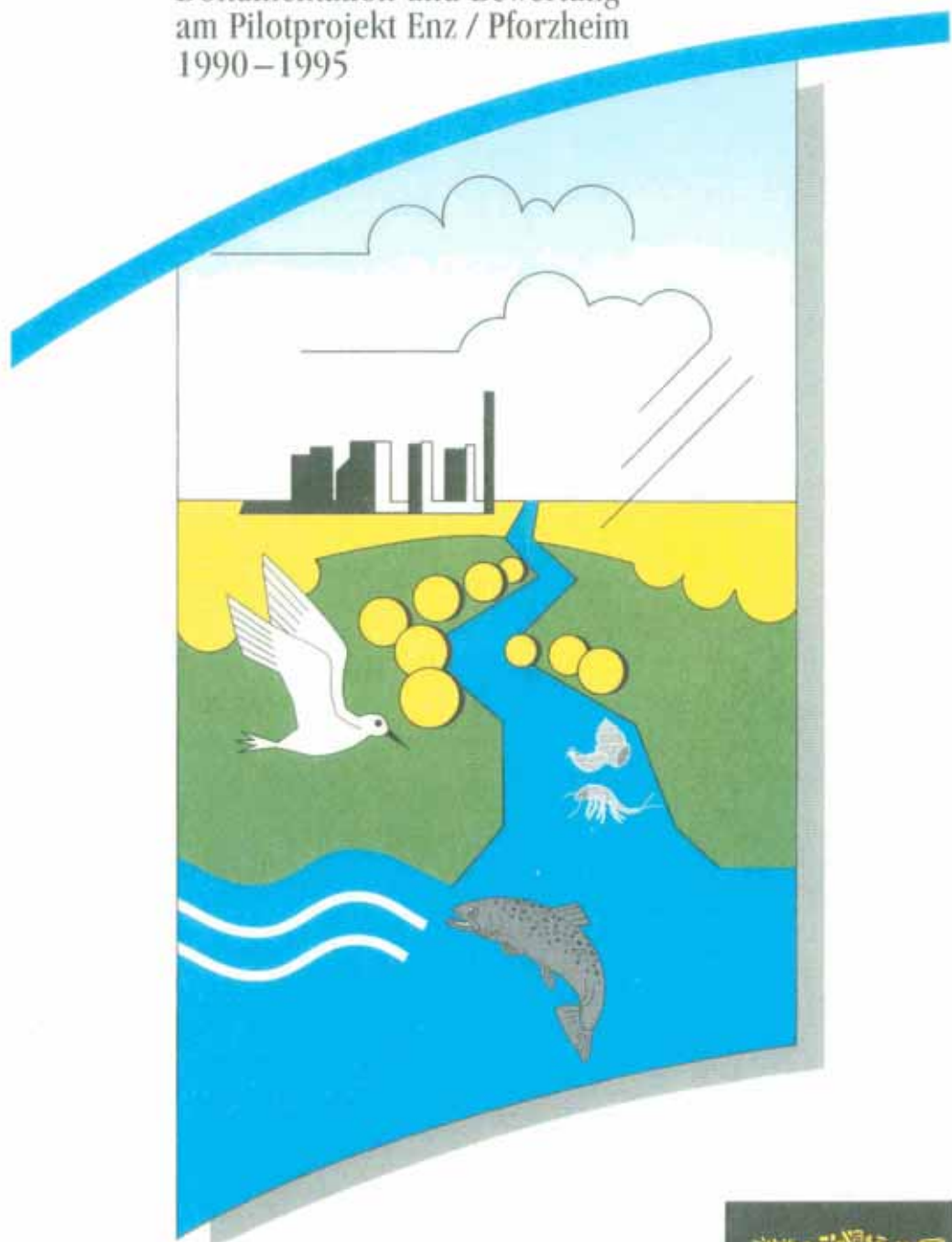


Handbuch Wasser 2

Naturnahe Bauweisen im Wasserbau

Dokumentation und Bewertung
am Pilotprojekt Enz / Pforzheim
1990 - 1995



WASSER



MINISTERIUM
FÜR UMWELT
UND VERKEHR

Handbuch Wasser 2

**Naturnahe Bauweisen
im Wasserbau**

Dokumentation und Bewertung
am Pilotprojekt Enz / Pforzheim
1990 – 1995



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 1996

IMPRESSUM

Herausgeber Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Griesbachstraße 1
76185 Karlsruhe

ISSN 0941-780 X (Zentraler Fachdienst Wasser, Boden, Abfall, Altlasten bei der
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg)
0946-0675 (Handbuch Wasser 2)

Bearbeitung Abteilung 4 - Wasser
Sachgebiet 41.2, auf Grundlage des Berichtes zum Hochwasser 1993
der Universität Karlsruhe, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik

Druck Engelhardt & Bauer, Karlsruhe

Gedruckt auf Recylux 115 g/m²

Bezug Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Referat 15 - Bibliothek
Postfach 21 07 52, 76157 Karlsruhe
Telefax 0721/983-1456

Preis 21.-- DM

Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Gewässer sind Lebensadern unserer Landschaft. Sie prägen wesentlich den Naturhaushalt und das Landschaftsbild; die Entwicklung der Kulturlandschaft ist eng verbunden mit dem Ausbau der Gewässer.

Der Umfang menschlicher Eingriffe nahm mit fortschreitender Industrialisierung, insbesondere nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs erheblich zu. Naturnahe Gewässer und Auen sind mittlerweile selten geworden. Ausgebaute Gewässer können ihre Funktionen im Ökosystem größtenteils nicht mehr erfüllen. Lebensräume für Tiere und Pflanzen gingen verloren, zahlreiche an Gewässer und Feuchtgebiete gebundene Arten sind vom Aussterben bedroht.

Die naturnahe Entwicklung der Gewässer und Auen ist eine Schwerpunktaufgabe der Umweltpolitik des Landes Baden-Württemberg. Sie bedarf der Unterstützung aller Beteiligten. Voraussetzung für zielgerichtetes Handeln sind fundiertes fachliches Wissen und Engagement.

In dieser Schriftenreihe werden im Rahmen des Zentralen Fachdienstes bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Arbeitshilfen zur naturnahen Entwicklung, Unterhaltung und Umgestaltung der Gewässer und Auen herausgegeben. Die Arbeitsmaterialien, vom Sachgebiet Gewässerentwicklung, Gewässerstruktur und Wasserbau in Zusammenarbeit mit zahlreichen Fachleuten innerhalb und außerhalb der Wasserwirtschaftsverwaltung erarbeitet und zusammengestellt, richten sich an Behörden, Planer und Betroffene gleichermaßen.

Die vorliegende Schrift beurteilt auf der Grundlage des Heftes 2 der Schriftenreihe Handbuch Wasser 2 (1991) „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim“ die Entwicklung und den derzeitigen Entwicklungsstand der ausgeführten Bauweisen an der Enz unter hydraulischen Gesichtspunkten. Drei Jahre nach der Umsetzung der naturnahen Bauweisen an der Enz trat im Dezember 1993 der Bemessungsabfluß auf. Auf Grundlage umfangreich erhobener Naturmeßdaten konnten die hydraulischen Belastungen dieses Ereignisses auf die verschiedenen Bauweisen errechnet und den eingetretenen Belastungen durch das Hochwasser im Dezember 1993 gegenübergestellt und bewertet werden.

Die Auswertung der Messungen und Beobachtungen der verschiedenen naturnahen Bauweisen in den vergangenen 5 Jahren ergibt wichtige Hinweise über ihre Stabilität. Darüberhinaus werden detaillierte Aussagen zur Bemessung, zum Einsatzbereich und zur praktischen Ausführung gemacht.

Ministerium für Umwelt
und Verkehr
Baden-Württemberg
Stuttgart

Landesanstalt
für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Karlsruhe

im September 1996



Gesamtkonzept Naturnahe Unterhaltung	6
1 Allgemeines	10
2 Beschreibung der Umgestaltungsmaßnahmen	12
2.1 Gewässer	12
2.2 Mittelwasserbett	14
2.3 Inseln	14
3 Untersuchungen	15
3.1 Voruntersuchungen	15
3.2 Untersuchungskonzept zur Erfolgskontrolle	15
3.3 Wasserstandsbeobachtungen	17
3.4 Vermessung	17
3.5 Hydraulik	18
3.6 Sonstige Untersuchungen	18
4 Hochwasser Dezember 1993	19
4.1 Hydrologie	19
4.2 Hydraulik	20
4.2.1 Schubspannungsverteilungen	20
4.2.2 Lokale Geschwindigkeitsvektoren	24



5 Entwicklung / Veränderungen 27

5.1 Synoptische Entwicklungsdarstellung 27

5.2 Gewässerbett 34

5.2.1 Mittelwasserbett 35

5.2.2 Inseln 35

5.3 Naturnahe Bauweisen 36

5.3.1 Faschinen 36

5.3.2 Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig 37

5.3.3 Spreitlage 38

5.3.4 Röhrichtwalze und Röhrichtballenpflanzung 38

5.3.5 Rollierung und Steinwurf 39

5.3.6 Rauhpäckwerk 40

5.3.7 Weidenstecklinge und Steckhölzer 42

5.3.8 Naturfasermatten und Geotextilien 43

5.3.9 Schotterrasen 43

5.3.10 Grassaat und Grassoden 44

5.4 Unterhaltung 44

6 Bewertung und Empfehlungen 45

6.1 Bewertung der einzelnen Bauweisen 46

6.1.1 Faschinen 46

6.1.2 Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig 48

6.1.3 Spreitlage 48

6.1.4 Röhrichtwalze und Röhrichtpflanzung 48

6.1.5 Rollierung und Steinwurf 49

6.1.6 Rauhpäckwerk mit Rollierung 50

6.1.7 Weidenstecklinge und Steckhölzer 51

6.1.8 Schotterrasen / Grassaat / Grassoden 52

6.2 Zusammenwirken der verschiedenen Bauweisen 53

6.2.1 Mittelwasserbett 53

6.2.2 Inseln 55

7 Zusammenfassung und weitere Entwicklung 56

8 Literaturverzeichnis 58



Gesamtkonzept Naturnahe Unterhaltung von Fließgewässern gemäß Handbuch Wasser 2, Heft 19

- Stand September 1996 -

Bereits erschienene Publikationen

Derzeit in Bearbeitung befindliche Publikationen

Vorgesehene Publikationen (Änderungen und weitere Ergänzungen vorbehalten)

Rechtliche Grundlagen		
Handbuch Wasser 2, Heft 31, Rechtsgrundlagen der Gewässerunterhaltung Teil I, Überblick, 1996 WBW-Gewässernachbarschaften, Fortbildungsunterlagen, "Was tun nach Hochwasser?", 1996		Handbuch Wasser 2, Rechtsgrundlagen der Gewässerunterhaltung, Teil II, Beispiele
Planung und Durchführung		
Handbuch Wasser 2, Heft 3, Gewässerentwicklungsplanung, 1993	Aktualisierung Handbuch Wasser 2, Heft 3, Gewässerentwicklungsplanung	
Gehölze		
Handbuch Wasserbau, Heft 5, Naturgemäße Bauweisen, 1993 WBW-Gewässernachbarschaften, Fortbildungsunterlagen, Praktische Gehölzpflege, 1993 Handbuch Wasser 2, Heft 6, Gehölze an Fließgewässern, 1994 Handbuch Wasser 2, Heft 11, Gewässerrandstreifen, 1994 Handbuch Wasser 2, Heft 30, Pappeln an Fließgewässern, 1996	Handbuch Wasser 2, Übersichtskarte zur Zustandsbewertung der Gehölzsäume Handbuch Wasser 2, Karte zur Verbreitung der Gehölzgesellschaften an Fließ- gewässern in Baden-Württemberg Handbuch Wasser 2, Karte zur Potentiellen natürlichen Vegetation der Auen und Fließgewässerufer in Baden-Württemberg	Handbuch Wasser 2, Bestimmung, Verbreitung und Verwendung von Weidenarten an Fließgewässern Handbuch Wasser 2, Altgehölze und Altholz: Bedeutung an Fließgewässern Handbuch Wasser 2, Erlenarten an Fließgewässern in Baden-Württemberg Handbuch Wasser 2, Neophytische Gehölze an Fließgewässern in Baden- Württemberg Handbuch Wasser 2, Landschaftsbild- gestaltung mit Ufergehölzen Handbuch Wasser 2, Ufergehölzsäume und faunistischer Artenschutz Handbuch Wasser 2, Gehölzverwendung an Fließgewässern in Ortslagen Handbuch Wasser 2, Problematik Fichtenforste in Auen
Grünland		
DVWK-Schrift 79, Erfahrungen bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern, 1987 DVWK-Merkblatt 224, Methoden und öko- logische Auswirkungen der maschinellen Gewässerunterhaltung, 1992 Handbuch Wasser 2, Heft 10, Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern, I. Erprobung ausgewählter Methoden, 1994 Handbuch Wasser 2, Heft 18, Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern, II. Untersuchungen zu Biologie und Öko- logie, 1995		Handbuch Wasser 2, Auswirkungen der Extensivierung der Grünlandpflege an Fließgewässern

Bereits erschienene Publikationen

Derzeit in Bearbeitung befindliche Publikationen

Vorgesehene Publikationen
(Änderungen und weitere Ergänzungen vorbehalten)**Krautung**

DVWK-Schrift 79, Erfahrungen bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern, 1987	Untersuchungen des DVWK: Ökologische Aspekte bei der maschinellen Gewässerunterhaltung/Managementmaßnahmen Krautung	Handbuch Wasser 2, Hydrophyten der Fließgewässer in Baden-Württemberg
DVWK-Merkblatt 224, Methoden und ökologische Auswirkungen der maschinellen Gewässerunterhaltung, 1992		Handbuch Wasser 2, Ergebnisse Forschungsprojekt Brenz, Auswirkungen verschiedener Managementmaßnahmen
DVWK-Schrift 99, Auswirkungen der maschinellen Gewässerunterhaltung auf aquatische Lebensgemeinschaften, 1992		
Handbuch Wasser 2, Heft 8, Verkrautung von Fließgewässern, 1993		

Räumung

DVWK-Merkblatt 224, Methoden und ökologische Auswirkungen der maschinellen Gewässerunterhaltung, 1992	Handbuch Wasser 2, Anfall, Verwertung und Entsorgung von Räumgut	Handbuch Wasser 2, Ökologische und hydraulische Aspekte bei der Räumung von Geschiebe und Sediment
DVWK-Schrift 99, Auswirkungen der maschinellen Gewässerunterhaltung auf aquatische Lebensgemeinschaften, 1992	Handbuch Wasser 2, Bedeutung und Pflege von Gräben	

Naturgemäße Bauweisen

Handbuch Wasser 2, Heft 2, Bauweisen des naturnahen Wasserbaus, 1991	Entwicklung von naturgemäßen Bauweisen zur Initiierung der eigendynamischen Entwicklung	
Handbuch Wasserbau, Heft 5, Naturgemäße Bauweisen, 1993		
Handbuch Wasser 2, Heft 25, Naturnahe Bauweisen im Wasserbau, Dokumentation und Bewertung am Pilotprojekt Enz/Pforzheim 1990 - 1995		
Handbuch Wasser 2, Heft 32, Naturgemäße Bauweisen, Unterhaltungsmaßnahmen nach Hochwasserereignissen (einschl. Dokumentation der Ausführung naturgemäßer Bauweisen hinsichtlich ihrer Stabilität), 1996		

Instandsetzung und Erneuerung von Bauwerken

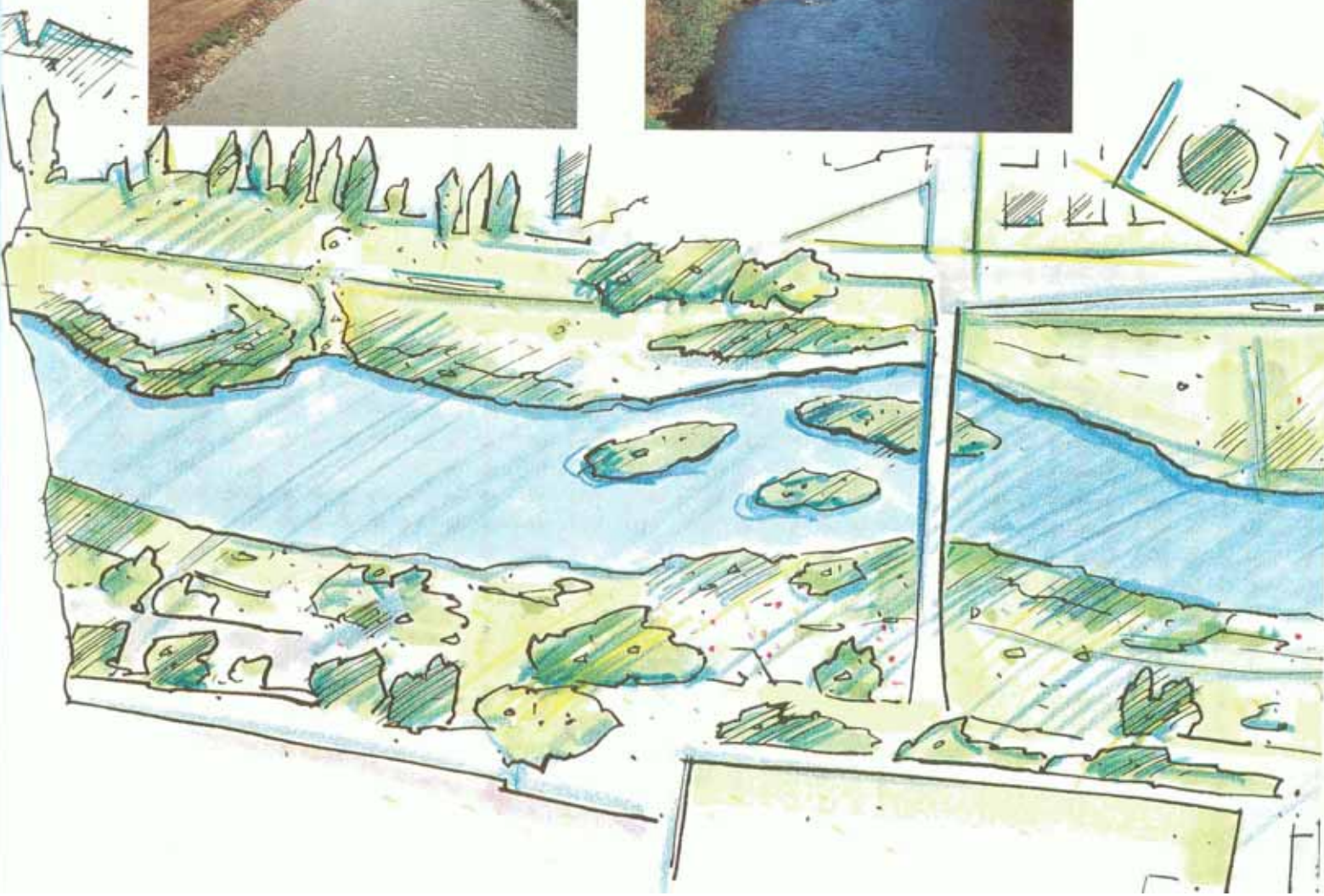
	Handbuch Wasser 2, Planung und Ausführung durchgängiger Sohlenbauwerke	Gestaltungsvorschläge für Fließgewässer in Ortslagen
	Dokumentation durchgängiger Sohlenbauwerke in Baden-Württemberg	

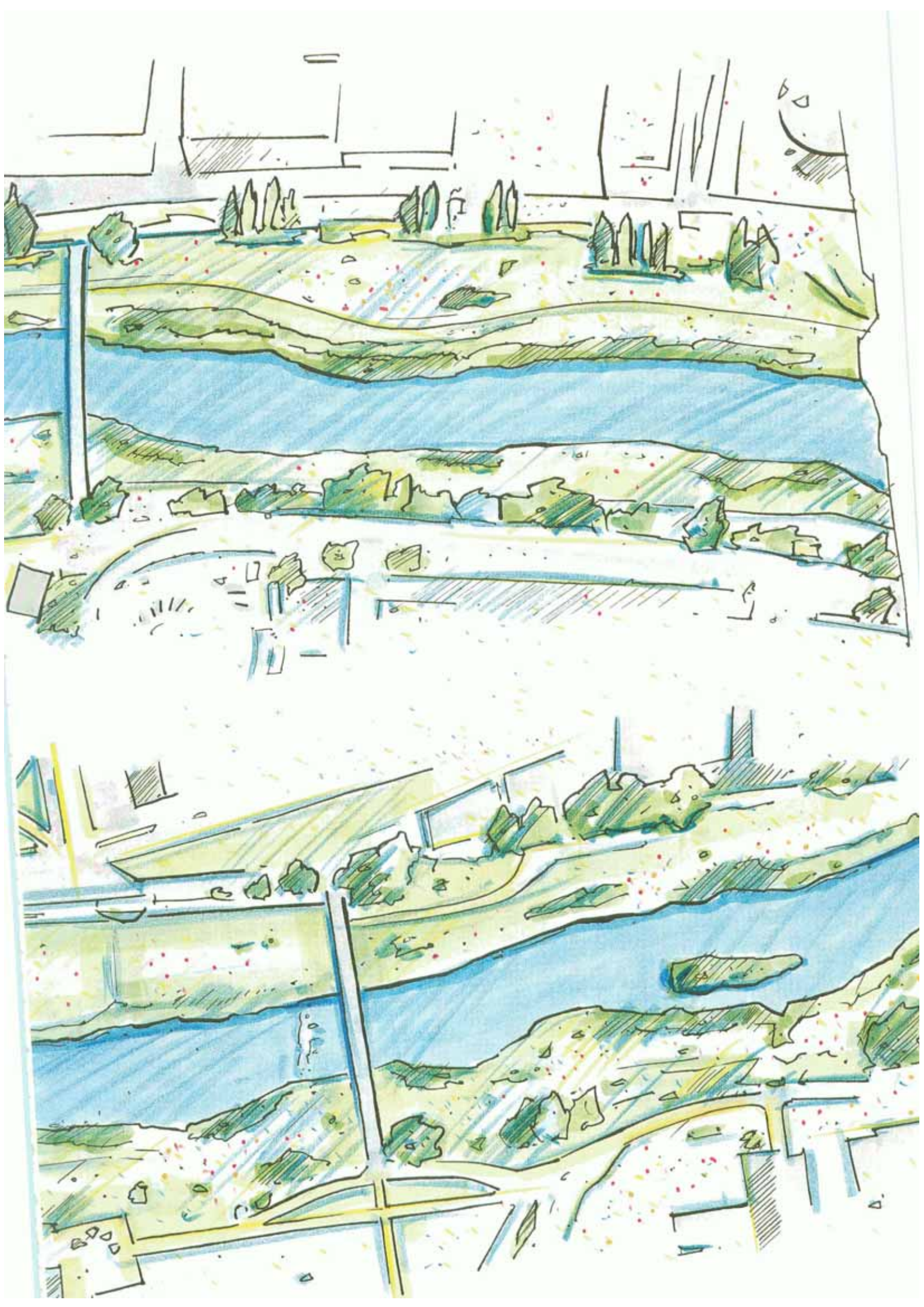
Sonstiges

--	--	--

Ein Schwerpunkt der Landesgartenschau 1992 war die Umgestaltung der Enz im Stadtbereich von Pforzheim. Als Ziel war vorgesehen, aus dem vorhandenen regelmäßigen Trapezprofil ein pendelndes Gewässer zu gestalten.

Zur Strukturvielfalt im Gewässer tragen auch die Inseln und die Buhnen bei. Zur vorübergehenden Stabilisierung der Mittelwasserlinie wurden naturnahe Bauweisen vorgesehen. Inzwischen sind 5 Jahre seit der Umgestaltung der Enz vergangen und es kann eine erste Bilanz gezogen werden.





1 Allgemeines

Im Jahr 1992 wurde in Pforzheim eine Landesgartenschau durchgeführt. Hierzu wurde das Gelände entlang der Enz neu gestaltet. Den Schwerpunkt stellte dabei die naturnahe Umgestaltung der Enz unmittelbar unterhalb der Einmündung von Nagold und Würm auf 1800 m Länge im Stadtgebiet von Pforzheim dar. Das Land Baden-Württemberg als Träger der Ausbau- und Unterhaltungslast an der Enz - vertreten durch das ehemalige Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Freudenstadt - hat die, in dieser Größenordnung im Land bisher einzige Umgestaltungsmaßnahme, in den Jahren 1990/91 in zehnmonatiger Bauzeit ausgeführt.

In Abstimmung mit dem Umweltministerium wurde die naturnahe Umgestaltung der Enz in Pforzheim von der Landesanstalt für Umweltschutz als Pilotprojekt des Landes Baden-Württemberg eingestuft. Hierzu wurde ein auf zehn Jahre angelegtes Untersuchungskonzept erarbeitet (siehe Tabelle 1). An diesem Projekt sollen ungeklärte Sachverhalte in den Bereichen Hydrologie, Geodäsie, Hydraulik, Morphologie, Ingenieurbiologischer Wasserbau, Ökologie und Gewässerentwicklung gemeinsam mit Universitäten und Fachbüros untersucht werden. Hierbei soll vor allem die Entwicklung der Umgestaltungsmaßnahmen erfaßt, bewertet und in praxisbezogene, allgemeingültige Grundlagen übertragen werden.



Abb. 2: Umgestaltung der Enz (Aufn.: LfU 1990).

Naturnahe Umgestaltungen von Fluß- und Bachläufen sind charakterisiert durch ein abwechslungsreiches Uferrelief, Flach- und Tiefwasserzonen, Aufweitungs- und Engstellen, Buhnen, Inseln, Gehölzstrukturen, etc. Zur Fixierung der nach dem natürlichen Vorbild neu angelegten Uferlinien und der zahlreichen, neu geschaffenen Strukturelemente im Mittelwasserbereich der Enz wurden verschiedene naturnahe Bauweisen, wie z.B. Steinwurf mit und ohne Weidenstecklingen, Rauhpäckwerk, Faschinenwalzen aus ausschlagfähigem bzw. totem Material, Röhrichtwalzen und Spreitlagen eingesetzt. Die Unterhaltungswege im Abflußbereich (Vorland) wurden teilweise als Schotterrasenweg ausgeführt und teilweise als unbefestigte Rasenwege belassen.

Die verwendeten Bauweisen und Pflanzen wurden im bereits erwähnten Handbuch Wasser 2, Heft 2 beschrieben.

Trotz intensiver Untersuchungen und Berechnungen konnten die erhofften und geplanten Erfolge von Umgestaltungsmaßnahmen in der Vergangenheit nur bedingt nachgewiesen werden. Die Gewässer weisen z.T. erst nach mehreren Jahren und mehreren Hochwasserereignissen naturnahe Verhältnisse auf. Die dabei dokumentierten Erkenntnisse wurden in einem ersten Zwischenbericht in der Schriftenreihe Handbuch Wasser 2, Heft 20 (1995) „Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern, Teil III: Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben - Erste Zwischenergebnisse der Erfolgskontrolle -“ veröffentlicht.

Ein Schwerpunkt bei den Untersuchungen an der Enz ist die Dokumentation und Bewertung der Entwicklung der naturnahen Bauweisen gegenüber wechselnden hydraulischen Belastungen. Da weitere Umgestaltungsmaßnahmen in Baden-Württemberg geplant oder bereits ausgeführt worden sind, wird der Auswertung der Messungen und Beobachtungen durch Nachrechnungen zu den naturnahen Bauweisen an der Enz eine hohe Priorität eingeräumt. Die sich hieraus ergebenden allgemeingültigen Empfehlungen für die praxisbezogene Anwendung werden in dieser Schrift zusammengefaßt.

