximalen Schiffswellenhöhen, die aus der Überlagerung der Sekundärwellen und des Absunks resultieren, für die Belastung der Ufer maßgebend sind.

Die Primärwellenhöhe (Absunk) wurde für den Böschungsfuß des Ersatzquerschnitts berechnet, wobei der Berechung die mittige Fahrt des Schiffes im Ersatzquerschnitt zugrunde liegt. Dies ist im untersuchten UHW-Abschnitt nur dann der Fall, wenn auch das Fahrwasser mittig verläuft (z.B. in schmalen Gewässerbereichen wie im Dammgraben). Für die außermittige Fahrt des Schiffes oder in Fließquerschnitten, in denen die Lage des Fahrwassers bezüglich der Ufer nicht mittig verläuft, sind an den beiden Uferseiten unterschiedliche Wellenhöhen zu erwarten. Das bedeutet, dass die Primärwellenhöhen in der Praxis an den zur Fahrspur näher gelegenen Ufern geringfügig höher und an den fahrspurfernen Uferbereichen geringfügig niedriger ausfallen werden als die berechneten Wellenhöhen³⁰. Aufgrund dieser Ungenauigkeit wird für die Einteilung der Ufer in unterschiedliche Belastungsbereiche nicht die Primärwellenhöhe, sondern die Sekundärwellenhöhe verwendet, wodurch der Uferabstand des Schiffes berücksichtigt wird.

Um einen Bezugswert zu erhalten, ab wann die Gefährdung der Ufer durch Wellen und der damit verbundenen Wasserspiegelschwankungen als "gering" eingeschätzt werden kann, wurde die Wellenhöhe am Rand des Einflussbereichs herangezogen. Auf diese Art lässt sich für diejenigen Gewässerquerschnitte, deren Ufer am Rand oder außerhalb der Einflussbreite liegen, als Referenzwert eine mittlere Primärwellenhöhe von ca. 20 cm bzw. eine Sekundärwellenhöhe von ca. 15 cm ableiten. Dies entspricht einem Wasserwechselbereich von ca. 35 cm (vgl. Abb. 138 und 139).

³⁰Werden die Primärwellenhöhen im Bereich des Dammgrabens (km 35,900 – 36,600) aufgrund der annähernd mittigen Fahrwasserführung als Vergleichshöhe herangezogen, so beträgt die Differenz zu Primärwellenhöhen in Querschnitten mit außermittigem Verlauf des Fahrwassers (z.B. km 32,600 – 34,200) im Mittel ca. 4 cm. Diese Abweichung kann für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden.

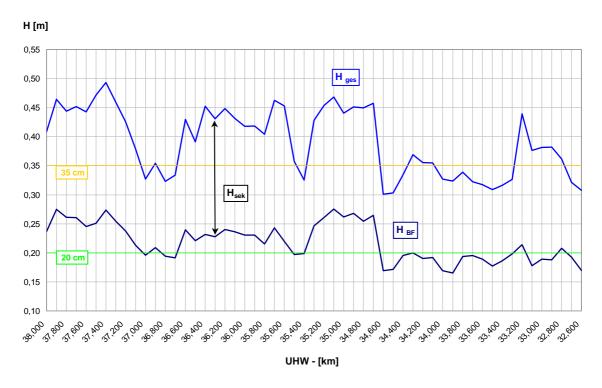


Abbildung 138: Maximale Schiffswellenhöhen aus der Überlagerung von Primär- und Sekundärwellen an der rechten Uferseite

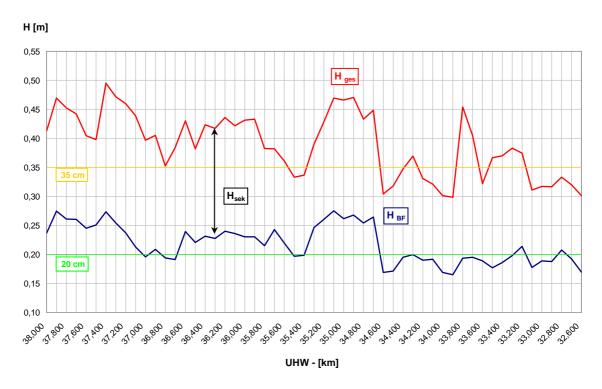


Abbildung 139: Maximale Schiffswellenhöhen aus der Überlagerung von Primär- und Sekundärwellen an der linken Uferseite

Das Ufersicherungskonzept beinhaltet die Sicherung der Böschungsoberfläche in der Wasserwechsel- bzw. Überwasserzone. Es wird davon ausgegangen, dass die Unterwasserböschung mit Schüttsteinen ausgeführt wird und dass die Standsicherheit der Böschung gewährleistet ist.

Die Eignung ingenieurbiologischer Bauweisen zur Ufersicherung wird von verschiedenen geologischen, hydrologischen und pflanzensoziologischen Standortfaktoren bestimmt. In den folgenden Ausführungen wird die Eignung einer Maßnahme auf der Grundlage der publizierten Grenzwerte zu den Belastungsgrößen Fließgeschwindigkeit ($v_{\rm ges}$) und Schubspannung (τ) abgeschätzt. Zusätzlich wird versucht, die aus der Schifffahrt resultierenden Wellenbelastungen bei der Auswahl der geeigneten Ufersicherungsbauweisen zu berücksichtigen. Eine detaillierte Abstimmung der gewählten ingenieurbiologischen Maßnahmen auf die Standortverhältnisse ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Es sind in der Literatur keine Angaben zu finden, die die Auswirkungen der Schiffswellenhöhen auf die Stabilität ingenieurbiologischer Uferbefestigungen ausdrücken. Entsprechend sind auch keine Angaben zur Widerstandsfähigkeit von Uferbewuchs gegen Wellenbelastung vorhanden. Aus diesem Grund kann über die Schiffswellenhöhen am untersuchten UHW-Abschnitt keine qualifizierte Aussage bezüglich der Stabilität der in Frage kommenden ingenieurbiologischen Uferbefestigungen gemacht werden.

Aus den für den UHW-Abschnitt km 32,600 - 38,000 ermittelten Belastungsgrößen wird deutlich, dass die absoluten Rückströmungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von $0,91 \,\text{m/s}$ bis $1,33 \,\text{m/s}$ liegen (vgl. Abb. 116). Die mittleren Sohlenschubspannungen betragen $2,3 - 4,9 \,\text{N/m}^2$ (vgl. Abb. 124).

Im Bereich des Dammgrabens (km 35,900 – 36,600) treten sowohl die maximalen Rückströmungsgeschwindigkeiten als auch die maximalen Werte der Schubspannungen auf. In beiden Fällen ist die mittige Fahrt des GMS maßgebend. Das hängt damit zusammen, dass die Schiffe in dieser Passage aufgrund der kritischen Geschwindigkeit nicht mit der zulässigen Geschwindigkeit von 9 km/h fahren dürfen, sondern der Bemessungswert der kritischen Geschwindigkeit $(0,9\cdot v_{\rm krit})$ maßgebend wird. Dieser liegt bei mittiger Fahrt immer über dem entsprechenden Wert für außermittige Fahrt (vgl. Abb. 112).

Die maximalen Wellenhöhen über dem Böschungsfuß ($H_{\rm BF}$) betragen im gesamten UHW-Abschnitt zwischen 17 cm und 28 cm (vgl. Abb. 118). Die maximalen Sekundärwellen ($H_{\rm sek}$) weisen eine Höhe zwischen 13 cm und 26 cm auf (vgl. Abb. 120), so dass durch Überlagerung mit dem Primärwellensystem Schiffswellenhöhen von insgesamt 30 cm bis 50 cm entstehen (vgl. Abb. 122). Der größte schiffswellenbedingte Wasserspiegelwechsel tritt im Querschnitt km 37,400 mit ca. 50 cm auf. Dadurch entsteht an dieser Uferstelle eine Wasserwechselzone von ca. 1,12 m (rechtes Ufer). Betrachtet man den gesamten UHW-Abschnitt km 32,600 – 38,000, so haben die Wasserspiegelschwankungen - auf den oberen und unteren Bemessungswasserspiegel bezogen - Wasserwechselzonen zwischen 0,97 m und 1,22 m zur Folge (vgl. Abb. 123).

Für die folgenden Ausführungen wird zur Einschätzung der Ufersicherheit die Sekundärwellenhöhe von 0,15 m festgelegt. Uferbereiche, an denen durch ufernahe Schiffspassage Sekundärwellenhöhen von über 20 cm auftreten, werden getrennt betrachtet, so dass hinsichtlich der Gefährdung durch Schiffswellen drei verschiedene Uferbereiche unterschieden werden:

- Bereich 1 ("stärker belastet"):
 - Uferstellen, die von der Ausbaumaßnahme in Form von Uferabgrabungen direkt betroffen sind sowie Uferbereiche, für die Sekundärwellenhöhen von über 0,20 m ermittelt wurden
- Bereich 2 ("belastet"):
 Uferstellen, für die Sekundärwellenhöhen zwischen 0,15 m und 0,20 m ermittelt wurden
- Bereich 3 ("gering bzw. nicht belastet"):
 Uferstellen, für die Sekundärwellenhöhen unter 0,15 m ermittelt wurden sowie Uferbereiche, die außerhalb des Einflussbereichs des GMS liegen

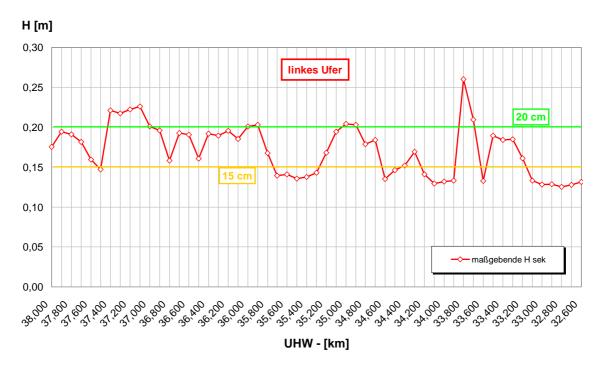


Abbildung 140: Einteilung der linken Uferseite in verschiedene Belastungsbereiche anhand der maßgebenden Sekundärwellenhöhen

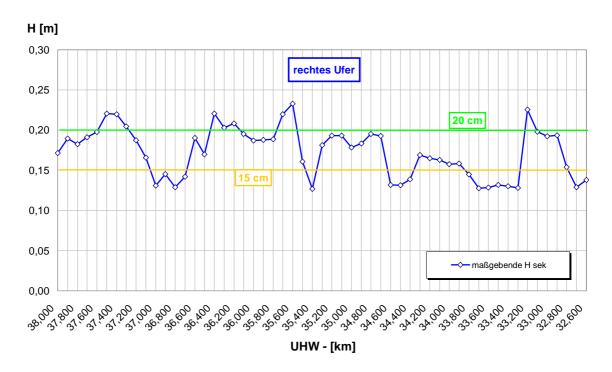


Abbildung 141: Einteilung der rechten Uferseite in verschiedene Belastungsbereiche anhand der maßgebenden Sekundärwellenhöhen

8.2.1 Ufersicherung im Bereich 1:

Uferbereiche, an denen Verbreiterungen vorgenommen werden müssen oder für die Sekundärwellenhöhen über 0,20 m ermittelt wurden, werden in dieser Betrachtung zum "Bereich 1"gezählt. Stellen erforderlicher Verbreiterungen basieren dabei auf der Darstellung des Verlaufs der Ausbauprofile nach Abbildungen 135 und 136. Folgende Uferstellen sind davon betroffen (vgl. Abb. 140):

rechte Uferseite:

- Verbreiterung durch Uferabtrag (vgl. Abb. 137):
 - km 35,900 36,400 (für Böschungsneigung 1:3)
 km 37,400 (für Böschungsneigung 1:3)
 - km 35,900 36,600 (für Böschungsneigung 1:5)
 km 37,200 37,400 (für Böschungsneigung 1:5)
- Sekundärwellenhöhe über 0,20 m:
 - km 33,100 33,200
 - km 35,600 35,700
 - km 36,200 36,400
 - km 37,300 37,500

linke Uferseite:

- Sekundärwellenhöhe über 0,20 m:
 - km 33,700 33,800
 - km 34,900 35,000
 - km 37,000 37,400

Wie in Abbildungen 116 und 124 deutlich wird, sind Fließgeschwindigkeiten und Schubspannungen im Bauabschnitt 1 relativ gering und stellen theoretisch keine Gefahr für die ingenieurbiologischen Uferbauweisen dar (vgl. dazu Tab. 13 und 17). Die Hauptbelastung der Ufer ist durch Wellenbildung und Absunk aus dem Schiffsverkehr zu erwarten, wie es gerade an schmalen Gewässerabschnitten, z.B. im Bereich des Dammgrabens, der Fall ist.

