

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Hydraulik naturnaher Fließgewässer

Empfehlungen zur naturnahen Entwicklung ausgebauter Fließgewässer
in Ortslagen unter besonderer Berücksichtigung des Hochwasserschutzes

von

Dr.-Ing. Boris Lehmann, apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Helmut Bernhart und
univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Förderkennzeichen: BWC 21019

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Februar 2005

Kurzfassung

Ziel der Arbeit ist es, Empfehlungen bzgl. einer naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Bereich zu geben. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf der hydraulisch-morphologischen Prognose insbesondere für Bäche und kleine Flüsse mit vegetationsbestandenen Ufern und/oder Vorländern. Die Arbeit ist somit nicht als Grundlagenuntersuchung einzuordnen – vielmehr werden ganzheitlich und interdisziplinär die Wechselwirkungen des Strömungsverhaltens, der Morphodynamik und des sog. „naturnahen Wasserbaus“ berücksichtigt

Mit Hilfe der erarbeiteten **Methodik zur hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer** können die derzeitigen turbulenz-theoretischen Ansätze einfach und dank der Umsetzung in einem EDV-Berechnungsmodul auch transparent angewendet werden. Simulationen der Vegetationsentwicklung und die Berechnung der daraus resultierenden strömungsmechanischen Auswirkungen sind so mit guter Genauigkeit möglich. Somit werden in diesen Fällen Berechnungsverfahren mit empirischen Beiwerten, die i.d.R. bei solchen Fragestellungen abgeschätzt werden müssen, hinfällig.

Die aus physikalischen Modellversuchen abgeleiteten **Empfehlungen bezüglich der Vegetationsanordnung und –pflege** entlang naturnaher Gewässerläufe sollen insbesondere bei der Planung und Unterhaltung eine ergänzende Rolle zu den landschaftsplanerischen und gartenbautechnischen Aspekten spielen. Die Arbeit erläutert ein spezielles Versuchskonzept, welches in der Synthese mit Naturbeobachtungen realer Entwicklungsprozesse zu allgemeinen Empfehlungen führt, die einen wesentlichen Beitrag für die Praxis leisten.

Ein zusammengestellter **Pool an Naturmessdaten** wird anderen Wissenschaftlern als wertvolle Datenquelle dienen. Die plausibilisierten und aufbereiteten Daten, die durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg während eines zehnjährigen Untersuchungszeitraumes (1992 bis 2002) an der renaturierten innerstädtischen Fließgewässerstrecke Pforzheim/Enz erhoben wurden, sind weltweit einmalig. Durch die im Rahmen der Arbeit erfolgte Sortierung und Archivierung steht dieser Datenpool nun weiteren Untersuchungen offen.

Die Ergebnisse der Arbeit sollten nun durch entsprechende Schulungen und anwenderbezogene Veröffentlichungen der Fachwelt zugänglich gemacht werden. Hierzu ist bereits in Absprache mit der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg für den Herbst 2005 eine landesweite Schulung in Vorbereitung.

Für Fragestellungen der Gewässerentwicklungs- und –unterhaltungsplanung bietet die Arbeit sowohl eine Methodik zur hydraulischen Prognose bewuchsbestandener Ufer- und Vorlandbereiche (z.B. für Hochwasserprognosen) als auch einen Empfehlungskatalog zur Gehölzanordnung und –pflege.

Abstract

The objective of this work is to provide recommendations for nature-orientated development of water bodies in urban areas. The main focus is on the hydraulic-morphological prognosis especially for streams and small rivers with vegetated banks and/or forelands. Consequently this thesis is not just a basic analysis – it is more a holistic and interdisciplinary consideration of the interdependency of the behaviour of currents, it's morphodynamic and the so-called nature-orientated hydraulic engineering:

With the help of the acquired method of the hydraulic calculation of nature-orientated streams and the realisation by a computer application module the present turbulence-theoretical approach can be used transparently. The simulation of the development of the vegetation and the calculation of the resulting fluid mechanical consequences are much more precise. This means that the cases with mainly guessed empirical coefficients are no longer needed.

The recommendations concerning the alignment and maintenance of vegetation along nature-orientated streams taken from physical model experiments should complement the landscaping and gardening aspects. This thesis describes a special experiment concept. In synthesising nature observations and real development processes this leads to general recommendations for practical work.

A compiled pool of natural measuring data will serve other scientists as valuable data. The plausible and preprocessed data that was collected during ten years (1992 till 2002) by the Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Regional Environmental Protection Office of Baden-Württemberg) at the renaturalisation of the urban stretch of the stream Pforzheim/ Enz is unique. The sorting and archiving that was part of this work sets a data pool for further research.

Inhalt

Einleitung: Gewässerentwicklung in Kulturlandschaften.....	1
1 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	6
2 Anforderungen der naturnahen Gewässerentwicklung	11
2.1 Interdisziplinäres Arbeitsgebiet	11
2.2 Anforderungen der Gewässerentwicklung in urbanen Bereichen	22
2.2.1 Anforderungen an das Management urbaner Fließgewässer.....	23
2.2.2 Relevante Planungsgrößen	27
2.2.3 Gewässerkosmetik	29
2.2.4 Ökologische Ansprüche der gewässerspezifischen Teillebensräume	30
2.3 Planungsmethodik: Regimeansatz – Leitbild – Restriktionsanalyse	38
2.3.1 Gewässermorphologische Merkmale und Eigenschaften	38
2.3.2 Regimeansatz und -gleichungen	42
2.3.3 Methodik der Gewässerentwicklungsplanung	46
3 Grundlagen zur Gewässerentwicklungsplanung.....	54
3.1 Hydraulik naturnaher Fließgewässer.....	57
3.1.1 Grundlagen der eindimensionalen Strömungsanalyse	57
3.1.1.1 Gleichförmige Strömung.....	57
3.1.1.2 Stark-ungleichförmige Strömung	58
3.1.1.3 Leicht ungleichförmige Strömung.....	60
3.1.1.4 Empirische Fließformeln.....	63
3.1.1.5 Universelle Fließformel.....	65
3.1.1.6 Berechnung der Wasserspiegellage.....	67
3.1.1.7 Dimensionsanalytische Betrachtung der Anwendungsbereiche	69
3.1.2 Quantifizierung der Strömungswiderstände.....	74
3.1.2.1 Widerstand infolge Oberflächenrauheit (λ_O)	76
3.1.2.2 Widerstand infolge Vegetation ($\lambda_{veg,Ü}$ oder $\lambda_{veg,D}$).....	78
3.1.2.3 Widerstand infolge von Interaktionsprozessen (λ_I oder λ_T)	86

3.1.3	Probleme bei der praktischen Umsetzung	102
3.1.3.1	Abstraktion und Parametrisierung der realen Situation.....	102
3.1.3.2	Quantifizierung der Strömungswiderstände	106
3.1.3.3	Anwendung der Fließformeln	111
3.2	Feststofftransport und Gewässermorphologie	113
3.2.1	Feststofftransport in Fließgewässern	114
3.2.2	Berücksichtigung einer heterogenen Feststoffzusammensetzung	116
3.2.3	Transportansätze (Exemplarischer Überblick)	117
3.2.3.1	Ansatz nach Meyer-Peter und Müller (1948)	117
3.2.3.2	Ansatz nach Engelund und Hansen (1967)	120
3.2.3.3	Ansatz nach Ackers und White (1973).....	121
3.2.3.4	Ansatz nach Van Rijn (1984)	123
3.2.3.5	Ansatz nach Hunziker (1995).....	124
3.2.3.6	Ansatz nach Wu (2000)	126
3.2.4	Beschreibung der gewässermorphologischen Entwicklung	128
3.3	Gewässerunterhaltungsmethodik	134
3.3.1	Aufgaben der Gewässerunterhaltung	134
3.3.2	Unterhaltungsmaßnahmen	136
3.3.3	Gewässerunterhaltungsplan	136
3.3.4	Ergänzende Empfehlungen	137

4 Empfehlungen zur Strömungsberechnung 140

4.1	Schritt 1: Gerinnegliederung und Parametererfassung.....	145
4.1.1	Gliederung infolge der Gerinnegeometrie	145
4.1.2	Gliederung infolge der Vegetation.....	148
4.2	Schritt 2: Berechnung der Teilwiderstandsbeiwerte.....	156
4.2.1	Widerstandsbeiwert infolge der Oberflächenrauheit	156
4.2.2	Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen der Vegetationssektionen.	157
4.2.3	Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen der vegetationsfreien Sektionen	162
4.3	Schritt 3: Berechnung des Durchfluss	167
4.4	Anwendungsbeispiel.....	168

5 Empfehlungen zur Vegetationsanordnung	176
5.1 Interaktion Strömung – Vegetation – Feststofftransport.....	177
5.2 Weiterführende qualitative Untersuchungen an einem Modell	179
5.2.1 Modelltechnische Grundlagen	179
5.2.2 Modellaufbau und Kalibrierung.....	183
5.2.3 Versuchsdurchführung	188
5.3 Analyse der Modellergebnisse und Ableitung von Empfehlungen	188
6 Naturuntersuchung mit Verfahrensanwendung	193
6.1 Untersuchungsgebiet „Landespiplotmessstrecke Pforzheim/Enz“	193
6.2 Datengrundlage	203
6.3 Dokumentation der Gewässerentwicklung (bisherige Untersuchungen)...	210
6.4 Hydraulische Berechnungen	217
6.5 Gewässermorphologische Untersuchungen	225
6.6 Diskussion der Ergebnisse.....	228
7 Zusammenfassung.....	230
Literatur	233
Anlagen	

Abbildungen

Abb. 0.1: Begradigte Alb (links) und Albdurchlass am Rheindamm (rechts)	2
Abb. 1.1: Sedimentation von Feinsanden im bewuchsbestandenen Uferbereich	7
Abb. 1.2: Aufbau der Arbeit vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung	8
Abb. 2.1: Flusskorrektur um 1713 (Aus: Landesbibliothek der Stadt Kassel).....	14
Abb. 2.2: Interdisziplinäre Verknüpfungen in der naturnahen Gewässerentwicklung.	15
Abb. 2.3: Links: Lageplan der künstlichen Inselgruppe. Rechts: Aufnahme der Inselgruppe.....	16
Abb. 2.4: Vergleich der Gerinnegeometrie zwischen 1992 und 1998 im Profil 33000.	17
Abb. 2.5: Darstellung von Luftbildern aus den Jahren 1992.....	18
Abb. 2.6: Verklausung einzelner Weiden und Bäume auf dem Vorland der Enz	18
Abb. 2.7: Feinsande, die sich während eines Hochwassers im Strömungsschatten der Uferweiden abgelagert haben	19
Abb. 2.8: Bewuchsentwicklung an der renaturierten Enz in Pforzheim.....	20
Abb. 2.9: Änderung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung infolge der Bewuchsentwicklung	21
Abb. 2.10: Die ausgebaute Murg bei Gernsbach im nördlichen Schwarzwald.....	22
Abb. 2.11: Auswirkungen des Landschaftswandels auf das Abflussverhalten eines Fließgewässers	24
Abb. 2.12: Der Neckar bei Heidelberg als Satellitenaufnahme.....	25
Abb. 2.13: Renaturierte Alb in Karlsruhe.....	26
Abb. 2.14: Gewässerkosmetik ohne wirkliche Verbesserung der gewässerökologischen Merkmale	29
Abb. 2.15: Sohlensicherung durch den Einbau eines sohlendurchgängigen Querriegels in aufgelöster Bauweise	32
Abb. 2.16: Der renaturierte Schlierbach im Allgäu.....	33
Abb. 2.17: Uferabbruch an der unteren Alb bei Karlsruhe-Daxlanden	34
Abb. 2.18: Die als Doppeltreppprofil ausgebaute Murr bei Gaggenau im Kreis Rastatt	36
Abb. 2.19: Gewässernaher Unterhaltungsweg, der zugleich als Spazier- und Erlebnispfad gestaltet wurde	37
Abb. 2.20: Gewässermorphologische Gleichgewichtszustände nach Chorley und Kennedy (1971).....	40
Abb. 2.21: Links: „Planunterlagen“ zum Bau der künstlichen Inseln und der Gerinneaufweitung.	41
Abb. 2.22: Darstellung der Entwicklung der Inselgrößen über die Zeit.....	41
Abb. 2.23: Lage der einzelnen Zustandsformen eines Gewässerabschnittes relativ zur Naturnähe.	49
Abb. 3.1: Schaubild zur Gliederung der Fluidmechanik.	55
Abb. 3.2: Strömungsverhältnisse in einem Gerinne mit Störkörper. (verändert nach Nestmann, 2002).....	59
Abb. 3.3: Prinzipskizze zur Energiehöhenbilanz beim leicht ungleichförmigen Strömungsverhalten.....	63
Abb. 3.4: Der Widerstandsbeiwert λ als Funktion der relativen Überdeckung h/k_s . (verändert nach Kirono und Graf, 1992).....	67
Abb. 3.5: Moody-Diagramm als graphische Beziehung zwischen λ und Re. (Naudascher, 1992)	73
Abb. 3.6: Darstellung der Strömungswiderstände bei einem naturnahen Gerinne.	75
Abb. 3.7: Klassifikation der Strömungswiderstände bei gewässernaher Vegetation.	79
Abb. 3.8: Zur Definition der Nachlauflänge und -breite. (Verändert nach Pasche, 1984).....	83
Abb. 3.9: Typische Verformung einer vollständig untergetauchten Weide bei verschiedenen Fließgeschwindigkeiten	84
Abb. 3.10: Skizze zur Typisierung der Einzelwiderstände bei gegliederten Gerinnen.	86
Abb. 3.11: Sektionierung eines Querschnittes mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten. (Verändert nach Horton, 1933)	87
Abb. 3.12: Visualisierte Oberflächenströmung bei den Versuchen von Sellin (1964).	89
Abb. 3.13: Queraustausch nach dem Interaktionsmodell von Kaiser (1984).....	90
Abb. 3.14: Interaktionsmodell nach Knight und Shiono (1990).....	91
Abb. 3.15: Aufbau der Versuche von Kaiser (1984).	94
Abb. 3.16: Aufbau der Versuche von Pasche (1984).	96
Abb. 3.17: Aufbau der Versuche von Bertram (1985).....	98
Abb. 3.18: Entwicklung der ufernahen Vegetation (jeweils Breite und Höhe) an der renaturierten Enz bei Pforzheim.....	104
Abb. 3.19: Schematische Darstellung der Abstraktion eines naturnahen Gewässerabschnittes	105
Abb. 3.20: Aus Naturmessdaten rückgerechneter Verlauf des Strickler-Beiwertes für das Hauptgerinne	107
Abb. 3.21: Kalibrierung der k_{st} -Werte an unterschiedlichen Gewässerabschnitten	108
Abb. 3.22: Vergleich von Fotoaufnahmen zur Dokumentation der Bewuchsentwicklung im Verlauf von zwölf Jahren	109
Abb. 3.23: Änderung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung (oben) und der k_{st} -Werte (unten)	110
Abb. 3.24: Darstellung der Zusammenhänge beim Feststofftransport in Fließgewässern.	114
Abb. 3.25: Sandige Gewässersohle der Alb bei Ettlingen mit Transportkörpern (Ripple).	116
Abb. 3.26: Zusammenspiel beteiligter Fachdisziplinen bei der gewässermorphologischen Entwicklung.	129
Abb. 3.27: Vergleich der geometrischen Differenzenmodelle.....	132
Abb. 3.28: Verlandung des Uferbereiches durch Sedimentation feiner Sande nach einem mittleren Hochwasser	133
Abb. 3.29: Skizze zur Verdeutlichung der Aufgaben der Gewässerunterhaltung.	135
Abb. 3.30: Anlandung von Feststoffen im Bereich einer Gerinneaufweitung unterhalb einer Wehranlage	139
Abb. 4.1: Exemplarische Klassifizierung naturnaher Fließgewässerquerschnitte anhand der Strömungswiderstände	142
Abb. 4.2: Dreistufiges Ablaufkonzept zur eindimensionalen Strömungsberechnung naturnaher Gewässer.	144
Abb. 4.3: Abstraktion einer realen Sektionsgeometrie als Sektion mit einheitlicher hydraulischer Fließtiefe.....	147
Abb. 4.4: Exemplarische Darstellung der geometrischen Gliederung eines Gewässerquerschnittes.	147
Abb. 4.5: Einteilung vegetationsbestandener Querschnitte in unterschiedliche hydraulische Einflussbereiche.	149
Abb. 4.6: Skizze zur Erläuterung des äquivalenten Vegetationsdurchmessers. (verändert nach DVWK, 1991).....	151
Abb. 4.7: Exemplarische Gerinnegliederung infolge Vegetation.	155

Abb. 4.8: Ablaufdiagramm zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes und der Strömungsgrößen.....	161
Abb. 4.9: Ablaufdiagramm zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes und der Strömungsgrößen.....	166
Abb. 4.10: Ablaufdiagramm zur Berechnung des Gesamtdurchfluss in einem naturnahen Gewässerquerschnitt.....	168
Abb. 4.11: Querschnitt und Draufsicht auf den betrachteten Gerinneabschnitt. (Verändert nach DVWK, 1991).....	169
Abb. 4.12: Gliederung des Querschnittes infolge der Geometrie und der Vegetation.	170
Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Interaktion zwischen Strömung, Vegetation und Feststofftransport.....	177
Abb. 5.2: Eckpunkte und exemplarische Schnittstellen in einem physikalischen Modell.....	180
Abb. 5.3: Skizze zum hydraulischen und sedimentologischen Zeitmaßstab. (Verändert nach Nestmann, 1992).....	183
Abb. 5.4: Lage des Modellgebietes Pforzheim/Enz (rechteckige Markierung).....	183
Abb. 5.5: Schematische Darstellung der Versuchsrinne.....	184
Abb. 5.6: Fotodokumentation der Laborrinne während des Bauzustandes.....	185
Abb. 5.7: Modell nach dem Einstellen der Querschnitte (links) und nach dem Einkieseln (rechts).....	186
Abb. 5.8: Simulation der Vegetation durch Astmaterial und künstliche Koniferen.	187
Abb. 5.9: Vergleich der Sedimentationsfelder nach einem Hochwasserereignis.....	187
Abb. 5.10: Wuchsformen und –höhen europäischer Weiden. (Schiechl, 2002).....	191
Abb. 5.11: Kolkerscheinung und Verlandungsbild um einen umströmten Stamm. (Schneider).....	192
Abb. 6.1: Darstellung des Untersuchungsgebietes mit der Lage der Messpegel 1 bis 5. (Verändert nach LfU, 1995).....	197
Abb. 6.2: Dokumentation der Entwicklung anhand standortgleicher Fotoaufnahmen.....	198
Abb. 6.3: Blick entlang des Bereich 1 mit Vegetation im unbelaubten Zustand.....	199
Abb. 6.4: Blick entgegen Fließrichtung zum Bereich 2. Aufnahme vom Juli 2003.	199
Abb. 6.5: Blick in Fließrichtung entlang des Bereiches 3. Unbelaubter Zustand.....	200
Abb. 6.6: Blick entgegen Fließrichtung entlang des oberen Teil von Bereich 4.....	201
Abb. 6.7: Blick in Fließrichtung entlang des Bereich 5. Aufnahme vom Juli 2003.	201
Abb. 6.8: Blick nach Oberstrom zum Bereich 6, der sich von der Pegelschwelle (Bildmitte) nach Oberwasser erstreckt.	202
Abb. 6.9: Blick in Fließrichtung entlang Bereich 7.	203
Abb. 6.10: Schematischer Aufbau der Datenbank für eine gezielte Datenzusammenführung von Naturmessdaten.....	207
Abb. 6.11: Bei der Datenübertragung zu berücksichtigende Faktoren.....	208
Abb. 6.12: Jahresweise Wasserstands-Abfluss-Beziehung am Sonderpegel 3 nach der Datenplausibilisierung.	209
Abb. 6.13: Korrelation zwischen den Wasserständen an den Sonderpegeln und am Landespegel.	209
Abb. 6.14 Darstellung der im Rahmen der Plausibilisierung als „falsch“ gekennzeichneten Messungen.....	210
Abb. 6.15: Abflussganglinie am Landespegel Pforzheim-Kläranlage während des Sommers 1999.	219
Abb. 6.16: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 1 bei Enz-km 57+970.	220
Abb. 6.17: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 1 bei Enz-km 57+443.	221
Abb. 6.18: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 1 bei Enz-km 57+094.	222
Abb. 6.19: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 1 bei Enz-km 56+934.	223
Abb. 6.20: Darstellung der Wasserspiegellagen beim Bemessungsabfluss $BQ = 540 \text{ m}^3/\text{s}$	224
Abb. 6.21: Morphologische Entwicklungen in den Bereichen 1 und 2. (Schneider und Lehmann).....	225
Abb. 6.22: Morphologische Entwicklungen in den Bereichen 3 und 4. (Schneider und Lehmann).....	226
Abb. 6.23: Morphologische Entwicklungen in den Bereichen 5 und 6. (Schneider und Lehmann).....	227
Abb. 6.24: Morphologische Entwicklungen im Bereich 7. (Schneider und Lehmann).....	228

Tabellen

Tab. 2.1: Ökologische Bedeutung der umgebenden Gehölze für die Fließgewässer.	13
Tab. 2.2: Einflüsse auf die Gewässerentwicklungsplanung für Fließgewässer im urbanen Bereich.....	27
Tab. 2.3: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Freifließendes Wasser“	30
Tab. 2.4: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Gewässersohle“	31
Tab. 2.5: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Ufer und Uferstrandstreifen“	32
Tab. 2.6: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Vorländer und Deiche“	35
Tab. 2.7: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Nebengewässer“	37
Tab. 2.8: Regime-Gleichungen, deren Anwendungsbereiche und Faktoren und Exponenten.....	45
Tab. 2.9: Verfahren zur Konstruktion des hpn-Zustandes.	50
Tab. 2.10: „Wegweiser“ durch die Gewässerentwicklungsplanung.	53
Tab. 3.1: Orientierungswerte für die äquivalente Sandrauheit k_s (nach Zanke, 1982 und Dittrich, 1998).	78
Tab. 3.2: Definition von Teilbereichen in einem gegliederten Gerinne. (nach DFG, 1987)	94
Tab. 3.3: Koeffizienten nach Ackers und White (1973)	122
Tab. 3.4: Maßnahmen zur Gewässerunterhaltung (in Anlehnung an Lehmann und Schneider, 2004).....	136
Tab. 4.1: Aus Naturmessungen abgeleitete äquivalente Vegetationsparameter (vgl. DVWK, 1991).....	152
Tab. 4.2: Berechnungsmatrix für Sektion 1.	171
Tab. 4.3: Berechnungsmatrix für Sektion 2.	172
Tab. 4.4: Berechnungsmatrix für Sektion 3.	173
Tab. 4.5: Matrix zur Berechnung des Gesamtdurchfluss.....	174
Tab. 4.6: Berechnungsergebnisse zum zweiten Berechnungslauf.....	175
Tab. 4.7: Berechnungsergebnisse zum zweiten Berechnungslauf.....	175
Tab. 6.1: Gewässerbeschreibung der Enz bei Pforzheim.	194
Tab. 6.2: Strukturmerkmale vor und nach der naturnahen Umgestaltung.....	195
Tab. 6.3: Daten zu den Sonderpegeln im Untersuchungsgebiet Pforzheim/Enz (vgl. auch Abb. 6.1)	203
Tab. 6.4: Zeitlicher Rahmen zur Datenerfassung an der Pilotstrecke Pforzheim/Enz.....	204
Tab. 6.5: Fachlicher Rahmen zur Datenerfassung an der Pilotstrecke Pforzheim/Enz.....	205

patentia — virtus — spes

In der römischen Kaiserzeit wirkte der Ingenieur Nonius Datus. Er war verantwortlich für den Bau zahlreicher Wasserleitungen, welche das Römische Reich mit Wasser versorgten. Unter anderem plante und baute Datus für eine Wasserüberleitung nach Rom ca. 150 n. Chr. einen aufwendigen Bergdurchstich. Eine in Stein gehauene Inschrift berichtet noch heute über das Bauprojekt. Über dieser Inschrift versinnbildlichen drei weibliche Reliefköpfe die Tugenden und Eigenschaften, die ein Wasserbaumeister vereinen sollte: Ausdauer (patentia), Tüchtigkeit (virtus) und Hoffnung (spes).

Einleitung: Gewässerentwicklung in Kulturlandschaften

Fließgewässer bestimmen maßgeblich das Wirkungsfeld zwischen Mensch und Umwelt. Gewässer sind die bedeutendste Grundressource der Natur und, wie die Geschichte zeigt, auch ein wesentlicher Faktor bei der Besiedlung der Erde und der Entwicklung menschlicher Kulturen.

Bereits in der frühen Menschheitsgeschichte bildete das Netzwerk oberirdischer Fließgewässersysteme eine günstige Ausgangsbasis zur Gründung von Siedlungen und zur Entfaltung wirtschaftlicher Tätigkeiten. Die Fließgewässer wurden in wachsendem Maße den menschlichen Bedürfnissen angepasst und zu Siedlungsbändern und Gewerbegeassen umgenutzt. Dabei wurde ihr ursprüngliches Funktions- und Erscheinungsbild stark verändert: Aus Naturlandschaften wurden Kulturlandschaften.

Zu den naturgegebenen hydraulischen, morphologischen und ökologischen Bestimmungen eines Fließgewässers traten weitere Aufgaben als Trink- und Brauchwasserspender, Fisch- und Rohstofflieferant (z.B. Kies, Sand, usw.), Energiespender, Transport- und Verkehrsweg und nicht zuletzt als Entsorgungspfad für Abwässer und Abfälle hinzu. Um diese Anforderungen an das Fließgewässer bewerkstelligen zu können, bediente sich die Wasserwirtschaft¹ der diversen Methoden des Wasserbaus². Anhand der in Deutschland stattgefundenen Entwicklung angewandter wasserbaulicher Methoden, wie sie z.B. in Fachbüchern und Lehrmaterialien dargestellt sind, soll in dieser Einleitung die Thematik der Gewässerentwicklung in Kulturlandschaften dokumentiert werden.

In den 1950er Jahren waren im Wasserbau in Deutschland u.a. die Fachbücher von Heinrich Press dominierend. Ein Lehrbuch „Flussbau“ oder „Gewässerentwicklung“ gab es zu dieser Zeit nicht; diese Thematik wurde z.B. in dem Buch „Binnenwasserstraßen und Häfen“ (Press, 1956) und „Wehre“ (Press, 1959) mit abgehandelt. Selbst noch im Jahr 1987 erschien ein Buch „Wasserbauten aus Beton“ (Blind, 1987), wodurch ersichtlich wird, mit welchen Materialien damals im Flussbau gearbeitet wurde. In diesen Lehrbüchern wird der wasserwirtschaftliche Eingriff in die Natur und die

¹ Wasserwirtschaft: Zielbewusste ordnende menschliche Einwirkung auf das ober- und unterirdische Wasser in Bezug auf Menge, Güte und Biologie.

² Wasserbau: baulicher Eingriff des Menschen zur Regelung des Wasserhaushaltes.

infolge der wasserbaulichen Maßnahmen entstandenen Auswirkungen auf die Gewässermorphologie und -ökologie nicht explizit behandelt. Lediglich der Begriff „schöne Landschaft“ wird erwähnt, d.h. auf die Einbindung der wasserbaulichen Maßnahmen in die Umgebung muss geachtet werden.

Das Ergebnis dieser nutzungsorientierten Baumaßnahmen lässt sich am Beispiel der unteren Alb³ bei Karlsruhe dokumentieren:



Abb. 0.1: Begradigte Alb (links) und Albdurchlass am Rheindamm (rechts).

In **Abb. 0.1** (links) ist die Alb im Bereich der Raffinerien bei Karlsruhe (ca. 1,5 km vor der Einmündung in den Rhein) dargestellt. Sie verläuft durch einen Ausbau unnatürlich geradlinig in einem Querschnitt mit Doppeltrapezform, wodurch Hochwasserabflüsse auf engstem Raum sehr schnell abgeführt werden können. Infolge massiver Steinschüttungen entlang der Uferlinien werden morphodynamische Gewässerbettentwicklungen verhindert; der fehlende Uferbewuchs bewirkt fehlende Beschattung und somit eine massive Zunahme des aquatischen Bewuchses, woraus u.a. durch den Sauerstoffgehalt im Wasser lebensraumfeindliche Bedingungen für die Gewässerfauna entstehen.

Etwas weiter stromabwärts kreuzt die Alb vor der Einmündung in den Rhein den Rheindamm (**Abb. 0.1**, rechts). Im betongefassten Durchlass stellen sich durch die Wasserspiegeldifferenzen vor und hinter dem Bauwerk sowie aufgrund der glatten Bauwerkssohle sehr hohe Fließgeschwindigkeiten ein. Dadurch wird das Einwandern von Fischen und aquatischen Benthosorganismen nahezu verhindert – das Erreichen der artentypischen Laichhabitate im Oberlauf der Alb wird durch solche Längs- und Querbauwerke stark eingeschränkt.

In den 1960er und 1970er Jahren wurden solche wasserbaulichen Eingriffe zunehmend als nicht mehr erträglich empfunden. Ausdruck dieser gesellschaftlichen Entwicklung ist das Bundesnaturschutzgesetz in seiner Fassung vom 20.12.1976:

³ Die Alb ist ein im nördlicher Schwarzwald entspringender Zufluss zum Rhein, der die Städte Ettlingen und Karlsruhe durchfließt.

- §1: Natur und Landschaft sind in allen besiedelten und unbesiedelten Bereichen zu pflegen und zu schützen...
- §8: Dem Versuch eines Eingriffs ist zu verpflichten, vermeidbare Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft zu unterlassen, sowie vermeidbare Beeinträchtigungen innerhalb einer bestimmten Frist durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege auszugleichen...

Diese Eingriffs- und Ausgleichsregelung, welche später durch das Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung noch ergänzt wurde, änderte die Methodik und die an wasserbauliche Maßnahmen zu stellenden Anforderungen grundlegend. Die neueren Lehrbücher wie z.B.

- „Gewässerregelung und Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern“ (Lange und Lecher, 1986)
- „Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung. Geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern“ (Kern, 1994)
- „Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern“ (Patt, Jürging und Krauss, 1998)
- „Naturnaher Wasserbau. Anleitung für ingenieurbioologische Bauweisen“ (Schiechtl und Stern, 2002)

tragen dieser Entwicklung Rechnung. Im Flussbau ist weniger vom „Bau“ als vielmehr vom „Rückbau“ die Rede. Es geht um Begriffe wie „Renaturierung“ und „Dynamisierung“ des Gewässers und es soll wieder mehr Raum für natürliche Gewässerentwicklung geschaffen werden.

Durch die Ausweisung von Uferrandstreifen soll das Biotopangebot (im Sinne einer Biotopvernetzung) erhöht und der Konflikt mit dem Anlieger (z.B. Landwirtschaft) verringert werden. Die „ökologische Durchgängigkeit“ der Fließgewässer wird zu einer Hauptforderung, die mit neuen wasserbaulichen Maßnahmen realisiert werden kann (z.B. der Umbau eines Absturzes in eine Raue Rampe). Eine linienhafte Betrachtung der Fließgewässer ist nicht mehr ausreichend, weil sich die Natur nicht nur auf das schmale Band des Gewässers begrenzt, sondern netzwerkartig mit dem Umland verknüpft ist.

In der Vergangenheit waren Flussbaumaßnahmen auf den Erhalt des Zustandes des ausgebauten Gewässers ausgerichtet und oft lokal bedingt. Erodierete Uferabschnitte wurden mit Deckwerken stabilisiert, Kolke zurückgebaut, Bewuchs beseitigt, etc.. Historisch gab es staatliche Rahmenplanungen, die in ihrer Wirkung auch weit über die Region hinaus Auswirkungen hatten. Beispielsweise sei hier an Johann Gottfried Tulla erinnert, dessen Pläne bezüglich der Korrektur des Oberrheines in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts weitreichende länderübergreifende Auswirkungen hatten (Mosonyi, 1970). Neue historische Erkenntnisse zeigen auf, dass die Unterlieger am Rhein (Preußische Strombauverwaltung) seinerzeit bereits sehr konkret die Auswir-

kungen der Tulla'schen Maßnahmen auf die Flussmorphologie und die Hochwassersituation einschätzten und entsprechend reagierten (Bernhardt, 2003).

Ab Mitte der 1950er Jahren nahm die Wasserwirtschaftsverwaltung in Form von „Generalplänen“ und „Rahmenplänen“ sehr umfassend den Bestand an Fließgewässern bundesweit auf. Dabei wurde bereits ganz modern im Sinne der Nachhaltigkeit gedacht: Auch heute noch bieten diese Planwerke eine Fülle von Informationen zum Bestand, zur Planung und zur Umsetzung⁴.

Beachtlich ist auch, mit welchen einfachen ingenieurmäßigen Abschätzungen recht praktikable und passende Lösungen erarbeitet wurden. Mit Hilfe der Auswertung von Wasserspiegellagen vergangener Hochwasserereignisse im Neckartal konnte so z.B. die Trassierung der Bahnlinie durchgeführt werden – bis heute ist bei Hochwasser noch nie ein Zug wegen Überflutung im Neckartal ausgefallen. Ein weiteres Beispiel ist der Generalplan zum Ausbau der hessischen Diemel, aus dem u.a. das damalige Konzept zum Hochwasserschutz deutlich wird: Man beschränkte sich im Wesentlichen auf den Bau von Talsperren und Rückhaltebecken sowie auf Querschnittserweiterungen in gefährdeten Ortslagen und den Bau von Deichen und Mauern (HMLU, 1972).

Das Beispiel des Diemel-Ausbaus zeigt den zeitbedingten großen Nachteil dieser Planwerke auf: Die im Bundesnaturschutzgesetz in den 1980er Jahren geforderte Eingriffs- und Ausgleichsbetrachtung fehlt in solchen Planungen gänzlich. Hieraus resultierte häufig ein Stoppen der Planumsetzungen.

Das „Pendel der Wasserwirtschaft“ schlug somit in den 1980er Jahren zur anderen Seite hin aus: Es wurden Planungen aufgestellt, die eine sehr starke Ausrichtung auf die Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes hatten und zusammenfassend als „ökologische Entwicklungskonzepte“ bezeichnet werden können.

Aus den ersten Beobachtungen und Erfahrungen bei repräsentativen Projekten dieser Art wurde als bundesweites Merkblatt die Schrift des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau „Fluss und Landschaft – Ökologische Entwicklungskonzepte“ (DVWK, 1996) entwickelt.

Ein gewisser Abschluss dieser Entwicklung wurde mit der Verabschiedung der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union erreicht (Richtlinie des Europ. Parlaments, 2000). Diese hat aktuell und zukünftig starke Auswirkungen auf die wasserwirtschaftliche Praxis: In ihr wird ein „Flussgebietsmanagement“ mit dem Ziel, einen „guten ökologischen Zustand“ bis zum Jahr 2015 zu erreichen, gefordert.

Aus einem Gebietsmanagement resultiert der Anspruch von Wasserwirtschaft und Naturschutz, nicht mehr nur die schmale Gewässerparzelle, sondern darüber hinaus Flächen in der Talaue einer intensiven Nutzung zu entziehen. Regeln für eine exten-

⁴ Eine Übertragung dieser Datenpools auf digitale Datenbanken ist derzeit in vielen Bundesländern in Arbeit. Beispielhaft sei hier das Programmsystem WAABIS in Baden-Württemberg erwähnt.

sive Nutzung in diesen Bereichen mussten aufgestellt werden. Ziel dieser Regelungen war es, die Beeinträchtigung des Naturhaushaltes zu reduzieren. Dies musste unweigerlich zu Konflikten mit den anderen Nutzern am Gewässer führen. Diese sind:

- Land- und Forstwirtschaft,
- Fischerei,
- Infrastruktur und Verkehr,
- Schifffahrt,
- Gewerbe und Industrie,
- Wohnen,
- Erholung und Freizeit.

Den Bearbeitern der Konzepte zum Flussgebietsmanagement war klar, dass eine besondere Schwierigkeit in der Herstellung eines Konsens zwischen den beteiligten Nutzern liegen würde. Deshalb wurden neben fachlichen Forderungen auch Moderationsverfahren (z.B. der „Runde Tisch“ oder „Agenda 21“-Arbeitsgruppen) empfohlen, die zwischen den beteiligten Nutzern, der Wasserwirtschaft und dem Naturschutz vermitteln sollen, bevor die Rahmenplanung behördlich geprüft und zur Grundlage behördlicher Entscheidungen wird. Der Erfolg solcher Methoden lässt sich zum Beispiel am Integrierten Rheinprogramm ersehen (Gewässerdirektion südlicher Oberrhein/Hochrhein, 2004).

ab → abadan

Es war kein Salz-, sondern Süßwasser, das die Wurzeln der menschlichen Kultur umspülte und nährte. Die vier ältesten großen Kulturen entstanden alle an Flüssen und auf deren fruchtbaren Schwemmebenen: Mesopotamien, das von Euphrat und Tigris (im heutigen Irak) umschlossen war, die Harrapan-Kultur am Indus (im heutigen Pakistan), China am mächtigen Jangtse und am Gelben Fluss, die beide von der tibetischen Hochebene herabströmen, und Ägypten am Nil. Das Persische gibt die grundlegende Natur dieser Abhängigkeit vom Wasser wieder: Das erste Wort des Wörterbuches ist dort >ab<, und es bedeutet >Wasser<. Davon leitet sich dann >abadan< ab, was >zivilisiert< bedeutet. So stellt sich im Wasser buchstäblich der Beginn der Zivilisation dar. (Aus: Ball, 2002: H₂O – Biographie des Wassers, Seite 56)

1 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, Empfehlungen bzgl. einer naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Bereich zu geben. Die Arbeit ist somit nicht als Grundlagenuntersuchung einzuordnen – vielmehr sollen hier ganzheitlich und interdisziplinär die Wechselwirkungen des Strömungsverhaltens, der Morphodynamik und des sog. „naturnahen Wasserbaus“ berücksichtigt werden. Aufgrund des in der Einleitung genannten Konfliktpotenzials sind darüber hinaus in urbanen Bereichen besondere Restriktionen (wie z.B. der Hochwasserschutz) zu berücksichtigen, die sich i.d.R. nachhaltig auf eine eigendynamische Gewässerentwicklung auswirken.

Auf der einen Seite liefern wissenschaftliche Grundlagenuntersuchungen immer neue und modifizierte Berechnungsverfahren, die dem Anwender eine Prognose hydraulischer und/oder morphologischer Entwicklungen an naturnahen Gewässerabschnitten ermöglichen sollen. Auf der anderen Seite scheitert in der Praxis die Anwendung (solcher mittlerweile sehr komplexen und in der Fachliteratur oftmals leider auch methodisch-didaktisch ungünstig erläuterten Verfahren) aufgrund der Tatsache, dass insbesondere für die Abstraktion einer realen Situation auf das Berechnungsmodell noch keinerlei weitreichende Handlungsempfehlungen vorliegen:

Naturnahe Fließgewässer zeichnen sich u.a. durch komplexe dynamische Strukturen aus, deren hydraulisches Widerstandsverhalten durch diverse Parameter erfasst werden müssen. Die Möglichkeiten zur Erfassung dieser für die Qualität der Berechnungsergebnisse entscheidenden Eingangsparameter werden vereinzelt zwar genannt; hier bedarf es jedoch einer wissenschaftlichen Durchdringung, welche letztendlich zu konkreten Handlungsempfehlungen führen sollte. Damit kann dann die Lücke im Sinne der Konvertierung realer Situationen auf geeignete hydraulische bzw. morphologische Berechnungsverfahren geschlossen werden.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag dazu: Aufgrund der Analyse derzeitiger Probleme wird in Anlehnung an bereits vorhandene, bewährte Verfahren und Konzepte eine Methodik entwickelt, die es dem Anwender ermöglicht, geeignete Berechnungsverfahren zu wählen und entsprechende Eingangsparameter zu erfassen bzw. deren

Signifikanz zu beurteilen. Die Empfehlungen werden exemplarisch an Naturmessdaten verifiziert.

Das Land Baden-Württemberg führt bereits seit Mitte der 1980er Jahre an renaturierten Gewässerstrecken zahlreiche Mess- und Untersuchungsprogramme durch. Ein Teil der vorhandenen Naturmessdaten wird im Rahmen der Arbeit hinsichtlich der Merkmale einer eigendynamischen Gewässerentwicklung interpretiert und als Grundlage zur Verifikation verwendet.

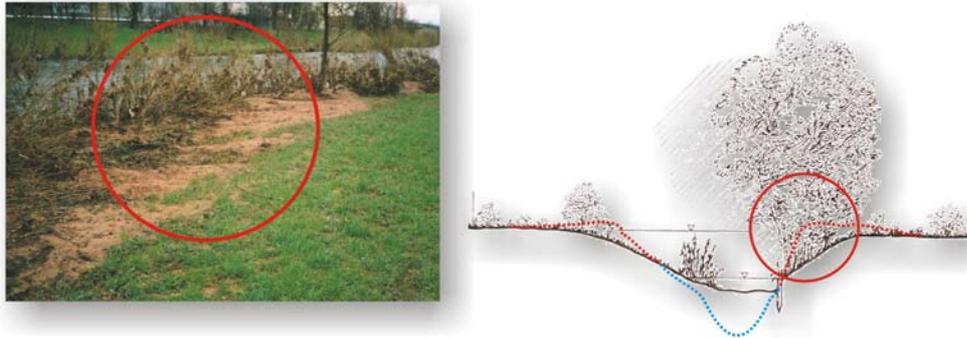


Abb. 1.1: Sedimentation von Feinsanden im bewuchsbestandenen Uferbereich an der Enz in Pforzheim nach einem Hochwasser (links). Prinzipskizze zur mittel- bis langfristigen Veränderung eines Gewässerbettes infolge solcher Auflandungen in Uferbereichen (rechts).

Im Fokus der eigendynamischen Gewässerentwicklung speziell in urbanen Bereichen sollen Fragestellungen, die derzeit noch nicht ausreichend genau beantwortet werden können, zunächst aufgezeigt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Wechselwirkung zwischen Uferbewuchs, Strömung und dem Sedimentationsverhalten von Feststoffen im Uferbereich (vgl. **Abb. 1.1**). Mit Hilfe von qualitativen Untersuchungen am wasserbaulichen Modell an der Universität Karlsruhe gibt die Arbeit neue Empfehlungen für die Gewässerentwicklungsplanung sowie eine Methodik für die mittelfristige Gewässerunterhaltung.

Die Arbeit folgt einem Faden, der sich von der einleitenden Motivation über die wissenschaftliche Analyse der Grundlagen und Anforderungen bei der Gewässerentwicklung im urbanen Bereich bis hin zur Darstellung derzeitiger Defizite spannt. Die darauf aufbauende Untersuchung zur Verwendung hydraulischer und morphologischer Prognoseverfahren in der Praxis sowie die daraus abgeleiteten neuen Erkenntnisse und Empfehlungen stellen die wissenschaftliche Durchdringung der „Grauzone“ zwischen Theorie und Praxis dar. Eine Verifikation der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt exemplarisch durch die Analyse von Naturmessdaten (vgl. **Abb. 1.2**).

Somit richtet sich diese Arbeit sowohl an den Praktiker bzw. Anwender als auch an den Wissenschaftler in der Grundlagenforschung.



Abb. 1.2: Aufbau der Arbeit vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung .

Die Arbeit wurde so gegliedert, dass die aufeinander aufbauenden Kapitel in sich auch als geschlossene Einheiten gelesen werden können. Zum Beginn jedes Kapitels erfolgt farbiger hinterlegt eine Nennung der thematischen Gliederung und der verwendeten Schlüsselbegriffe, um somit dem Anwender das Auffinden einzelner Inhalte zu erleichtern.

Neben dieser Einleitung untergliedert sich die Arbeit in fünf weitere Kapitel:

Kapitel 2 widmet sich der Erläuterung der interdisziplinären Anforderungen einer naturnahen Gewässerentwicklung. Neben einer theoretischen Übersicht wird an der Darstellung ausgeführter Beispiele die derzeitige Methodik bei der Gewässerentwicklung dokumentiert. Dazu findet auf Basis des gegenwärtigen „Stand des Wissens“ eine Diskussion der Anforderungen und der Restriktionen statt.

Hierbei wird insbesondere auf die in der Praxis angewandten Regimeansätze eingegangen, welche u.a. zur Herleitung des sog. „Leitbildes“ eine bedeutende Rolle spielen. Da innerhalb von Ortslagen oftmals spezielle Restriktionen vorliegen, erfolgt an

dieser Stelle auch eine ausführliche Diskussion diverser Methoden zur Berücksichtigung der Restriktionen.

Kapitel 3 erläutert die bisherigen Erkenntnisse, Methoden und Probleme zur Gewässerentwicklungsplanung:

- Anhand der aus Nutzungen (z.B. Uferzonenbebauung) resultierenden Restriktionen (z.B. Hochwasserschutz) wird der Einsatz hydraulischer Berechnungsverfahren notwendig, um für typische urbane Gewässerquerschnitte eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung aufstellen zu können. Die Entwicklung solcher Verfahren wird in diesem Kapitel aufgezeigt; die Problematik der Parameterfassung und der Anwendung der Verfahren auf naturnahe Gewässerstrukturen wird diskutiert.
- Ebenso gilt es, die morphologische Entwicklung eines Gewässers prognostizieren zu können, um ggf. Nutzungen weiterhin erhalten zu können. Aus diesem Grund dokumentiert das Kapitel Verfahren zur Berechnung des Feststofftransportverhaltens in Gewässerläufen und zeigt die derzeitigen Anwendungsgrenzen im Hinblick auf die Prognose morphodynamischer Prozesse auf.
- Die aktuellen Methoden der Gewässerunterhaltung dienen dazu, die eigendynamische Entwicklung innerhalb formulierter Randbedingungen zu steuern bzw. zu gewährleisten. Gestützt durch hydraulische und morphologische Berechnungen und auf Grundlage von Erfahrungswissen werden Entscheidungen hinsichtlich durchzuführender Unterhaltungsarbeiten getroffen. Die daraus abzuleitende Methodik sowie resultierende Probleme werden dargestellt.

Kapitel 4 liefert Empfehlungen zur hydraulischen Berechnung naturnaher Gewässer. Die in Kapitel 3 dargestellten Probleme werden aufgegriffen und auf Grundlage aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse analysiert. Aus der Diskussion bzgl. der Erfassung relevanter Parameter und der Parameterauswertung im Rahmen geeigneter Berechnungsverfahren erfolgt in einer Synthese ein Vorschlag für ein methodisches Vorgehen bei naturnahen Gewässern.

In Kapitel 5 werden Empfehlungen hinsichtlich hydraulisch und unterhaltungstechnisch günstiger Bewuchsanordnungen entlang renaturierter Gewässerabschnitte gegeben. Da bislang keine praxistauglichen Verfahren die morphologische Wirkung zwischen Strömung, Uferbewuchs und Feststofftransportverhalten beschreiben können, wird hier auf eine physikalisch-dynamische Simulation in einem wasserbaulichen Modell an der Universität Karlsruhe zurück gegriffen. Neben der Erläuterung der modellspezifischen Grundlagen und des Versuchskonzeptes sind die Ergebnisse eines Variantenstudiums dargestellt.

Als Verifikation der in den Kapiteln 4 und 5 erarbeiteten Empfehlungen erfolgt in Kapitel 6 eine Zusammenstellung und Auswertung des sehr umfangreichen Naturmessdatenpool der Gewässerstrecke Pforzheim/Enz (ca. 365.000 Datensätze von unter-

schiedlichen Sonderpegeln über einen Zeitraum von 12 Jahren). Neben der Erläuterung der verwendeten Datengrundlage wird auf Basis bisher durchgeführter Untersuchungen die Gewässerentwicklung innerhalb der Stadt Pforzheim aufgezeigt. Im Anschluss daran werden hydraulische Berechnungen durchgeführt, um die Empfehlungen anhand real gemessener Wasserstands-Abfluss-Beziehungen zu verifizieren. Ebenso werden gewässermorphologische Entwicklungen mit den erarbeiteten Empfehlungen verglichen. Eine Diskussion der Ergebnisse zeigt die Validierung der erarbeiteten Empfehlungen auf.

In den Anlagen sind Verfahren, Berechnungen, Programmauszüge und Auszüge aus dem Datenpool, auf die im Textteil eingegangen wird, in ausführlicher und übersichtlicher Form zusammengetragen.

Gestückelte Wirklichkeit

„Meine Herren“, sagte der Wissenschaftler, „wir haben es uns zur Gewohnheit gemacht, die Wirklichkeit in Stückchen zu zerschnippeln. Und für jedes Stückchen haben wir eine wissenschaftliche Disziplin gegründet. In jeder dieser Disziplinen wiederum schneiden wir Stücke aus der Wirklichkeit und untersuchen sie im Labor. Mit dieser Methode erzielen wir Ergebnisse. Nur, dass wir so die Möglichkeit verpassen, die Zusammenhänge zwischen jedem dieser Teile und deren umfassendes Ganzes zu begreifen!“

Aus dem Roman „Der Zorn“ (Marquet, 2004), in dem die Menschheit durch bisher nie dagewesene Umwelteinflüsse vom Aussterben bedroht ist und eine Gruppe von Wissenschaftler im Auftrag der Regierung die Ursachen dieses Naturverhaltens erforschen soll.