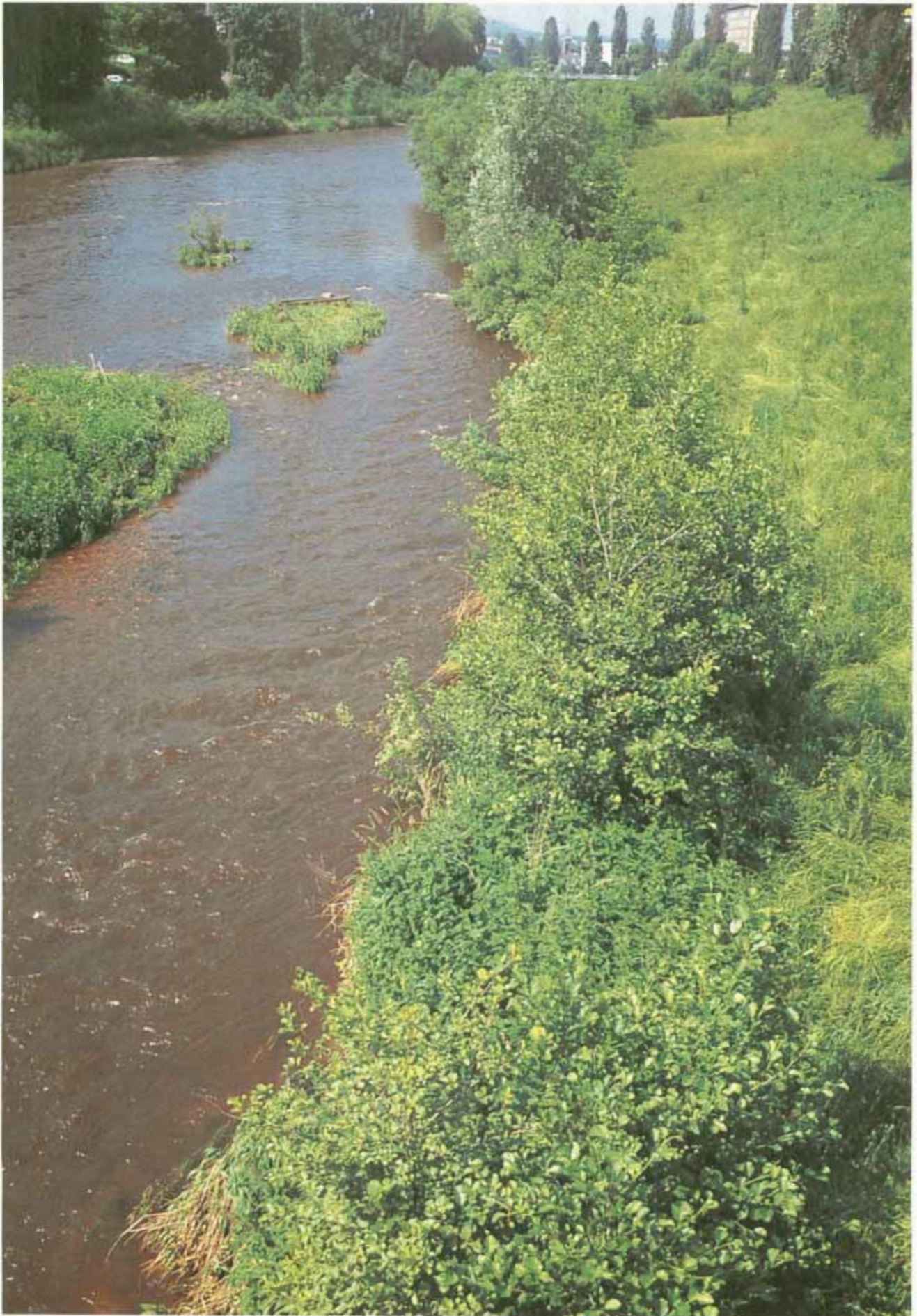


Abb. 3: Strauchweidensaum an der Enz in Pforzheim (Aufn.: LfU 1996).

2 Beschreibung der Umgestaltungsmaßnahmen

2.1 Gewässer

Die Enz wurde innerhalb der bestehenden Hochwasserdeiche naturnah umgestaltet. Entlang der Hochwasserschutzdämme befindet sich über die gesamte Untersuchungsstrecke hinweg - mit Ausnahme der Tribüne am linken Ufer bei Fluß-km 56+900 - auf beiden Flußufern ein älterer einreihiger Baumbestand. Die Vorländer wurden innerhalb des gesamten Untersuchungsbereichs entweder als Rasenflächen vorgesehen oder als Sukzessionsflächen ausgewiesen. In bestimmten Bereichen wurde eine lockere Gehölzpflanzung vorgenommen. Die Umgestaltungsstrecke mit den Untersuchungsabschnitten und den hydraulisch kritischen Punkten wird in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt.

Bereich oberhalb der Umgestaltungsstrecke (oberhalb Fluß-km 57+700)

Die noch im ursprünglichen Zustand belassene Gewässerstrecke erstreckt sich oberhalb der Altstädter Brücke. Unterhalb der Altstädter Brücke wurde in einer langgezogenen Linkskrümmung als Übergangsbereich eine Bewuchsentwicklung im Mittelwasserbereich bis kurz vor die erste Inselgruppe zugelassen. Der klassische Doppeltreppenzerschnitt besitzt keine Unregelmäßigkeiten und wird sowohl links- als auch rechtsufrig von einem Vegetationsstreifen (Steinwurf mit Böschungsbewuchs) gesichert. Die beiden Vorlandbereiche sind bis auf eine Furt mit Gras bewachsen.

Bereich 1 (57+700 bis 57+470) „Aufweitungsbereich mit vier Inseln“

Der Bereich 1 ist als Aufweitungsbereich mit vier Inseln gestaltet. Das Mittelwasserbett weist stark unregelmäßige Querschnitte mit zum Teil starken Einengungen auf. Die Querschnittsaufweitung erfolgt auf Kosten der Vorländer. Dieser Bereich wird abgeschlossen durch einen starken Ufervorsprung am rechten Ufer bei km 57+470.

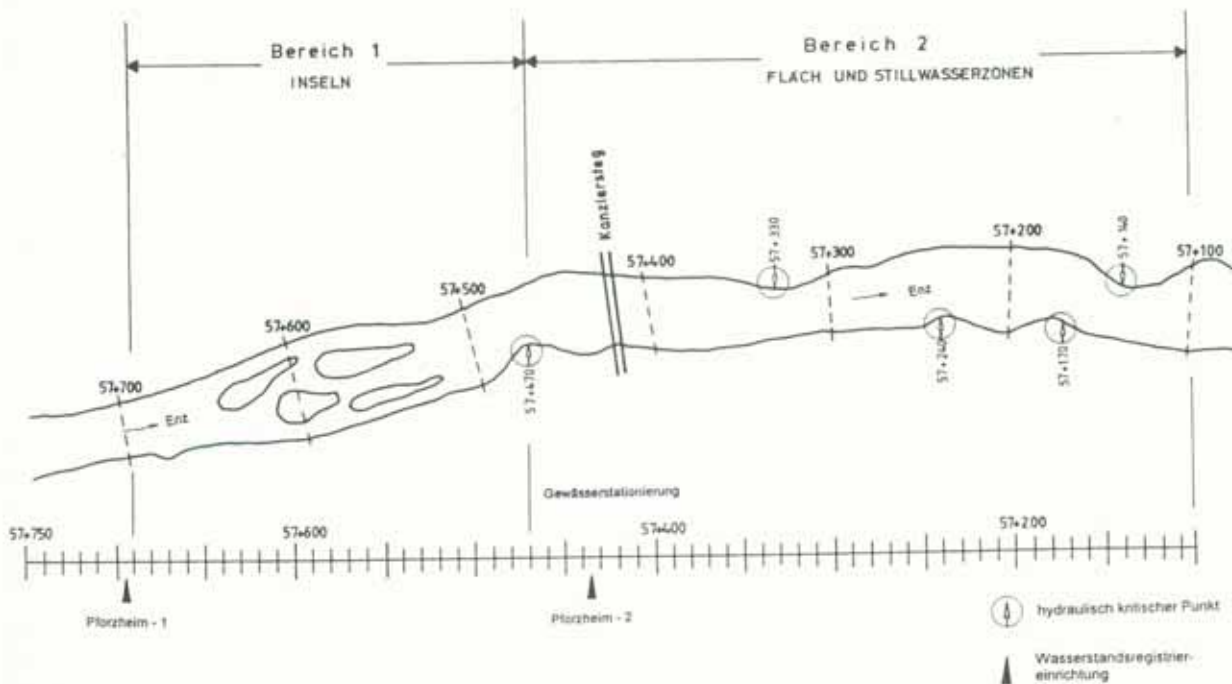


Abb. 4: Übersichtslageplan der Umgestaltungsstrecke mit den hydraulisch kritischen Punkten.

Bereich 2 (57+470 bis 57+070) „Flach- und Stillwasserzonen“

Flußabwärts folgt zwischen km 57+440 und 57+080 ein Abschnitt, der durch ausgeprägte Flach- und Stillwasserzonen, hervorgerufen durch Ufervorsprünge und Buchten unterschiedlicher Böschungsneigungen gekennzeichnet ist. Besonders hervorzuheben sind am linken Ufer zwei starke Ufervorsprünge bei km 57+330 und km 57+140 und ein kleiner Vorsprung bei km 57+070 sowie am rechten Ufer zwei kleinere Ufervorsprünge bei km 57+240 und km 57+170. Das Mittelwasserbett der Enz besitzt in diesem Abschnitt eine pendelnde Linienführung. Die Breite der Vorlandstreifen variiert entsprechend der unregelmäßigen Flußbettgestaltung.

Bereich 3 (57+070 bis 56+940) „Aufweitungs- bereich mit drei Inseln“

Zwischen km 57+070 und km 56+940 folgt ein Aufweitungs-bereich mit drei Inseln. Die Flußbettaufweitung erfolgt wiederum auf Kosten der Vorlandbereiche. Zur Sicherung des Mittelwasserbettes wurde entlang des Aufweitungs-bereiches Steinwurf eingesetzt. Auf den Vorländern wurden vereinzelt Bäume gepflanzt.

Bereich 4 (56+940 bis 56+740) „Geradlinig und regelmäßig“

Im Bereich 4 verläuft das Mittelwasserbett, mit Ausnahme zweier starker Ufervorsprünge am rechten Ufer bei km 56+800 und km 56+740, geradlinig und regelmäßig. Die erste, kleinere Bucht liegt oberstrom des Gärtnersteges, die zweite und größere Bucht liegt unterstrom des Gärtnersteges. In Höhe des Gärtnersteges befindet sich eine Blocksteinrampe und nur wenige Meter stromaufwärts die Kühlwasserentnahme des nahegelegenen Heizkraftwerkes.

Bereich 5 (56+740 bis 56+530) „Insel mit gerader Flußstrecke zum Landespegel“

Das flußabwärts gelegene Ende der Untersuchungsstrecke zwischen km 56+720 und km 56+530 umfaßt einen kleinen Aufweitungs-bereich mit einer Insel sowie einen 80 m langen, geraden Flußabschnitt im Bereich des Landespegels. Die Enz besitzt in dem geraden Flußabschnitt noch den klassischen Doppeltrapezquerschnitt.

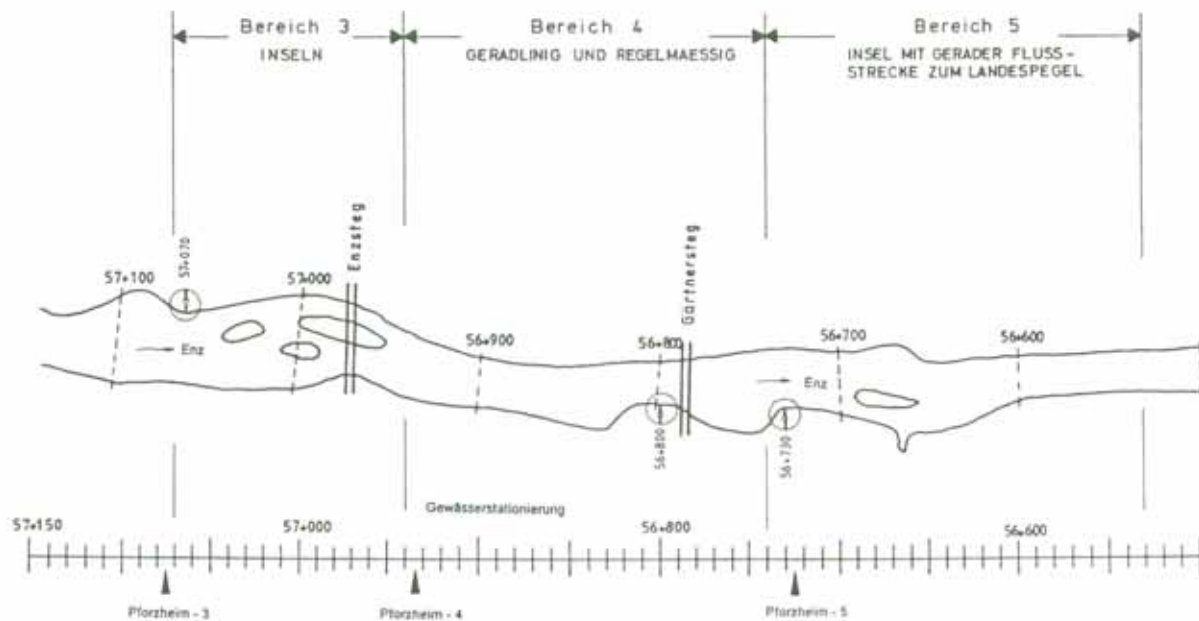


Abb. 5: Übersichtslageplan der Umgestaltungstrecke mit den hydraulisch kritischen Punkten.

2.2 Mittelwasserbett

Der Bereich des Mittelwassers wurde auf der gesamten Untersuchungsstrecke mit naturnahen Bauweisen gesichert. Es handelt sich hierbei hauptsächlich um Faschinenwalzen aus ausschlagfähigen Weidenruten bzw. aus nicht ausschlagfähigem Reisig (Totfaschinen) und um Röhricht- bzw. Hochstaudenwalzen. Zur Stabilisierung der Ufer wurde teilweise ergänzend eine Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat verschiedener Größen (klein/mittel/groß) eingebracht (Abb. 7). Nur in wenigen, stark gefährdeten Bereichen (Inseln, Bühnen) wurde zu Sicherung der Mittelwasserlinie ein Steinwurf aus gebrochenem Material in Verbindung mit Weidenstecklingen oder Rauhpäckwerk eingebracht. An einer Stelle wurden Spreitlagen verwendet.

2.3 Inseln

Auf der Umgestaltungsstrecke wurden drei Inselbereiche geschaffen. Der Bereich 1 (57+700 bis 57+470) wurde mit vier, Bereich 3 (57+070 bis 56+940) mit drei Inseln und Bereich 5 (56+740 bis 56+530) mit einer Insel gestaltet. Wie bereits dargestellt, sind Aufweitungsgebiete mit Inseln durch die Reduzierung der Vorlandflächen und durch veränderte Böschungsneigungen möglich geworden.

Bereich 1 (57+700 bis 57+470) „Aufweitungsgebiet mit vier Inseln“ (Abb. 6)

Die Prallufer der beiden vorderen Inseln wurden mit Rauhpäckwerk und Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat, das sich über die gesamte Insel erstreckt, gesichert. Im Anschluß an das Rauhpäckwerk wurden Weidenstecklinge in die Rollierung eingesetzt und im Anschluß daran Röhricht- bzw. Hochstaudenpflanzungen zur Sicherung der Inseloberfläche angelegt. Die beiden hinteren Inseln sind im vorderen Bereich ebenfalls mit Rauhpäckwerk und im hinteren Bereich mit einer Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat gesichert.

Bereich 3 (57+070 bis 56+940) „Aufweitungsgebiet mit drei Inseln“

Die Inseln wurden im vorderen Bereich mit Rauhpäckwerk mit Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat und einer Reihe von Weidenstecklingen gesichert. Lediglich auf den beiden hinteren Inseln wurden zusätzlich Röhricht- bzw. Hochstaudenpflanzungen zur Sicherung der Inseloberfläche angelegt.

Bereich 5 (56+740 bis 56+600) „Insel mit gerader Flußstrecke zum Landespegel“

Im Aufweitungsgebiet befindet sich eine Insel, die mit Rauhpäckwerk mit Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat sowie Weidenstecklingen und auf der Inseloberfläche mit Hochstaudenpflanzungen gesichert wurde.



Abb. 6: Inseln im Bereich 1 (Aufn.: Universität Karlsruhe IPF 1993).



Abb. 7: Mittelwasserlinie aus vorhandenem Sohlsubstrat (Aufn.: LfU 1991).

3 Untersuchungen

3.1 Voruntersuchungen

Der umgestaltete und untersuchte Flußabschnitt liegt im Bereich oberhalb des Landespegels Pforzheim-Kläranlage/Enz zwischen Flußkilometer 57+750 und 56+530. Vor Baubeginn wurde der Ausgangszustand sorgfältig dokumentiert und eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. Besonders zu erwähnen sind hierbei die hydraulischen Modelluntersuchungen der Universität Karlsruhe.

In den Modellversuchen, die zur Planung der Umgestaltungsmaßnahmen an der Enz am Theodor-Rehbock-Laboratorium der Universität Karlsruhe durchgeführt wurden, ergaben sich die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten und ihre Richtung bei verschiedenen Abflüssen für die jeweiligen Bau- und Entwicklungszustände der Umgestaltungsmaßnahmen. Hieraus konnten die kritischen Belastungsbereiche an einzelnen Ufer- und Inselstellen ermittelt werden.

Über das Stabilitätsverhalten der einzelnen Bauweisen lagen keine ausreichenden Kenntnisse vor, so daß nur Schätzwerte aus der Fachliteratur angesetzt werden konnten.



Abb. 8: Modellversuch - Entwicklungszustand (Aufn.: Universität Karlsruhe 1989).

In der Vorplanungsphase der Landesgartenschau wurde ein ökologisches Gutachten mit einer ökologischen Raumgliederung und -bewertung der Enzaue in Auftrag gegeben sowie eine vegetationskundliche Untersuchung an einem außerhalb des Planungsgebietes liegenden naturnahen Gewässerabschnitt veranlaßt.



Abb. 9: - modellierte Inseln (Aufn.: Universität Karlsruhe 1989).

Weitere Ausführungen zu den Voruntersuchungen und den künftigen Erfolgskontrollen sind im Handbuch Wasser 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim -“ veröffentlicht (LfU 1992).

3.2 Untersuchungskonzept zur Erfolgskontrolle

Inzwischen wurde ein Teil der Untersuchungen ausgewertet. Die in Tabelle 1 dargestellte Untersuchungsmatrix zur Erfolgskontrolle stellt die Untersuchungen nach beteiligter Fachdisziplin, Untersuchungsgegenstand, Art der Untersuchung, Zielsetzung und Untersuchungszeitraum zusammen.

Pilotvorhaben des Landes Baden-Württemberg
 „Naturnahe Umgestaltung ausgebauter Fließgewässer“
 Untersuchungskonzept zur Erfolgskontrolle für das Pilotprojekt Enz / Pforzheim
 Untersuchungsstrecke Enz in Pforzheim von km 56+600 bis km 57+750 Untersuchungsdauer 1991 - 1995

FACHLICHER RAHMEN

Beteiligte Fachdisziplinen	Untersuchungen		Untersuchungsgegenstand	Art der Untersuchung/Zielsetzung	Untersuchungszeitraum
	vorher	Entwicklungsphase			
1. Hydrologie			Wasserstand, Abflußdynamik	Statistische Untersuchungen Niederschlag/Abfluß	ganzjährig
2. Geodäsie	1992/93/94		Geometrie: Lage, Länge- und Querprofile	Photogrammetrische Geländeerfassung, Detailvermessung	Befliegung Nov. - April
3. Hydraulik	1988/89	1992/94	Erfassung der Wasserspiegellagen und des Strömungsverhaltens	Entwicklung und Anwendung geeigneter hydraulischer Berechnungsverfahren	ganzjährig
4. Morphologie	1988/89		Lauf- und Querprofilentwicklung, Feststoffhaushalt, Feinmorphologie/Substrat	Digitales Geländemodell für Massenbilanzierung. Untersuchung des Substrats hinsichtlich Fraktionen und Korngrößen (Bewertung der Tierlebensstätten)	ganzjährig 1 x pro Jahr
5. Ingenieurbiologischer Wasserbau			Bauweisen	Kartierung und Bewertung der diversen Bauweisen hinsichtlich Stabilität, Vitalität und hydraulischer Wirkung	Vegetationsperiode bzw. bei Hochwasserereignissen
6. Limnologie	1990	1992/93	Wirbellose Tiere des Wassers (Makrozoobenthon)	Quantitative Untersuchung repräsentativer Choriotopa. Ermittlung der Gewässergüte. Statistische Untersuchungen. Physikal.-chem. Messungen.	möglichst Frühjahr oder Spätherbst, Sommer
7. Spezielle Faunistik	1990	1992	Fischfauna	Qualitative und quantitative Erhebung des Bestands repräsentativer Gewässerabschnitte durch Elektrofischung. Statistische Auswertung.	je nach Tiergruppe
8. Pflanzensoziologie	1987	1994	Ausgewählter Tiergruppen	Qualitative Erhebung, je nach Tiergruppe zur speziellen ökologischen Indikation	je nach Tiergruppe
9. Biotop- und Artenschutz	1987/88	1992	Vegetation	Standortanalyse, Sukzessionsforschung, Erhebung des Gesellschaftsinventars sowie zusätzliche Transekt- und Detailkartierungen im amphibischen Bereich	Wasservegetation im Hochsommer, Ufervegetation im Juni - August, Auevegetation Früh- bis Spätsommer
10. Gewässerentwicklung			Bemerkenswerte Biotopstrukturen der gewässernahen Umgebung	Untersuchungen abhängig vom Biotoptyp. Aussagen zur Biotopvernetzung	je nach Biotoptyp Früh- Spätsommer
11. Kosten		1993	Gehölze, krautige Vegetation, Sohle- und Uferzustand, Unterhaltungsplan	Vergleich: Entwicklungszustand - Entwicklungsziel	nach der Bauphase
			Kosten für Planung, Grunderwerb, Ausführung und Unterhaltung	Kostenfeststellung und Auswertung	fortlaufend

Tab. 1: Untersuchungsmatrix zur Erfolgskontrolle - Fachlicher Rahmen (Stand 1995).

3.3 Wasserstandsbeobachtungen

Zur detaillierteren Erfassung der Wasserspiegellagen vom Niederwasser bis zum Hochwasser wurden ergänzend zum Landespegel Pforzheim-Kläranlage/Enz sechs zusätzliche Wasserstandsregistriereinrichtungen im gesamten Umgestaltungsbereich installiert und deren Aufzeichnungen ausgewertet.

Die Lage der zusätzlichen Wasserstandsregistriereinrichtungen kann aus Tabelle 2 und Abb. 4 und 5 ersehen werden. Die Standorte wurden so gewählt, daß wesentliche Wechsel in der Linienführung und Sohlstruktur und somit auch anzunehmende größere Wasserspiegellagenveränderungen aufgezeichnet werden.



Abb. 10: Querprofil zur Wasserstandsregistrierung (Aufn.: LfU 1996).

3.4 Vermessung

Um die Veränderungen in der umgestalteten Flußlandschaft, insbesondere im Flußbett zu dokumentieren, wurden sowohl konventionell durchzuführende Vermessungen (Lageplan, Längsprofil und Querprofile) als auch eine pilothafte Vermessung über Befliegungen an die Universität Karlsruhe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung vergeben:

- ▶ **Oktober 1992:** Befliegung und Luftbilddauswertung, terrestrische Ergänzungsmessungen,
- ▶ **Oktober 1993:** Befliegung und Luftbilddauswertung zur Dokumentation der Vegetationsstrukturen,
- ▶ **22. Dezember 1993:** Befliegung und Luftbilddauswertung zur Dokumentation des Hochwassers,
- ▶ **Juli 1994:** Befliegung und Luftbilddauswertung, terrestrische Ergänzungsmessungen.

Die Ergebnisse dieser Vermessungsmethoden und ihre allgemeine praktische Anwendbarkeit unter Berücksichtigung der erzielbaren Genauigkeiten werden in einer gesonderten Schrift dieser Handbuch-Reihe veröffentlicht.

Die Vermessungsergebnisse wurden für die Berechnungen und Auswertungen zugrunde gelegt.

Name der Wasserstandsregistriereinrichtung	bei Fluß-km	Registrierung
Pforzheim - 0 (Altstädter Brücke) / Enz	57 + 970	kontinuierliche Registrierung plus Datensammler
Pforzheim - 1 (Bushaltestelle) / Enz	57 + 696	Höchstwasserstandsanzeiger
Pforzheim - 2 (Kanzlersteg) / Enz	57 + 434	kontinuierliche Registrierung
Pforzheim - 3 (OW Römersteg) / Enz	57 + 077	Höchstwasserstandsanzeiger
Pforzheim - 4 (Römersteg) / Enz	56 + 935	kontinuierliche Registrierung
Pforzheim - 5 (Gärtnersteg) / Enz	56 + 725	Höchstwasserstandsanzeiger

Tab. 2: Wasserstandsregistriereinrichtungen im Untersuchungsgebiet.

3.5 Hydraulik

Bei den bereits erwähnten, aufwendigen Modelluntersuchungen wurde immer wieder deutlich, daß die Zusammenhänge zwischen Abfluß und Wasserstand in naturnahen Gewässern unzureichend bekannt sind. Die folgenden Untersuchungen wurden deshalb in die Bereiche Hydraulische Bemessungsgrundlagen Teil „Abfluß-Wasserstands-Beziehung“ und Teil „Strömungs- und Transportvorgänge“ geteilt:

- ▶ **Juli/August 1992:** Hydraulische Bemessungsgrundlagen „Abfluß-Wasserstands-Beziehung“ in naturnahen Gewässern Universität Karlsruhe,
- ▶ **Juli 1992:** Hydraulische Bemessungsgrundlagen „Strömungs- und Transportvorgänge“ in naturnahen Gewässern, Universität Stuttgart,
- ▶ **November 1994:** Bewertung der naturnahen Bauweisen an der Enz nach dem Hochwasser vom Dezember 1993, Universität Karlsruhe.

Mit Hilfe der bereits beschriebenen zusätzlichen Wasserstandsregistriereinrichtungen und den am Landespegel Pforzheim-Kläranlage/Enz bekannten hydrologischen Daten sollen daraus allgemeingültige praxisnahe Berechnungsgrundlagen und Widerstandsbeiwerte für die Wahl der Ufersicherungsmaßnahmen und naturnahen Bauweisen erarbeitet werden. Diese sollen mit Untersuchungen an weiteren Pilotprojekten verglichen und zusammengeführt werden.

Auf die allgemeinen Erkenntnisse und Ergebnisse aus den Untersuchungen zur „Abfluß-Wasserstands-Beziehung“ soll hier nicht weiter eingegangen werden, da diese in dieser Handbuch-Reihe separat veröffentlicht werden.

3.6 Sonstige Untersuchungen

Zur Dokumentation der Entwicklung ökologischer Verhältnisse wurden aufbauend auf den Voruntersuchungen folgende Untersuchungen vergeben:

- ▶ **November 1992 und Mai/Juni 1993:** Qualitative und quantitative Untersuchung des Makrozoobenthon (PRO AQUA),
- ▶ **1992:** Untersuchung der Fischfauna (PRO AQUA),
- ▶ **Juni und August 1994:** Untersuchung der Bodenkäfer (WOLF-SCHWENNINGER 1994),
- ▶ **Juni und September 1992:** Vegetationskartierung mit Dauerbeobachtungsflächen (UNIVERSITÄT HOHENHEIM 1993).

Die Ergebnisse der Untersuchungen hierzu sind im Handbuch Wasser 2, Heft 20 „Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern, Teil III: Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben - Erste Zwischenergebnisse der Erfolgskontrolle“ veröffentlicht (LfU 1995).

Darüber hinaus hat das damalige Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Freudenstadt 1993 ein Konzept zur Gewässerunterhaltung erarbeitet. Die Kartierung von Vegetationsstrukturen der Universität Hohenheim und das Konzept zur Gewässerunterhaltung des WBA Freudenstadt sind Grundlage der bei den Untersuchungen durchgeführten hydraulischen Berechnungen und Beurteilung der Entwicklung der naturnahen Bauweisen.



Abb. 11: Entwicklung zum naturnahen Gewässer (Aufn.: LfU 1996).

4 Hochwasser Dezember 1993

4.1 Hydrologie

Im Dezember 1993 kam es nach ausgiebigen Regenfällen, die auf einen je nach Höhenlage teilweise gefrorenen, teilweise wassergesättigten Boden trafen, zu erhöhten Abflüssen, die auch an der Enz in Pforzheim zu einem außergewöhnlichen Hochwasser („Jahrhunderthochwasser“) führten. Ausgehend von den Aufzeichnungen des Landespegels Pforzheim-Kläranlage/Enz wurde der Hochwasserscheitel in der Umgestaltungsstrecke am 21. Dezember 1993 um 7.20 Uhr morgens erreicht und ergab unterlegt durch eine Abflußmessung (Abb. 12) nahe des Hochwasserscheitels, einen Durchfluß von 554 m³/s (W = 336 cm). Die durchgeführte Durchflußmessung ergab Q = 532 m³/s (W = 336 cm). Die Geschwindigkeitsverteilung bei dieser Messung wird im folgenden Isotachenplan dargestellt.

Pegel Pforzheim-Kläranlage / Enz Abflußjahre 1932 bis 1994	
Hauptwerte	in m ³ /s
NQ	2,32 vom 10.01.1934
MNQ	5,03
ZQ	12
MQ	17
MHQ	158
HQ	554 vom 21.12.1993
HQ 50	430
HQ 100	525

Tab. 3: Statistische Werte (Stand 20.01.1996).