Die nachfolgenden ingenieurbiologischen Methoden wurden als geeignete Bauweisen zur Sicherung der Uferstellen im "Bereich 1" ausgewählt, da sie in verschiedener Literatur [LfU, SCHIECHTL et al., PATT et al., BEGEMANN et al.] als "massive Bauweisen zur Sicherung stark belasteter Uferbereiche" bezeichnet werden, wobei der Ausdruck "stark belastet" in der Fachliteratur mit hohen Fließgeschwindigkeiten und großen lokalen Schubspannungen gleichgesetzt wird und nicht wie in diesem Kapitel als "Erosionsgefahr durch Schiffswellen" interpretiert wird.

Dabei spiegelt sich die schon angesprochene Problematik wieder, dass für die Beurteilung der Stabilität ingenieurbiologischer Bauweisen keine publizierten Werte zu Belastungsgrenzen bezüglich Wellenbelastungen bestehen. Die in diesem Kapitel aufgeführten Ufersicherungskonzepte orientieren sich überwiegend an den Erkenntnissen, die mit ingenieurbiologischen Ufersicherungen an Test- und Versuchsstrecken gemacht wurden und stützen sich auf die praktischen Erfahrungen nach den Beispielen in Kapitel 6.

Steinschüttung mit Steckhölzern bzw. Röhrichtpflanzungen

Aufgrund der ufernahen Fahrt bei Schiffsbegegnungen oder Überholvorgängen³¹ kann im "Bereich 1" auf eine massive Ufersicherung wie z.B mit Schüttsteinen kaum verzichtet werden. Als ingenieurbiologische Ufersicherung eignet sich die *Steinschüttung mit Steckhölzern* bzw. *Röhrichtpflanzungen*, die eine Kombination aus Lebend- und Totbauweise darstellt. Im Querschnitt km 37,400 zum Beispiel sind dazu bei einer Böschungsneigung 1:3 an beiden Ufern Steine der Klasse II zu verwenden (vgl. Abb. 125). Durch Ausbildung flacherer Böschungen lässt sich die Steingröße reduzieren, so dass bereits bei einer Neigung von 1:5 durchgängig Schüttsteinklasse I verwendet werden kann. Die Steinschüttung ist in der gesamten Wasserwechselzone auszuführen. Im Bereich unterhalb des Mittelwassers (29,42 m üNN, Ketzin) können

³¹Die Entfernung der Schiffsachse zum Ufer beträgt z.B. im Querschnitt km 35,600 bei außermittiger Fahrt 19,9 m für n=3 und 27,9 m für n=5 (rechtes Ufer).

Pflanzungen verschiedener heimischer Röhrichtarten vorgenommen werden. Um eine gute Entwicklung der Pflanzen zu gewährleisten und optimale Wirkungsweise zu erzielen, sollten die Erläuterungen in Kapitel 4.1.19 eingehalten werden. Ist die Ausbildung eines Röhrichtgürtels nicht erwünscht, kann die Steinschüttung ebenso mit Steckhölzern versehen werden (vgl. Kap. 4.1.12 und 4.1.5).

Vegetatives Deckwerk

Als alternative Lösung zur Steinschüttung kann *Vegetatives Deckwerk* (System Bestmann) eingebaut werden. Dabei sollte der Einbau der Matten wegen der Austrocknungsgefahr rein auf den Wasserwechselbereich beschränkt bleiben. Weiter oberhalb kann die Uferböschung mit Stecklingen, Pflanzungen bzw. Gras- und Kräutersaat versehen werden, die gegebenenfalls mit Böschungssschutzmatten (vgl. Kap. 4.1.15) gegen Oberflächenerosion zu schützen sind. Aufgrund des Aufbaus der Deckwerksmatten und ihres Gewichtes wird diese Uferschutzvariante sowohl den Ansprüchen an die Sicherheit der Böschungsoberfläche als auch den biologisch-ökologischen Anforderungen gerecht. Der Einsatz Vegetativen Deckwerks wurde an der UHW bereits getestet. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse, vor allem was die Verlegung und die Bestückung mit Pflanzen betrifft (vgl. Kap. 6.3.1), kann festgehalten werden, dass mit den Deckwerksmatten eine wirksame und gleichzeitig die ökologischen Anforderungen zufriedenstellende Ufersicherung möglich ist. Aus wirtschaftlichen Gründen wird sich diese Bauweise allerdings auf einzelne, ökologisch sehr wertvolle Gebiete beschränken müssen.

Faschinenwalzen in Kombination mit Weidenspreitlagen

Als dritte Möglichkeit ist eine Kombination aus Faschinenwalzen im unteren Wasserwechselbereich (vgl. Kap. 4.1.1) und Weidenspreitlagen (vgl. Kap. 4.1.6) oberhalb der Mittelwasserlinie denkbar. Der Bereich unterhalb des unteren Bemessungswasserspiegels (29,20 m üNN) sollte dabei wegen mangelhafter Sauerstoffversorgung der Ruten, bedingt durch längere Überstauungszeiträume, mit Senkwalzen oder mit Totfaschinen verbaut werden. Um einen durchgängigen Weidensaum zu erhalten, sind die Faschinenwalzen als Lebendfaschinen bis über die Mittelwasserlinie einzubauen. Oberhalb des Mittelwassers übernehmen dann Weidenspreitlagen die flächendeckende Sicherung der erosionsgefährdeten Böschung, indem sich bereits nach der ersten Vegetationsperiode die jungen, biegsamen Weidenruten bei Überströmung schützend über die Oberfläche legen. Der Übergang von Faschinen zu Spreitlage sollte "fließend" ausgeführt sein, d.h. dass die Ruten gut hinter den Faschinen eingebunden sein müssen, um Wasserangriffen keine Schwachstellen zu bieten. Ein großer Nachteil dieser Variante liegt im optischen Erscheinungsbild des Uferstreifens nach der Entwicklung der Pflanzen. Aus landschaftsästhetischer Sicht ist zu prüfen, inwiefern ein weidendominanter Uferabschnitt in das Gewässerrandgebiet der UHW passt. Ansonsten ist durch regelmäßige Verjüngung bzw. Ansiedlung verschiedener heimischer Baum- und Straucharten der Uferzone (vgl. Tab. 5) auf Dauer eine Bestandsumwandlung anzustreben.

Die Flächensicherung der Böschung oberhalb der Faschinenwalzen kann auch mit *Erosionsschutzmatten* (vgl. Kap. 4.1.15) in Kombination mit Röhrichtpflanzungen unterhalb des Mittelwasserbereichs sowie Pflanzungen oder Stecklingen oberhalb des Mittelwassers erfolgen. Alternativ zu Röhrichtpflanzungen kann an die Faschinenwalzen im Bereich der Mittelwasserlinie auch eine Röhrichtwalze (vgl. Kap. 4.1.16) angebaut werden. Für diese Kombination empfiehlt es sich, die Faschinen mit Totholz herzustellen, da sonst die Entwicklung des Röhrichts von den rasch austreibenden Weiden beeinträchtigt wird und aufgrund Platz- und Lichtmangels Fehlstellen im Röhrichtgürtel zur Folge hat.

Weidenwippe

Eine weitere Möglichkeit die Uferstellen des "Bereichs 1" zu sichern, ist die Weidenwippe (vgl. Kap. 4.1.4). Aufgrund ihres hohen Eigengewichts stellt sie eine wirksame Bauweise gegen die hydraulischen Belastungen in den oben genannten Bereichen der UHW dar. Je nach Aufbau der Weidenwippe kann sie in mehrlagiger Ausführung sowohl im Unterwasser- als auch im Wasserwechselbereich und somit über den gesamten zu schützenden Böschungsbereich eingebaut werden.

8.2.2 Ufersicherung im Bereich 2:

Uferbereiche, für die Sekundärwellenhöhen zwischen 0,15 m und 0,20 m ermittelt wurden, werden in dieser Betrachtung zum "Bereich 2"gezählt. Folgende Uferstellen sind davon betroffen (vgl. Abb. 140):

Sekundärwellenhöhen zwischen 0,15 m und 0,20 m:

linke Uferseite:

_	km 32,800 – 33,100	_	km 33,200 – 33,700
_	km 33,800 – 34,400	_	km 34,200 – 34,500
_	km 34,700 – 35,300	_	km 34,600 – 34,900
_	km 35,500 – 35,600	_	km 35,000 – 35,300
_	km 35,700 – 36,200	_	km 35,600 – 37,000
_	km 36,400 – 36,700	_	km 37,400 – 38,000
_	km 37,100 – 37,300		
_	km 37,500 – 38,000		

Für die Sicherung dieser Uferbereiche kommen die gleichen ingenieurbiologischen Bauweisen in Frage wie für die Ufer in "Bereich 1". Im Vergleich zu den Uferbereichen im vorigen Abschnitt, wo die Schiffe die Ufer mit geringen Abständen passieren,

betragen die Uferentfernungen der Schiffe in "Bereich 2" 30 – 100 m. Dies hat neben der Reduzierung der Sekundärwellenhöhen den Vorteil, dass in diesen verbreiterten Bereichen den Ufern vorgelagerte Schutzbauwerke gegen auflaufende Wellen angeordnet werden können.

Reisiglahnungen

Die Anordnung von *Reisiglahnungen*, wie in Kapitel 4.1.17 beschrieben, wurde bereits erfolgreich am Neckar unter den Belastungsbedingungen einer Bundeswasserstraße angewendet (vgl. Kap. 4.1.17). Falls am Ufer keine oder nur schwach ausgebildete Röhrichtbestände vorhanden sind, sollte diese Maßnahme von Röhrichtpflanzungen im Uferbereich begleitet werden. Einem ausgeprägten Röhrichtgürtel kommt große Bedeutung bezüglich der Wellendämpfung zu. Die Entwicklung der Bestände ist wiederum stark von der Wirkung der vorgelagerten Lahnung abhängig, denn nur in deren Schutz können sich die Pflanzen gut entwickeln.

Palisaden-Lahnungen

Am Beispiel der Potsdamer Havel wurde in Kapitel 6.3.3 die Sicherung bestehender Schilfbestände durch Holzpfahlreihen, sogenannten *Palisaden-Lahnungen*, erläutert. Diese Variante stellt auch für die "Ufer-Bereiche 2" der UHW eine wirksame Sicherungsmethode dar. Gerade durch das prognostizierte ansteigende Verkehrsaufkommen nach dem Ausbau der UHW, kommt der Sicherung der vorhandenen Röhrichtbestände nicht nur aus biologisch-ökologischer Sicht, sondern auch aus Sicht des Uferschutzes große Bedeutung zu.

Mit zunehmendem Schiffsverkehr werden die Wasserspiegelwechsel häufiger, was sich negativ auf die Röhrichtbestände auswirken kann. Deshalb sollte gerade bei einseitigem Uferausbau darauf geachtet werden, dass die gegenüberliegenden, von Abgrabungen nicht betroffenen Uferbereiche und ihre eventuell vorhandenen Röhrichtbestände vor den zunehmenden Wasserspiegelschwankungen ausreichend geschützt sind. Voraussetzung für die Anordnung von vorgelagerten Schutzbauwerken ist ausreichend Fläche. In diesem Zusammenhang wird sich die Frage stellen, ob die Ufer unter erhöhtem Flächenbedarf flacher ausgebildet werden, was zweifelsohne die Röhrichtentwicklung fördern und die Belastungsgrößen gleichzeitig herabsetzen würde, oder ob eher massive ingenieurbiologische Bauweisen an steileren Ufern zum Einsatz kommen, wie es für die Ufer in "Bereich 1" beschrieben wurde. Diese Frage kann in dieser Arbeit nicht beantwortet werden, da hier wirtschaftliche, technische, ökologische und landschaftsästhetische Gesichtspunkte einfließen.

8.2.3 Ufersicherung im Bereich 3:

Uferbereiche, für die Sekundärwellenhöhen unter 0,15 m ermittelt wurden sowie Uferbereiche, die außerhalb des Einflussbereichs des GMS liegen, werden in dieser Betrachtung dem "Bereich 3" zugeordnet.