2 Anforderungen der naturnahen Gewässerentwicklung

Aufbau und Gliederung:

- 2.1 Interdisziplinäres Arbeitsgebiet
- 2.2 Spezielle Anforderungen an die Gewässerentwicklung in urbanen Bereichen
 - 2.2.1 Anforderungen an das Management urbaner Fließgewässer
 - 2.2.2 Relevante Planungsgrößen
 - 2.2.3 Gewässerkosmetik
 - 2.2.4 Ökologische Ansprüche der gewässerspezifischen Teillebensräume
- 2.3 Planungsmethodik: Regimeansatz – Leitbild – Restriktionsanalyse
 - 2.3.1 Gewässermorphologische Merkmale und Eigenschaften
 - 2.3.2 Regimeansatz und -gleichungen
 - 2.3.3 Methodik der Gewässerentwicklungsplanung

2.1 Interdisziplinäres Arbeitsgebiet

Zum Schutz vor Naturkatastrophen und zu seiner eigenen Entwicklung hat der Mensch seinen Lebensraum stark umgestaltet. Die Nutzungsansprüche der Landwirtschaft sowie die Erfahrungen und die Angst vor dem Hochwasser haben dazu geführt, dass viele unserer Fließgewässer kultiviert und entsprechend den hydrologischen, hydraulischen und morphologischen Kenntnissen ausgebaut wurden. Besonders in urbanen Bereichen bzw. innerhalb von Ortslagen ist ein technisch ausgerichtet und sehr strukturarmer Ausbau der Gewässerprofile weit verbreitet, wodurch die schadlose Abführung extremer Hochwassermengen ermöglicht werden soll.

Wie in der Einleitung dieser Arbeit bereits aufgezeigt, werden heute erhöhte Anforderungen sowohl an die Gewässergüte als auch an die Gewässerstrukturgüte gestellt. Im Zuge von Renaturierungs-, Revitalisierungs-, Ökologisierungs- oder naturnahen Umgestaltungs- und Entwicklungsmaßnahmen hat der Mensch die urbanen Fließgewässer nicht nur als Lebensraum sondern vielmehr auch als Natur-, Erlebnis- und Erholungsraum wieder entdeckt.

Durch die umweltpolitische Richtungsänderung besteht an ehemals ausgebauten Fließgewässern aktuell ein Handlungsbedarf zum „[...] Schützen, Verbessern und

Sanieren aller Oberflächengewässerkörper [...] mit dem Ziel, spätestens 15 Jahre nach Inkrafttreten dieser Richtlinie [...] einen guten Zustand der Oberflächengewässer zu erreichen.“ (EU, 2000: Wasserrahmenrichtlinie Artikel 4, Abs. 1). Der „gute Zustand“ wird dabei durch „[...] ein gutes ökologisches Potenzial und einen guten chemischen Zustand der Oberflächengewässer“ (ebd.) charakterisiert und mit Hilfe von Merkmalen und Parametern definiert (vgl. EU, 2000: Wasserrahmenrichtlinie Anhang V).

Mit Hilfe von ganzheitlichen interdisziplinären Konzepten ist ein Flussgebietsmanagement gefordert, welches unter Berücksichtigung der lokalen anthropogenen Einflüsse folgende Eigenschaften eines Fließgewässers fördert:

- Gewässerstruktur

Strukturreiche Fließgewässer bedingen eine komplexe Strömungsdiversivität. Es gibt zahlreiche Untersuchungen die belegen, dass eine hohe Strukturvielfalt bei guter Wasserqualität auch eine große Organismendiversivität fördert. Durch die unterschiedlichen Lebensbedingungen, die solche Strukturen bieten, kommt es zur Ausbildung unterschiedlicher Lebensgemeinschaften.

Die Gewässerstruktur hat so z.B. einen entscheidenden Einfluss auf die Territoriumsgröße von Fischen und anderen Wasserlebewesen: Die räumliche und zeitliche Trennung der Individuen verhindert innerartliche Konkurrenz und erlaubt eher eine optimale Ausnutzung des Nahrungsangebotes (vgl. Hütte, 2000).

Ferner wird aufgrund von Beobachtungen in Naturräumen deutlich, dass natürliche Gewässerstrukturen einer vielfältigen Entwicklungsdynamik unterliegen: Im Laufe der Zeit finden durch hydraulische Belastungsänderungen (z.B. bei Hochwasser) Feststofftransportprozesse statt, die zu morphodynamischen Entwicklungen führen.

- Vernetzung des Gewässers mit dem Umland

Eine naturnahe Uferstruktur zeichnet sich durch das Vorhandensein standorttypischer Vegetation (Röhrichte, Büsche, Bäume) sowie durch ausreichenden Abstand zu angrenzenden, anthropogen genutzten Flächen aus (z.B. Landwirtschaft). Als Beispiel für die ökologische Bedeutung von Ufergehölzen seien hier die Ergebnisse der Untersuchungen von Maser und Sedell (1994) skizziert (vgl. **Tab. 2.1**).

Tab. 2.1: Ökologische Bedeutung der umgebenden Gehölze für die Fließgewässer.

Einflussfaktor	Funktion
Baumkronen	<ul style="list-style-type: none"> - Gewässerbeschattung und damit Verhinderung einer unnatürlich hohen Wassererwärmung - Eintrag von organischer Substanz (z.B. Blätter, Äste) in das Gewässer als Nährstoffe für Wasserwesen - Orientierungspunkte für das Paarungsverhalten mancher Wasserinsekten - Ansitzwarte für wassergebundene Vogelarten (z.B. Wasseramsel, Eisvogel)
Totholz im Gewässer	<ul style="list-style-type: none"> - Ausbildung strömungsgeschützter Bereiche für verschiedene Organismen - Erhöhung der Strukturvielfalt und Strömungsdiversität (z.B. durch Sedimentationsareale) - Verstärkte Retention von Nährstoffen, Detritus u.a. - Besiedelbare Oberflächen (wichtig z.B. in Sandbächen ohne feste Substrate) - Nahrungsgrundlage für einige Wirbellose
Baumwurzeln im Uferbereich	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilisierung und Strukturierung des Ufers - Schutzzräume sowohl unter Wasser (z.B. Fischunterstände) als auch oberhalb des Wassers (z.B. für geschlüpfte Wasserinsekten) - Aufnahme und Reinigung von Wasser - Aufnahme von Nährstoffen aus Wasser und Boden

Ebenso sei die Bedeutung der Vielgestaltigkeit im Bereich der Wasserwechselzone⁵ erwähnt. Hier kommt es bei natürlichen Fließgewässern infolge des Feststofftransportes zur Ausbildung von Bänken aus Sand, Kies oder Schotter. Durch das häufige Überschwemmen der Bänke werden diese oft umgelagert, so dass sich hier keine oder nur eine geringe Vegetation entwickeln kann.

Neben solchen Bänken spielen die bei Hochwasser überschwemmten Bereiche des Gewässerumlandes (sog. Auen) eine zentrale Rolle im Ökosystem Fließgewässer.

Anmerkung: Da sich diese Arbeit jedoch auf die naturnahe Gewässerentwicklung in urbanen Bereichen konzentriert, wo infolge der intensiven Besiedlung und Nutzung i.d.R. keine natürlichen Auen vorhanden sind, werden spezielle auenökologische Prozesse hier nicht weiter dargestellt.

▪ Vernetzung des Gewässers mit dem Untergrund

Bei allen Fließgewässern, welche auf einem wasserdurchlässigen Untergrund verlaufen, bildet sich unterhalb der Gewässersohle ein vom Flusswasser be-

⁵ Wasserwechselzone: Bereich im Abflussquerschnitt, der von den Wasserständen des Niedrigwassers und des Hochwassers eingegrenzt wird.

einflussster Bereich, der als Hyporheal bezeichnet wird. Die Mächtigkeit des Hyporheals und dessen Durchströmung ist abhängig vom geologischen Aufbau des Untergrunds sowie von der Durchlässigkeit bzw. Porosität der Sedimente.

White (1993) fasst in seiner Arbeit die ökologische Bedeutung des Hyporheals zusammen: Daraus wird ersichtlich, dass für viele ein- und mehrzellige Mikroorganismen sowie für viele Arten des Makrozoobenthos das Hyporheal sowohl als Lebens-, Aufwuchs- und Rückzugsraum dient. Kommt es infolge anthropogener Beeinflussung des Gewässers zur Ablagerung von feinstpartikulären Feststoffen (Silt- und Tonpartikel) an der Gewässersohle, so kann dies zu einer Reduktion des Porenraumes führen (sog. Kolmation), was letztendlich den Lebensraum Hyporheal zerstört. Insbesondere bei Flusstauhaltungen ist dieser Effekt zu beobachten.

- Einsatz naturtypischer wasserbaulicher Maßnahmen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, erfordern die zahlreichen Anforderungen, welche die Menschen als Nutzer an ein Gewässer haben, den Einsatz wasserbaulicher Maßnahmen zur wasserwirtschaftlichen Regelung.

Durch das Aufgreifen althergebrachter Methoden zur Gewässerregelung (vgl. **Abb. 2.1**), welche aus einer Zeit stammen, wo es noch keinen hochfesten Beton und keine motorgetriebenen Maschinen zum Bewegen schwerer und großer Lasten gab, sowie durch eine Weiterentwicklung und Optimierung bisheriger Erfahrungswerte findet man heute in der Fachliteratur zahlreiche sog. „ingenieurbiologische Bauweisen“.

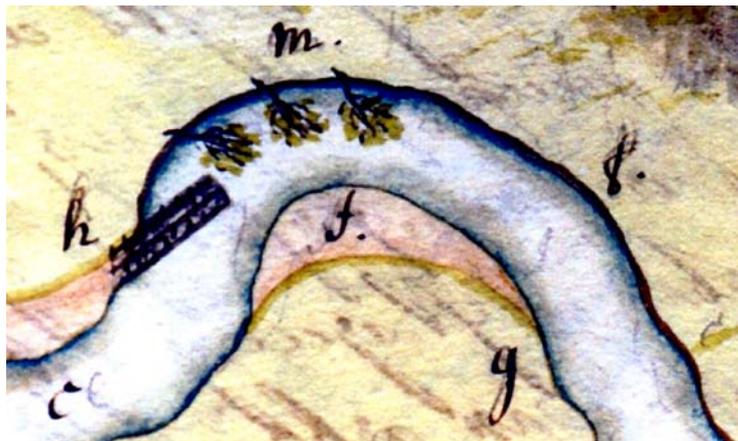


Abb. 2.1: Flusskorrektur um 1713 (Aus: Landesbibliothek der Stadt Kassel). Entschärfung einer starken Krümmung (f) der Diemel mittels Strömungsumlenkung durch ein Holzleitwerk (h). Dahinter werden Raubbäume angeordnet (m), die eine Verlandung des Außenufers bewirken sollen. Die Maßnahme wurde vom Wasserbauer B.C. Münnich geplant, der die Schiffbarmachung der Diemel zum Auftrag hatte. Die Aufzeichnungen Münnichs zeigen sehr deutlich, dass die Wasserbauingenieure des frühen 18. Jahrhunderts die Zusammenhänge zwischen Abfluss, Gefälle und Feststofftransport aus Erfahrungen kannten und für ihre Aufgaben nutzen konnten.

Ingenieurbiologische Maßnahmen bzw. Bauweisen bestehen aus Pflanzenmaterial, welches ggf. in Kombination mit Pflöcken, Netzen und Steinen zur Stabilisierung des Untergrundes und des Umfeldes verwendet wird. Der Einsatz erfolgt linienhaft (z.B. zur Ufersicherung) oder flächenhaft (z.B. zur Sicherung von Vorlandbereichen). Eine Klassifizierung und umfangreiche Darstellung der derzeit in der Praxis angewandten Bauweisen mit Angabe der Einsatzbereiche ist auf Grundlage der aktuellen Fachliteratur in Lehmann und Schneider (2004) zusammengestellt.

Aus den oben genannten Merkmalen naturnaher Fließgewässer wird sofort ersichtlich, dass solche öko-morphologischen Systeme aufgrund der zahlreich beteiligten Parameter (Geometrie, Rauheits- und Formwiderstände, etc.) und Variablen (Wasserstand, Vegetationsdichte, etc.) mit ingenieurtechnischen Ansätzen allein nicht zu beschreiben sind. Aufgrund der hohen Eigendynamik dieser Systeme im klein-, mittel- und großskaligen Bereichen (Mikro-, Makro- und Mesoskala → vgl. Kap. 2.3.1) während kurz-, mittel- und langfristigen Zeitperioden besteht hier die Notwendigkeit einer interdisziplinären Verzahnung unterschiedlicher Fachdisziplinen.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Parametrisierung der abiotischen Merkmale, woraus sich eine Darstellung der Interdisziplinarität nach den Regeln der Mengenlehre skizzieren lässt (vgl. **Abb. 2.2**).

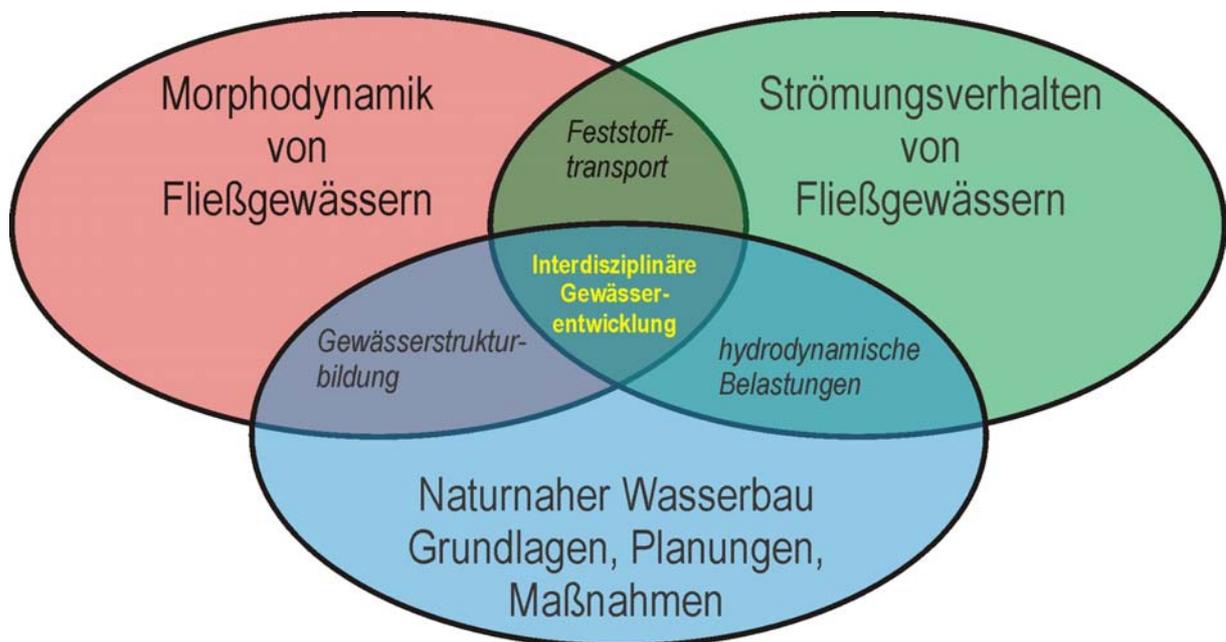


Abb. 2.2: Interdisziplinäre Verknüpfungen in der naturnahen Gewässerentwicklung.

Abb. 2.2 zeigt die Verschneidung von drei wasserwirtschaftlichen Fachdisziplinen. Die Erläuterung der Zusammenhänge und interdisziplinären Anforderungen soll nun exemplarisch am Beispiel eines im Jahr 1992 renaturierten Gewässerabschnittes der Enz in der Stadt Pforzheim bildhaft erfolgen.

Das Strömungsverhalten von Fließgewässern wird durch die Hydraulik beschrieben. Aufgrund der Stoffeigenschaften des Wassers (Dichte, Zähigkeit, etc.) entstehen bei Fließbewegungen an den benetzten Flächen infolge der Haftbedingung Schubspannungen. Fließendes Wasser überträgt somit Kraft auf Widerstände im Strömungsgebiet, wodurch wiederum die Fließbewegung selbst beeinflusst wird.

Bei entsprechenden Schubspannungen kommt es zur Mobilisierung von Feststoffen an der Gewässersohle und entlang der Uferbereiche. Mit zahlreichen empirischen Ansätzen gelingt eine Bilanzierung des Feststofftransportes bei bekannten Randbedingungen: Dort, wo die Feststoffe mobilisiert werden, findet Erosion statt; an anderer Stelle kommt es zur Immobilisierung und es findet Sedimentation statt.

Hieraus resultiert eine Änderung der Gewässerbettform. Solche Prozesse werden im Rahmen der Morphodynamik von Fließgewässern beschrieben, welche nach Seminara und Blondeaux (2001, Seite 1 ff) als Wissenschaft zwischen Geomorphologie und Fluidmechanik anzusehen ist.

Beispiel: Als Beispiel für morphodynamische Prozesse sei hier die eigendynamische Umformung der künstlich errichteten Inseln in einem Aufweitungsbereich der Enz (Profil 33000) aufgezeigt (vgl. **Abb. 2.3** und **Abb. 2.4**).



Abb. 2.3: Links: Lageplan der künstlichen Inselgruppe. Gestrichelt dargestellt sind die Grundrissänderungen zwischen 1992 und 1998. Rechts: Aufnahme der Inselgruppe vom rechten Ufer aus nach oberstrom aus dem Jahr 2000. Das Profil 33000 wurde zur Orientierung gestrichelt eingetragen.

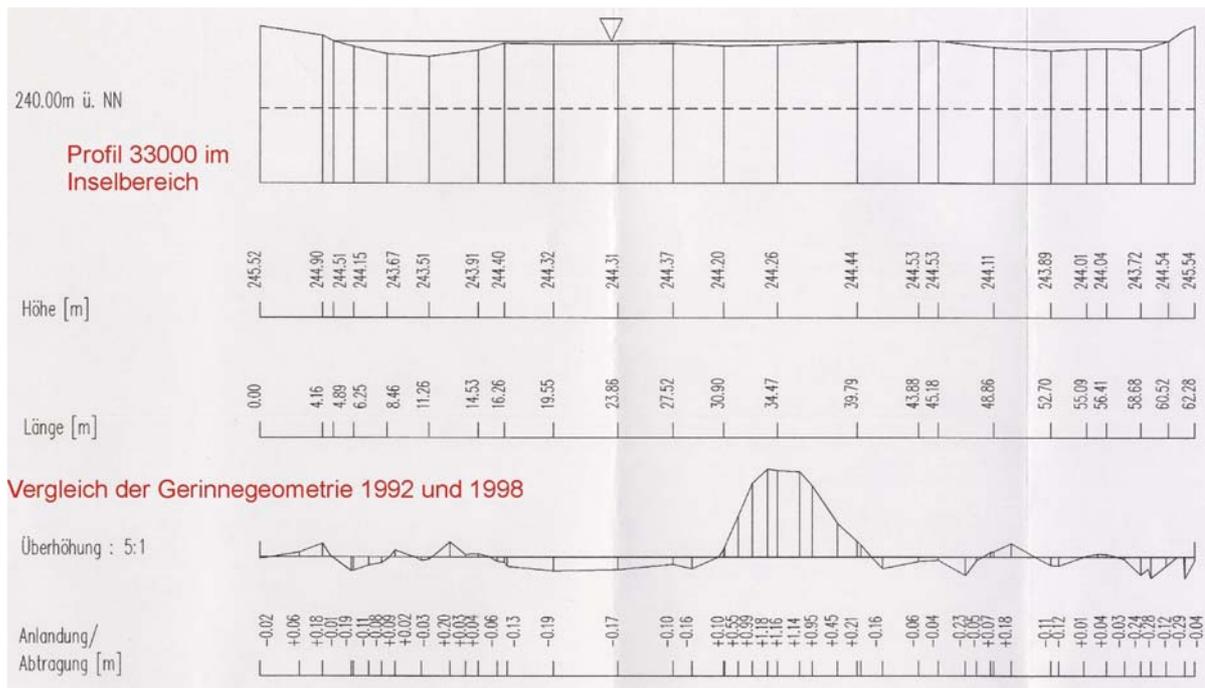


Abb. 2.4: Vergleich der Gerinnegeometrie zwischen 1992 und 1998 im Profil 33000.

Die Kräfte des fließenden Wassers wirken nicht nur auf die Oberflächenrauheit der Gerinnewandungen, sondern auch auf um- bzw. überströmte Formwiderstände, wie z.B. ingenieurbioologische Bauweisen, Ufergehölze oder künstliche Gerinneeinbauten aus standortfremden Material (Brückenpfeiler), etc.. Hieraus resultieren hydrodynamische Belastungen, die im naturnahen Wasserbau insbesondere bei der Wahl der ingenieurbioologischen Bauweisen bzw. deren Stabilität eine Rolle spielen.

Beispiel: Trotz mehrmaliger Nacharbeiten im Rahmen der Gewässerunterhaltung ist es im Laufe von 10 Jahren nicht gelungen, mit ingenieurbioologischen Bauweisen einen Uferabbruch im Bereich einer künstlich angelegten Flusseinengung an der Enz zu verhindern. In **Abb. 2.5** ist die Situation zu verschiedenen Zeitpunkten mit Luftbildern dokumentiert:

Die Aufnahme aus dem Jahr 1992 dokumentiert den Gewässerabschnitt direkt nach Fertigstellung der Renaturierungsarbeiten. Die mittigstehende Aufnahme aus dem Jahr 1994 zeigt auf, dass infolge von Hochwasserereignissen eine Ufererosion stattgefunden hat; das Gerinne besitzt an dieser Stelle die Tendenz, sich zu verbreitern. Die während eines Hochwassers auftretenden hydrodynamischen Belastungen auf das Ufer sind so stark, dass es zur Zerstörung der ingenieurbioologischen Bauweisen zur Ufersicherung kommt. Die Aufnahme rechts dokumentiert den Zustand im Jahr 2000. Deutlich ist die Bewuchsentwicklung zu erkennen.

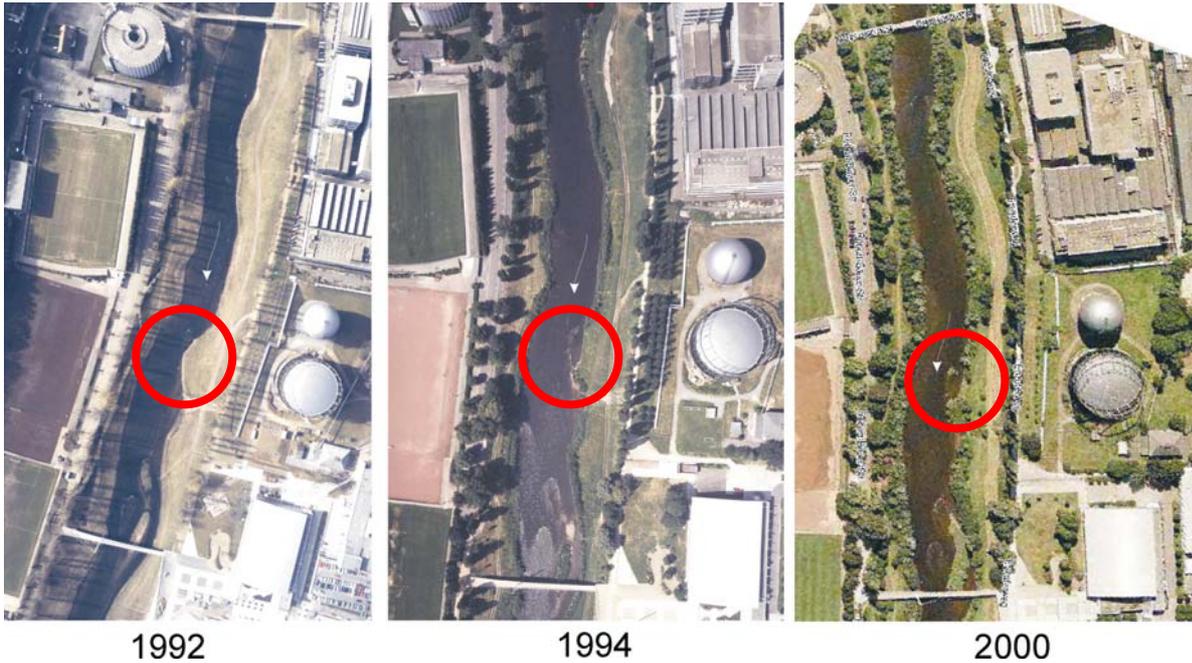


Abb. 2.5: Darstellung von Luftbildern aus den Jahren 1992 (nach Fertigstellung der Renaturierung), 1994 und 2000. (Quelle: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg)

Als Schnittmenge zwischen der Morphodynamik und den Maßnahmen im Naturnahen Wasserbau können die zahlreichen lokalen Prozesse der Gewässerstrukturbildung genannt werden. Exemplarisch werden im Folgenden die drei häufigsten in der Praxis naturnaher Fließgewässer zu beobachtenden Prozesse dargestellt:

- a) Standorttypische Ufergehölze verklauen bei Hochwasser infolge des angeschwemmten Getreibsel und des Mülls (vgl. **Abb. 2.6**). Hierdurch kann sich aus vielen Einzelelementen in kurzer Zeit ein signifikantes Strömungshindernis bilden, was wiederum starke Auswirkungen auf das Strömungsverhalten und damit auch auf den Feststofftransport im benachbarten Umfeld hat.



Abb. 2.6: Durch die Verklauung einzelner Weiden und Bäume auf dem Vorland der Enz hat sich während eines Hochwassers ein quer zur Fließrichtung über das Vorland verlaufender Riegel gebildet. Hierdurch kam es zu einer massiven Störung des Abflusses während des Hochwassers. (Aufnahme: Lehmann)

- b) Im Strömungsschatten der Ufer- und Vorlandvegetation kommt es bei Überflutung zur Sedimentation von Feststoffen (vgl. **Abb. 2.7**). An der Enz konnten an Uferbereichen, welche mit Jungweiden bestanden waren, nach einem Hochwasser Auflandungen von bis zu 0,4 m festgestellt werden. Durch solche Verlandungen reduziert sich die zur Gewährleistung der Hochwassersicherheit benötigte Abflussfläche. Aus diesem Grund muss im Rahmen aufwendiger Unterhaltungsarbeiten eine Entnahme der sedimentierten Feststoffe durchgeführt werden. Aufgrund der Tatsache, dass die sedimentierten Feststoffe oftmals sehr feinfractioniert und nährstoffreich sind, entwickelt sich in solchen Bereichen sehr schnell ein krautartiger Bewuchs (z.B. Brennnesseln).



Abb. 2.7: Feinsande, die sich während eines Hochwassers im Strömungsschatten der Uferweiden abgelagert haben. Deutlich ist die Bildung eines neuen Höhengrades direkt entlang der Uferlinie zu erkennen (sog. Uferrehne). (Aufnahme: Lehmann)

- c) Genauso dynamisch wie die Gewässerstruktur entwickelt sich auch der Bewuchs (vgl. **Abb. 2.8**). Die Auswertung mehrerer Bewuchskartierungen an der Enz hat gezeigt, dass sich die angeströmten projizierten Bewuchsflächen im Laufe von 10 Jahren in einzelnen Querschnitten um den Faktor 28 bis 30 vergrößert haben (vgl. Kap. 6). Die Auswirkung der Bewuchsentwicklung ist daher beim hydraulischen Nachweis der Hochwassersicherheit besonders zu berücksichtigen.



Abb. 2.8: Bewuchsentwicklung an der renaturierten Enz in Pforzheim. Oben: Nach Fertigstellung der Renaturierung 1992. Mitte nach 1,5 Jahren Entwicklungszeit 1993. Unten: Nach 10 Jahren Entwicklungszeit im Jahr 2002. (Aufnahmen: Bernhart, Lehmann)

Im Jahr 1990 wurden am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik physikalische Modelluntersuchungen der Gewässerstrecke Enz in Pforzheim durchgeführt. Mit den Versuchen sollte die Auswirkung der Bewuchselemente auf die Hochwassersituation vor der Renaturierung, während der Entwicklung und nach Erreichen des Entwicklungszieles in der Renaturierungsstrecke überprüft werden. Als Ergebnis aus den Untersuchungen resultierte letztendlich eine Überarbeitung des Bepflanzungsplanes insbesondere in den Bereichen, die als „hydraulischer Flaschenhals“ bezeichnet wurden. Ferner stellten die Wissenschaftler auf Basis der Modellergebnisse für diese hydraulisch signifikanten Engstellen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen auf, woraus der Einfluss der Bewuchsentwicklung deutlich wird (vgl. **Abb. 2.9**). Eine Überprüfung dieser Kurven auf Basis tatsächlich ermittelter Naturmessdaten zeigte eine gute Übereinstimmung mit der Prognose der Karlsruher Wissenschaftler (vgl. Kap. 6).

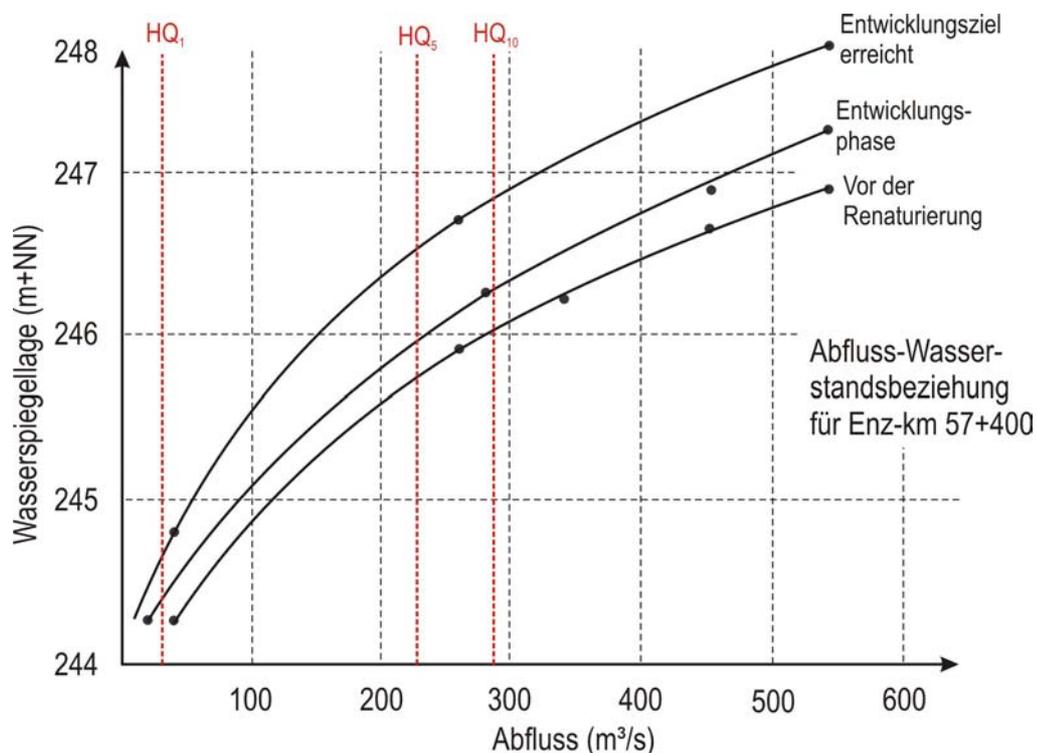


Abb. 2.9: Änderung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung infolge der Bewuchsentwicklung im betrachteten Gewässerquerschnitt. Die Kurven wurden aus physikalischen Modellversuchen an der Universität Karlsruhe abgeleitet. (Quelle: Bernhart, 1993)

Die aufgezeigten Beispiele verdeutlichen damit die in **Abb. 2.2** geforderte interdisziplinäre Betrachtungsweise unterschiedlicher wasserwirtschaftlicher Disziplinen. Die Synthese zwischen

- Prognoseverfahren auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten (z.B. Ansätze aus der Gerinnehydraulik);

- Bilanzierungsverfahren auf Basis empirischer Formelwerke (z.B. Regimeansätze aus der Morphodynamik);
- Erfahrungswerte aus laufenden Beobachtungen

spielt dabei die zentrale Rolle. Diese Arbeit trägt einen Teil dazu bei, solche Anforderungen zu erkennen und mit einer geeigneten Methodik bei der Planung naturnaher Gewässerstrukturen zu berücksichtigen.

2.2 Anforderungen der Gewässerentwicklung in urbanen Bereichen

In urbanen Bereichen wurde die Entwicklung der Fließgewässer und ihrer begleitenden Auen in vielen vitalen Bereichen von den natürlichen eigendynamischen Prozessen abgekoppelt und den Nutzungsansprüchen der Menschen untergeordnet. Das Ergebnis sind ausgebaute, sterile Fließgewässerstrukturen ohne Entwicklungsspielraum und ein anthropogen geprägtes Abflussgeschehen (vgl. **Abb. 2.10**).



Abb. 2.10: Die ausgebaute Murg bei Gernsbach im nördlichen Schwarzwald. In dem Foto wurden exemplarisch die häufigsten anthropogenen Einwirkungen gekennzeichnet.

Hochwertige Nutzungen und bedeutende Infrastrukturmaßnahmen am urbanen Gewässer sind oft unüberwindbare Hindernisse für eine ökologische Aufwertung eines Fließgewässers. Die beengten Verhältnisse erfordern, dass die Auswirkungen einer Umgestaltung sorgfältig untersucht werden müssen, um Schäden und Nutzungskonflikte zu vermeiden sowie ein Ansteigen der Pflege- und Unterhaltungskosten auszuschließen (vgl. Patt, 2003).

Von Seiten des Wasserbaus umfasst das Spektrum der Anforderungen an eine Planung insbesondere die Einflüsse auf die Abflussleistung der Gerinnestrecke und die sich einstellenden Wasserstände, aber auch die Auswirkungen auf die Gewässerberandungen, wie z.B. die Stabilität der Böschungen sowie die Stabilität und Höhenlage der Gewässersohle. Dazu kommen Fragen konstruktive Details betreffend und natürlich auch die Gewässerunterhaltung.

Fließgewässerentwicklungsplanungen in urbanen Bereichen unterscheiden sich von Planungen im ländlichen Raum im Wesentlichen aufgrund der Nähe der Nutzungen zum Gewässer und der starken Konzentrierung anthropogener Einwirkungen. Da eine größere Anzahl von tatsächlichen oder möglichen Einflüssen zu berücksichtigen bzw. abzuprüfen sind, sind die Planungen in einem urbanen Umfeld i.d.R. wesentlich differenzierter und dadurch vielfach auch umfangreicher.

2.2.1 Anforderungen an das Management urbaner Fließgewässer

Die typischen Anforderungen an das Management urbaner Fließgewässer sind in der folgenden Aufzählung dokumentiert und mit Verweisen auf die weiterführende Fachliteratur untermauert:

- **Sicherstellung des Hochwasserschutzes**

Aufgrund der hohen Besiedlungsdichte und der räumlich konzentrierten Ansammlung von Industrie- und Handelsbetrieben existiert in urbanen Bereichen ein hohes Schadenspotenzial. Neben der Gefahr für Leib und Leben bewirken Hochwasser oftmals unmittelbare Schäden an Gebäuden und Anlagen, welche der Strömung direkt ausgesetzt sind. Sogar in strömungsberuhigten überfluteten Bereichen kann es zu beträchtlichen Schäden an Wirtschaftsgütern und infolge der Zerstörung von auftreibenden Heizöltanks zu weitreichenden ökologischen Schäden kommen.

Ferner bewirken Hochwasser bzw. deren Auswirkungen bei den Betroffenen Anliegern oftmals psychische Schäden, die monetär nicht beziffert werden können. Demzufolge genießt der Hochwasserschutz in urbanen Bereichen die oberste Priorität bei der Planung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen.

Vielfältige Konzepte, von mobilen und/oder temporären Hochwasserschutzsystemen über räumliche Schutzmaßnahmen (z.B. Talsperren, Polder oder Hochwasser-Rückhaltebecken) bis hin zu operationellen Hochwassermanagementtools, sind in der Praxis im Einsatz (vgl. LAWA, 1995, Patt, 2001, Oberle, 2004).

- **Wiederherstellung natürlicher Abflussverhältnisse**

Natürliche Abflussverhältnisse sind infolge der kulturlandschaftlichen Umprägung im Einzugsgebiet bei urbanen Fließgewässern kaum gegeben. Die Versiegelung der angrenzenden Flächen sowie das Sammeln und Abführen von

Niederschlagswasser im Siedlungsbereich tragen letztendlich in Verbindung mit zahlreichen Querbauwerken dazu bei, dass die Abflussdynamik in dicht besiedelten Gebieten durch Ganglinien charakterisiert ist, deren Scheitelkurven sehr steil und spitz ausgebildet sind (vgl. **Abb. 2.11**) (Geiger und Dreiseitl, 1995, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1998).

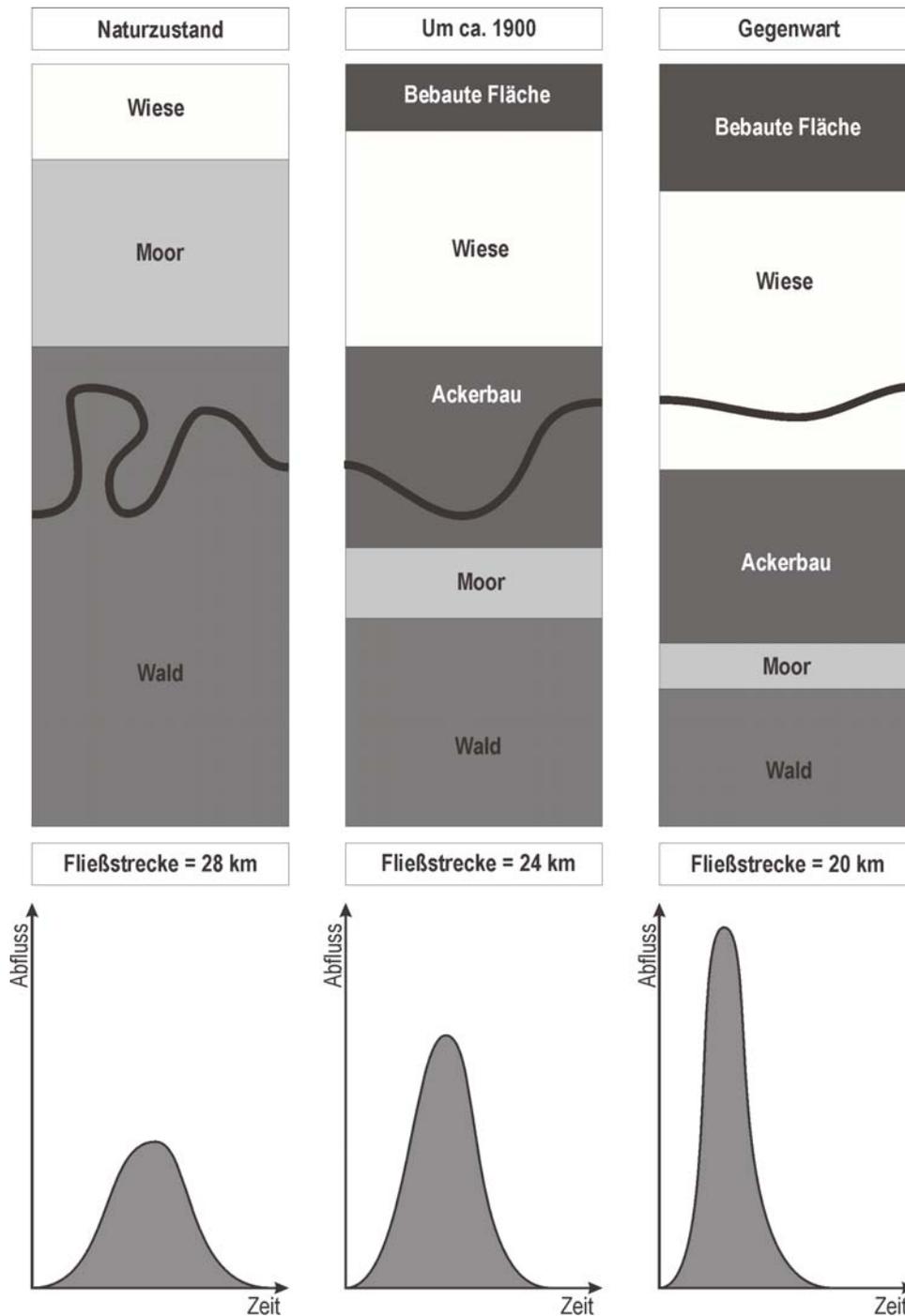


Abb. 2.11: Auswirkungen des Landschafts- und Gewässerlaufwandels auf das Abflussverhalten eines Fließgewässers basierend auf mathematische Modellrechnungen für den Fluss Attel in Bayern. (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, verändert)

- Berücksichtigung von Stadtplanung und Denkmalschutz

Die Mobilität in urbanen Bereichen wird durch die infrastrukturelle Planung und Ausführung von Verkehrswegen gewährleistet. Oftmals verlaufen Schnellstraßen direkt entlang der ausgebauten Fließgewässer, da sich hier die Möglichkeit bietet, relativ direkt ein Stadtgebiet zu durchqueren (vgl. **Abb. 2.12**). Gewässertypische Auestrukturen sind in urbanen Gebieten oftmals durch kulturtechnische Eingriffe zu Parks umfunktioniert, die den Stadtbewohnern Flächen zur Naherholung bieten sollen.



Abb. 2.12: Der Neckar bei Heidelberg als Satellitenaufnahme. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich die Infrastruktur der Verkehrswege an den Gewässerlauf angepasst hat. (DSAT-Auszug).

- Freizeit und Erholung

Wie bereits erwähnt, spielen die Fließgewässerlandschaften als „grüne Lunge“ einer Stadt eine wichtige Rolle bei der Naherholung der Bürgerinnen und Bürger (vgl. **Abb. 2.13**). Es gilt daher, einen Kompromiss zwischen den Bedürfnissen der Natur (Strukturvielfalt, Strömungsdiversivität, Rückzugsräume für Flora und Fauna → vgl. Kap. 2.3) und den Bedürfnissen der Bürgerinnen und Bürger (Spazier- und Joggingwege, Liege- und Spielwiesen, asphaltierte Wege zum Radfahren und Rollerbladen, Kinderspielplätze, Hundeauslaufflächen, etc.) zu finden (DVWK, 2001).



Abb. 2.13: Renaturierte Alb in Karlsruhe. Neben dem Gewässer wurden Wege und Wiesenflächen mit einzelstehenden Bäumen und Sitzgelegenheiten angelegt.

- Naturnahe Gewässerlaufgestaltung und Unterhaltungsformen

Durch die Planung und Umsetzung gewässerlandschaftlich typischer Strukturen und die Verwendung ingenieurbioologischer Bauweisen soll die ökologische Qualität eines urbanen Fließgewässers aufgewertet werden. Besonders in Verbindung mit der Gestaltung von Naherholungsflächen lassen sich oftmals auch auf kleinsten Raum beachtliche Erfolge erzielen (vgl. Patt, Jüring und Kraus, 2004, Schichtl und Stern, 2002).

- Akzeptanzförderung und Öffentlichkeitsbeteiligung

Insbesondere großflächige Umgestaltungen der Fließgewässer in Ortslagen (z.B. Isar in München → Bernhart und Lehmann, 2003) berühren die persönlichen Interessen der Anlieger und Nutzer. Deshalb ist es notwendig und wichtig, den Planungsprozess jederzeit transparent und bürgernah zu gestalten. Eine Möglichkeit hierfür ist durch die Einbindung von „Agenda 21“ – Arbeitsgruppen gegeben (vgl. Vogt, 1997).

2.2.2 Relevante Planungsgrößen

In **Tab. 2.2** sind Planungsgrößen zusammengetragen, die bei der naturnahen Umgestaltung von ausgebauten urbanen Fließgewässern von Bedeutung sein können. Viele der aufgezeigten Aspekte müssen bei einer ausgewogenen Fließgewässerentwicklungsplanung berücksichtigt werden, wodurch sich die Forderung der Interdisziplinarität ein weiteres mal rechtfertigt (→ Kap. 2.1).

Tab. 2.2: Einflüsse auf die Gewässerentwicklungsplanung für Fließgewässer im urbanen Bereich

Bereich	Bei der Gewässerentwicklungsplanung im urbanen Bereich evtl. zu berücksichtigenden...
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> - Raumordnungsplan, Landschaftsrahmenplan, Flächennutzungsplan, Bebauungsplan und ggf. FFH-Gebietsausweisungen - Gewässerentwicklungskonzept - Eigentumsverhältnisse - Wasserrechtliche Festlegungen (z.B. bestehende Rechte zur Nutzung) - Ökonomische Randbedingung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Finanzierung (Anliegerbeteiligung) ▪ Kosten-Nutzen-Analyse ▪ Unterhaltungskosten ▪ Möglichkeiten zur Bezuschussung durch Bund, Land - Bauablauf und Baubetrieb
Fließgewässer und Aue	<ul style="list-style-type: none"> - Abfluss bzw. Wasserstände: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hydrologische Hauptdaten ▪ Einzugsgebietsgröße, -form und Fließzeiten ▪ Gewässergröße (Bach, Fluss, künstl. Gewässer) ▪ Niedrig- und Hochwasserabflüsse (Abflussdaten und Jährlichkeiten) ▪ Stillwasserbereiche (Seen, Speicher, Altarme, Teichanlagen, u.a.) - Bemessungsereignis, Hochwasser (Abfluss, Wasserstand): <ul style="list-style-type: none"> ▪ Laufentwicklung (Linienführung, Querprofile, Sohlenstrukturen) ▪ Morphologische Gegebenheiten ▪ Überschwemmungsgebiete und -grenzen - Ökologische Belange; Naturschutz: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nistzeiten der Vögel ▪ Laich und ggf. Wanderzeiten der Fische ▪ Schutzgebiete ▪ Flächen für den Arten- und Biotopschutz ▪ Entwicklungspotenzial für Flächen ▪ Durchgängigkeit für Wasserorganismen

nächste Seite...

Bereich	Bei der Gewässerentwicklungsplanung im urbanen Bereich evtl. zu berücksichtigen...
Fließgewässer und Aue	<ul style="list-style-type: none"> - Bebauungen am Gewässer: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wohnanlagen ▪ Infrastruktureinrichtungen ▪ Industrie ▪ Landwirtschaft ▪ Freizeit und Erholungsflächen ▪ Handel- und Gewerbe - Hochwasserschutz: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hochwasserschutzeinrichtungen ▪ Schadenspotenziale bei Hochwasser - Wasserwirtschaftliche Anlagen am und im Gewässer: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontrollbauwerke, Querbauwerke, Einbauten, Engstellen, Zwangspunkte ▪ Gewässerkreuzungen (Brücken, Dücker, Wasser, Strom, Gas, etc.) ▪ Wasserkraftnutzung, Wasserentnahme, Wasserzugabe - Ausleitungstrecken, Wasseraufteilung
Grundwasser	<ul style="list-style-type: none"> - Grundwasserflurabstände - Aufbau des Grundwasserleiters (Infiltration / Exfiltration) - Grundwassererneuerungsraten - Grundwassernutzungen
Gewässernahe Bereiche	<ul style="list-style-type: none"> - Nutzungen des Uferstreifen bzw. Uferstrandstreifen - Flächenverfügbarkeit der <ul style="list-style-type: none"> ▪ Uferstreifen ▪ Gewässerauenbereiche ▪ Talräume
Einzugsgebiet bzw. Stadtgebiet	<ul style="list-style-type: none"> - Versiegelungsgrad - Kanalisationsnetz: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Trennsystem oder Mischsystem ▪ Speicherkomponenten (RÜB-Entlastungen) ▪ Bauwerke (z.B. Sammelbauwerke) ▪ Regel- und Steuereinrichtungen - Abwasserreinigung - Pumpwerke

2.2.3 Gewässerkosmetik

Ziel der naturnahen Gewässerentwicklung sollte es immer sein, eine ökologische Verbesserung des derzeitigen Zustandes zu bewirken. Aufgrund der zahlreichen vorhandenen Restriktionen und einer Fehlinterpretation der Fachliteratur sind in der Praxis jedoch immer öfter sog. „Renaturierungen“ zu beobachten, die eher als „Verschönerungsmaßnahmen“ fungieren, da hierbei die „ökologischen Sünden“ nicht beseitigt werden, sondern vielmehr mit mehr oder weniger gut gepflegten Bewuchsstrukturen kaschiert werden (vgl. **Abb. 2.14**).



Abb. 2.14: Gewässerkosmetik ohne wirkliche Verbesserung der gewässerökologischen Merkmale. Links: Gewässer im ausgebauten Zustand. Rechts: Durch fachlich fehlerverstandene „Renaturierungen“ überwuchert der zugelassene Bewuchs die eigentliche harte Verbauung des Baches. Zudem kann sich eine solche Maßnahme sehr nachhaltig negativ auf die Hochwassersicherheit auswirken.

Kaiser und Schüle (2004) zeigen in Ihrer Arbeit ein Konzept zur Bewertung städtischer Fließgewässer unter Berücksichtigung öko-morphologischer Faktoren und Aspekten der Erlebnis- und Aufenthaltsqualität auf. Mit Hilfe solcher Bewertungsverfahren und der im folgenden Kapitel aufgezeigten ökologischen Ansprüche der gewässerspezifischen Teillebensräume kann eine unfachgemäße „Gewässerkosmetik“ vermieden werden.