Der in den hydraulischen Berechnungen und den Modelluntersuchungen für die Umgestaltung der Enz zugrunde gelegte Bemessungsabfluß betrug 540 m³/s bei einem Freibord von 1,00 m bis zur Böschungsoberkante. Dieser Bemessungsabfluß wurde beim Hochwasser im Dezember 1993 geringfügig überschritten.

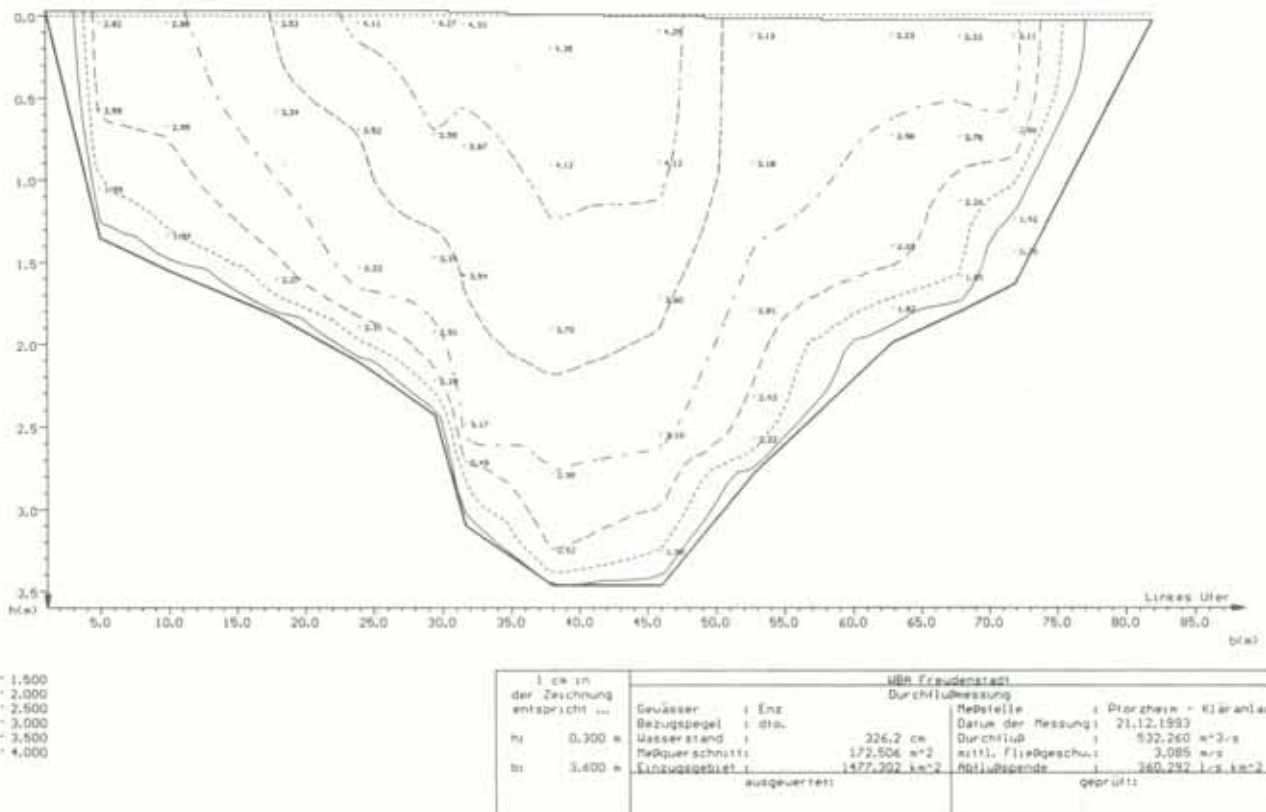


Abb. 12: Isotachenplan vom 21.12.1993 am Pegel Pforzheim-Kläranlage/Enz (Messung).

4.2 Hydraulik

Um die an der Enz durchgeführten Ufersicherungsmaßnahmen letztlich beurteilen zu können, reicht es nicht aus, den Schadenszustand der verschiedenen Uferbereiche unter Berücksichtigung der Uferlinie und des Entwicklungszustandes der Sicherungsmaßnahmen zu betrachten. Deshalb wurden die während des Hochwasserereignisses lokal wirksamen Schubspannungsverteilungen und die lokalen Geschwindigkeitsvektoren berechnet. Von zentraler Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die momentane, lokale Belastung der Ufersicherungsmaßnahmen während des Hochwassers. Die Universität Karlsruhe, Institut für Wasserbau, hat diese Berechnungen zur Wasserspiegellage mit den zugehörigen lokalen Geschwindigkeitsvektoren und den lokal wirksamen Schubspannungsverteilungen im Gewässer durchgeführt.

4.2.1 Schubspannungsverteilungen

Der Entwicklungszustand der naturnahen Bauweisen spielt eine große Rolle für die Größe der von den einzelnen Bauweisen maximal aufnehmbaren Schubspannungen. Diese Schubspannung τ setzt sich zusammen aus den beiden zeitabhängigen Komponenten τ_B und τ_V . τ_B bezeichnet die von der Bauweise aufnehmbare Schubspannung direkt nach der Fertigstellung der Ufersicherung. Diese nimmt im Laufe der Zeit aufgrund der Verrottung ab. τ_V steht für jene Schubspannung, die von der sich entwickelnden Vegetation aufgenommen werden kann. Da die Vegetationsdichte im Laufe der Jahre zunimmt, nimmt τ_V mit der Zeit zu.



Abb. 13: Vegetation entlang der Mittelwasserlinie (Aufn.: LfU 1996).

Die im Bereich der Sicherungsmaßnahmen während des Hochwassers lokal wirksamen Schubspannungen wurden mit Hilfe eines vom Institut für Wasserbau und Kulturtechnik entwickelten Programmes berechnet, das auf einem eindimensionalen Modell beruht. Das verwendete Programm basiert auf der Schubspannungsformel

$$\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot I$$

(mit ρ = Dichte des Wassers, g = Erdbeschleunigung, h = Wassertiefe und I = Sohlneigung). Der jeweilige Querschnitt wird für die Berechnung in viele Einzelmellen unterteilt, wodurch man die Schubspannungsverteilung über den gesamten Querschnitt darstellen kann (Abb. 14).

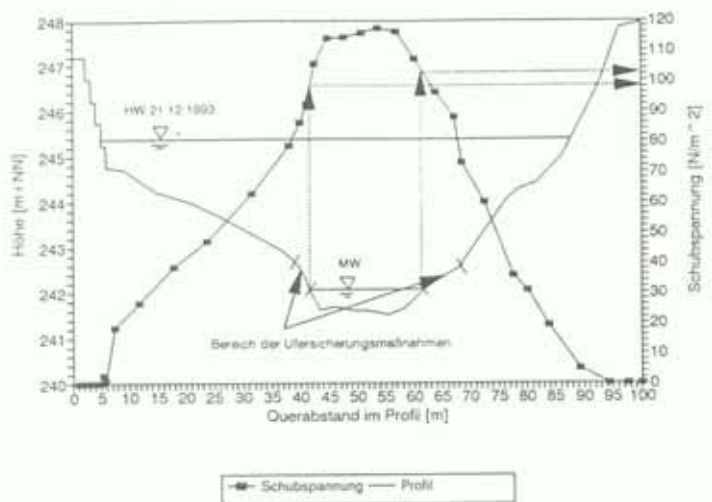


Abb. 14: Ermittlung der im Bereich der Ufersicherungsmaßnahmen maximal wirksamen Schubspannungen.

Die wichtigsten Eingangsdaten sind wie bei einem eindimensionalen Wasserspiegellagenprogramm die Querprofile. Es standen 28 Querprofile der Enz zur Verfügung. Der Abstand der Querprofile richtete sich nach der flußmorphologischen Vielfalt des jeweiligen Gewässerabschnittes. Als Grundlage für die Eichung und Berechnungen der zu untersuchenden Flußabschnitte dienten die Scheitelwerte der Wasserstände am Landespegel Pforzheim-Kläranlage, und den sechs zusätzlichen Wasserstandsmeßeinrichtungen sowie die Geschwemmsellinie, die während des Hochwassers (21. Dezember 1993) festgehalten wurde. Berechnet wurden die Schubspannungsverteilungen in den 28 vermessenen Querschnitten.

Die Verteilungen wurden anschließend weiterverarbeitet, um hauptsächlich die im Bereich der Ufersicherungsmaßnahmen lokal wirksamen Schubspannungen zu erhalten. Die Ufersicherungen wurden auf Grundlage der Ergebnisse aus den Modelluntersuchungen zur Umgestaltung der Enz 1990 beidseitig des Flußbettes in der Wasserwechselzone für einen Mittelwasserabfluß von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ eingebaut. Ausgehend von der Wasserspiegellage beim Hochwasser im Dezember 1993 wurde in jeder Schubspannungsverteilung der Bereich der Ufersicherungsmaßnahmen an beiden Ufern in den Querprofilen gekennzeichnet. Die über den gesamten Gewässerquerschnitt ermittelten maximal wirksamen Schubspannungen wurden im Bereich der naturnahen Bauweisen besonders hervorgehoben. Abb. 14 zeigt dies an einem Beispiel.

Die lokal wirksamen Schubspannungen im Bereich der naturnahen Bauweisen variieren zwischen 30 N/m^2 und 150 N/m^2 . Der Durchschnittsbereich erstreckte sich von 60 N/m^2 bis 80 N/m^2 . Am flußaufwärts gelegenen noch weitgehend begradigten Gewässerabschnitt bei km 57+697 beträgt die maximale Schubspannung 75 N/m^2 am linken und 80 N/m^2 am rechten Ufer. Die Verteilung ist weitgehend symmetrisch, die Werte sind durchschnittlich.

Exemplarisch sollen an drei unterschiedlich strukturierten Stellen die Schubspannungsverteilungen über den Querschnitt vorgestellt werden, um einen Eindruck von den insgesamt wirkenden Kräften zu vermitteln.

Bereich 1 (57+700 bis 57+470) „Aufweitungsbereich mit vier Inseln“ (Abb. 4)

Am Beginn des Aufweitungsbereiches bei km 57+655 beträgt die maximale Schubspannung an beiden Ufern 70 N/m^2 . Die Aufweitung hat sich also in einer leichten Abnahme der Schubspannungen bemerkbar gemacht. Im Anfangsbereich der ersten Insel bei km 57+640 macht sich die Einengung des Fließquerschnittes durch die erste Insel deutlich bemerkbar. Die maximalen Schubspannungen steigen auf 105 N/m^2 am linken und 110 N/m^2 am rechten Ufer. Im Verlauf der weiteren Aufweitung sinken sie jedoch wieder auf ihren Anfangswert und bleiben ungefähr auf demselben Niveau bis zum Ende des Aufweitungsbereichs. Bei km 57+606 beträgt die maximale

Schubspannung am linken und rechten Ufer 85 N/m^2 , danach bleibt sie bis km 57+505 am linken Ufer bei 75 N/m^2 , am rechten Ufer variiert sie zwischen 80 und 85 N/m^2 .

Auf der Höhe der ersten Insel wurde auch der Fahrweg am linken Ufer stark beschädigt. Am Ende des Aufweitungsbereiches bei 57+470 wurden am rechten Ufer ähnliche Schäden am Fahrweg beobachtet. An diesen Stellen wird daher die Schubspannungsverteilung über den gesamten Querschnitt betrachtet.

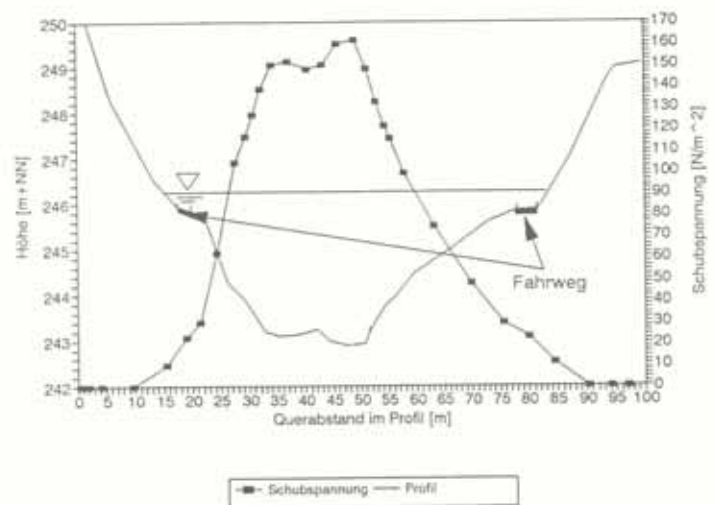


Abb. 15: Schubspannungsverteilung im Profil 57+470.

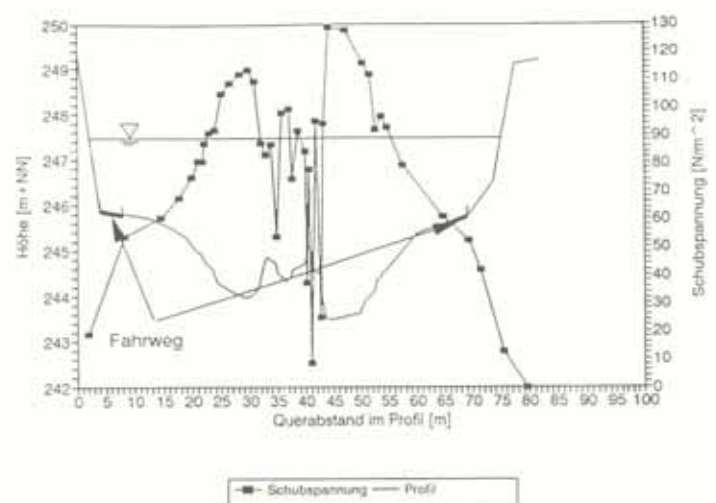


Abb. 16: Schubspannungsverteilung im Profil 57+640.

Insel	Schubspannungen					
	Inselanfang		Inseloberfläche		Inselende	
	link. Ufer	recht. Ufer	Anfang	Ende	link. Ufer	recht. Ufer
	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²
1	65	65	55	45	50	50
2	beim Zeitpunkt des Hochwassers bereits erodiert					
3	55	55	45	45	50	50

Tab. 4: Schubspannungen der ersten Inselgruppe.

Der Wasserspiegel des Hochwasserereignisses vom 21.12.1993 ist zur Verdeutlichung eingezeichnet. Der Fahrweg wurde in beiden Abbildungen durch einen Balken angedeutet. Es fällt auf, daß bei km 57+640 immerhin durchschnittliche Schubspannungen von ca. 60 N/m² auf den Fahrweg am linken Ufer einwirkten, während am rechten Ufer bei km 57+470 die Schubspannungen nur noch maximal 30 N/m² betragen und damit weit unter dem Durchschnitt liegen.

Ein ähnliches Bild wie an den Ufern ergibt sich auch für die Schubspannungen, die an den Inseln angreifen. Die größten maximalen Schubspannungen für die erste Inselgruppe sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Insgesamt wird deutlich, daß die Belastungen auf die Ufer der ersten beiden Inseln und hier insbesondere auf die erste Insel außergewöhnlich groß waren, während die Belastungen auf die beiden hinteren Inseln ein durchschnittliches Maß erreichten. Da die Inseloberflächen weniger stark befestigt waren, ist der an dieser Stelle ermittelten Belastung zwischen 75 N/m² und 70 N/m² noch eine große Bedeutung beizumessen. Vor allem zeigt die Schubspannung zu Beginn auf der Inseloberfläche der ersten Insel mit 90 N/m², daß die aufgetretene Belastung größere Erosionen hervorruft. Auch für die zweite Insel gilt dies noch in leicht abgeschwächter Form. Die auf die Inseloberfläche wirkenden Schubspannungen waren grundsätzlich im vorderen Teil größer als im hinteren Teil.

Der Aufweitungsbereich mit der ersten Inselgruppe endet mit einem starken Ufervorsprung am rechten Ufer bei km 57+470. Die maximalen Schubspannungen betragen hier an beiden Ufern 150 N/m². Dies ist der Maximalwert innerhalb der gesamten Untersuchungsstrecke und entspricht immerhin dem doppelten des durchschnittlichen Wertes. Im Anschluß an den Ufervorsprung sinkt die maximale Schubspannung bei km 57+434 im Bereich des Kanzlerstegs auf sehr kleine Werte von 35 N/m² an beiden Ufern.

Bereich 2 (57+470 bis 57+070) „Flach- und Stillwasserzonen“ (Abb. 4)

Flußabwärts in diesem Bereich sind mehrere Flach- und Stillwasserzonen angelegt worden. Vorspringende Bühnen grenzen diese Zonen ab und stellen eine erhöhte Angriffsfläche für die Strömung dar. Die Schubspannungen der Ufervorsprünge werden in Tabelle 5 zusammengestellt.

Stationierung	Ufervorsprung	Schubspannung		
		Gewässerseite	linkes Ufer	rechtes Ufer
			N / m ²	N / m ²
57 + 330	links		85	75
57 + 240	rechts		50	50
57 + 170				
57 + 140	links		105	90
57 + 070	links		40	40

Tab. 5: Schubspannungen an den Ufervorsprüngen.

Die Übersicht macht deutlich, daß an den Ufervorsprüngen vor allem am linken Ufer bei km 57+330 und bei km 57+140 sehr hohe Schubspannungen angreifen. Das übrige Ufer weist durchschnittliche bis unterdurchschnittliche Schubspannungen auf.

Insel	Schubspannungen					
	Inselanfang		Inseloberfläche		Inselende	
	l. Ufer	r. Ufer	Anfang	Ende	l. Ufer	r. Ufer
	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²
1	110	130	90	75	85	85
2	95	90	75	70	85	80
3	85	85	75	70	80	80
4	80	80	75	70	80	80

Tab. 6: Schubspannungen der zweiten Inselgruppe.

**Bereich 3 (57+070 bis 56+940) „Aufweitungs-
bereich mit drei Inseln“ (Abb. 5)**

Die maximalen Schubspannungen, die im Verlauf der ursprünglich aus drei Inseln bestehenden zweiten Inselgruppe auftraten, stellen sich wie in Tabelle 6 dar.

Wiederum ist der Anfangsbereich der ersten Insel die am stärksten beanspruchte Stelle. Die Schubspannungen nehmen sowohl entlang der Inseln selbst, als auch von einer zur nächsten Insel ab.

**Bereich 4 (56+940 bis 56+740) „Geradlinig und
regelmäßig“ (Abb. 5)**

Im Anschluß an den Aufweitungsbereich steigt die Schubspannung an den Uferlinien wieder kontinuierlich an. So beträgt sie bei km 56+931 am rechten Ufer bereits 80 N/m² und am linken Ufer 75 N/m² und hat damit wieder ein durchschnittliches Maß erreicht. Bei km 56+904 steigt sie sogar auf 100 N/m² am linken und 95 N/m² am rechten Ufer an. Flußabwärts bei km 56+832 sinken die maximalen Schubspannungen wieder auf 80 N/m² am linken und 70 N/m² am rechten Ufer. Flußabwärts bei km 56+758 betragen die maximalen Schubspannungen nur noch 65 N/m² am linken und 70 N/m² am rechten Ufer.



Abb. 17: Luftbild Bereich 4 (Aufn.: Universität Karlsruhe IPF 1993).

**Bereich 5 (56+740 bis 56+530) „Insel mit gerader
Flußstrecke zum Landespiegel“ (Abb. 5)**

Am Ufervorsprung des rechten Ufers bei km 56+726 ergeben sich Schubspannungen von 70 N/m² an beiden Ufern. Die wirksamen Schubspannungen liegen damit im durchschnittlichen Bereich.

Im Bereich der letzten Insel bei km 56+681 betragen die Schubspannungen 75 N/m² am linken und 70 N/m² am rechten Ufer. Im geraden Flußabschnitt zum Landespiegel fallen die wirksamen Schubspannungen auf Werte zwischen 30 N/m² und 35 N/m² und damit auf ein sehr niedriges Niveau und bleiben auf diesem bis zum Ende der Untersuchungsstrecke. Abb. 18 zeigt die Schubspannungsverteilung bei km 56+604.

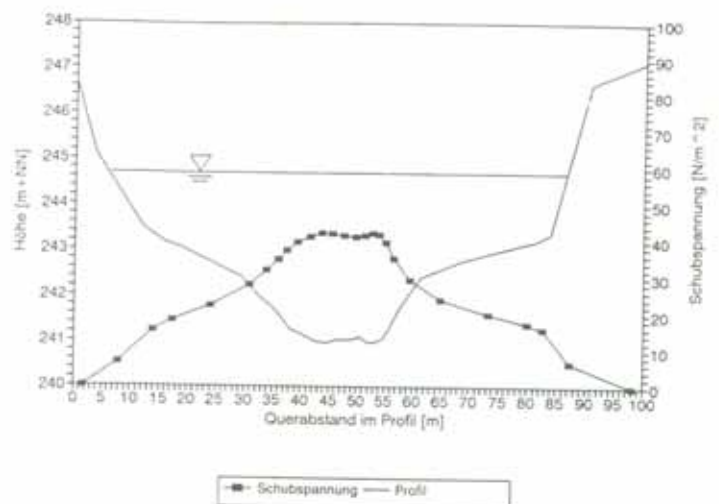


Abb. 18: Schubspannungsverteilung im Profil 56 + 604.

Auf die fast vollständig abgetragene Insel wirken im Anfangsbereich maximale Schubspannungen von 70 N/m^2 an beiden Ufern und 60 N/m^2 an der Oberfläche, im Endbereich sinken die Schubspannungen auf 35 N/m^2 an den Ufern und 30 N/m^2 auf der Oberfläche. Die Belastungen sind damit wieder etwas höher als bei den Inseln der zweiten Inselgruppe, erreichen jedoch noch nicht das Niveau der ersten Inselgruppe. Wiederum sind die Schubspannungen im Anfangsbereich um einiges größer als im Endbereich der Insel.

4.2.2 Lokale Geschwindigkeitsvektoren

Die lokalen Geschwindigkeitsvektoren wurden mit Hilfe eines zweidimensionalen Rechenmodells am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik berechnet. Der gesamte Untersuchungsabschnitt wurde hierbei mit einem Netz von Dreiecken überzogen, an deren Knotenpunkten die Flußbettkoordinaten eingegeben wurden. Die resultierenden Geschwindigkeitsvektoren entsprechen hierbei der innerhalb eines solchen Dreieckes über die Wassertiefe gemittelten Geschwindigkeit.

Aus der Gesamtheit der Ergebnisse wurden typische Geschwindigkeitsvektoren für die Umgebung der Ufersicherungsmaßnahmen sowie der Inseln ermittelt, die sich in den meisten Fällen auf das Mittelwasserflußbett und seine unmittelbare Umgebung beschränken. Innerhalb dieses Bereiches variieren die mittleren Geschwindigkeiten zwischen $2,5 \text{ m/s}$ und $4,5 \text{ m/s}$. Die Richtung der Geschwindigkeitsvektoren verläuft zum überwiegenden Teil parallel zur Flußachse oder innerhalb eines maximalen Öffnungswinkels von $\pm 15^\circ$ zur Flußachse. An den Ufervorsprüngen trifft die Strömung teilweise unter Winkeln von bis zu 40° auf die Uferlinie.

Bereich 1 (57+700 bis 57+470): „Aufweitungs- bereich mit vier Inseln“

Am flußaufwärts gelegenen Ende der Untersuchungsstrecke bis km 57+700 beträgt die Geschwindigkeit im gesamten Flußbett $3,5 \text{ m/s}$ und zeigt in Richtung der Flußachse. Unmittelbar vor der ersten Insel sinkt die Geschwindigkeit auf $2,9$ bis $3,0 \text{ m/s}$ und zeigt weiterhin in Richtung der Flußachse. Die senkrecht auf die Ufer der Inseln auftreffenden mittleren Geschwindigkeiten betragen bei den ersten beiden Inseln der Inselgruppe $2,9 \text{ m/s}$

und bei der dritten und vierten Insel $2,7 \text{ m/s}$. Es zeigen sich auch bei den Geschwindigkeiten wiederum Unterschiede in den angreifenden Kräften zwischen den ersten beiden und den letzten beiden Inseln.

Im Endbereich der Inselgruppe erhöht sich die weitgehend parallel zu den Uferlinien ausgerichtete Geschwindigkeit in den Flußarmen rechts der vierten bzw. links der dritten Insel auf außergewöhnlich große Werte von $3,6 \text{ m/s}$ bzw. $3,5 \text{ m/s}$. Auch an der dritten Insel selbst greift im Endbereich bereits eine Geschwindigkeit von $3,1 \text{ m/s}$ an.



Abb. 19: Unterschiedliche Strömungen im Inselbereich (Aufn.: IJU 1996).

Im Anschluß an den Aufweitungsbereich mit der ersten Inselgruppe ist als nächster Engpaß der starke Ufervorsprung am rechten Ufer bei km 57+470 zu betrachten. Die in Richtung der Flußachse ausgerichteten Geschwindigkeiten mit Beträgen zwischen $2,7 \text{ m/s}$ und $3,2 \text{ m/s}$ sind für gesicherte Stellen nicht außergewöhnlich hoch. Hingegen ist der starke Winkel von 20° bis 40° zwischen der Strömungsrichtung und der Uferlinie außergewöhnlich groß. Durch die starke Einengung des Fließquerschnittes erhöhen sich die Geschwindigkeiten der Flußachse in der Nähe des Ufervorsprungs auf außergewöhnlich hohe Werte von $3,5 \text{ m/s}$ bis $4,5 \text{ m/s}$. In Abbildung 20 wird das gesamte Geschwindigkeitsfeld aus dem soeben beschriebenen Gewässerabschnitt dargestellt.

—: $0.0 < v \leq 1.0$; —: $1.0 < v \leq 2.0$;
 —: $2.0 < v \leq 3.0$; —: $v > 3.0$

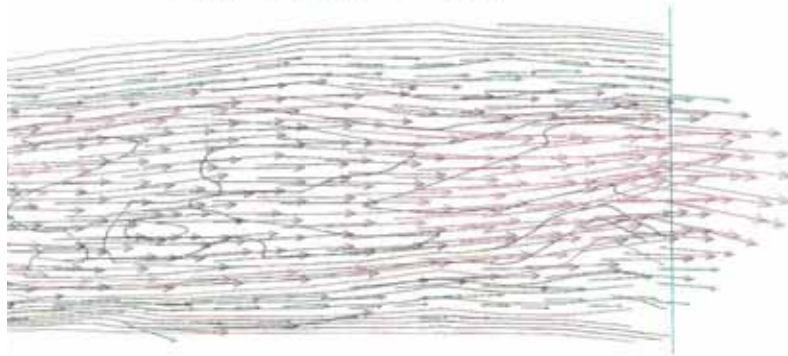


Abb. 20: Fließgeschwindigkeiten der Enz zwischen km 57+700 und km 57+440 im Maßstab 1:2000.

Die verschiedenen Farben bezeichnen verschiedene Beträge der Geschwindigkeiten. Auffallend ist zunächst einmal das bereits erwähnte Absinken der Geschwindigkeiten im Flußbett zu Beginn der Inselgruppe, die durch die Höhenlinien angedeutet wurde. Deutlich sichtbar werden auch die Flußrinnen rechts und links der Inselgruppe mit der erhöhten Fließgeschwindigkeit. Auf den Vorländern sinkt die Fließgeschwindigkeit auf Werte unter 2 m/s und in manchen ufernahen Bereichen sogar auf Werte unter 1 m/s. Im Bereich der Fahrwege auf beiden Seiten liegen die Geschwindigkeiten ungefähr bei 1,5 m/s oder sogar etwas darunter.

Bereich 2 (57+470 bis 57+070) „Flach- und Stillwasserzonen“

Flußabwärts bis km 57+350 beträgt die grundsätzlich parallel zum Ufer orientierte Fließgeschwindigkeit in der Flußachse 4,0 m/s, am Ufer zwischen 3 m/s und 3,5 m/s. Im Bereich des schwachen Ufervorsprungs am linken Ufer bei km 57+330 sinken die Geschwindigkeiten im Uferbereich an beiden Ufern auf 2,7 m/s bis 3,2 m/s und sind damit nicht sehr groß. Auch der maximale Winkel, unter dem die Geschwindigkeiten auf den Vorsprung treffen, ist mit 15° eher als klein einzustufen.

In demselben Rahmen bewegen sich sowohl Beträge als auch Richtungen der Geschwindigkeiten am rechten Ufer im Bereich der beiden schwachen Ufervorsprünge bei km 57+240 und km 57+190.