Folgende Uferstellen sind davon betroffen (vgl. Abb. 140):

rechte Uferseite:

- Uferbereiche, die außerhalb des Einflussbereichs des GMS liegen:
 - km 33,300 33,700
 - km 34,500 34,600
 - km 35,400
 - km 36,800
 - km 37,000
- Sekundärwellenhöhen unter 0,15 m:
 - km 32,700
 - km 36,900

linke Uferseite:

- Uferbereiche, die außerhalb des Einflussbereichs des GMS liegen:
 - km 32,600 33,100
 - km 33,900 34,100
- Sekundärwellenhöhe über 0,20 m:
 - km 34,600
 - km 35,300 35,600

Bei den oben aufgeführten Stellen handelt es sich um seenartige Gewässererweiterungen, die überwiegend außerhalb des Einflussbereichs der Schiffe liegen. Zwischen km 32,600 und km 33,100 betragen zum Beispiel die Entfernungen der linken Uferbereiche zur Fahrrinne 145 – 292 m, am rechten Ufer zwischen km 33,300 und km 33,700 werden bis zu 400 m Entfernung erreicht. Charakteristisch für diese weitgehend naturnahen Wassergebiete sind flache, zum Großteil unbefestigte Ufer mit Böschungsneigungen von 1:7 bis 1:10, die abschnittsweise von breiten Röhrichtgürteln durchzogen sind. Diese Uferbereiche werden von den Wasserspiegelschwankungen der Berufsschifffahrt nur noch geringfügig oder gar nicht mehr berührt und sind auch von den Ausbaumaßnahmen nicht betroffen. Ufererosion findet in diesen Bereichen überwiegend durch Windwellen oder durch Fahrgast- und Sportbootschifffahrt statt, wobei natürliche Regenerationsprozesse und eine artenreiche Ufervegetation für ein Gleichgewicht sorgen. Sofern keine Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes oder der Sicherheit anliegender landwirtschaftlicher Nutzflächen besteht, sollten diese Bereiche weiterhin der natürlichen Sukzession überlassen werden und müssen nicht gesichert werden.

Packwerk, Gitterbuschbauwerk, Lahnungen

Nimmt die Erosion an einigen Uferstellen überhand, so ist dem Prozess entgegenzuwirken. Dazu eignen sich aufgrund der relativ geringen Belastungen Lebendbauweisen, die teilweise in Kombination mit toten Baumaterialien wie Holz oder Steinen eingebaut werden, um einen besseren Anfangsschutz zu gewährleisten. So können Uferabbrüche und Ausspülungen z.B. durch *Packwerk aus Ast- und Zweiglagen* (vgl. Kap. 4.1.9) gesichert werden, die gerade in Gewässern mit flach ausgebildeten Randbereichen eine wirksame Uferschutzmaßnahme gegen Oberflächenerosion darstellen.

Eine weitere ingenieurbiologische Bauweise zur Sicherung lokaler Erosionsstellen ist das *Gitterbuschbauwerk* (vgl. Kap. 4.1.10), das durch kreuzweise verlegte Äste und Ruten für die Verlandung von Uferabbrüchen sorgt. Die Verwendung von ausschlagfähigen Weidenruten sorgt zusätzlich für die Durchwurzelung und Ausbildung eines grünen Ufersaums.

Gefährdete Röhrichtbestände (z.B. durch Sportschifffahrt) können wie in "Bereich 2" beschrieben durch vorgelagerte *Lahnungen* geschützt werden (vgl. Kap. 8.2.2).

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Themengebiet der ingenieurbiologischen Ufersicherung. Ziel war es, die wichtigsten Ausführungen ingenieurbiologischer Bauweisen vorzustellen und die Grundlagen bezüglich Bau und Wirkungsweise zu erläutern, um einen Einsatz an Bundeswasserstraßen zukünftig zu bestärken. Dies beinhaltet auch die Abschätzung der maßgebenden Belastungseinwirkungen und des Widerstandsverhaltens der Bauweisen. Mit Hilfe wissenschaftlicher Erkenntnisse zur Belastbarkeit ingenieurbiologischer Maßnahmen und durch praktische Ausführungsbeispiele sollen diese neuen Wege der Ufersicherung faktisch untermauert werden. Die einzelnen Aspekte dieser Arbeit werden hier nochmals zusammengefasst erläutert.

Die maßgebenden Beanspruchungen der Uferbereiche an Schifffahrtsstraßen stellen neben den natürlichen, hydraulischen Belastungsgrößen (Fließgeschwindigkeit, Schubspannung bzw. Schleppkraft) die aus der Schifffahrt resultierenden Absunkund Wellenbewegungen dar. Besonders bei ufernaher Fahrt eines Schiffes oder in Kanalabschnitten sind die Schiffswellen die ausschlaggebenden Größen für die Bemessung der Uferdeckwerke. Die Ufersicherheit ist besonders gefährdet, wenn es zur Überlagerung der Primärwellen mit den Wellen des sekundären Wellensystems kommt. Dabei sind der Wellenauflauf und der Brecherstoß (Druckschlag) die beiden Hauptbelastungskomponenten, die auf die Uferböschung einwirken. Zusätzlich bewirken schnelle, kurzzeitige Wasserspiegelschwankungen Porenwasserüberdrücke in der Böschung, die Sickerströmungen aus dem Untergrund in das Gewässer zur Folge haben.

Aus diesen von der Schifffahrt hervorgerufenen Belastungen resultieren kontinuierlich wirkende Saug- und Schwallzugkräfte, die die Sicherheit der Uferböschung gefährden.

Unter ingenieurbiologischen Bauweisen wird eine Bautechnik verstanden, die Verfahren des Totbaus und des Lebendbaus verbindet. Durch günstige Kombination toter Baumaterialien mit geeigneten Pflanzen und Pflanzenteilen werden sowohl biologische als auch technische Vorteile optimal ausgenutzt. Dadurch erhalten ingenieurbiologische Bauweisen neben ihrer Schutzfunktion einen hohen ökologischen und landschaftsästhetischen Stellenwert (vgl. Abb. 142). Sie sichern Uferböschungen vor Erosion, schaffen wertvollen Lebensraum für zahlreiche Tier- und Pflanzenarten und fügen sich gut in die Ökologie des Gewässerrandstreifens sowie in das bestehende Landschaftsbild ein.

Ein effektiver Uferschutz ist nur dann gegeben, wenn Pflanzen im Laufe ihrer Entwicklung eine dauerhafte, langfristige Sicherung der Böschung bewirken. Hierbei wird dem toten Material die wichtige Funktion des Sofort-Schutzes übertragen, damit sich die Pflanzen gerade in den ersten Vegetationsperioden ausreichend entwickeln können. Dementsprechend setzt sich die Widerstandsfähigkeit der Uferbefestigung aus zwei voneinander unabhängigen Komponenten zusammen. Ein Teil wird sofort

nach der Fertigstellung der Maßnahme von dem Bauwerk bzw. von den toten Baustoffen übernommen, den anderen Teil übernimmt die Vegetation.

Eine erfolgreiche Entwicklung langlebiger Pflanzenbestände kann nur erwartet werden, wenn neben der Art und Größe der mechanischen Belastungen auch die Standortverhältnisse gründlich untersucht werden, damit standortgerechte Pflanzen zum Einsatz kommen. Mit zunehmendem Alter gewinnt die Böschung dann durch Vegetationsvermehrung und Durchwurzelung an Festigkeit und Widerstandsfähigkeit.

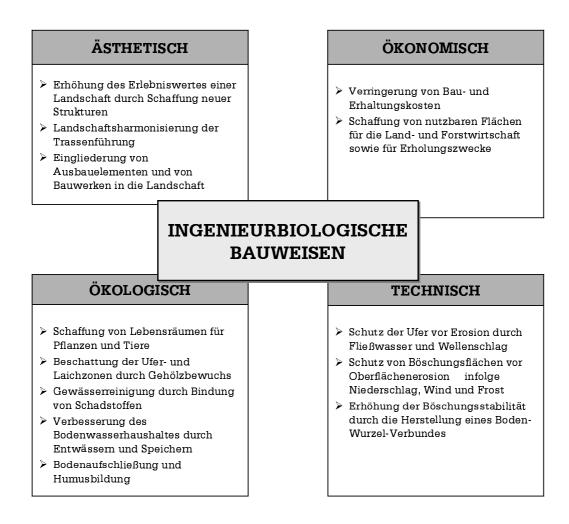


Abbildung 142: Wirkungsbereiche ingenieurbiologischer Bauweisen

Beim Einsatz ingenieurbiologischer Bauweisen nutzt man vorteilhafte biotechnische Eigenschaften der Pflanzen aus (z.B. vegetative Vermehrbarkeit oder gutes Regenerationsvermögen). Unter den richtigen Lebensbedingungen findet eine ständige Entwicklung und Anpassung der Vegetation an die Umgebung statt. Auf die Böschung bezogen bedeutet dies einen äußeren Schutz durch flächige Bedeckung sowie eine intensive innere Verwurzelung.

Über die Böschungsneigung kann die Intensität der Belastung erheblich beeinflusst werden. An flachen Ufern verändert sich das Wellenbild unter dem Einfluss abnehmender Wassertiefe und die Welle kommt vorzeitig zum Brechen. Langgezogene Uferbereiche bieten bereits mit Uferneigungen von 1:7 ausreichend Schutz vor Wellenangriffen. Dadurch wird auch im Bereich der Wasserwechselzone eine erhebliche Reduzierung des Wellenauflaufs erreicht. Verstärkt wird diese Schutzwirkung durch einen vorgelagerten, ausgeprägten Röhrichtstreifen. Durch ein intensives Geflecht aus Wurzeln und Rhizomen sichern Röhrichte die Ufer vor allem in Flachwassergebieten. Sie sind fest im Unterwasserboden verankert und bieten dem Ufer zusätzlichen Schutz vor Schiffswellen und Strömungsangriffen vergleichbar der Wirkung eines Wellenbrechers. Durch Pflanzenhalme und Blätter kommt es zu Verwirbelungen, die die Strömungsgeschwindigkeiten im Uferbereich auf ein Minimum reduzieren.

Über das Zusammenspiel zwischen den dynamischen Kräften des Wassers (Zerstörungsprozesse) und der stabilisierenden Wirkung der Vegetation (Widerstandsfähigkeit) ist bis heute noch wenig bekannt. Sicher ist, dass sich die Prozesse zwischen den einwirkenden Belastungen und dem Widerstandsverhalten der Ufersicherung gegenseitig beeinflussen (dynamischer Prozess) und dadurch die Stabilität des Ufers bestimmen. In Abbildung 143 sind die wichtigsten Faktoren, von denen sowohl die Belastung als auch der Widerstand einer Bauweise abhängt, dargestellt.

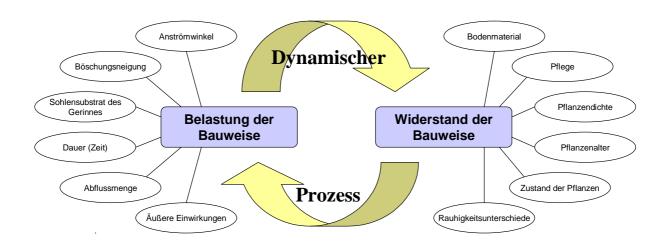


Abbildung 143: Darstellung der maßgebenden Belastungs- und Widerstandsfaktoren, die für die Stabilität ingenieurbiologischer Bauweisen eine Rolle spielen.

Die Abschätzung der Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen ist deshalb nicht mit herkömmlichen Bemessungsmodellen der Ingenieurwissenschaften, die auf dem Prinzip "Beanspruchung-Belastungsgrenze" beruhen, möglich. Pflanzen sind lebende Elemente, die sich ständig verändern und sich nicht normieren lassen. Deshalb mangelt es der Ingenieurbiologie an exakten Werten über die Belastbarkeit der Bauweisen. Man behilft sich mit Erfahrungswerten, die auf Beobachtungen basieren und nicht zwingend mit den eigentlichen Belastungsgrenzen identisch sind. Diese Werte sind lediglich als Vergleichswerte anzusehen. Sie geben jedoch wertvolle Hinweise über den Einsatz der Maßnahmen, sofern die jeweiligen örtlichen Verhältnisse berücksichtigt werden. Aussagen über Grenzen hinsichtlich der Belastung durch Schiffswellen sind bisher nicht

möglich. Es existieren noch keine allgemein gültigen Angaben, die die Gefährdung der Maßnahmen in Abhängigkeit von der Wellenhöhe ausdrücken. Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen haben sich überwiegend auf nicht schiffbare naturnahe Fließgewässer beschränkt und drücken die zulässigen Belastungen über die kritische Schubspannung (Schleppspannung) ($\tau_{\rm crit}$) oder die Strömungsgeschwindigkeit (v) aus. Dabei wurde die Erkenntnis gewonnen, dass sowohl die Schleppspannung als auch die Fließgeschwindigkeit herangezogen werden muss, um realistische Aussagen über die Belastbarkeit ingenieurbiologischer Bauweisen machen zu können. Hierbei soll nicht nur ein einzelner Wert, sondern ein ganzer Wertebereich und zusätzlich der Anströmwinkel angegeben werden.