2.2.4 Ökologische Ansprüche der gewässerspezifischen Teillebensräume

Insbesondere für Fließgewässer in Ortslagen sind auch kleinere, noch mögliche naturnahe Maßnahmen stets eine Verbesserung der Teillebensräume. Zu diesen gewässerspezifischen Teillebensräumen zählen vor allem das freifließende Wasser, die Gewässersohle, die Ufer und – wenn vorhanden – die Vorländer, Deiche und Nebengewässer.

Die folgende Aufzählung gibt eine stichwortartige Matrix zur Bewertung der Qualität der Lebensbedingungen speziell in den urbanen Teillebensräumen (verändert nach Patt, 2001 Seite 420 ff). Außerdem werden exemplarisch Möglichkeiten zur Aufwertung der Teillebensräume erläutert.

▪ Freifließendes Wasser

Tab. 2.3: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Freifließendes Wasser“

Teillebensraum „Freifließendes Wasser“		
Lebensbedingungen im Teillebensraum sind bei innerörtlichen Verhältnissen...		
gut	mäßig	schlecht
<ul style="list-style-type: none"> - vielfältige Fließstrukturen mit hoher Strömungsdiversivität - vorhandene Teilbeschattung - vorhandene Durchgängigkeit - strömungsberuhigte Rückzugsräume bei Hochwasser 	<ul style="list-style-type: none"> - monotone Fließstrukturen infolge Gewässerausbau - kaum strömungsberuhigte Rückzugsräume bei Hochwasser - Durchgängigkeit nur für schwimmstarke Fische - Abschnitte ohne Teilbeschattung infolge fehlendem Uferbewuchs 	<ul style="list-style-type: none"> - beengter, ausgebauter kanalartiger Gewässerlauf ohne Fließstrukturen - verändertes Fließverhalten infolge von Stauanlagen oder Ausleitungen (bei z.B. bei Wasserkraft im Nebenschluss) - keine Durchgängigkeit infolge von Quer- oder Längsbauwerken - fehlende Beschattung - keine strömungsberuhigten Rückzugsräume bei Hochwasser

Eine wesentliche Verbesserung des Teillebensraumes „Freifließendes Wasser“ kann durch die Umgestaltung des ausgebauten Gewässerlaufes entsprechend der jeweiligen vorherrschenden natürlichen Gewässerlandschaft erfolgen. Eine sehr gute und praxisingerechte Grundlage zur Bestimmung der potenziell natürlichen Gewässerlandschaft in Deutschland kann der Arbeit und den Kartenwerken von Briem (2003) entnommen werden. Ferner bieten viele Landesämter ebensolche Kataloge mit den landestypischen Gewässerlandschaften an.

Der Gestaltung eines innerörtlichen Gewässerlaufes ähnlich dem Vorbild der potenziell natürlichen Gewässerlandschaft sind jedoch in der Praxis aufgrund der Nutzungen oftmals Grenzen gesetzt. Speziell bei Nutzungsänderungen

können sich aber Möglichkeiten ergeben, Umgestaltungen durchzuführen und im Rahmen eines neu definierten Konsenses zwischen Lebensraumqualität und Nutzungsanspruch den Teillebensraum aufzuwerten. Als Beispiel sei hier die Umgestaltung von Absturzbauwerken zu Rauhen Rampen genannt, wodurch zum einen die Durchgängigkeit hergestellt wird und zum anderen vielfältige Fließstrukturen geschaffen werden. Lehmann und Nestmann (2000) haben speziell hierzu gängige naturnahe Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit bei Querbauwerken in Baden-Württemberg dokumentiert und Empfehlungen hinsichtlich der Gestaltung, Bemessung und hydraulischen Nachweise zusammengetragen.

▪ Gewässersohle

Tab. 2.4: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Gewässersohle“

Teillebensraum „Gewässersohle“		
Lebensbedingungen im Teillebensraum sind bei innerörtlichen Verhältnissen...		
gut	mäßig	schlecht
<ul style="list-style-type: none"> - offenporiges und durchwanderbares Hyporheal - vorhandene Dynamik infolge Erosion, Akkumulation und Sedimentation von Geschiebe 	<ul style="list-style-type: none"> - im Gewässerbett auf undurchlässiger Sohle aufliegende Geschiebeschicht 	<ul style="list-style-type: none"> - glatte, befestigte oder kolmatierte Sohle

In urbanen Gebieten ist die Sohle der Fließgewässer oft durchgehend so befestigt, dass im Extremfall kein funktionsfähiges Hyporheal vorhanden ist und sich auch nicht eigendynamisch ausbilden kann. Eine Verbesserung z.B. durch Aufreißen der Sohle hat somit im Hinblick auf eine ausreichende Durchgängigkeit des Hyporheals eine wichtige Bedeutung.

Bei solchen Maßnahmen ist darauf zu achten, dass es nicht infolge von initiiertem Erosion zur einer Eintiefung der Gewässersohle kommt. Um dies zu verhindern, empfiehlt es sich, den Sohlenaufriß gleichzeitig mit einer Querschnittsaufweitung durchzuführen, um so die strömungsbedingten Schubspannungen, welche letztendlich den Geschiebetransport bedingen, zu reduzieren. Ebenso sollte überprüft werden, ob vom Oberwasser ausreichender Feststoffeintrag vorhanden ist.

Grundsätzlich ist im Rahmen von naturnahen Umgestaltungsmaßnahmen primär ein ausgeglichener Geschiebehaushalt anzustreben. Kann trotz solcher Maßnahmen eine Sohleneintiefung nicht verhindert werden, so besteht die Möglichkeit der Sohlensicherung durch den Einbau lokaler Querriegel, welche die Sohle punktuell stützen aber ansonsten eine offene Substratsohle erlauben (vgl. **Abb. 2.15**).



Abb. 2.15: Sohlsicherung durch den Einbau eines ökologisch durchgängigen Querriegels in aufgelöster Bauweise bestehend aus großflächigen, plattigen Steinen. (Aufnahme: Lehmann)

Zusammenfassend gilt, dass

„[...] das Gewässerbett als offene, heterogene Sohle mit Möglichkeiten zur Substratumlagerung ausgebildet werden sollte. Damit wird eine Grundvoraussetzung für die Durchgängigkeit in Längsrichtung (Fließgewässerkontinuum) und in vertikaler Richtung (Wechselzone zwischen Hyporheal und fließender Welle) erfüllt. Durch Feststoffumlagerungen entstehen Kies- und Sandbänke sowie Gumpen und Kolke, die mosaikartig angeordnete Kleinlebens- und Rückzugsräume für die aquatische Fauna darstellen und die Abflüsse bei Niedrigwasser konzentrieren.“ (DVWK, 2000 Seite 25).

▪ Ufer und Uferrandstreifen

Tab. 2.5: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Ufer und Uferrandstreifen“

Teillebensraum „Ufer und Uferrandstreifen“		
Lebensbedingungen im Teillebensraum sind bei innerörtlichen Verhältnissen...		
gut	mäßig	schlecht
<ul style="list-style-type: none"> - kein monotoner Uferverlauf erkennbar; Uferlinie ist von ständigem Strukturwechsel gekennzeichnet - flache Übergänge vom Wasser zum Land sind vorhanden; hohe Varianz der Böschungsneigungen entlang der Uferlinie - es sind Uferrandstreifen vorhanden, so dass die urbane Bebauung nicht direkt bis an das Gewässer geht - Die Ufer sind mit standorttypischen Röhrichten und Gehölzen bewachsen 	<ul style="list-style-type: none"> - die Uferlinie ist relativ regelmäßig und mit Steinwurf befestigt - die Böschungen sind steil; es gibt keinen flachen Übergang vom Wasser zum Land - die Uferrandstreifen sind nur zum Teil vorhanden, vielerorts geht die Bebauung bis unmittelbar an das Gewässer - die Ufer sind nur mäßig mit Röhrichten und Gehölzen bewachsen; in der Regel ist nur Rasenbewuchs vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> - die Ufer bestehen aus einer Beton- oder Mauerwand, sind absolut monoton und strukturarm - es gibt keinen flachen Übergang vom Wasser zum Land - die Besiedlung reicht direkt bis ans Wasser; ein Uferrandstreifen ist nicht vorhanden - außer Algen, Moose und Flechten existiert kein Uferbewuchs

Vielfach sind in städtischen Bereichen die Ufer der Fließgewässer mit Wasserbausteinen bis hin zu senkrechten Betonwänden gesichert, um auch gewässernahe Flächen optimal nutzen zu können.

Ist ausreichend Platz vorhanden bzw. können entsprechende Grundstücke erworben werden, dann sollten derartig befestigte Ufer, soweit man dies im Hinblick auf den Hochwasserschutz und die Gewässerdynamik vertreten kann, zurückgebaut werden. Hierbei kann es auch sinnvoll sein, am Gewässerumland Gelände abzutragen: Neben einem vergrößertem Hochwasser-Abflussquerschnitt bewirkt dies eine Mehrung der amphibischen Standorte bzw. eine häufigere Überflutung (vgl. **Abb. 2.16**).

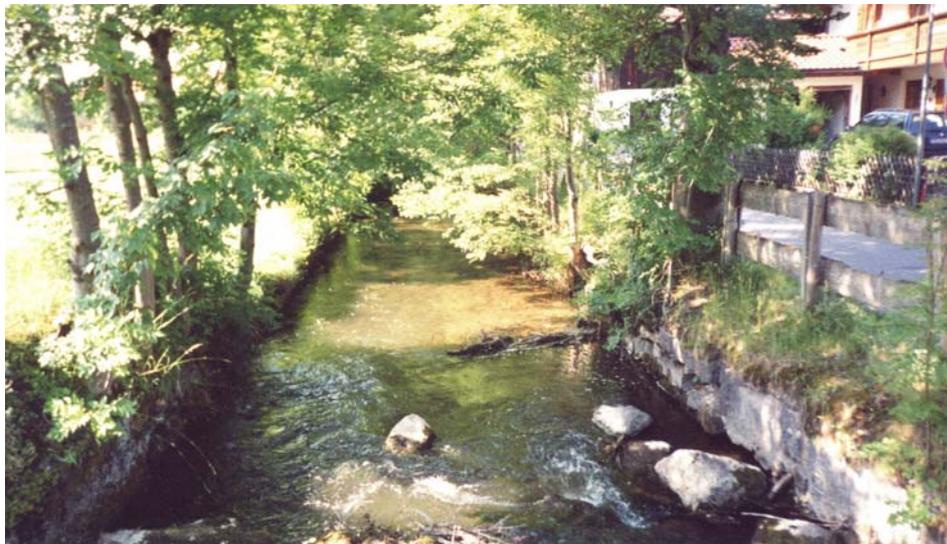


Abb. 2.16: Der renaturierte Schlierbach im Allgäu (oben: ausgebauter Zustand; unten: renaturierter Zustand). Die ufernahen Grundstücke wurden aufgekauft und zum Teil abgetragen. Dadurch konnte der ehemals kastenartige Regelquerschnitt naturnah umgestaltet werden, wobei gleichzeitig eine Erholungsfläche für die Bürgerinnen und Bürger entstand. (Aufnahme: Lehmann)

Besonders in urbanen Bereichen, wo Auen nicht mehr vorhanden sind und auch durch Renaturierungen derzeit nicht wieder geschaffen werden können, sollen überall, wo die Situation es ermöglicht, Uferrandstreifen angelegt werden. Eine Bepflanzung mit standortgerechten bzw. heimischen Gehölzen hilft dabei, die Ufer und Randstreifen zu sichern.

Ist ein Uferrandstreifen breit genug, so kann er für gewässerdynamische Prozesse zur Verfügung gestellt werden, d.h. nicht jeder Uferabbruch muss sofort wieder verbaut bzw. „repariert“ werden (vgl. **Abb. 2.17**).



Abb. 2.17: Uferabbruch an der unteren Alb bei Karlsruhe-Daxlanden. Da hier ein ausreichend breiter Uferrandstreifen vorhanden ist, findet kein Verbau des „beschädigten“ Ufers statt. Dadurch entstehen flache Uferbereiche, die einen wichtigen Übergang vom Wasser zum Land darstellen (amphibischer Bereich). Zur Vermeidung einer unerwünschten Vergrößerung des Abbruchs wäre hier eine Böschungfußsicherung mittels Steinsatz und/oder Lebendverbau möglich. (Aufnahme: Lehmann)

Ziel der Gestaltung eines Uferbereiches sollte es sein, die Gewässerunterhaltung zu minimieren. Gleichzeitig verbessern vor allem mit Gehölzen bestandene Uferabschnitte die Lebensbedingungen im Wasser und können für eine Vielzahl von Arten eigenständige Lebensräume sein. Bereits vorhandene einzelne Ökotope können durch neu angelegte Uferrandstreifen vernetzt werden und im Idealfall einen Biotopverbund mit unbesiedelten Talbereichen ergeben (vgl. DVWK, 1997).

▪ Vorländer und Deiche

Tab. 2.6: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Vorländer und Deiche“

Teillebensraum „Vorländer und Deiche“		
Lebensbedingungen im Teillebensraum sind bei innerörtlichen Verhältnissen...		
gut	mäßig	schlecht
Vorländer: - standorttypischer heimisches Faunainventar vorhanden bzw. nur extensiv genutzte Wiesenflächen und Hochstauden - auwaldige oder parkartige Vegetation	Vorländer: - monotoner Bewuchs durch Rasen - Nutzung z.B. als <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sportplatz ▪ Liegewiese ▪ Schrebergärten ▪ Campingplatz 	Vorländer: - versiegelt und befestigt, z.B. mit wasserundurchlässiger Asphaltdecke (Parkplatz)
Deiche: - im Gelände vorgezogenes Deichprofil mit Gehölzgruppen und/oder Magerrasen	Deiche: - starres Regelprofil des Deichkörpers - intensiv unterhaltener Einheitsrasenbewuchs	Deiche: - anstatt eines Deiches eine durchgehende senkrechte Mauer aus Beton

Vorländer:

Jedes Element auf einem Vorland stellt im Hochwasserfall einen Strömungswiderstand dar und bewirkt somit eine Erhöhung der Wasserspiegellagen. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit im Rahmen sog. „Flusskorrekturen“ die innerstädtischen Fließgewässer oftmals als Doppeltrapezprofil ausgebaut (vgl. **Abb. 2.18**): Angrenzend an das sog. Mittelwasserbett sind breite, durch intensiv gepflegten monotonen Rasenbewuchs glatte Vorländer gebaut, welche landseitig von Deichen eingegrenzt werden. Somit steht im Hochwasserfall eine große Querschnittsfläche zur Verfügung.



Abb. 2.18: Die als Doppeltrapezprofil ausgebaute Murg bei Gaggenau im Kreis Rastatt. Deutlich zu erkennen sind die grasbewachsenen Vorländer, welche an das Mittelwasserbett anschließen. Das Gewässer wird beidseitig von Deichen eingegrenzt; hinter den Deichen sind Verkehrswege, Besiedlung oder Industrie bzw. Gewerbe. Eine eigendynamische Gewässerentwicklung kann hier aufgrund des massiven Ausbaus und der Sicherungen nicht stattfinden. (Aufnahme: Lehmann)

Die Unterhaltung solcher hydraulisch sehr leistungsfähigen Gewässerquerschnitte ist sehr aufwendig. Mehrmals pro Jahr muss eine Mahd der Vorland- und Deichflächen erfolgen; während Hochwasserereignissen kommt es oftmals zu großflächigen Ablagerungen von Feststoffen auf den Vorländern, so dass in unregelmäßigen Abständen eine Räumung stattfinden muss.

Als Konsens zwischen hydraulischer Leistungsfähigkeit und landschaftsökologischen Ansprüchen wurde ab den 1960er Jahren zunehmend entlang der Uferbereiche eine Gehölzentwicklung zugelassen. Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich seitdem mit der Auswirkung solcher gehölzbestandener Ufer- und Vorlandbereiche auf die hydraulische Leistungsfähigkeit des Gerinnes. Im Kapitel 3 und Kapitel 4 dieser Arbeit wird speziell hierauf näher eingegangen.

Deiche:

Werden Deiche neu angelegt oder bestehende Deiche saniert, so unterliegen diese besonderen Sicherheitsanforderungen in Bezug auf die Standsicherheit, Überflutung und Durchsickerung (vgl. z.B. DIN 10712). Unter strenger Anwendung der Normen entsteht zwangsläufig ein eintöniger Deich mit Regelprofil und einem kurz geschorenen Rasenbewuchs.

Um einen Spielraum für landschaftsgestalterische und landschaftsökologische Maßnahmen zu schaffen, sollte bei vorhandenem Platz der Deich großzügiger

aufgebaut werden, als es der erdstatisch nötige Mindestquerschnitt verlangt. Diese zusätzlichen Schüttungen dienen der Gestaltung und ermöglichen eine Bepflanzung bzw. eine Sukzession sowie eine Reduzierung der Unterhaltung. Die erforderlichen Deichverteidigungswege können im städtischen Bereich auch in ein Konzept von Uferpromenaden, Rad-, Wander- und Spazierwege integriert werden (vgl. **Abb. 2.19**) (vgl. DVWK, 2000).



Abb. 2.19: Gewässernaher Unterhaltungsweg, der zugleich als Spazier- und Erlebnispfad gestaltet wurde. In Zusammenarbeit mit Pädagogen ist so ein Konzept umgesetzt worden, welches an mehreren eingerichteten Stationen entlang des Pfades zum Mitmachen anregt und zugleich durch Informationstafeln Auskunft über die Fließgewässerökologie, -morphologie und -hydraulik vermittelt. (Aufnahme: Lehmann)

▪ Nebengewässer

Tab. 2.7: Bewertungsmatrix zum Teillebensraum „Nebengewässer“

Teillebensraum „Nebengewässer“		
Lebensbedingungen im Teillebensraum sind bei innerörtlichen Verhältnissen...		
gut	mäßig	schlecht
<ul style="list-style-type: none"> - Bach mit offenem, unregelmäßigem Querschnitt - höhengleich, spitzwinklige Einmündung in das Hauptgewässer - Böschungen mit heimischen Gehölzbewuchs 	<ul style="list-style-type: none"> - offener Bachlauf mit monotonen Regelquerschnitt - senkrechte Einmündung in das Hauptgewässer - kein höhengleicher Anschluss an das Hauptgewässer (z.B. Schwelle vor der Einmündung) - Böschungen mit Rasenbewuchs 	<ul style="list-style-type: none"> - verdohlter oder verrohrter Bachlauf - hoher, senkrechter Absturz in das Hauptgewässer - keine Vegetation vorhanden

Ein wichtiger Schritt in punkto Quervernetzung ist das Freilegen versiegelter und/oder verdohlter Nebengewässer unter Berücksichtigung der gewässerökologischen Belange. Hierzu zählt u.a. auch eine funktionstüchtige Anbindung des Seitengewässers an das Hauptgewässer im Hinblick auf die Durchwanderbarkeit, damit sich z.B. Fließgewässerorganismen für die Dauer eines Hochwasserabflusses im Hauptgewässer in die Nebengewässer zurückziehen können.

Ideal ist eine offene, naturnah gestaltete niveaugleiche Einmündung unter einem spitzen Winkel ($\approx 45^\circ$ bis 60° zur Fließrichtung des Hauptgewässers). Dies entspricht der vielfach beobachteten Mündungssituation natürlicher Seitengewässer. Bei diesen Bedingungen bleibt die zustrombedingte „Lockströmung“ für Wasserorganismen im Hauptgewässer lange „gebündelt“ und die Sedimentation im Mündungsbereich wird verringert; i.d.R. bilden sich eher Kolke aus, die beliebte Einstandsräume für Fische darstellen.

2.3 Planungsmethodik: Regimeansatz – Leitbild – Restriktions-analyse

Nachdem in Kap. 2.1 die Notwendigkeit einer interdisziplinären Arbeitsweise dokumentiert wurde und in Kap. 2.2 von den allgemeinen auf die speziellen Anforderungen der Gewässerentwicklungen in urbanen Bereichen übergeleitet wurde, stellt dieses Kapitel die Methodik vor, die den Fachleuten in der Praxis zur Gewässerentwicklungsplanung zur Verfügung steht.

2.3.1 Gewässermorphologische Merkmale und Eigenschaften

Die Erscheinungsform natürlicher und naturnaher Fließgewässer ist durch eine komplexe dynamische Strukturvielfalt geprägt. Hier ist eine Unterteilung nach der geometrischen Größenordnung in Makro-, Meso- und Mikrostrukturen üblich:

- **Makrostrukturen**

Zu den Makrostrukturen zählen die Lauform (gestreckt, gewunden, verzweigt) sowie der laufbedingte Wechsel von Prall- und Gleituferrn und die Längsgliederung der Sohle durch den Wechsel von Kolke und Furten (vgl. Leopold, Wolmann und Miller (1964) und Mangelsdorf und Scheurmann (1980)).

- **Mesostrukturen**

Zu den Mesostrukturen zählen neben der Querschnittsform (Profilausbildung) die Kolke, Furten bzw. Bänke und Uferbuchten sowie größere Totholzansammlungen.

- Mikrostrukturen

Als Mikrostrukturen bezeichnet man die Substratverteilung des Geschiebematerials, die Wurzelstrukturen der Ufergehölze, die Wasservegetation und die Ansammlungen von kleineren organischen Materialien wie z.B. Blätter und Äste.

Aus dieser dreistufigen Klassifizierung gewässermorphologischer Prozessräume wird wiederum die Verkettung der Strukturen deutlich: Die Verteilung der aus mobilen Materialien gebildeten Mikrostrukturen im Gewässerbett ist stark von der Strömung beeinflusst, die wiederum von den Makro- und Mesostrukturen beeinflusst wird.

Die Lauf- und Bettstrukturen eines Gewässers sind somit keine statischen, sondern ständig in Veränderung begriffene Zustände. Schumm und Lichty (1965) stellten erstmals ein geomorphologisches Zeitmaßstabsmodell vor, welches sich auf flussmorphologische Raumeinheiten bezieht. Knighton (1984) ergänzte diesen Ansatz und stellte für unterschiedliche Strukturen der Makro-, Meso- und Mikroebene einen Raum-Zeit-Bezug her, der Prozesse der Gewässerentwicklung unter natürlichen Bedingungen zeitlich quantifiziert. Da dieses Modell für ingenieurpraktische Arbeiten am Gewässer nicht hochaufgelöst genug war, fand eine Ergänzung durch Newson und Sear (1994) und letztendlich auch eine höhere räumliche Differenzierung nach Kern (1994) statt.

Im Gegensatz zu seinen Vorgängern diskutiert Kern (1994) in seinem Modell sehr ausführlich die geomorphologischen Prozesse, die innerhalb der Raumeinheiten

- Gewässernetz / Einzugsgebiet,
- Flussabteilung (z.B. Oberlauf) / Flusstal,
- Gewässerabschnitt / Talboden,
- Gewässerstrecke / Überschwemmungsaue,
- Bettstruktur / Auenhabitate und
- Mikrohabitat

ablaufen und die äußeren Einwirkungen, die im jeweiligen Zeitrahmen die Landschaftsentwicklung in der Raumeinheit bewirken. Hierbei schließt Kern (1994) ebenfalls die Auswirkungen von Naturkatastrophen und anthropogenen Einflüssen in seine Betrachtungen mit ein.

Aufgrund der in Kap. 2.2 genannten speziellen Anforderungen an die Gewässerentwicklung in urbanen Bereichen kann festgestellt werden, dass im meso- und mikroskaligen Bereich eigendynamische Entwicklungen zugelassen werden können und im Rahmen von Renaturierungsarbeiten erwünscht sind. Im makroskaligen Bereich hingegen sollte aufgrund der räumlich gegebenen Zwangspunkte keine Eigendynamik stattfinden – hier ist also ein gewässermorphologisches Gleichgewicht angestrebt.

Bereits Mackin (1948) hat sich für fluviale Gewässer mit der Frage der Definition eines geomorphologischen Gleichgewichtes beschäftigt. Er definiert dies letztendlich durch ein Gleichgewicht zwischen Gefälle und Feststofffracht, welches sich durch eine neutrale Feststoffbilanz an den Ein- und Ausgängen eines betrachteten makroskaligen Gewässerabschnittes ausdrückt. Ahnert (1973) stimmt diesem Konzept nicht zu, da so keine morphodynamischen Prozesse innerhalb des Gewässerabschnittes berücksichtigt werden.

Das Konzept nach Ahnert (1973) basiert daher nicht auf der Bilanzierung einzelner Parameter, sondern baut auf qualitativen Formulierungen auf, welche aus Beobachtungen abgeleitet wurden und die dynamische Wechselwirkung zwischen fließender Welle und lokaler Akkumulation von Feststoffen beschreibt (z.B. Querschnittseinengung durch Geschiebeablagerungen nach einem Hochwasser → zunehmende lokale Fließgeschwindigkeiten in der Einengung → zunehmende Erosion in diesem Bereich bis der ursprüngliche Querschnitt wieder vorhanden ist).

Chorley und Kennedy (1971) führten ihre Untersuchungen parallel zu Ahnert durch und entschieden sich, im Gegensatz zu den anderen Autoren die Zeit als Parameter mit in ihre Betrachtungen einfließen zu lassen. Als Ergebnis aus ihren systematischen Untersuchungen definierten sie vier gewässermorphologische Gleichgewichtszustände (vgl. **Abb. 2.20**).

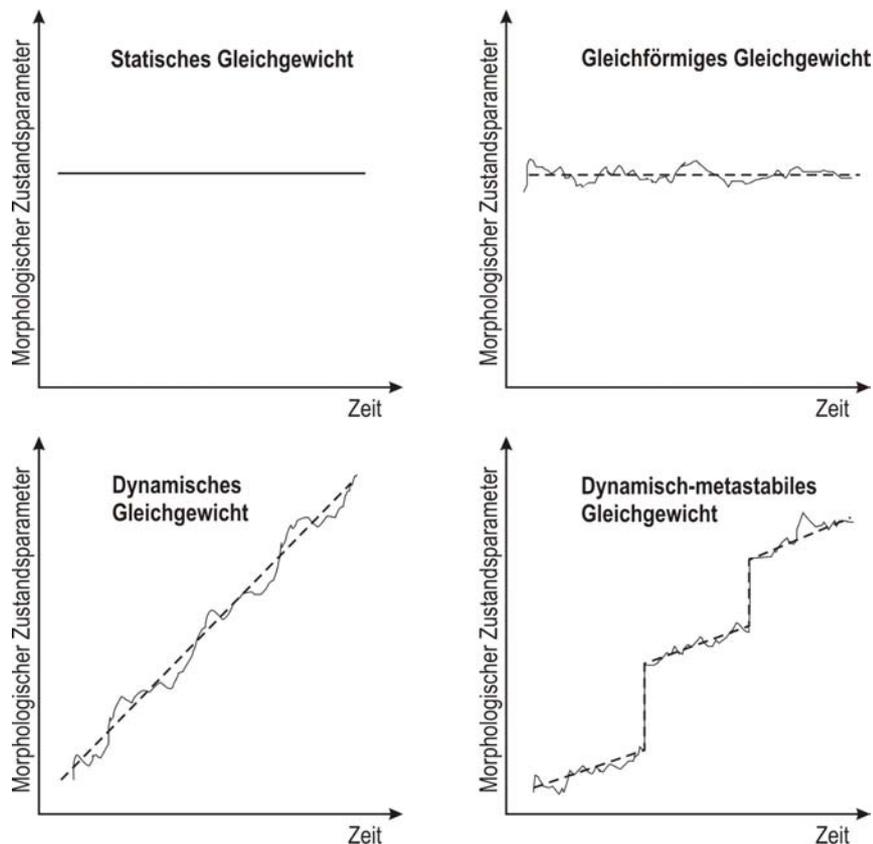


Abb. 2.20: Gewässermorphologische Gleichgewichtszustände nach Chorley und Kennedy (1971).

Beispiel:

Im Rahmen des Ausbaus der unteren Murr bei Steinheim Ende der 1970er Jahre wollte man einen alten Weidenbestand erhalten und legte deshalb in diesem Bereich eine künstliche Inselgruppe im Bereich einer Gewässeraufweitung an (vgl. **Abb. 2.21**).

Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg nutzte die Gelegenheit und deklarierte diesen Bereich als Pilotgebiet zur Dokumentation eigendynamischer Gewässerentwicklung. Durch jährliche Vermessung der Inselgruppe konnte man die Veränderung der Inseln dokumentieren (vgl. **Abb. 2.22**).

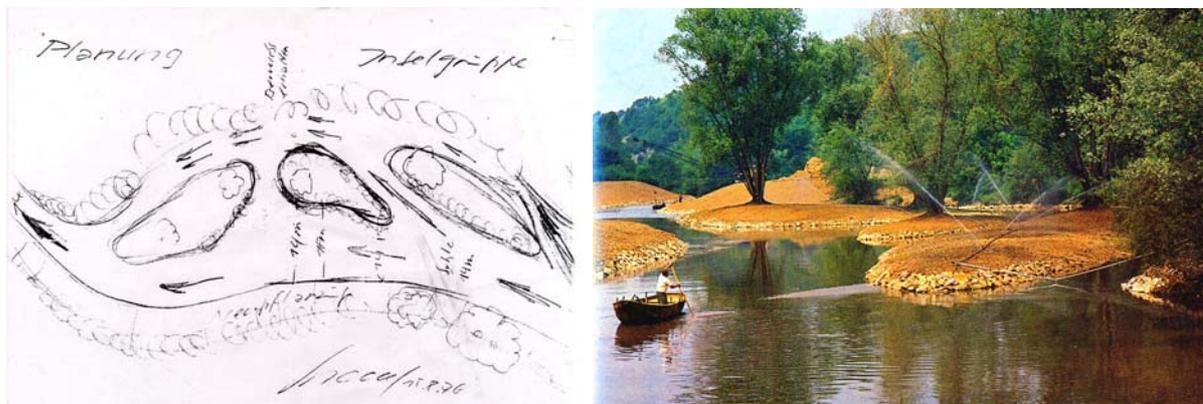


Abb. 2.21: Links: „Planunterlagen“ zum Bau der künstlichen Inseln und der Gerinneaufweitung. Ziel war es, im Rahmen des Ausbau der unteren Murr bei Steinheim einen alten Weidenbestand zu erhalten. (Schade, 1976). Rechts: Die künstlichen Inseln direkt nach der Fertigstellung im Jahr 1977 (Bilder: Schade)

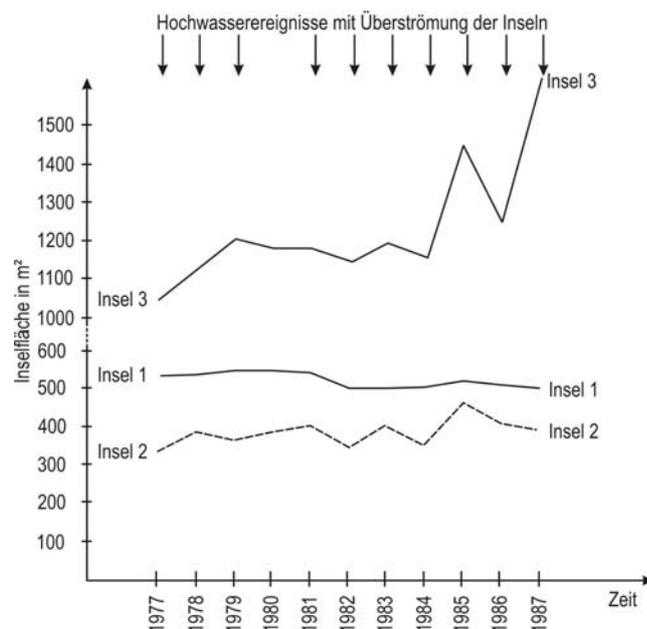


Abb. 2.22: Darstellung der Entwicklung der Inselgrößen über die Zeit. Zusätzlich wurden noch die Zeitpunkte von signifikanten Hochwasserereignissen am oberen Bildrand markiert. (Forschergruppe Murr, verändert und ergänzt durch Lehmann mit Vermessungsdaten der Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg)

Aus **Abb. 2.22** werden die zuvor definierten Gleichgewichtszustände ersichtlich:

- Insel 1 (in **Abb. 2.21** rechts im Vordergrund zu erkennen) hat sich über die Zeit kaum verändert. Es handelt sich hierbei um ein statisches bzw. schwach ausgeprägtes gleichförmiges Gleichgewicht;
- Bei Insel 2 sind die Schwankungen etwas ausgeprägter; hier handelt es sich um ein gleichförmiges Gleichgewicht;
- Insel 3 weist einen ansteigenden Verlauf der Inselgröße auf. Hier handelt es sich um ein dynamisches Gleichgewicht. Zwischen den Jahren 1984 und 1987 erkennt man Sprünge, was wiederum auf ein dynamisch-metastabiles Gleichgewicht in diesem Zeitraum hinweist.

Kern (1994) diskutiert in seinem Raum-Zeit-Modell die Gleichgewichte der einzelnen Raumeinheiten. Aufbauend hierauf leitet er dann Schwellenparameter zur Abgrenzung von Gleichgewichtsprozessen und Katastrophenprozessen ab.

Aufgrund der oben gezeigten Eigenschaften stellt das Kern'sche Raum-Zeit-Modell eine wichtige Grundlage bei der Planung naturähnlicher Fließgewässerstrukturen dar. Der Anwender kann mit Hilfe des Raum-Zeit-Modells qualitativ prognostizieren, wie sich kurz-, mittel- und langfristige natürliche und/oder anthropogene Einflüsse auf die Gewässermorphologie in der Makro-, Meso- und Mikroskala auswirken werden. Somit können für hydraulische und sedimentologische Nachweise untersuchungsrelevante Entwicklungsszenarien abgeleitet werden und Maßnahmen zur Gewässerunterhaltung geplant werden.

2.3.2 Regimeansatz und -gleichungen

Ein Gewässer ist ein physikalisches System, welches das Bestreben hat, einen gleichförmigen Gleichgewichtszustand zu erreichen (vgl. Rosgen, 1993). Bei der Renaturierung ausgebauter urbaner Fließgewässer wird angestrebt, eigendynamische Entwicklungen im Bereich der Meso- und Mikrostrukturen zu initiieren und zuzulassen. Um zu große morphologische Änderungen zu verhindern, sollte der Planer darauf achten, dass sich für diese Strukturen ein gleichförmiger Gleichgewichtszustand einstellt, wodurch gewährleistet werden kann, dass sich die übergeordnete Makrostruktur nicht signifikant ändert und dort ein statisches Gleichgewicht erreicht wird.

Der gleichförmige Gleichgewichtszustand wird auch als Regime-Zustand bezeichnet, innerhalb dessen die Randbedingen über eine bestimmte Zeitperiode hinweg keinerlei Veränderungen unterliegen (vgl. Blench, 1969, Seite 27 ff). Als Randbedingungen bzw. Prozessvariablen, welche den morphologischen Zustand eines Gewässers bestimmen, sind nach Hey (1978) folgende zu nennen:

- Abfluss (1)
- Feststofftransport (2)

- Talgefälle (3)
- Gewässerbettbeschaffenheit (4)

Diese Prozessvariablen werden selbst wiederum vom

- Klima (5) und den
- geologischen Verhältnissen (6)

bestimmt. Parametrisiert man zudem das Gewässerbettmaterial anhand seiner

- mittleren Korngröße (7) und seiner
- Korngrößenverteilung (8),

so ergeben sich acht Variablen. In dieser Aufzählung ist die Vegetation nicht enthalten. Otto (1991) fand diesbezüglich heraus, dass insbesondere bei Bächen bzw. schmalen Fließgewässern die Vegetation einen großen Einfluss auf die Gewässermorphologie besitzt. Sie muss deshalb als weitere unabhängige Variable berücksichtigt werden, ist jedoch nur schwer zu parametrisieren.

Der Abfluss ist der wesentliche Parameter, welcher die morphologische Ausformung eines Gewässers bestimmt. Im Vergleich zu den anderen Variablen korreliert der Abfluss meist am stärksten mit der Breite und Tiefe des Gewässerbettes sowie der Lauform. Da in der Natur kein konstanter Abfluss über einen längeren Zeitraum hinweg existiert, spricht man von einem gewässerspezifischen Abflussregime, das durch verschiedene spezifische Abflussgrößen (wie z.B. MNQ, MQ, MHQ, HQ_x), deren jährliche Schwankungen, deren Relativwerte und die Abflussganglinie charakterisiert wird. Da nur selten eine Pegelstation und eine entsprechende Datenfülle zur differenzierten Beschreibung des Abflussregimes zur Verfügung steht und zudem die Simulation und Analyse eines langjährigen Abflussgeschehens ein zu großer Aufwand ist, wurde von verschiedenen Autoren versucht, einen sog. „bettbildenden“ Abfluss zu definieren.

Scherle (1999) erläutert und diskutiert in seiner Arbeit diverse Ansätze und kommt zu folgendem Fazit, welches für die Praxis der Planung naturnaher Gewässer eine wichtige Bedeutung haben sollte:

- 1) Besitzt das zu renaturierenden Fließgewässer eine den natürlichen Verhältnissen nahe kommende Abflusskapazität und ist das Gewässer nicht stark ausgebaut bzw. ist es nicht zu einer deutlichen Eintiefung der Gewässersohle gekommen, so sollte der bordvolle Abfluss als bettbildender Abfluss angenommen werden.
- 2) Bei begradigten und/oder stark ausgebauten Fließgewässerabschnitten tritt der bordvolle Abfluss je nach dem Bemessungsabfluss, der einer Ausbaumaßnahme zugrunde gelegt wurde, i.d.R. nur noch einmal in 10 Jahren oder gar 100 Jahren auf. Diese Wiederkehrzeit ist zu gering, als dass ein solcher bordvoller Abfluss als bettbildend bezeichnet werden könnte. Hier verweist Scherle auf Untersuchungen von Chang (1988), Otto (1991), Nadolny (1994) und Kinsinger und Löffler (1995)

sowie auf selbst durchgeführte Untersuchungen auf Grundlage von Abflusspegeln in Baden-Württemberg.

Scherle kommt zu dem Schluss, dass die Ableitung des bettbildenden Abflusses durch eine pauschal anwendbare Formel auf Basis spezifischer Abflusswerte (MQ, MHQ und HQ₂) nicht optimal ist. Er schlägt vor, als weitere zusätzliche Variable die Einzugsgebietsgröße mit zu berücksichtigen und zeigt in seiner Arbeit einen möglichen Weg auf, wie man über Regionalisierungsverfahren den bettbildenden Abfluss herleiten kann.

Unter der Annahme, dass ein Gewässer in einem gleichförmigen Gleichgewichtszustand, d.h. im Regime mit den unabhängigen Randbedingungen ist, können sog. „Regime-Gleichungen“ zur Berechnung der Gewässerbettbreite und -tiefe in Abhängigkeit vom bettbildenden Abfluss benutzt werden. Die von Lacey (1930) aufgestellten Grundgleichungen wurden unter Einbeziehung weiterer Datensätze u.a. von Blench (1969) und Simons und Albertson (1960 – in Chang, 1988) derart verbessert, dass damit auch unterschiedliche Ufer- und Sohlmaterialien berücksichtigt werden konnten.

Die Regime-Gleichungen haben dabei folgende Struktur:

1) Gewässerbettbreite

$$b = f(Q_b) = a_1 \cdot Q^{c_1} \quad \text{Gl. 2.1}$$

b.....mittlere Gewässerbettbreite (m)
Q_b.....bettbildender Abfluss (m³/s)
a₁.....empirischer Faktor
c₁.....empirischer Exponent

2) Gewässerbetttiefe

$$h = f(Q_b) = a_2 \cdot Q^{c_2} \quad \text{Gl. 2.2}$$

h.....mittlere Gewässerbetttiefe (m)
Q_b.....bettbildender Abfluss (m³/s)
a₂.....empirischer Faktor
c₂.....empirischer Exponent

3) mittlere Fließgeschwindigkeit

$$v = f(Q_b) = a_3 \cdot Q^{c_3} \quad \text{Gl. 2.3}$$

v.....mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
Q_b.....bettbildender Abfluss (m³/s)
a₃.....empirischer Faktor
c₃.....empirischer Exponent

Aufgrund der Kontinuitätsbedingung $Q = v \cdot A \approx v \cdot b \cdot h$ gilt für die Faktoren a_i und für die Exponenten c_i (vgl. Leopold und Maddock, 1953): $a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 = 1$ und $c_1 + c_2 + c_3 = 1$.

In **Tab. 2.8** werden die Anwendungsbereiche, Faktoren a_i und Exponenten c_i der Regimegleichungen verschiedener Autoren für unterschiedlicher Gewässertypen bzw. Bettmaterialien dargestellt.

Tab. 2.8: Regime-Gleichungen, deren Anwendungsbereiche und Faktoren und Exponenten.

Autor	Anwendungsbe- reich	Regime-Gleichung	Bemerkungen
Lacey (1930)	sandige Gerinne mit sandigen U- fern	bordvolle Breite [m]: $b_b = 4,84 \cdot Q_b^{0,5}$ mittlere Tiefe [m]: $h_m = (0,53 \cdot d_m^{-1/6}) \cdot Q_b^{0,42}$	Mittlerer Korndurchmesser d_m wird in [mm] eingesetzt.
Blench (1969)	sandige Gerinne mit ggf. bindigen Ufern	mittlere Breite [m]: $b_m = \left(2,5 \cdot \frac{d_m^{0,25}}{\sqrt{F_N}} \right) \cdot Q_b^{0,5}$ bordvolle Tiefe [m]: $h_b = \left(0,65 \cdot \frac{F_N}{\sqrt[3]{d_m}} \right) \cdot Q_b^{0,33}$	Mittlerer Korndurchmesser d_m wird in [mm] eingesetzt. Beiwert zur Charakterisierung der Uferbeschaffenheit: sandig: $F_N = 0,1$ schluffiger Ton: $F_N = 0,2$ tonig: $F_N = 0,3$
Simons und Albertson (1960)	sandig bis kiesige Gerinne, ggf. mit kohäsiven Bettma- terial	mittlere Breite [m]: $b_m = k_1 \cdot Q_b^{0,5}$ bordvolle Tiefe [m]: $h_b = k_2 \cdot Q_b^{0,36}$	Beiwert k_1 und k_2 zur Charakterisierung der Sohlen- (S) und Uferbeschaffenheit (U): S & U sandig: $k_1 = 5,71, k_2 = 0,69$ S & U kiesig: $k_1 = 2,85, k_2 = 0,30$ S & U sandig, wobei U kohäsiv: $k_1 = 4,24, k_2 = 0,58$ S & U sandig und kohäsiv: $k_1 = 3,58, k_2 = 0,50$
Kellerhals (1967)	kiesige Gerinne	bordvolle Breite [m]: $b_b = 3,26 \cdot Q_b^{0,5}$ mittlere Tiefe [m]: $h_m = (0,242 \cdot k_s^{-0,12}) \cdot Q_b^{0,40}$	Äquivalente Sandrauheit der Gerinnewandung und der Sohle k_s wird in [mm] eingesetzt.

Scherle (1999) wendet in seiner Arbeit die Regime-Gleichungen auf Bäche in Baden-Württemberg an. Am Ende seiner Ergebnisdiskussion stellt er fest, dass die gängigen Regime-Gleichungen gute Ergebnisse erzielen, wenn ...

- 1) ...der bettbildende Abfluss für das Gewässer bestimmt werden kann. Ist dies nicht möglich, so sollte der bordvolle Abfluss oder – bei stark ausgebauten Fließgewässern – der MHQ-Wert als Ersatz für den bettbildenden Abfluss verwendet werden;

2) ...der Faktor a_i an einer oder mehreren naturnahen bzw. natürlichen Referenzgewässerabschnitten des gleichen Gewässers kalibriert werden kann.

Yalin und Da Silva (2001) schlagen in ihrer Arbeit eine Methode vor, mit der auf Basis partieller Ansätze weitergehende Regime (z.B. Transportintensität, Laufcharakter, etc.) abgeschätzt werden können. Für die praktische Anwendung haben Yalin und Da Silva (2001) ein PC-Programm erstellt. Aufgrund fehlender Anwendungserfahrungen hierzu wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher auf diese recht komplizierten erweiterten Regime-Ansätze eingegangen.

Als Fazit bezüglich der Regime-Gleichungen kann somit festgehalten werden, dass es aufbauend auf den bettbildenden Abfluss für den Planer durch Anwendungen der Gleichungen möglich wird, einen gewässertypischen natürlichen Querschnitt zu bemessen, der als Grundlage für eine Renaturierung verwendet werden kann und den Naturzustand annähernd wiedergibt.

2.3.3 Methodik der Gewässerentwicklungsplanung

Aufbauend auf die in Kap. 2.1 genannten interdisziplinären Ansätze und den in Kap. 2.2 erläuterten speziellen Anforderungen sowie den in Kap. 2.3 genannten gewässermorphologischen Grundlagen bietet das Instrumentarium der Gewässerentwicklungsplanung eine methodische Vorgehensweise, die es transparent für alle Beteiligten ermöglicht, einen Kompromiss zwischen dem naturnahen und dem ausgebauten Fließgewässer abzuleiten und Entwicklungsziele zu formulieren.

Natürliche Fließgewässer haben im Vergleich zu ausgebauten Gewässern die Fähigkeit zur Selbstregulation durch Resistenz und Resilienz. Die Begriffe Resistenz und Resilienz beziehen sich auf die Ausprägung eines Systems, auf natürliche Störungen zu reagieren und aus eigener Kraft die wichtigen Strukturen für den Stofftransport und Energiefluss wieder herzustellen.

Das morphologische Gleichgewicht ist Ausdruck dieser Fähigkeit: Die Resistenz drückt sich durch eine gewisse Stabilität gegenüber Störungen aus. Infolge der Resilienz reagieren natürliche Gewässerstrukturen elastisch, d.h. Strukturen und Prozesse werden durch Störungen verändert, kehren dann aber wieder weitgehend zum Ausgangszustand zurück.

Die hohe ökologische Wertigkeit von Fließgewässern und ihren vielfältigen Wechselbeziehungen mit der umgebenden Landschaft sind jedoch in urbanen Bereichen durch zahlreiche Eingriffe z.T. erheblich eingeschränkt worden (vgl. Kap. 2.2). Das Ziel der Gewässerentwicklungsplanung ist das Wiederherstellen naturnaher Fließgewässer als funktionsfähige Fließgewässer-Ökosysteme mit den Teilzielen

- naturnahe Regelung des Wasserhaushaltes und des Abflussgeschehens,
- Erhaltung bzw. Wiederherstellung naturnaher (dynamischer) Gewässerstrukturen,

- Verbesserung der Lebensverhältnisse für Mensch, Flora und Fauna am bzw. im Gewässer.

Hierbei müssen im urbanen Bereich auch die gesellschaftlichen Bedingungen und die zulässigen Nutzungen im Sinne einer nachhaltigen Gewässerbewirtschaftung beachtet werden. Als übergeordnetes Ziel resultiert daraus ein Kompromiss, der eine möglichst große Schnittmenge aus Teilzielen und Nutzungsansprüchen beinhaltet.

Der Gewässerentwicklungsplan stellt Entwicklungsziele und daraus abgeleitete Maßnahmenvorschläge zusammen. Er gibt die Richtung vor, was an einem Gewässer von der Entwicklung bis zur langfristigen Unterhaltung zu tun ist. Somit können auch einzelne, kleinere Maßnahmen sinnvoll koordiniert werden, so dass im Lauf der Jahre aus den einzelnen Teilen eine ganz neue ökologische Qualität des gesamten Gewässers entsteht.

In der Praxis hat sich in der Gewässerentwicklungsplanung ein Vorgehen aus sechs Stufen in Kombination mit einer Analysemethodik bewährt. Im Folgenden werden die sechs Stufen und die Methodik erläutert:

- Stufe 1: Datenerhebung

Die Zusammenstellung bereits vorhandener Daten stellt die Basis der Gewässerentwicklungsplanung dar. Man erhält einen Überblick über den Datenbestand und kann Datenlücken ausfindig machen bzw. notwendige Erhebungen einleiten. Zur Datenverwaltung empfiehlt sich ein digitales Datenbanksystem (z.B. MS-Access).

- Stufe 2: Bestandsaufnahme / aktuelle Daten

Sofern nicht in der Stufe 1 bereits geschehen, sind folgende aktuelle Daten zu erheben:

- derzeitige Gewässermorphologie,
- aktuelle Vegetation,
- derzeitige Flächennutzung gewässerangrenzender Bereiche.

Ferner sollten alle wasserbaulichen Anlagen und die gewässerbeeinflussende Infrastruktur wie z.B.

- Abstürze und Wehre,
- Ein- und Ausleitungen,
- Verdohlungen,
- Brücken,
- Sohl- und Uferbefestigungen und
- Verkehrswege bzw. Gewässerkreuzungen (Strom-, Gas-, Wasser- und Telekommunikationsleitungen und Kanalisation)

erhoben und dargestellt werden. Dies sind oftmals lokale Zwangspunkte, die eine eigendynamische Gewässerentwicklung eingrenzen.

▪ Stufe 3: Erstellen des heutigen potenziell natürlichen Gewässerzustandes

Der ursprüngliche natürliche Zustand ausgebauter Fließgewässer ist i.d.R. nur bedingt ermittelbar, da man rückblickend nicht mehr zwischen Veränderungen infolge natürlicher und anthropogener Einflüsse unterscheiden kann. Ein Beispiel hierfür sind die Auensedimente entlang des Oberrheines, welche in dieser Art nicht natürlich, sondern als Folge der mittelalterlichen Rodungen und erhöhten Denudation im Einzugsgebiet entstanden sind.