Am linken Ufer folgt flußabwärts der starke Ufervorsprung bei km 57+140. Auf diesen Vorsprung treffen relativ hohe Geschwindigkeiten zwischen 3,5 m/s und 3,7 m/s in einem Winkel von bis zu 40° zur Uferlinie auf. An dem kleinen Ufervorsprung am linken Ufer direkt im Anschluß an den starken Ufervorsprung betragen die Geschwindigkeiten zwischen 2,1 m/s und 2,9 m/s und nehmen zudem einen wesentlich kleineren Winkel zur Uferlinie ein.

Bereich 3 (57+070 bis 56+940) „Aufweitungs-bereich mit drei Inseln“ (Abb. 22)

Im Anschluß folgt flußabwärts die zweite Inselgruppe, die ursprünglich aus drei Inseln bestand. Die folgende Abbildung zeigt die Geschwindigkeitsfelder im Bereich dieser Inselgruppe.

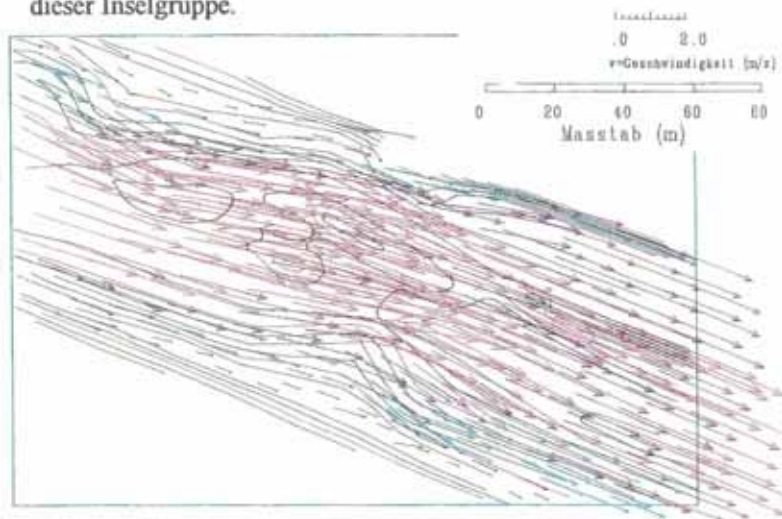


Abb. 21: Fließgeschwindigkeiten der Enz zwischen km 57+060 und km 56+920 im Maßstab 1:2000.

Ein Blick auf Abb. 20 und 21 zeigt deutlich die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Inselgruppe bezüglich der Geschwindigkeitsbeträge. Während die Geschwindigkeiten bei den Inseln der ersten Inselgruppe zwischen 2,9 m/s (bei den ersten beiden Inseln) und 2,7 m/s (bei den letzten beiden Inseln) betragen, liegen die Geschwindigkeiten bei der zweiten Inselgruppe durchweg um einiges höher zwischen 3,3 m/s auf der ersten Insel bzw. 3,4 m/s an der Stelle der ursprünglich vorhandenen zweiten Insel und 2,9 m/s an einigen wenigen Stellen der dritten Insel.

An dem Ufervorsprung am rechten Ufer bei km 56+970 greifen Geschwindigkeiten zwischen 3,1 m/s und 3,2 m/s an, die gegenüber dem Durchschnitt nur leicht erhöht sind und die zudem nur unter einem maximalen Winkel von 20° auf die Uferlinie treffen.

Bereich 4 (56+940 bis 56+740) „Geradlinig und regelmäßig“

Flußabwärts bei km 56+900 sinken die parallel zur Flußachse orientierten Geschwindigkeiten im gesamten Flußabschnitt auf 2,9 m/s, steigen jedoch im Bereich des Ufervorsprungs am rechten Ufer bei km 56+800 wieder auf 3,0 m/s am Ufer bzw. 3,2 m/s in der Flußachse an und treffen mit einem relativ großen Winkel von ca. 30° auf die Uferlinie. Im weiteren Verlauf bis zum nächsten Ufervorsprung am rechten Ufer bei km 56+730 steigen die Geschwindigkeiten nochmals auf 3,2 m/s am Ufer und 3,5 m/s in der Flußachse an und treffen mit einem großen Winkel von 40° auf den Ufervorsprung.

Bereich 5 (56+740 bis 56+530) „Insel mit gerader Flußstrecke zum Landespegel“

Auf die folgende Insel zwischen km 56+650 und km 56+690 wirken außergewöhnlich große Geschwindigkeiten zwischen 3,2 m/s und 3,5 m/s ein. An dem Ufervorsprung am linken Ufer bei km 56+650 hat die Geschwindigkeit den durchschnittlichen Betrag von 2,9 m/s und erhöht sich im Anschluß wieder leicht auf 3,0 m/s. Am rechten Ufer sind die Geschwindigkeiten mit 2,7 m/s zunächst relativ niedrig, erhöhen sich gegen Ende des Aufweitungsbereiches ungefähr ab km 56+620 jedoch bis auf 3,6 m/s, die etwas unterhalb von km 56+600 auch am linken Ufer erreicht werden. Am rechten Ufer trifft die Strömung mit diesen hohen Geschwindigkeiten unter einem Winkel von ca. 20° auf die Uferlinie.



Abb. 22: Aufweitungsbereich mit ursprünglich drei Inseln (Aufn.: LfU 1994).

Auswertung der Gegenüberstellung

Die Modelluntersuchungen an der Universität Karlsruhe zur Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Umgestaltung der Enz in Pforzheim wurden 1988/89 sowohl für den Bauzustand als auch für den Entwicklungszustand durchgeführt.

Im Folgenden werden hauptsächlich die repräsentativen lokalen Geschwindigkeiten aus den Modelluntersuchungen für den vorgesehenen Entwicklungszustand mit den Ergebnissen aus den zweidimensionalen Berechnungen des Hochwassers im Dezember 1993 verglichen. Die Geschwindigkeiten aus den Modelluntersuchungen wurden als Geschwindigkeitsflächen angegeben. Zum besseren Vergleich wurden diese Flächen vereinfachend in Geschwindigkeitsvektoren in Fließrichtung dargestellt.

Gegenüberstellung der Fließgeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeiten aus den Modelluntersuchungen stimmen weitgehend mit den Berechnungsergebnissen zum Hochwasser im Dezember 1993 überein. Abweichungen sind bei den Geschwindigkeiten im Uferbereich und teilweise in der Flußmitte zu erkennen.

Die Geschwindigkeiten beim Hochwasser im Dezember 1993 sind in der Flußmitte bis zu einem halben Meter pro Sekunde und im Uferbereich bis zu einem Meter pro Sekunde höher.

Im Bereich der Inseln sind auf der rechten Seite der ersten Inselgruppe bei km 57+600 die Geschwindigkeiten beim Hochwasser im Dezember 1993 bis zu einem Meter pro Sekunde und bei der Einzelinsel bei km 56+670 um 0,7 m/s höher. Bei der zweiten Inselgruppe bei km 57+000 und auf der linken Seite der ersten Inselgruppe stimmen die Geschwindigkeiten aus den Modelluntersuchungen und den berechneten Werten des Hochwasser im Dezember 1993 sehr gut überein (Abb. 26).



Abb. 23: Inselgruppe im Bereich 1, nach dem Bau (Aufn.: LfU 1992).

5 Entwicklung / Veränderungen

5.1 Synoptische Entwicklungsdarstellung

Der Entwicklungszustand der Bauweisen vor dem Hochwasser wurde entsprechenden vegetationsstrukturellen Erhebungen der Universität Hohenheim entnommen. Die qualitative Erfassung der nach dem Hochwasser beobachteten Veränderungen erfolgte mittels photographischer Aufnahmen. Anhand der in den einzelnen Querschnitten lokal wirkenden Schubspannungen bzw. auftretenden Fließgeschwindigkeiten werden die Veränderungen nach dem Hochwasser diskutiert.

Die weiteren Auswertungen zur Vegetation, Schubspannung und Schadensbilanz nach dem Hochwasser im Dezember 1993 werden in einer synoptische Darstellung zusammengestellt. Die Aufbereitung in dieser Darstellungsform erleichtert eine abschließende Bewertung der naturnahen Bauweisen (Abb. 23-28).

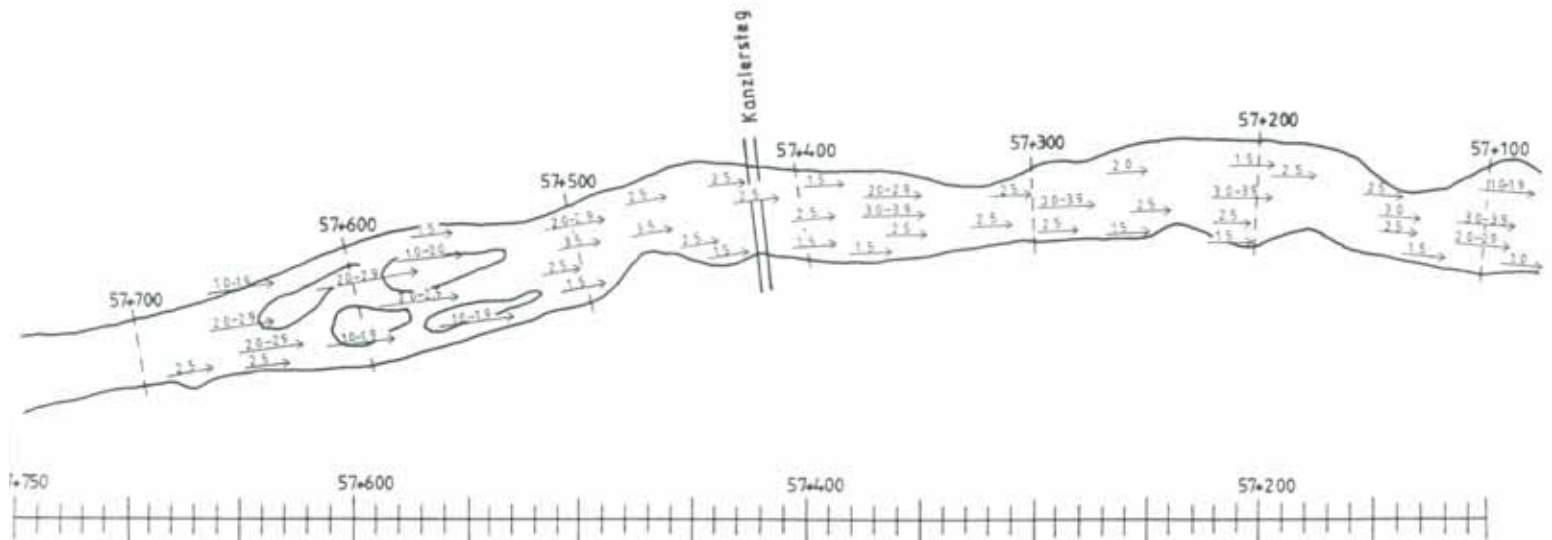


Abb. 24: Inselgruppe im Bereich 1, überstaut (Aufn.: LfU 1992).



Abb. 25: Entwicklungszustand 1996 (Aufn.: LfU 1996).

Modellversuch 1988/89 (Universität Karlsruhe) - Bemessungshochwasser BHQ = 540 m³/s



Auswertungsergebnisse des Hochwassers Dezember 1993 - HQ = 542 m³/s

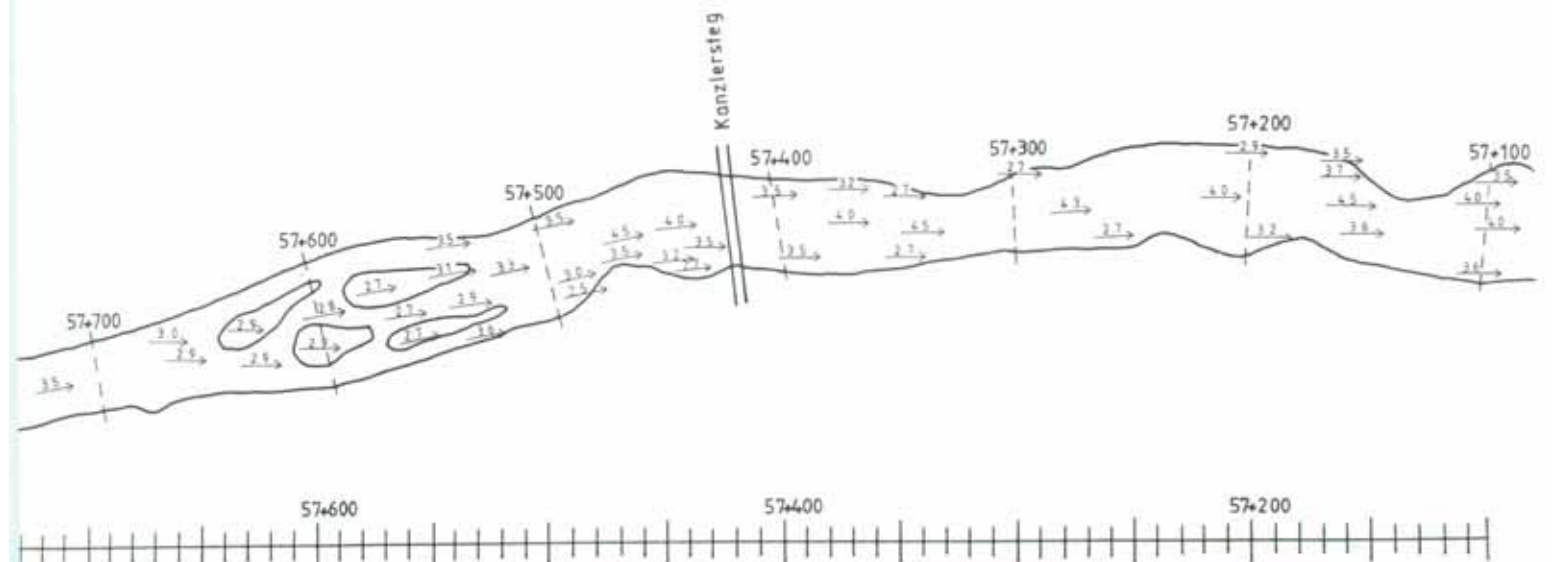
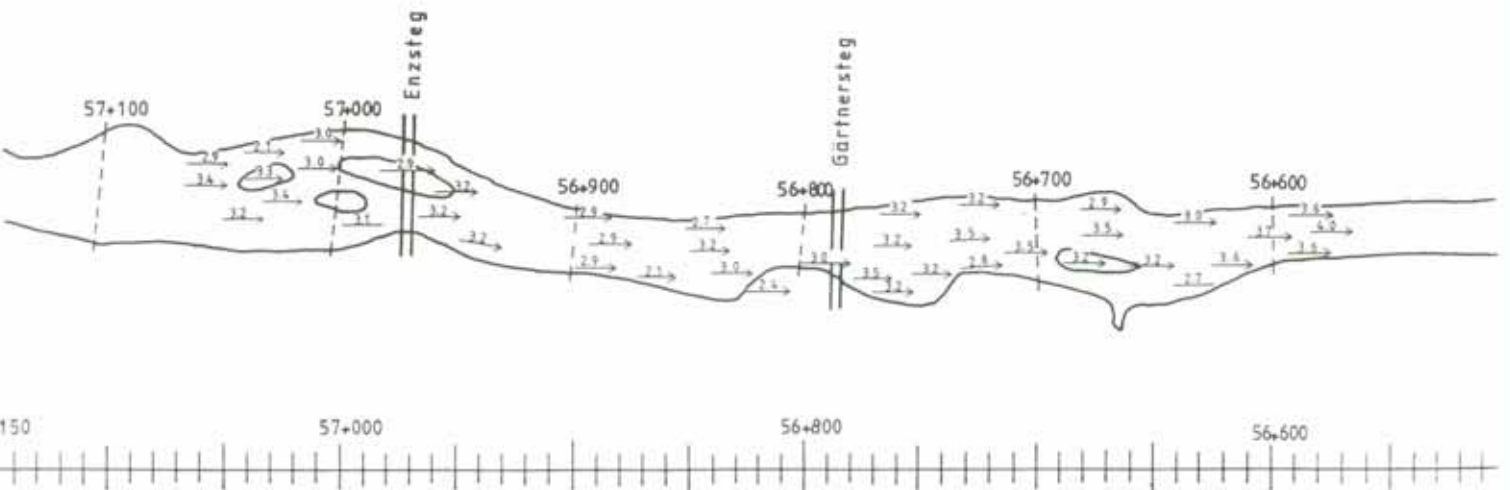
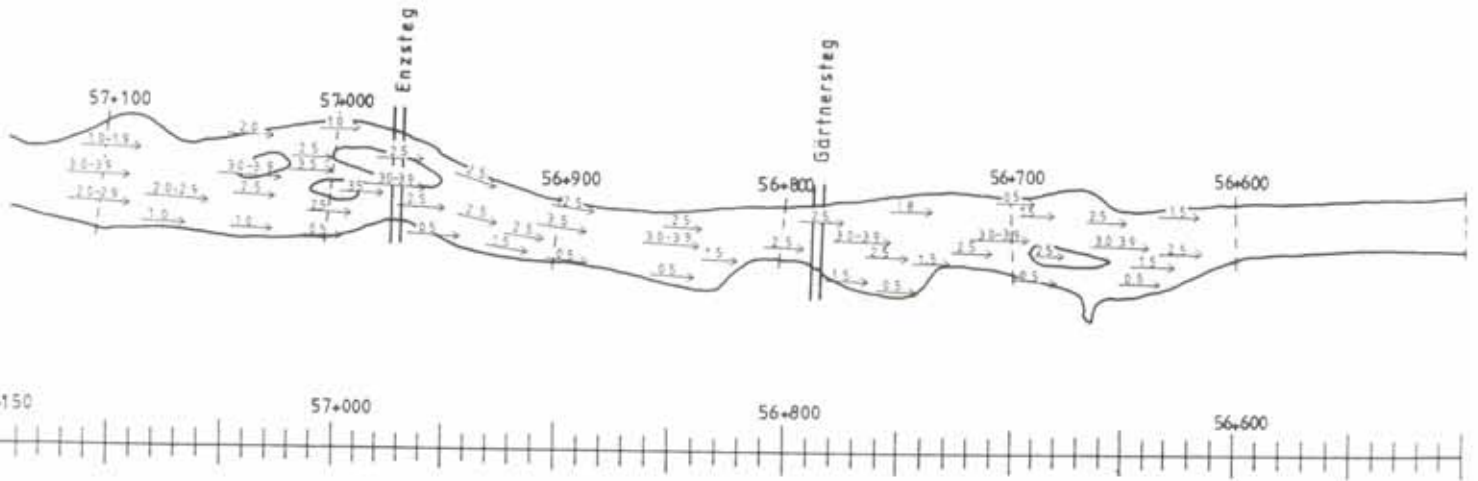
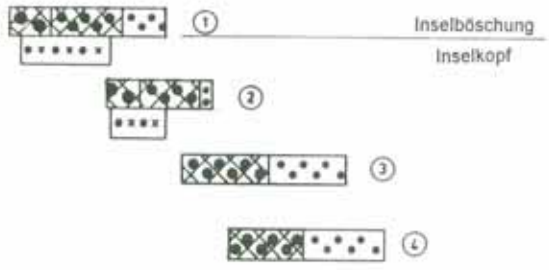
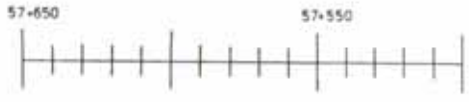
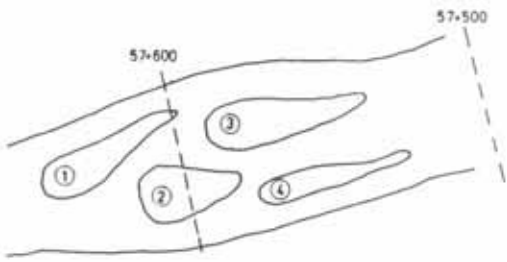


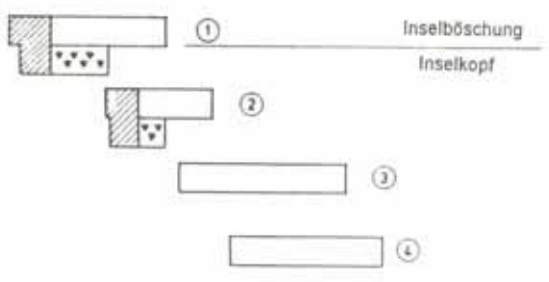
Abb. 26: Fließgeschwindigkeiten zum vorgesehenen Entwicklungszustand aus den Modellversuchen 1988/89 und dem Hochwasser im Dezember 1993.



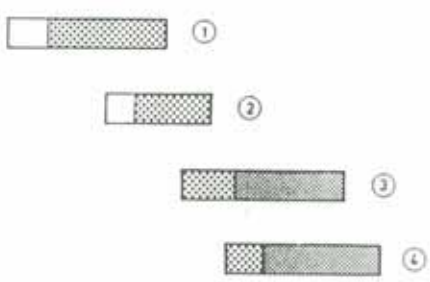


Gewässerstationierung

ursprüngliche Sicherungsmaßnahmen durch naturnahe Bauweisen

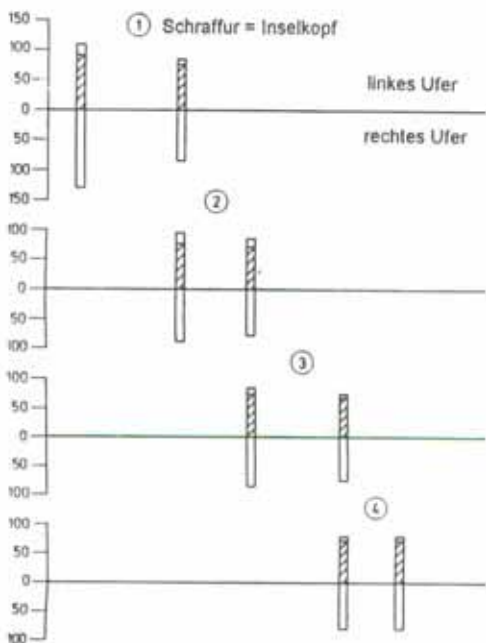


Entwicklungszustand bis November 1993



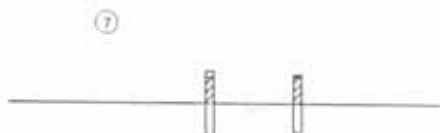
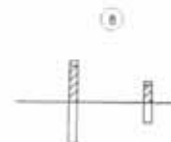
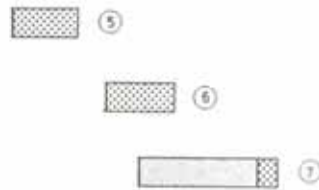
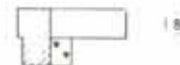
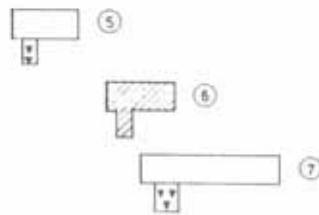
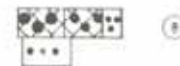
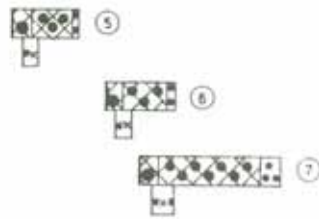
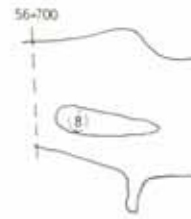
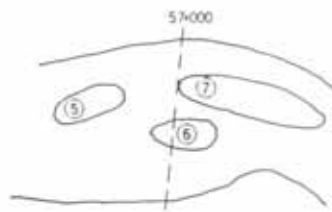
Zustand nach dem Hochwasser im Dezember 1993

Schubspannung
Maßstab [N/m²]



wirksame Schubspannungen beim Hochwasser

Abb. 27: Synoptische Darstellung der Auswertungsergebnisse bezüglich der Inseln.



Legende

verwendete naturnahe Bauweisen

- Raupackwerk
- Steinwurf mit Weidenstecklingen
- Steinwurf KleinmehlgröÙ

Entwicklungszustand der naturnahen Bauweisen

- unterdurchschnittlich gewachsen
- erodiert

Schadenszustand nach dem HW Dezember 1992

- mittlere Schäden
- sehr große Schäden

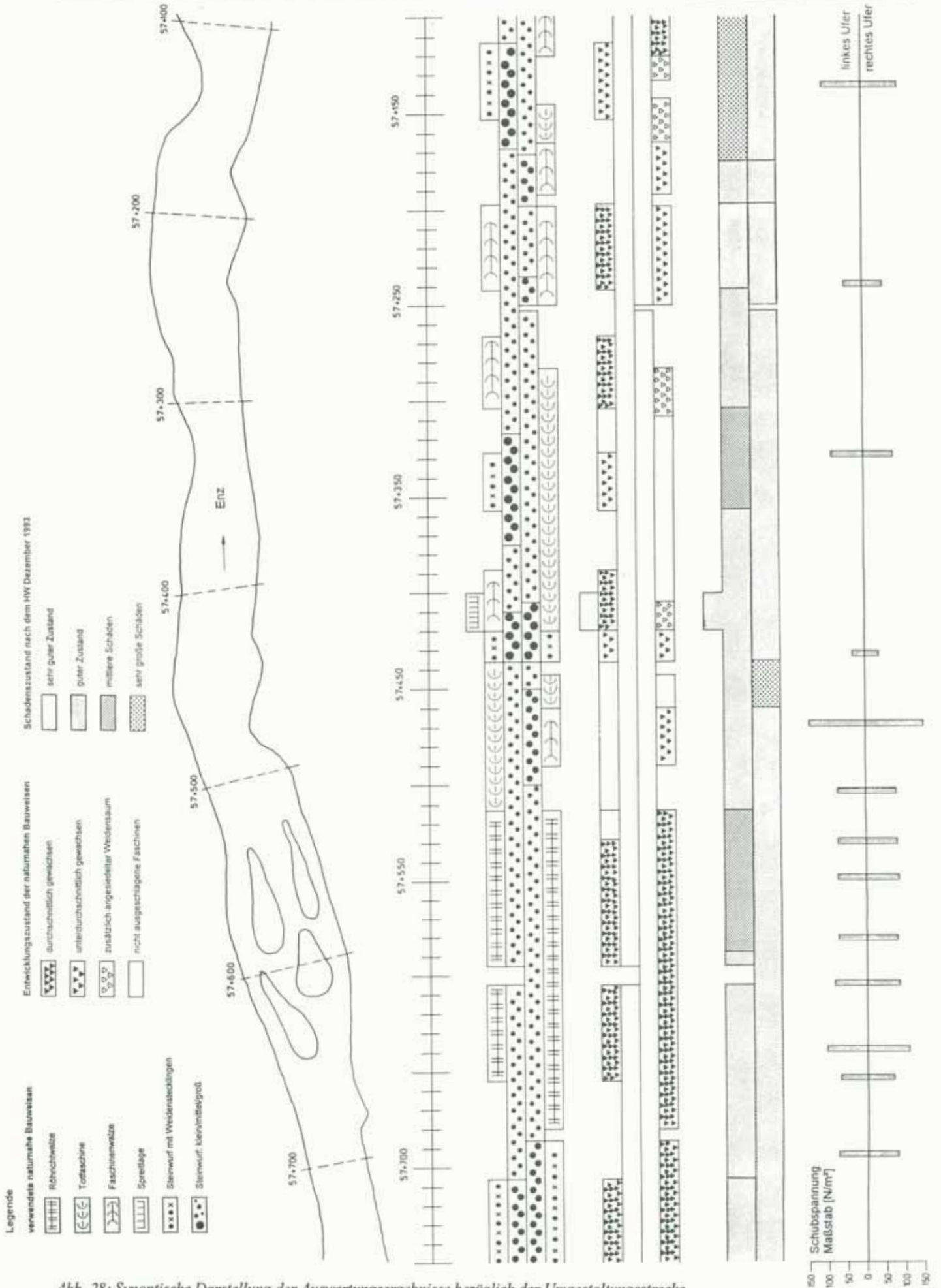
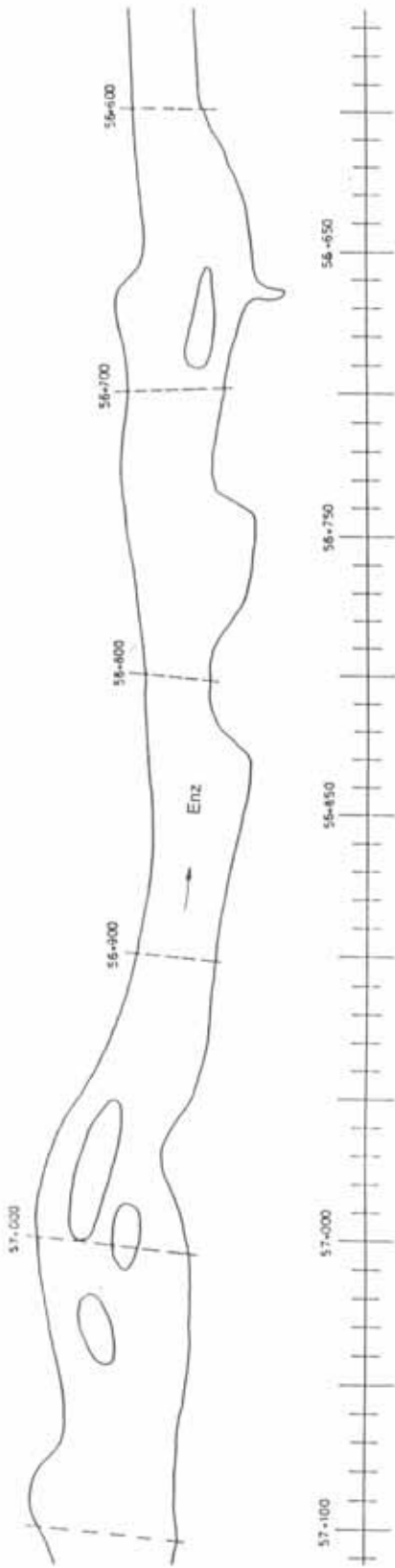


Abb. 28: Synoptische Darstellung der Auswertungsergebnisse bezüglich der Umgestaltungstrecke.