Werden Pflanzen von Wasser um- oder überströmt, wird auf die Pflanze eine Kraft ausgeübt (Strömungskraft). Mit zunehmender Geschwindigkeit oder Wassertiefe neigt sich die Pflanze immer mehr in Strömungsrichtung, bis sie schließlich untertaucht. In diesem Zusammenhang konnte festgestellt werden, dass Pflanzen einen Ausreißwiderstand aufweisen, der um ein Vielfaches über der auf sie einwirkenden Strömungskraft liegt. Auf die Stabilität von ingenieurbiologischen Bauweisen bezogen lässt sich daraus folgern, dass Schäden nicht durch das Ausreißen von einzelnen Pflanzen, sondern durch die Erosion von Bodenpartikeln entstehen (vgl. Kap. 5). Das bedeutet wiederum, dass die Schutzwirkung hauptsächlich von der Reduzierung der Fließgeschwindigkeit an der Bodenoberfläche abhängt. Bei Überströmen legen sich junge elastische Pflanzen schützend über die Böschung, wodurch die Fließgeschwindigkeiten in Bodennähe stark zurückgehen und somit die Beanspruchung des Bodens vermindert wird.

Eine Lösung in Form eines Ansatzes für die Dimensionierung ingenieurbiologischer Bauweisen konnte in dieser Arbeit nicht gefunden werden. Es sind jedoch verschiedene Aspekte im Umgang mit den umweltverträglichen Sicherungsmaßnahmen erläutert worden, die die Entscheidung über einen Einsatz und die Auswahl der Bauweise erleichtern sollen. In Tabelle 17 (Anlagen) sind repräsentative Werte über zulässige Belastbarkeiten bzw. über das Widerstandsverhalten verschiedener Bauweisen zusammengestellt. Dabei wird darauf aufmerksam gemacht, dass diese Angaben teilweise auf Beobachtungen basieren und erst noch wissenschaftlich untersucht und anhand von weiteren Hochwasserereignissen, Modellversuchen oder an Teststrecken bestätigt werden müssen.

Um die Eignung und Wirkungsweise ingenieurbiologischer Bauweisen besser einschätzen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Anwendungsbeispiele ingenieurbiologischer Bauweisen an Bundeswasserstraßen zusammengestellt (vgl. Kap. 6). Zu diesem Zweck wurden Berichte über Bau und Einsatz der Maßnahmen, Gutachten der zuständigen Ämter sowie Vegetationsaufnahmen analysiert. Insbesondere nachfolgende Bauweisen können als erfolgreiche Maßnahmen der Ufersicherung an Bundeswasserstraßen genannt werden:

- Vegetatives Deckwerk und Schilfmatten
- Bulten- bzw. Röhrichtpflanzungen

- Lahnungen aus Holz-Palisaden
- Pfahlreihen mit Packwerk und Faschinen

Von besonderem Interesse war dabei die Betrachtung der Versuchsstrecke mit Vegetativem Deckwerk und Bultenpflanzungen an der UHW bei km 35,700. Dieser Abschnitt liegt im Ausbaubereich und lässt somit direkte Rückschlüsse über Stabilität und Widerstandsverhalten der Maßnahmen unter Schifffahrtsbelastungen zu. Das rechte Ufer bei km 35,700 ist aufgrund auftretender Sekundärwellenhöhen von 22 cm, was bei Überlagerung mit dem primären Wellensystem zu Wasserspiegelschwankungen von ca. 46 cm führt, bezüglich Wellenbelastungen repräsentativ für den gesamten Bauabschnitt 1. Die an dieser Teststrecke gewonnenen Erkenntnisse über ingenieurbiologische Maßnahmen sind somit aussagekräftig hinsichtlich eines Einsatzes an der UHW:

Aus den Gutachten der BfG wurde deutlich, dass Vegetatives Deckwerk viele Vorteile gegenüber losen Steinschüttungen aufweist. Bereits eine Vegetationsperiode nach dem Einbau fügte sich der Uferbereich optisch gut in das Landschaftsbild ein. Es bildete sich eine für die Ufer von Fließgewässern typische Zonierung der Ufervegetation auf den Deckwerksmatten aus. Fast acht Jahre nach dem Einbau sind die Deckwerke und die Bulte optisch kaum von anderen Bereichen zu unterscheiden³². Es konnten keine wesentlichen Unterschiede bezüglich Artenzusammensetzung und Vegetationsentwicklung zwischen den einzelnen Einbauvarianten festgestellt werden.

Der Einsatz von Deckwerksmatten oberhalb der Wasserwechsellinie hat sich nach Aussagen des WSA Brandenburg nicht gelohnt, da sich letztendlich doch die am Standort vorhandene natürliche Vegetation durchgesetzt hat und Teile der Deckwerksmatten ausgetrocknet sind. Im wassernahen Bereich haben sich die Vegetativen Deckwerke bewährt, allerdings waren die Bultenpflanzungen unter wesentlich geringerem finanziellem Aufwand gleichermaßen effektiv.

Kritisch sollte an dieser Stelle angemerkt werden, dass die Gefahr der Artenverfälschung eventuell gegen einen Einsatz der Vegetativen Deckwerke sprechen könnte, da die Deckwerksmatten in Schleswig-Holstein bepflanzt und herangezogen wurden. Diese Gefahr besteht auch bei nicht standortgerechten Bultenpflanzungen.

Der letzte Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Aufstellung eines Ufersicherungskonzepts hinsichtlich des geplanten Ausbaus der UHW. Aufbauend auf den Erläuterungen und Ergebnissen aus den Kapiteln 2 – 6 wurde ein Ideenkonzept zur Sicherung gefährdeter Uferstellen am Beispiel des UHW-Abschnitts km 32,600 – 38,000 erarbeitet. Hierfür wurden beide Uferseiten nach den berechneten Sekundärwellenhöhen in die Belastungsbereiche "stärker belastet", "belastet" und "gering bzw. nicht belastet" eingeteilt³³.

³²Durch eine persönliche Besichtigung der Teststrecke an der UHW konnte ein Eindruck über den aktuellen Zustand der Maßnahmen gewonnen werden.

³³Die Berechnung der Schiffswellen, der Rückströmungen und der Schubspannungen wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführt (BAW, 2001).

Die Auswertung der berechneten Daten (Belastungsgrößen) ergab, dass die Rückströmgeschwindigkeiten (max $v_{\rm rück}$ =1,33 m/s) und die Schubspannungen (max τ_0 =4,9 N/m²) im betrachteten UHW-Abschnitt theoretisch keine Gefahr für die in Betracht gezogenen ingenieurbiologischen Uferbauweisen darstellen. Die maßgebende Gefährdung der Ufer ist durch Wellenkräfte zu erwarten.

Unter Berücksichtigung des Ausbaugrundsatzes, Verbreiterungen möglichst nur an einer Uferseite vorzunehmen (Eingriffsminimierung), wurde teilweise die Verlegung der Fahrspurachse in Betracht gezogen, um in einigen Gewässerquerschnitten die Eingriffe in die bestehende Uferstruktur in Form von Uferabgrabungen möglichst zu reduzieren.

An dieser Stelle wird nochmals darauf aufmerksam gemacht, dass die in dieser Arbeit vorgeschlagene Verlegung der Fahrspur rein nach dem Ausbaugrundsatz erfolgte, die notwendigen Verbreiterungen auf ein Minimum und möglichst auf nur eine Uferseite zu reduzieren. Dabei wurden weder Ergebnisse aus Umweltverträglichkeitsuntersuchungen noch eine bei Fahrspurverlegung eigentlich erforderliche Neu-Trassierung des Teilabschnitts berücksichtigt.

Die für einen Einsatz an der UHW als geeignet empfundenen ingenieurbiologischen Uferbauweisen lassen sich in zweierlei Bereiche einteilen. In breiten Querschnitten oder in Querschnitten, in denen die Uferböschung mit einer Böschungsneigung von 1:5 oder flacher ausgebildet werden kann, sollten vorgelagerte Maßnahmen zur Wellendämpfung angeordnet werden. Hierzu werden folgende Bauweisen in Betracht gezogen:

- Reisiglahnungen
- Palisaden-Lahnungen

Falls an diesen Uferstellen keine ausreichend ausgebildete Ufervegetation vorhanden sein sollte, ist das Ufer zusätzlich mit Maßnahmen des Lebendbaus zu stärken (Pflanzungen).

In Querschnitten, in denen aufgrund des hohen Flächenbedarfs oder aufgrund diverser Randbedingungen die Ufer mit einer Neigung von 1:3 ausgebildet werden müssen, sollte die Sicherung der Wasserwechselzone mit massiven ingenieurbiologischen Bauweisen durchgeführt werden:

- Vegetatives Deckwerk
- Steinschüttung mit Steckhölzern bzw. Röhrichtpflanzungen
- Faschinenwalzen, Weidenwippen in Verbindung mit Weidenspreitlagen oder Erosionsschutzmatten

Dabei sollte gerade bei einseitigem Uferausbau darauf geachtet werden, dass die gegenüberliegenden, von Abgrabungen nicht betroffenen Böschungen in gleichem Maße gegen die Belastungen, die aus der Schifffahrt resultieren, geschützt sind.

Einzelne, lokale Erosionsstellen wie Uferabbrüche oder Ausspülungen in gering belasteten Uferbereichen (Aufweitungen oder seenartige Abschnitte) können durch Packwerk aus Ast- und Zweiglagen und durch Gitterbuschbauwerk gesichert werden. Stellen diese lokalen Schadstellen keine Gefahr für die Sicherheit der Schifffahrt, des Hochwasserschutzes oder der Anlieger dar, so sollte der Uferbereich "sich selbst überlassen" werden (Bauweise Null)³⁴.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die oben genannten ingenieurbiologischen Bauweisen unter den ermittelten Belastungsbedingungen im untersuchten UHW-Abschnitt ausreichend widerstandsfähige Uferschutzmaßnahmen darstellen, so dass die Sicherheit der Uferböschungen gewährt ist. In der ausgeprägten Kulturlandschaft der Unteren Havel-Wasserstraße sollte ihr Einsatz besonders aus ökologischen Gründen und aus Sicht des Naturschutzes befürwortet werden. Sicherlich werden bei der Entscheidung über einen Einsatz ingenieurbiologischer Bauweisen weitere, z.B. finanzielle und ökonomische Faktoren eine große Rolle spielen. Dabei muss eine angemessene Lösung gefunden werden, die sowohl der wirtschaftlichen Nutzung als auch den Belangen des Hochwasser- und Naturschutzes gerecht wird. Oberstes Ziel der geplanten Anpassung der UHW an die moderne Schifffahrt und an den damit verbundenen steigenden Schiffsverkehr sollte der Erhalt der bestehenden Gewässerökologie und der naturnahen Gewässerstrukturen sein.

³⁴,....Wiederherstellung des Gewässerlaufs kommt dann in Betracht, wenn Hochwasserschäden zu einer nicht beabsichtigten Härte gegenüber den Anliegern führen würden..." (§9a, Abs. 2, Wassergesetz 1995)

10 Anlagen

10.1 Böschungsneigungen an Dämmen oder Einschnitten nach DIN 4084

Böschungen an Dämmen oder in Einschnitten müssen nach DIN 4084 gegen Böschungsbruch untersucht werden, wenn sie hinsichtlich Bodenart, Neigung und Böschungshöhe nicht mit der folgenden Tafel übereinstimmen.³⁵

Bodenart	Böschungshöhe in [m]							
	0 - 3	3 – 6	6-9	9 – 12	12 – 15			
feiner Sand grober Sand Kiessand mit Steinen			1 : 2 1 : 1,7 1 : 1,5					
Schluff	1:1,25	1:1,6	1:1,75	1:1,9	1:2			
	1:1,6	1:2	1:2,2	1:2,3	1:2,4			
sandiger, schwach toniger	1 : 1,25	1:1,25	1:1,4	1:1,6	1:1,7			
Schluff	1 : 1,25	1:1,6	1:1,8	1:1,9	1:2			
schwach sandiger, schluffiger	1:1,25	1:1,25	1:1,25	1:1,7	1:2			
Ton	1:1,25	1:1,7	1:2,1	1:2,4	1:2,5			
Ton	1:1,25	1 : 1,25	1:1,25	1:1,5	1:2			
	1:1,25	1 : 1,4	1:2,6	1:3,2	1:3,5			

Tabelle 16: Böschungsneigungen an Dämmen oder Einschnitten nach DIN 4084 (SCHNEI-DER, 1994)

 $^{^{35}\}mbox{Die}$ obere Zeile gilt jeweils für Einschnitte, die unter für Dämme.