Der sog. „Naturzustand“ oder „Urzustand“, also der Gewässerzustand, wie er sich in der Gegenwart ohne menschlichen Eingriff darstellen würde, ist theoretisch nur durch die in Kap. 2.3.2 erläuterten Regime-Gleichungen zu rekonstruieren. Er kann infolge der für die Kulturräumlicherhaltung notwendigen wasserwirtschaftlichen Regularien nicht wieder hergestellt werden.

Daher wird im Rahmen der Gewässerentwicklungsplanung als Leitbild ein naturnaher, pragmatisch gewählter Gewässerzustand entworfen: Hierzu wird der heutige potenzielle natürliche Zustand (hpn-Zustand) aus der in Stufe 1 und 2 erstellten Datenbasis abgeleitet.

Der hpn-Zustand beschreibt eine Situation, die sich mittelfristig als geomorphologisches Gleichgewicht einstellen würde, wenn man

- die heutigen Nutzungen am Gewässer einstellen würde,
- Sohlen- und Uferbefestigungen zurückbauen bzw. entfernen würde,
- künstliche Regelungen des Wasserhaushaltes aufgeben würde sowie
- Grundwasserabsenkungen in den ehemaligen Auengebieten rückgängig machen könnte und gleichzeitig
- die Gewässerunterhaltung komplett einstellen würde.

Im hpn-Zustand besitzt das Gewässer eine voll ausgeprägte Abfluss- und Auendynamik. Dieses Leitbild definiert sich damit ausschließlich am heutigen Erkenntnisstand über die natürliche Struktur- und Ökodynamik eines Fließgewässer-Ökosystems und ist somit unabhängig von wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Vorgaben.

In **Abb. 2.23** ist zusammenfassend die Lage des Naturzustandes, des hpn-Zustandes, des im Rahmen einer Gewässerentwicklungsplanung zu erarbeitenden Entwicklungszieles und des heutigen, anthropogen beeinflussten Kulturzustandes relativ zur Naturnähe dargestellt.

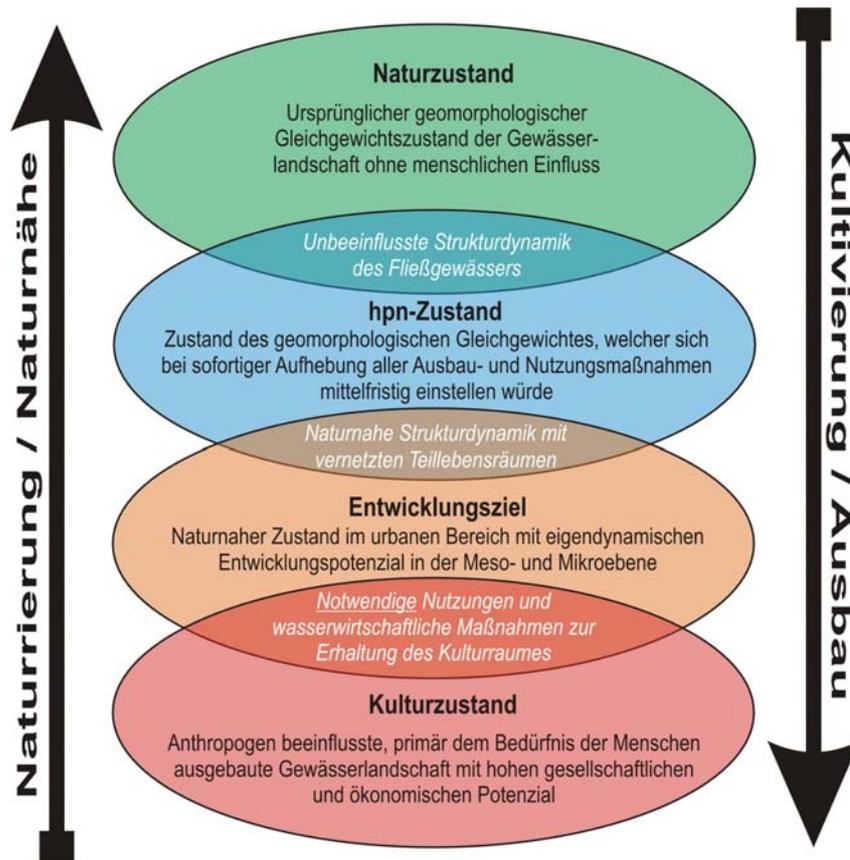


Abb. 2.23: Lage der einzelnen Zustandsformen eines Gewässerabschnittes relativ zum Entwicklungsziel.

In der Praxis haben sich drei Verfahren bewährt, um den hpn-Zustand zu konstruieren (vgl. **Tab. 2.9**). Aufgrund eigener Erfahrungen kann die Empfehlung gemacht werden, möglichst immer alle drei Verfahren anzuwenden und eine gemeinsame Schnittmenge zu bilden.

Tab. 2.9: Verfahren zur Konstruktion des hpn-Zustandes.

Verfahren zur Konstruktion des hpn-Zustandes		
Räumliche Referenz	Historische Referenz	Theoretisch rekonstruierte Referenz
<p>Eine räumliche Referenz wäre ein weitgehend unbeeinflusstes, typologisch vergleichbares Gewässer in demselben Naturraum.</p> <p>Sucht man für ein verbautes Gewässer eine räumliche Referenz, so dürfen nicht nur die betrachteten Abschnitte vergleichbar sein, sondern das Einzugsgebiet muss auch hinsichtlich</p> <ul style="list-style-type: none"> - der Größe, - der Höhenlage, - der Struktur, - der Geologie, - der Vegetation und - der Landnutzung <p>ähnlich sein, da diese die Gewässermorphologie maßgeblich bestimmen.</p>	<p>Bei einer historischen Referenz werden historische Informationen über das Gewässer herangezogen.</p> <p>Dies können z.B. Angaben über ursprünglich vorhandene Fischarten sein oder alte Karten, in welchen die ursprüngliche Linienführung bzw. Gerinneform zu erkennen ist.</p> <p>Bei der Verwendung solcher Unterlagen muss jedoch berücksichtigt werden, dass die ersten großflächigen Gestaltungsmaßnahmen im Umfeld der Fließgewässer bereits um 1800 begannen (z.B. alte Drainagen im Zuge der Melioration), so dass neuere Karten bereits diese Änderungen beinhalten und i.d.R. deshalb einen bereits anthropogen beeinflussten Zustand wiedergeben.</p>	<p>Bei einer theoretische rekonstruierten Referenz wird der hpn-Zustand aufgrund von wissenschaftlichen Erkenntnissen hergeleitet.</p> <p>So können z.B. geomorphologische Gesetzmäßigkeiten zur Rekonstruktion der Gewässermorphologie verwendet werden (vgl. Regime-Gleichungen)</p> <p>Inwieweit damit die ursprüngliche Organismenbesiedlung ermittelt werden kann, ist abhängig vom Kenntnisstand der geographischen Verbreitung der Organismen.</p>

- Stufe 4: Bewertung des derzeitigen Zustandes am hpn-Zustand

In dieser Stufe wird der Untersuchungsraum hinsichtlich der ökologischen und wasserwirtschaftlichen Situation relativ zum hpn-Zustand bewertet, wobei erkannte Defizite, nutzungsbedingte Konflikte und schutzwürdige Bereiche aufgezeigt werden. Die Bewertung ist ausgerichtet auf eine ökologisch-morphologische Beurteilung der Gewässerstrukturen, der Verbauungen im und am Gewässer sowie der Vegetation bzw. Landnutzung in den gewässerangrenzenden Bereichen.

In der Praxis hat sich hieraus die Gewässerstrukturgüte als ein Maß für die ökologisch-morphologische Qualität etabliert. Man unterscheidet derzeit zwischen zwei Verfahren zur Erhebung der Gewässerstrukturgüte:

- Das Übersichtsverfahren ist geeignet bei großräumigen, überregionalen Planungen. Dieses Verfahren kommt weitgehend ohne eine Geländebegehung aus. Die Erhebung wird anhand von Luftbildern sowie vorhandenen Karten und Daten durchgeführt. Somit eignet sich dieses Verfahren beson-

ders für große Fließgewässer, die gut auf Luftbildern sichtbar sind (vgl. LAWA, 1999).

- Mit dem sog. „Vor-Ort-Verfahren“ wird die Gewässerstrukturgüte kleiner und mittelgroßer Fließgewässer im Rahmen einer Begehung und mit Hilfe von Erhebungsbögen abgeleitet (vgl. LAWA, 1998).

Für die Bewertung des derzeitigen Zustandes ist die Gewässerstrukturgütekartierung alleine jedoch nicht ausreichend. Zusätzlich sollten noch folgende Bewertungen durchgeführt werden:

- Hydrologische Fließgewässerbewertung. Hierfür steht derzeit für den deutschsprachigen Raum kein normiertes Verfahren zur Verfügung. In den USA ist man derzeit dabei, ganzheitliche hydrologische Bewertungsverfahren zu testen (vgl. Hütte, 2000).
 - Bewertung des Makrozoobenthos. Die Kenntnis des Arteninventars ist von grundlegender Bedeutung und gibt Fachleuten Hinweise auf den ökologischen Zustand des Gewässers.
 - Bewertung der Fischfauna. Hier gilt Gleiches wie bei der Bewertung des Makrozoobenthos.
- Stufe 5: Formulierung der Gewässerentwicklungsziele

Aus dem Vergleich des hpn-Zustandes und dem derzeitigen Zustand des Fließgewässers werden auf Grundlage der durchgeführten Bewertungen unter Berücksichtigung der Restriktionen bzw. Nutzungsansprüche Entwicklungsziele abgeleitet. Hierbei sind alle Einflüsse zu beachten, die während der Dauer der Gewässerentwicklung (i.d.R. ca. 10 bis 15 Jahre) unabänderlich sind. Die Entwicklungsziele beinhalten damit unter dem Aspekt der Realisierbarkeit die Belange sowohl der Ökologie als auch der anthropogenen Ansprüche (vgl. **Abb. 2.23**).

Die Liste aller möglichen Entwicklungsziele ist sehr lang; eine gute Übersicht ist in LfU (2000) dargestellt. Die Formulierung der Entwicklungsziele basiert neben den restriktiv-analytischen Bewertungen auch auf den Ergebnissen der zu erbringenden Nachweise zur Gewährleistung der Sicherheit und Funktionsfähigkeit des betrachteten Untersuchungsraumes.

Insbesondere die Forderung der Hochwassersicherheit angrenzender Bereiche verlangt nach hydraulischen Berechnungsverfahren, die es ermöglichen, sehr komplexe Gewässer- und Strömungsstrukturen zu simulieren und hinsichtlich der Wasserspiegel-Abfluss-Beziehung zu quantifizieren. Solche Verfahren werden in den Kapiteln 3 und 4 dieser Arbeit erläutert und zur praktischen Anwendung formuliert.

- Stufe 6: Handlungs- und Maßnahmenvorgabe

Die Maßnahmen, welche sich aus den vorhandenen Defiziten ergeben, um die formulierten Entwicklungsziele zu erreichen, stellen das eigentliche Kernstück des Gewässerentwicklungsplanes dar. Es wird dabei grundsätzlich zwischen drei Maßnahmentypen klassifiziert:

- Erhalten...

...der noch vorhandenen natürlichen bzw. naturnahen Abschnitte als Reservoir für eine Wiederbesiedlung von gegenwärtig degenerierten Gewässerabschnitten;

- Entwickeln...

...von Gewässerabschnitten durch Maßnahmen, die nur den Anstoß für eine zukünftige eigendynamische Gewässerstrukturbildung geben (sog. „Initialmaßnahmen“). Das kann z.B. durch Bereitstellen von Raum, durch die Entfernung von Uferverbau oder durch das Tolerieren von spontanen Gehölzwuchs erreicht werden.

- Umgestalten...

...der Gewässerstruktur in Abschnitten, wo in absehbarer Zeit keine natürliche Eigenentwicklung des Gewässers möglich ist. Beispiele hierfür sind die Wiederherstellung der Durchgängigkeit an Querbauwerken (vgl. Lehmann und Nestmann, 2000) oder die Sohlanbindung von Seitengewässern.

Es empfiehlt sich für die Praxis, im Hinblick auf die Umsetzung und einen effektiven Mitteleinsatz die Einteilung der geplanten Maßnahmen in kurz-, mittel- und langfristige Realisierbarkeit sowie eine Priorisierung der einzelnen Positionen.

In **Tab. 2.10** sind alle Komponenten der Gewässerentwicklungsplanung auf Grundlage der Fachliteratur und eigener Erfahrungen zusammenfassend als „Wegweiser“ komprimiert dargestellt.

Tab. 2.10: „Wegweiser“ durch die Gewässerentwicklungsplanung.

Stufe 1: Datenerhebung
<ul style="list-style-type: none">▪ Abgrenzung des Planungsgebietes▪ Geologie des Gebietes anhand von Karten▪ Hydrologische Daten▪ Daten zum Naturraum (Schutzgebiete etc.)▪ Erfassung der Gewässermorphologie anhand vorhandener Karten▪ Typologische Einordnung des Gewässers z.B. nach Typenkatalog der EU
Stufe 2: Bestandsaufnahme und aktuelle Daten
<ul style="list-style-type: none">▪ Erfassung der Gewässermorphologie anhand einer Begehung▪ Erfassung der Nutzungen und vorhandener wasserwirtschaftlicher Anlagen▪ Erfassung gewässernaher Infrastrukturelemente (Straßen, Leitungen, Kreuzungen, etc.)
Stufe 3: Erstellen des heutigen potenziell natürlichen Gewässerzustandes
<ul style="list-style-type: none">▪ Ableiten aus der räumlichen Referenz▪ Ableiten aus der historischen Referenz▪ Ableiten aus der theoretisch rekonstruierten Referenz▪ Definition des hpn-Zustandes aus den drei Referenzen
Stufe 4: Bewertung des derzeitigen Zustandes am hpn-Zustand
<ul style="list-style-type: none">▪ Gewässerstrukturgütebewertung zum Aufdecken vorhandener öko-morphologischer Defizite▪ Bewertung der Gewässerflora und –fauna Ursachen für die aufgedeckten Defizite erörtern▪ Bewertung der Gewässergüte Restriktionen analysieren und Alternativen suchen
Stufe 5: Formulierung der Gewässerentwicklungsziele
<ul style="list-style-type: none">▪ Darstellung der Zielkonflikte aufgrund der Nutzungen und Restriktionen▪ Ableiten von Renaturierungsmöglichkeiten▪ Durchführung notwendiger (Sicherheits-)Nachweise (z.B. Hydraulik, Standsicherheit, Hochwasserschutz)▪ Ermitteln der kurz-, mittel- und langfristig erreichbaren Ziele unter Berücksichtigung unterschiedlicher Renaturierungsmethoden und deren Auswirkungen▪ Bewertung der erreichbaren ökologisch-morphologischen Zustände und Nutzungseinschränkungen▪ Vergleich der betrachteten Renaturierungsmöglichkeiten▪ Abstimmung über Art und Umfang der Renaturierungen mit Beteiligten und Betroffenen▪ Dokumentation der Entscheidungsgründe
Stufe 6: Handlungs- und Maßnahmenvorgabe
<ul style="list-style-type: none">▪ Entscheiden über die Renaturierungsmethode: Erhalten, Entwickeln und/oder Umgestalten▪ Maßnahmen in Planwerken darstellen▪ Prioritäten und Zeitplan abstimmen und festlegen▪ Erfolgskontrollen abstimmen und durchführen▪ Ggf. Korrektur der Planung während des Umsetzungsprozesses

Open-Channel Hydraulics

„In recent years water-resources projects and hydraulic engineering works have been developing rapidly throughout the world. The knowledge of open-channel hydraulics, which is essential to the design of many hydraulic structures, has thus advanced by leaps and bounds. To the students and engineers in the field of hydraulic engineering, such valuable new knowledge should be made available in suitable book form.“

Zitat aus dem Vorwort des Buches von Ven Te Chow: Open-Channel Hydraulics (1959, Seite vii), in dem erstmalig umfassend alle seinerzeit gängigen hydraulischen Berechnungsansätze ganzheitlich und praxisnah dargestellt und kritisch diskutiert werden. Dieses Buch beinhaltet das Grund- und Anwendungswissen vieler Generationen von Wasserbauern und liefert auch heute noch zahlreiche Ansätze für Forschungsarbeiten.

3 Grundlagen zur Gewässerentwicklungsplanung

Aufbau und Gliederung:

- 3.1 Hydraulik naturnaher Fließgewässer
 - 3.1.1 Grundlagen der eindimensionalen Strömungsanalyse
 - 3.1.2 Quantifizierung der Strömungswiderstände
 - 3.1.3 Probleme bei der praktischen Umsetzung
- 3.2 Feststofftransport und Gewässermorphologie
 - 3.2.1 Feststofftransport in Fließgewässern
 - 3.2.2 Berücksichtigung einer heterogenen Feststoffzusammensetzung
 - 3.2.3 Transportansätze (exemplarischer Überblick)
 - 3.2.4 Beschreibung der gewässermorphologischen Entwicklung
- 3.3 Gewässerunterhaltungsmethodik
 - 3.3.1 Aufgaben der Gewässerunterhaltung
 - 3.3.2 Unterhaltungsmaßnahmen
 - 3.3.3 Gewässerunterhaltungsplan
 - 3.3.4 Ergänzende Empfehlungen

Die physikalischen Grundlagen zur Untersuchung strömungstechnischer Fragestellungen liefert die Fluidmechanik. Im Gegensatz zur Mechanik starrer Körper, bei der von freien oder in bestimmter Weise geführten Massepunkten ausgegangen wird, handelt es sich bei der Mechanik der Fluide um kontinuierliche über bestimmte Räume verteilte Masselemente (vgl. Truckenbrodt, 1996).

Nach der hierfür entwickelten Mechanik der Kontinua stehen die einzelnen Fluidelemente zu jedem Zeitpunkt unter der Wirkung ihrer Umgebung und beeinflussen sich somit ständig in ihrer Bewegung. Die vollständigen Bewegungsgleichungen fließender Fluide wurden gegen Mitte des 19. Jahrhunderts von Navier und Stokes angegeben. Da diese sehr komplexen Gleichungen große mathematische Schwierigkeiten bei der Lösung verursachten, wurde zunächst im Rahmen von Vernachlässigungen nur das Strömungsverhalten reibungsfreier Fluide behandelt.

Aus den abgeleiteten Zusammenhängen gründete sich die klassische Hydromechanik, die aufgrund der oben genannten Vernachlässigungen in vielerlei Hinsicht stark von der Wirklichkeit abwich. Die praktisch tätigen Ingenieure, die bei der Bemessung von Rohrleitungen und Kanälen insbesondere die Reibungseinflüsse zu berücksichtigen hatten, leiteten aus Untersuchungen empirische Zusammenhänge ab, die heute unter den Begriff Technische Hydraulik zusammengefasst werden (vgl. Bollrich, 1996).

Dadurch gab es bis zum Ende des 19. Jahrhunderts zwei kaum in Berührung stehende Zweige der Fluidmechanik (vgl. **Abb. 3.1**). Die zu Beginn des 20. Jahrhunderts aufgestellte Reibungsschichttheorie für wandnahe Strömungen (sog. Grenzschichttheorie) konnte letztendlich eine Verbindung beider Zweige herstellen.

Seit dieser Zeit arbeiten Mathematiker, Naturwissenschaftler und Ingenieure gemeinsam nach einheitlichen Grundgedanken an der Lösung fluidmechanischer und strömungstechnischer Aufgaben. Durch die zunehmende Leistungsfähigkeit von Rechneranlagen und Softwareprodukten finden Untersuchungen zum Strömungsverhalten nicht mehr nur im Wasserbaulabor, sondern auch mathematisch modelliert am PC statt.

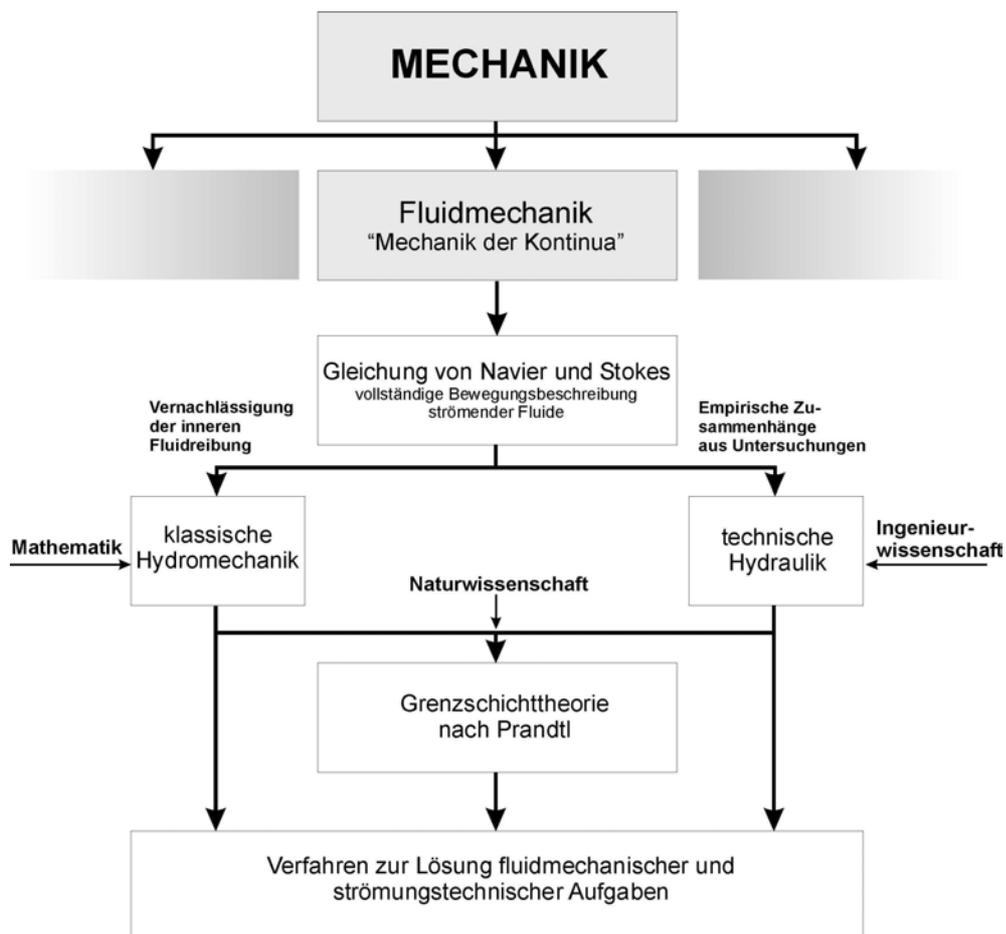


Abb. 3.1: Schaubild zur Gliederung der Fluidmechanik.

Die Stoffeigenschaften des Fluid Wasser (Dichte, Viskosität und Kompressibilität) und die Erdbeschleunigung sorgen dafür, dass flüssiges Wasser bei geneigter Oberfläche in Bewegung gerät und fließt. In diesem Zustand, der durch die dimensionslose Froude- und Reynoldskennzahl näher charakterisiert werden kann, werden Kräfte auf Widerstände entlang des Fließweges übertragen. So wird ein Teil der Bewegungsenergie des Wassers in andere Energieformen (Wärme, Schall) umgewandelt, was wiederum Auswirkungen auf die Fließbewegung bzw. auf das Strömungsverhalten an sich hat.

Infolge des zähigkeitsbedingten Haftens von Wassers an festen Grenzflächen (z.B. an der Gerinnwandung), ergeben sich während der Fließbewegung rauheitsgeprägte Ablösewirbel im grenzflächennahen Bereich. Diese Wirbel induzieren eine Turbulenz im Fluid, wodurch folgende Prozesse zeitgleich in einer sog. „turbulenten Strömung“ stattfinden:

- Energiedissipation,
- Durchmischung und
- Impulsaustausch im Fluid und in Wechselwirkung mit den Widerständen.

Letztendlich resultieren aus der Turbulenz chaotische, unvorhersehbare Bewegungen und Beschleunigungen der betroffenen Fluidpartikel.

Besonders bei naturnahen Gewässerstrukturen ist die Wechselwirkung zwischen Strömung und Fließwiderständen die Grundlage aller hydraulischen Berechnungsansätze. Nur bei wissenschaftlicher Durchdringung und der daraus resultierenden Möglichkeit einer empirischen, halbempirischen oder physikalisch exakten Beschreibung dieser Prozesse bzw. deren Auswirkung auf das Strömungsverhalten können Berechnungsergebnisse als qualitativ gute Näherung zu den Naturprozessen gelten.

Aufgrund der zuvor genannten chaotischen Prozessabläufe infolge der Turbulenz wird in der Fließgewässerhydraulik mit zeitlichen und/oder räumlich gemittelten Parametern gearbeitet.

Im Kap.3.1 werden die Grundlagen sowie der Wissenstand für die Strömungsanalyse bei eindimensionaler Betrachtungsweise⁶ erläutert⁷. Aufbauend hierauf werden die derzeitigen Verfahren zur hydraulischen Quantifizierung von typischen Fließwiderständen in offenen, naturnahen Gerinnen aufgezeigt und die derzeitigen Probleme bei der Anwendung der Grundlagen genannt.

Infolge der erwähnten hydrodynamischen Kraftübertragung auf um- und überflossene Widerstände in einem Strömungsgebiet beginnt ab Erreichen einer Schwellenbelas-

⁶ Eindimensionale Betrachtungsweise in der Gerinnehydraulik bedeutet, dass von der Annahme ausgegangen wird, in einem durchströmten Gerinnequerschnitt existiert für jedes Fluidpartikel nur eine Bewegung in Fließrichtung. Bewegungen vertikal oder seitlich dazu werden vernachlässigt.

⁷ Die Grundlagen zur mehrdimensionalen und/oder zeitlich veränderlichen (instationären) Strömungsanalyse sind in übersichtlicher Form in Lehmann, Oberle und Theobald (2002) dargestellt

tion der Feststofftransport entlang des Fließweges. Hieraus resultieren solche morphodynamischen Prozesse, wie sie im Kap. 2 mehrfach erläutert wurden. In Kap. 3.2 werden stark verkürzt und auf den Schwerpunkt der Arbeit bezogen die Grundlagen und exemplarisch einige Verfahren zur Prognose und Berechnung der Feststofftransportfrachten erläutert.

Da bei der Gewässerentwicklung innerhalb urbaner Bereiche infolge der Randbedingungen oftmals eine begleitende Gewässerunterhaltung und somit auch eine Art Entwicklungssteuerung notwendig wird, um unvorhersehbare öko-morphologische Prozesse zu kontrollieren, wird in Kap. 3.3 auf die Methodik der Gewässerunterhaltung eingegangen.

3.1 Hydraulik naturnaher Fließgewässer

3.1.1 Grundlagen der eindimensionalen Strömungsanalyse

Aufbau und Gliederung:

- 3.1.1.1 Gleichförmige Strömung
- 3.1.1.2 Stark ungleichförmige Strömung
- 3.1.1.3 Leicht ungleichförmige Strömung
- 3.1.1.4 Empirische Fließformeln
- 3.1.1.5 Universelle Fließformel
- 3.1.1.6 Berechnung der Wasserspiegellage
- 3.1.1.7 Dimensionsanalytische Betrachtung der Anwendungsbereiche

Die klassische Anwendung hydraulischer Untersuchungen ist die Berechnung von Wasserspiegellagen entlang einer Fließgewässerstrecke für unterschiedliche Abflussereignisse. Hierbei spielen die funktionalen Zusammenhänge der geometrischen und der hydraulischen Parameter die entscheidende Rolle. Betrachtet man insbesondere die Wirkung natürlicher bzw. naturnaher Gewässerstrukturen auf die Wasserspiegellage, so ist grundsätzlich zwischen Berechnungsansätzen für den stark ungleichförmigen Abfluss und den leicht ungleichförmigen Abfluss zu unterscheiden.

3.1.1.1 Gleichförmige Strömung

Eine gleichförmige Gerinneströmung liegt dann vor, wenn sich charakteristische Parameter der Strömung (z.B. Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsverteilung, etc.) entlang des Fließweges nicht ändern. Solche Bedingungen können jedoch nur in prismatischen Gerinnen mit gleichbleibender Wandungsrauheit vorhanden sein, sofern sie sich nicht im Wirkungsbereich von Abflussstörungen (z.B. durch Einbauten oder seitlichen Zuläufen) befinden (vgl. Naudascher, 1992, S. 256 f.). Für naturnahe Gerinne sind diese Bedingungen allein schon aufgrund der Strukturdiversivität niemals vorhanden, weshalb sich dort i.d.R. eine stark- oder leicht-ungleichförmige Strömung einstellt.

3.1.1.2 Stark ungleichförmige Strömung

Das wesentliche Merkmal beim stark ungleichförmigen Strömungsverhalten ist die Änderung der Wasserspiegellage auf einer relativ kurzen Fließstrecke. Die Verluste an hydraulischer Energie sind durch lokale Beschleunigungen oder Verzögerungen gekennzeichnet. Eine pauschale Berücksichtigung der Energieverluste an der Störstelle reicht nicht aus, um die Verlusthöhe zu berechnen.

Dadurch ergibt sich, dass insbesondere bei naturnahen Gewässerstrukturen infolge der an- und umströmten Strukturen bei der Berechnung der Wasserspiegellagen zwei Arten von hydraulischen Energieverlusten zu berücksichtigen sind:

- Verluste an hydraulischer Energie durch die Oberflächenrauheit des Gewässerprofils

Hieraus resultiert der flächenhafte Wand- und Sohlenwiderstand. Solche sog. „kontinuierliche“ Verluste werden, wie in Kap. 3.1.1.4 beschrieben, durch die Berücksichtigung von Widerstandsbeiwerten (k_{st} , λ) in den Fließformeln berücksichtigt.

- Verluste an hydraulischer Energie durch die Formrauheit von Widerstandskörpern im Gewässerprofil

Solche Verluste entstehen örtlich konzentriert durch den Formwiderstand eines angeströmten Störkörpers und werden i.d.R. durch einen Verlustbeiwert ξ beschrieben.

Naudascher (1992) konnte durch physikalische und dimensionsanalytische Betrachtungen die folgenden Einflussgrößen als maßgebend für den Beiwert ξ identifizieren:

- Randgeometrie

Hiermit sind im wesentlichen Längenverhältnisse gemeint, welche die strömungsbeeinflussende Geometrie bzw. die Strömungsränder beschreiben.

- Rauheit

Wie beim leicht-ungleichförmigen Strömungsverhalten (vgl. Kap. 3.1.1.3) wirkt sich auch bei stark ungleichförmigen Strömungen die Gerinnerauheit auf die Strömung aus und muss daher berücksichtigt werden.

- Anströmbedingungen

Die Anströmung eines Störkörpers wird entscheidend durch die Form und Lage evtl. benachbarter Störungen beeinflusst. Besonders bei bewuchsbestandenen Fließquerschnitten oder bei durchströmten Auebereichen muss dies berücksichtigt werden. Hierzu gibt es zahlreiche Ansätze insbesondere für umströmte zylindrische Störkörper (als abstrakte Abbildung von umströmten Baumstämmen), die auf Untersuchungen von Petryk und Bosmajian (1975), Lindner (1982) und Pasche (1985) zurückzuführen sind.

- Reynoldszahl

Hierbei spielen i.d.R. nur kleine Reynoldszahlen eine Rolle. In diesem Fall hängt der Ablösepunkt der Strömung bei abgerundeten Störkörpern stark mit der Reynoldszahl zusammen. Zahlreiche Untersuchungen hierzu hat Schlichting (1982) durchgeführt und veröffentlicht.

- Froude-Zahl

Die Froude-Zahl bestimmt jenen Anteil vom Verlustbeiwert, der durch stehende Wellen bzw. durch eine verformte Wasseroberfläche verursacht wird. Dies kann man vereinfacht als „Wellenwiderstand“ bezeichnen, der durch den Störkörper induziert wird.

Im angewandten Wasserbau wird die örtliche Energieverlusthöhe $h_{v,\delta}$ durch den Verlustbeiwert ξ dargestellt. Der Widerstand W eines Störkörpers wird durch den Widerstandsbeiwert C_w berechnet.

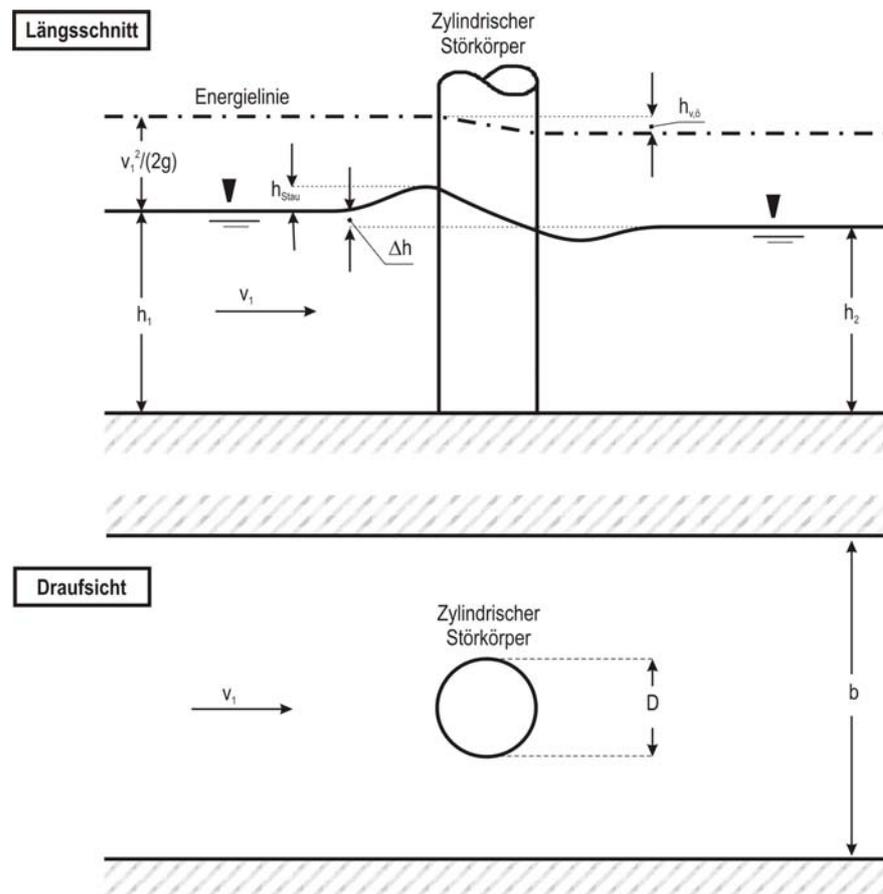


Abb. 3.2: Strömungsverhältnisse in einem Gerinne mit Störkörper. (verändert nach Nestmann, 2002)

In Anlehnung an die in **Abb. 3.2** skizzierte Situation eines umströmten zylindrischen Körpers lassen sich folgende Definitionsgleichungen angeben:

$$h_{v,\delta} = \xi \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad \text{Gl. 3.1}$$

$h_{v,\delta}$ örtlich konzentrierte Energieverlusthöhe (m)
 ξ empirischer Beiwert (-)
 v_1 mittlere Fließgeschwindigkeit im unbeeinflussten Oberwasser (m/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)

$$W = C_W \cdot A_s \cdot \rho_w \cdot g \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad \text{Gl. 3.2}$$

W Widerstandskraft eines senkrecht angeströmten Störkörpers (N)
 C_W empirischer Widerstandsbeiwert (-)
 A_s senkrecht angeströmte Fläche des Störkörpers (m²)
 ρ_w Dichte des Fluids (kg/m³)
 v_1 mittlere Fließgeschwindigkeit im unbeeinflussten Oberwasser (m/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)

Zwischen den beiden Beiwerten ξ und C_W hat Naudascher (1992) folgenden Zusammenhang ermittelt:

$$\xi = \frac{A_s}{A_1} \cdot C_W \quad \text{Gl. 3.3}$$

ξ empirischer Beiwert (-)
 A_s senkrecht angeströmte Fläche des Störkörpers (m²)
 A_1 senkrecht durchströmte Querschnittsfläche im unbeeinflussten Oberwasser (m²)
 C_W empirischer Widerstandsbeiwert (-)

Hiermit kann nun argumentiert werden, dass die Berechnungsansätze für den Strömungswiderstand W unmittelbar auf die örtliche Energieverlusthöhe $h_{v,\delta}$ übertragbar sind.

3.1.1.3 Leicht ungleichförmige Strömung

Bei der leicht ungleichförmigen Strömung wird die Änderung der Wasserspiegellage auf relativ langen Fließstrecken maßgebend durch die Wand- und Sohlenwiderstände beeinflusst. Hierfür lässt sich mit dem Energieansatz nach Daniel Bernoulli zwischen zwei benachbarten Fließquerschnitten die hydraulische Energie bilanzieren, woraus iterativ die Berechnung der Wasserspiegellagen möglich wird (vgl. **Abb. 3.3**).

Mit den Bezeichnungen in **Abb. 3.3** gilt nach dem Energieansatz von Bernoulli:

$$h_{i+1} + z_{i+1} + \frac{v_{i+1}^2}{2 \cdot g} + h_{v,r} = h_i + z_i + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \quad \text{Gl. 3.4}$$

h_j mittlere Fließtiefe im Querschnitt j (m)
 z_i Höhe der Sohle über Bezugsniveau im Querschnitt j (m)
 v_j mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt j (m/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 $h_{v,r}$ Energieverlusthöhe infolge kontinuierlicher Fließverluste (m)

Aus **Abb. 3.3** und Gl. 3.4 wird ersichtlich, dass folgende Annahmen bei der Energiebilanzierung getroffen werden:

- eindimensionale Betrachtungsweise
Es wird nur mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit v_m in Hauptströmungsrichtung gerechnet; Sekundärströmungen im Gerinne sowie lotrechte Geschwindigkeitsverteilungen werden nicht berücksichtigt;
- konstantes Sohlengefälle I_{s0}
Zwischen den benachbarten Fließquerschnitten findet keine plötzliche Änderung der Sohlenneigung statt;
- stationäre Strömung
Die zeitliche Änderung des Abflussgeschehens wird nicht berücksichtigt. Im Rahmen einer Approximation durch Einzelberechnung mehrerer Abflusszustände wird jedoch eine quasi-stationäre Simulation von Abflussganglinien möglich;
- prismatische Geometrie der Fließquerschnitte
zwischen zwei benachbarten Querschnitten treten keine signifikanten Änderungen bzgl. der Gerinnegeometrie auf;
- hydrostatische Druckverteilung
die Stromlinienkrümmung wird an allen Stellen im Untersuchungsgebiet vernachlässigt, so dass die hydrostatische Druckverteilung als notwendige Bedingung für die Anwendung des Bernoulli-Ansatzes gewährleistet ist;
- vollturbulente Fließbewegung
der strukturbedingte Widerstands- bzw. Reibungsbeiwert ist bei der vollturbulenten Strömung unabhängig von der Reynoldszahl, welche die Auswirkung der Fluidviskosität auf die Strömung beschreibt.

Zusätzlich zu den genannten Bedingungen muss die Massenerhaltung durch die Kontinuitätsbedingung gewährleistet sein:

$$Q = v_m \cdot A \Leftrightarrow v_m = \frac{Q}{A} \quad \text{Gl. 3.5}$$

QDurchfluss im Gerinne (m³/s)

v_m mittlere Fließgeschwindigkeit im betrachteten Querschnitt (m/s)

A.....senkrecht durchflossene Querschnittsfläche (m²)

Ersetzt man nun in Gl. 3.4 die Fließgeschwindigkeit durch den Quotienten aus Durchflussmenge Q und durchflossener Querschnittsfläche A, so bleibt als Unbekannte Größe in Gl. 3.4 neben der Fließtiefe h_{i+1} nur die Energielinienneigung l_E zu bestimmen. Dazu wird für l_E der Mittelwert der Energielinienneigungen in den Randquerschnitten i und i+1 angesetzt:

$$\Delta x \cdot l_E = \frac{\Delta x}{2} \cdot (l_{E,i} + l_{E,i+1}) \quad \text{Gl. 3.6}$$

Δx Abstand zwischen zwei benachbarten Querschnitten (m)

l_E mittleres Energieliniengefälle zwischen zwei benachbarten Querschnitten (-)

Die lokalen Werte für die Energielinienneigung können nur mit Hilfe von Fließformeln berechnet werden.

Der Beiwert C hat die Dimension $[m^{1/2}/s]$ und erfasst global die Einflüsse der

- Oberflächenrauheit,
- Formwiderstände,
- Linienführung und der
- Querschnittsform

auf das Strömungsverhalten. Zahlreiche Wissenschaftler beschäftigten sich mit der Bestimmung des Beiwertes C. Aus der empirischen Ableitung von Beziehungen anhand durchgeführter Messungen im Labor und/oder in der Natur resultiert eine Fülle empirischer Fließformeln mit gleicher Grundstruktur wie Gl. 3.7. Eine sehr gute, jedoch nicht mehr aktuelle Übersicht ist Bretschneider und Schulz (1985) zu entnehmen.

Die im europäischen Raum bekannteste empirische Fließformel wurde von Gauckler, Manning und Strickler entwickelt (sog. GMS-Formel) (Strickler, 1923):

$$v_m = k_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I_E^{1/2} \quad \text{Gl. 3.8}$$

v_m mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
 k_{st} empirischer Widerstandsbeiwert ($m^{1/3}/s$)
 r_{hy} hydraulischer Radius (m)
 I_E Energieliniengefälle (-)

Der empirische Beiwert k_{st} (sog. Strickler-Beiwert) besitzt die Dimension $[m^{1/3}/s]$ und charakterisiert entlang des benetzten Umfangs den auftretenden Strömungswiderstand. Da dieser Beiwert messtechnisch nicht erfasst werden kann, existieren tabellarische Zusammenstellungen, die dem Ingenieur bei der Anwendung der GMS-Formel helfen sollen. Eine sehr ausführliche tabellarische Darstellung kann dem Leitfaden „Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 1“ der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg entnommen werden (LfU, 2002).

Die Vorzüge der GMS-Formel liegen in ihrer einfachen mathematischen Handhabung. Durch die Tabellenwerke kann bei der notwendigen Schätzung der k_{st} -Werte auf zahlreiche Erfahrungen zurückgegriffen werden. Trotzdem gelten folgende Einschränkungen bei der Verwendung der GMS-Formel:

- Der k_{st} -Wert ist dimensionsbehaftet und somit u.a. abhängig von der absoluten Größe des Gerinnes;
- Die Annahme einer Proportionalität des k_{st} -Wertes zum benetzten Umfang ist bei gegliederten Gerinnequerschnitten, unterschiedlichen Rauheiten in verschiedenen Querschnittsbereichen sowie bei durch- bzw. überströmten Einzelwiderständen (z.B. Bewuchs) nicht gegeben. Die in diesen Fällen zusätzlich wirkenden Fließwiderstände werden nicht berücksichtigt.

- Der Zähigkeitseinfluss und das Widerstandsgesetz werden nicht berücksichtigt, wodurch der k_{st} -Wert nur für große Reynoldszahlen und bei mittleren relativen Rauheiten gültig ist.

Der k_{st} -Wert definiert als globaler Parameter analog zum C-Beiwert die Strömungsverluste infolge Oberflächenrauheit, Formwiderstand, Querschnittsform und Linienführung. Er eignet sich jedoch nicht zur Berechnung von Einzelwiderständen oder räumlich begrenzten Schubspannungen (vgl. Ritterbach, 1988). Übertragen auf naturnahe Gewässerstrukturen lassen sich die daraus resultierenden Probleme bei der Anwendung der GMS-Formel mit folgendem Zitat darstellen:

„Schon bisher war die hydraulische Bemessung der Abflussquerschnitte von Fließgewässern schwierig und mit vagen Annahmen verbunden. Nicht selten sind annähernd zutreffende Rechenergebnisse vom Zufall begleitet. Keine großen Schwierigkeiten beim Umgang mit Zahlen, hydraulischen Tafeln und Tabellen hat nur der Anfänger. Wer dagegen Gelegenheit hatte zu beobachten, wie sich ausgebaute Gewässer im Laufe von Jahrzehnten mannigfaltig verändern und damit die ursprünglichen Berechnungsgrundlagen hinfällig werden, der wird die Berechnung wohl nicht ganz in Frage stellen, ihre Bedeutung aber entsprechend gewichten.“ (Schade, 1985, S. 52).

Es empfiehlt sich daher bei naturnahen Gewässern, wo eigendynamische Entwicklungen zugelassen werden, auf physikalisch fundierte Fließgesetze zurückzugreifen.

3.1.1.5 Universelle Fließformel

Die Einschränkungen, welche im Zusammenhang mit der Empirie des k_{st} -Beiwertes in Kap. 3.1.1.4 aufgezählt wurden, ergeben sich nicht für die von Henry-Philibert-Gaspard Darcy und Julius Weisbach im 19. Jahrhundert angegebene universelle Fließformel. Ihre Fließformel kommt bei der Berechnung von Strömungen in Rohrleitungen zum Einsatz und kann auf Strömungen in offenen Gerinnen übertragen werden.

Bereits 1963 gab die American Society of Civil Engineers aufgrund der Unabhängigkeit der Darcy-Weisbach Gleichung von empirischen Beiwerten eine Empfehlung zur Anwendung für Fließgewässer (Task Force, 1963):

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E} \quad \text{Gl. 3.9}$$

- v_m mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
- λ Widerstandsbeiwert (-)
- g Erdbeschleunigung (m/s²)
- r_{hy} hydraulischer Radius (m)
- I_E Energieliniengefälle (-)

Zur Quantifizierung des in dieser Fließformel enthaltenen dimensionslosen Widerstandsbeiwertes λ wurden in Anlehnung an das von-Kármán-Prandtlische Widerstandsgesetz für glattwandige Rohrströmungen neue Widerstandsbeziehungen aus Versuchen abgeleitet. Es zeigte sich dabei, dass der Widerstandsbeiwert λ für pris-

matische Gerinne maßgebend funktionell abhängig von folgenden Parametern angenommen werden kann:

$$\lambda = f \left(\text{Re}, \frac{k_s}{r_{hy}}, \text{Querschnittsform}, \text{Rauheitsstruktur}, \text{Linienführung} \right) \quad \text{Gl. 3.10}$$

λ Widerstandsbeiwert (-)

Re Reynolds-Zahl (-)

k_s äquivalente Sandrauheit der Gerinnewandung (m) → vgl. Kap. 3.1.2.1

r_{hy} hydraulischer Radius (m)

Aus den Versuchsdaten von Bazin (1865) hat Keulegan (1938) für kompakte Gerinne unterschiedlicher Querschnittsform entsprechend dem Colebrook-White'schen Ansatz (Colebrook-White, 1937) folgende Beziehung erhalten:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2,5 \cdot \ln \left(\frac{r_{hy}}{k_s} \right) + Br \quad \text{Gl. 3.11}$$

λ Widerstandsbeiwert (-)

k_s äquivalente Sandrauheit der Gerinnewandung (m) → vgl. Kap. 3.1.2.1

r_{hy} hydraulischer Radius (m)

Br Beiwert zur Erfassung der Gerinneform (-)

Für breite Rechteckgerinne wird für die dimensionslose Konstante Br häufig ein Wert von 6,25 angenommen (vgl. z.B. Graf, 1991 und Kironoto und Graf, 1992). Hey (1979) hat die Untersuchungen von Keulegan interpretiert und kommt zu dem Ergebnis, dass der Wert $Br = 6,25$ fließtiefenabhängig interpretiert werden sollte, so dass er nur für relative Gerinnebreiten von $b/h \approx 10$ gültig sei. Neuere Untersuchungen von Kironoto und Graf stellen deshalb die Abhängigkeit des Beiwertes Br von der relativen Überdeckung⁸ (h/k_s) dar (vgl. **Abb. 3.4**).

Für große relative Überdeckungen $h/k_s > 20$ (glatte Sohle) sollte Br zu 6,25 angenommen werden. Bei sehr kleinen relativen Überdeckungen von $h/k_s < 4$ (raue Sohle) empfehlen die Autoren einen Wert von $Br = 3,25$. Im Bereich $4 \leq h/k_s \leq 20$ sollte nach Meinung der Autoren eine Interpolation durchgeführt werden (vgl. Kironoto und Graf, 1992).

⁸ Die relative Überdeckung berechnet sich aus dem Verhältnis von Fließtiefe (h) zur Oberflächenrauheit (k_s).