Gewässerstationierung



ursprüngliche Sicherungsmaßnahmen durch naturnahe Bauweisen



Entwicklungszustand bis November 1993



Zustand nach dem Hochwasser im Dezember 1993



wirksame Schubspannungen beim Hochwasser

5.2 Gewässerbett

Ein wesentlicher Gesichtspunkt zur Beurteilung der naturnahen Bauweisen ist außer dem am 21. Dezember 1993 abgelaufenen Hochwasserabfluß die kontinuierliche Belastung der Bauweisen durch wechselnde Wasserstände und Abflüsse. Dies gilt insbesondere für die Überflutungshäufigkeit der Inseln.

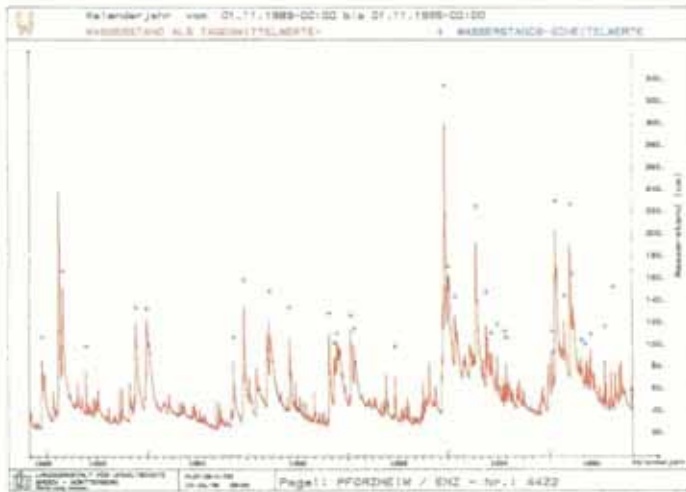


Abb. 29: Wasserstandsganglinie 1991 - 1995 Pforzheim-Kläranlage/Enz.

In den Abbildungen 29 und 30 werden die Wasserstände und Abflüsse der letzten 5 Jahre am Pegel Pforzheim-Kläranlage/Enz dargestellt.

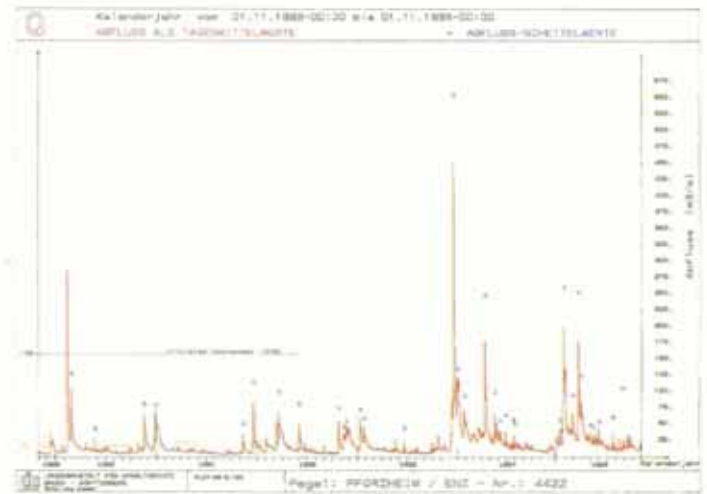
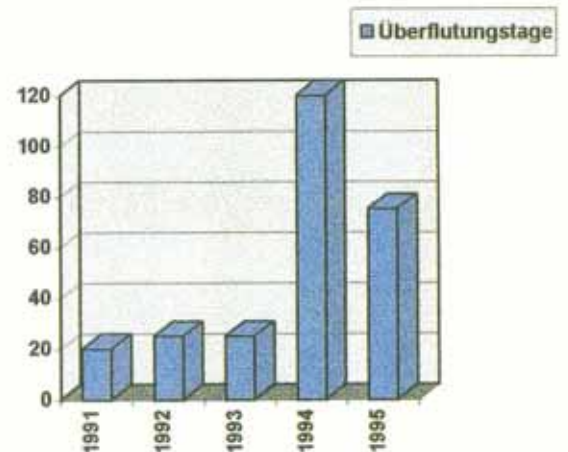


Abb. 30: Abflußganglinie 1991 - 1995 Pforzheim-Kläranlage/Enz.

In Tabelle 7 sind Hochwasserereignisse nach der Umgestaltung (1990) nach Größe dargestellt. Alle Inseln werden ab einem Abfluß von ca. 37 m³/s gleichzeitig überströmt. Dies ergibt für alle Inseln Überflutungshäufigkeiten nach Abb. 31. Die mittleren Überflutungshöhen der Inseln sind Ereignisabhängig in Tabelle 7 gegenübergestellt.

Datum	Uhrzeit	Wasserstand	Abfluß	Überflutungshöhe der Inseln
cm	h / min	cm	m ³ /s	cm
23.12.1993	7 / 20	336	554	246
25.01.1995	23 / 59	233	265	143
19.03.1995	17 / 19	228	253	138
13.04.1994	22 / 30	226	248	136
01.01.1994	5 / 00	172	135	82
22.12.1991	14 / 09	159	113	69
01.02.1995	8 / 15	158	112	68
23.03.1992	2 / 36	150	100	60
19.05.1994	16 / 00	149	99	59
21.11.1990	4 / 30	135	81	45
04.06.1992	8 / 12	135	81	45

Tab. 7: Ausgewählte Hochwasserereignisse seit 1990 Pforzheim-Kläranlage/Enz.



5.2.1 Mittelwasserbett

Im Untersuchungsabschnitt wurde die Böschung vom Böschungsfuß bis zur Mittelwasserlinie mit Steinwurf/Rollierung verschiedener Größen gesichert. Im Bereich der Mittelwasserlinie wurden verschiedene ingenieurbiologische Ufersicherungsmaßnahmen wie Faschinenwalzen, Weidenstecklingen und Röhrichtwalzen verwendet. Spreitlagen wurden nur an einer einzigen Stelle direkt unterhalb des Kanzlerstegs, Röhricht- bzw. Hochstaudenwalzen nur in dem Aufweitungsbereich mit der ersten Inselgruppe eingesetzt (Abb. 32).



Abb. 32: Sicherung des Mittelwasserbettes mit Röhricht und Weiden (Aufn.: LfU 1992).

Der Einsatz der Bauweisen hing weitgehend von der Gestaltung der Uferlinie ab. Gerade Streckenabschnitte wurden hauptsächlich mit Faschinenwalzen aus ausschlagfähigem oder totem Material abgesichert. Lediglich an zwei geraden Uferlinien - zu Beginn der Untersuchungsstrecke flußaufwärts von der ersten Inselgruppe sowie direkt unterhalb des Kanzlerstegs - wurden keine Faschinenwalzen sondern Weidenstecklinge mit Steinwurf verwendet. Ansonsten wurden Weidenstecklinge zusammen mit großem oder mittlerem Steinwurf an exponierten Ufervorsprüngen sowie im vorderen Bereich der Inseln verwendet. Im Anschluß an den großen oder mittleren Steinwurf im Bereich der Weidenstecklinge wurde zum Gewässer hin im allgemeinen kleiner Steinwurf/Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat verwendet. Ein Teil der Ufervorsprünge wurde auch durch Faschinenwalzen aus ausschlagfähigem Weidenreisig gesichert. Totfaschinen wurden nur an einem Ufervorsprung verwendet. Faschinenwalzen stellten insgesamt die am häufigsten verwendeten Ufersicherungsmaßnahmen dar.

5.2.2 Inseln

Die Inselköpfe wurden an den Prallufern mit Rauhpackwerk, daran anschließend Steinwurf mit Weidenstecklingen und auf der Inseloberfläche mit Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat gesichert. In die Rollierung wurden teilweise Röhricht- und Hochstaudenpflanzungen zur Entwicklung einer Langzeitsicherung der Inseloberfläche eingesetzt.

Mit dieser Anordnung der naturnahen Bauweisen war das Ziel verbunden, das Prallufer der Inseln stabil zu sichern und im Strömungsschatten durch die Sicherungsmaßnahme Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat Veränderungen bzw. Umlagerungen zuzulassen. Die Begrünung und entgeltige Ausformung der Inseln sollte durch Ablagerungen von Sedimenten und Pflanzen und deren Entwicklung erfolgen. Diese sollten auch die langfristige Stabilisierung der Inseln gewährleisten (Abb. 33, 34).



Abb. 33: Bau der Inseln in Tropfenform (Aufn.: LfU 1992).



Abb. 34: Umlagerungen im Strömungsschatten der Inseln (Aufn.: WBA FDS 1991).

5.3 Naturnahe Bauweisen

Nach dem Hochwasser im Dezember 1993 wurden Begehungen vorgenommen, bei denen der Zustand der Ufersicherungsmaßnahmen sowie die aufgetretenen Schäden dokumentiert wurden. Danach wurde der Zustand der Bauweisen für eine synoptische Darstellung (Abb. 27 und 28) in die folgenden vier Klassen unterteilt:

- ▶ sehr guter Zustand
- ▶ guter Zustand bzw. kleine Schäden
- ▶ mittlere Schäden
- ▶ sehr große Schäden

Die eingesetzten naturnahen Bauweisen überstanden insgesamt betrachtet das Hochwasserereignis gut und wiesen bis auf ein paar Stellen nur kleine Schäden auf. Im folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse über die Entwicklung der jeweiligen naturnahen Bauweise seit der Umgestaltung der Enz (1990) zusammengefaßt und unter Berücksichtigung des Hochwassers (1993) dargestellt.

5.3.1 Faschinen

Faschinen aus ausschlagfähigen Weidenruten wurden verteilt im gesamten Umgestaltungsbereich im Bereich der Wasserwechselzone eingebaut. Es wurden sowohl kritische Stellen mit hoher hydraulischer Belastung als auch gerade Streckenabschnitte und Stillwasserzonen mit dieser Faschinenart befestigt. Die befestigten Bereiche werden in Abb. 35 dargestellt.

Entwicklung von 1991 bis 1993:

Die Faschinen aus ausschlagfähigen Weidenruten haben erwartungsgemäß ausgeschlagen und sind im allgemeinen bis ins Jahr 1993 durchschnittlich gewachsen. An hydraulisch kritischen Stellen, wie zum Beispiel an den Ufervorsprüngen 57+470, 57+240, 57+170, zwischen 57+070 und 57+080 ist die Wuchshöhe eher unterdurchschnittlich. Bis auf den Bereich 56+800 mit einem starken Ufervorsprung, an dem die Wuchsentwicklung wunschgemäß verlaufen ist, kann festgestellt werden, daß vor allem an den hydraulisch stark belasteten Ufervorsprüngen die Entwicklung der Faschinen aus ausschlagfähigen Weidenruten unterdurchschnittlich erfolgt ist. Darüberhinaus ist aufgefallen, daß sich die Anfangs- bzw. Endbereiche der Fachinenwalzen unterdurchschnittlich bis schlecht entwickelt haben.

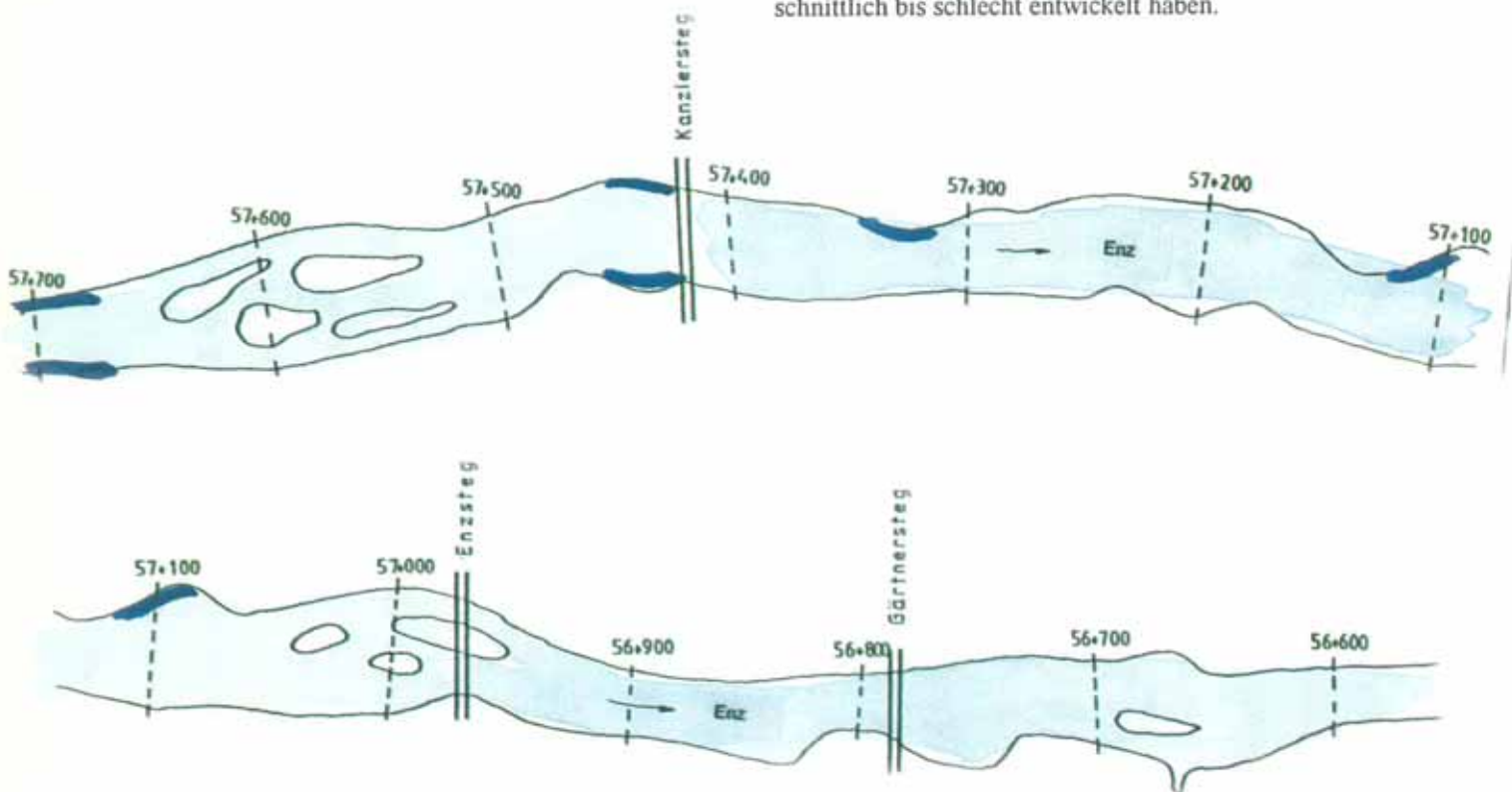


Abb. 35: Übersichtslageplan: Abschnitte mit Faschinen aus ausschlagfähigen Weidenruten (■).



Abb. 36: Erosion hinter der Weidenfaschine (Aufn.: LfU 1996).

Das Hochwasser im Dezember 1993:

Die Faschinen aus ausschlagfähigen Weidenruten haben das Hochwasser insgesamt gut überstanden. Es traten an den Faschinenwalzen keine Schäden auf. Dagegen waren uferseitig, hinter den Faschinen und in den Anfangs- und Endbereichen sowie an den Übergangsstellen zu anderen naturnahen Bauweisen erhebliche Erosionen zu verzeichnen.

Im Bereich des Ufervorsprungs auf der rechten Uferseite bei km 57+470 sind sehr starke Schäden eingetreten. An der Stelle, an der die Faschine in eine Totfaschine überging wurden größere Teile des Vorlandes herausgerissen, so daß ein tiefer Stillwasserbereich entstand. Das Ende der Faschine hatte sich hier auch unterdurchschnittlich entwickelt. An einer weiteren Stelle (56+600) traten beidseitig am Ende der Faschinen mittlere Schäden auf.

Die sonstige Uferbefestigung mit Faschinen befindet sich trotz einer teilweisen unterdurchschnittlichen Wuchsentwicklung in einem guten bis sehr guten Zustand.

Entwicklung 1994 / 1995

Die Bereiche, die mit Faschinen aus ausschlagfähigen Weidenruten befestigt wurden, haben sich inzwischen weiter entwickelt. Die kleineren Auskolkungen hinter den Faschinen sind zwischenzeitlich weitgehend übersandet und überwachsen. Die Schäden an den Anfangs- und Endbereichen der Faschinen wurden nicht saniert und sind deshalb noch deutlich zu sehen. Eine Vergrößerung des Kolks bei km 57+470 erfolgte bisher nicht.

5.3.2 Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig

Mit dieser Bauweise wurden vor allem die Uferlinien in geraden Gewässerabschnitten oder in Buchten im oberen Ausbaubereich zwischen 57+500 und 57+100 gesichert. Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig wurden ausschließlich in schwächer belasteten Bereichen zur Stabilisierung der Mittelwasserlinie eingebaut. Durch natürliche Sukzession sollte sich eine Vegetation im Bereich der Totfaschine entwickeln, die die Sicherung der Mittelwasserlinie im Laufe der Zeit von der Totfaschine übernehmen soll.

Entwicklung 1991 bis 1993:

Im oberen Bereich der Ausbaustrecke zwischen km 57+515 und km 57+280 haben sich keine oder nur in sehr kleinen Bereichen (Anfang und Ende der Faschine) weitere Pflanzen angesiedelt, so daß die Totfaschinen die Sicherung der Mittelwasserbettes noch alleine gewährleisten mußten.

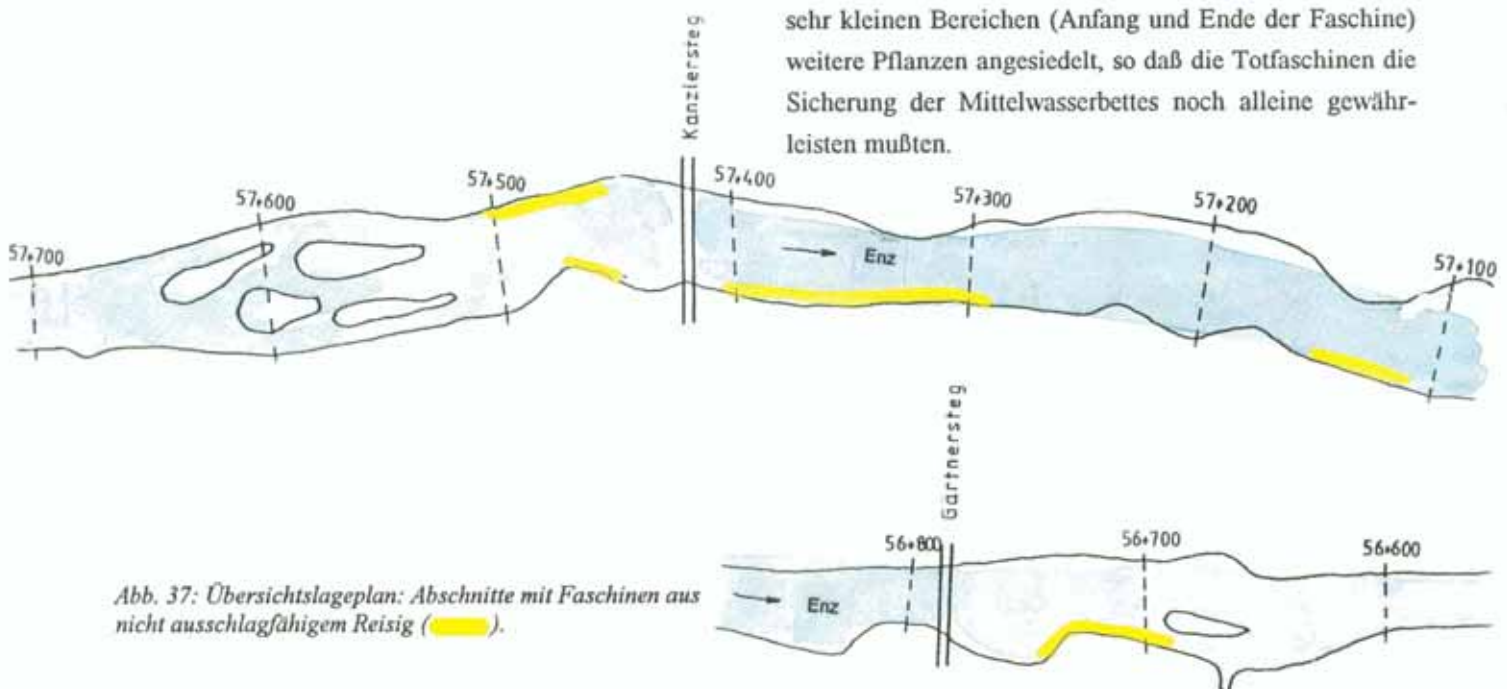


Abb. 37: Übersichtslageplan: Abschnitte mit Faschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig (gelb).

An den rechtsseitigen Mittelwasserlinien bei km 57+150 und km 56+700 hat sich in der Totfaschine ein Erlensaum entwickelt. Bis ins Jahr 1993 haben die Totfaschinen noch ihre Funktion der Sicherung des Mittelwasserbettes erfüllt und zu ca. 50 % ein durchschnittliches Entwicklungsziel durch natürliche Sukzession erreicht. Die entwickelten Erlensäume können die Fixierung der Uferlinie von den Totfaschinen übernehmen.

Das Hochwasser im Dezember 1993:

Die Totfaschinen haben die Belastungen des Hochwassers gut überstanden. Dabei muß aber berücksichtigt werden, daß sie nur in geraden und somit schwächer hydraulisch belasteten Bereichen verwendet wurden.

Am linksseitigen Ufervorsprung bei km 57+470 sind sehr starke Schäden am Übergang zwischen der Weidenfaschine und der Totfaschine aufgetreten (siehe Bild 8 und Beschreibung Weidenfaschine). Ansonsten weisen die Totfaschinen am rechten Ufer zwischen km 57+515 und 57+440 und am linken Ufer zwischen km 57+420 und 57+280 keine Schäden auf und befanden sich auch nach dem Hochwasser in gutem, voll funktionsfähigem Zustand. Am rechten Ufer zwischen km 56+740 und 56+680 wies die Totfaschine, die bereits mit einem Erlensaum durchsetzt war, im Bereich des Ufervorsprungs mittlere Schäden auf. Ein Teil des Bodens am Vorsprung wurde mit der Totfaschine herausgerissen.

Entwicklung 1994 / 1995:

Die Schäden an den Totfaschinen wurden nicht behoben. Inzwischen haben sich die nicht beschädigten Bereiche mit den Erlensäumen bei km 57+150 und 56+700 weiter gut entwickelt. Die Uferlinie mit den mittleren Schäden am Ufervorsprung bei km 56+740 hat sich durch den Erlensaum selbst stabilisiert und zeigt eine fortschreitende Entwicklung, die zielorientiert zu einer naturnahen Ufersicherung führt.

Im Bereich der Totfaschinen zwischen km 57+515 und km 57+280 haben Schwarzerlen-Sämlinge den Boden inzwischen ebenfalls durchwurzelt. Auch hier kann von einer Stabilisierung der Mittelwasserlinie ausgegangen werden.

5.3.3 Spreitlage

Die Bauweise Spreitlage wurde nur in einem steileren Böschungstück auf einer Strecke von 20 Metern bei km 57+410 oberhalb einer Weidenfaschine eingebaut. Der Einbaubereich liegt in einer weitestgehend geraden Gewässerstrecke und stellt den Übergang zur Sicherung der Böschung zwischen der Weidenfaschine und den Grasflächen dar. Insgesamt haben sich die Spreitlagen durchschnittlich entwickelt. Beim Hochwasser sind keine Schäden aufgetreten.



Abb. 38: Faschinenwalze mit anschließender Spreitlage (Aufn.: WBA FDS 1990).

5.3.4 Röhrichtwalze und Röhrichtballenpflanzung

Röhrichtwalzen in Verbindung mit Röhrichtballenpflanzungen wurden ausschließlich zu Beginn der Umgestaltungsstrecke zwischen km 57+680 und 57+510 an beiden Uferlinien eingebaut. Dieser Bereich wird vor allem durch die erste Inselgruppe geprägt. Die hier eingebrachte Bauweise hatte zum Ziel, eine begrünte Sicherung der Mittelwasserlinie ohne Verbaucharakter im Hochwasserfall zu gewährleisten.

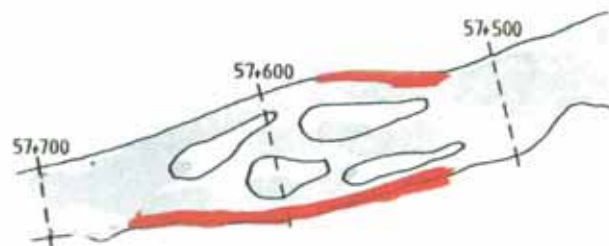


Abb. 39: Übersichtslageplan: Abschnitte mit Röhrichtwalze ().

Entwicklung von 1991 bis 1993:

Die Röhrichtwalzen und Röhrichtballenpflanzungen haben sich durchschnittlich entwickelt. Lediglich im Endbereich des linken Ufers ist der Wuchs unterdurchschnittlich. An dieser Stelle hat sich eine Springkrautflur entwickelt.

Das Hochwasser im Dezember 1993:

Am linken Ufer, etwas weiter flußabwärts zwischen km 57+550 und km 57+510, wurden Teile der Uferbefestigung herausgerissen. Abbildung 40 zeigt das linke Ufer in diesem Bereich. Es ist von zahlreichen Ausbuchtungen geprägt. Der beschädigte Bereich entspricht ungefähr jener Stelle, an der sich die Röhrichtwalze unterdurchschnittlich entwickelte und teilweise durch eine Springkrautflur verdrängt wurde. Ansonsten konnte das Hochwasser im Aufweitungsbereich der ersten Inselgruppe keine Schäden an der Röhrichtflur verursachen.

Entwicklung 1994 / 1995:

Die Schäden auf der linken Uferseite am Ende des Aufweitungsbereiches wurden nicht saniert. Inzwischen hat sich die Springkrautflur weiter ausgedehnt. Hierdurch ist eine weitere Instabilität dieses Uferabschnittes gegeben.



Abb. 40: Schäden an der Uferbefestigung (Aufn.: Universität Karlsruhe 1994).



Abb. 41: Austrieb der Röhrichtwalze und Röhrichtballenpflanzung (Aufn.: WBA FDS 1990).



Abb. 42: Strömungsvarianten im Bereich der Sicherung durch Röhricht (Aufn.: LfU 1996).

5.3.5 Rollierung und Steinwurf

Über die gesamte Umgestaltungsstrecke verteilt wurde auf der Wasserseite eine Rollierung eingebracht. Diese bestand aus vorhandenem Sohlmaterial der Enz. Gegen Ende der Umgestaltungsmaßnahme wurde, da nicht mehr ausreichend Sohlsubstrat zur Verfügung stand, auch gebrochenes Material als Steinwurf eingebaut. Die Verwendung des vorhandenen runden Sohlsubstrates hatte zum Ziel, den Übergang der Sohle zu den Bauweisen so naturnah als möglich zu gestalten und diese zu sichern. Das vorhandene Sohlsubstrat kann als abgestuftes Rundkorn mit einem Durchmesser bis 40 cm beschrieben werden.

Darüberhinaus wurden auch die strömungsabgewandten Teile der Inseln mit einer Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat ausgebildet. Hier bestand das Ziel darin, es dem Gewässer zu ermöglichen, die Inseln selbst zu gestalten. Die Entwicklung und Bewertung erfolgt bei der Bauweise „Rauhpackwerk“.