10.2 Tote Baumaterialien im naturnahen Wasserbau

Die nachfolgende Zusammenstellung der Baumaterialien, die Definitionen sowie Angaben über die Verwendung im Wasserbau erfolgen in Anlehnung an DIN 19657 (1973) und DIN 18918 (1973) bzw. DIN 18918 (1990).

10.2.1 Übersicht - Tote Baumaterialien

Folgende technische und natürliche Baumaterialien werden im Totbau verwendet:

- Holz (Bretter, Stangen, Pflöcke, Reisig)
- Natursteine (Kies, Schotter, Pflastersteine, Platten)
- künstliche Steine (Vollsteine, Lochsteine, Hohlblocksteine aus unterschiedlichem Material wie Ton, Kalksandstein, Beton usw.)
- Stahl (Walzstahl, Stäbe, Drahtgeflechte, Draht, Nägel, Schrauben, Bleche, Rohre, Spundbohlen, Kanaldielen)
- feste Kunststoffe (Blöcke, Bahnen, Gewebe, Folien)
- flüssige Kunststoffe (Emulsionen)
- Bitumen
- Mörtel und Beton

10.2.2 Verwendung von toten Baumaterialien

Uferschutzbauten zur flächigen Böschungssicherung:

Einsatz vorwiegend von der Sohle bis zum Mittelwasser (MW), aber gegebenenfalls auch bis zum Mittelhochwasser (MHW):

• Steinschüttung, Kiesschüttung (Steinwurf, Steinberollung):

Unbearbeitete gedrungene Steine werden manuell oder maschinell in einer Stärke von 15 bis 30 cm aufgebracht. Zur Vermeidung des Einsinkens der Schüttung ist in der Regel eine Unterlage aus Kunststoffvlies oder Kunststoffgeflecht als Filter bzw. ein filterartiger Aufbau der Schüttung erforderlich. Diese Bauweise wird vor allem an stark strömenden Gewässern eingesetzt.

Kombinationsmöglichkeiten mit lebenden Baumaterialien:

- Röhrichtballen
- Rhizome
- Sprösslinge

- Halmstecklinge
- Röhrichtansaat
- Weidensteckholz oder -pflanzen
- Pflanzen der Hartholzzone
- Rasenansaat

• Steinsatz:

Unbearbeitete, lagerhafte Steine werden mauerwerksartig aufgesetzt. Der Steinsatz muss die Sohle einbinden und bei Bedarf durch Steinvorschüttung vor Unterspülung geschützt werden. Der Filterunterbau gegen Absinken wird wie bei der Steinschüttung ausgeführt. Der Steinsatz ist vor allem für Böschungsfüße und steile Böschungen von Wasserläufen mit hohen Fließgeschwindigkeiten geeignet.

Kombinationsmöglichkeiten mit lebenden Baumaterialien:

- Weidensteckhölzer
- Rasenansaat

• Rauhpflaster:

Lagerhafte Bruch- und Spaltsteine von etwa 15 bis 60 cm Dicke werden im Verband gesetzt. Sie sind nur soweit zu behauen, wie es für die Herstellung des Verbandes notwendig ist. Der Filterunterbau gegen Absinken wird wie bei der Steinschüttung ausgeführt. Auch diese Bauweise wird vor allem zum Uferschutz schnell fließender und durch Wellenschlag gekennzeichneter Gewässer eingesetzt.

Kombinationsmöglichkeiten mit lebenden Baumaterialien: siehe Steinsatz

• Steinmatte:

Die Steinmatte besteht aus einer flächigen, etwa 20 cm starken Steinlage, die durch Maschendrahtgeflecht zusammengehalten wird. Steinmatten eignen sich zur flächigen Sicherung von Sohlen und Böschungen schnell fließender oder durch Wellenschlag gekennzeichneter Gewässer.

Kombinationsmöglichkeiten mit lebenden Baumaterialien: siehe Steinsatz

• Gitterstein-Pflaster:

Bei den Beton-Gittersteinen, von denen verschiedene Typen im Handel erhältlich sind, handelt es sich um Betonplatten mit Aussparungen (Löcher, Schlitze usw.) für eine Befüllung mit Boden und Vegetation. Die Gittersteine werden auf der planierten Böschung aneinander stoßend verlegt. Während sie bei leichten Böden direkt auf den Unterboden gelegt werden können, empfiehlt es sich bei schweren Böden als Unterbau eine einige Zentimeter dicke Sandschicht aufzubringen. Bei steileren Böschungen sind die Gittersteine mit Holzpflöcken am Unterboden zu befestigen.

Kombinationsmöglichkeiten mit lebenden Baumaterialien: siehe Steinsatz

Uferschutzbauten zur linienförmigen Sicherung von Böschungsfüßen:

• Drahtsenkwalze:

Als Hülle für die Drahtsenkwalze dient verzinktes, viereckiges oder sechseckiges Drahtgeflecht, dessen Dicke sich nach der Größe der Beanspruchung richtet. Auf diesen Geflechten werden Steine oder Grobkies aufgeschüttet. Anschließend wird das Geflecht zusammengebogen und mit verzinktem Bindedraht zu walzenförmigen Körpern verflochten. Die Walzen können in beliebiger Länge und mit Durchmessern bis zu 80 cm hergestellt werden. Drahtsenkwalzen sind besonders geeignet, den Bereich Sohle-MW zu schützen. In Verbindung mit ingenieurbiologischen Verfahren werden sie als Fuß- und Böschungssicherung im Unterwasserbereich für die oberhalb ihres Einsatzbereiches angesiedelte Vegetation eingesetzt.

Kombinationsmöglichkeiten mit Weidenarten als:

- Weidenpflanzung
- Spreitlage
- Steckholzbesatz
- Astbesatz

10.3 Belastbarkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen

Bauweise	Literatur / Autor	Alter	v _m	I _{So}	h	\mathbf{b}_{So}	Ufer-	τ	Bemerkung
		[Monate]	[m/s]	[‰]	[m]	[m]	neigung	[N/m²]	
Weidenspreitlage	FLORINETH (1982)	15	_	30,0	1,20	16,0	4:5	218	Zangenbach
Troidonopromago	1 2011112111 (1002)	15	-	30,0	1,15	8,0	4:5	195	Lasankenbach
	FLORINETH (1995)	7	-	18,0	3,00	36,0	2:3	309	Passer
		7	-	30,0	1,20	16,0	4:5	312	Zangenbach
		7 7	-	30,0	1,15	8,0	4:5	292	Lasankenbach
	LACHAT (1994)	/	-	18,0	3,00	36,0	2:3	480 300	Passer
	ZEH (1990)		3,5					000	
	BEGEMANN/SCHIECHTL (1994)							50 bis >300	
	GERSTGRASER (2000)	3 bzw. 7	3,2 - 3,5					200 - 300	
Flechtzaun	STEIGER (1918)			2,0			1:2	50	
	BORKENSTEIN (1976)							50	
	ZEH (1990)		3,5						
	RÖSSERT (1994)							50	
	GERSTGRASER (2000)	15	3,2 - 3,5					100 - 120	
Faschine	BEGEMANN/SCHIECHTL (1994)							60	
	RÖSSERT (1994)							70	
	LACHAT (1994)		25 20	00 00				250	Tattasakina
	LfU (1996)		2,5 - 3,0 3,0 - 3,5	0,6 - 0,9 0,6 - 0,9				70 - 100 100 - 150	Totfaschine Lebende Faschine
	ZEH (1990)		3,5	0,0 - 0,9				100 - 150	Lebende i asciline
	GERSTGRASER (2000)	15	3,5 - 4,0					180 - 240	mit Holzpfählen
		15	2,0 - 2,5					120 - 150	auf Buschlagen
		15	3,3 - 3,8					150 - 200	Faschinenreihe
	STEIGER (1918)			7,0				180	Holzbau mit Faschinen
	SCHOKLITSCH (1930)							70	
Weidensteckhölzer	WITZIG (1970)			5,5	3,00	28,0	2:3	165	zwischen Betonblöcken
	EVED (1982)							> 140	als Fugenbepflanzung
	BEGEMANN/SCHIECHTL (1994)	0 - 3 Jahre						50 - 250	verpflockte Steinberollung
	LfU (1996)	0 - 3 Jahre	3,0 - 3,5	0,6 - 0,9				75 bis > 350 100 - 150	lebender Steinbesatz in Steinwurf
	GERSTGRASER (2000)	15	2,2 - 2,8	0,0 - 0,9				80 - 120	in Kokosfasermatte
Weidengebüsch	\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\						2:3	100	elastisch
weiderigebusch	WITZIG (1970) EASF (1973)						2.3	100 - 140	elastiscri
	ANSELM (1976)	1-2 Jahre						50 - 70	
	, ,	> 2 Jahre						100 - 140	
		20 Jahre						800	
Packwerk	GERSTGRASER (2000)	15	3,0 - 3,5					120 - 160	Geotextilpackung auf
									Buschlagen
	STEIGER (1918) LfU (1996)		3,5 - 4,0	7,0				170 bis 150	Pauhpackwork mit Polliorung
	ZEH (1990)		3,5 - 4,0					טוג וטט	Rauhpackwerk mit Rollierung Rauhpackwerk mit Rollierung
	BEGEMANN/SCHIECHTL (1994)	0 - 3 Jahre	-,-					100 bis > 300	lebendes Packwerk
Dährichtoflonzung /	7EH (1000)		2.0						
Röhrichtpflanzung / Röhrichtwalze	ZEH (1990) LfU (1996)		2,0 2,0 - 2,5					55 - 65	
D	MUTZIO (4070)						401:00	50 400	
Rasen	WITZIG (1970) EASF (1973)						1:2 bis 2:3 1:2 bis 2:3	50 - 100 50 - 80	
	RÖSSERT (1988)						1.2 015 2.3	50 - 80 15 - 18	lange Zeit
								20 - 30	kurze Zeit
	BEGEMANN/SCHIECHTL (1994)							15 - 18	lange Belastung
	1 51 (4000)							20 - 30	kurze Belastung
	LfU (1996)		1,5					30 40	Schotterrasen Grassaat
			1,8 > 3,5					40 > 60	Grassaat Rasensoden
	ZEH (1990)		1,8					- 50	Trockensaat
	. ,		1,8					30	Saat mit Geotextil
			3,7						Rasensoden
	LfU (1996)		2,5 - 3,2					70 - 100	Rollierung (0 - 40mm)
Befestigungen		1	0 - 40	1		I		100 - 150	Steinwurf
Befestigungen			3,5 - 4,0						
Befestigungen	DOLL SIGN (V		> 4,0					> 150	großer Steinwurf
Befestigungen	BOLLRICH (1992)								

Tabelle 17: Zusammenstellung publizierter Angaben über maximale Belastbarkeiten ingenieurbiologischer Bauweisen