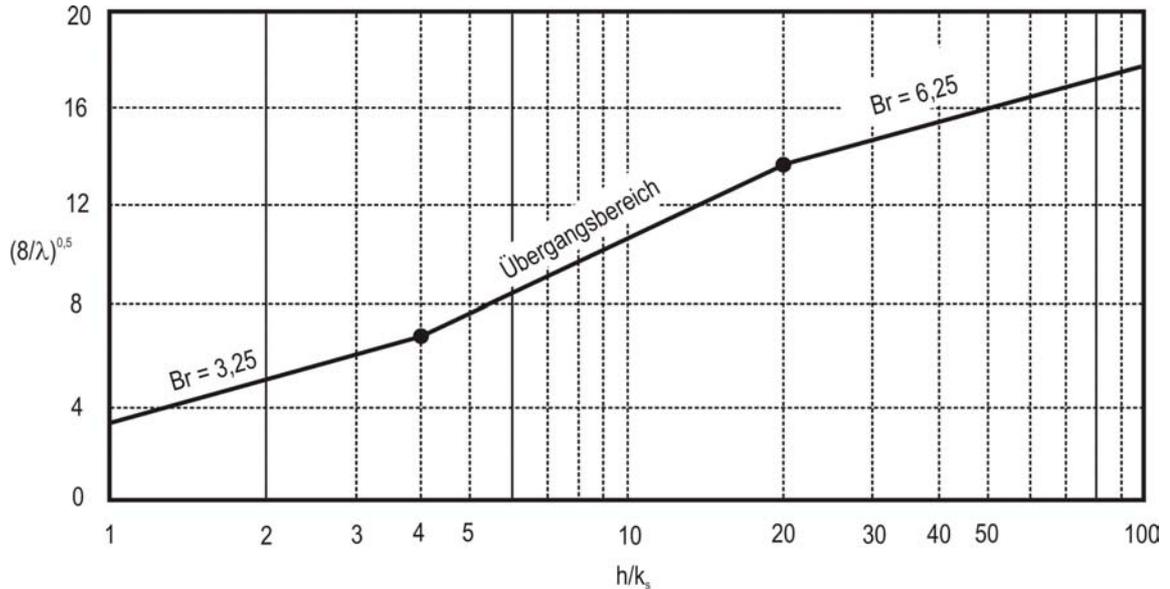


Abb. 3.4: Der Widerstandsbeiwert λ als Funktion der relativen Überdeckung h/k_s . (verändert nach Kirono und Graf, 1992)

Die universelle Fließformel nach Darcy-Weisbach (**Gl. 3.9**) sowie die Widerstandsbeziehung nach Keulegan (**Gl. 3.11**) bilden derzeit im deutschsprachigen Raum die Grundlage zur hydraulischen Berechnung des Strömungsverhaltens naturnaher Fließgewässer.

„Eine direkte Anwendung dieser Beziehung ist aufgrund einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren jedoch nicht [ohne weiteres] möglich. So treten in rauheits- und querschnittsgliederten Gerinne keine einheitlichen Geschwindigkeits- und Schubspannungsverhältnisse auf. Dies führt zu Querimpulsen in Form von Sekundärströmungen, so dass ein dispersiver Turbulenztransport zusätzlich den Fließvorgang beeinflusst. Zudem stellt der Bewuchs in einem Fließquerschnitt mehr ein Formwiderstands- als ein Rauheitsproblem dar.“ (Pasche, 1984, S. 9.)

Aufgrund der von Pasche erwähnten Probleme bezüglich der Rauheits- und/oder Querschnittsgliederung und der Berücksichtigung einzelner und/oder kollektiver um- oder überströmter Formwiderstände in naturnahen Gerinnen existieren aktuell modifizierte Fließ- und Widerstandsformeln, die in Verfahren zur Berechnung von Abfluss-Wasserstandsbeziehungen implementiert wurden.

3.1.1.6 Berechnung der Wasserspiegellage

Setzt man die Gleichungen 3.5, 3.6 und 3.8 bzw. 3.9 in Gl. 3.4 ein, so ergeben sich durch Auflösen nach h_i folgende Beziehungen zur Bestimmung der Wasserspiegellage für den leicht ungleichförmigen Abfluss:

$$h_i = h_{i+1} + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q^2}{A_{i+1}^2} - \frac{Q^2}{A_i^2} \right) + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left(\frac{Q^2}{k_{st,j}^2 \cdot A_i^2 \cdot r_{hy,j}^{4/3}} + \frac{Q^2}{k_{st,i+1}^2 \cdot A_{i+1}^2 \cdot r_{hy,i+1}^{4/3}} \right) \quad (a)$$

Gl. 3.12

$$h_i = h_{i+1} + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q^2}{A_{i+1}^2} - \frac{Q^2}{A_i^2} \right) + \frac{\Delta x}{2} \cdot \left(\frac{Q^2 \cdot \lambda_i}{8 \cdot g \cdot A_i^2 \cdot r_{hy,j}} + \frac{Q^2 \cdot \lambda_{i+1}}{8 \cdot g \cdot A_{i+1}^2 \cdot r_{hy,i+1}} \right) \quad (b)$$

h_j mittlere Fließtiefe (m)
 g Erdbeschleunigung (m/s^2)
 Q Durchfluss (m^3/s)
 Δx Abstand zwei benachbarter Querschnitte (m)
 $k_{st,j}, \lambda_j$ Widerstandsbeiwert ($m^{1/3}/s$) bzw. (-)
 A_j durchflossene Querschnittsfläche (m^2)
 $r_{hy,j}$ hydraulischer Radius (m)

Bei Kenntnis der Querschnittsabmessungen und der Widerstandsbeiwerte k_{st} bzw. λ kann mit diesen Gleichungen ausgehend von bekannten Verhältnissen im Querschnitt [i+1] die Wasserspiegellage im Querschnitt [i] iterativ berechnet werden. Das bedeutet, dass die Berechnung der Wasserspiegellage bzw. des Energieverlustes längs der Fließstrecke Δx auf das Problem der Bestimmung der Widerstandsbeiwerte naturnaher Gewässerstrukturen zurückgeführt wird.

Der Anfangsquerschnitt wird in Abhängigkeit von der Froude-Zahl festgelegt. Die Froude-Zahl lässt sich als Quotient aus mittlerer Fließgeschwindigkeit und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Oberflächenwelle interpretieren:

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot \frac{A}{b_{WSP}}}} \quad \text{Gl. 3.13}$$

Fr Froude-Zahl (-)
 v_m mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s^2)
 A senkrecht durchflossene Querschnittsfläche (m^2)
 b_{WSP} Wasserspiegellagebreite (m)

Anhand der Froude-Zahl lassen sich drei unterschiedliche Strömungszustände definieren, die zur Festlegung des Anfangsquerschnittes und der Berechnungsrichtung führen:

- $Fr > 1$: schießender Abfluss

Schwerewellen können sich aufgrund der großen Fließgeschwindigkeit nicht nach Oberstrom ausbreiten. Damit liegt die Abflusskontrolle im Oberwasser: Störungen im Unterwasser bewirken beim schießenden Abfluss keine Wasserspiegellagenänderung im Oberwasser: Die Berechnungsrichtung ist in diesem Fall in Fließrichtung.

- $Fr = 1$: Grenzabfluss

Die Abflusskontrolle liegt direkt im betrachteten Querschnitt.

▪ $Fr < 1$: strömender Abfluss

Gegenteilig zum schießenden Abfluss bewirken Störungen im Unterwasser eine Änderung der Wasserspiegellage im Oberwasser. Der Anfangsquerschnitt liegt also in diesem Fall im Unterwasser und die Berechnung erfolgt gegen die Fließrichtung.

In der Regel ist bei naturnahen Fließgewässern strömender Abfluss vorhanden. Schießender Abfluss stellt sich oftmals nur lokal (z.B. im Nahbereich von Störsteinen oder an den Abstürzen von Step-Pool-Sequenzen) ein.

3.1.1.7 Dimensionsanalytische Betrachtung der Anwendungsbereiche

Mit Hilfe einer Dimensionsanalyse können aufbauend auf den Energie- und Impulserhaltungssätzen aus den Einflussfaktoren auf das Strömungsverhalten dimensionslose Kennzahlen abgeleitet werden. Hieraus werden dann die Anwendungsgrenzen der gängigen eindimensionalen Fließformeln abgeleitet.

In **Abb. 3.3** ist der Abschnitt eines Gerinnes mit der Länge Δx und der mittleren Breite b dargestellt. Dieser Abschnitt wird von Wasser (Dichte ρ_w und kinematische Viskosität ν), auf das die Erdbeschleunigung g wirkt, mit einer mittleren Geschwindigkeit v_m durchflossen. Die Fließtiefe sei h , die Rauheit der Gerinnewandungen sei k_s ⁹.

Beim Durchfließen des Gerinneabschnittes Δx entsteht ein Verlust an hydraulischer Energie, der als Verlusthöhe $h_{v,r}$ angegeben wird. Für diese Verlusthöhe besteht eine funktionale Abhängigkeit in der Form

$$h_{v,r} = f(\Delta x, b, h, g, k_s, \rho_w, \nu, v_m) \quad \text{Gl. 3.14}$$

- $h_{v,r}$ Energiehöhe der kontinuierlichen hydraulischen Verluste (m)
- Δx Länge der betrachteten Fließstrecke (m)
- b mittlere Gerinnebreite (m)
- h mittlere Fließtiefe (m)
- g Erdbeschleunigung (m/s²)
- k_s äquivalente Sandrauheit der Gerinnewandung (m)
- ρ_w Dichte des Fluid (kg/m³)
- ν kinematische Viskosität des Fluid (m²/s)
- v_m mittlere Fließgeschwindigkeit im betrachteten Abschnitt (m/s)

Mit einer dimensionsanalytischen Betrachtung sollen nun die Variablen $h_{v,r}$, Δx , b , g , k_s und ν durch Potenzprodukte der drei gewählten Basisgrößen h , ρ_w und v_m dargestellt werden.

- mittlere Breite b $\rightarrow \dim b = \dim h^{a1} \cdot \dim \rho_w^{b1} \cdot \dim v_m^{c1}$
- äquiv. Rauheit k_s $\rightarrow \dim k_s = \dim h^{a2} \cdot \dim \rho_w^{b2} \cdot \dim v_m^{c2}$

⁹ Der k_s -Wert steht für eine äquivalente Oberflächenrauheit \rightarrow vgl. Kap. 3.1.2.1

- Erdbeschleunigung g → $\dim g = \dim h^{a3} \cdot \dim \rho_w^{b3} \cdot \dim v_m^{c3}$
- kinem. Viskosität ν → $\dim \nu = \dim h^{a4} \cdot \dim \rho_w^{b4} \cdot \dim v_m^{c4}$
- Verlusthöhe $h_{v,r}$ → $\dim h_{v,r} = \dim h^{a5} \cdot \dim \rho_w^{b5} \cdot \dim v_m^{c5}$
- Fließweg Δx → $\dim \Delta x = \dim h^{a6} \cdot \dim \rho_w^{b6} \cdot \dim v_m^{c6}$

Die Exponenten $[a_i]$, $[b_i]$ und $[c_i]$ der dargestellten Potenzprodukte lassen sich berechnen, indem die Basisgrößen h , ρ_w , v_m durch die Grundeinheiten Kraft $[F]$, Länge $[L]$ und Zeit $[T]$ dargestellt werden:

- Basisgröße h → $\dim h = L$
- Basisgröße ρ_w → $\dim \rho_w = F \cdot T^2 / L^4$
- Basisgröße v_m → $\dim v_m = L / T$

Berechnung der Exponenten:

- mittlere Breite b → $\dim b = \dim h^{a1} \cdot \dim \rho_w^{b1} \cdot \dim v_m^{c1}$
 $L = L^{a1} \cdot F^{b1} \cdot T^{2b1} \cdot L^{-4b1} \cdot L^{c1} \cdot T^{-c1}$
 $\Rightarrow a1 = 1, b1 = c1 = 0$

Dimensionslose Kennzahl: relative Breite b/h

- äquivalente Rauheit k_s → $\dim k_s = \dim h^{a2} \cdot \dim \rho_w^{b2} \cdot \dim v_m^{c2}$
 $L = L^{a2} \cdot F^{b2} \cdot T^{2b2} \cdot L^{-4b2} \cdot L^{c2} \cdot T^{-c2}$
 $\Rightarrow a2 = 1, b2 = c2 = 0$

Dimensionslose Kennzahl: relative Überdeckung h/k_s oder k_s/h

- Erdbeschleunigung g → $\dim g = \dim h^{a3} \cdot \dim \rho_w^{b3} \cdot \dim v_m^{c3}$
 $L/T^2 = L^{a3} \cdot F^{b3} \cdot T^{2b3} \cdot L^{-4b3} \cdot L^{c3} \cdot T^{-c3}$
 $\Rightarrow c3 = 2, b3 = 0, a3 = -1$

Dimensionslose Kennzahl: $Fr = v_m / (g \cdot h)^{0,5}$

Die Fr-Zahl ist somit das Kriterium für die Ähnlichkeit von Strömungen, die im wesentlichen unter dem Einfluss der Schwere stehen. Sie spielt bei Strömungen mit freier Oberfläche, d.h. bei der Möglichkeit der Bildung von Schwerkwellen (Oberflächenwellen) eine wichtige Rolle (vgl. Kap. 3.1.1.6).

- kinematische Viskosität $\nu \rightarrow \dim \nu = \dim h^{a4} \cdot \dim \rho_w^{b4} \cdot \dim v_m^{c4}$
 $L^2/T = L^{a4} \cdot F^{b4} \cdot T^{2b4} \cdot L^{-4b4} \cdot L^{c4} \cdot T^{-c4}$
 $\Rightarrow c4 = 1, a4 = 1, b4 = 0$

Dimensionslose Kennzahl: $Re = v_m \cdot h / \nu$

- Verlusthöhe $h_{v,r} \rightarrow \dim h_{v,r} = \dim h^{a5} \cdot \dim \rho^{b5} \cdot \dim v_m^{c5}$
 $L = L^{a5} \cdot F^{b5} \cdot T^{2b5} \cdot L^{-4b5} \cdot L^{c5} \cdot T^{-c5}$
 $\Rightarrow a5 = 1, b5 = c5 = 0$

Dimensionslose Kennzahl: $h_{v,r}/h$ bzw. $h/h_{v,r}$

- Fließweg $\Delta x \rightarrow \dim \Delta x = \dim h^{a6} \cdot \dim \rho^{b6} \cdot \dim v_m^{c6}$
 $L = L^{a6} \cdot F^{b6} \cdot T^{2b6} \cdot L^{-4b6} \cdot L^{c6} \cdot T^{-c6}$
 $\Rightarrow a6 = 1, b6 = c6 = 0$

Dimensionslose Kennzahl: $\Delta x/h$ bzw. $h/\Delta x$

Die dimensionslosen Kennzahlen $h_{v,r}/h$ und $h/\Delta x$ werden zusammengefasst zu einer dimensionslosen Kennzahl $h_{v,r}/\Delta x$, welche die Neigung der Energielinie angibt:

$$I_E = \frac{h_{v,r}}{\Delta x} \quad \text{Gl. 3.15}$$

I_E mittleres Energieliniengefälle (-)
 $h_{v,r}$ Energiehöhe der kontinuierlichen hydraulischen Verluste (m)
 ΔX Länge der betrachteten Fließstrecke (m)

Bei stationär-gleichförmigem Strömungsverhalten entspricht die Neigung der Energielinie der Neigung der Gerinnesohle:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \rightarrow I_E = I_{So} \quad \text{Gl. 3.16}$$

Q Durchfluss (m^3/s)
 t, v Zeit (s), Geschwindigkeit (m/s)
 I_E Energieliniengefälle (-)
 I_{So} Sohlenliniengefälle (-)

Somit lässt sich folgender dimensionsloser funktionaler Zusammenhang schreiben:

$$\frac{h_{v,r}}{\Delta x} = I_E \xrightarrow{\text{Normalabfluss}} I_E(\lambda) \text{ oder } I_E(k_{st}) = f\left(\frac{b}{h}, \frac{h}{k_s}, Fr, Re\right) \quad \text{Gl. 3.17}$$

$h_{v,r}$ Energiehöhe der kontinuierlichen hydraulischen Verluste (m)
 ΔX Länge der betrachteten Fließstrecke (m)
 I_E mittleres Energieliniengefälle (-)
 λ Widerstandsbeiwert (-)
 k_{st} empirischer Widerstandsbeiwert ($m^{1/3}/s$)
 b mittlere Gerinnebreite (m)
 h mittlere Fließtiefe (m)

k_s äquivalente Sandrauheit der Gerinnewandung (m)
 Fr Froude-Zahl (-)
 Re Reynolds-Zahl (-)

Aus der vorhergehenden Ableitung und den Erfahrungen in der praktischen Anwendung können folgende Gültigkeitsbereiche für die Fließformeln angegeben werden:

- Im betrachteten Gerinneabschnitt wird annähernd stationär-gleichförmiges Strömungsverhalten vorausgesetzt. Dann gilt $l_E \approx l_{S0}$, wobei l_{S0} eine messbare Größe ist, die im Gelände leicht ermittelt werden kann. Bei der Anwendung der Fließformeln ist also darauf zu achten, dass vor der Berechnung Abschnitte definiert werden, in denen annähernd gleiche Randbedingungen herrschen, so dass sich in etwa der Normalabfluss einstellt.
- Das Gerinne ist hinreichend breit, damit die seitlichen Gerinnewandungen keinen signifikanten Einfluss mehr auf das Strömungsverhalten haben. Nach Dittrich (1998) können folgende Grenzen empfohlen werden:
 - Wände sind glatter als die Sohle $\rightarrow b/h \geq 6$
 - Wände und Sohle sind gleichrau $\rightarrow b/h \geq 10$
 - Wände sind rauher als die Sohle $\rightarrow b/h \geq 25$
- Das Gerinne muss kleine Sohlrauheiten bzw. große relative Überdeckungen aufweisen: $h/k_s > 3$. Ist dies nicht der Fall, so wirkt sich die Rauheit mehr als Formwiderstand vieler Einzelelemente aus, der mit speziellen Ansätzen erfasst werden muss (vgl. Kap. 3.1.1.2).

Ein Vergleich der Fließformel nach Darcy-Weisbach mit der GMS-Formel liefert folgenden Zusammenhang zwischen dem dimensionslosen Widerstandsbeiwert λ und dem dimensionsbehafteten STRICKLER-Beiwert k_{st} :

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot l_E} = k_{st} \cdot \sqrt{l_E} \cdot r_{hy}^{2/3}$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda}} = k_{st} \cdot \frac{r_{hy}^{2/3}}{r_{hy}^{1/2}}$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{\frac{8}{\lambda}} = k_{st} \cdot r_{hy}^{1/6} \cdot \frac{1}{\sqrt{g}} \quad \text{wobei} \quad \sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2,5 \cdot \ln\left(\frac{r_{hy}}{k_s}\right) + Br$$

Gl. 3.18

v_m mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
 λ Widerstandsbeiwert (-)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 r_{hy} hydraulischer Radius (m)
 l_E Energieliniengefälle (-)
 k_{st} empirischer Widerstandsbeiwert (m^{1/3}/s)

Aus der Berechnung des Widerstandsbeiwertes λ für offene Gerinne wird deutlich, dass λ als unabhängig von der Re-Zahl angenommen wird. Die Betrachtung des Moody-Diagrammes (welches die Beziehung zwischen Re-Zahl und λ dar-

stellt, vgl. **Abb. 3.5**) zeigt sofort, dass diese Annahme nur für hydraulisch raue Strömungen zutrifft.

Aufgrund der o.g. Beziehung zwischen λ und k_{st} gilt diese Bedingung auch für die Anwendung der GMS-Formel. Ferner wird deutlich, dass der k_{st} -Wert eine Funktion des hydraulischen Radius r_{hy} und somit auch der Fließtiefe h ist. Der k_{st} -Wert ändert sich also mit dem Wasserstand.

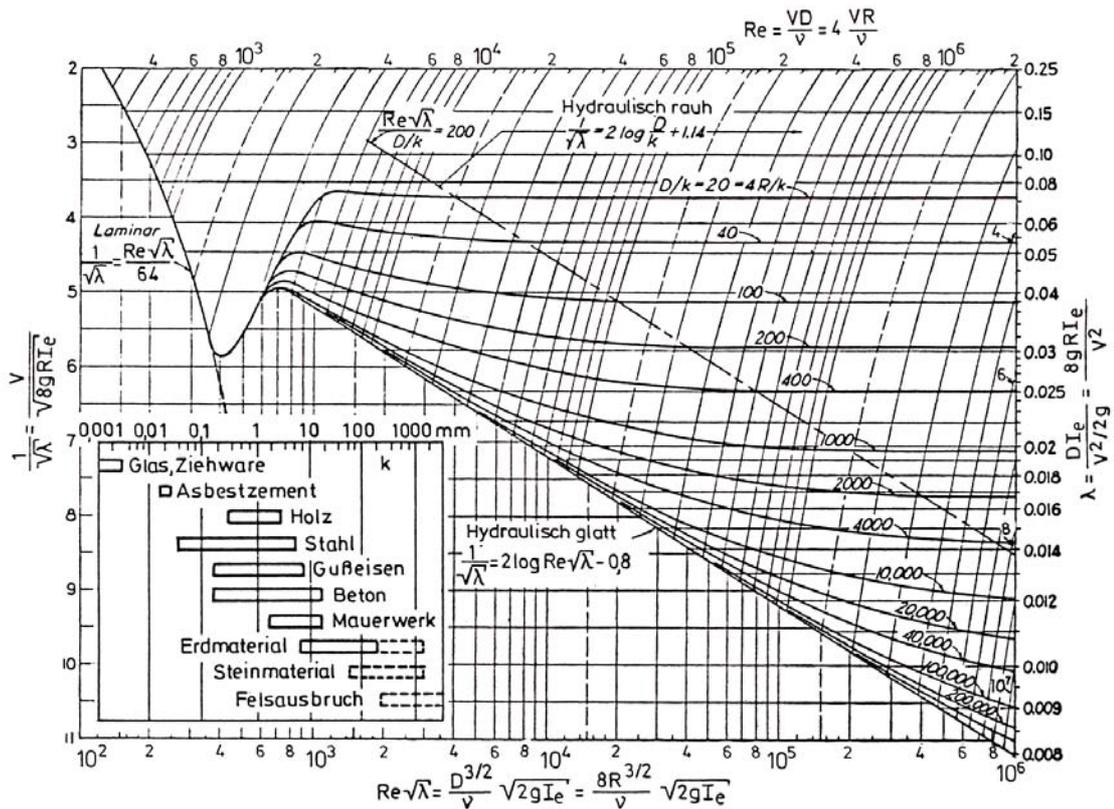


Abb. 3.5: Moody-Diagramm als graphische Beziehung zwischen λ und Re . (Naudascher, 1992)

3.1.2 Quantifizierung der Strömungswiderstände

Aufbau und Gliederung:

- 3.1.2.1 Widerstand infolge Oberflächenrauheit (λ_o)
- 3.1.2.2 Widerstand infolge Vegetation ($\lambda_{veg,\dot{u}}$ oder $\lambda_{veg,D}$)
 - a) Widerstandsbeiwert bei überströmter Vegetation ($\lambda_{veg,\dot{u}}$)
 - b) Widerstandsbeiwert bei durchströmter Vegetation ($\lambda_{veg,D}$)
- 3.1.2.3 Widerstand infolge Interaktionsprozesse (λ_I oder λ_T)
 - a) Widerstand infolge Rauheitsgliederung
 - b) Interaktionswiderstand bei gegliederten Gerinnen
 - Phänomenologische Beschreibung des Interaktionsvorganges
 - Empirische Ansätze zur Quantifizierung des Interaktionswiderstandes
 - Turbulenz-theoretisch basierte Ansätze zur Quantifizierung des Interaktionswiderstandes

Naturnahe Fließgewässer können im Wesentlichen durch folgende Merkmale beschrieben werden:

- indifferente Profilierung des Gewässerbettes und des Vorlandes;
- keine oder natürliche Ufersicherung;
- verzweigte oder gewundene bzw. mäandrierende Linienführung; geradlinige gestreckte Linienführungen kommen in der Natur nur sehr selten vor (vgl. Leopold, Wolman und Miller, 1964);
- Vegetation auf den Vorländern und im Uferbereich zwischen Vorland und Hauptgerinne:
 - relativ starre, durchströmte Vegetation,
 - flexible, meist überströmte Vegetation;
- extreme Heterogenität in der Gerinnegeometrie;
- abschnittsweise stark veränderliche Rauheiten.

„Auf wissenschaftlicher Ebene ist daher der Wasserbau-Ingenieur herausgefordert, auf der Basis umfassender Beobachtungen in Natur und Labor neue Verfahren zu entwickeln, die die hydraulische Berechnung naturnaher Fließgewässer auf eine fundierte wissenschaftliche Grundlage stellen. Man sollte sich dabei jedoch nicht der Illusion hingeben, dass dem praktizierenden Ingenieur alsbald ein Werkzeug zur Verfügung steht, mit dem er auf ähnlich einfache Weise wie beim klassischen Gewässerausbau naturnahe Fließgewässer zuverlässig hydraulisch erfassen kann.“ (DFG, 1987, S. 3).

Gegenwärtig können trotz vielfältiger Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des Strömungsverhaltens naturnaher Fließgewässer die in der Natur vorliegenden Rauheiten nur mit Unsicherheiten quantifiziert werden. So stellt z.B. die gewässernahe Vegetation an einem Fließquerschnitt mehr ein Formwiderstands- als ein Rauheitsproblem dar. Darüber hinaus liegen in natürlichen Gerinnequerschnitten keine ein-

heitlichen Geschwindigkeitsverhältnisse vor, so dass zusätzliche Schubspannungen hervorgerufen werden. Zahlreiche Arbeiten beschäftigten sich bereits mit diesen für naturnahe Gewässer typischen Problemstellungen. Sie wurden bereits von Bretschneider und Schulz (1985) zusammenfassend dargestellt. Im Folgenden wird deshalb nur auf die neueren Verfahren näher eingegangen.

Die Genauigkeit aller eindimensionalen Berechnungsansätze für ein naturnah gestaltetes Gerinne hängt hauptsächlich davon ab, wie exakt die vorhandenen Strömungswiderstände erfasst und dargestellt werden. Die Bestimmung dieser Widerstände wird in der Praxis dadurch erschwert, dass naturnahe Gerinne aufgrund der komplexen Form- und Strukturdiversivität nicht allein durch eine konstante Rauheit beschrieben werden können. Vielmehr setzt sich der Gesamtwiderstand aus unterschiedlichen Teilwiderständen zusammen (vgl. **Abb. 3.6**).

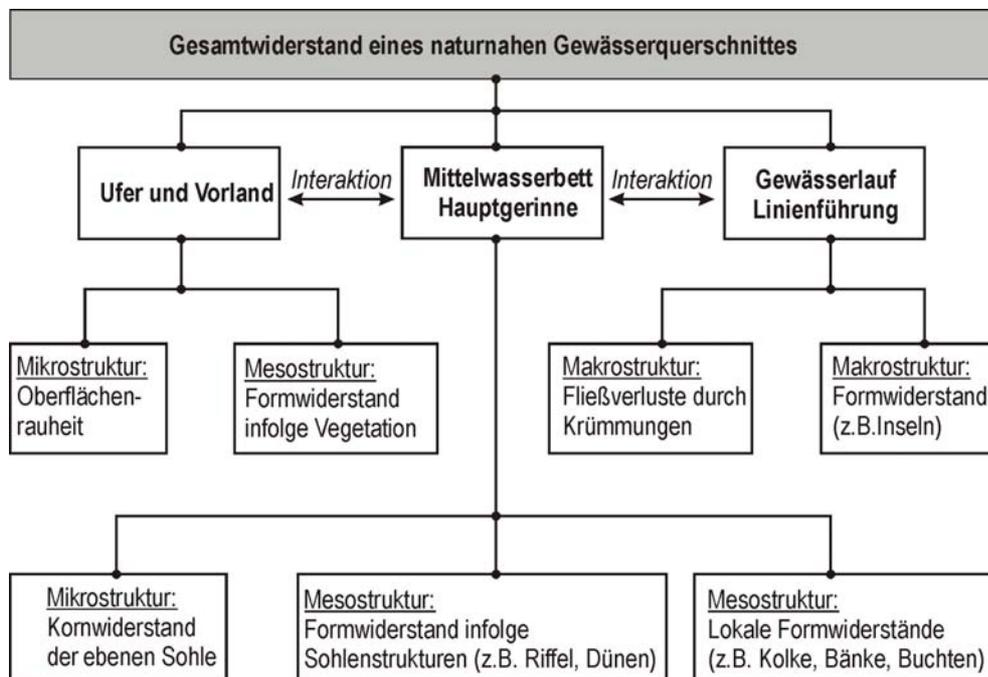


Abb. 3.6: Darstellung der Strömungswiderstände bei einem naturnahen Gerinne.

Nach **Abb. 3.6** sind sowohl Strömungswiderstände aufgrund der Ufer- und Sohlenbildung als auch Widerstände durch Laufkrümmungen oder Inseln und Vegetationsstrukturen bei einer hydraulischen Berechnung zu berücksichtigen. Da bislang für einige Widerstände noch keine praxistauglichen Verfahren zur Abschätzung bereit stehen, werden Annahmen getroffen (z.B. Widerstand infolge Gerinnekrümmung oder Inselbildung). Bei anderen Widerständen hingegen erfolgt eine Zuordnung zu einer fiktiven Fläche, da sonst keine Lokalisierung möglich ist (z.B. beim fiktiven Trennflächenwiderstand, der die Interaktionsprozesse zwischen dem schnell fließenden Wasser im Hauptgerinne und dem langsam fließenden Wasser über den Vorländern parametrisiert).

Im Rahmen dieser Arbeit wird aufbauend auf Empfehlungen aus der Fachliteratur (DFG 1987 oder Dittrich, 1998) eine Klassifizierung der Strömungswiderstände in drei Hauptgruppen verfolgt:

- Widerstand infolge Oberflächenrauheit (vgl. Kap. 3.1.2.1);
- Widerstand infolge Vegetation (vgl. Kap. 3.1.2.2);
- Widerstand infolge Interaktionsprozesse (vgl. Kap. 3.1.2.3).

Der Strömungswiderstand wird ausgedrückt durch Beiwerte, die in den Fließformeln als Faktoren berücksichtigt werden. In der Praxis haben sich sowohl die Nutzung empirischer als auch dimensionsloser Widerstandsbeiwerte bewährt:

- Empirische Widerstandsbeiwerte

Empirische Widerstandsbeiwerte sind dimensionsbehaftet und i.d.R. in der Natur messtechnisch nicht direkt zu erfassen. Es gibt daher nur die Möglichkeit der Rückrechnung dieser Beiwerte aus bekannten Wasserstands-Abfluss-Ereignissen bzw. aus Ereignissen, bei denen die Wasserspiegellage und die mittlere Fließgeschwindigkeit gemessen wurde. In der Fachliteratur finden sich dazu zahlreiche Tabellenwerke, die für unterschiedliche Gerinneigenschaften Anhaltswerte für die empirischen Beiwerte liefern (vgl. z.B. LfU, 2002).

Zudem sind die empirischen Widerstandsbeiwerte i.d.R. als Summenparameter aller im Gerinneabschnitt vorhandenen Einzelwiderstände pauschalisiert. Dadurch führt die Anwendung der genannten Tabellenwerke oftmals zu sehr ungenauen Aussagen im Berechnungsergebnis. Der Ingenieur ist somit auf eigene Erfahrungen im Umgang mit den Beiwerten angewiesen. In der Praxis empfiehlt sich in jedem Fall eine Kalibrierung der empirischen Beiwerte durch Rückrechnung aus bekannten Abflussereignissen im Untersuchungsabschnitt.

- Dimensionslose Widerstandsbeiwerte (Darcy-Weisbach Koeffizienten)

Dimensionslose Widerstandsbeiwerte haben den Nachteil, dass sie in der Natur messtechnisch nicht direkt erfasst werden können. Durch physikalisch begründete Beziehungen ist es jedoch möglich, diese Beiwerte durch dimensionsreine, messtechnisch erfassbare Parameter auszudrücken (vgl. Gl. 3.10).

Ferner besteht hier die Möglichkeit der separaten Erfassung sämtlicher Einzelwiderstände in einem Gerinne durch Einzelbeiwerte und deren Überlagerung zu einem Gesamtwiderstandsbeiwert.

3.1.2.1 Widerstand infolge Oberflächenrauheit (λ_o)

Der Begriff „Rauheit“ definiert sich durch die Oberflächenbeschaffenheit des Gewässerprofils. In der Hydraulik werden folgende drei Begriffe zur Quantifizierung von Oberflächenbeschaffenheiten verwendet:

- Absolute Rauheit k_{abs} [m oder mm]

Die absolute Rauheit ist ein Maß für die Abweichung der Oberflächenkontur von einem ebenen, geradlinigen Nullniveau senkrecht zu diesem.

- Relative Rauheit k_{rel} [m oder mm]

Dies ist ein relatives Rauheitsmaß, das die Auswirkungen der absoluten Rauheit auf eine Strömung simuliert. Die relative Rauheit ist durch gleich große Kugeln definiert, die auf einer glatten Oberfläche in dichtestmöglicher Lagerung aufgebracht sind (vgl. DIN 4044). Derartige relative Rauheiten wurden z.B. von Nikuradse (1932) in zahlreichen Untersuchungen bei Rohrströmungen auf ihr Widerstandsverhalten hin untersucht.

- Äquivalente Sandrauheit k_s [m oder mm]

Technische als auch natürliche Rauheiten werden in der Fließgewässerhydraulik durch die äquivalente Sandrauheit ausgedrückt. Hiermit ist eine relative Rauheit gemeint, die unter hydraulisch voll-rauen Strömungsverhältnissen einen Oberflächenwiderstand hervorruft, wie die tatsächlich untersuchte Wand- bzw. Sohlrauheit. Sie ist somit eine Vergleichsrauheit mit der Eigenschaft, dass sie durch lauter gleichgroße Rauheitselemente (Sandkörner) beschrieben wird.

Der Widerstand infolge der Oberflächenrauheit drückt sich als dimensionsloser Beiwert (λ_o) aus, welcher mit der Beziehung nach Keulegan (1938) in Abhängigkeit vom hydraulischen Radius (r_{hy}) und der äquivalenten Sandrauheit (k_s) ermittelt werden kann (vgl. Gl. 3.11). Zur Abschätzung der äquivalenten Sandrauheit (k_s) liegen für die meisten im Wasserbau verwendeten technischen Materialien und Untergrundverhältnisse experimentell ermittelte Orientierungswerte vor.

Ist beispielsweise der charakteristische Korndurchmesser der Gewässersohle oder die Höhe vorhandener Sohlenformen (z.B. Riffelhöhe) bekannt, können die in **Tab. 3.1** aufgeführten Näherungswerte verwendet werden (vgl. Zanke, 1982 und Dittrich, 1998). Die enormen Abweichungen der tabellarisch dokumentierten Ansätze lassen auf große Unsicherheiten bei der Bestimmung des k_s -Wertes schließen.

Experimentell ermittelte k_s -Werte können z.B. DVWK (1990) entnommen werden. Mit dem in Kapitel 3.1.2.3 gezeigten Ansatz wird es zudem möglich, eine Überlagerung unterschiedlicher Oberflächenwiderstandsbeiwerte (z.B. Sohle und Böschungen) durchzuführen.

Tab. 3.1: Orientierungswerte für die äquivalente Sandrauheit k_s (nach Zanke, 1982 und Dittrich, 1998).

Autor / Jahr	Ansatz für den k_s -Wert (mm)
Zanke / 1982:	
- ebene Sohle, einkörniges Sohlematerial	$k_s = d_{ch}$
- ebene Sohle, kohäsionsloses Korngemisch	$k_s = 2,5 \cdot d_{50}$ oder $k_s = d_{90}$
- Riffelsohle	$k_s \approx h_{Riffel}$
- Dünensohle	$k_s \approx h_{Düne}$
Garbrecht / 1961	$k_s = d_{90}$
Engelund und Hansen / 1966	$k_s = 2 \cdot d_{65}$
Hey / 1979	$k_s = 3,5 \cdot d_{84}$
Kamphuis / 1974	$k_s = 2 \cdot d_{50}$
Mertens / 1997	$k_s = 2,5 \cdot d_{50}$
Dittrich / 1998	
- Sohle aus Kiesgemisch	$k_s = 3,5 \cdot d_m$
- Sohle aus Grobkiesgemisch	$k_s = 3,5 \cdot d_{84}$
k_s äquivalente Sandrauheit (m) d_i Korndurchmesser der gesiebten Probe bei $i\%$ Siebdurchgang (m) d_{ch} charakteristischer Korndurchmesser des Einkorngemisches (m) d_m maßgebender Korndurchmesser (z.B. nach Meyer-Peter und Müller, 1949) (m) h_{Riffel} Höhe der Riffel relativ zur ebenen Sohle (m) $h_{Düne}$ Höhe der Düne relativ zur ebenen Sohle (m)	

3.1.2.2 Widerstand infolge Vegetation ($\lambda_{veg,\dot{U}}$ oder $\lambda_{veg,D}$)

Naturnahe Fließgewässer sind oftmals mit Bewuchs entlang der Ufer und/oder auf den Vorlandbereichen bestanden. Nach Bretschneider und Schulz (1982) eignet sich bei hydraulischen Untersuchungen die folgende Klassifizierung des Bewuchses hinsichtlich der Auswirkungen auf das Strömungsverhalten, wobei als Abgrenzkriterium die Höhe der Vegetation (h_{veg}) gegenüber der Fließtiefe (h) im Vegetationsbereich gilt (vgl. **Abb. 3.7**):

- Kleinbewuchs ($h_{veg} \ll h$)

Hier findet eine vollständige Überströmung des Bewuchses statt. Die Wuchshöhe ist deutlich geringer als die Fließtiefe. Die lotrechte Geschwindigkeitsverteilung entspricht qualitativ der Geschwindigkeitsverteilung über einer Sohle mit reiner Kornrauheit und hat einen logarithmischen Verlauf über die Fließtiefe.

- Mittelbewuchs ($h_{veg} \leq h$)

Hier findet eine Um- und Überflutung des Bewuchses statt. Die Wuchshöhe entspricht in etwa der Fließtiefe. Die lotrechte Geschwindigkeitsverteilung wird stark beeinflusst und entspricht nicht mehr dem logarithmischen Verlauf.

▪ Großbewuchs ($h_{\text{veg}} > h$)

Da die Wuchshöhe größer als die Fließtiefe ist, findet eine Umströmung (z.B. bei Baumstämmen) und evtl. eine Durchströmung (z.B. bei Strauchgewächsen wie größeren Weidenbeständen) statt. Die lotrechte Geschwindigkeitsverteilung entspricht auch hier nicht mehr einem logarithmischen Verlauf.

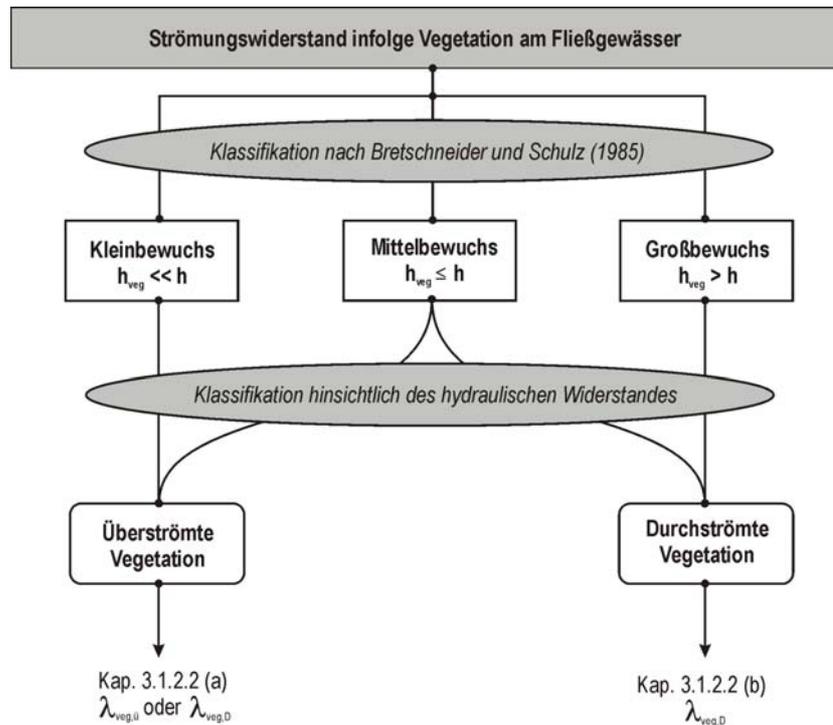


Abb. 3.7: Klassifikation der Strömungswiderstände bei gewässernaher Vegetation.

a) Widerstandsbeiwert bei überströmter Vegetation ($\lambda_{\text{veg},\text{ü}}$)

Kleinbewuchs:

Ist die Vegetationshöhe deutlich kleiner als die Fließtiefe (sog. Kleinbewuchs), so kann der überströmten Vegetation eine äquivalente Rauheit zugeordnet werden und somit hydraulisch als Oberflächenrauheit berücksichtigt werden (vgl. Kap. 3.1.2.1). Hier gibt es i.d.R. infolge der Flexibilität überströmter Vegetation jedoch Schwierigkeiten bei der Festlegung der äquivalenten Rauheit.

Deshalb entwickelte Kouwen (1988 und 1990) aus Untersuchungen im Feld und Labor eine empirische Beziehung für überströmten flexiblen Bewuchs, mit der ein dimensionsloser Widerstandsbeiwert λ_{Kouwen} in Relation zur Bewuchshöhe im strömungsbedingt umgelegten Zustand, zur Fließtiefe und zur Steifigkeit der Bewuchselemente berechnet werden kann. Das Kouwen-Verfahren eignet sich besonders für überströmte Vorländer, die mit Wiese oder Rasen bewachsen sind. Eine anwendungsspezifische Verfahrenserläuterung ist in **Anlage 1** dargestellt.

Mittelbewuchs:

Der Widerstandsbeiwert der überströmten Vegetation in der Klasse des Mittelbewuchses wird durch die Grundströmungsparameter der relativen Überströmhöhe (h/h_{veg}), der Steifigkeit der Elemente und der Dichte der Anordnung im Querschnitt bestimmt. Aufbauend auf Untersuchungen von Kouwen und Unny (1973), Plate und Quraishi (1965) sowie Businger (1975) gibt Haber (1982) folgenden funktionalen Zusammenhang für den Widerstand überströmter Vegetation an:

$$\frac{v_m}{\sqrt{g \cdot h \cdot I_E}} = f \left[\frac{h}{d_m}, \frac{h'_{veg}}{h_{veg}}, \frac{h}{h'_{veg}}, \frac{1}{h_{veg}} \cdot \left(\frac{n \cdot E \cdot I}{\rho_W \cdot g \cdot h \cdot I_E} \right)^{0,25}, \alpha \right] \quad \text{Gl. 3.19}$$

- v_m mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 I_E Energieliniengefälle (-)
 h Fließtiefe (m)
 d_m maßgebender Durchmesser der Rauheitselemente (m)
 h_{veg} Vegetationshöhe im nicht-überströmten Zustand (m)
 h'_{veg} Vegetationshöhe der strömungsbedingt geeigneten Vegetation (m)
 $n \cdot E \cdot I$ Steifigkeit der überströmten Vegetationselemente (kg·m³/s²)
 ρ_W Dichte von Wasser (kg/m³)
 α Anordnungsparameter (-)

In Abhängigkeit dieser Parameter wurden von diversen Autoren unterschiedliche Widerstandsbeziehungen hergeleitet. Das Problem, welches sich immer wieder stellt, beruht auf der Einbeziehung der Vegetationsdynamik (Biegung und Schwingung in der Strömung). Stephan (2000) führt in ihrer Arbeit eine ausführliche Gegenüberstellung derzeitiger Ansätze durch. Die Anwendung der dort diskutierten Widerstandsbeziehungen auf praktische Problemstellungen ist aufgrund der noch unzureichend erfassten empirischen Parameter (z.B. für die Vegetationselastizität) nur näherungsweise möglich. Daher besteht hier noch Forschungsbedarf.

b) Widerstandsbeiwert bei durchströmter Vegetation ($\lambda_{veg,D}$)

Die Strömungssituation in diesem Fall wurde in zahlreichen Modellversuchen analysiert (vgl. Fenzl, 1962, Petryk und Bosmajian, 1975, Lindner, 1982). Es kristallisierte sich zunächst der gemeinsame Ansatz heraus, dass die durch die Vegetation aufgebaute Formwiderstandskraft (F_{veg}) auf die bewuchsbestandene Grundfläche ($a_x \cdot a_y$) als Schubspannung ausgedrückt werden kann und als dimensionsloser Widerstandsbeiwert ($\lambda_{veg,D}$) darstellbar ist:

$$F_{veg} = \frac{1}{2} \cdot c_{WR} \cdot A_{veg} \cdot \rho_W \cdot v_{veg}^2 \quad \text{mit} \quad A_{veg} = h \cdot d_{veg} \quad \text{Gl. 3.20}$$

- F_{veg} Formwiderstandskraft durch die Strömung auf die Vegetationselemente (N)
 c_{WR} Formwiderstandsbeiwert der angeströmten Vegetationsfläche (-)
 A_{veg} in Hauptströmungsrichtung projizierte Vegetationsfläche (m²)

ρ_w Dichte des Wassers (kg/m³)
 v_{veg} ... mittlere Fließgeschwindigkeit der Strömung im Vegetationsbereich (m/s)
 h Fließtiefe im Vegetationsbereich
 d_{veg} ... Durchmesser der angeströmten Vegetation (m)

$$\lambda_{veg,D} = \frac{4 \cdot A_{veg}}{a_x \cdot a_y} \cdot c_{WR} \quad \text{Gl. 3.21}$$

$\lambda_{veg,D}$ Formwiderstandsbeiwert der durchströmten Vegetation (-)
 A_{veg} in Hauptströmungsrichtung projizierte Vegetationsfläche (m²)
 a_x, a_y Abstand der Vegetationselemente in und quer zur Hauptfließrichtung (m)
 c_{WR} ... Formwiderstandsbeiwert der angeströmten Vegetationsfläche (-)

Geht man von geometrisch einfachen Vegetationsstrukturen aus (z.B. starre Baumstämme), dann reduziert sich die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes auf die korrekte Erfassung des Formwiderstandsbeiwertes (c_{WR}). Hierfür existieren in der Fachliteratur verschiedene Ansätze und Tabellen, die jedoch für die praktische Anwendung auf reale Vegetationsformen ungeeignet sind.

Die natürlichen Vegetationsanordnungen entlang eines Fließgewässers sind i.d.R. durch Gruppenanordnungen mehrerer formendiverser Elemente geprägt. Für die Ermittlung des c_{WR} -Wertes in solchen Fällen gibt es bislang nur Untersuchungen für stark vereinfachte, idealisierte Fälle:

Lindner (1982) hat zur Bestimmung des Formwiderstandsbeiwertes einer durchströmten Gruppenanordnung von Vegetationselementen Versuche mit verschiedenen natürlichen Pflanzen sowie mit idealisiertem Bewuchs in Form von kreiszylindrischen Elementen durchgeführt. Aufbauend auf seine Versuchsergebnisse und auf theoretische Überlegungen von Li und Shen (1973), Richter (1973), Petryk und Bosmajian (1975) und Schlichtig (1965) leitete Lindner eine Bestimmungsgleichung für den Formwiderstandsbeiwert (c_{WR}) eines angeströmten Zylinders inmitten einer Gruppe weiterer Zylinder ab:

$$c_{WR} = c_{W\infty} \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{d_{veg}}{a_y} \cdot c_{W\infty} \right) \cdot \left(\frac{v_{veg}}{v_m} \right)^2 + \Delta c_w \quad \text{Gl. 3.22}$$

c_{WR} ... Formwiderstandsbeiwert einer Gruppe durchströmter Kreiszyylinder (-)
 $c_{W\infty}$... Formwiderstandsbeiwert eines allein stehenden Kreiszyinders (-)
 d_{veg} ... Durchmesser eines Zylinders (m)
 v_{veg} ... Anströmgeschwindigkeit an einem Kreiszyylinder (m/s)
 v_m ... mittlere Strömungsgeschwindigkeit (m/s)
 Δc_w .. Formwiderstandsbeiwert eines Kreiszyinders infolge Verbauung und Schwerewellen (-)

Gleichung 3.22 zeigt folgende Abhängigkeiten des c_{WR} -Wertes auf:

- Angeströmte Vegetationsform ($c_{W\infty}$)

Der Formeinfluss auf den Formwiderstandsbeiwert entspricht dem Widerstand eines seitlich nicht verbauten einzelnen Kreiszyinders in der Strö-

mung. Für diesen Fall der Abstraktion der Vegetationsform besteht nach Untersuchungen von Schlichting (1982) ein direkter Zusammenhang mit der Reynoldszahl des Kreiszyinders ($Re_{Zylinder}$). Nach Angabe von Pasche (1984) kann der $c_{W\infty}$ -Beiwert in dem für Pflanzenbestände maßgeblichen unterkritischen Bereich ($800 \leq Re_{Zylinder} < 8000$) mit $c_{W\infty} = 1,0$ als konstant angenommen werden.

- Einfluss der seitl. Einengungen durch weitere Elemente (v_{veg}/v_m)

Unter der Berücksichtigung der Theorie der Nachlaufströmung, die durch Reichardt (1941) und Schlichting (1982) geprägt wurde, sowie unter der Annahme einer linearen Überlagerung der Geschwindigkeitsabnahme im Nachlaufbereich eines Vegetationselementes bei hintereinander angeordneten Einzelementen, gelangt Lindner zur analytischen Erfassung der relativen Anströmgeschwindigkeit (v_{veg}/v_m). Hierzu gibt er in seiner Arbeit ein Gleichungssystem an, das auf der induktiven Turbulenztheorie nach Reichardt (1941) aufbaut, jedoch nur mit großem Aufwand gelöst werden kann.