Entwicklung von 1991 bis 1993:

Das eingebrachte vorhandene Sohlsubstrat hat seine von ihm erwartete Funktion erfüllt. Die eingebauten naturnahen Bauweisen wurden gesichert und die Ufergestaltung ging fließend in den Böschungsbereich über. Auch die erwarteten und gewünschten Umlagerungen im Uferbereich fanden in einem begrenzten und hydraulisch vertretbaren Rahmen statt. Es wurden keine Bauweisen freigespült bzw. unterspült. Somit war die Funktion der Bauweisen zur Sicherung der Mittelwasserlinie an der Enz gewährleistet.



Abb. 43: Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat (Aufn.: LfU 1991).

Die Bauweise „Rollierung“ wurde sowohl in Bereichen mit hohen Schubspannungsbelastungen und Fließgeschwindigkeiten als auch in Buchten und strömungsärmeren Bereichen eingesetzt. An besonders exponierten Stellen wurde zur besseren Stabilisierung entweder nur gebrochenes Steinwurfmaterial verwendet oder dieses dem Rundmaterial beigemischt.

Das Hochwasser im Dezember 1993:

Durch das Hochwasser verursacht sind einige Schäden aufgetreten. Bei km 57+450 hat sich auf der rechten Uferseite ein Stillwasserbereich gebildet (Abb. 44). In diesem Bereich wechseln die Bauweisen Steinwurf in Rollierung und wieder in Steinwurf mit Steinen großer Kantenlänge auf eine Strecke von 20 Metern. Der Schaden im Bereich von 57+160 bis 57+090 beginnt zunächst als mittelstarker Schaden vor dem starken Ufervorsprung auf der linken Uferseite. Im Anschluß daran werden die Schäden im Bereich des Ufervorsprungs sehr groß. Im Bereich des Überganges zwischen Steinwurf und Rollierung wurde die Uferbefestigung herausgerissen und im weiteren das gesamte Bodenmaterial abgetragen, so daß sich ein „Altarm“ gebildet hat (Abb. 45). Einzelne Teile des Steinwurfs mit den Weidenstecklingen sind noch vorhanden und deuten als Insel die ursprüngliche Uferlinie an.



Abb. 44: Schaden hinter dem Ufervorsprung bei km 57+450 (Aufn.: Universität Karlsruhe 1994).

Bei km 56+740 sind auf der rechten Uferseite mittlere Schäden aufgetreten. Teile der Uferbefestigung wurden herausgerissen und es haben sich leichte Uferabbrüche gebildet. Auch hier ist zu beobachten, daß auf einer sehr kurzen Gewässerstrecke die Uferbefestigung von Rollierung zu Steinwurf und wieder zu Rollierung wechselt.

Entwicklung 1994 / 1995:

Die beschriebenen Uferschäden wurden nicht saniert. Inzwischen sind keine weiteren Schäden entstanden, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Uferlinie durch angelandetes Pflanzenmaterial stabilisiert wird.



Abb. 45: „Altarm“ bei km 57+100 (Aufn.: LfU 1994).

5.3.6 Rauhpäckwerk

Die Bauweise Rauhpäckwerk wurde nur im Bereich der Inseln angewendet. Als Ziel war vorgesehen, die Inselköpfe mit einer stabilen aber auch elastischen Bauweise zu sichern, wie auch hohen Schubspannungsbelastungen und Fließgeschwindigkeiten widerstehen kann. Im Rauhpäckwerk können sich aber auch Sedimente anlagern und eingeschwemmte Pflanzen entwickeln.

Entwicklung von 1991 bis 1993:

Die beiden ersten Inseln der Inselgruppe im Bereich I waren bereits Mitte des Jahres 1992 abgetragen. Bis zum Hochwasser im Dezember 1993 waren von den beiden ersten Inseln nur noch die mit schwerem Steinwurf gesicherten Grundformen vorhanden. Eine Sedimentablagerung oder Pflanzenentwicklung fand nicht statt. Die beiden flußabwärts folgenden Inseln wiesen keine Schäden an der „Bauweise Rauhpäckwerk“ auf.

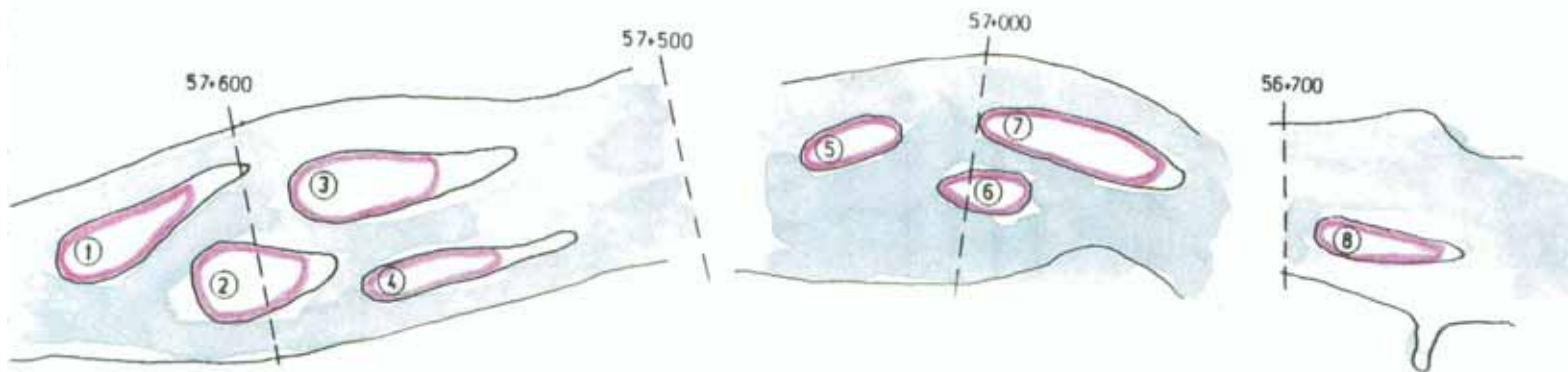


Abb. 46: Übersichtslageplan: Abschnitt mit Rauhpäckwerk (■).

Die zweite Insel der Inselgruppe im Bereich 3 ist ebenfalls bereits Mitte 1992 vollständig erodiert. Sie ist auf entsprechenden Bildern nicht mehr zu finden. Die erste und dritte Insel haben ihre Form und Uferbefestigung beibehalten. Es sind keine Schäden am Inselkopf erkennbar.

Die Insel im Bereich 5 war am Inselkopf bereits Mitte des Jahres 1992 erodiert. Das heißt, daß das Rauhpäckwerk seine Funktion als Sicherungsbauweise nicht erfüllen konnte. Trotzdem konnte sich zumindest noch eine Restinsel ausbilden und entwickeln.

Das Hochwasser im Dezember 1993:

Die beiden vorderen Inseln im Bereich 1 sind fast vollständig abgetragen und haben lediglich noch kranzförmige Überreste des großen Steinwurfs. Die beiden hinteren Inseln sind jeweils im vorderen Teil abgetragen, aber im hinteren Teil noch vorhanden. Vom „Rauhpäckwerk“ ist nichts mehr vorhanden.

Von der Inselgruppe im Bereich 3 ist nur noch die letzte Insel vorhanden. Die erste Insel ist nur noch als Inselkranz zu erahnen, die zweite Insel war bereits vor dem Hochwasser abgetragen.

Von der Insel im Bereich 5 sind nur noch kranzförmige Überreste des Rauhpäckwerks sichtbar.

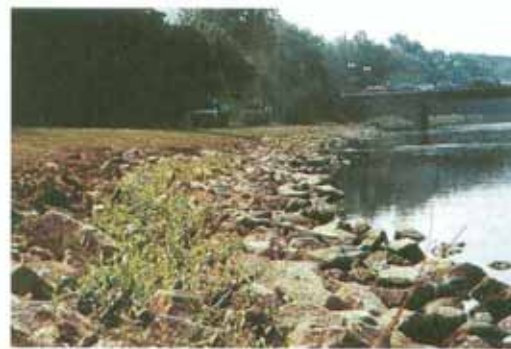


Abb. 47: Steinwurf mit Weidenstecklingen (Aufn.: LfU 1990).

Entwicklung 1994 /1995:

Die beiden hinteren Inseln im Bereich 1 sind nicht weiter erodiert. Inzwischen hat sich eine Vegetation gebildet, die sich weiterentwickelt und somit die Stabilisierung übernehmen kann. Die letzte Insel im Bereich 3 hat sich mittels eines abgestuften Bewuchses stabilisiert. Es kann davon ausgegangen werden, daß eine weitere Umlagerung oder Erosion nur noch bedingt möglich ist.



Abb. 48: Schaden zwischen Böschung und Bauweise Steinwurf mit Weidenstecklingen (Aufn.: Universität Karlsruhe 1994).

5.3.7 Weidenstecklinge und Stechhölzer

Auf der Umgestaltungsstrecke entlang der Enz wurden nur sehr kleine Bereiche mit Steinwurf und Weidenstecklingen bzw. Stechhölzern gesichert. Ziel dieser Bauweise ist es, steilere Böschungen durch den Steinwurf zu sichern und in dessen Schutz einen Bewuchsgürtel zu initiieren, der mittelfristig die Ufersicherung übernimmt und das Gewässer beschattet. Darüberhinaus kann sich in dem Steinwurf Sediment ablagern, und bildet somit eine gute Grundlage für den Wurzelausschlag der Weidenstecklinge aber auch für angeschwemmte Pflanzen.

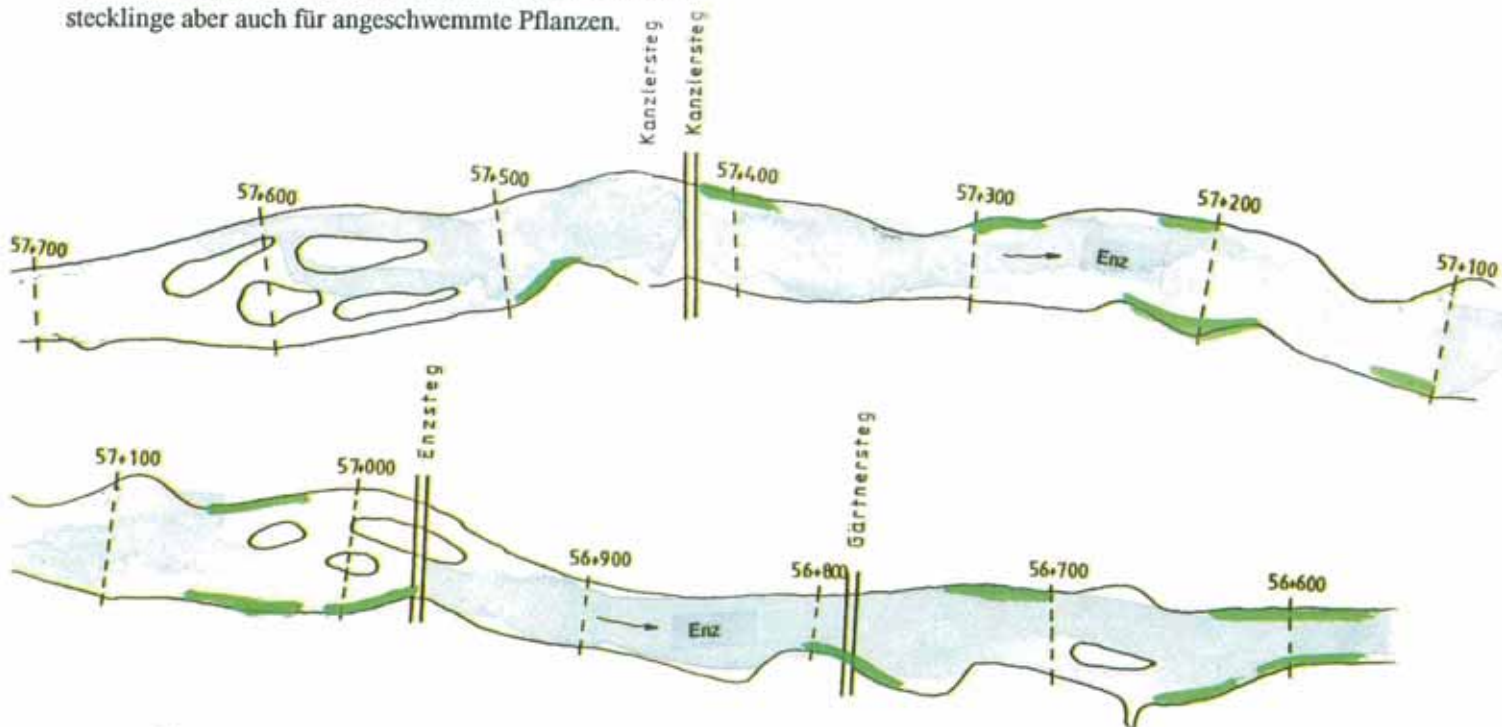


Abb. 49: Übersichtslageplan: Abschnitte mit Weidensteckhölzer und Stechhölzer (■).

Entwicklung von 1991 bis 1993:

Die Weidenstecklinge zu Beginn der Umgestaltungsstrecke zwischen km 57+750 und 57+700 haben sich auf beiden Uferseiten durchschnittlich und somit wunschgemäß entwickelt. Die Weidenstecklinge bei km 57+430 und bei km 57+330 haben sich unterdurchschnittlich entwickelt. Dies drückt sich insbesondere in einer zu geringen Wuchsdichte aus. Die bei km 57+140 eingebrachten Weidenstecklinge entwickelten sich ebenfalls unterdurchschnittlich.

Die Inseln wurden teilweise mit Weidenstecklingen besetzt. Bevor sie eine Sicherungsfunktion übernehmen konnten, war ein Großteil der Inseln bereits abgetragen.

Das Hochwasser im Dezember 1993:

Die Weidenstecklinge am Beginn der Umgestaltungsmaßnahme haben sich zu einem Weidensaum entwickelt und haben somit das Hochwasser fast unbeschadet überstanden. Nur die rechte Uferseite weist kleine kaum erwähnenswerte Schäden auf.

An den beiden Ufern im Bereich 57+430 sind keine Schäden aufgetreten. Der Ufervorsprung bei km 57+330 weist mittelstarke Schäden auf. Während der Steinwurf mit den unterdurchschnittlich entwickelten Weidenstecklingen weitestgehend stabil blieb, wurde im Übergangsbereich zur Böschung das Erdreich herausgewaschen und hat einen durchgehenden Graben mit einzelnen Vertiefungen gebildet.

Im Bereich des Ufervorsprungs bei km 57+140 haben sich große Schäden ausgebildet. Auch hier wurde vor allem das hinter dem Steinwurf mit Weidenstecklingen befindliche Erdreich abgetragen. Ein Teil der Weidenstecklinge ist noch als unterdurchschnittlich entwickelter Weidensaum vorhanden. Auf den Inseln konnten, bezogen auf die Weidenstecklinge, keine weiteren Schäden festgestellt werden.

Entwicklung 1994 / 1995:

Die Weidenstecklinge zu Beginn der Umgestaltungsstrecke haben sich weiter entwickelt und sichern die Böschung der Mittelwasserrinne sehr gut ab. Die Weidenstecklinge an den beiden Ufern im Bereich 57+430 haben sich ebenfalls weiterentwickelt. Es kann davon ausgegangen werden, daß sie jetzt ebenfalls die Sicherung der Mittelwasserlinie zufriedenstellend übernehmen können. Die Weidenstecklinge an den Ufervorsprüngen bei km 57+330 und bei km 57+140 haben inzwischen ebenfalls eine zufriedenstellende Entwicklungsstufe erreicht, sind aber immer noch als unterdurchschnittlich einzustufen.

5.3.8 Naturfasermatten und Geotextilien

Naturfasermatten und Geotextilien werden zur kurzfristigen, vorübergehenden Sicherung der Grasansaatflächen eingebaut. Sie sollen die blanken Uferböschungen vor Wasserangriffen bei Hochwasser schützen. Wie aus der statistischen Übersicht der Abflüsse ersichtlich wird, spielte sich das erste größere Hochwasser am 22.12.1992 ab. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Sicherung der Böschung bereits durch die Grasflächen übernommen. Somit kann über die Stabilität der Naturfasermatten und Geotextilien nichts weiteres ausgesagt werden.

5.3.9 Schotterrasen

Entlang der Enz wurden auf beiden Uferseiten in der Umgestaltungsmaßnahme begrünte Unterhaltungswege vorgesehen. Ziel des Schotterrasens ist die Befahrbarkeit mit Maschinen ohne die Wanderwege für Kleinlebewesen zu unterbrechen und die Gewährleistung der Standsicherheit bei Hochwasser durch die stabilisierende Bewurzelung des Weges.

Entwicklung von 1991 bis 1993:

Die Schotterrasenwege haben sich gut entwickelt und gewährleisten einen stabilen, befahrbaren Unterhaltungsweg. Auch die Belastungen durch die Besucherbegehungen während der Landesgartenschau 1992 wurden gut überstanden. Hydraulische Belastungen durch Hochwasser fanden in diesem Zeitraum keine statt.

Das Hochwasser im Dezember 1993:

Der Schotterrasenweg weist an einigen Stellen erhebliche Schäden auf. Der Weg wurde aufgerissen und es blieben tiefe Gräben bzw. trichterförmige Auswaschungen zurück. Der anschließende Rasen weist keine Schäden auf.

Entwicklung 1994 / 1995:

Die Schäden im Schotterrasenweg wurden saniert. Der Rasen hat sich inzwischen gut entwickelt. Seit dem Hochwasser im Dezember 1993 fand keine neuerliche Überflutung der Unterhaltungsweg statt.



Abb. 50: Schotterrasenweg leicht begrünt (Aufn.: LfU 1991).



Abb. 51: Schaden am Schotterrasenweg im Bereich des Schachtes (Aufn.: LfU 1994).

5.3.10 Grassaat und Grassoden

Im Bereich der Umgestaltungsmaßnahme wurden drei Arten der Begrünung gewählt. Es wurden Flächen ausgewiesen, die sich nach und nach selbst begrünen sollten (Sukzessionsflächen) und die mit Grassaat sowie mit Grassoden begrünt wurden. Die Grassaat wurde in kritischen Bereichen zur Sicherung vor Hochwasser mit Naturfasermatten oder Geotextilien abgedeckt.

Entwicklung von 1991 bis 1993:

Alle Flächen haben sich entsprechend den Vorplanungen gut entwickelt. Da keine größeren Hochwässer während der Austriebs- und Wachstumsphase stattfanden, konnten die Flächen gut durchwurzelt werden. Auch die Sukzessionsflächen haben sich so entwickelt, daß bereits zur Landesgartenschau 1992 von einer stabilen Sicherung der Böschungsflächen ausgegangen werden kann.

Das Hochwasser im Dezember 1993:

An den Böschungsflächen entstanden keine Schäden. Nur in den Übergangsbereichen von den Bauweisen zur Sicherung der Mittelwasserlinie und der eingesäten Böschung wurde die Grasnarbe herausgerissen und es kam zu Schäden.

Entwicklung 1994 / 1995:

Die Schäden entlang der Mittelwasserlinie wurden nicht saniert. Inzwischen hat sich nach und nach eine Vegetation eingestellt, die die Schäden nur noch erahnen lassen und bereits eine erste Sicherung übernehmen können.

5.4 Unterhaltung

Gestützt durch Untersuchungen der Universität Hohenheim in den Jahren 1992 und 1993 wurde ein Konzept zur Unterhaltung der Umgestaltungsstrecke entwickelt. Die erforderlichen Unterhaltungs- und Pflegemaßnahmen, unter Berücksichtigung der hydraulischen Vorgaben aus den Modelluntersuchungen an der Universität Karlsruhe und den vegetationskundlichen Entwicklungszielen, sollen in einem praxisorientierten Gewässerunterhaltungsplan dargestellt werden.



6 Bewertung und Empfehlung

Im Rahmen der Umgestaltungsmaßnahmen an der Enz im Stadtbereich Pforzheim wurden neue Strukturelemente im Mittelwasserbereich der Enz, wie Inselgruppen, Aufweitungen, Vorsprünge und Böschungen mit wechselnden Neigungen geschaffen. Da bisher in der Literatur über das Stabilitätsverhalten der einzelnen Bauweisen nur wenig veröffentlicht ist und angegebene Belastungsgrenzen mitunter große Streubreiten aufweisen, konnten bei der Planung zur Festlegung der jeweiligen naturnahen Bauweise nur Schätzwerte für die Schubspannungen oder Fließgeschwindigkeiten verwendet werden.

Dem „günstigen Umstand“ des Hochwassers im Dezember 1993, das dem Bemessungsabfluß entsprach, ist es zu verdanken, daß bereits nach 5 Jahren erste Aussagen zur hydraulischen Belastbarkeit der naturnahen Bauweisen möglich sind.

Bei der Auswertung der Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen ergab sich, daß eine Bewertung der naturnahen Bauweisen nur gesamtschaulich erfolgen kann. Diese gesamtschauliche Betrachtung beinhaltet die Linienführung, die entsprechende Entwicklung des Bewuchses, die hydraulischen Belastungen der Bauweisen und versucht die verursachten Schäden zu analysieren und die sich hieraus ergebenden Lösungen herauszuarbeiten.



Abb. 52: Die umgestaltete Enz (Aufn.: LfU 1994).

6.1 Bewertung der einzelnen Bauweisen

Die im folgenden angegebenen Werte für die Schubspannungen und die mittleren Fließgeschwindigkeiten der einzelnen Bauweisen sind in der Regel so zu interpretieren, daß der höhere Wert für gerade Gewässerstrecken und der niedrigere Wert für exponierte, hydraulisch stark belastete Gewässerstrecken wie Ufervorsprünge, Buhnen, Inseln usw. anzuwenden ist.

6.1.1 Faschinen

Wie bereits beschrieben, haben sich die Faschinen aus ausschlagfähigen Weidenruten bis ins Jahr 1993 in der Regel erwartungsgemäß durchschnittlich entwickelt. An kritischen Stellen, wie an den Ufervorsprüngen ist die Wuchshöhe überwiegend unterdurchschnittlich. Ebenso haben sich die Anfangs- bzw. Endbereiche der Faschinenwalze unterdurchschnittlich bis schlecht entwickelt. Nach dem Hochwasser im Dezember 1993 waren uferseitig hinter den Faschinen und in den Anfangs- und Endbereichen sowie an den Übergangsstellen zu anderen naturnahen Bauweisen Schäden zu verzeichnen. Der größte Schaden entstand auf der rechten Uferseite bei km 57+470.

In der Tabelle 8 werden die Schubspannungen und die mittleren Fließgeschwindigkeiten an den Ufervorsprüngen bei km 57+470, 57+240, 57+170, 57+080, 56+970, 56+800 und 56+600 zusammengestellt.

Werden nun die Berechnungen zu den Schubspannungen, die mittleren Fließgeschwindigkeiten und deren Winkel in Bezug auf die Uferlinie und die sonstigen Randbedingungen betrachtet, so kommt man zum Ergebnis, daß keiner der vorgenannten Parameter alleine für die Schäden verantwortlich ist.

Deshalb werden im folgenden die einzelnen Schadensursachen dargestellt und eventuelle Möglichkeiten zur Vermeidung erläutert.

► Erste Voraussetzung ist eine wunschgemäße Entwicklung der Bauweisen. Dies war in den geraden Fließstreckenabschnitten gewährleistet. An den Ufervorsprüngen war der Bewuchs (außer bei km 56+800) grundsätzlich unterdurchschnittlich entwickelt. Deshalb wird davon ausgegangen, daß die Einbettung der Faschinen in wurzelungsfähiges Erdreich überall in ausreichendem Maße gegeben war.

► Für die unterdurchschnittliche Entwicklung ist der Winkel der angreifenden mittleren Fließgeschwindigkeit verantwortlich. Die an den Ufervorsprüngen permanent erzeugten Turbulenzen im Bewuchs hemmen die Entwicklung der Weiden von Beginn an. Es läßt sich noch nicht beurteilen, ob die Entwicklung des Bewuchses zu einer stabilen Sicherung der Mittelwasserlinie nur eine längere Entwicklungszeit braucht, oder ob der Bewuchs ständig unterentwickelt bleiben wird.

► Die Übergänge zwischen den verschiedenen Bauweisen entlang der Mittelwasserlinie als auch in den Böschungsbereich hinein wurden ausgespült und bei km 57+470 wurde sogar das gesamte Vorland herausgerissen, so daß sich ein Kolk ausbilden konnte. Diese Beobachtung wurde in den geraden Gewässerstrecken wie auch an den Ufervorsprüngen gemacht. Verantwortlich für diese Erosionen sind die unterschiedlichen Oberflächenrauheiten und der Verbund zwischen den einzelnen Bauweisen.

Tab. 8: Schubspannungen und mittlere Fließgeschwindigkeiten an den Ufervorsprüngen.

Station	Uferseite	Schubspannungen	mittlere Fließgeschwindigkeit	Winkel zur Uferlinie	Bemerkungen
km		N/m ²	m/s	Grad	
57+470	rechts	150	3,0 bis 3,5	20 - 40	Starke Schäden, Ufer wurde hinterspült und Teile des Vorlandes herausgerissen
57+240	rechts	50	2,7	15	keine Schäden
57+170	rechts	50	3,2	15	keine Schäden
57+080	links	50	2,9		keine Schäden
56+970	rechts	50	3,2	20	keine Schäden
56+800	rechts	70 - 80	3,0	30	Entwicklung des Bewuchses wunschgemäß, keine Schäden
56+600	beidseitig	30 - 35	3,6	20	Mittlere Schäden

► So sollten Faschinen, unabhängig ob mit Weidenstecklingen oder mit nicht ausschlagfähigem Reisig als „Endlos-Faschinen“ gefertigt und eingebaut werden. Bei der Uferauskolkung bei km 54+470 konnte nachgewiesen werden, daß der Schaden gerade im Übergangsbereich zwischen einer Faschine mit Weidenstecklingen und einer aus nicht ausschlagfähigem Reisig entstand. Beide Faschinen verjüngten sich zum Ende hin, der Bewuchs der Faschine mit Weidenstecklingen war schlecht entwickelt und eine Verbindung zwischen den Faschinen bestand nicht.

► Das uferseitige Hinterspülen der Faschinen kann in der Regel hingenommen werden. Bei einer wunschgemäßen Entwicklung der Bauweise und unter der Voraussetzung, daß der Bemessungsabfluß nicht bereits in der Ausschlagsphase bzw. ersten Entwicklungsphase der Vegetation erfolgt, übernimmt der Wurzelstock die Sicherung des Ufers und die An- und Einbindung in die Böschung. Bei der Faschinenbauweise mit Weidenstecklingen können zur Einbindung in den Ufer- und Böschungsbereich auch im Abstand von 3 bis 5 Metern entlang der Faschine, bis zu 2 Meter lange Ausläufer von Weidenruten in den Ufer- oder Böschungsbereich eingelassen werden. Dies bewirkt, daß sich ein lockerer, nicht massiv auftretender durchströmbarer Bewuchs entwickeln kann. Darüberhinaus ermöglicht dieser zusätzliche Bewuchs eine unregelmäßige Bewuchslinie auf der Uferseite und vermeidet somit eine lineare Hinterspülung der Bauweise.

► Wie die Gegenüberstellung in der obigen Tabelle zeigt, können Schubspannungen von 70 bis 80 N/m² und Fließgeschwindigkeiten von 3 m/s bei wunschgemäßer Entwicklung von dieser Bauweise auch an exponierten Gewässerstrecken ohne Schaden aufgenommen werden. Bei Geschwindigkeiten von 3,6 m/s sind trotz geringer Schubspannungen (30-35 N/m²) an Ufervorsprüngen bereits mittlere Schäden aufgetreten.

► An geraden Gewässerstrecken kann davon ausgegangen werden, daß erheblich größere Geschwindigkeiten und Schubspannungen von dieser Bauweise ohne Schaden aufgenommen werden können.