232

10.4 Ergebnisse der Wellenberechnung

I	Primärwell	enhöhen H _{BF}		Sekundärwelle	enhöhen H _{sek}	
	(Ab	sunk)		maßgebende		
	•	de Fahrweise		(mittig / au		
		außermittig)		(mag / dd	isommug)	
	(9 / .	adioordy	link	es Ufer	recht	es Ufer
UHW - [km]	[m]		[m]		[m]	
38,000	0,237	außermittig	0,176	außermittig	0,172	außermittig
37,900	0,275	außermittig	0,194	außermittig	0,189	außermittig
37,800	0,261	außermittig	0,191	außermittig	0,183	mittig
37,700	0,261	außermittig	0,182	mittig	0,191	außermittig
37,600	0,245	außermittig	0,159	außermittig	0,198	außermittig
37,500	0,251	außermittig	0,147	außermittig	0,221	außermittig
37,400	0,274	außermittig	0,221	außermittig	0,220	außermittig
37,300	0,255	außermittig	0,217	außermittig	0,205	außermittig
37,200	0,237	außermittig	0,222	außermittig	0,188	außermittig
37,100	0,213	außermittig	0,226	außermittig	0,166	außermittig
37,000	0,196	außermittig	0,201	außermittig	0,131	außermittig
36,900	0,209	außermittig	0,196	außermittig	0,145	außermittig
36,800	0,194	außermittig	0,158	außermittig	0,129	außermittig
36,700	0,192	außermittig	0,193	außermittig	0,142	außermittig
36,600	0,240	außermittig	0,191	mittig	0,190	mittig
36,500	0,221	mittig	0,161	mittig	0,170	mittig
36,400	0,232	mittig	0,192	außermittig	0,221	außermittig
36,300	0,228	mittig	0,189	außermittig	0,203	außermittig
36,200	0,240	mittig	0,196	außermittig	0,208	außermittig
36,100	0,236	mittig	0,185	außermittig	0,195	außermittig
36,000	0,231	mittig	0,201	außermittig	0,187	außermittig
35,900	0,230	außermittig	0,203	außermittig	0,188	außermittig
35,800	0,215	außermittig	0,168	außermittig	0,189	außermittig
35,700	0,243	außermittig	0,139	außermittig	0,220	außermittig
35,600	0,220	außermittig	0,141	außermittig	0,233	außermittig
35,500	0,197	außermittig	0,136	außermittig	0,161	außermittig
35,400	0,199	außermittig	0,138	außermittig	0,127	außermittig
35,300	0,247	außermittig	0,143	außermittig	0,181	außermittig
35,200	0,261	außermittig	0,168	außermittig	0,193	außermittig
35,100	0,275	außermittig	0,194	außermittig	0,193	außermittig
35,000	0,262	außermittig	0,204	außermittig	0,178	außermittig
34,900	0,268	außermittig	0,203	außermittig	0,183	außermittig
34,800	0,254	außermittig	0,179	außermittig	0,195	außermittig
34,700	0,265	außermittig	0,184	außermittig	0,193	außermittig
34,600	0,169	außermittig	0,135	außermittig	0,132	außermittig
34,500 34,400	0,171	außermittig außermittig	0,146	außermittig außermittig	0,131	außermittig außermittig
34,400	0,195 0,200	außermittig	0,152 0,169	außermittig	0,139 0,169	außermittig
34,300 34,200	0,200	außermittig	0,169	außermittig	0,169	außermittig
34,200 34,100	0,190	außermittig	0,141	außermittig	0,163	außermittig
34,000	0,169	außermittig	0,130	außermittig	0,157	außermittig
33,900	0,165	außermittig	0,132	außermittig	0,157	außermittig
33,800	0,194	außermittig	0,133	außermittig	0,145	außermittig
33,700	0,194	außermittig	0,260	außermittig	0,143	außermittig
33,600	0,189	außermittig	0,133	außermittig	0,128	außermittig
33,500	0,177	außermittig	0,190	außermittig	0,132	außermittig
33,400	0,186	außermittig	0,184	außermittig	0,130	außermittig
33,300	0,198	außermittig	0,185	außermittig	0,128	außermittig
33,200	0,214	außermittig	0,161	außermittig	0,225	außermittig
33,100	0,178	außermittig	0,133	außermittig	0,198	außermittig
33,000	0,189	außermittig	0,133	außermittig	0,192	außermittig
32,900	0,188	außermittig	0,128	außermittig	0,194	außermittig
32,800	0,208	außermittig	0,125	außermittig	0,154	außermittig
,	0,192	außermittig	0,123	außermittig	0,129	außermittig
32,700	0.197					

Tabelle 18: Ergebnisse der Primär- und Sekundärwellenberechnung

		enhöhen H _{BF}	Seku	ındärwell	enhöhen	H _{sek}	Überlagerung der Wellen H _{sek} + H _{BF}			llen
	(Abs	unk) außermittig	mittia	e Fahrt	auß armit	tige Fahrt	mittia	H _{sek} Fahrt		tige Fahrt
	millig	auisermittig	minige	Fallit	auiseiiiii	lige Fariit	muge	Fallit	auiseiiiii	uge Fanit
UHW		chungsfuß	li. U.	re. U.	li. U.	re. U.	li. U.	re. U.	li. U.	re. U.
[km]	[m]	[m]	[m] 0,168	[m] 0.164	[m]	[m] 0.172	[m]	[m] 0.262	[m] 0.413	[m]
38,000 37,900	0,097 0,161	0,237 0,275	0,185	0,164	0,176 0,194	0,172	0,265 0,346	0,262	0,413	0,409 0,464
37,800	0,179	0,273	0,183	0,181	0,194	0,189	0,340	0,342	0,469	0,444
37,700	0,179	0,261	0,190	0,183	0,181	0,182	0,361	0,302	0,433	0,444
37,700	0,105	0,245	0,152	0,185	0,159	0,191	0,351	0,370	0,441	0,432
37,500	0,105	0,251	0,138	0,183	0,147	0,221	0,243	0,289	0,398	0,472
37,400	0,162	0,274	0,187	0,186	0,221	0,220	0,349	0,348	0,495	0,493
37,300	0,131	0,255	0,185	0,178	0,217	0,205	0,316	0,309	0,472	0,459
37,200	0,109	0,237	0,188	0,168	0,222	0,188	0,297	0,277	0,460	0,425
37,100	0,082	0,213	0,190	0,153	0,226	0,166	0,273	0,235	0,439	0,378
37,000	0,060	0,196	0,173	0,131	0,201	0,131	0,233	0,191	0,397	0,327
36,900	0,073	0,209	0,172	0,137	0,196	0,145	0,244	0,209	0,405	0,354
36,800	0,057	0,194	0,152	0,129	0,158	0,129	0,209	0,186	0,352	0,323
36,700	0,062	0,192	0,182	0,139	0,193	0,142	0,244	0,201	0,384	0,334
36,600	0,212	0,240	0,191	0,190	0,182	0,181	0,402	0,402	0,421	0,421
36,500	0,221	0,192	0,161	0,170	0,151	0,163	0,382	0,391	0,343	0,355
36,400	0,232	0,230	0,184	0,197	0,192	0,221	0,415	0,429	0,422	0,451
36,300	0,228	0,221	0,179	0,185	0,189	0,203	0,407	0,413	0,410	0,424
36,200	0,240	0,212	0,180	0,185	0,196	0,208	0,420	0,426	0,407	0,420
36,100	0,236	0,212	0,180	0,186	0,185	0,195	0,417	0,422	0,397	0,407
36,000	0,231	0,227	0,193	0,185	0,201	0,187	0,424	0,416	0,428	0,414
35,900	0,229	0,230	0,195	0,187	0,203	0,188	0,424	0,416	0,433	0,418
35,800	0,081	0,215	0,155	0,170	0,168	0,189	0,236	0,251	0,383	0,404
35,700	0,096	0,243	0,136	0,201	0,139	0,220	0,232	0,297	0,382	0,463
35,600	0,081	0,220	0,137	0,208	0,141	0,233	0,218	0,289	0,361	0,453
35,500	0,061	0,197	0,132	0,154	0,136	0,161	0,193	0,215	0,333	0,358
35,400	0,058	0,199	0,134	0,127	0,138	0,127	0,192	0,185	0,336	0,325
35,300	0,096	0,247	0,139	0,170	0,143	0,181	0,235	0,266	0,390	0,428
35,200 35,100	0,121 0,149	0,261	0,160 0,181	0,180 0,180	0,168 0,194	0,193 0,193	0,282	0,301 0,330	0,429 0,469	0,454 0,468
35,100	0,149	0,275 0,262	0,181	0,180	0,194	0,193	0,331 0,377	0,357	0,469	0,466
34,900	0,173	0,268	0,197	0,178	0,204	0,178	0,377	0,351	0,400	0,440
34,800	0,179	0,254	0,169	0,173	0,203	0,105	0,300	0,301	0,471	0,449
34,700	0,133	0,265	0,175	0,182	0,173	0,193	0,308	0,315	0,449	0,457
34,600	0,047	0,169	0,132	0,132	0,135	0,132	0,179	0,179	0,304	0,301
34,500	0,048	0,171	0,142	0,131	0,146	0,131	0,190	0,179	0,318	0,303
34,400	0,060	0,195	0,145	0,134	0,152	0,139	0,205	0,194	0,347	0,334
34,300	0,069	0,200	0,157	0,156	0,169	0,169	0,225	0,225	0,370	0,369
34,200	0,059	0,190	0,134	0,153	0,141	0,165	0,193	0,211	0,331	0,355
34,100	0,057	0,192	0,130	0,150	0,130	0,163	0,186	0,207	0,321	0,355
34,000	0,048	0,169	0,132	0,147	0,132	0,157	0,180	0,195	0,301	0,327
33,900	0,047	0,165	0,133	0,148	0,133	0,158	0,180	0,194	0,299	0,324
33,800	0,066	0,194	0,209	0,138	0,260	0,145	0,274	0,204	0,454	0,339
33,700	0,062	0,195	0,178	0,128	0,210	0,128	0,240	0,189	0,405	0,323
33,600	0,054	0,189	0,130	0,128	0,133	0,128	0,184	0,183	0,322	0,317
33,500	0,051	0,177	0,169	0,132	0,190	0,132	0,219	0,182	0,367	0,309
33,400	0,054	0,186	0,165	0,130	0,184	0,130	0,219	0,184	0,370	0,316
33,300	0,059	0,198	0,164	0,128	0,185	0,128	0,223	0,187	0,383	0,327
33,200	0,082	0,214	0,150	0,192	0,161	0,225	0,232	0,274	0,375	0,439
33,100	0,052	0,178	0,133	0,186	0,133	0,198	0,185	0,237	0,311	0,376
33,000	0,054	0,189	0,128	0,176	0,128	0,192	0,183	0,230	0,318	0,382
32,900	0,054	0,188	0,128	0,177	0,128	0,194	0,182	0,231	0,317	0,382
32,800	0,062	0,208	0,125	0,146	0,125	0,154	0,187	0,208	0,333	0,361
32,700	0,055	0,192	0,128	0,128	0,128	0,129	0,183	0,183	0,320	0,321
32,600	0,047	0,170	0,132	0,134	0,132	0,138	0,179	0,181	0,302	0,308

Tabelle 19: Ergebnisse der Überlagerung von Primär- und Sekundärwellen (maximale Schiffswellenhöhen)

10.5 Wertetabellen zu Querschnittsverbreiterungen

		unte	r Beibehaltun	g der ursprüi	nglichen Lage o	ier Fahrspura	cnse	
		:3		:5	1:			:5
	re.U. Δ	li.U. Δ	re.U. Δ	li-U. ∆	re.U.	li.U.	re.U.	li-U.
UHW - [km]	[m]	[m]	[m]	[m]	UHW-[km]	UHW-[km]	UHW - [km]	UHW - [km
38,000	0	0	0	0				
37,900	0	0	0	0				
37,800	0	0	0	0				
37,700	0	0	0	0				
37,600	0	0	0	0	07.500		07.500	
37,500	6,51	0	14,51	0 11,51	37,500	27 400	37,500	27 400
37,400	3,01 0	3,51 1,71	11,01 4,51	9,71	37,400	37,400 37,300	37,400 37,300	37,400 37,300
37,300 37,200	0	3,11	0	11,11		37,300	37,300	37,300
37,200	0	4,21	0	12,21		37,200		37,200
37,000	0	0	0	7,41		37,100		37,100
36,900	Ö	0	0	2,81				36,900
36,800	0	0	0	0				,
36,700	0	0	0	0				
36,600	0	0	1,00	1,20			36,600	36,600
36,500	0	0	7,20	1,80			36,500	36,500
36,400	15,57	7,97	23,57	15,97	36,400	36,400	36,400	36,400
36,300	13,57	9,77	21,57	17,77	36,300	36,300	36,300	36,300
36,200	15,87	12,87	23,87	20,87	36,200	36,200	36,200	36,200
36,100	9,51	6,61	17,51	14,61	36,100	36,100	36,100	36,100
36,000	4,01	8,31	12,01	16,31	36,000	36,000	36,000	36,000
35,900	3,31	8,11	11,31	16,11	35,900	35,900	35,900	35,900
35,800	0	0	0	0			05.700	
35,700 35,600	0 0,05	0	6,60	0	25 600		35,700	
35,500	0,05	0 0	8,05 0	0 0	35,600		35,600	
35,400	0	0	0	0				
35,300	0	0	0	0				
35,200	Ö	Ö	ő	Ö				
35,100	Ö	Ö	Ö	Ö				
35,000	0	0	0	3,35				35,000
34,900	0	0	0	1,35				34,900
34,800	0	0	0	0				
34,700	0	0	0	0				
34,600	0	0	0	0			}	
34,500	0	0	0	0				
34,400	0	0	0	0			1	
34,300	0	0	0	0			-	
34,200	0	0	0	0				
34,100	0 0	0 0	0	0 0			-	
34,000 33,900	0	0	0	0				
33,800	0	11,01	0	19,01		33,800	}	33,800
33,700	0	3,31	0	11,31		33,700		33,700
33,600	0	0	ő	0		30,733		00,700
33,500	0	Ö	ő	Ő			-	
33,400	Ö	0	Ö	Ö				
33,300	0	0	0	0			}	
33,200	2,91	0	10,91	0	33,200		33,200	
33,100	0	0	0	0	1		}	
33,000	0	0	0	0				
32,900	0	0	0	0				
32,800	0	0	0	0				
32,700	0	0	0	0				
32,600	0	0	0	0	1		1	