- Einfluss der Schwerewellen (Δc_W)

Bei der Umströmung eines Vegetationselementes bilden sich stehende Schwerewellen, die eine zusätzliche Erhöhung des Formwiderstandes bewirken. Der Einfluss der Schwerewellen auf den Formwiderstandsbeiwert (c_{WR}) kann durch die Froudezahl erfasst werden. Lindner gibt hierfür folgende Beziehung an:

$$\Delta c_W = \frac{2}{Fr^2} \cdot \left(1 - \frac{h_u}{h_o}\right) \quad \text{mit } Fr = \frac{\frac{h_u}{h_o} \cdot \left[\left(\frac{h_u}{h_o}\right)^2 - 1\right]}{2 \cdot \left(\frac{h_u}{h_o} - \frac{a_y}{a_y - d_{veg}}\right)} \quad \text{Gl. 3.23}$$

Δc_W Formwiderstandsbeiwert eines Kreiszyinders infolge Verbauung und Schwerewellen (-)

Fr Froudezahl (-)

h_u Wassertiefe unterhalb des betrachteten Einzelementes (m)

h_o Wassertiefe oberhalb des betrachteten Einzelementes (m)

a_x Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung (m)

a_y Abstand der Vegetationselemente quer zur Fließrichtung (m)

d_{veg} Durchmesser der Vegetationselemente (m)

Aus den drei erläuterten Abhängigkeiten des c_{WR} -Wertes wird ersichtlich, dass zu seiner Bestimmung ein enormer Rechenaufwand betrieben werden muss und das Ergebnis an sich eigentlich nur für umströmte starre Zylinderanordnungen Gültigkeit besitzt.

Aus diesem Grund hat Pasche (1984) durch weiterführende Laboruntersuchungen einen Ansatz erarbeitet, der die relative Anströmgeschwindigkeit

(v_{veg}/v_m) als Funktion der Nachlauflänge (a_{NL}) und -breite (a_{NB}) in ihrem Verhältnis zum Elementabstand beschreibt (vgl. **Abb. 3.8**).

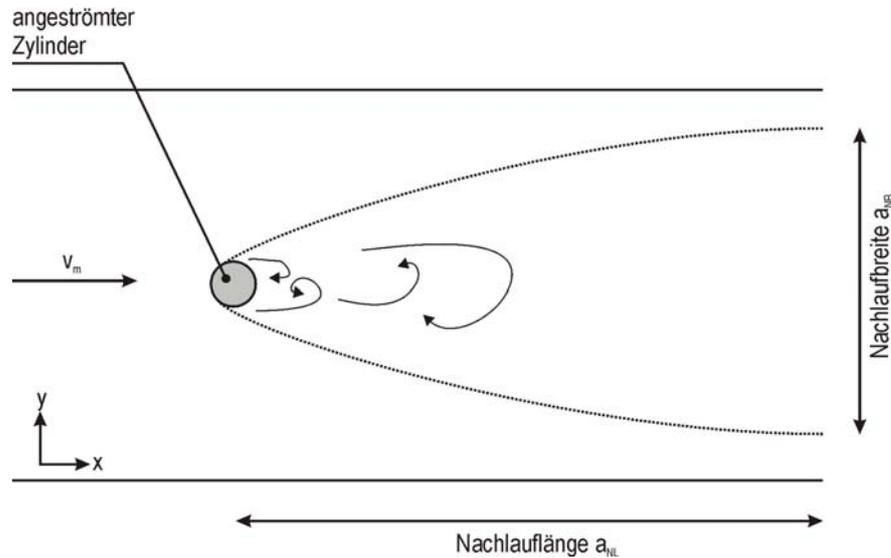


Abb. 3.8: Zur Definition der Nachlauflänge und -breite. (Verändert nach Pasche, 1984)

Nach Pasche (1984) lässt sich damit die relative Anströmgeschwindigkeit wie folgt ausdrücken:

$$\left(\frac{v_{veg}}{v_m}\right)^2 = 1,15 \cdot \left(\frac{a_{NL}}{a_x}\right)^{-0,48} + 0,5 \cdot \left(\frac{a_{NB}}{a_y}\right)^{1,1} \quad \text{Gl. 3.24}$$

- v_{veg} ... Anströmgeschwindigkeit an einem Kreiszyylinder (m/s)
- v_m ... mittlere Strömungsgeschwindigkeit (m/s)
- a_{NL} ... Nachlauflänge (m)
- a_{NB} ... Nachlaufbreite (m)

Aus empirischen Beziehungen können nach Pasche (1984) die Nachlauflänge (a_{NL}) und -breite (a_{NB}) berechnet werden:

$$a_{NL} = 128,876 \cdot c_{W\infty} \cdot d_{veg} \cdot \left[\frac{1 + g \cdot a_{NL} \cdot l_E}{\frac{v_m^2}{2}} \right]^{-2,143} \quad \text{Gl. 3.25}$$

$$a_{NB} = 0,24 \cdot a_{NL}^{0,59} \cdot (d_{veg} \cdot c_{W\infty})^{0,41}$$

- a_{NL} ... Nachlauflänge (m)
- a_{NB} ... Nachlaufbreite (m)
- $c_{W\infty}$... Formwiderstandsbeiwert eines allein stehenden Kreiszyinders(-)
- d_{veg} ... Durchmesser eines Vegetationselementes (m)
- g ... Erdbeschleunigung (m/s^2)
- l_E ... Energieliniengefälle (-)
- v_m ... mittlere Fließgeschwindigkeit (m/s)

Trotz der Vereinfachungen von Pasche, die mittels der empirischen Beziehungen eine im Vergleich zur Lindner-Methode einfache Berechnung des c_{WR} -Wertes und somit auch des $\lambda_{veg,D}$ -Beiwertes ermöglichen, besteht die Gültigkeit der Ergebnisse nur für umströmte kreiszylindrische Elemente.

Oplatka (1998) führte im Labor und in der Natur Versuche zur Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern durch. Er untersuchte u.a. die Beanspruchung von Weidenbüschen durch die Strömung. Er dokumentiert und quantifiziert erstmalig das Biegeverhalten von jungen Weidenstöcken infolge der Strömungskräfte bzw. der Fließgeschwindigkeiten (vgl. **Abb. 3.9**). Ausgehend von den Messwerten, die zum Teil aus Videoanalysen abgeleitet wurden, gibt Oplatka Diagramme zur Ermittlung des Widerstandsbeiwertes c_{WR} an, deren Anwendung jedoch in der Praxis aufgrund nicht ermittelbarer Parameter (z.B. die Biegungsform der Weide bei Über- und Durchströmung) scheitert.

Gerstkrasser (1998) führte Untersuchungen zur Wirkungsweise und Belastbarkeit von ingenieurb biologischen Bauweisen an Fließgewässern durch. Er bestätigt durch Messungen und Beobachtungen das plötzliche „Umlegen“ von Jungweiden und Sträuchern, sobald die Wasserspiegellage die Wuchshöhe übersteigt. Der Umlegeeffekt tritt nach Gerstkrassers Beobachtungen sogar noch früher ein, wenn ein Versatz der Sträucher mit Getreibsel, Geschwemm- sel und Müll stattfindet. Durch Messung bodennaher Fließgeschwindigkeiten im Umfeld solcher Sträucher konnte Gerstkrasser zeigen, dass die Durchströmung solche umgelegter Sträucher vernachlässigbar gering ist. In diesem Fall empfiehlt er deshalb die widerstandsmäßige Charakterisierung der umgelegten Vegetation durch eine äquivalente Flächenrauheit (k_s).

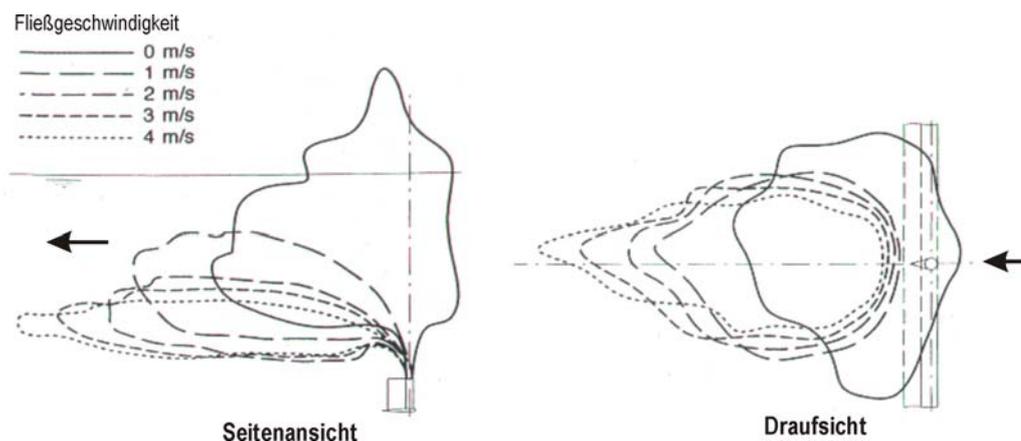


Abb. 3.9: Typische Verformung einer vollständig untergetauchten Weide bei verschiedenen Fließgeschwindigkeiten in der Seitenansicht und in der Draufsicht. (verändert nach Oplatka)

Um Anhaltswerte für den Widerstandsbeiwert ($\lambda_{veg,D}$) realer durchströmter Vegetationselemente und -gruppen zu erhalten, führte Järvelä (2002) Laborversuche mit realen Weidenästen in Kombination mit verschiedenen Gräsern

durch. Er zeigte auf, dass grundsätzlich eine Abnahme der Widerstandsbeiwerte bei zunehmender Reynoldszahl der Strömung eintritt. Jedoch ging aus der Rückrechnung seiner Versuchsergebnisse auch hervor, dass die Reynoldszahl allein zur Ableitung der Widerstandswirkung nicht ausreicht.

Järvelä nennt daher in Abhängigkeit seiner Versuchskonfigurationen weitere Parameter (Anströmfläche, lokale Fließgeschwindigkeiten, etc.), die zur Charakterisierung des Widerstandsbeiwertes wichtig sind. Außerdem zeigt er auf, dass bei gleicher Vegetationsbesatzdichte die Vegetationsanordnung keinen Einfluss auf den Widerstandsbeiwert hat, was er mit der stark verästelten Struktur der Weiden erklärt, die bei allen Anordnungen automatisch zu einer relativ homogenen Verteilung der Biomasse im Kontrollvolumen führte.

Der Einfluss der Vegetationsbesatzdichte auf den Widerstandsbeiwert ist nach Järvelä direkt gegeben: bei doppelter Besatzdichte treten auch doppelt so große Widerstandsbeiwerte auf. Ebenso spielt seiner Meinung nach auch der Belaubungszustand der Vegetation eine wesentliche Rolle: Durchströmte Weiden mit Laub bewirken bei gleicher Besatzdichte und Anordnung einen zwei- bis dreifach höheren Widerstandsbeiwert als Weiden ohne Laub.

Unabhängig von Järvelä stellt Stephan (2002) zeitgleich ähnliche Untersuchungen zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation an. Sie beschäftigt sich jedoch überwiegend mit submerser aquatischer Vegetation. Aufgrund einer sehr umfangreichen Literaturrecherche macht Stephan jedoch auch Aussagen zur Quantifizierung des k_s -Wertes für umgebogene, überströmte Vegetation mit strauchartigem Charakter. Die z.T. sehr kontroversen Aussagen lassen sich vereinfacht und als praxistaugliche Empfehlung darstellen, dass der k_s -Wert von überströmter, umgelegter Vegetation von der gebeugten Pflanzhöhe abhängt, die i.d.R. zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{2}$ der Wuchshöhe beträgt.

3.1.2.3 Widerstand infolge von Interaktionsprozessen (λ_I oder λ_T)

Da bei naturnahen Fließgewässern die Fließtiefe und/oder die Rauheitsverhältnisse über dem Querschnitt so variieren, dass im Profil keine einheitlichen Geschwindigkeitsverhältnisse vorliegen, muss im Rahmen einer eindimensionalen hydraulischen Untersuchung eine Gerinnegliederung durchgeführt werden (vgl. **Abb. 3.10**).

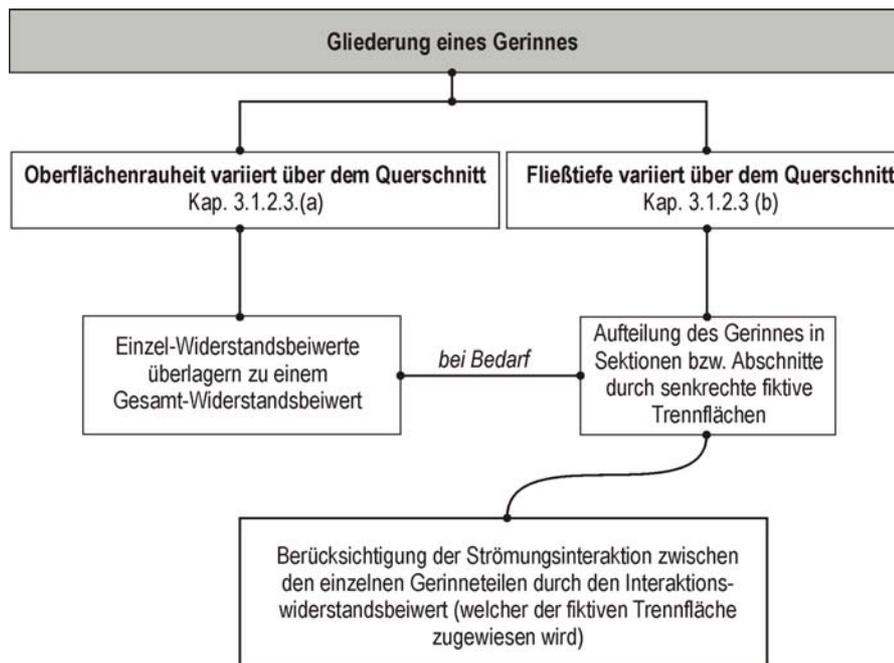


Abb. 3.10: Skizze zur Typisierung der Einzelwiderstände bei gegliederten Gerinnen.

a) Widerstandsbeiwert infolge Rauheitsgliederung

Horton (1933) und Einstein (1934) entwickelten einen Ansatz zur gewichteten Überlagerung von unterschiedlichen Rauheiten in einem Querschnitt. Das Verfahren weist jeder Rauheitssektion durch fiktive Trennlinien eine hydraulisch wirksame Querschnittsfläche zu. Ausgehend von der Gerinnewandung verlaufen die fiktiven Trennlinien senkrecht zu den Isotachen bis zum freien Wasserspiegel, so dass aus turbulenztheoretischen Gründen kein Impulsaustausch zwischen den Teilquerschnitten stattfindet (vgl. **Abb. 3.11**).

Aus den äquivalenten Sandrauheiten $k_{s,i}$ der einzelnen Rauheitssektionen lassen sich mit dem Widerstandsgesetz nach Keulegan (1938) die einzelnen Widerstandsbeiwerte λ_i berechnen. Hierzu müssen die Teilflächen A_i zunächst abgeschätzt und später durch einen iterativen Prozess verifiziert werden.

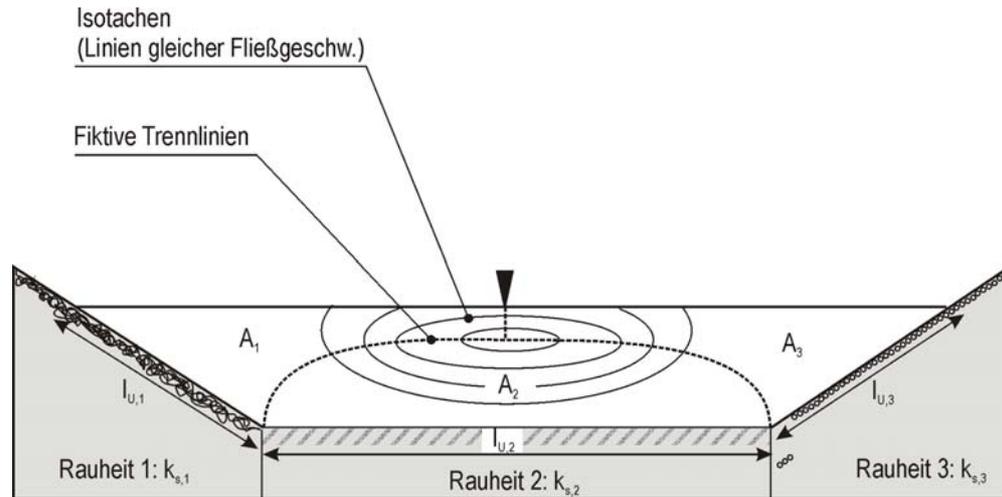


Abb. 3.11: Sektionierung eines Querschnittes mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten. (Verändert nach Horton, 1933)

Die Überlagerung der Widerstandsbeiwerte λ_i zu einem Gesamtwiderstandsbeiwert λ_{ges} erfolgt durch lineare Superposition, die mit den jeweiligen benetzten Teilumfängen $I_{U,i}$ gewichtet werden:

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_{ges}}} = \sqrt{\frac{\sum I_{U,i}}{\sum (\lambda_i \cdot I_{U,i})}} \quad \text{mit} \quad \sum A_i = A_{ges} \quad \text{Gl. 3.26}$$

- λ_{ges} ... Gesamt-Widerstandsbeiwert (-)
- λ_i Teil-Widerstandsbeiwert (-)
- $I_{U,i}$ benetzter Teilumfang (m)
- A_i zugeordnete Teilfläche (m²)
- A_{ges} .. Gesamtquerschnittsfläche (m²)

Durch die schubspannungsfreie Lage der fiktiven Trennlinien werden rauheitsbedingt induzierte Wirbelstrukturen und Sekundärströmungen, welche einen Massen- und Impulsaustausch durch die Trennlinien zur Folge hätten, nicht erfasst. Besonders diese Interaktion bewirkt jedoch i.d.R. eine Energiedissipation in der Strömung, was sich durch eine weitere Reduktion der Abflussleistungsfähigkeit des Gesamtquerschnittes ausdrückt. Besonders bei der hydraulischen Untersuchung von Hochwasserereignissen sollte diese Interaktion berücksichtigt werden.

Die aus dieser Forderung überwiegend aus Laboruntersuchungen resultierenden empirischen Verfahren zur Berücksichtigung des Fließwiderstandes infolge extremer Rauheitsgliederung und deren Interaktion können den Arbeiten von Felkel (1960), Obendorf (1978), Rickert, Barleben und Billib (1980), Indelkofer und Rouvé (1980) sowie Evers (1983) entnommen werden.

Im DFG-Forschungsbericht (DFG, 1987) wird mit Hinweis auf eine durchgeführte Vergleichsuntersuchung auf Basis von Messdaten naturnaher Fließgewässer zum Ausdruck gebracht, dass diese Verfahren nur als Näherungslö-

sung zu betrachten sind und bei naturnahen Gewässerläufen zu keinen qualitativ guten Ergebnissen führen.

„Die hydraulischen Überlagerungseinflüsse werden im Wesentlichen mit einem Parameter erfasst, ohne nach den einzelnen Grundströmungsgrößen aufzuschlüsseln. [...] (Aus den durchgeführten Vergleichsuntersuchungen) wird deutlich, welche Risiken bei der Bemessung naturnaher Fließgewässer eingegangen werden, wenn man auf empirische Beziehungen zurückgreift, die den Fließwiderstand in naturnahen Gerinnen nicht nach Einzelphänomenen aufschlüsseln, sondern über einen Rauheitsparameter darzustellen versuchen.“ (DFG, 1987, Seite 11 und 13).

b) Interaktionswiderstandsbeiwert bei gegliederten Gerinnen

Die Untersuchung des Interaktionsmechanismus in gegliederten Gerinnen findet seit den 1960er Jahren statt. Dabei kristallisieren sich drei Untersuchungsziele heraus, wobei die Untersuchungsmethodik bei allen bisherigen Arbeiten physikalische Modellversuche mit einbezieht:

- Einfluss der Gerinnegeometrie auf die Abflussleistung

Die folgenden Autoren konzentrierten sich auf die Erstellung einer Methodik zur Berechnung der Abflussleistung in Querschnitten, bei denen die Fließtiefe über den Querschnitt variiert, die Oberflächenrauheit homogen ist und keine signifikanten Strömungsverluste induziert: Posey (1957), Sellin (1964), Wright und Carstens (1970), Nicollet und Uan (1979) und Wormeaton und Merret (1990). Eine kurze Darstellung der einzelnen Verfahren sowie für die praktische Anwendung erstellte Ablaufdiagramme sind in **Anlage 2** dargestellt.

- Verteilung der Fließgeschwindigkeit im Querschnitt bei Interaktion

Die Arbeiten von Yen und Overton (1973) sowie Rajaratnam und Ahmadi (1978 und 1981) versuchen, die Interaktion durch gemessene Fließgeschwindigkeiten zu quantifizieren.

- Verteilung der Sohlenschubspannung im Querschnitt bei Interaktion

Die Arbeiten von Myers und Elsayy (1975), Knight und Hamed (1985) oder Holden und James (1989) versuchen die Interaktion durch die Verteilung der Sohlenschubspannung zu beschreiben.

Um den derzeitigen Wissensstand zur Quantifizierung des Interaktionswiderstandes zu erläutern, werden zunächst einige Arbeiten vorgestellt, welche auf einer phänomenologischen Beschreibung des Interaktionsprozesses basieren. Im Anschluss daran werden einige empirische und turbulenz-theoretisch basierte Ansätze dargestellt.

Phänomenologische Beschreibung des Interaktionsvorganges

Sellin (1964) visualisierte die oberflächennahe Strömung in einem geraden Doppelrechteckquerschnitt durch Zugabe von Aluminiumpulver (vgl. **Abb. 3.12**). Aus seinen Beobachtungen leitete er ab, dass der Impulsaustausch zwischen dem fließenden Wasser in tieferen Hauptgerinne und dem Wasser auf den flach überströmten Vorländern mit der Entstehung großflächiger, periodischer vertikalachsiger Wirbelstrukturen einhergeht. Sellins Beobachtungen gelten jedoch nur für die Strömungen an der Wasseroberfläche und geben keine Auskunft über die Interaktionsprozesse im Inneren des Wasserkörpers.

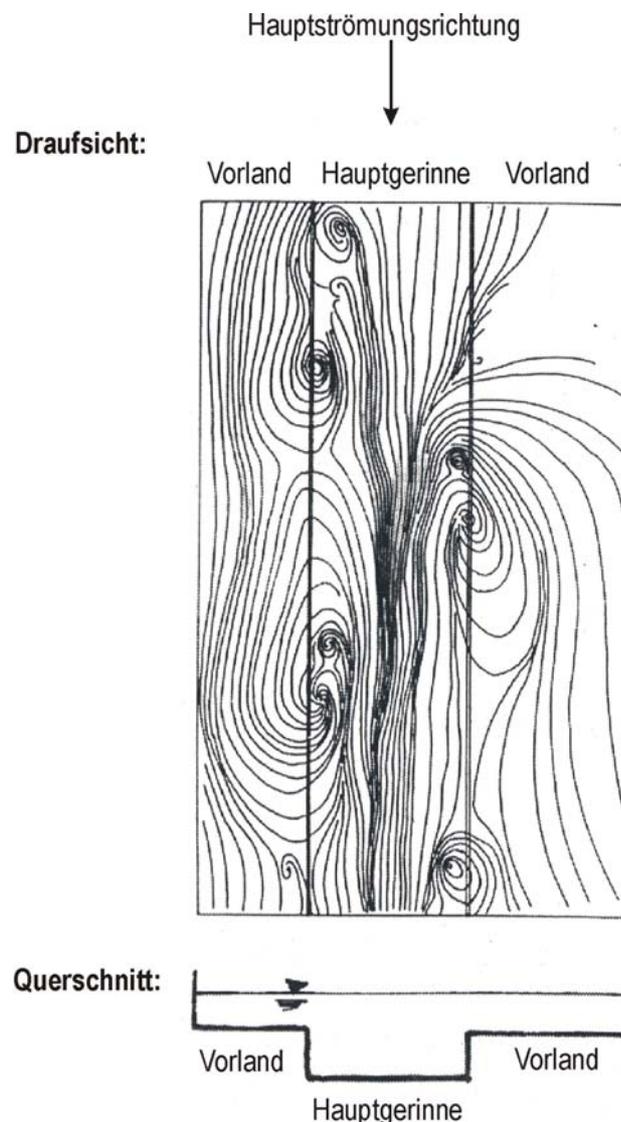


Abb. 3.12: Visualisierte Oberflächenströmung bei den Versuchen von Sellin (1964).

Kaiser (1984) führte Modellversuche in einem doppelt gegliederten Gerinne durch, bei dem die Rauheit der Vorländer wesentlich größer/rauer als im Hauptgerinne war. Durch Messungen der lokalen Fließgeschwindigkeiten

konnte er eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der relativ langsamen Fließbewegung im Vorlandbereich und der schnellen Fließbewegung im Hauptgerinne nachweisen. Kaiser führte mit den gemittelten Geschwindigkeitsdaten eine Energiebetrachtung nach Bernoulli durch, die aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeitshöhen einen lateralen Gradienten der Energielinie zwischen dem Vorland und dem Hauptgerinne ergab.

Aufgrund des natürlichen Bestrebens nach Gleichgewicht tritt nach Kaiser zunächst eine Querströmung vom Hauptgerinne in Richtung Vorland auf, um den Energieunterschied zu kompensieren (vgl. **Abb. 3.13 a**). Infolge der großen Rauheit auf dem Vorland erhöht sich dort aufgrund der Querströmung nicht nur die Fließgeschwindigkeit, sondern zugleich auch die Fließtiefe und somit der hydrostatische Druck (vgl. **Abb. 3.13 b**). Hierdurch kommt es zum Nachlassen der Querströmung und schließlich zu einer Umkehr der Querströmung in umgekehrter Richtung vom Vorland zum Hauptgerinne (vgl. **Abb. 3.13 c**). Durch die Massenträgheit des Systems kommt es zum Durchpendeln der Wasserspiegellage im Hauptgerinne über das Wasserspiegelniveau des Vorlandes hinaus (vgl. **Abb. 3.13 d**).

Das so entstandene Schwingungssystem wird durch Energieentzug aus der in Längsrichtung verlaufenden Hauptströmung gespeist. Nach Kaisers Modellvorstellung laufen die Schwingungen und mit ihnen der Austausch von Turbulenzballen periodisch ab, was somit den Beobachtungen von Sellin (1964) entspricht und diese quasi zweidimensional ergänzt.

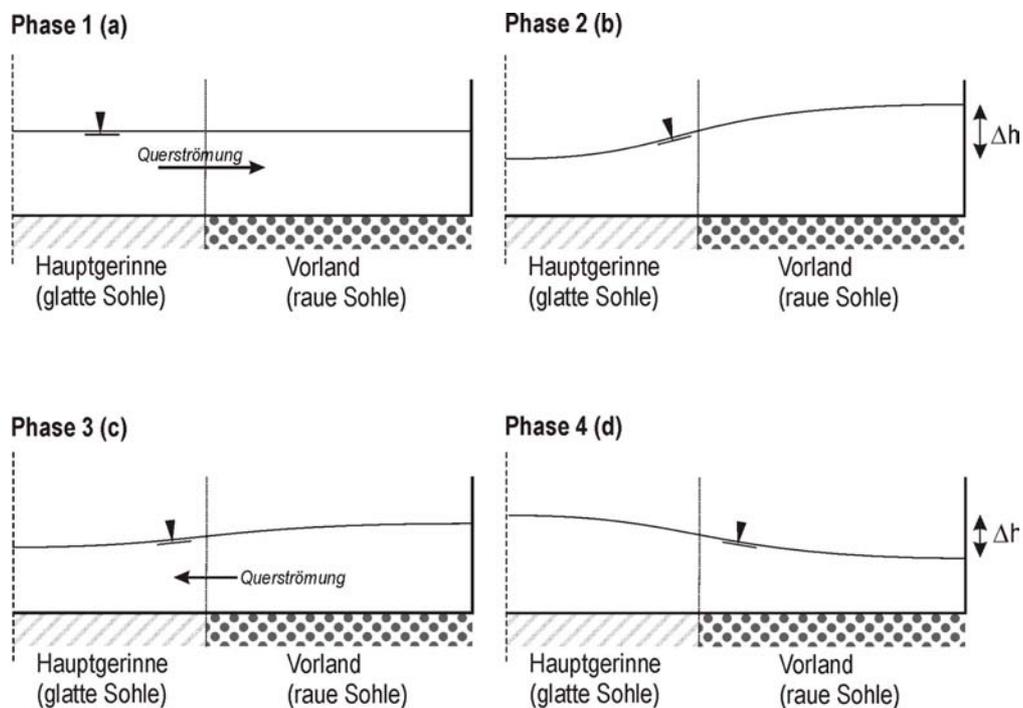


Abb. 3.13: Queraustausch nach dem Interaktionsmodell von Kaiser (1984).

Knight und Shiono (1990) bedienen sich der Laser-Doppler-Anemometrie, die seit Mitte der 1980er Jahre eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Erfassung von feinen Partikeln in einer Strömung ermöglicht. Sie führten Modellversuche in einem zweifach gegliederten Trapezgerinne durch. Hier konnten sie neben den bereits von Sellin (1964) beobachteten oberflächennahen periodischen Makrowirbeln mit vertikaler Achse auch kleinere Wirbelstrukturen mit horizontaler Achse nachweisen, die sich zu einer Sekundärströmung überlagert schraubenartig in Hauptfließrichtung fortbewegen.

Diese kleinen Wirbel tragen nach Knight und Shiono mit zum Impulsaustausch zwischen Hauptgerinne und Vorland bei: Sie beeinflussen durch ihre auf- oder abwärtsgerichteten vertikalen Geschwindigkeitskomponenten signifikant die Strömung in ihrem Umfeld.

In weiteren Versuchen ordneten Knight und Shiono zylindrische Elemente gleichverteilt auf dem Vorland an, um durchströmte Vegetationsanordnungen zu simulieren. Sie konnten hierdurch zeigen, dass durch die Wirbel in der Nachlaufströmung hinter den Zylinderelementen die Interaktionssituation noch komplexer wird (vgl. **Abb. 3.14**). Das Maximum der Austauschintensität lokalisierten sie bei allen untersuchten Fällen (mit und ohne Vegetationssimulation) immer im Bereich der Böschungskante zwischen Hauptgerinne und dem Vorland.

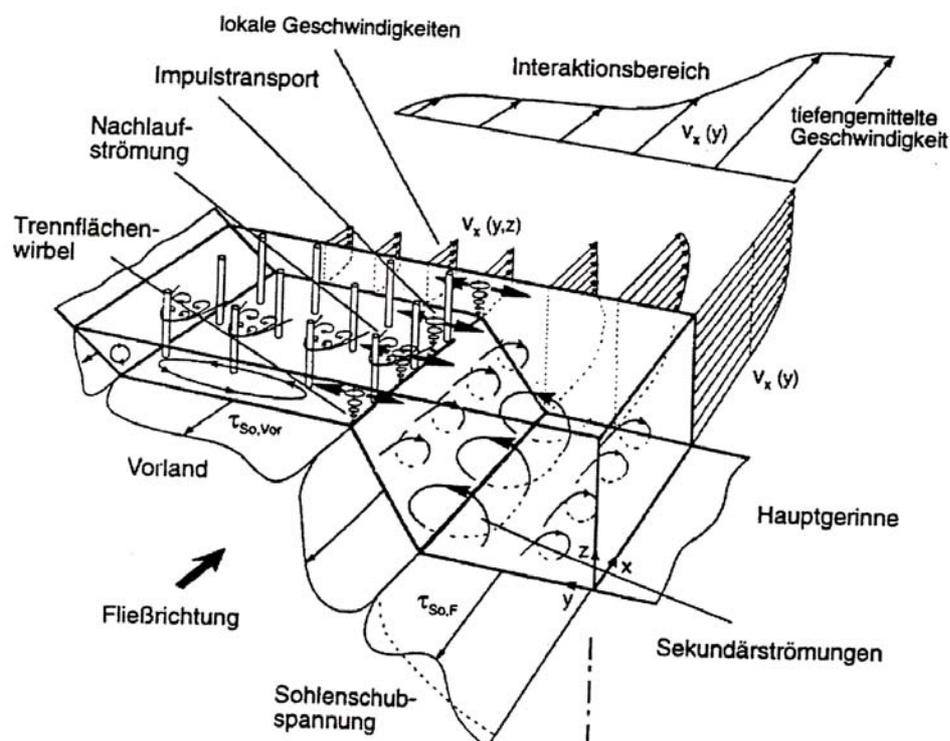


Abb. 3.14: Interaktionsmodell nach Knight und Shiono (1990).

Nezu und Onitsuka (2001) führten ebenfalls mit Verwendung der Laser-Doppler-Anemometrie Laborversuche in einem doppelt gegliederten Rechteckgerinne durch. Aufbauend auf die Erfahrungen von Knight und Shiono (1990) variierten sie die relative Fließtiefe ($h_{\text{Vor}}/h_{\text{H}}$).

Für kleine relative Fließtiefen ($h_{\text{Vor}}/h_{\text{H}} \leq 0,625$) beobachteten sie in der Interaktionszone große horizontale Wirbelstrukturen mit vertikaler Achse, die konzentriert im Bereich der Böschungskante zwischen Hauptgerinne und Vorland aufgetreten sind.

Für große relative Fließtiefen ($h_{\text{Vor}}/h_{\text{H}} > 0,625$) konnten sie wie bei den Untersuchungen von Knight und Shiono (1990) zusätzlich zahlreiche kleine Wirbelstrukturen nachweisen, die sich zu komplexen Sekundärströmungen überlagern und dadurch die Interaktion zwischen Vorland und Hauptgerinne intensivieren.

Empirische Ansätze zur Quantifizierung des Interaktionswiderstandes

„Auf dem Gebiet der Gerinnegliederung infolge veränderlicher Fließtiefen (sog. Querschnittsgliederung) sind bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden [...]. In diesem Gerinnetyp wird der Interaktionsvorgang, welcher sich in einem intensiven Impulsaustausch zwischen den Gerinneteilen mit hohem Fließverlust bemerkbar macht, zum die Strömung bestimmenden Element. Zur analytischen Erfassung dieser Strömungsvorgänge wird von allen Autoren einheitlich eine Aufteilung des Gerinnes durch fiktive Trennflächen vorgenommen [...].“ (DFG, 1987, Seite 10).

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt hat sich der Ansatz einer vertikalen fiktiven Trennfläche durchgesetzt. Das gegliederte Gerinne wird dadurch in Sektionen mit annähernd gleicher mittlerer Fließgeschwindigkeit aufgeteilt. Aufgrund der seit den 1960er Jahren gesammelten Erfahrungen wird diesen Trennflächen eine Scheinschubspannung (τ_{T}) zugerechnet. Somit wird die interaktionsbedingte Energiedissipation über eine Schubspannung ausgedrückt, welche eine theoretische Beschreibung der Wirkung des Impulstransportes quer zur betrachteten Querschnittsfläche darstellt (vgl. Naudascher, 1992).

Zur Berechnung der Scheinschubspannung (τ_{T}) sind der Fachliteratur unterschiedliche empirische Beziehungen zu entnehmen. Zusammenfassend lässt sich daraus die funktionale Abhängigkeit der Scheinschubspannung von folgenden Parametern ableiten:

$$\frac{\tau_{\text{T}}}{\rho_{\text{W}} \cdot g \cdot l_{\text{E}} \cdot h_{\text{Vor}}} = f \left[\frac{h_{\text{Vor}}}{h_{\text{H}}}, \frac{b_{\text{Vor}}}{b_{\text{H}}}, \frac{(v_{\text{H}} - v_{\text{Vor}})^2}{l_{\text{E}}} \right] \quad \text{Gl. 3.27}$$

τ_{T} Scheinschubspannung (N/m²)

ρ_{W} Dichte von Wasser (kg/m³)

g Erdbeschleunigung (m/s²)

l_{E} Energienliniengefälle (-)

h_{Vor} mittlere Fließtiefe über dem Vorland (m)

h_{H} mittlere Fließtiefe im Hauptgerinne (m)

b_{Vor} ... Breite der Vorlandsektion (m)
 b_H ... Breite der Hauptgerinnesektion (m)
 v_H ... mittlere Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne (m/s)
 v_{Vor} ... mittlere Fließgeschwindigkeit über dem Vorland (m/s)

Der dargestellte Zusammenhang zeigt, dass die Scheinschubspannung in den empirischen Ansätzen neben der relativen Fließtiefe (h_{Vor}/h_H) auch von der relativen Breite (b_{Vor}/b_H) und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Hauptgerinne und Vorland ($v_H - v_{Vor}$) abhängt.

Ein Schwachpunkt der dargestellten funktionalen Abhängigkeit ist darin zu sehen, dass die relative Breite (b_{Vor}/b_H) rein querschnittsgeometrisch definiert ist und keine Informationen über die vom interaktiven Impulsaustausch hydraulisch tatsächlich mitwirkenden Breiten enthält. Bei sehr breiten Vorländern kommt es deshalb bei diesen Verfahren zu einer Überschätzung der Scheinschubspannung.

Ferner ist zu kritisieren, dass die Geschwindigkeitsdifferenz ($v_H - v_{Vor}$) eine rein rechnerische Größe darstellt, wodurch die Übertragbarkeit des Quotienten sowohl auf andere Querschnittsgeometrien (z.B. bei asymmetrischen Querschnitten) als auch auf Gerinne mit extremen lokalen Rauheitsunterschieden (z.B. bei vegetationsbestandenem Vorland) nicht uneingeschränkt möglich ist.

Besonders für den Fall von Vegetation auf dem Vorland hat Thornton (2000) einen empirischen Ansatz aus Laborversuchen abgeleitet, der jedoch wiederum nur auf Fälle mit ähnlicher Gerinnegeometrie und Vegetationsanordnung angewendet werden kann.

Turbulenz-theoretisch basierte Ansätze zur Quantifizierung des Interaktionswiderstandes

Aufgrund der begrenzten Aussagefähigkeit der empirischen Verfahren wurden Mitte der 1980er Jahre Untersuchungen im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt (vgl. DFG, 1987). Dabei sollte speziell der Einfluss von Vegetation auf Vorländern und Böschungen im Hinblick auf die Interaktion in gegliederten Gerinnen untersucht werden.

Man ging von der vereinfachenden Annahme aus, dass der Interaktionsvorgang im zeitlichen und räumlichen Mittel als stationär angesehen werden kann, wodurch sich die temporären Geschwindigkeits- und Wasserspiegelfluktuationen ausgleichen. Zudem wurde eine Aufteilung des Querschnittes aufgrund der tiefengemittelten, horizontalen Geschwindigkeitsverteilung vorgeschlagen. Dadurch kann man vier unterschiedliche Teilbereiche in einem gegliederten Gerinne klassifizieren (vgl. **Tab. 3.2**).

Tab. 3.2: Definition von Teilbereichen in einem gegliederten Gerinne. (nach DFG, 1987)

Bereich Nr.	Eigenschaft / Merkmal
1	Vorland und/oder Böschungsbereich, von der Interaktion unbeeinflusst
2	Vorland und/oder Böschungsbereich, von der Interaktion beeinflusst
3	Hauptgerinne, von der Interaktion beeinflusst
4	Hauptgerinne, von der Interaktion unbeeinflusst

Aus den Untersuchungen gingen u.a. turbulenz-theoretisch abgeleitete Berechnungsverfahren für die Quantifizierung der Scheinschubspannung (τ_T) hervor. Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Verfahren wird in DFG (1987), Nuding (1981) und Schumacher (1995) gegeben.

Allen Berechnungsansätzen ist gemeinsam, dass zunächst eine Gliederung des Gesamtgerinnes in Sektionen erfolgen muss, indem fiktive Trennflächen zwischen den bewachsenen und den vegetationsfreien Querschnittsbereichen angesetzt werden. Die an dieser fiktiven Trennfläche anliegende Scheinschubspannung wird mit Hilfe eines dimensionslosen Widerstandsbeiwertes als Koeffizient im Fließgesetz nach Darcy-Weisbach ausgedrückt.

Nachfolgend werden die wesentlichen Merkmale der Verfahren und die bis zur Gegenwart darauf aufbauenden Modifikationen erläutert.

Kaiser (1984) führte Laborversuche in einer zwei Meter breiten Rechteckrinne mit glatter und rauer Sohle durch. Die Vegetation wurde durch umströmte starre Zylinder simuliert, wobei zwei verschiedene Besatzdichten untersucht wurden (vgl. **Abb. 3.15**)

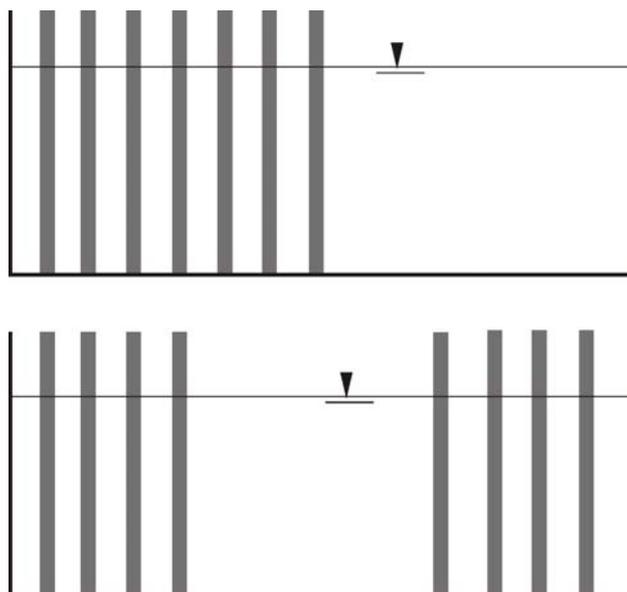


Abb. 3.15: Aufbau der Versuche von Kaiser (1984).

Der Ansatz von Kaiser sieht eine Abgrenzung des vegetationsfreien Gerinneteils durch fiktive Trennflächen vor, welche im Gegensatz zu realen, festen Wänden für Sekundärströmungen durchlässig angenommen werden. Der dimensionslose Widerstandsbeiwert dieser Trennflächen setzt sich aus dem Widerstandsbeiwert des durchströmten Vegetationsbereiches (λ_D , vgl. Kap. 3.1.2.2) und dem interaktionsbedingten Widerstandsbeiwert (λ_I) zusammen:

$$\lambda_T = \lambda_D + \lambda_I \quad \text{Gl. 3.28}$$

λ_T Widerstandsbeiwert der fiktiven Trennfläche (-)
 λ_D Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation (-)
 λ_I Widerstandsbeiwert infolge Interaktion (-)

Für den Interaktionswiderstandsbeiwert (λ_I) leitet Kaiser aus seinen Versuchsergebnissen eine empirische Regressionsbeziehung ab:

$$\lambda_I = 0,18 \cdot \log \left[0,0135 \cdot \frac{V_{o, \text{frei}}^2 \cdot (1 \text{ m})}{V_{o, \text{veg}}^2 \cdot l_{U,T}} \right] \quad \text{Gl. 3.29}$$

λ_I interaktionsbedingter Widerstandsbeiwert (-)
 $V_{o, \text{frei}}$. rechnerische mittlere Fließgeschwindigkeit im vegetationsfreien Gerinneteil ohne Interaktion (m/s)
 $V_{o, \text{veg}}$. rechnerische mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich ohne Interaktion (m/s)
 $l_{U,T}$ Länge der fiktiven Trennlinie (m)

Zusätzlich gibt Kaiser folgende Formel für die maximale wirksame Vegetationsbreite ($b_{1, \text{veg}, \text{max}}$) an, ab der die Interaktion voll ausgeprägt ist:

$$b_{1, \text{veg}, \text{max}} = 17,5 \cdot \frac{V_{o, \text{veg}}^2 \cdot \lambda_I}{g \cdot I_{S0}} \quad \text{Gl. 3.30}$$

$b_{1, \text{veg}, \text{max}}$ maximale wirksame Vegetationsbreite im Interaktionsbereich (m)
 $V_{o, \text{veg}}$. rechnerische mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich ohne Interaktion (m/s)
 λ_I interaktionsbedingter Widerstandsbeiwert (-)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 I_{S0} Sohlgefälle (-)

Für schmale Vegetationsbreiten ($b_{\text{veg}} < b_{1, \text{veg}, \text{max}}$) gibt Kaiser einen Abminderungsfaktor (α_I) an, der aufgrund der unvollkommen ausgebildeten Interaktion dann mit λ_I zu multiplizieren ist. Zur Bestimmung von α_I werden Gleichungen genannt, die auf den Ergebnissen der Laborversuche beruhen.

Beim Ansatz nach Kaiser ist zu kritisieren, dass die Gleichung zur Berechnung von λ_I nicht dimensionsrein ist und folglich der Faktor (1 m) induziert werden musste. Ferner muss hinsichtlich der Einschränkungen bei den Versuchsbedingungen beachtet werden, dass die Koeffizienten ausgehend von nur zwei unterschiedlichen Vegetationsanordnungen im Kastenquerschnitt kalibriert worden sind.

Pasche (1984) führte Versuche in einem Modell mit Doppeltrapezquerschnitt durch. Wie bei Kaiser (1984) wurde die Vegetation durch umströmte starre Zylinder, die auf das Vorland montiert waren, simuliert (vgl. **Abb. 3.16**). Aus seinen Versuchsergebnissen leitete Pasche einen Berechnungsansatz ab, welcher auf die Methode aufbaut, dass der durch die Interaktion verursachte Störeinfluss im vegetationsfreien Hauptgerinne durch eine strömungsdurchlässige fiktive Trennfläche bewirkt wird, die sich in Strömungsrichtung mit der mittleren Fließgeschwindigkeit fortbewegt.

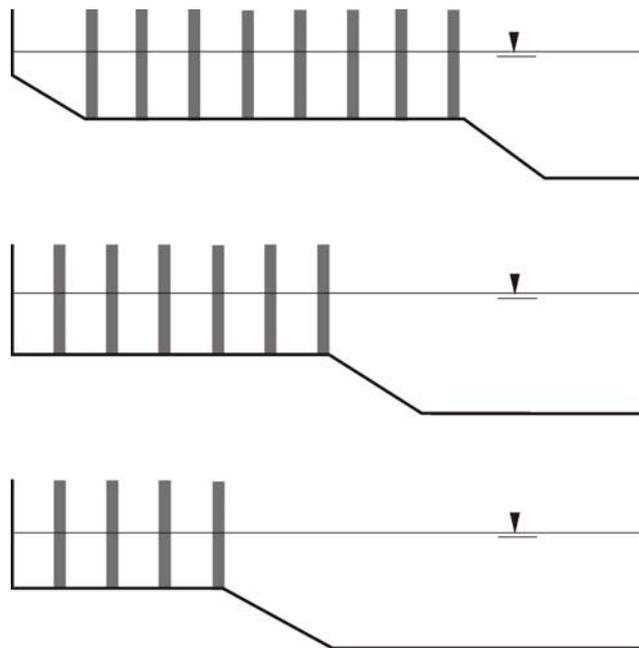


Abb. 3.16: Aufbau der Versuche von Pasche (1984).

Aus der Integration der im Versuch gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen konnte Pasche folgenden Ansatz für den Widerstandsbeiwert der fiktiven Trennfläche ableiten:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2,03 \cdot \log \left[0,072 \cdot \left(\frac{b_m}{\frac{b_{\text{frei}}}{2}} \right)^{1,07} \cdot \Omega \right] \quad \text{Gl. 3.31}$$

λ_TTrennflächenwiderstandsbeiwert (-)

b_man der Interaktion mitwirkende Breite im Vegetationsbereich (m)

b_{frei}an der Interaktion mitwirkende Breite im vegetationsfreien Gerinnebereiche (m)

Ω Bewuchsparameter (-)

Ähnlich wie bei dem Verfahren von Kaiser (1984) wird auch in diesem Ansatz eine Abhängigkeit des Trennflächenwiderstandsbeiwertes (λ_T) von dem durch die Interaktion beeinflussten Vegetationsbereich berücksichtigt, indem eine

sog. „mitwirkende Vegetationsbreite“ (b_m) aufgenommen wurde. Hierfür gibt Pasche eine strömungsphysikalisch exakte Gleichung an, die jedoch nur mit hohem Aufwand explizit gelöst werden kann. Mit Hilfe dimensionsanalytischer Überlegungen nennt Pasche jedoch eine einfachere halbempirische Beziehung, die als Alternative eine gute Näherung von b_m berechnet:

$$\frac{b_m}{h_{veg}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_D}} \cdot (0,068 \cdot e^{(0,56 \cdot c_T)} - 0,056) \quad \text{mit } c_T = -3,27 \cdot \log(\Omega) + 2,85 \quad \text{Gl. 3.32}$$

b_m an der Interaktion mitwirkende Breite im Vegetationsbereich (m)

h_{veg} ... Fließtiefe im Vegetationsbereich (m)

λ_D Widerstandsbeiwert der durchflossenen Vegetation (-)

c_T slip-velocity Beiwert (-)

Ω Bewuchsparameter (-)

Für die Ermittlung des Bewuchsparameters (Ω) gibt Pasche in Analogie zu einem Ansatz nach Shen und Li (1973) folgende Beziehung an:

$$\Omega = \left(0,071 \cdot \frac{a_{NL}}{a_x} \right)^{3,29} + \left(\frac{a_{NB}}{a_y} \right)^{0,95} \quad \text{Gl. 3.33}$$

Ω Bewuchsparameter (-)

a_{NL} ... Nachlaufänge hinter einem Vegetationselement (m) → Gl. 3.25

a_{NB} ... Nachlaufbreite hinter einem Vegetationselement (m) → Gl. 3.25

a_x Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung (m)

a_y Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung (m)

Die Vorteile des Pasche-Ansatzes sind durch die konsequente Herleitung des Trennflächenwiderstandsbeiwertes aus den zahlreichen gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen begründet. Hierdurch ergibt sich ein sehr großer Anwendungsbereich bei zugleich guter Darstellung der hydraulischen Gegebenheiten (vgl. Schumacher, 1995).