► Dies bedeutet, daß der im Handbuch Wasser 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim“ angegebene Richtwert für die mittlere Geschwindigkeit von 3,5 m/s eine angemessene Belastungsgrenze vorgibt.

naturnahe Bauweise	Schubspannung	mittlere Geschwindigkeit
Faschinenwalze mit ausschlagfähigen Weiden	100 - 150 N/m ²	3,0 - 3,5 m/s

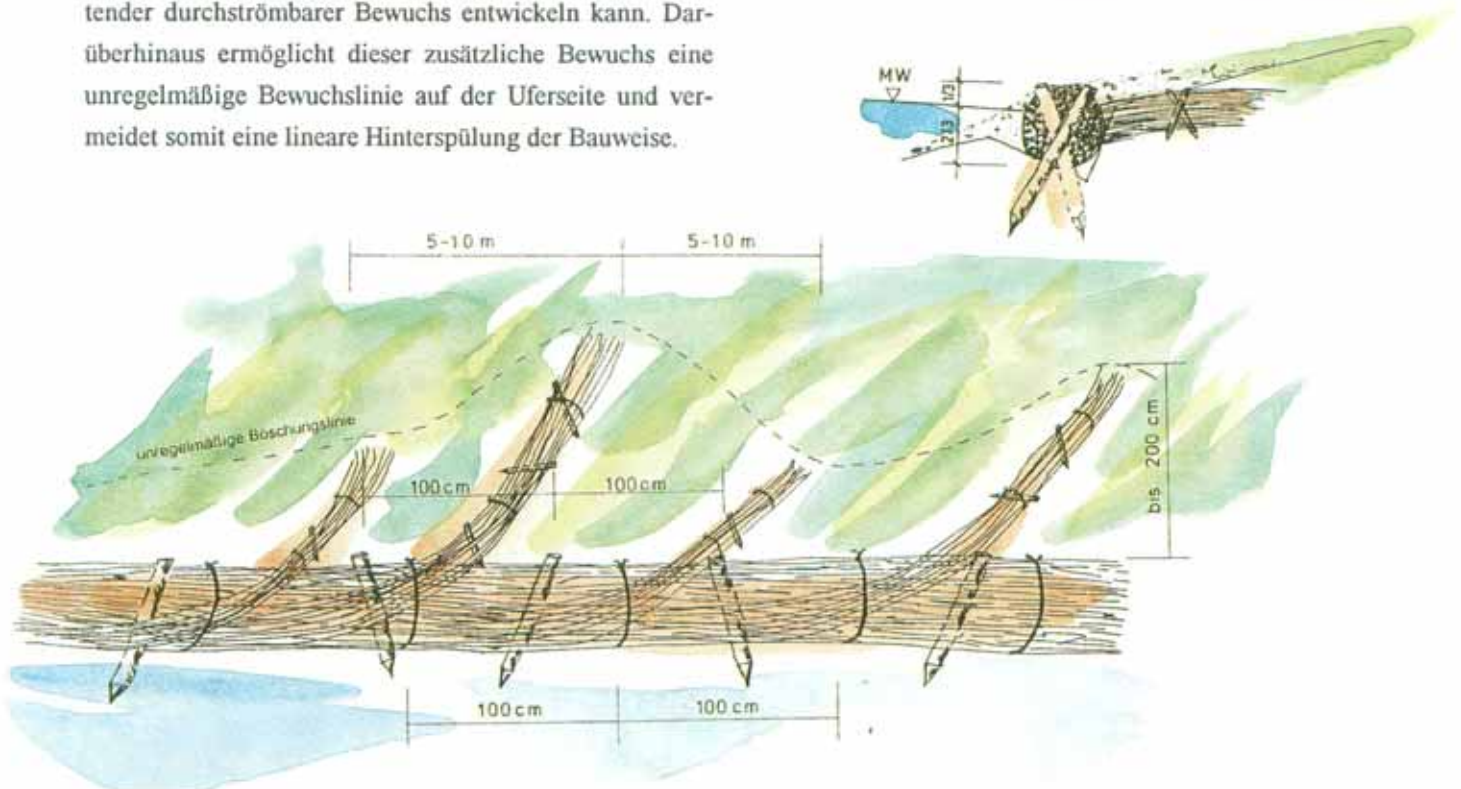


Abb. 53: Systemskizze zur Faschine aus Handbuch Wasser 2, Heft 2 mit Ergänzung der Einbindung in die Böschung.

6.1.2 Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig

Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig wurden in einem längeren Stück als Sicherungsbauweise im geraden Gewässerabschnitt im Bereich 2 „Flach- und Stillwasserzonen“ eingesetzt. Ein zweites längeres Stück wurde zwischen km 56+740 und 56+680 eingebaut.

Insgesamt hat sich diese Faschinenart im eingesetzten Bereich bewährt. Der Entwicklungszustand war bei allen Einbaustellen zufriedenstellend. Die Faschinen haben die vorübergehende Sicherung der Mittelwasserlinie übernommen und gute Sukzessionsmöglichkeiten geschaffen. Bereits 1993 hatten sich schon junge Erlensäume gebildet. In den geraden Strecken traten Schubspannungen von 150 N/m² (km 57+470 auf der linken Uferseite) bis 80 N/m² (km 57+330 auf der rechten Uferseite) und Geschwindigkeiten von 3,5 m/s bis 2,7 m/s auf, ohne Schäden zu verursachen.

Obwohl sich bei km 56+740 bereits ein Erlensaum gebildet hatte, wurde die Totfaschine am Ufervorsprung durch das Hochwasser herausgerissen. Im Bereich des Ufervorsprungs betragen die Schubspannungen 70 N/m² und die mittleren Fließgeschwindigkeiten 3,2 m/s bei einem Winkel zur Uferlinie von 40°. Die wahrscheinlichste Begründung für den Schaden dürfte wohl sein, daß die Ufersicherung von Rollierung zu Steinwurf und wieder zu Rollierung wechselte, sowie die Totfaschine nicht ausreichend weit in die Stillwasserzone hinein eingebunden war. Dieser geschwächte, unterentwickelte Uferbereich am Vorsprung stellte somit einen guten Angriffspunkt für das Wasser dar. Die leicht über dem Durchschnitt liegende mittlere Fließgeschwindigkeit, die über den jungen Erlensaum auf die Totfaschine gewirkt hat sowie der große Winkel, dürfte zusätzlich zum Versagen dieses Bereiches beigetragen haben.

naturnahe Bauweise	Schubspannung	mittlere Geschwindigkeit
Totfaschine aus nicht ausschlagfähigem Reisig	70 - 100 N/m ²	2,5 - 3,0 m/s

6.1.3 Spreitlage

Hinsichtlich der Bauweise Spreitlage konnten keine Erkenntnisse gewonnen werden, da sie nur in einer geraden Gewässerstrecke über 20 m eingebaut wurde.



Abb. 54: Entwicklung des Ufers mit Röhricht (Aufn.: LfU 1996).

6.1.4 Röhrichtwalze und Röhrichtpflanzung

Die Bauweisen Röhrichtwalze und Röhrichtpflanzung wurden ausschließlich im Bereich 1, Aufweitungsbereich mit vier Inseln, eingesetzt. Das Mittelwasserbett weist eine geschwungene Linienführung mit starken Aufweitungen und Einengungen auf.

Schäden traten in diesem Bereich auf der linken Uferseite zwischen km 57+550 und 57+510 auf. Das Röhricht hat sich in diesem Bereich unterdurchschnittlich entwickelt und wurde teilweise durch eine Springkrautflur verdrängt. Betrachtet man die Schubspannungen in diesem Bereich, so stellt man fest, daß sich diese im Durchschnittsbereich bewegen. Die Fließgeschwindigkeiten erreichen aber in diesem Bereich mit 3,5 m/s einen Spitzenwert. Dies läßt den Schluß zu, daß die häufigen Überströmungen mit diesen hohen Fließgeschwindigkeiten in diesem Bereich die Entwicklung des Röhrichts gehemmt haben. Darüberhinaus hat die sich schnell entwickelnde Springkrautflur den Röhrichtbewuchs zusätzlich in seiner Entwicklung gehemmt. Dies führte zum Ergebnis, daß weder die instabile Springkrautflur noch die unterdurchschnittlich entwickelte Röhrichtwalze die Ufersicherung beim Hochwasser im Dezember 1993 übernehmen konnte.

Nachdem im übrigen Uferbereich, der mit der Bauweise Röhrichtwalze befestigt war, die Entwicklung wunschgemäß verlaufen ist und auch keine Schäden auftraten, kann davon ausgegangen werden, daß die anzusetzenden Schubspannungen im durchschnittlichen Bereich unter 70 N/m^2 und die Fließgeschwindigkeiten bei maximal $2,5 \text{ m/s}$ liegen dürften. Dies entspricht auch den Vorgaben im Handbuch 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim“.

naturnahe Bauweise	Schubspannung	mittlere Geschwindigkeit
Röhrichtwalze und -pflanzung	$55 - 65 \text{ N/m}^2$	$2,0 - 2,5 \text{ m/s}$

6.1.5 Rollierung und Steinwurf

Über die gesamte Umgestaltungstrecke wurde eine Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat als Übergang vom Gewässerbett zur naturnahen Bauweise und zur Böschung eingebaut. Die Rollierung wurde nicht zur Sicherung der Uferböschung oder der naturnahen Bauweise eingebracht. An den Ufervorsprüngen wurde zur Sicherung der naturnahen Bauweisen zusätzlich ein Steinwurf aus gebrochenem Material eingebaut. Schäden traten vor allem an den exponierten Stellen auf, die hydraulisch sehr stark belastet sind und an denen in kurzen Abständen ein Wechsel von Rollierung zu Steinwurf und umgekehrt erfolgt.

So wurde beim rechtsseitigen Ufervorsprung bei km $57+470$ von Rollierung auf Steinwurf, nach dem Ufervorsprung wieder auf Rollierung und 15 Meter weiter im Kanzlerstegbereich auf großen Steinwurf gewechselt. Im Anschluß an den Brückenbereich wurde wieder Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat eingebaut. Im Bereich des Wechsels von Steinwurf auf Rollierung auf großen Steinwurf entstand beim Hochwasser im Dezember 1993 ein tiefer Kolk, der auch durch den Übergang von einer Faschine mit Weidenruten zu einer Faschine begünstigt wurde (siehe Abschnitt Faschine). Abgesehen von dieser Ursache sollten Wechsel der Steinrauheiten auf kurzer Strecke vermieden werden. In diesem Fall

hätte ein Fortführen des Steinwurfes über die eingebrachten 20 m Rollierung hinaus bis zum großen Steinwurf vielleicht die Auskolkung verhindern können.

Ebenso verhält es sich mit dem Schaden zwischen km $57+160$ und $57+090$. Auch hier wurde im Bereich des Ufervorsprungs auf einer Länge von 50 Metern von Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat auf großen Steinwurf und wieder zurück gewechselt. An den jeweiligen Übergangsstellen wurde das Ufer aufgerissen, und es bildete sich eine Hinterströmung, so daß der große Steinwurf mit der anschließenden uferseitigen Bauweise „Steinwurf mit Weidenstecklingen“ als Insel im Fluß stehen blieb.

Ein weiterer Schaden trat beim rechtsseitigen Ufervorsprung bei km $56+740$ auf. Auch hier fiel der Übergangsbereich von Rollierung zu Steinwurf und wieder zurück zu Rollierung mit dem Anfangsbereich einer Totfaschine zusammen. Das Ufer wurde unterspült, so daß sich einige Uferabbrüche bilden konnten.

Zusammenfassend kann aber festgehalten werden, daß die Entscheidung, das vorhandene Sohlmaterial als Rollierung einzubauen, richtig war. Somit konnte der Einsatz von großem Steinsatz auf die extrem belasteten Bereiche und die Sicherung der Bauwerke und Brücken beschränkt werden. Kleinere Umlagerungen des rolligen Materials waren schon im Planungsstadium vorgesehen und beabsichtigt.

Bei Betrachtung der aufgetretenen Schubspannungen, der mittleren Fließgeschwindigkeiten und des wirksamen Winkels zur Uferlinie kann festgestellt werden, daß folgende Werte für die Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat (Kiesig, Korndurchmesser $0-40 \text{ mm}$, rund), für Steinwurf und großen Steinwurf angegeben werden können.

naturnahe Bauweise	Schubspannung	mittlere Geschwindigkeit
Rollierung (Kies $0 - 40 \text{ mm}$)	$70 - 100 \text{ N/m}^2$	$2,5 - 3,2 \text{ m/s}$
Steinwurf	$100 - 150 \text{ N/m}^2$	$3,5 - 4,0 \text{ m/s}$
großer Steinwurf	$> 150 \text{ N/m}^2$	$> 4,0 \text{ m/s}$

6.1.6 Rauhpäckwerk mit Rollierung

Die Bauweise Rauhpäckwerk wurde ausschließlich im Bereich der Inseln in Verbindung mit großem Steinsatz und Rollierung eingebaut. Deshalb werden unter dieser Bauweise auch die Inseln abgehandelt.

Wie bereits dargestellt wurde, sind einige Inseln bereits vor dem Hochwasser im Dezember 1993 abgetragen worden, so daß nur noch Reste der Inseln zu erkennen waren. Da aus dieser Zeit keine Schubspannungs- und zweidimensionale Fließgeschwindigkeitsberechnungen vorliegen, wird im folgenden nur auf die möglichen Versagensgründe eingegangen.



Abb. 55: Vier Inseln im Bereich 1 (Aufn.: LfU 1996).

Durch das Hochwasser im Dezember 1993 wurden die beiden hinteren noch vorhandenen Inseln im Bereich 1 im vorderen Teil abgetragen. Vom Rauhpäckwerk ist nichts mehr vorhanden. Die Schubspannungen betragen ca. 85 N/m^2 , die mittlere Geschwindigkeit ca. $2,7 \text{ m/s}$. Im Bereich 3 wurde durch das Hochwasser ebenfalls die erste Insel erodiert. Die dritte Insel ist noch vorhanden. Die Schubspannungen betragen im Bereich der ersten Insel 65 N/m^2 und im Bereich der dritten Insel 55 N/m^2 . Die zugehörigen mittleren Geschwindigkeiten lagen bei $3,3 \text{ m/s}$ und $3,0 \text{ m/s}$. Die Einzelinsel im Bereich 5 ist ebenfalls abgetragen und nur noch als Kranz zu erkennen. Hier traten Schubspannungen von 70 N/m^2 und mittlere Geschwindigkeiten von $3,2 \text{ m/s}$ auf.

Wie bereits dargestellt, wurden die Inseln bis zum Hochwasser im Dezember 1993 ca. 70 mal überflutet. Die höchsten Überflutungen wurden am 22.12.1991 mit einem Abfluß von $113 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Überflutungshöhe von 70 cm und am 23.03.1992 mit einem Abfluß von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Überflutungshöhe von 60 cm erreicht. Der

Aufbau der Inseln bestand aus Rauhpäckwerk, Steinwurf mit Weidenstecklingen und Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat. Die Weidenstecklinge im Steinwurf waren unterdurchschnittlich entwickelt.

Gründe für die starken Umlagerungen im Bereich der Inseln:

► Das Rauhpäckwerk soll mit dem geplanten Böschungsknick zur Sohle genau abschließen. Somit findet eine Einbindung in die Flußsohle nicht statt. Darüberhinaus verlaufen im Böschungsknick zur Sohle die Ausläufer der Äste, d.h. die dünnen, nicht dicht verlegten Astspitzen. Aber gerade im Anschlußbereich der Inseln an die Sohle ist die Einbindung in den Untergrund besonders wichtig. Dies heißt, daß am Böschungsknick die Äste in die Sohle einzubinden sind und auf das Rauhpäckwerk Steinmaterial mit größerer Kantenlänge und Gewicht einzubauen ist.

► Das Rauhpäckwerk soll die Ablage von Pflanzenteilen und Sedimenten ermöglichen und einen Besiedlungsraum für Pflanzen und Kleinlebewesen schaffen. Dies setzt voraus, daß diese Bauweise vom Wasser gut durchströmt und die Geschwindigkeit zur Sedimentablagerung reduziert wird. Deshalb sollte vor allem gebrochenes Steinmaterial (gute Durchströmung und Verzahnung) zur Abdeckung der Reisigäste verwendet werden. Bei der Ausformung der Inseln und der Sicherung der Bauweise Rauhpäckwerk wurde im Mittelwasserbereich überwiegend eine Rollierung aus vorhandenem Sohlsubstrat mit einem maximalen Gewicht von 10 kg/Stein eingebracht.



Abb. 56: Drei Inseln im Bereich 3 (Aufn.: LfU 1996).

► Im Anschluß an das Rauhpäckwerk wurde Rollierung aus vorhandenem Sohls substrat und zum Teil noch Steinwurf mit Weidenstecklingen eingebracht. Wie auch neuere Modelluntersuchungen an Inseln zeigen, wird eine erhebliche Belastung der Inseloberfläche schon bei geringer Überströmung sichtbar. Dies kann soweit führen, daß auf der Insel sogar ein Fließwechsel stattfinden kann. Die gewünschte Umlagerung im hinteren Bereich der Inseln war hierdurch so stark, daß die Inseln von hinten nach vorne abgetragen wurden und teilweise nur noch Steinkränze aus der Einbindung in die Sohle und dem Steinwurf, der mit Weidenstecklingen besetzt war, übrig blieben.

► Die Weidenstecklinge, die in den Steinwurf eingebracht wurden, waren unterdurchschnittlich entwickelt. Es muß davon ausgegangen werden, daß die häufige Überströmung die Entwicklung der Weiden fortlaufend gestört bzw. gehemmt hat.

► Die aus dem Hochwasser im Dezember 1993 berechneten Schubspannungen und mittleren Geschwindigkeiten zeigen, daß hohe Schubspannungen und durchschnittliche mittlere Geschwindigkeiten das gleiche Ergebnis erzielen wie durchschnittliche Schubspannungen und hohe mittlere Geschwindigkeiten. Es kann davon ausgegangen werden, daß für den Abtrag der Inseln (also des rolligen Steinmaterials) die mittlere Geschwindigkeit verantwortlich ist. Bei Verwendung von schwererem gebrochenem Steinmaterial zur Sicherung der gesamten Insel dürften die Umlagerungen kontrollierbar und die höheren Geschwindigkeiten verträglich sein. Die Schubspannungen hingegen dürften einen Hinweis auch auf die Stabilität der Bauweise Rauhpäckwerk geben. Aus den Übersichten zu den Schubspannungen in den drei Inselbereichen kann ersehen werden, daß Werte von 55 N/m^2 bis 130 N/m^2 auftreten. In allen Versagensfällen der Sicherung der Inseln zeigt sich, daß die Erosion am Inselende begonnen hat und der Inselanfang, was auch die noch vorhandenen Steinkränze andeuten, am längsten den Belastungen standgehalten hat.

Eine abschließende Bewertung der Bauweise Rauhpäckwerk ist nicht möglich, da sie nicht für die Schäden an den Inseln verantwortlich gemacht werden kann. Die im Handbuch Wasser 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim -“ angegebene mittlere Geschwindigkeit von 4 m/s wurde an keiner Insel erreicht. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß bei der Verwendung von gebrochenem Steinmaterial zur Herstellung der gesamten Insel eine mittlere Geschwindigkeit von $3,5 \text{ m/s}$ bis 4 m/s von der Bauweise Rauhpäckwerk aufgenommen werden kann. Auch die Aufnahme der maximal auftretenden Schubspannungen von 130 N/m^2 durch diese Bauweise erscheint durchaus realistisch zu sein. Ob Schubspannungen bis 250 N/m^2 (BEGEMANN/SCHIECHTL 1986) aufgenommen werden können, kann am Pilotprojekt Enz/Pforzheim bisher nicht beurteilt werden.

naturnahe Bauweise	Schubspannung	mittlere Geschwindigkeit
Rauhpäckwerk mit Rollierung	bis 150 N/m^2	$3,5 - 4 \text{ m/s}$



Abb. 57: Einzelinsel im Bereich 5 (Aufn.: LfU 1996).

6.1.7 Weidenstecklinge und Steckhölzer

Die Bereiche Steinwurf mit Weidenstecklingen bzw. Steckhölzern haben sich sehr unterschiedlich entwickelt. So haben sich die Weidenstecklinge oberhalb der Umgestaltungsmaßnahme sehr gut entwickelt und bildeten schon beim Hochwasser im Dezember 1993 einen wirksamen Uferschutz. Dabei ist zu berücksichtigen, daß durch die gestreckte Linienführung in diesem Bereich keine außergewöhnlichen hydraulischen Schub- und Geschwindigkeitsbelastungen auftraten, die die Entwicklung des Bewuchses hätten behindern können.

Im Umgestaltungsgebiet wurden vor allem die Ufervorsprünge mit dieser Bauweise zusätzlich gesichert. Hier haben sich die Weidenstecklinge alle unterdurchschnittlich entwickelt. Trotzdem traten durch die Grundsicherung „Steinwurf“ bei den Hochwässern im Beobachtungszeitraum von 1991 bis 1995 keine Schäden an dieser Bauweise auf. Im Bereich dieser Bauweise traten Schubspannungen bis 100 N/m^2 und mittlere Geschwindigkeiten bis $4,5 \text{ m/s}$ auf. Die Schäden entstanden im Übergangsbereich der Bauweise „Steinwurf mit Weidenstecklingen“ zur Uferböschung aus Gras. Hier wurden mittlere Geschwindigkeiten von ca. $3,5 \text{ m/s}$ ermittelt.



Abb. 58: Uferschäden bei km 57+100 (Aufn.: Universität Karlsruhe 1994).

Die auf den Inseln mit dieser Bauweise gesicherten Bereiche wurden erodiert und können daher nicht zur Beurteilung herangezogen werden.

Es kann davon ausgegangen werden, daß der im Handbuch Wasser 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim -“ angegebene Richtwert für die mittlere Geschwindigkeit von $3,5 \text{ m/s}$ durch die Grundsicherung aus Steinwurf gewährleistet wird. Es muß aber auch berücksichtigt werden, daß der Einsatz dieser Bauweise in Bereichen mit hohen hydraulischen Belastungen / hohen mittleren Geschwindigkeiten die Entwicklung der Pflanzen beeinträchtigt und somit eine erheblich längere Entwicklungszeit angesetzt werden muß. Für diese Bauweise können bei Verwendung von gebrochenem Steinmaterial, die Schubspannungen und mittleren Geschwindigkeiten der Bauweise „Steinwurf“ herangezogen werden.

Der Übergang vom Steinwurf mit Weidenstecklingen zur Böschung mit Gras darf nicht hart und linienförmig sein. Um dieses zu vermeiden könnte ein abgestufter Steinwurf zur Böschung hin unter Berücksichtigung von Pflanzgruppen oder in Richtung der Böschungfalllinie eingebaute Faschinen mit ausschlagfähigem Material zur Sicherung beitragen.

Zusammenfassend kann für diese Bauweise als Richtwert angesetzt werden:

naturnahen Bauweise	Schubspannung	mittlere Geschwindigkeit
Steinwurf mit Weidenstecklingen	100 - 150	3,0 - 3,5 m/s

6.1.8 Schotterrassen / Grassaat / Grassoden

An den Unterhaltungswegen, die mit Schotterrassen gesichert wurden, traten nach dem Hochwasser im Dezember 1993 einige erhebliche Schäden auf. Gründe für diese Schäden dürften vor allem die relativ hohen Schubspannungen, in Verbindung mit den im linken Unterhaltungsweg vorhandenen glatten Oberflächen von Beton-schächten sein. Der durch das eingebrachte Steinmaterial in den Schotterrassen reduzierte Wurzelverbund der Einsaat trägt noch zusätzlich zu Destabilisierung bei.

Somit wird deutlich, daß der Schadensgrund nicht in der Bauweise „Schotterrassen“ begründet ist, sondern die Betonflächen im Unterhaltungsweg und somit die Rauheitswechsel zwischen Beton und Schotterrassen für die Schäden verantwortlich sind. Diese Schäden können wenigstens zum Teil, durch eine massivere Grundsicherung mit Steinwurf und einer Schotterrassenverfüllung gemindert werden. Diese Bauweise garantiert wenigstens, daß der Weg weiterhin befahrbar und nicht wie an der Enz bis zu $0,70 \text{ m}$ ausgewaschen wird.

naturnahe Bauweise	Schubspannung	mittlere Geschwindigkeit
Schotterrassen	30 N/m^2	$1,5 \text{ m/s}$
Grassaat	40 N/m^2	$1,8 \text{ m/s}$
Grassoden	$> 60 \text{ N/m}^2$	$> 3,5 \text{ m/s}$

6.2 Zusammenwirken der verschiedenen Bauweisen

6.2.1 Mittelwasserbett

Zusammenfassend kann die Umgestaltung der Enz in Pforzheim als aus wasserbaulicher Sicht gelungenes Beispiel einer naturnahen Umgestaltung eines Fließgewässers bezeichnet werden. Sicher ist das Gewässer z.T. von den Vorgaben der Planer und Verantwortlichen abgewichen und es sind auch zum Teil erheblich größere Umlagerungen aufgetreten als geplant, aber die dynamische Eigenentwicklung des Gewässers hat auch zu neuen Erkenntnissen in der Umgestaltung von Fließgewässern geführt. Um solche Erkenntnisse zu erhalten, wurde diese Umgestaltung der Enz als Pilotprojekt des Landes Baden-Württemberg eingestuft. Mit einem hohen meßtechnischen Untersuchungsaufwand, wurden schwerpunktmäßig Daten zur Gewässergeomorphologie und zur Gewässerhydraulik gesammelt und ausgewertet. Diese Untersuchungen wurden durch das im Dezember 1993 abgelaufene Bemessungshochwasser wesentlich unterstützt.

Wie bereits beschrieben, sind für die Stabilität des Mittelwasserbetts und der naturnahen Bauweisen eine ganze Reihe von Einzelfaktoren wie Linienführung, Bauausführung, Entwicklung der Vegetation und die hydraulischen Belastungen der Bauweisen maßgebend. Einzelparameter gefährden die Stabilität der Bauweisen in der Regel nicht, aber im Verbund können diese zu Schäden führen.

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, daß vor allem die Linienführung und die Entwicklung der Vegetation die Stabilität der Bauweisen ganz erheblich beeinflusst. So kann oberhalb des Umgestaltungsbereiches, in dem ausgebauten, gestreckten Gewässerabschnitt nachgewiesen werden, daß bei Schubspannungen von ca. 80 N/m^2 und Fließgeschwindigkeiten von $3,5 \text{ m/s}$ die Entwicklung der Vegetation wunschgemäß erfolgte und keine Schäden beim Hochwasser eingetreten sind. Betrachtet man den unregelmäßigen mit wechselnden Böschungneigungen umgestalteten Enzabschnitt, so muß festgestellt werden, daß bei gleichen Schubspannungen und Geschwindigkeiten der Bewuchs unterentwickelt ist und das Hochwasser im Dezember 1993 bereits Umlagerungen bzw. Schäden verursachte.

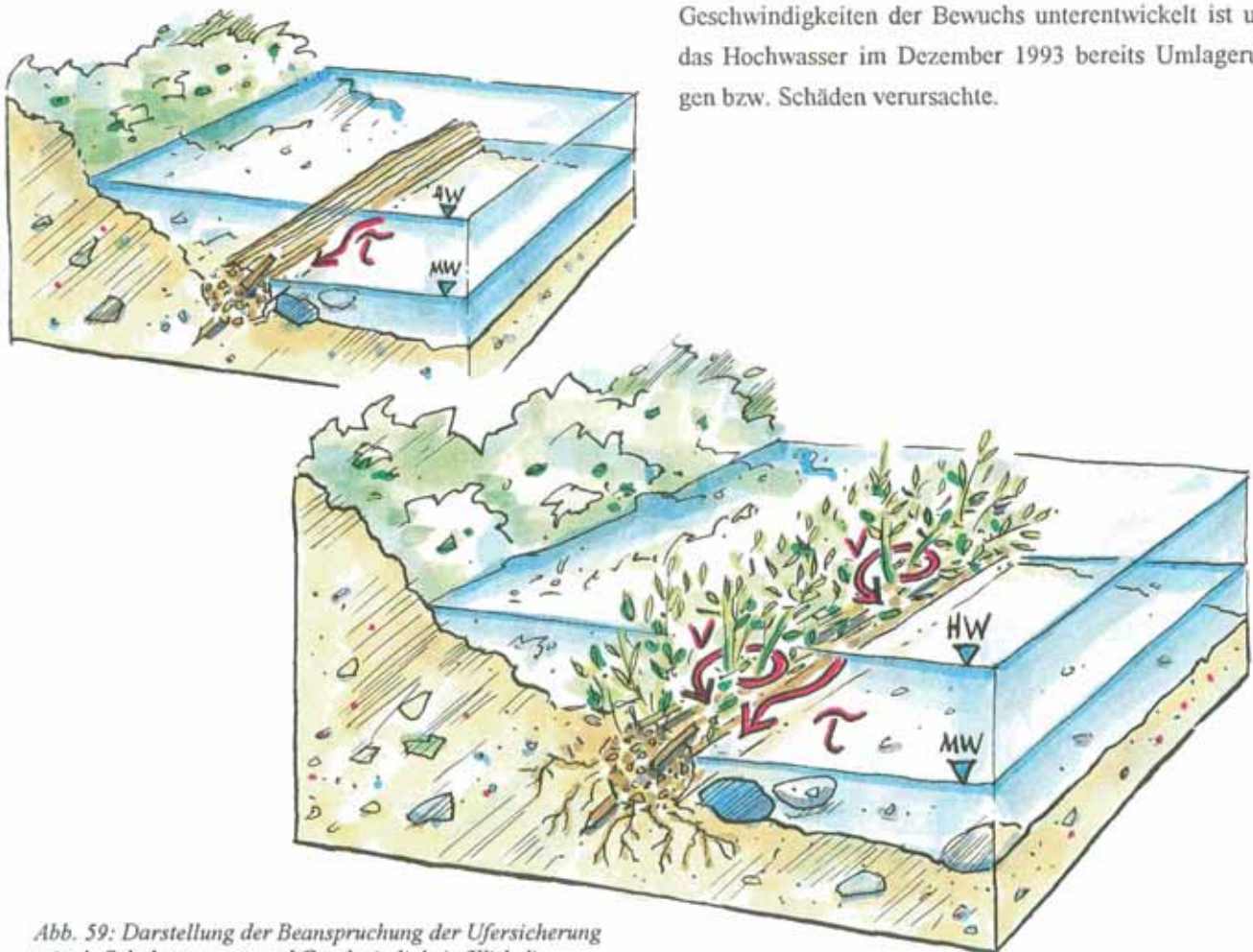


Abb. 59: Darstellung der Beanspruchung der Ufersicherung mittels Schubspannung und Geschwindigkeit (Wirbel).