Tabelle 20: Maßgebende Stellen und Größen der erforderlichen Querschnittsverbreiterungen, die sich durch die neuen Ausbauprofile bei ursprünglichem Verlauf der Fahrspurachse ergeben.

			rliche einseiti ken Ufer	ge Ufer-Bagg	jerungen bei V	erlegung der zum recht		
	Δhhanna	rung li. U.			Abbagger	ung re. U.		
	1:3	1:5	1:3	1:5	1:3	1:5	1:3	1:5
UHW - [km]	[m]	[m]	UHW-[km]	UHW-[km]	[m]	[m]	UHW-[km]	UHW-[km]
38,000	0	0	-	-	0	0	-	-
37,900	0	0	-	-	0	0	-	-
37,800	0	0	-	-	0	0	-	-
37,700	0	0	-	-	0	0	-	-
37,600 37,500	0 0	0 0	-	-	0 6,51	0 14,51	37,500	- 37,500
37,400 37,400	6,51	22,51	37,400	37,400	6,51	22,51	37,500	37,500
37,300	1,71	14,21	37,300	37,300	0,51	14,21	-	37,300
37,200	3,11	11,11	37,200	37,200	Ö	5,61	_	37,200
37,100	4,21	12,21	37,100	37,100	0	0	-	-
37,000	Ô	7,41	-	37,000	0	0	-	-
36,900	0	2,81	-	36,900	0	0	-	-
36,800	0	0	-	-	0	0	-	-
36,700	0	0	-	-	0	0	-	-
36,600	0	2,20	-	36,600	0	2,20	-	36,600
36,500	0	9,00	-	36,500	0	9,00	-	36,500
36,400	23,54	39,54	36,400	36,400	23,54	39,54	36,400	36,400
36,300	23,34	39,34	36,300	36,300	23,34	39,34	36,300	36,300
36,200	28,74	44,74	36,200	36,200	28,74	44,74	36,200	36,200
36,100	16,11	32,11	36,100	36,100	16,11	32,11	36,100	36,100
36,000 35,900	12,31 11,41	28,31 27,41	36,000 35,900	36,000 35,900	12,31 11,41	28,31 27,41	36,000 35,900	36,000 35,900
35,800	0	0	33,900	55,900	0	0	33,900	-
35,700	0	0	_	_	0	6,60	_	35,700
35,600	Ö	Ő	_	-	0,05	8,05	35,600	35,600
35,500	0	0	-	-	0	0	-	-
35,400	0	0	-	-	0	0	-	-
35,300	0	0	-	-	0	0	-	-
35,200	0	0	-	-	0	0	-	-
35,100	0	0	-	-	0	0	-	-
35,000	0	3,35	-	35,000	0	0	-	-
34,900	0	1,35	-	34,900	0	0	-	-
34,800	0	0	-	-	0	0	-	-
34,700	0	0 0	-	-	0	0	-	-
34,600 34,500	0 0	0	_	-	0 0	0 0	_	-
34,400	0	0		_	0	0		_
34,300	0	0	_	_	0	0	_	_
34,200	Ö	0	-	-	0	0	-	-
34,100	0	0	-	-	0	0	-	-
34,000	0	0	-	-	0	0	-	-
33,900	0	0	-	-	0	0	-	-
33,800	11,01	19,01	33,800	33,800	0	0	-	-
33,700	3,31	11,31	33,700	33,700	0	0	-	-
33,600	0	0	-	-	0	0	-	-
33,500	0	0	-	-	0	0	-	-
33,400	0	0	-	-	0	0	_	-
33,300	0 0	0 0	-	-	0 2.01	0 10,91	33,200	33 300
33,200 33,100	0	0	Ī _	-	2,91 0	0	33,200	33,200
33,000	0	0		-	0	0	_	_
32,900	0	0	_	-	0	0	_	-
32,800	0	0	-	-	0	0	-	-
32,700	0	0	-	-	0	0	-	-
32,600	0	0	-	-	0	0	-	-

Tabelle 21: Maßgebende Stellen und Größen der erforderlichen Verbreiterung der Gewässerquerschnitte für Böschungsneigungen 1:3 und 1:5. Dabei ist berücksichtigt, dass über die gesamte Strecke von 5,4 km nur an einer Uferseite Abgrabungen stattfinden und die andere Seite erhalten bleibt.

Erforderliche Ufer-Baggerungen (Eingriffsminimierung)

	Abbagger	una li II			Abbaggar	ung re. U.		
	1:3	1:5	1:3	1:5	1:3	1:5	1:3	1:5
UHW - [km]	[m]	[m]	UHW-[km]	UHW-[km]	[m]	[m]	UHW-[km]	UHW-[km
38,000	0	0	-	-	0	0	-	-
37,900	0	0	-	-	0	0	-	-
37,800	0	0	-	-	0	0	-	-
37,700	0	0	-	-	0	0	-	-
37,600	0	0	-	-	0	0	-	-
37,500	0	0	-	-	0	0	-	-
37,400	0	0	-	-	6,51	22,51	37,400	37,400
37,300	0	0	-	-	0	14,21	-	37,300
37,200	0	0	-	-	0	5,61	-	37,200
37,100	0	0	-	-	0	0	-	-
37,000	0	0	-	-	0	0	-	-
36,900	0	0	-	-	0	0	-	-
36,800	0	0	_	_	0	0	-	-
36,700	0	0	-	-	0	0	_	=
36,600	Ő	Ö	_	-	Ö	2,20	_	36,600
36,500	Ö	Ö	_	_	Ö	9,00	_	36,500
36,400	0	Ö	_	_	23,54	39,54	36,400	36,400
36,300	0	0	_	_	23,34	39,34	36,300	36,300
36,200	0	0	_	_	28,74	44,74	36,200	36,200
36,100	0	0	_	_	16,11	32,11	36,100	36,100
36,000	0	0		_	12,31	28,31	36,000	36,000
35,900	0	0	-	-	11,41	27,41	35,900	35,900
•	0	0	_	-	0	0	33,900	33,900
35,800	0	0	-	-		0	_	-
35,700			_	-	0		-	-
35,600	0	0	-	-	0	0	_	-
35,500	0	0	-	-	0	0	_	-
35,400	0	0	-	-	0	0	-	-
35,300	0	0	-	-	0	0	-	-
35,200	0	0	-	-	0	0	-	-
35,100	0	0	-	-	0	0	-	-
35,000	0	0	-	-	0	0	-	-
34,900	0	0	-	-	0	0	-	-
34,800	0	0	-	-	0	0	-	-
34,700	0	0	-	-	0	0	-	-
34,600	0	0	-	-	0	0	-	=
34,500	0	0	-	-	0	0	-	-
34,400	0	0	-	-	0	0	-	-
34,300	0	0	-	-	0	0	-	=
34,200	0	0	-	-	0	0	-	-
34,100	0	0	-	-	0	0	-	-
34,000	0	0	-	-	0	0	-	-
33,900	0	0	-	-	0	0	-	-
33,800	0	0	-	-	0	0	-	-
33,700	0	0	-	-	0	0	-	_
33,600	0	0	-	-	0	0	-	-
33,500	0	0	-	-	0	0	-	-
33,400	0	0	-	-	0	0	-	-
33,300	0	0	-	-	0	0	-	-
33,200	0	0	-	-	0	0	-	-
33,100	0	0	-	-	0	0	-	_
33,000	0	Ō	-	-	0	0	_	-
32,900	0	0	_	-	0	0	_	_
32,800	Ö	0	-	-	Ö	Ö	_	=
U-,UUU			1				l	
32,700	0	0	-	-	0	0	-	-

Tabelle 22: Maßgebende Stellen und Größen erforderlicher Verbreiterungen der Gewässerquerschnitte (Eingriffsminimierung)

10.6 Wertetabelle der Ausbauprofile

Abmessungen der erforderlichen Ausbauprofile (Trapezprofile)

1	Abst	tände von Fahra	achse	Absta	ände von Fahra	achse		Abstand Sch	niffsachse zu	
	n	ach rechts auß	en	n	ach links auße	en		Profilberandung bei		
	1:3	1:5		1:3	1:5		maximale	außermitt	iger Fahrt	
	maßg. BW/2	maßg. BW/2	maßg. bSo/2	maßg. BW/2	maßg. BW/2	maßg. bSo/2	Exzentrizität	1:3	1:5	
UHW - [km]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
38,000	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
37,900	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
37,800	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
37,700	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
37,600	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
37,500	44,31	52,31	32,31	-44,31	-52,31	-32,31	16,15	28,15	36,15	
37,400	44,31	52,31	32,31	-44,31	-52,31	-32,31	16,15	28,15	36,15	
37,300	44,31	52,31	32,31	-44,31	-52,31	-32,31	16,15	28,15	36,15	
37,200	44,31	52,31	32,31	-44,31	-52,31	-32,31	16,15	28,15	36,15	
37,100	44,31	52,31	32,31	-44,31	-52,31	-32,31	16,15	28,15	36,15	
37,000	44,31	52,31	32,31	-44,31	-52,31	-32,31	16,15	28,15	36,15	
36,900	44,31	52,31	32,31	-44,31	-52,31	-32,31	16,15	28,15	36,15	
36,800	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
36,700	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
36,600	29,00	37,00	17,00	-29,00	-37,00	-17,00	8,50	20,50	28,50	
36,500	29,00	37,00	17,00	-29,00	-37,00	-17,00	8,50	20,50	28,50	
36,400	48,57	56,57	36,57	-48,57	-56,57	-36,57	18,28	30,28	38,28	
36,300	48,57	56,57	36,57	-48,57	-56,57	-36,57	18,28	30,28	38,28	
36,200	48,57	56,57	36,57	-48,57	-56,57	-36,57	18,28	30,28	38,28	
36,100	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31 40,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
36,000 35,900	41,31	49,31	29,31	-41,31 -41,31	-49,31 40,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
35,800	41,31 41,31	49,31 49,31	29,31 29,31	-41,31 -41,31	-49,31 -49,31	-29,31 -29,31	14,65 14,65	26,65 26,65	34,65 34,65	
35,700	27,50	35,50	15,50	-41,51	-49,51	-29,31 -15,50	6,89	20,65	28,61	
35,600	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
35,500	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
35,400	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
35,300	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
35,200	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
35,100	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
35,000	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
34,900	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
34,800	27,85	35,85	15,85	-27,85	-35,85	-15,85	7,93	19,93	27,93	
34,700	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
34,600	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
34,500	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
34,400	31,28	39,28	19,28	-31,28	-39,28	-19,28	9,64	21,64	29,64	
34,300	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
34,200	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
34,100	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
34,000	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
33,900	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
33,800	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
33,700	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
33,600	27,50	35,50	15,50	-27,50	-35,50	-15,50	6,89	20,61	28,61	
33,500	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
33,400	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
33,300	41,31	49,31	29,31	-41,31	-49,31 40,31	-29,31	14,65	26,65	34,65	
33,200	41,31	49,31	29,31	-41,31 -27.50	-49,31	-29,31 15.50	14,65	26,65	34,65 28.61	
33,100	27,50	35,50	15,50	-27,50 -30,66	-35,50	-15,50 -18,66	6,89	20,61	- / -	
33,000 32,900	30,66 30,66	38,66 38,66	18,66 18,66	-30,66	-38,66 -38,66	-18,66 -18,66	9,33 9,33	21,33 21,33	29,33 29,33	
32,800	30,66	38,66	18,66	-30,66	-38,66	-18,66	9,33	21,33	29,33	
32,700	30,66	38,66	18,66	-30,66	-38,66	-18,66	9,33	21,33	29,33	
32,600	30,66	38,66	18,66	-30,66	-38,66	-18,66	9,33	21,33	29,33	
32,000	55,00	55,55	. 5,55	23,00	25,00	. 5,55	0,50	2.,00	_0,00	

Tabelle 23: Wertetabelle der erforderlichen Ausbauprofile (Trapezprofile) mit Böschungsneigungen 1:3 und 1:5