Die Nachteile des Verfahrens liegen in der praktischen Anwendung, da aufgrund der Verschachtelung des Ansatzes zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes durchströmter Vegetation (λ_D) und des Ansatzes zur Berechnung des interaktionsbedingten Trennflächenwiderstandsbeiwertes (λ_T) komplexe Gleichungssysteme z.T. iterativ gelöst werden müssen. Pasche schlägt hierfür eine numerische Variante auf Basis der Predictor-Correktor-Methode vor. Obwohl somit durch den Einsatz von PC-Systemen der Rechenlauf automatisiert bearbeitet wird, bleibt für den Praktiker das Problem der Abstraktion der realen Situation auf die Eingangsparameter. Hier fehlen derzeit noch praxisnahe Handlungsempfehlungen.

Bertram (1985) führte Versuche in Trapezquerschnitten mit rauer Gerinnesohle und mit Zylinderanordnungen als Vegetationssimulation entlang der Böschungen durch (vgl. **Abb. 3.17**).

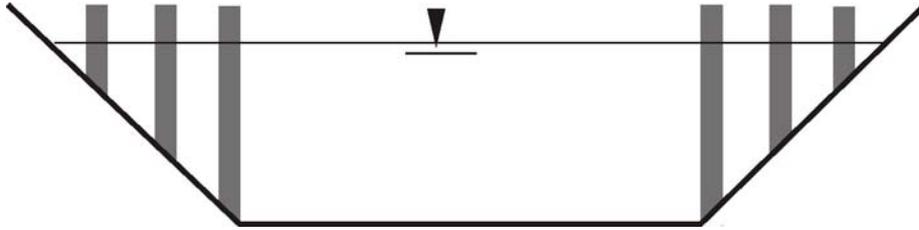


Abb. 3.17: Aufbau der Versuche von Bertram (1985).

Aufgrund seiner Versuchsergebnisse und ausgehend von einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung leitete Bertram einen Ansatz zur Berechnung des Trennflächenwiderstandsbeiwertes ab, der formal dem Gesetz für den Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit nach Keulegan (1938) entspricht:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = 2,035 \cdot \log \left[\frac{4 \cdot 3,046 \cdot r_{hy,T, frei}}{k_T} \right] \quad \text{Gl. 3.34}$$

λ_TWiderstandsbeiwert der fiktiven Trennfläche (-)

$r_{hy,T, frei}$ Hydraulischer Radius der vegetationsfreien Sektion (zzgl. der Trennflächenhöhe) (m)

k_Täquivalente Rauheitshöhe der fiktiven Trennfläche (m)

Die äquivalente Rauheitshöhe der fiktiven Trennfläche (k_T) setzt sich, ähnlich wie der Trennflächenwiderstandsbeiwert nach Kaiser (1984), aus der äquivalenten Rauheitshöhe der durchflossenen Vegetation ($k_{T, veg}$) und der interaktionsbedingten äquivalenten Rauheitshöhe ($k_{T, I}$) zusammen.

Aus seinen Messergebnissen leitete Bertram eine Abhängigkeit zwischen $k_{T, veg}$ und dem mittleren Durchmesser der Vegetationselemente (d_{veg}) ab:

$$k_{T, veg} = (1,2 \dots 1,5) \cdot d_{veg} \quad \text{Gl. 3.35}$$

$k_{T, veg}$..äquivalente Rauheitshöhe der durchströmten Vegetation (m)

d_{veg} ...mittlerer Durchmesser der Vegetationselemente (m)

Zur Quantifizierung der interaktionsbedingten äquivalenten Rauheitshöhe ($k_{T, I}$) gibt Bertram folgende Formel an:

$$k_{T, I} = 3 \sqrt{\frac{v_{veg, 2}}{v_{veg, 1}}} \cdot 0,77 \cdot \frac{A_2}{h_T} \quad \text{Gl. 3.36}$$

$k_{T, I}$interaktionsbedingte äquivalente Rauheitshöhe (m)

$v_{veg, 1}$..tatsächliche mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich (m/s)

$v_{veg, 2}$..rechnerische mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich bei $k_{T, veg} = 0,77 \cdot A_2/h_T$ (m/s)

A_2 an der Interaktion beteiligte Querschnittsfläche (m²)

h_THöhe der fiktiven Trennfläche (m)

Beim Ansatz nach Bertram ist zunächst die Berechnung der äquivalenten Rauheitshöhe im Vegetationsbereich ($k_{T,veg}$) kritisch zu hinterfragen:

„[...] hier muss einschränkend hinzugefügt werden, dass dieser Ansatz noch als vorläufig zu bezeichnen ist, da die Rauheitshöhe $k_{T,veg}$ aus hydrodynamischer Sicht auch eine Funktion des Abstandes der Bewuchselemente darstellen müsste, dieser funktionale Zusammenhang bei der gewählten Bewuchsvariation (in den Modellversuchen) jedoch nur begrenzt nachweisbar war.“ (DFG, 1987, S. 22).

Außerdem ist die lineare Überlagerung der beiden geometrischen äquivalenten Rauheiten ($k_{T,veg} + k_{T,l}$) zu kritisieren, da dies physikalisch nicht begründet werden kann.

Mertens (1989) führte auf Basis der Untersuchungen von Bertram (1985) weitergehende Laborversuche durch. Er modifizierte den Ansatz von Bertram, indem er eine neue Formel zur Berechnung der interaktionsbedingten äquivalenten Rauheitshöhe ($k_{T,l}$) lieferte:

$$k_{T,l} = \left(1,2 - 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot B + 0,06 \cdot (B \cdot 10^{-3})^{1,5}\right) \cdot b_{2,veg} \quad \text{Gl. 3.37}$$

$k_{T,l}$ interaktionsbedingte äquivalente Rauheitshöhe (m)

B..... Bewuchsparameter (-)

$b_{2,veg}$. Breite des von der Interaktion beeinflussten Vegetationsbereiches (m)

Durch Einführung eines Bewuchsparameters (B) möchte Mertens die kritisierte Schwachstelle im Bertram-Verfahren abstellen, indem eine funktionale Abhängigkeit von $k_{T,l}$ zur Vegetationsanordnung hergestellt wird. Für den Bewuchsparameter gibt Mertens in Analogie zu Pasche (1984) eine empirische Beziehung an, die aus Laborversuchen mit starren umströmten Kreiszylinder-elementen abgeleitet wurde:

$$B = \left(\frac{a_x}{d_{veg}} - 1\right)^2 \cdot \left(\frac{a_y}{d_{veg}}\right) \quad \text{Gl. 3.38}$$

B..... Bewuchsparameter (-)

a_x Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung (m)

a_y Abstand der Vegetationselemente senkrecht zur Fließrichtung (m)

d_{veg} ... Durchmesser der Vegetationselemente (m)

Die Breite des von der Interaktion beeinflussten Vorlandbereiches ($b_{2,veg}$) ist wiederum vom Bewuchsparameter (B) abhängig. Mertens gibt hier die Empfehlung, dass für Bewuchsparameter $B \geq 16$ die Annahme $b_{2,veg} = b_3$ (b_3 = Breite des von der Interaktion beeinflussten vegetationsfreien Bereiches und somit in der Praxis bei naturnahen Fließgewässern i.d.R. die Breite des Hauptgerinne) getroffen werden kann. Für kleinere Bewuchsparameter $B < 16$ empfiehlt Mertens folgende Näherung:

$$b_{2,veg} = 0,25 \cdot \sqrt{B} \cdot b_3 \quad \text{Gl. 3.39}$$

$b_{2,veg}$..Breite des von der Interaktion beeinflussten Vegetationsbereiches (m)

B.....Bewuchsparameter (-)

b_3Breite des von der Interaktion beeinflussten vegetationsfreien Bereiches (m)

Beim Verfahren von Mertens gilt aufgrund der immer noch notwendigen linearen Überlagerung von $k_{T,veg}$ und $k_{T,l}$ die gleiche Kritik, wie sie bereits diesbezüglich beim Bertram-Verfahren geäußert wurde.

Nuding (1991) führte ebenso wie Kaiser (1984) Laborversuche in einem Gerinne mit Rechteckquerschnitt durch. Im Gegensatz zu seinen Vorgängern simulierte Nuding die Vegetation nicht durch starre kreiszylindrische Elemente, sondern er verwendete geformten Maschendraht und natürliche starre Zweige.

Der von Nuding entwickelte Ansatz beruht auf der Annahme einer hyperbolischen Scheinschubspannungsverteilung in einem interaktionsbeeinflussten vegetationsfreien Fließquerschnitten. Der Ansatz unterscheidet sich somit von den Ansätzen nach Pasche (1984) und Mertens (1989), welche von einer linearen Scheinschubspannungsverteilung in diesem Bereich ausgehen.

$$\lambda_T = 4 \cdot \left[\log \left(c_\alpha \cdot \frac{v_{o,frei}}{v_{veg}} \right) \right]^2 \cdot \frac{r_{hy,veg}}{h_T} \cdot \frac{b_3}{b_T} \quad \text{Gl. 3.40}$$

λ_TTrennflächenwiderstandsbeiwert (-)

c_αKorrekturfaktor (-)

$v_{o,frei}$..rechnerische interaktionsfreie Fließgeschwindigkeit im vegetationsfreien Abschnitt (m/s)

v_{veg}Fließgeschwindigkeit im Vegetationsabschnitt (m/s)

$r_{hy,veg}$..hydraulischer Radius des Vegetationsabschnittes (m)

h_THöhe der fiktiven Trennfläche (m)

b_3interaktionsbeeinflusste Breite des vegetationsfreien Abschnittes (m)

b_Tfiktiver Nullpunktversatz des horizontalen Geschwindigkeitsprofils (m)

Für die Bestimmung des fiktiven Nullpunktversatzes (b_T) muss ein Gleichungssystem mit mehreren Bestimmungsgleichungen gelöst werden, die von empirisch ermittelten Konstanten, geometrischen Bewuchsparametern und der Gerinnegeometrie abhängen. Der Korrekturfaktor (c_α) wurde aus den Versuchsergebnissen abgeleitet. Da die Abhängigkeit des c_α -Wertes noch nicht vollständig geklärt ist und hier weiterer Forschungsbedarf besteht, empfiehlt Nuding vorerst $c_\alpha = 1,0$ anzusetzen.

Ein weiteres Problem besteht in der Parameterisierung der in den Versuchen verwendeten Naturzweige. Nuding versucht eine Beschreibung durch die Bewuchsparameter (a_x , a_y und d_{veg}), welche für die Beschreibung der Elementanordnung bei Versuchen mit Kreiszyklindern diente. Die Bestimmung dieser Parameter bei Naturzweigen führte selbst unter Laborbedingungen zu Problemen, so dass Nuding hier bereits mit Vereinfachungen und Schätzungen arbeiten musste.

In Wallingford (England) wurde Ende der 1980er Jahre das SERC-Forschungsprogramm „Flood Channel Facility“ durchgeführt. Hierbei wurden in einer 56 m langen und 10 m breiten Laborrinne mit symmetrischen Doppeltrepezquerschnitt und glatter Gerinnesohle großmaßstäbliche Versuchsreihen durchgeführt (vgl. Knight, 1992). In einigen Versuchsreihen wurden starre kreiszylindrische Elemente auf die Vorländer installiert, um durchströmte Vegetation zu simulieren.

Schumacher (1995) nutzte diese Daten und verglich in seiner Arbeit die Messergebnisse des SERC-Programmes mit Ergebnissen, welche er mit den Ansätzen von Pasche (1984), Mertens (1989) und Nuding (1991) berechnet hatte:

Es ergaben sich z.T. erhebliche Abweichungen. Schumacher konnte durch die Analyse der Messergebnisse zeigen, dass die Scheinschubspannungen im Trennflächenbereich keinen linearen Verlauf aufweisen. Hiermit begründete er die Abweichungen der Berechnungsergebnisse des Pasche- und des Mertens-Verfahrens, da diese Verfahren von einem linearen Scheinschubspannungsverlauf ausgehen.

Nach Schumacher wird die Scheinschubspannungsverteilung im Interaktionsbereich durch einen annähernd bilinearen Verlauf mit Knick über dem Böschungsfußpunkt dargestellt, ab wo sich über dem interaktionsbeeinflussten Hauptegrinneabschnitt eine hyperbolische Verteilung, wie im Nuding-Verfahren angenommen, anschließt.

Weiterhin begründet Schumacher die Abweichungen der Berechnungsergebnisse durch die unzureichende Abgrenzung des Interaktionsbereiches von den unbeeinflussten Teilquerschnitten. Er zeigt zudem auch auf, dass die relative Fließtiefe (h_{Vor}/h_H) einen Einfluss auf den Trennflächenwiderstand hat, der jedoch bislang in allen Ansätzen nicht berücksichtigt wird.

Schumacher kommt zu dem Schluss, dass der Scheinschubspannungsverlauf in gegliederten Gerinnen nicht mit einem pauschal für alle Gerinnegeometrien und Fließtiefenverhältnissen gültigen Ansatz beschrieben werden kann. Trotz aufgezeigter Abweichungen empfiehlt er den Berechnungsansatz nach Pasche, da er hier durch Auswertung aller Versuche die beste allgemeine Anwendbarkeit festgestellt hat. Aus den Ergebnissen leitet er für das Pasche-Verfahren eine Modifikation zur Berechnung der mitwirkenden Interaktionsbreite des vegetationsfreien Bereiches ab.

Schnauder (2004) baut auf die Empfehlung von Schumacher auf und setzt die Laboruntersuchungen von Pasche derart fort, dass er anstelle von starren kreiszylindrischen Körpern flexible Zylinder bzw. Zylinder mit aufgeklebten Folienstreifen verwendet. Zudem untersucht er vorwiegend Abflüsse, bei denen sich große Fließtiefen sowohl im Hauptgerinne als auch über den Vorländern

einstellen. Schnauder modifiziert einerseits den Pasche-Ansatz zur Berechnung des Bewuchsparameters (Ω) speziell für biegsamen bzw. flexiblen Bewuchs und weist andererseits auch die Anwendbarkeit des Pasche-Verfahrens für große Fließtiefen über den Vorländern nach.

3.1.3 Probleme bei der praktischen Umsetzung

Im Kap. 3.1.1 wurden die Grundlagen der eindimensionalen Berechnung des Strömungsverhaltens dargestellt. Hier wurde gezeigt, dass der Kern jeder eindimensionalen Strömungsberechnung aus einer Fließformel besteht, die entweder empirisch, halbempirisch oder physikalisch exakt eine Quantifizierung hydraulischer Strömungsparameter ermöglicht. Durch eine dimensionsanalytische Betrachtung der funktionalen Abhängigkeiten der beteiligten Parameter wurden zunächst die Anwendungsgrenzen der Fließformeln definiert. Bereits hierbei zeigte sich, dass die Anwendung der Fließformeln nur bei starker Abstraktion des realen Strömungsgeschehens möglich wird.

Das zuvor behandelte Kap. 3.1.2 besteht im Wesentlichen aus dem Exzerpt zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten, die allesamt zum Ziel haben, die Strömungswiderstände in offenen Gerinnen zu quantifizieren. Die Zusammenfassung der bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten ist dabei so aufgebaut, dass dem Leser sofort die Abstraktion der realen Situation vor Augen geführt wird (z.B. Vegetation wird häufig durch regelmäßige Anordnungen kreiszylindrischer Elemente im Strömungsgebiet simuliert). Ferner erläutert dieses Kapitel die Anwendungsgrenzen der einzelnen Verfahren, welche i.d.R. aufgrund der Versuchsanordnungen gegeben sind.

Ziel des Kap. 3.1.3 soll es nun sein, aus der Synthese der Fakten der vorhergehenden Kapitel die Probleme der vorgestellten Ansätze beim Transfer auf reale Situationen bzw. ingenieurpraktische Fragestellungen zu erläutern. Dabei wird im Rahmen der Arbeit speziell auf naturnahe Gewässer fokussiert. Grundsätzlich sollen drei Klassen von Anwendungsproblemen typisiert werden:

- Abstraktion und Parametrisierung der realen Situation;
- Quantifizierung der Strömungswiderstände;
- Anwendung der Fließformeln.

3.1.3.1 Abstraktion und Parametrisierung der realen Situation

Die Abstraktion einer realen Situation zur Durchführung einer eindimensionalen Strömungsberechnung beinhaltet i.d.R. zwei Schritte. Im Folgenden werden die Schritte kurz skizziert und die wesentlichen Probleme bei der praktischen Umsetzung genannt.

- Erfassung und Aufbereitung gerinnegeometrischer Daten

Im Rahmen einer eindimensionalen Berechnung wird der Gerinneverlauf durch eine Abfolge abschnittscharakteristischer Querprofile abgebildet. Besonders bei naturnahen Fließgewässern, die sich durch eine komplexe Strukturdiversivität auszeichnen, bereitet die Festlegung charakteristischer Querprofile Schwierigkeiten.

In **Abb. 3.19 (Mitte)** ist eine solche Abstraktion auf Basis von Querprofilen beispielhaft skizziert.

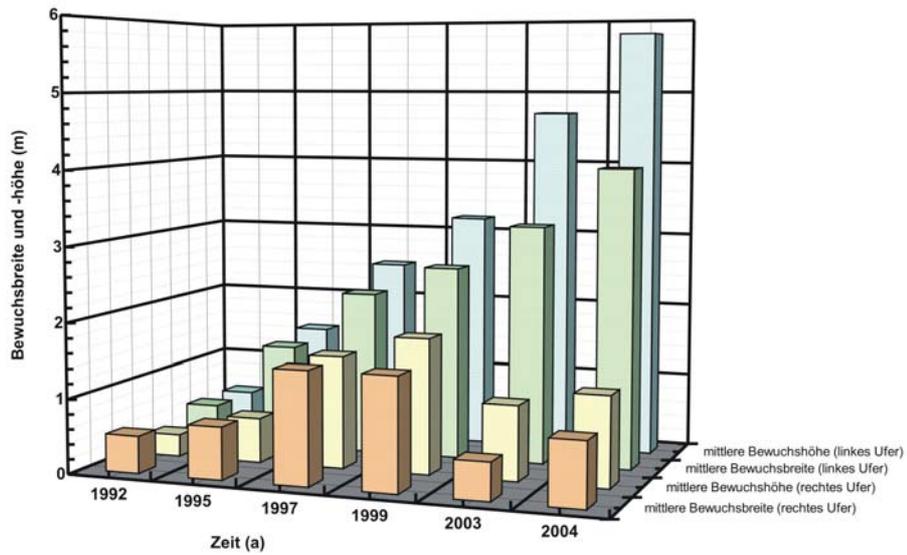
- Erfassung und Aufbereitung von Daten zur Quantifizierung der Widerstände

Die Beschreibung der Oberflächenrauheiten erfolgt i.d.R. über die äquivalente Sandrauheit k_s . Hier treten in der Praxis oftmals Probleme bei der Bestimmung des k_s -Wertes auf, da die Oberflächenrauheit meist durch sehr heterogene Strukturen bestimmt wird. Beispielsweise reicht eine Siebanalyse des Materials einer Gewässersohle nicht aus, um daraus einen aussagekräftigen k_s -Wert für die Gewässerbettrauheit abzuleiten. In diesem Fall müssen weitere Faktoren wie z.B. das Vorhandensein einer Deckschicht oder von Transportkörpern bei der Bildung des k_s -Wertes beachtet werden.

Die Beschreibung der durchströmten Vegetation sollte anhand der Vorgaben aus den wissenschaftlichen Untersuchungen auf Basis der geometrischen Parameter der Bewuchsanordnung (a_x , a_y , d_{veg}) erfolgen. Hier zeigt sich jedoch bei der Umsetzung in der Praxis, dass i.d.R. nur mit Mittelwerten gearbeitet werden kann, die zudem infolge der heterogenen Verästelungen meist auf Schätzungen beruhen (vgl. **Abb. 3.19 unten**).

Besonders bei der Abschätzung der Bewuchsentwicklung ist der Praktiker auf eigene Erfahrungen und Schätzungen angewiesen. In **Abb. 3.18** ist exemplarisch auf Grundlage durchgeführter Bewuchskartierungen die Entwicklung von Bewuchsbreite und -höhe eines Ufersaumes aus Sträuchern (rechtes Ufer) und Bäumen mit Sträuchern (linkes Ufer) dargestellt. Deutlich ist hierbei der Trend der Bewuchsentwicklung zu erkennen.

Derzeit fehlen zur Parametrisierung der Vegetation noch geeignete Methoden und Ansätze, die sowohl eine praxistaugliche Erfassung spezifischer Vegetationsparameter erlauben als auch die Implementierung dieser Parameter auf die wissenschaftlichen Verfahren ermöglichen.



	1992	1995	1997	1999	2003	2004
mittlere Bewuchsbreite (rechtes Ufer)	0,5	0,7	1,5	1,5	0,5	0,85
mittlere Bewuchshöhe (rechtes Ufer)	0,3	0,6	1,5	1,8	1	1,2
mittlere Bewuchsbreite (linkes Ufer)	0,5	1,4	2,2	2,6	3,2	4
mittlere Bewuchshöhe (linkes Ufer)	0,5	1,5	2,5	3,2	4,7	5,8

Abb. 3.18: Entwicklung der ufernahen Vegetation (jeweils Breite und Höhe) an der renaturierten Enz bei Pforzheim. Das linke Ufer ist mit Bäumen und Weiden bestanden, das rechte Ufer vorwiegend mit Strüchern bewachsen. Die Darstellung bezieht sich auf die Ufervegetation, die in Abb. 3.19 dargestellt ist.

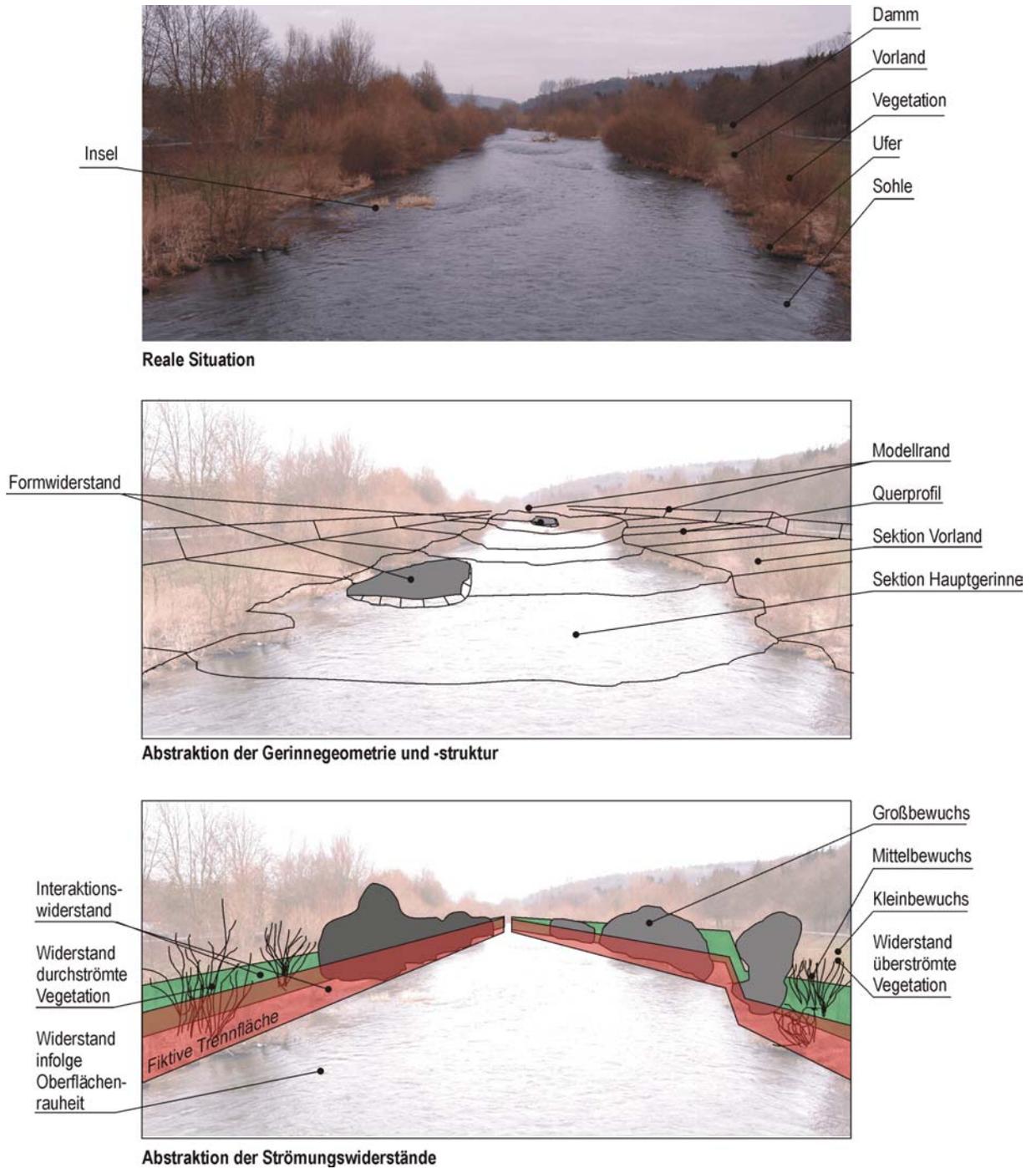


Abb. 3.19: Schematische Darstellung der Abstraktion eines naturnahen Gewässerabschnittes als Grundlage für eine eindimensionale Strömungsberechnung am Beispiel eines Gewässerabschnittes der Enz in Pforzheim.

3.1.3.2 Quantifizierung der Strömungswiderstände

Infolge der Gerinnegliederung kommt es zu Interaktionsprozessen, die durch das Modellieren fiktiver Trennflächen im Strömungsmodell berücksichtigt werden. Die Lage der Trennflächen sowie die Ableitung des Trennflächenwiderstandes führt in der Praxis oftmals zu Problemen. Standardmäßig werden die Trennflächen aus Gründen der geometrischen Gliederung oftmals direkt an der Böschung zwischen dem Hauptgerinne und den Vorländern platziert (vgl. **Abb. 3.19 unten**).

Uneinigkeiten bestehen sowohl in den Lehrbüchern als auch in der derzeit geführten wissenschaftlichen Diskussion bei der Platzierung von Trennflächen, die vegetationsbestandene Bereiche von den vegetationsfreien Bereichen abtrennen sollen, um dortige Interaktionsprozesse zu berücksichtigen.

Die Quantifizierung der Vegetationswiderstände bereitet in der Praxis dahingehend Schwierigkeiten, dass die Anwendung der komplexen Formelwerke zu Unsicherheiten und Fehleinschätzungen führt. Hier fehlt es derzeit an methodischen Vorgaben, wie die Berechnung der Vegetationswiderstände zu erfolgen hat. Die Lehrbücher nennen hierzu entweder ein zu großes Verfahrensangebot, ohne konkrete Handlungsvorgaben mitzuteilen (vgl. BWK, 2000) oder es findet eine Pauschalisierung des komplexen Problemfeldes statt, für das letztendlich nur ein einziger Ansatz erläutert wird (vgl. Patt, Jüring und Krauss, 2004).

Die Verwendung kumulativer empirischer Widerstandsbeiwerte (z.B. Strickler-Beiwert k_{st}) ist bei naturnahen Fließgewässerstrukturen nur bedingt zu empfehlen. Aufgrund der einfachen Handhabung solcher Beiwerte wird die Verwendung jedoch nach wie vor von vielen Praktikern den dimensionslosen Beiwerten vorgezogen.

Bei sehr breiten und/oder ausgebauten Fließgewässern ist eine Strömungsberechnung auf Basis empirischer Widerstandsbeiwerte möglich, sofern durch bereits vorhandene Fließgeschwindigkeitsmessungen und/oder Wasserstands-Abfluss-Beziehungen die Möglichkeit der Kalibrierung besteht.

Besonders bei kleinen naturnahen Fließgewässern, wo sich aufgrund der schmalen strukturreichen Gerinnegeometrie der Vegetationswiderstand an den Ufern signifikant auf das Strömungsverhalten auswirkt, führt die Abschätzung empirischer Beiwerte oftmals zu falschen Strömungsberechnungen:

Die in **Abb. 3.20** dokumentierte Änderung des k_{st} -Wertes über die Fließtiefe zeigt sehr deutlich, dass zum Einen eine Schätzung nahezu unmöglich ist und zum Anderen selbst bei vorhanden Wasserstands-Abfluss-Beziehungen eine Kalibrierung und Extrapolation des k_{st} -Wertes nur ungenau durchgeführt werden kann.

Abb. 3.21 dokumentiert den praktischen Regelfall: Durch die Kalibrierung der vorhandenen extremen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen soll die Bestimmung des k_{st} -Wertes im untersuchten Abflussspektrum ermöglicht werden. Hierbei wird jedoch nicht berücksichtigt, dass die zur Kalibrierung verwendeten Hochwasser zu unter-

schiedlichen Zeitpunkten stattfanden, und somit die Vegetationsentwicklung unterschiedlich fortgeschritten war. Zum Beispiel trat das maximal gemessene Hochwasser ($Q = 530 \text{ m}^3/\text{s}$) bereits ca. ein Jahr nach Fertigstellung der Renaturierung auf – also zu einem Zeitpunkt, als die Vegetation noch keinen Entwicklungsstand hatte, wie nach zwölfjähriger Beobachtungszeit. In **Abb. 3.22** und **Abb. 3.23** ist ergänzend dargestellt, wie sich die Wasserstands-Abfluss-Beziehungen und der Verlauf des k_{st} -Wertes im Laufe der Zeit infolge der Entwicklungen von Vegetation und Morphologie verändern können.

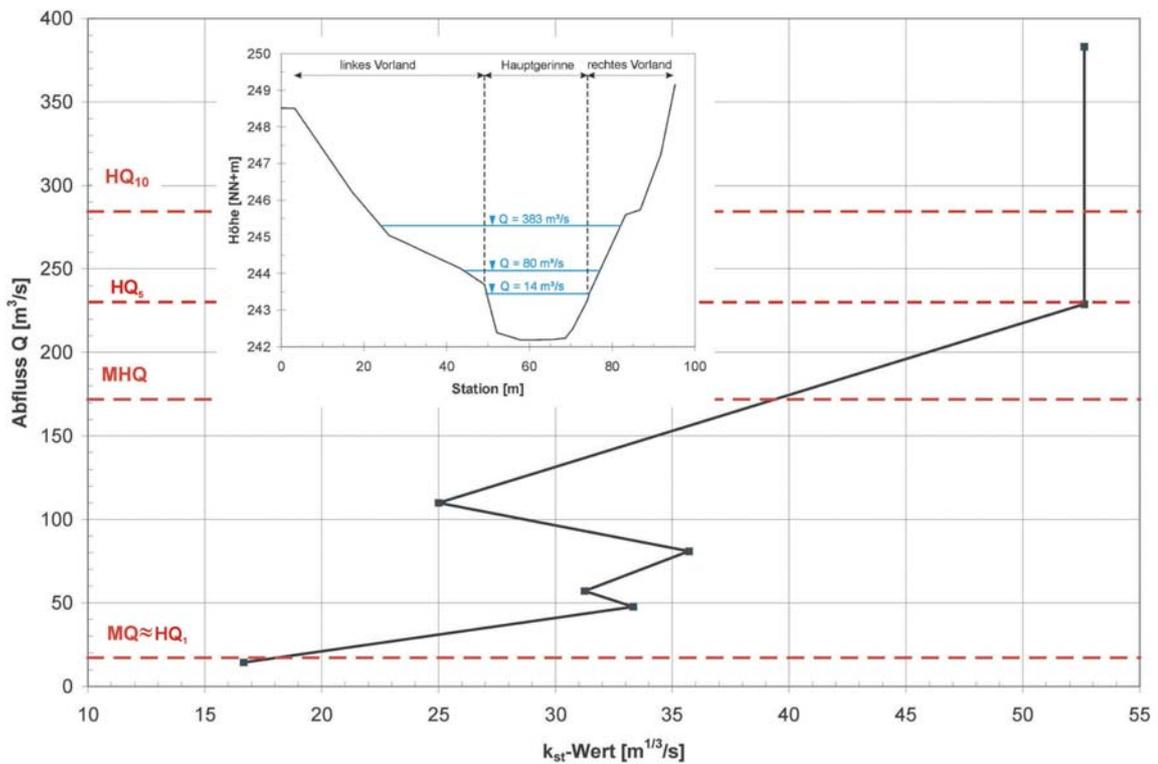


Abb. 3.20: Aus Naturmessdaten rückgerechneter Verlauf des Strickler-Beiwertes für das Hauptgerinne der renaturierten Enz bei Pforzheim bei km 57+330. Die Vorländer sind in diesem Abschnitt mit Baum- und Strauchgruppen kollektiv bestanden. Alle Abflussereignisse fanden innerhalb eines Jahres statt, so dass von einer Entwicklung des Vegetationsbestandes bzw. einer signifikanten Änderung der Vegetationsanordnungsparameter ausgeschlossen werden kann.

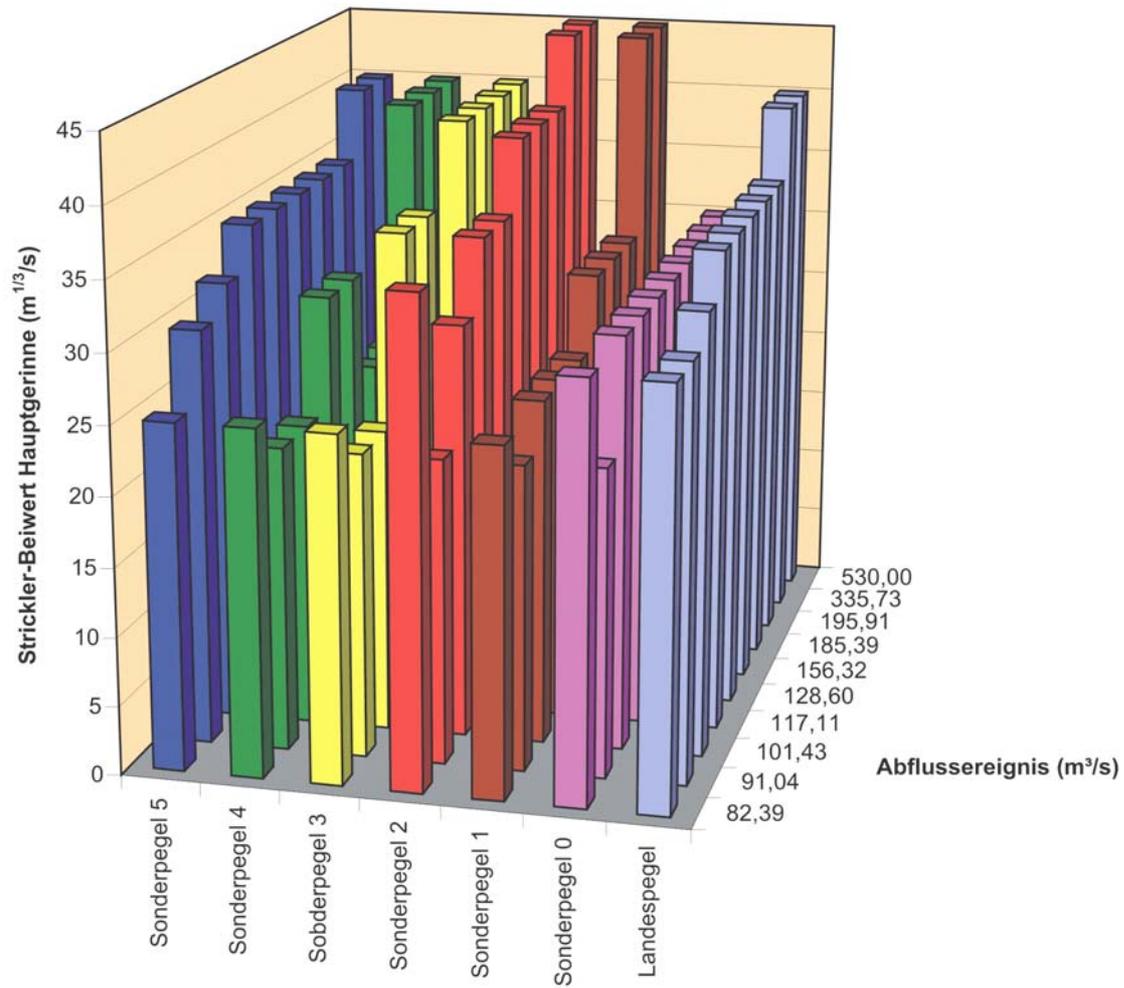
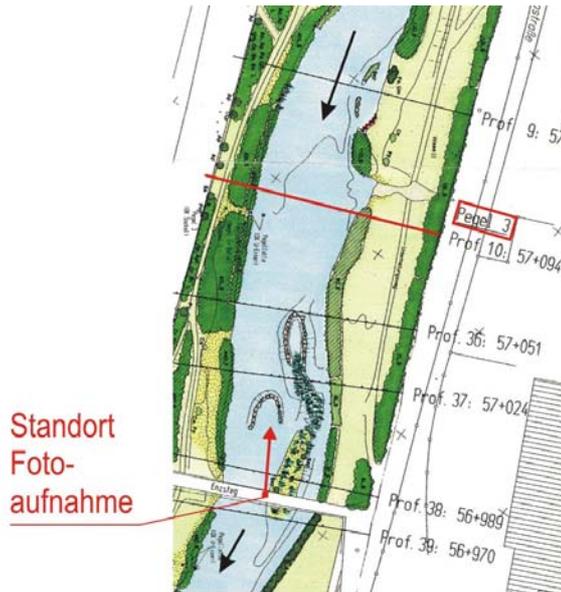


Abb. 3.21: Kalibrierung der k_{st} -Werte an unterschiedlichen Gewässerabschnitten (Sonderpegeln) der Enz bei Pforzheim für die zehn größten Abflussereignisse der letzten 12 Jahre. Diese Grafik beinhaltet die Auswirkungen der Vegetationsentwicklung und der morphologischen Änderungen auf den empirischen Strickler-Beiwert.



Lageplan mit Sonderpegel Nr. 3



a)ENZsteg nach Oberstrom 04/1992



b)ENZsteg nach Oberstrom 08/1995



c)ENZsteg nach Oberstrom 07/1999



d)ENZsteg nach Oberstrom 06/2002



e)ENZsteg nach Oberstrom 08/2004

Abb. 3.22: Vergleich von Fotoaufnahmen zur Dokumentation der Bewuchsentwicklung im Verlauf von zwölf Jahren. Dargestellt ist der Gewässerabschnitt, der in Abb. 3.22 ausgewertet wurde. Standort ist derENZsteg – die Blickrichtung ist nach Oberstrom. Unter den jeweiligen Bildern ist der Monat und das Jahr der Fotoaufnahme vermerkt. (Aufnahmen: Landesanstalt für Umweltschutz BW und Lehmann)

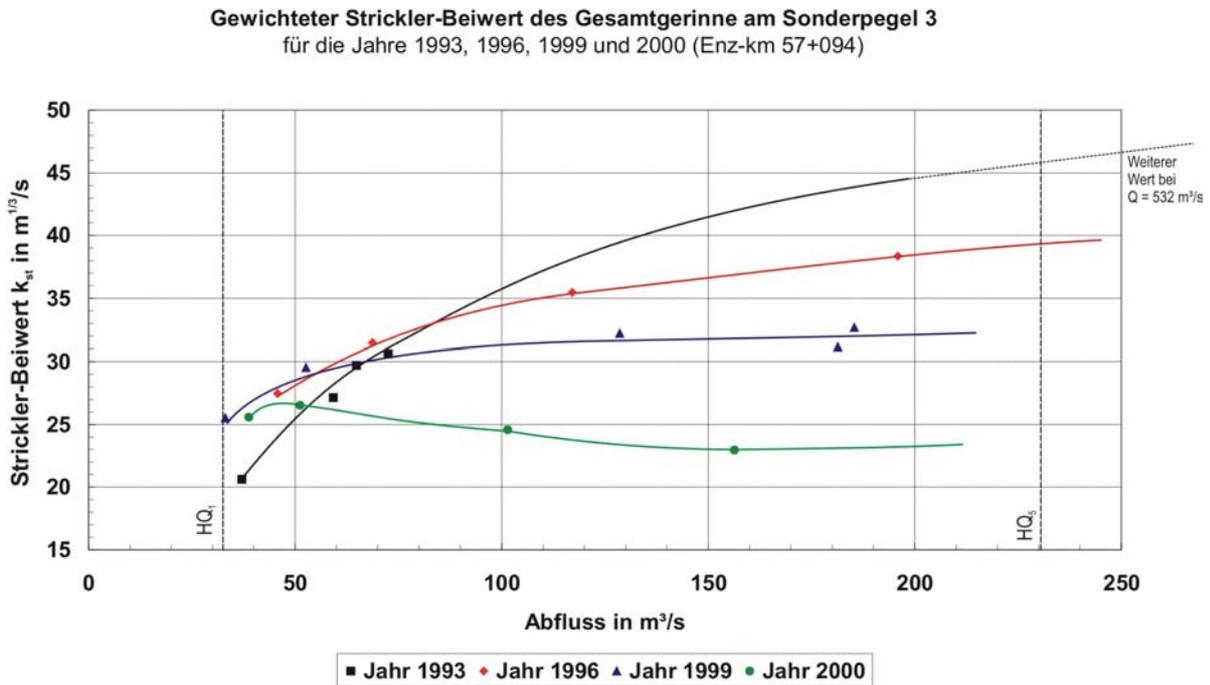
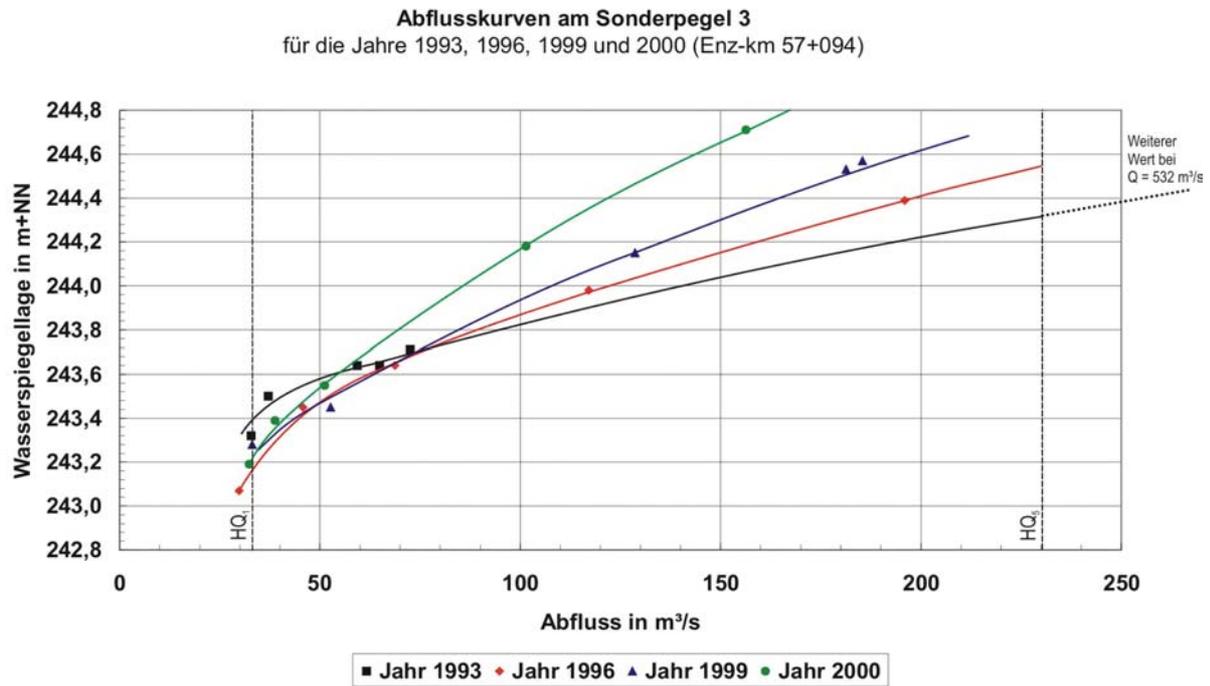


Abb. 3.23: Änderung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung (oben) und der nach dem Einstein/Horton-Verfahren (1933) gewichteten k_{st} -Werte (unten) infolge eigendynamischer Entwicklungen der Vegetation und der Morphologie. Die Grafiken wurden aus Naturmessdaten der Enz bei Pforzheim abgeleitet.

3.1.3.3 Anwendung der Fließformeln

Dittrich (1998) schlägt in seiner Arbeit die grobstrukturspezifische Anwendung der Fließformeln vor. Er erstellt dazu einen Katalog, der aus 18 unterschiedlichen morphologischen Grobstrukturen besteht, wobei deren Strömungswiderstand hauptsächlich durch je eine der folgenden Eigenschaften bewirkt wird:

- Querschnittsform oder
- homogene Oberflächenrauheit oder
- inhomogene Oberflächenrauheit oder
- Formwiderstand oder
- Linienführung.

Mit dem Zusammentragen vieler existierender Ansätze gelingt Dittrich eine Zuordnung der Berechnungsansätze zu den einzelnen Grobstrukturklassen. Dieses Konzept zeichnet sich durch seine Übersichtlichkeit und durch seine Anwenderfreundlichkeit aus.

Anzumerken ist bei dem Konzept, das sowohl empirische, halbempirische und physikalisch begründete Berechnungsansätze miteinander vermengt werden, ohne konsequent auf die Anwendungsgrenzen und Schwachstellen aufmerksam zu machen. Ferner ist zu beachten, dass das Widerstandsverhalten bei Dittrichs Grobstrukturen signifikant stets nur durch eine der o.g. Eigenschaften bewirkt wird. Somit geht Dittrich nicht direkt auf die Möglichkeit der Kombination mehrerer Widerstandseigenschaften in einem Querschnitt ein. Zudem fehlt eine EDV-technische Umsetzung der grobstrukturspezifischen Ansätze bislang, was dem Anwender derzeit umfangreiche Programmierarbeit oder mühseliges manuelles Berechnen abfordert.

In der Praxis findet gegenwärtig die Anwendung der Fließformeln überwiegend EDV-gestützt am PC statt. Hierbei spielt neben der Zuverlässigkeit des Programms auch die Programmbedienung durch den Anwender eine wesentliche Rolle:

Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg beauftragte Mitte der 1990er Jahre einige Ingenieurbüros, Universitäten und Softwareanbieter mit der Durchführung von eindimensionalen Wasserstands-Abfluss-Berechnungen für eine naturnahe Gewässerstrecke. Dabei wurden den Auftragnehmern Vermessungsdaten, Fotomaterial, Bewuchskartierungen und die siebanalytische Auswertung von Sohlenproben zur Verfügung gestellt. Die Auftragnehmer sollten den Gewässerabschnitt modellieren und für ein bestimmtes Abflussereignis die Wasserstände entlang des Fließweges berechnen. Ferner sollte dokumentiert werden, wie bei der Berechnung vorgegangen wurde.

Die Auswertung der abgelieferten Berechnungen und Dokumentationen ergab signifikante Abweichungen der einzelnen Berechnungsergebnisse, obwohl alle Auftrag-

nehmer mit den gleichen Fließformeln und somit nach den gleichen Verfahren arbeiteten¹⁰. Die Ursache hierfür lag in der eigentlichen Modellierung begründet.

Die Auftragnehmer wählten unterschiedliche Randbedingungen sowohl an den Modellrändern als auch im Modell selbst (z.B. Lage der fiktiven Trennflächen). Ferner lagen bei der Verwendung empirischer Fließformeln einige Abweichungen durch die unterschiedlichen Kalibrierung und Abschätzung der Widerstandsbeiwerte begründet.

Zu guter Letzt konnte die LfU durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den in der Natur tatsächlich gemessenen Wasserspiegellagen zeigen, dass kein Auftragnehmer den natürlichen Zustand exakt simulieren konnte. Dies war der Grund, eine landesweite vierbändige Leitfadenreihe zu erarbeiten, in der das Thema „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ ganzheitlich und methodisch abgehandelt werden sollte (vgl. LfU, 2002)¹¹:

- Band 1: Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren;
- Band 2: Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen;
- Band 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in BW;
- Band 4: Numerische Modelle zur Strömungssimulation.

Allgemein lässt sich aus dem oben Genannten ableiten, dass der Einsatz von derzeitigen Softwareprodukten die Möglichkeiten der Modellierung natürlicher Situationen eingrenzt (z.B. kann bei vielen Programmen mit nur einer Trennfläche zwischen Vorland und Hauptgerinne gearbeitet werden). Zusätzlich wird es durch die moderne Software dem Anwender leicht ermöglicht, Berechnungsergebnisse graphisch zu visualisieren und dadurch auf Basis von Geo-Informationssystemen eine Aussagegenauigkeit der Berechnungsergebnisse vorzutäuschen, die in keinem Fall der Realität entspricht.