Besonders gefährdet sind hierbei die Ufervorsprünge. Sie sind durch die extremen Belastungen und vor allem durch die bis zu einem Winkel von 40° zur Uferlinie angreifenden Fließgeschwindigkeiten nur sehr schwierig vor Umlagerungen zu sichern. Die vielen kleineren und größeren Überflutungen beeinflussen die Entwicklung der Vegetation und die naturnahen Bauweisen. Auch darf in diesem Zusammenhang das Zusammenspiel der Kräfte aus Schubspannungen auf den Sohlbereich bzw. Wurzelbereich der Pflanzen und der mittleren Fließgeschwindigkeiten auf die Triebe der im Gewässer stehenden Pflanzen nicht unterschätzt werden.

An den stark beschädigten Stellen ist grundsätzlich einer der beiden Faktoren Schubspannung oder Geschwindigkeit außergewöhnlich groß und der andere gegenüber dem Durchschnitt leicht erhöht gewesen. Erschwerend kommt noch der außergewöhnlich große Winkel hinzu, unter dem die Strömung auf den Ufervorsprung getroffen ist. Alle diese Faktoren führten zu starken Turbulenzen und somit zu weiteren hydraulischen Belastungen im Bereich der Bauweise.

Darüberhinaus muß auch auf die gewonnenen Erkenntnisse für den Einbau und die Einbindung der naturnahen Bauweisen in das anschließende Gelände eingegangen werden. Es zeigte sich beim Hochwasser im Dezember 1993, daß vor allem zwischen den Bauweisen und der daran anschließenden Böschung und an den Übergängen von einer zur anderen Bauweise Erosionen auftraten, die dann sogar zu erheblichen Umlagerungen bzw. Schäden führten.

Deshalb sollte darauf geachtet werden, daß die einzelnen Bauweisen untereinander und miteinander verbunden werden. Das heißt zum einen, daß Faschinen aus ausschlagfähigem Material und aus nicht ausschlagfähigem Reisig endlos herzustellen sind und auch endlos miteinander zu verbinden sind. Ebenso verhält es sich mit den Übergängen zur Röhrichtwalze und zum Steinwurf mit Weidenstecklingen. Das Ende bzw. der Anfang der Gestaltungsstrecke mit naturnahen Bauweisen ist in einer geraden Gerinnestrecke zu wählen und mit Steinwurf zusätzlich zu sichern.

Der Erosion zwischen Bauweise und Böschung kann durch eine unregelmäßige Bewuchslinie begegnet werden. Dies kann erreicht werden in dem zum Beispiel in bestimmten Abständen (z.B. 3-5 m, je nach Größe des Gewässers) unterschiedlich lange Ruten oder Rutenbüschel aus den Faschinen mit ausschlagfähigem Material in die Böschung eingebunden werden. Auch die Bepflanzung mit Röhrichtballen, Busch- oder Baumgruppen im Anschluß an die Bauweise, wie im Handbuch Wasser 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim“ dargestellt, trägt zu einer unregelmäßigen Bewuchslinie bei und vermindert somit die Gefahr einer linienförmigen Erosion zwischen Bauweise und Böschung. Die Umlagerungen und Schäden waren in den Bereichen mit anschließender Bepflanzung erheblich geringer.

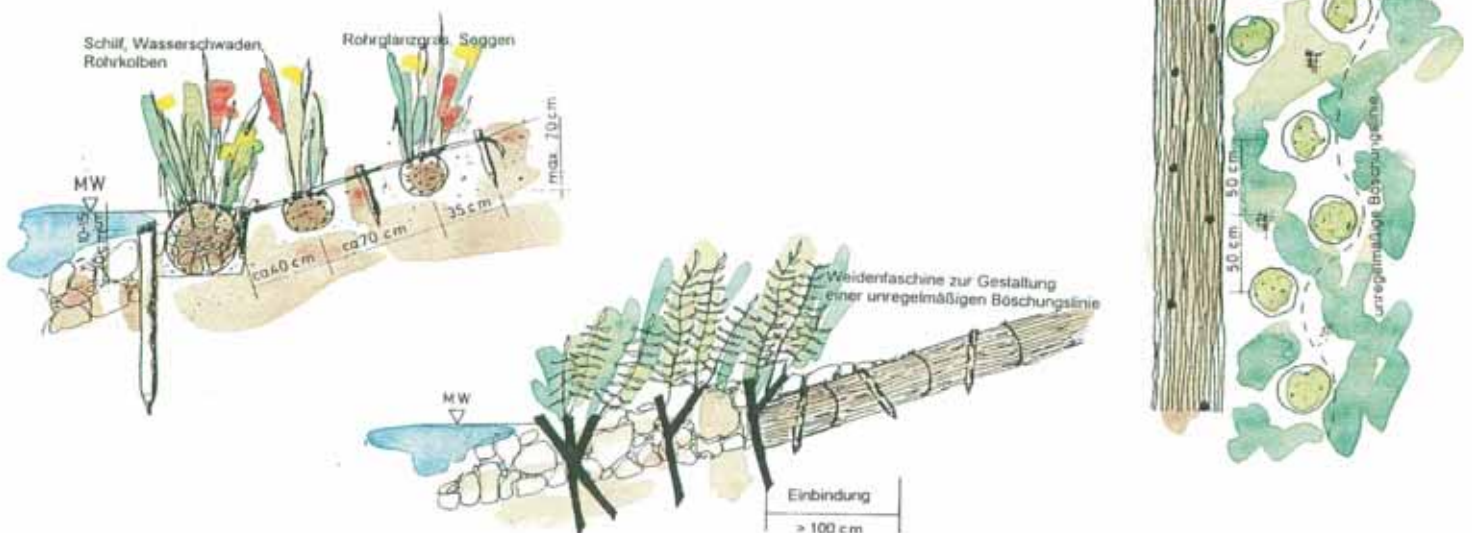


Abb. 60: Beispiel für die Anordnung von Weidenstecklingen und Röhricht.

6.2.2 Inseln

Wie bereits beschrieben, sind die Umlagerungen und Schäden an den Inseln am gravierendsten. Von insgesamt 8 angelegten Inseln ist nur noch eine Insel im ursprünglichen Zustand vorhanden. Alle anderen Inseln wurden entweder ganz oder teilweise abgetragen. Die Betrachtung der Schubspannungen und der Geschwindigkeiten während des Hochwassers im Dezember 1993 zeigen erhöhte Werte im Bereich der Inselgruppen. Die einzige Insel, bei der beide Faktoren zusammengenommen in einem durchschnittlichen Bereich liegen, ist die dritte Insel der zweiten Inselgruppe und damit jene Insel, die als einzige nach dem Hochwasser vom Dezember 1993 in einem guten Zustand war. Die ursprünglich vorgesehene und zugelassenen Umlagerungen im hinteren Teil der Inseln haben sich somit nicht wunschgemäß eingestellt.

Die Gründe für die Umlagerungen bzw. die Erosion der Inseln wurden bereits beschrieben. Als Ergebnis kann festgehalten werden, daß die Kräfte, Geschwindigkeiten und Turbulenzen es erfordern, die Inseln zumindest in ihrer Grundform stabil zu befestigen. Dies bedeutet, daß für die Sicherung nur wenige Bauweisen in Frage kommen und diese auch sehr sorgfältig ausgeführt werden müssen. Aber gerade die sorgfältige und genaue Ausführung ist ohne Wasserhaltung besonders schwierig.

Die Inseln sollten in ihrer Grundstruktur mit vorhandenem Sohlssubstrat hergestellt werden. Zur Sicherung der gesamten Insel sollte das Prallufer mit Rauhpackwerk, entsprechend den Vorgaben, wie im Handbuch Wasser 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim“ beschrieben, mit einem Steinwurf in einer Stärke von 50 bis 80 cm versehen werden. Daran nahtlos anschließend sollte auf der Inseloberfläche und im hinteren Teil der Insel ein Steinwurf mit Weidenstecklingen oder mit einer Röhrichtpflanzung eingebracht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß zum Anwurzeln bzw. Anwachsen der Weidenstecklinge und der Röhrichtpflanzung bewurzelungsfähiges Material (z.B. durchwurzelungsfähiger Oberboden) in den Steinwurf mit eingebracht werden muß. Es muß davon ausgegangen werden, daß die Entwicklung der Weidenstecklinge oder der Röhrichtpflanzung auf den Inseln durch die ungünstigen strömungsbedingten Belastungen wesentlich länger dauern wird als an der Uferlinie im Böschungsbereich. Um die Stabilität der Inseln bis zur Übernahme dieser Funktion durch den Bewuchs zu gewährleisten, muß die Primärsicherung durch gebrochenes Steinwurfmaterial erfolgen. Die gesamte Insel sollte mit einem großen Steinwurf bzw. Steinsatz in die Sohle des Gewässers eingebunden werden.

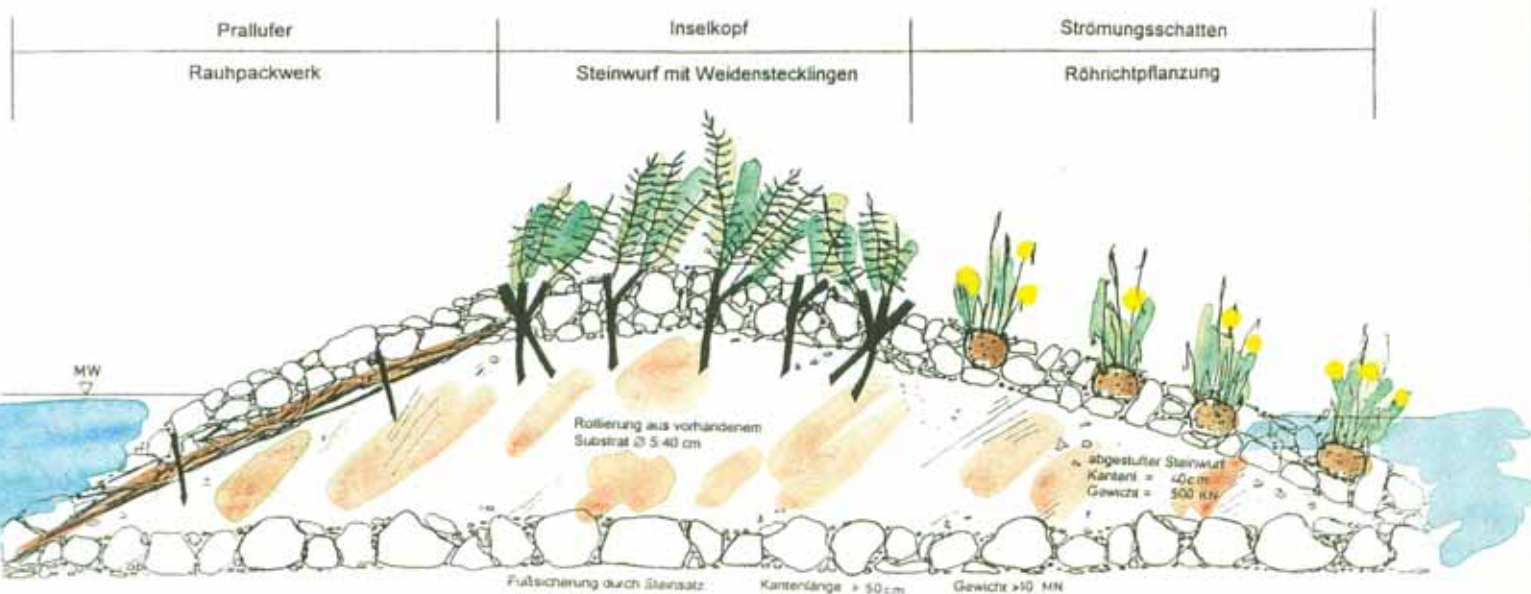


Abb. 61: Beispiel für naturnahe Sicherung von Inseln (Längsschnitt).

7 Zusammenfassung und weitere Entwicklung

Insgesamt zeigt sich, daß die im Handbuch Wasser 2, Heft 2 „Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim“ angegebenen Richtwerte (Maximalwerte) für die Geschwindigkeiten eingehalten wurden. Diese Richtwerte werden um die von den naturnahen Bauweisen aufnehmbaren Schubspannungen ergänzt (siehe Tabelle 9). Der in der Tabelle beschriebene höhere Wert ist für gerade Gewässerstrecken und der niedrigere Wert für exponierte hydraulisch stark belastete Gewässerstrecken oder -punkte anzuwenden. Die Angabe nur eines Faktors, Schubspannung oder Geschwindigkeit, ist nicht zu empfehlen.

In Tabelle 9 werden die gebräuchlichen Literaturangaben zur Stabilität naturnaher Bauweisen dargestellt und um die Ergebnisse aus dem Pilotprojekt Enz / Pforzheim ergänzt.

Die Landesanstalt für Umweltschutz wird das auf zehn Jahre angelegte Untersuchungsprogramm zu den naturnahen Bauweisen fortführen.



Abb. 62: Naturnahe Entwicklung der Enz (Aufn.: LfU 1996).

Ufersicherungsmaßnahme	Quelle	aufnehmbare Schubspannung N/m ²	aufnehmbare Geschwindigkeit m/s
Rasen	EVED (1982)	50 - 80	-.-
	Johannsen (1988)	20	-.-
Rasen, kurze Überflutungszeit	Begemann & Schiechl (1986)	20 - 30	-.-
lange Überflutungszeit		15 - 18	-.-
Grassaat	Handbuch Wasser 2, Heft 25 (1996)	40	1,8
Grassoden		> 60	> 3,5
Schotterrasen		30	1,5
Röhrichtwalze	Begemann & Schiechl (1986)	50	-.-
Röhrichtwalze und - pflanzung	Handbuch Wasser 2, Heft 25 (1996)	55 - 65	2,0 - 2,5
Weidenfaschine, Senkfaschine, Reisiglagen	Johannsen (1988)	60	-.-
Wurzeln von Weiden und Erlen		60	-.-
Faschinen	Begemann & Schiechl (1986)	60	-.-
	Rössert (1988)	70	-.-
Faschinenwalze mit ausschlagfähigen Weiden	Handbuch Wasser 2, Heft 25 (1996)	100 - 150	3,0 - 3,5
Totfaschinen aus nicht ausschlagfähigem Reisig	Handbuch Wasser 2, Heft 25 (1996)	70 - 100	2,5 - 3,0
Weiden / Erlen	EVED (1982)	80 - 140	-.-
Natursteinblöcke mit Weidenstecklingen	EVED (1982)	> 140	-.-
Roterlenpflanzung mit Reisiglage	Johannsen (1982)	50 - 150	-.-
Weidenspreitlage	Johannsen (1982)	100 - 200	-.-
	Begemann & Schiechl (1986)	150 - 300	-.-
Faschinenwalze mit Spreitlage	Handbuch Wasser 2, Heft 2 (1991)	-.-	3,5 - 4,0
Steinwurf mit Weidenstecklingen	Handbuch Wasser 2, Heft 25 (1996)	100 - 150	3,0 - 3,5
Rauhpackwerk mit Rollierung	Handbuch Wasser 2, Heft 25 (1996)	< 150	3,5 - 4,0
großer Steinwurf	Rössert (1988)	240	-.-
großer Steinsatz	Johannsen (1982)	150	-.-
Rollierung (Kies 0 - 50 mm) Steinwurf großer Steinwurf	Handbuch Wasser 2, Heft 25 (1996)	70 - 100	2,5 - 3,2
		100 - 150	3,5 - 4,0
		> 150	> 4,0

Tab. 9: Schubspannungen und mittlere Geschwindigkeiten für naturnahe Bauweisen.

Literaturübersicht

Veröffentlicht

- ANSELM, R.** (1986): Bauweisen und Kosten naturnaher Umgestaltungen. Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- BAUDIREKTION DES KANTONS BERN** (1988): Ingenieurbiologische Uferverbauungen - Bauweisen und Beispiele im Kanton Bern, Bern.
- BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM DES INNERN** (1989): Flüsse-Bäche-Auen pflegen und gestalten, München.
- BEGEMANN, W. & SCHIECHTL, H.M.** (1986): Ingenieurbiologie. Handbuch zum naturnahen Wasser und Erdbau, Bauverlag Wiesbaden und Berlin.
- BEGEMANN, W., SCHIECHTL, H.M.** (1986): Ingenieurbiologie - Handbuch zum naturnahen Wasser- und Erdbau, Bauverlag Wiesbaden und Berlin.
- BESTMANN, L.** (1984): Praktische Verwendung lebender Baustoffe und technische Möglichkeiten. In Wasser und Boden 1/1984, S. 20-23.
- BINDER, W., JÜRGING, P., & KARL, J.** (1983): Naturnaher Wasserbau - Merkmale und Grenzen. In Garten und Landschaft 93, 1983, Heft 2, S. 91-94.
- BINDER, W., u.a.** (1986): Fließgewässer-Erhalten, Pflegen, Gestalten. Deutscher Naturschutzring (DNR), 24 S., Bonn.
- BITTMANN, E.** (1965): Grundlagen und Methoden des biologischen Wasserbaus. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz: Der biologische Wasserbau an den Bundeswasserstraßen. S. 17-78, Stuttgart.
- BREUERS, H.G.** (1985): Naturnahe Umgestaltung und Unterhaltung von Gewässern in Hessen. In: Wasser und Boden 37, 1985, Heft 12, S. 605-607.
- CHMELAR, J., MEUSEL, W.** (1986): Die Weiden Europas, Wittenberg Lutherstadt.
- DVWK** (1984): Ökologische Aspekte bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern - Merkblatt Nr. 204, Hamburg und Berlin.
- ELLENBERG, H.** (1982): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen, Stuttgart.
- EVED, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartment** (1982): Hochwasserschutz an Fließgewässern, Begleitung 1982; Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach 2743, 3001 Bern.
- HEMPHILL, R.W.; BRAMLEY, M.E.** (1989): Protection of Rivers and Canal Banks, Butterworths, London, ISBN 0-408-03945-0.
- JOHANNSEN, R.** (1982): Zur Wirkung ingenieurbiologischer Bauweisen am Beispiel lebender Uferdeckwerke im Flußbau; aus: Ingenieurbiologie, Uferschutzwald am Fließgewässer, Jahrbuch 1980 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie, Karl Krämer Verlag Stuttgart.
- JOHANNSEN, R.** (1988): Ingenieurbiologische Ufersicherung des Schwalbaches bei Ensdorf im Saarland - Planung, Bauausführung und Entwicklung; Jahrbuch 3 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie, Sepia Verlag, Aachen; S. 190-203.
- KLAUSING, O.** (1973): Vegetationsbau an Gewässern. Hessische Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden.
- KRAUSE, A.** (1987): Bewuchs an Wasserläufen. AID Broschüre Nr. 1087, Bonn Bad Godesberg.
- LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL, NRW** (1984): Fließgewässer-Richtlinien für naturnahen Ausbau und Unterhaltung, Düsseldorf.
- LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL, NRW** (1986): Bäche und Flüsse naturnah. In: LWA-Schriftenreihe, Heft 43, Düsseldorf.
- LAUTENSCHLAGER, E.** (1989): Die Weiden der Schweiz.
- MESSMER, F.** (1982): Baum und Strauch als Bau- und ökologisches Element an Fließgewässern. In: Pflug, W. (1982): Ingenieurbiologie-Uferschutzwald an Fließgewässern. S. 17-28, Stuttgart.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG** (1990): Naturgemäße Gestaltung von Fließgewässern. Handbuch Wasserbau, Heft 3, Stuttgart.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG** (1993): Naturgemäße Bauweisen, Ufer- und Böschungssicherungen. In Handbuch Wasserbau, Heft 5, Stuttgart.
- OBENDORFER, E.** (1977): Süddeutsche Pflanzengesellschaften. Teile I, II und III, Stuttgart, Jena.
- OBENDORFER, E.** (1979): Pflanzensoziologische Exkursionsflora, Stuttgart.
- PFLUG, W.** (1982): Ingenieurbiologie- Uferschutzwald an Fließgewässern. Jahrbuch 1980 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V. Stuttgart.
- PRÜCKNER, R.** (1965): Die Technik der Lebendverbauung. Ein Leitfaden der Ingenieurbiologie für Schutzwasserbau, Forstwesen und Landschaftsschutz.
- RÖSSERT, R.** (1988): Hydraulik im Wasserbau, R. Oldenbourg Verlag München Wien.
- ROUVE, G.** (1986): Gewässerausbau. Vorträge Wasserbau-Seminar WS 1985/86, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TH Aachen, Aachen.
- ROUVE, G.** (1988): Wasserbau und Landschaftspflege. Vorträge Wasserbau-Seminar WS 1987/88, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TH Aachen, Aachen.

SCHAUER, T., CASPARI, C. (1982): Der große BLV Pflanzenführer, München.

SCHIECHTL, H.M. (1973): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau, Innsbruck.

SCHLÜTER, U. (1971): Lebendbau-Ingenieurbiologische Bauweisen und lebende Baustoffe, Hannover.

VOLGMANN, W. (1978): Landschaftsbau, Stuttgart.

WOLF, H. (1977): Naturgemäßer Gewässerausbau - Erfahrungen und Beispiele aus Baden-Württemberg. In Veröffentlichungen Naturschutz und Landschaftspflege Baden-Württemberg, 46, S. 259-320, Karlsruhe.

ZENTRALER FACHDIENST WASSER- ABFALL - ALTLASTEN BEI DER LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1991); Handbuch Wasser 2, Heft 2: Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim.

Unveröffentlicht

HAMMANN DE SALAZAR, K., DITTRICH, A., DU, C. (1994): Bewertung der naturnahen Bauweisen an der Enz nach dem Hochwasser vom Dezember 1993; Bericht des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, SG 41.2.

INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KULTURTECHNIK, UNIVERSITÄT KARLSRUHE (1991): Hochwassersituation am Wehr Wieblingen - Untersuchungen über den Einfluß von Änderungen des Unterwasserstandes auf den Hochwasserabfluß im Bereich Heidelberg; Im Auftrag des Regierungspräsidiums Karlsruhe, Abteilung V, Wasserwirtschaft, der Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege Karlsruhe und der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest, Mainz.

INSTITUT FÜR LANDSCHAFTS- UND PFLANZENÖKOLOGIE, UNIVERSITÄT HOHENHEIM (1993): Karten zur Vegetationsstruktur - Renaturierung der Enz in Pforzheim; Auftraggeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

Handbuch Wasserbau Baden-Württemberg

Herausgeber: Umweltministerium Baden-Württemberg

<i>Band</i>	<i>Titel</i>	<i>Jahr der Herausgabe</i>	<i>Preis (falls lieferbar)</i>
1	Gewässerausbau Wasserbaumerkblatt* Beschreibung ausgewählter Gewässerstrecken	1986	vergriffen
2	Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern Teil I: Leitfaden Teil II: Dokumentation ausgewählter Projekte	1992	25,- DM
3	Naturgemäße Gestaltung von Fließgewässern Kolloquium am 3. Mai 1990 in Karlsruhe	1990	vergriffen
4	Methodologische Untersuchungen zur Feuchteindikation von Biotopen auf der Basis von Bodenkäfergesellschaften	1990	20,- DM
5	Naturgemäße Bauweisen Ufer- und Böschungssicherungen	1993	20,- DM
6	Gehölze an Fließgewässern Gehölzverwendung für die Entwicklung naturnaher Ufergehölzsäume	1994	25,- DM

*) derzeit in Neubearbeitung

Diese Reihe wird fortgeführt als Veröffentlichungen des Zentralen Fachdienstes Wasser-Boden-Abfall-Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg/Handbuch Wasser 2.

Handbuch Wasser 2

Veröffentlichungen des Zentralen Fachdienstes Wasser-Boden-Abfall-Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (ISSN 0941-780X), Handbuch Wasser 2 (ISSN 0946-0675)

<i>Band</i>	<i>Titel</i>	<i>Jahr der Herausgabe</i>	<i>Preis (falls lieferbar)</i>
1	Gewässerkundliche Beschreibung Abflußjahr 1990	1991	30,- DM
2	Bauweisen des naturnahen Wasserbaus Umgestaltung der Enz in Pforzheim	1991	30,- DM
3	Gewässerentwicklungsplanung - Leitlinien -	1992	30,- DM
4	Übersichtskartierung der morphologischen Naturnähe von Fließgewässern - Vorinformation -	1992	vergriffen
5	Regionalisierung hydrologischer Parameter für N-A-Berechnungen - Grundlagenbericht - - Programmdiskette -	1992	50,- DM 40,- DM
6	Ökologie der Fließgewässer Niedrigwasser 1991	1992	40,- DM
7	Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung - Arbeitsanleitung - - Programmdiskette -	1993	50,- DM 40,- DM
8	Verkrautung von Fließgewässern Einflußfaktoren, Wechselwirkungen, Kontrollmaßnahmen	1993	21,- DM

9	Gewässerkundliche Beschreibung Abflußjahr 1992	1993	30,- DM
10	Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern I. Erprobung ausgewählter Methoden	1994	30,- DM
11	Gewässerrandstreifen Voraussetzung für die naturnahe Entwicklung der Gewässer	1994	30,- DM
12	Gewässerkundliche Beschreibung Hochwasser Dezember 1993	1994	25,- DM
13	Handbuch der stehenden Gewässer in Baden-Württemberg Regierungsbezirke Freiburg, Karlsruhe und Stuttgart	1994	25,- DM
14	Handbuch der stehenden Gewässer in Baden-Württemberg Regierungsbezirk Tübingen	1994	25,- DM
15	Übersichtskartierung des morphologischen Zustands der Fließgewässer in Baden-Württemberg 1992/93	1994	25,- DM
16	Umweltverträglichkeitsprüfung bei Wasserbauvorhaben nach § 31 WHG. Leitfaden Teil I: Verfahren	1994	25,- DM
17	Morphologischer Zustand der Fließgewässer in Baden-Württemberg Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Übersichtskartierung 1992/93	1995	25,- DM
18	Kontrolle des Japan-Knöterichs an Fließgewässern. II. Untersuchungen zu Biologie und Ökologie der neophytischen Knöterich-Arten	1995	30,- DM
19	Gesamtkonzept Naturnahe Unterhaltung von Fließgewässern Möglichkeiten, Techniken, Perspektiven	1995	15,- DM
20	Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern Teil III Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben, Erste Zwischenergebnisse der Erfolgskontrolle	1995	30,- DM
21	Umweltverträglichkeitsprüfung bei Wasserbauvorhaben nach § 31 WHG. Leitfaden Teil III: Bestimmung des Untersuchungsrahmens, Untersuchungsmethoden	1995	25,- DM
22	Schadstoffdatei Rhein Dokumentation	1996	15,- DM
23	Qualitative Beschaffenheit der Fließgewässer in Baden-Württemberg während des Hochwassers im Januar 1995	1996	15,- DM
24	Schwermetalle in den Sedimenten der Fließgewässer Baden-Württembergs	1996	15,- DM
25	Bauweisen des naturnahen Wasserbaus Dokumentation und Bewertung am Pilotprojekt Enz/Pforzheim 1990-1995	1996	21,- DM
26	Gütebericht 1994	1996	15,- DM

27	Das Abflußjahr 1994 - ein Hochwasserjahr	1996	30,- DM
28	Gewässergeometrie	1996	30,- DM
29	Meßnetz-Zentrale, Meßnetzprogramm	1996	30,- DM
30	Pappeln an Fließgewässern Historische Hintergründe, Bestimmung, Verwendung und ökologische Problematik - Literaturstudie	1996	30,- DM
31	Rechtsgrundlagen der Gewässerunterhaltung Teil I Überblick	1996	15,- DM
32	Naturgemäße Bauweisen Unterhaltungsmaßnahmen nach Hochwasserereignis- sen	1996	15,- DM