Literatur

- BEGEMANN, WOLF/ SCHIECHTL, HUGO-MEINHARD: Ingenieurbiologie: Handbuch zum ökologischen Wasser- und Erdbau, Bauverlag GmbH, Wiesbaden; Berlin, 2. Auflage (1994).
- BERNECKER, KLEMENS: "Flächenhaftes Naturdenkmal Schilfgebiet Neue Chance hinter alten Pfählen," Eberbacher Geschichtsblatt, Stadt Eberbach (Hrsg.), S. 180–187 (1999).
- BESTMANN, L.: "Bepflanzung von Deckwerken," Wasser & Boden, S. 160–163 (3/1991).
- BESTMANN, L.: "Vegetatives Deckwerk," Wasser & Boden, S. 78–79 (5/1995).
- BESTMANN, L.: "Vegetatives Deckwerk am Parallelwerk Walsum-Stapp," Wasser & Boden, S. 15–19 (9/1998).
- Bestmann GmbH Ingenieurbiologie: "Vegetatives Deckwerk System Bestmann. Ufersicherung an Bundeswasserstraßen," Produktinformation (1993b).
- Bestmann GmbH Ingenieurbiologie: "Böschungs- und Biotopschutz an schiffbaren Gewässern. Informationen zum Vegetativen Deckwerk. System Bestmann," Produkt-information (1994a).
- BOLLRICH, GERHARD/ PREISSLER, GÜNTER: *Technische Hydromechanik*, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 3. Auflage (1992).
- Bretschneider, Hans/ Lecher, Kurt/ Schmidt, Martin: *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 6. Auflage (1982).
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG): Zwischenbericht Versuchstrecken Vegetativen Deckwerks, Koblenz, Berlin (1997).
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR), Karlsruhe (1993b).
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen (MBB), Entwurf,, Karlsruhe (1999c).
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): "Ausbau Untere Havel Wasserstraße Flusshavel. Ufer- und Sohlbelastungen Bauabschnitt 1 (UHW-km 32,6 38,0)," unveröffentlicht (2001a).
- Bundesministerium für Verkehr: "Projekt 17," CREAD Werbeagentur GmbH, Bonn (1997b).
- Bundesministerium für Verkehr: "Die Untere Havel-Wasserstraße. Umweltverträgliche Schifffahrt in einer alten Kulturlandschaft," CREAD Werbeagentur GmbH, Berlin (1998a).
- Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchg): "Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege in der Neufassung vom 21.09.1998," (1998).

- CHOW, VEN TE: *Open-channel Hydraulics*, Kapitel 7, S. 157–189, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York (1959).
- DIN 18918: Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen, Beuth Verlag GmbH, Berlin (1990).
- DIN 19657: Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen, Beuth Verlag GmbH, Berlin (1973).
- DIN 19661-2: Sohlenbauwerke, Beuth Verlag GmbH, Berlin (2000).
- DIN 4044: Hydromechanik im Wasserbau, Beuth Verlag GmbH, Berlin (1980).
- DITTRICH, ANDREAS: Wechselwirkung Morphologie / Strömung naturnaher Fließgewässer, Habilitationsschrift, Technische Universität Fridericiana (TH), Karlsruhe (1998).
- DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 220: *Hydraulische Berechnung von Fließgewässern*, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin (1991).
- DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 244: *Uferstreifen an Fließgewässern Funktion, Gestaltung und Pflege*, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn (1997).
- DVWK-Schriften, Heft 118: *Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung*, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn (1997).
- DVWK-Schriften, Heft 79: Erfahrungen bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin (1987).
- DVWK-Schriften, Heft 92: *Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten*, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin (1990).
- FELKEL, KARL: *Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs*, Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 15, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe (1960).
- FLORINETH, FLORIN: *Ingenieurbiologische Maßnahmen an Gewässern in Südtirol*, Band 11, Ingenieurbiologie im Schutzwasserbau von *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft*, S. 39–61, Helmut Renner (Hrsg.), Technische Universität Graz, Graz (1993).
- FRÖMBGEN, B./ RICHTER, K./ TÖNSMANN, F./ OTTO, A.: *Naturnaher Wasserbau*, *Projekt Holzbach*, Stüder-Druck, Kreisverwaltung Neuwied (1992).
- GERSTGRASER, CHRISTOPH: Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern. Grundlagen zu Bau, Belastbarkeit und Wirkungsweisen, Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien (2000).
- GÜNTHER, ULRICH: "Biologische Auswirkungen von Geotextilien im Kanalbau," *Binnenschifffahrt*, Nr.4, S. 38–40 (1996).

- HAGER, U./ JUPÉ, E.: "Vegetatives Deckbauwerk zur Sicherung eines Gleichgewichtsprofils," Wasser & Boden, S. 28–33 (3/1995).
- HEINEMANN, EKKEHARD/ PAUL, RUNO: *Hydraulik für Bauingenieure*, Teubner, Stuttgart; Leipzig (1998).
- HÜTTE, MICHAEL: Ökologie und Wasserbau: ökologische Grundlagen von Gewässerverbauung und Wasserkraftnutzung, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin; Wien (2000).
- Institut für Konstruktiven Wasserbau in Zusammenarbeit mit dem Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV): *Uferschutz und Gerinnestabilisierung im modernen Gewässerausbau*, Band 16 von *Konstruktiver Wasserbau / Landschaftswasserbau*, Helmut Drobir (Hrsg.), TU Wien (1995).
- Institut für Wasserbau und Kulturtechnik (IWK): Beiträge zur naturnahen Umgestaltung von Fließgewässern, Mitteilungen, Heft 180, Peter Larsen (Hrsg.), Universität Fridericiana zu Karlsruhe (1991a).
- Institut für Wasserbau und Kulturtechnik (IWK): Wasserbau I, Umdrucke zur Vorlesung, Franz Nestmann (Leiter), Universität Fridericiana zu Karlsruhe (1992b).
- Internationale Geotextil GmbH (IGG): "Ingenieurbiologische Bauweisen mit Hastec. Naturfaser-Geotextil," Produktinformation (1997).
- JOHANNSEN, R.: Zur Wirkung ingenieurbiologischer Bauweisen am Beispiel lebender Uferdeckwerke im Flußbau, Band Ingenieurbiologie. Uferschutzwald an Fließgewässern, S. 102–111, K. Krämer-Verlag, Stuttgart (1980).
- KÖHLER, H.-J.: Filterbemessung aus geotechnischer Sicht, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe (2000).
- KLIMMER, MARTIN: Untere Havel Wasserstraße zwischen Ketzin und Brandenburg (UHW-km 32,610 54,250): Streckenorientierte Analyse im Hinblick auf Gewässerhydraulik, Schifffahrt und Naturschutzbelange sowie Ableitung möglicher Ausbaumaßnahmen, Diplomarbeit, Institut für Hydromechanik Universität Karlsruhe (TH), Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (BAW) (2000).
- KRÜGER, FRANK: Fließgesetze in offenen Gerinnen, Dissertation, Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen, TU Dresden (1988).
- KUHN, RUDOLF: *Binnenverkehrswasserbau*, Verlag für Architektur u. techn. Wiss., Berlin (1985).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU): Bauweisen des naturnahen Wasserbaus. Umgestaltung der Enz in Pforzheim, Band 2 von Handbuch Wasser 2, Stuttgart (1991a).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU): Gesamtkonzept Naturnahe Unterhaltung von Fließgewässern. Möglichkeiten, Techniken, Perspektiven, Band 19 von Handbuch Wasser 2, Karlsruhe (1995b).

- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU): Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern. Teil III: Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben. Erste Zwischenergebnisse der Erfolgskontrolle, Band 20 von Handbuch Wasser 2, Karlsruhe (1995c).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU): Naturnahe Bauweisen im Wasserbau. Dokumentation und Bewertung am Pilotprojekt Enz / Pforzheim 1990-1995, Band 25 von Handbuch Wasser 2, Karlsruhe (1996d).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU): *Naturgemäße Bauweisen. Unterhaltungsmaßnahmen nach Hochwasserereignissen*, Band 47 von *Oberirdische Gewässer*, *Gewässerökologie*, Karlsruhe (1998e).
- LANGE, GERD/ LECHER, KURT: Gewässerregelung, Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 2. Auflage (1989).
- MATTHECK, CLAUS: Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister, Rombach GmbH Druck- und Verlagshaus, Freiburg im Breisgau, 3. Auflage (1997).
- Naturschutzbund Eberbach (NABU): Eine Bilanz zum Ende des 20. Jahrhunderts, Klemens Bernecker u. Max Schulz (Hrsg.), Eberbach (2000).
- NAUDASCHER, EDUARD: *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*, Springer-Verlag, Wien; New York, 2. Auflage (1992).
- NESS, ANDREAS: "Erfahrungen mit der UVU am Beispiel der Unteren-Havel-Wasserstraße / Projekt 17," Binnenschifffahrt, Nr.1, S. 11–15 (1996).
- OEBIUS, HORST: Charakterisierung der Einflussgrößen Schiffsumströmung und Propellerstrahl auf die Wasserstraßen, Band 82 von Mitteilungen, S. 7–22, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe (2000).
- OPLATKA, MATTHIAS: *Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern*, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich (1998).
- PASCHE, ERIK: *Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung*, Mitteilungen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Gerhard Rouvé (Hrsg.), RWTH Aachen (1984).
- PATT, HEINZ/ JÜRGING, PETER/ KRAUS, WERNER: Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern, Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York (1998).
- PFLUG, WOLFRAM: Etwas zur Geschichte der Ingenieurbiologie ausgewählte Unterlagen der Arbeitsgruppe Untersuchung naturnaher Böschungssicherungsarten am Neckar, S. 2–9, Mitteilungen 5, Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V. (5/1995).
- PRÜCKNER, RICHARD: Die Technik der Lebendverbauung, Österreichischer Agrarverlag, Wien (1965).

- SAURER, BRUNO: *Ingenieurbiologie in der Steiermark*, Band 11, Ingenieurbiologie im Schutzwasserbau von *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft*, S. 15–23, Helmut Renner (Hrsg.), Technische Universität Graz, Graz (1993).
- SCHERLE, JÜRGEN: Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen Grundlagen, Leitbilder, Planung, Mitteilungen, Heft 199, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik (IWK), Universität Fridericiana zu Karlsruhe (1999).
- SCHIECHTL, HUGO-MEINHARD/ STERN, ROLAND: Handbuch für naturnahen Wasserbau: Eine Anleitung für ingenieurbiologische Bauweisen, Österreichischer Agrarverlag, Wien (1994).
- SCHLÜTER, UWE: *Pflanze als Baustoff: Ingenieurbiologie in Praxis und Umwelt*, Patzer Verlag GmbH und CO. KG, Berlin; Hannover (1986).
- SCHMIDT-VÖCKS, DIETER: "Ufersicherung des Mittellandkanals unter ökologischen Aspekten," Binnenschifffahrt, Nr.7, S. 30–36 (1998).
- SCHMIDT-VÖCKS, DIETER/ MÖBIUS, WERNER: "Der Bau von Deckwerken bei der Erweiterung des Mittellandkanals," *Binnenschiffahrt*, Nr.17, S. 20–27 (1994).
- SCHNEIDER, KLAUS-JÜRGEN: Bautabellen für Ingenieure mit europäischen und nationalen Vorschriften, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf, 11. Auflage (1994).
- SCHUPPENER, B.: "Standsicherheit bei durchwurzelten Uferböschungen," *Binnenschifffahrt*, *Nr.9*, S. 18–23 (1993).
- STERN, ROLAND: *Kritische Anmerkungen zur Ingenieurbiologie*, Band 11, Ingenieurbiologie im Schutzwasserbau von *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft*, S. 101–111, Helmut Renner (Hrsg.), Technische Universität Graz, Graz (1993).
- TITTIZER, T.: Auswirkungen auf die aquatische Besiedlung (Makrozoobenthos) Schlacken im Wasserbau, S. 4, Report des Forschungsinstituts, Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e.V., Duisburg (4/1997).
- Verein für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e.V.: Fahrdynamik von Binnenschiffen. Allgemeine Einführung und Folgerungen aus Schifffahrtsversuchen, Duisburg (1992).
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV): "www.wsv.de," Internet (2001).
- WILDE, ELMAR: Natürliche Wellenentstehung, Wellenbeanspruchung der Ufer und alternative Konzepte für Uferschutzmaßnahmen an der Unteren Havel Wasserstraße zwischen Ketzin und Brandenburg (UHW-km 32,610 54,250), Diplomarbeit, Institut für Hydromechanik Universität Karlsruhe (TH), Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (BAW) (2000).