¹⁰ Quelle: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Ref. 41, unveröffentlicht

¹¹ Bei der Erstellung dieser Leitfäden war der Autor der vorliegenden Arbeit mit beteiligt.

3.2 Feststofftransport und Gewässermorphologie

Aufbau und Gliederung:

- 3.2.1 Feststofftransport in Fließgewässern
- 3.2.2 Berücksichtigung einer heterogenen Feststoffzusammensetzung
- 3.2.3 Transportansätze (exemplarischer Überblick)
 - 3.2.3.1 Ansatz nach Meyer-Peter und Müller (1948)
 - 3.2.3.2 Ansatz nach Engelund und Hansen (1967)
 - 3.2.3.3 Ansatz nach Ackers und White (1973)
 - 3.2.3.4 Ansatz nach Van Rijn (1984)
 - 3.2.3.5 Ansatz nach Hunziker (1995)
 - 3.2.3.6 Ansatz nach Wu (2000)
- 3.2.4 Beschreibung der gewässermorphologischen Entwicklung

Im naturnahen Wasserbau initiiert man bewusst den Feststofftransport zur Einleitung eigendynamischer gewässermorphologischer Entwicklungen, um eine vielfältige Strömungsdiversivität zu erhalten, die als Basis für eine gute ökologische Qualität des Fließgewässers notwendig ist. Dazu stehen dem Ingenieur zahlreiche Verfahren und Formeln zur Prognose der Wasser-Feststoff-Interaktion zur Verfügung.

Die Untersuchung der physikalischen Zusammenhänge zwischen Strömung und Feststoffbewegung gehört trotz langjähriger intensiver Forschungen immer noch zu den am wenigsten theoretisch durchdrungenen Problemen in der Wasserwirtschaft. Der Stand der derzeitigen Forschung stellt noch kein wirklich befriedigendes universelles Verfahren zur Verfügung, um die durch den Feststofftransport sich ergebenden gewässermorphologischen Auswirkungen (z.B. Erosion und Auflandung des Gewässerbettes, Verlandung von Stauräumen) zu analysieren, zu modellieren und zu prognostizieren.

Bei der Modellierung der zwei-Phasen-Interaktion Wasser/Feststoffe in offenen Gerinnen steht man vor der Schwierigkeit, dass die physikalischen Zusammenhänge aufgrund zahlreicher beteiligter Parameter sehr komplex und deshalb nicht in allen Einzelheiten nachvollziehbar sind (vgl. **Abb. 3.24**).

Das Strömungsverhalten bedingt den Transport von Feststoffen im Fließgewässer. Hydromechanische Schnittstelle ist dabei die Schubspannung an den Gerinnewandungen, die letztendlich aus der kinematischen Energie des Wasserkörpers und der Viskosität des Wassers sowie dessen adhäsives Verhalten an Grenzflächen resultiert.

Besonders im naturnahen Wasserbau ist die Berechnung des Feststofftransportes allein auf Basis der Sohlenschubspannung nicht ausreichend: Die ungleichförmigen, Sieblinien erfordern i.d.R. eine fraktionelle Berechnung und bei den komplexen Strömungssituationen ist neben der Schubspannung noch die Turbulenzintensität durch zusätzliche Faktoren mit einzubeziehen (Kap. 3.2.2).

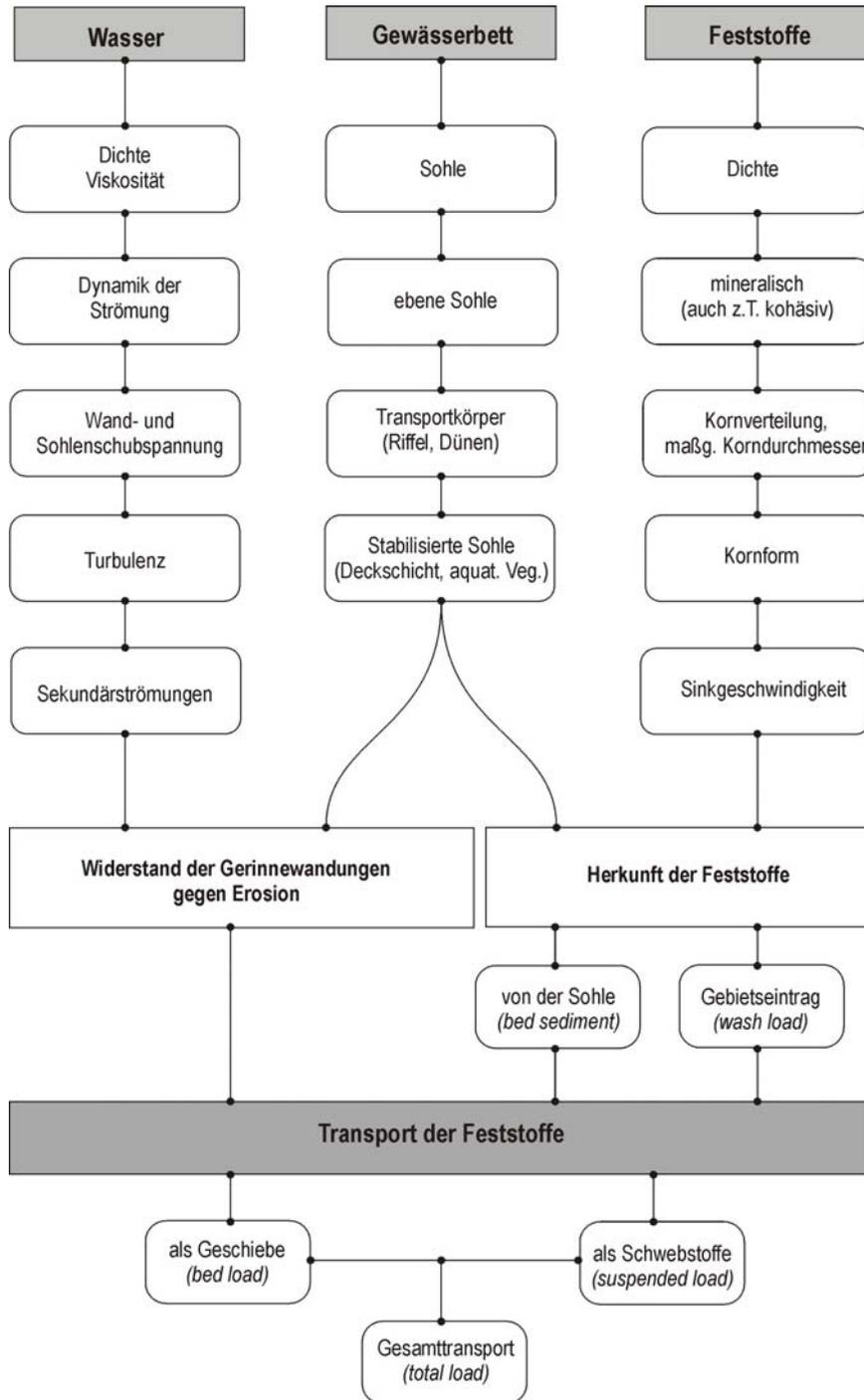


Abb. 3.24: Darstellung der Zusammenhänge beim Feststofftransport in Fließgewässern.

3.2.1 Feststofftransport in Fließgewässern

Einfache Ansätze zur Berechnung des Feststofftransportes führen zunächst auf Formeln, die empirisch bestimmt werden oder denen ein stark vereinfachtes physikalisches Modell zugrunde liegt. Mit solchen Formeln, in denen im Allgemeinen über den Ort und die Zeit gemittelte hydraulische und sedimentologische Größen eingehen, kann der Anwender eine einfache Approximation für das mittlere oder globale Transportverhalten durchführen.

„Für das gleiche physikalische Phänomen existieren meist mehrere theoretisch-empirische Ansätze, die sich in Anzahl und Art der Parameter unterscheiden. Die Verifikation dieser Modelle geschieht durch Anpassung mit Hilfe von Koeffizienten an bestimmte (meist wenige) und mit entsprechenden Fehlern behaftete Messdaten. Aufgrund dieser Vorgehensweise sind die Modelle nur innerhalb des durch die jeweiligen Messdaten abgedeckten Bereichs gültig.“ (Maurer, 2002, Seite 3).

Die Entwicklung einer allgemeingültigen und auf rein physikalischen Prinzipien aufbauende Berechnungsmethode zur Quantifizierung des Feststofftransportes oder zur Abschätzung der gewässermorphologischen Folgen ist bis heute noch nicht möglich. Du Boys (1879) lieferte seinerzeit den ersten theoretischen Ansatz, den er aus Naturmessungen an der Rhône und Nebenflüssen ableitete. Aufbauend hierauf wurde eine Vielzahl von weiteren Formeln entwickelt.

Fortwährend wurde der Versuch unternommen, eine neue Transportformel zu entwickeln, die noch besser mit existierenden Messungen übereinstimmt und auf einen weiten Bereich der in der Natur vorkommenden hydraulisch-sedimentologischen Prozesse angewendet werden kann. Die jeweiligen Autoren versuchten dabei u.a. eine genauere Definition und Beschreibung der beteiligten physikalischen Parameter. Trotzdem liegen auch heute noch die einzelnen Berechnungsergebnisse oft um Größenordnungen auseinander und sind zudem weit von den tatsächlich auftretenden Transportraten entfernt (vgl. Pernecker und Vollmers, 1965, Maurer, 2002 oder KHR, 2003).

Die Grundlagen des Feststofftransportes werden von vielen Autoren beschrieben (vgl. Vanoi, 1975, Yalin, 1977, Graf, 1971, Raudkivi, 1982, Zanke, 1982, Vetter, 1988). In den meisten Veröffentlichungen sind ausführliche Zusammenstellungen und Vergleiche der Berechnungsverfahren enthalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher nur ein Querschnitt bewährter Ansätze erläutert, wobei infolge der gewählten Thematik eine Beschränkung auf den Geschiebetransport gemacht wird.

Die große Zahl der existierenden Transportformeln berechnet die Masse der durch einen Kontrollquerschnitt transportierten Feststoffe pro Breitenmeter und Zeiteinheit. Dabei werden mehr oder wenig starke Vereinfachungen zugrunde gelegt. Prinzipiell lassen sich alle Ansätze auf eine funktionale Abhängigkeit eines Transportparameters X_F von einem Abflussparameter X_Q zurückführen:

$$X_F = f(X_Q, \dots) \quad \text{Gl. 3.41}$$

X_F Transportparameter (-)
 X_Q Abflussparameter (-)

Unbekannte oder für weniger wichtig erachtete Einflussgrößen werden zu empirischen Koeffizienten zusammengefasst und mit Hilfe von Messdaten an ein vorher entwickeltes Formelgerüst angepasst. Damit stehen zur Berechnung des Feststofftransportes sehr unterschiedliche Formeln mit einer stark variierenden Anzahl an Eingabeparametern zur Verfügung.

3.2.2 Berücksichtigung einer heterogenen Feststoffzusammensetzung

In naturnahen Fließgewässern bestehen die Feststoffe nicht aus Einkornmaterial, sondern aus Sedimentmischungen mit unterschiedlichen Kornfraktionen. In den gängigen Anwendungen wird daher ein Konzept praktiziert, welches den Feststofftransport als die Summe der einzelnen Transporte der verschiedenen Kornfraktionen behandelt. Der Transport pro Fraktion wird dabei mit den (empirischen) Ansätzen beschrieben, welche i.d.R. für Einkornmaterial entwickelt wurden. In diesen Konzepten ist die antreibende Kraft für den Sedimenttransport durch die Sohlenschubspannung τ definiert.

Die Energie, welche das fließende Wasser auf die Gerinnewandungen überträgt, wird nicht in vollem Umfang als Antriebsenergie für den Sedimenttransport genutzt. Die auf der Gewässersohle vorhandenen Transportkörperstrukturen verbrauchen als Formwiderstand einen Teil der Energie, ohne dass dies zum Sedimenttransport beiträgt (vgl. **Abb. 3.25**). Der Einfluss der Transportkörper äußert sich in den Ansätzen durch einen Korrekturfaktor, der meist Ripple-Faktor genannt wird. Der Ripple-Faktor reduziert die Sohlenschubspannung τ auf eine sog. „effektive Sohlenschubspannung“ für den Feststofftransport.



Abb. 3.25: Sandige Gewässersohle der Alb bei Ettlingen mit Transportkörpern (Ripple).

Eine Kornfraktion in einem Sedimentgemisch kann sich infolge der angreifenden Kräfte nur dann bewegen, wenn die Sohlenschubspannung einen fraktionscharaktere-

ristischen kritischen Schwellenwert überschreitet. Diesen Schwellenwert bezeichnet man als die kritische Sohlenschubspannung τ_{crit} .

Die gegenseitige Wechselwirkung zwischen den Kornfraktionen äußert sich in den sog. „Hiding & Exposure“-Korrekturen. Größere Kornfraktionen werden den Kräften der Wasserbewegung mehr ausgesetzt als kleinere Fraktionen. Die kleineren Fraktionen verbergen sich gleichsam hinter- bzw. unter den größeren. Um diesen Effekt bei einer Berechnung berücksichtigen zu können, wird in Abhängigkeit von der fraktionalen Zusammensetzung des Sediments der Transport pro Fraktion mit dem sog. „Hiding & Exposure-Faktor“ korrigiert.

Die drei Faktoren (kritische Sohlenschubspannung, Ripple-Faktor, Hiding & Exposure-Faktor) können allgemein als Sammelbegriffe betrachtet werden, die den zuvor genannten komplexen Zusammenhang zwischen hydraulischer Belastung, Sedimentzusammensetzung und Feststofftransport zum Ausdruck bringen. In fast allen gängigen Transportansätzen finden sich daher diese Begriffe in irgendeiner Form wieder.

3.2.3 Transportansätze (Exemplarischer Überblick)

3.2.3.1 Ansatz nach Meyer-Peter und Müller (1948)

Meyer-Peter und Müller (1948) führten experimentelle Untersuchungen im Labor durch. Sie verwendeten sowohl Einkorngemisch als auch Kornmischungen und deckten durch ihre Versuche ein Korngrößenspektrum von 0,29 mm bis 0,4 mm ab.

a) Transport von nahezu Einkornmaterial

Aus den Versuchen leiteten Meyer-Peter und Müller eine empirische Beziehung ab, welche auf dem maßgebenden Korndurchmesser d_m als charakteristische geometrische Größe zur Korndefinition aufbaut. Ferner fußt die Formel auf den Ansatz zur Beschreibung des Bewegungsbeginnes nach Shields (1936) sowie auf die Berücksichtigung der Sohlenstrukturen durch einen Ripple-Faktor:

$$\Phi = 8 \cdot (\mu_{MPM} \cdot \theta_m - 0,047)^{3/2} \quad \text{Gl. 3.42}$$

Φ Transportintensität (-)

μ_{MPM} Ripple-Faktor (-)

θ_m Shields-Parameter für d_m (-)

0,047 von Meyer-Peter und Müller aus Versuchen definierter kritischer Shieldsfaktor für den Bewegungsbeginn (-)

Die dimensionslosen Faktoren setzen sich dabei aus folgenden Beziehungen zusammen:

$$\Phi = \frac{q_F}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_m^3}} \quad \text{mit } \Delta = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W} \quad \text{und } m_F = q_F \cdot \rho_F \quad \text{Gl. 3.43}$$

Φ Transportintensität (-)
 q_F Feststofftransportrate (m²/s)
 Δ spezifische Dichte (-)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 d_m maßgebender Korndurchmesser (m)
 ρ_F Dichte der Feststoffe (kg/m³)
 ρ_W Dichte von Wasser (kg/m³)
 m_F Feststofftransport pro Breitenmeter und Sekunde (kg/m·s)

$$\mu_{\text{MPM}} = \left(\frac{C}{C'} \right)^{3/2} \quad \text{mit } C' = 18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot h}{d_{90}} \right) \quad \text{Gl. 3.44}$$

μ_{MPM} Ripple-Faktor (-)
 C Chezy-Beiwert der Gerinnesohle (m^{1/2}/s)
 C' Chezy-Beiwert der Sohlenoberfläche (m^{1/2}/s)
 h Fließtiefe (m)
 d_{90} Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang

Auf Basis der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler lässt sich der Ripple-Faktor wie folgt ausdrücken:

$$\mu_{\text{MPM}} = \left(\frac{k_{\text{st}}}{k_{\text{st}}'} \right)^{3/2} \quad \text{mit } k_{\text{st}}' \approx \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad \text{Gl. 3.45}$$

μ_{MPM} Ripple-Faktor (-)
 k_{st} Strickler-Beiwert der Gerinnesohle (m^{1/3}/s)
 k_{st}' Fiktiver Strickler-Beiwert einer ebenen Sohle (m^{1/3}/s)
 d_{90} Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang

$$\theta_m = \frac{\tau}{\Delta \cdot \rho_W \cdot g \cdot d_m} \quad \text{Gl. 3.46}$$

θ_m Shields-Parameter für d_m (-)
 τ Sohlenschubspannung (N/m²)
 Δ spezifische Dichte (-)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 d_m maßgebender Korndurchmesser (m)
 ρ_W Dichte von Wasser (kg/m³)

b) Transport von Kornfraktionen

Aus durchgeführten Experimenten leitete Egiazaroff (1965) durch Kalibrierung einen Hiding & Exposure-Faktor (ξ_i) ab. Dieser Faktor wird direkt auf den kritischen Shieldsfaktor angewandt.

$$\Phi_i = \rho_i \cdot 8 \cdot (\mu_{\text{MPM}} \cdot \theta_{m,i} - \xi_i \cdot 0,047)^{3/2} \quad \text{Gl. 3.47}$$

- Φ_i Transportintensität der Fraktion i (-)
 ρ_i Anteil der Fraktion i am Gesamtgemisch (%)
 μ_{MPM} Ripple-Faktor (-) → vgl. Gl. 3.44 und 3.45
 $\theta_{m,i}$ Shields-Parameter für d_m der Fraktion i (-)
 ξ_i Hiding & Exposure-Faktor der Fraktion i (-)
 0,047 von Meyer-Peter und Müller aus Versuchen definierter kritischer Shieldsfaktor für den Bewegungsbeginn (-)

$$\Phi_i = \frac{q_{F,i}}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_{m,i}^3}} \quad \text{mit } \Delta = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W} \quad \text{und } m_{F,i} = q_{F,i} \cdot \rho_F \quad \text{Gl. 3.48}$$

- Φ_i Transportintensität (-)
 $q_{F,i}$ Feststofftransportrate der Fraktion i (m²/s)
 Δ spezifische Dichte (-)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
 ρ_F Dichte der Feststoffe (kg/m³)
 ρ_W Dichte von Wasser (kg/m³)
 $m_{F,i}$ Feststofftransport der Fraktion i pro Breitenmeter und Sekunde (kg/m·s)

$$\theta_{m,i} = \frac{\tau}{\Delta \cdot \rho_W \cdot g \cdot d_{m,i}} \quad \text{Gl. 3.49}$$

- $\theta_{m,i}$ Shields-Parameter für $d_{m,i}$ (-)
 τ Sohlenschubspannung (N/m²)
 Δ spezifische Dichte (-)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
 ρ_W Dichte von Wasser (kg/m³)

$$\xi_i = \left[\frac{\log(19)}{\log\left(\frac{19 \cdot d_{m,i}}{d_m}\right)} \right]^2 \quad \text{mit } d_m = \sum (\rho_i \cdot d_{m,i}) \quad \text{Gl. 3.50}$$

- ξ_i Hiding & Exposure-Faktor für die Fraktion i (-)
 $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
 d_m maßgebender Korndurchmesser des Gesamtgemisches (m)
 ρ_i Anteil der Fraktion i am Gesamtgemisch (%)

Durch weiterführende Versuche konnten Ashida und Michiue (1973) die Formel für den Hiding & Exposure-Faktor speziell im feinkörnigen Bereich modifizieren:

$$\xi_i = \begin{cases} \left[\frac{\log(19)}{\log\left(\frac{19 \cdot d_{m,i}}{d_m}\right)} \right]^2 & \text{für } \frac{d_{i,m}}{d_m} \geq 0,4 \\ 0,85 \cdot \frac{d_m}{d_{i,m}} & \text{für } \frac{d_{i,m}}{d_m} < 0,4 \end{cases} \quad \text{Gl. 3.51}$$

ξ_i Hiding & Exposure-Faktor für die Fraktion i (-)
 $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
 d_m maßgebender Korndurchmesser des Gesamtgemisches (m)

3.2.3.2 Ansatz nach Engelund und Hansen (1967)

Engelund und Hansen (1967) führten Versuche mit Korngrößen im Bereich zwischen 0,19 mm bis 0,93 mm durch. Aus den Ergebnissen leiteten sie eine halbempirische Formel ab, die sich bis heute besonders beim Feststofftransport kleiner Korngrößen bewährt hat.

a) Transport von nahezu Einkornmaterial

Analog dem Formelgerüst nach Meyer-Peter und Müller (1948) stellt sich die halbempirische Formeln von Engelund und Hansen wie folgt dar:

$$\Phi = 0,05 \cdot (\mu_{EH} \cdot \theta_m)^{5/2} \quad \text{Gl. 3.52}$$

Φ Transportintensität (-) → vgl. Gl. 3.43
 μ_{EH} Ripple-Faktor (-)
 θ_m Shields-Parameter für d_m (-) → vgl. Gl. 3.46

$$\mu_{EH} = \left(\frac{C^2}{g} \right)^{2/5} \quad \text{mit } C = \frac{V_m}{\sqrt{h \cdot I_E}} \quad \text{Gl. 3.53}$$

μ_{EH} Ripple-Faktor (-)
 C Chezy-Beiwert (m^2/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s^2)
 V_m tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (m/s)
 h Fließtiefe (m)
 I_E mittleres Energieliniengefälle (-)

b) Transport von Kornfraktionen

Engelund und Hansen entwickelten in ihrer Untersuchung keinen Hiding & Exposure-Faktor. Laguzzi (1994) schlägt in seiner Arbeit vor, den Hiding & Exposure-Faktor nach Egiazaroff (1965) bzw. nach Ashida und Michiue (1973) (vgl. Gl. 3.51) zu übernehmen. Diese Methode wird derzeit in der Fachliteratur diskutiert; Anwendungserfahrungen liegen hierfür jedoch noch nicht vor.

$$\Phi_i = p_i \cdot 0,05 \cdot (\mu_{EH} \cdot \theta_{m,i})^{5/2} \quad \text{Gl. 3.54}$$

- Φ_i Transportintensität der Fraktion i (-) → vgl. Gl. 3.48
 μ_{EH} Ripple-Faktor (-) → vgl. Gl. 3.53
 $\theta_{m,i}$ Shields-Parameter für $d_{m,i}$ (-) → vgl. Gl. 3.49

3.2.3.3 Ansatz nach Ackers und White (1973)

Ackers und White (1973) führten ca. 930 Erosionsversuche im Labor mit Rechteckquerschnitt durch. Sie verwendeten Korngrößen im Bereich zwischen 0,04 mm und 4 mm und Fließtiefen im Bereich bis ca. 0,4 m bei Froudezahlen bis 0,8.

Die Auswertung ihrer Messergebnisse führte Ackers und White zu dem Schluss, den Transport von feinen Feststoffen ($d_m \leq 0,04$ mm) über die sog. Schubspannungsgeschwindigkeit (v^*) zu charakterisieren. Bei kleinpartikulären Fraktionen besteht jedoch in Abhängigkeit von den Feststoffeigenschaften die Gefahr der Kohäsion einzelner Partikel untereinander, was eine Anwendung der Formeln in einem solchen Fall nicht empfiehlt. Die Verwendung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit (v_m) erschien dagegen praktikabel für die Transportbeschreibung größerer Feststofffraktionen.

a) Transport von nahezu Einkornmaterial

Aus den Messergebnissen wurde folgendes empirisches Formelgerüst abgeleitet:

$$q_F = K \cdot v_m \cdot d_m \cdot \left(\frac{v_m}{v^*} \right)^n \cdot \left| \left(\frac{F_{gr}}{F_{gr,crit}} - 1 \right)^m \right| \quad \text{Gl. 3.55}$$

- q_F Feststofftransportrate (m^2/s)
 K, n, m empirische Koeffizienten (-) → Tab. 3.3
 v_m tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (m/s)
 d_m maßgebender Korndurchmesser (m)
 v^* Schubspannungsgeschwindigkeit (m/s)
 F_{gr} Feststoffmobilitätszahl (-)
 $F_{gr,crit}$ kritische Feststoffmobilitätszahl (-)

$$F_{gr} = \frac{v^{*n}}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_m}} \cdot \left(\frac{v_m}{\sqrt{32} \cdot \log\left(\frac{10 \cdot h}{d_m}\right)} \right)^{1-n} \quad \text{mit } v^* = \sqrt{g \cdot h \cdot I_E} \quad \text{Gl. 3.56}$$

- F_{gr} Feststoffmobilitätszahl (-)
 v^* Schubspannungsgeschwindigkeit (m/s)
 n empirischer Koeffizient (-) → Tab. 3.3
 Δ spezifische Dichte (-) → Gl. 3.43
 I_E Energieliniengefälle (-)
 v_m tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (m/s)
 h Fließtiefe (m)
 d_m maßgebender Korndurchmesser (m)

Die Koeffizienten n, m und K sowie die kritische Feststoffmobilitätszahl ($F_{gr,crit}$) werden von Ackers und White in Abhängigkeit vom dimensionslosen sedimentologischen Korndurchmesser (d^*) angegeben (vgl. **Tab. 3.3**):

$$d^* = d_m \cdot \left(\frac{\Delta \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3} \tag{Gl. 3.57}$$

- d^* sedimentologischer Korndurchmesser (-)
- d_m maßgebender Korndurchmesser (m)
- Δ spezifische Dichte (-) → Gl. 3.43
- g Erdbeschleunigung (m/s²)
- ν kinematische Viskosität von Wasser (m²/s)

Tab. 3.3: Koeffizienten nach Ackers und White (1973)

Koeffizient	Bereich $1 \leq d^* < 60$	Bereich $d^* \geq 60$
n	$1 - 0,56 \cdot \log(d^*)$	0
m	$9,66/d^* + 1,34$	1,5
K	$10^{-3,53+2,86 \cdot \log(d^*) - [\log(d^*)]^2}$	0,025
$F_{gr,crit}$	$0,23/d^{*0,5} + 0,14$	0,17

b) Transport von Kornfraktionen

Day (1980) wendet als Ergänzung zur Formel nach Ackers und White einen Hiding & Exposure-Faktor auf die kritische Sedimentmobilitätszahl ($F_{gr,crit}$) an:

$$q_{F,i} = p_i \cdot K_i \cdot v_m \cdot d_{m,i} \cdot \left(\frac{v_m}{v^*} \right)^{n_i} \cdot \left(\frac{F_{gr,i}}{F_{gr,crit,i} \cdot \xi_i} - 1 \right)^{m_i} \tag{Gl. 3.58}$$

- $q_{F,i}$ Feststofftransportrate der Fraktion i (m²/s)
- p_i Anteil der Fraktion i am Gesamtgemisch (%)
- K_i, n_i, m_i empirische Koeffizienten der Fraktion i (-) → Tab. 3.3
- v_m tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (m/s)
- $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
- v^* Schubspannungsgeschwindigkeit (m/s) → vgl. Gl. 3.56
- $F_{gr,i}$ Feststoffmobilitätszahl der Fraktion i (-)
- $F_{gr,crit,i}$ kritische Feststoffmobilitätszahl der Fraktion i (-)
- ξ_i Hiding & Exposure-Faktor der Fraktion i (-)

$$\xi_i = 0,4 \sqrt{\frac{d_{m,A}}{d_{m,i}}} + 0,6 \text{ mit } \frac{d_{m,A}}{d_{50}} = 1,6 \cdot \left(\frac{d_{16}}{d_{84}} \right) \tag{Gl. 3.59}$$

- ξ_i Hiding & Exposure-Faktor der Fraktion i (-)
- $d_{m,A}$ Korngröße der Feststoffe, die nicht dem Hiding & Exposure-Prozess ausgesetzt sind (m)
- $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
- d_{50} Korndurchmesser der Sedimentmischung bei 50% Siebdurchgang (m)
- d_{84} Korndurchmesser der Sedimentmischung bei 84% Siebdurchgang (m)

3.2.3.4 Ansatz nach Van Rijn (1984)

Van Rijn (1984) leitete aus Versuchen und aus Naturmessungen einen Ansatz ab, der den Feststofftransport aus den Anteilen des Geschiebetransportes und des Schwebstofftransportes berechnet. Für den Geschiebetransport setzt Van Rijn voraus, dass sich die Feststoffe entlang der Gewässersohle rollend, hüpfend oder springend bewegen. In seinen Versuchen verwendete er Material mit Korngrößen zwischen 0,2 mm und 2 mm.

a) Transport von nahezu Einkornmaterial

In Abhängigkeit von einem dimensionslosen Schubspannungsparameter (T) empfiehlt Van Rijn folgenden Ansatz:

$$\Phi = \begin{cases} 0,053 \cdot d^{*-0,3} \cdot T^{2,1} & \text{für } T < 3 \\ 0,1 \cdot d^{*-0,3} \cdot T^{1,5} & \text{für } T \geq 3 \end{cases} \quad \text{Gl. 3.60}$$

- Φ Transportintensität (-) → vgl. Gl. 3.43
- d* sedimentologischer Korndurchmesser (-) → vgl. Gl. 3.57
- T Schubspannungsparameter (-)

$$T = \frac{\tau_{\text{red}} - \tau_{\text{crit}}}{\tau_{\text{crit}}} \quad \text{mit } \tau_{\text{red}} = \mu_{\text{VR}} \cdot \tau_0 \quad \text{und } \tau_{\text{crit}} = (\rho_F - \rho_W) \cdot g \cdot d_m \cdot \theta_{\text{crit}} \quad \text{Gl. 3.61}$$

- T Schubspannungsparameter (-)
- τ_{red} reduzierte Sohlenschubspannung (N/m²)
- τ₀ Sohlenschubspannung (N/m²)
- τ_{crit} kritische Sohlenschubspannung bei Bewegungsbeginn (N/m²)
- μ_{VR} Ripple-Faktor (-)
- ρ_F Dichte der Feststoffe (kg/m³)
- ρ_W Dichte von Wasser (kg/m³)
- g Erdbeschleunigung (m/s²)
- d_m maßgebender Korndurchmesser (m)
- θ_{crit} kritischer Shieldsparameter (-) → Gl. 3.63

$$\mu_{\text{VR}} = \left(\frac{C}{C'} \right)^2 \quad \text{mit } C' = 18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot h}{d_{90}} \right) \quad \text{Gl. 3.62}$$

- μ_{VR} Ripple-Faktor (-)
- C Chezy-Beiwert der Gerinnesohle (m^{1/2}/s)
- C' Chezy-Beiwert der Sohlenoberfläche (m^{1/2}/s)
- h Fließtiefe (m)
- d₉₀ Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang

Der kritische Shieldsparameter kann durch eine mathematische Beschreibung der Shields-Kurve wie folgt in Abhängigkeit vom sedimentologischen Korndurchmesser berechnet werden:

$$\theta_{\text{crit}} = \left\{ \begin{array}{l} 0,24 \cdot d^{*-1} \text{ für } d^* \leq 4 \\ 0,14 \cdot d^{*-0,64} \text{ für } 4 < d^* \leq 10 \\ 0,04 \cdot d^{*-0,10} \text{ für } 10 < d^* \leq 20 \\ 0,013 \cdot d^{*-0,29} \text{ für } 20 < d^* \leq 150 \\ 0,055 \text{ für } d^* > 150 \end{array} \right. \quad \text{Gl. 3.63}$$

θ_{crit} kritischer Shieldsparameter (-)

d^* sedimentologischer Korndurchmesser (-) → Gl. 3.57

b) Transport von Kornfraktionen

Ein spezieller Hiding & Exposure-Faktor wurde bislang für die Formel von Van Rijn nicht abgeleitet. Deshalb kann der fraktionierte Feststofftransport berechnet werden, indem man in die Gleichungen 3.60 bis 3.63 jeweils die charakteristischen Korndurchmesser der einzelnen Fraktionen eingetragen werden:

$$\Phi_i = \left\{ \begin{array}{l} p_i \cdot 0,053 \cdot d^{*-0,3} \cdot T_i^{2,1} \text{ für } T_i < 3 \\ p_i \cdot 0,1 \cdot d^{*-0,3} \cdot T_i^{1,5} \text{ für } T_i \geq 3 \end{array} \right. \quad \text{Gl. 3.64}$$

Φ_i Transportintensität (-) der Fraktion i → vgl. Gl. 3.48

d^* sedimentologischer Korndurchmesser für die Fraktion i (-) → vgl. Gl. 3.57

T Schubspannungsparameter für die Fraktion i (-) → vgl. Gl. 3.61

3.2.3.5 Ansatz nach Hunziker (1995)

Hunziker (1995) bezieht die Datengrundlage zur Ableitung seiner Formeln aus den Modellversuchen von Meyer-Peter und Müller (1948), Günther (1971) und anderen Forschern. Vom Prinzip spricht sich Hunziker für die Richtigkeit des Ansatzes nach Meyer-Peter und Müller (1948) aus. Er modifiziert jedoch das Formelgerüst für den fraktionellen Transportansatz durch eine andere Einflechtung eines speziell aus den untersuchten Daten abgeleiteten Hiding & Exposure-Faktors:

$$\Phi_i = p_i \cdot 5 \cdot \left[\xi_i \cdot (\theta_{m,i}^* - \theta_{\text{crit},i}) \right]^{3/2} \quad \text{Gl. 3.65}$$

Φ_i Transportintensität der Fraktion i (-) → vgl. Gl. 3.48

p_i Anteil der Fraktion i am Gesamtgemisch (%)

ξ_i Hiding & Exposure-Faktor der Fraktion i (-)

$\theta_{\text{crit},i}$ kritischer korrigierter Shields-Parameter der einzelnen Sohlenschichten (-)

$\theta_{m,i}^*$ korrigierter Shields-Parameter der Fraktion i (-)

Die Berechnung des korrigierten Shields-Parameter ($\theta_{m,i}^*$) erfolgt durch folgende Formelwerke:

$$\theta_{m,i}^* = \mu_H \cdot \theta_{m,i} \quad \text{Gl. 3.66}$$

$\theta_{m,i}^*$ korrigierter Shields-Parameter für d_m der Fraktion i (-)

$\theta_{m,i}$ Shields-Parameter für d_m der Fraktion i (-) → vgl. Gl. 3.49

μ_H Ripple-Faktor nach Hunziker (-)

Nach den Untersuchungen von Hunziker liefert der Ripple-Faktor auf Basis der Strickler-Werte zu kleine Werte. Daher führt er hierfür eine Modifikation ein, die auf einen kornbezogenen Chézy-Wert nach Yalin und Scheuerlein (1988) beruht:

$$\mu_H = \left(\frac{C}{C'} \right)^2 \quad \text{mit } C' = \sqrt{\frac{g}{A_F}} \quad \text{Gl. 3.67}$$

- μ_H Ripple-Faktor nach Hunziker (-)
- C Chezy-Beiwert der Gerinnesohle ($m^{1/2}/s$)
- C' Chezy-Beiwert der Sohlenoberfläche ($m^{1/2}/s$)
- g Erdbeschleunigung (m/s^2)
- A_F Kornwiderstand der Sohle nach Yalin und Scheuerlein, 1988 (-)

$$A_F = \left[\frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(b^* \cdot \frac{h}{2 \cdot d_{90}} \right) \right]^{-2} \quad \text{mit } b^* = e^{(0,4 \cdot B_s - 1)} \quad \text{Gl. 3.68}$$

- A_F Kornwiderstand der Sohle (-)
- κ Karman-Konstante (-)
- b^* empirischer Korrekturfaktor (-)
- h Fließtiefe (m)
- d_{90} Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang (m)
- B_s Rauheitsfunktion nach Schlichting (-)

$$B_s = 8,5 + [2,5 \cdot \ln(\text{Re}^*) - 3] \cdot e^{-0,217 \cdot \ln(\text{Re}^*)^2} \quad \text{mit } \text{Re}^* = \frac{v^* \cdot 2 \cdot d_{90}}{\nu} \quad \text{Gl. 3.69}$$

- B_s Rauheitsfunktion nach Schlichting (-)
- Re^* Kornbezogene Reynoldszahl (-)
- v^* Schubspannungsgeschwindigkeit (m/s) → vgl. Gl. 3.56
- d_{90} Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang (m)
- ν kinematische Viskosität (m^2/s)

Der fraktionsbezogene kritische Shields-Parameter ($\theta_{\text{crit},i}$) wird aus dem kritischen Shields-Parameter (θ_{crit}) und den antiproportional gewichteten geometrischen Korngrößen der unteren und oberen Sohlenschichten abgeleitet:

$$\theta_{\text{crit},i} = \theta_{\text{crit}} \cdot \left(\frac{d_{m,u}}{d_{m,o}} \right)^{0,33} \quad \text{mit } d_{m,o} = \sum (p_{i,o} \cdot d_{i,o}) \quad \text{und } d_{m,u} = \sum (p_{i,u} \cdot d_{i,u}) \quad \text{Gl. 3.70}$$

- $\theta_{\text{crit},i}$ kritischer korrigierter Shields-Parameter der einzelnen Sohlenschichten (-)
- θ_{crit} kritischer Shields-Parameter (-) → vgl. Gl. 3.63
- $d_{m,u}$ maßgebender Korndurchmesser der unteren Sohlenschicht (m)
- $d_{m,o}$ maßgebender Korndurchmesser der oberen Sohlenschicht (m)
- d_i maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
- p_i Anteil der Fraktion i am Gesamtgemisch (%)

Der Hiding & Exposure-Faktor berechnet sich nach Huntziger wie folgt:

$$\xi_i = \left(\frac{d_{m,i}}{d_{m,0}} \right)^{-\alpha} \quad \text{mit } \alpha = 0,011 \cdot \theta_{m,i}^{*1,5} - 0,3 \quad \text{Gl. 3.71}$$

ξ_i Hiding & Exposure-Faktor der Fraktion i (-)
 $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
 $d_{m,0}$ maßgebender Korndurchmesser der oberen Sohlenschicht (m) → vgl. Gl. 3.70
 α Exponent (-)
 $\theta_{m,i}^*$ korrigierter Shields-Parameter für d_m der Fraktion i (-) → vgl. Gl. 3.66

Als Anwendungsgrenzen gibt Hunziker folgende Grenzwerte an:

$$\alpha \leq 2,3 \quad \text{und} \quad \frac{d_{m,i}}{d_{m,0}} \geq 0,25 \quad \text{Gl. 3.72}$$

α Exponent (-) → vgl. Gl. 3.71
 $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
 $d_{m,0}$ maßgebender Korndurchmesser der oberen Sohlenschicht (m) → vgl. Gl. 3.70

3.2.3.6 Ansatz nach Wu (2000)

Die Gleichung nach Wu setzt sich aus zwei Modulen zusammen, mit denen der fraktionierte Geschiebetransport und der Schwebstofftransport berechnet werden kann. Er entwickelte sein Gleichungsgerüst anhand bewährter Ansätze (vgl. Ansatz nach Meyer-Peter und Müller).

Im Zentrum seiner Formeln steht ein neuer Ansatz für den Hiding & Exposure-Faktor, welcher durch die Kalibrierung zahlreicher Labor- und Naturmessungen verifiziert wurde. Unter der Voraussetzung einer zufälligen Verteilung aller Partikelgrößen in der Sohle vergleicht Wu hier fraktionsbezogen die Hiding-Wahrscheinlichkeit in Relation zur Exposure-Wahrscheinlichkeit, indem er die betrachtete Fraktion mit den anderen im Gemisch vorhandenen Fraktionen wichtet. Die Stärke dieses Ansatzes beruht auf der enormen Datenbasis, die Wu seinem Ansatz zugrunde gelegt hat.

$$\Phi_i = p_i \cdot 0,0053 \cdot \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{crit},i}} - 1 \right]^{2,2} \quad \text{Gl. 3.73}$$

Φ_i Transportintensität der Fraktion i (-) → vgl. Gl. 3.48
 p_i Anteil der Fraktion i am Gesamtgemisch (%)
 n' Rauheit nach Manning bezogen auf Einkornsediment ($\text{s/m}^{1/3}$)
 n Rauheit der tatsächlichen Sohle nach Manning ($\text{s/m}^{1/3}$)
 τ Sohlenschubspannung (N/m^2)
 $\tau_{\text{crit},i}$ kritische Sohlenschubspannung der Fraktion i (N/m^2)

$$n' = \frac{\sqrt[6]{d_{50}}}{20} \quad \text{und} \quad n = \frac{h^{2/3} \cdot \sqrt{I_E}}{V_m} \quad \text{Gl. 3.74}$$

- n' Rauheit nach Manning bezogen auf Einkornsediment (s/m^{1/3})
- d_{50} Korndurchmesser bei 50% Siebdurchgang (m)
- n Rauheit der tatsächlichen Sohle nach Manning (s/m^{1/3})
- h Fließtiefe (m)
- I_E Energieliniengefälle (-)
- V_m tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (m/s)

Der Hiding & Exposure-Faktor ist im Ansatz nach Wu direkt bei der kritischen Schubspannung implementiert:

$$\tau_{\text{crit},i} = (\rho_F - \rho_W) \cdot g \cdot d_{m,i} \cdot \theta_{\text{crit}} \cdot \xi_i \quad \text{Gl. 3.75}$$

- $\tau_{\text{crit},i}$ kritische Sohlenschubspannung der Fraktion i (N/m²)
- ρ_F Dichte der Feststoffe (kg/m³)
- ρ_W Dichte von Wasser (kg/m³)
- g Erdbeschleunigung (m/s²)
- $d_{m,i}$ maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
- θ_{crit} kritischer Shields-Parameter (-)
- ξ_i Hiding & Exposure-Faktor (-)

Nach Wu kann der kritische Shields-Parameter konstant zu 0,03 angenommen werden. Für den Hiding & Exposure-Faktor gilt:

$$\xi_i = \left(\frac{p_{e,i}}{p_{h,i}} \right)^{-0,6} \quad \text{mit} \quad p_{e,i} = \sum_{a=1}^n \left(p_a \cdot \frac{d_i}{d_i + d_a} \right) \quad \text{und} \quad p_{h,i} = \sum_{b=1}^n \left(p_b \cdot \frac{d_b}{d_i + d_b} \right) \quad \text{Gl. 3.76}$$

- ξ_i Hiding & Exposure-Faktor (-)
- $p_{e,i}$ Exposure-Wahrscheinlichkeit der Fraktion i (-)
- $p_{h,i}$ Hiding-Wahrscheinlichkeit der Fraktion i (-)
- p_a Anteil der Kornfraktion a am Gesamtgemisch (%)
- d_i maßgebender Korndurchmesser der Fraktion i (m)
- d_a maßgebender Korndurchmesser der Fraktion a (m)
- p_b Anteil der Kornfraktion b am Gesamtgemisch (%)
- d_b maßgebender Korndurchmesser der Fraktion b (m)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die derzeit vorliegenden Formelwerke außerordentlich empirisch geprägt sind und zudem oftmals komplexe Rechenarbeit erfordern. Alle erläuterten Ansätze basieren auf optimierten hydraulischen Randbedingungen (Normalabfluss).

Die Ansätze besitzen zudem nur bei kohäsionslosen Feststoffen Gültigkeit und wurden, wenn überhaupt, an Naturmessdaten von Fließgewässern mit alluvialen Sedimenten verifiziert:

„Ohnehin gilt für alle [sedimentologischen] Berechnungsverfahren, dass der Anwendungsbereich – gemessen an den vielfältigen Formen der Fließgewässer – recht be-

grenzt ist. Fasst man die hydraulischen und sedimentologischen Restriktionen zusammen, so ergeben sich im wesentlichen folgende Anwendungsbereiche:

- Die Berechnungsverfahren gelten für alluviale Fließgewässer mit sandigem oder kie-sigem Sohlmaterial,
- der Abflussvorgang ist strömend,
- die Strömungsverhältnisse sind (näherungsweise) stationär gleichförmig [...],
- die Querschnittsform ist kompakt, gegliederte Querschnitte sind in kompakte Teil-querschnitte mit einheitlicher mittleren Fließgeschwindigkeit zu untergliedern,
- das Sohlenmaterial (Sand, Kies) ist relativ gleichförmig und nicht kohäsiv. Die Sohle liegt offen (keine Abpflasterung, keine Wasserpflanzen, keine biologische oder che-mische Verfestigung) [...],
- Die Vegetation auf Ufer und Vorland besteht aus Kleinbewuchs (z.B. Gras) und/oder Großbewuchs (Büsche, Bäume); über die hydraulischen Vorgänge bei Mittelbewuchs (überströmte, flexible Pflanzenbestände) liegen noch relativ wenig Erfahrungen vor.“

(DVWK Mitteilungen Nr. 25, Seite 3 ff, 1994).

Neben den erläuterten Ansätzen gibt es noch zahlreiche weitere Methoden, die im Rahmen der Arbeit jedoch nicht näher erläutert werden sollen. Der Vollständigkeit halber sei nur erwähnt, dass man die meisten der oben genannten Ansätze zu den Schwellenwertansätzen zählt und in dieser Kategorie als sog. Überschussansätze definiert. Eine andere Art von Schwellenwertansätzen sind die sog. Migrationsansätze, die den Feststofftransport infolge der Wanderung der Transportkörper beschreiben (z.B. Zanke, 1978 oder Yalin, 2001).

In den schwellenwertfreien Ansätzen gruppiert man die sog. Regressionsansätze (z.B. Engelund und Hansen, 1967), die Wahrscheinlichkeitsansätze (z.B. Zanke, 1990 oder Einstein und Brown (in Vetter, 1988)) und die Regime-Ansätze (z.B. Blench, 1969).

3.2.4 Beschreibung der gewässermorphologischen Entwicklung

Bedingt durch das Wechselspiel zwischen fließender Welle und Feststofftransport finden kontinuierliche morphologische Prozesse entlang des Fließweges statt, die das Erscheinungsbild und die Güte des Gewässers prägen. Doch das gewässermorphologische Erscheinungsbild wird nicht nur durch hydrodynamische Belastungen gestaltet, sondern ebenso durch die klimatologischen, geologischen, ökologischen und tektonischen Eigenschaften des Raumes sowie durch die anthropogenen Eingriffe des Menschen (vgl. **Abb. 3.26**).

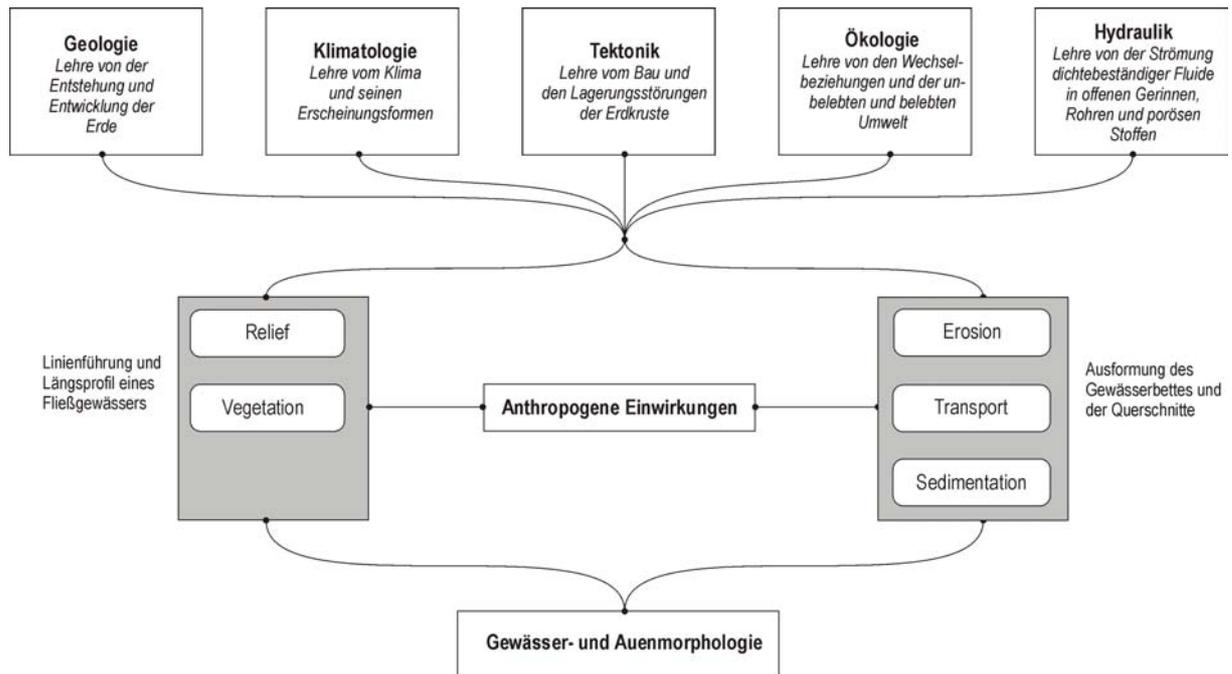


Abb. 3.26: Zusammenspiel beteiligter Fachdisziplinen bei der Gewässer- und Auenmorphologie.

Aufgrund der geomorphologischen Untersuchungen der Talformen, der in der Natur vorhandenen Linienführungen der Fließgewässer sowie der Ausformung und Erscheinung der Gewässerquerschnitte hat man Konzepte erstellt, die aufbauend auf die fluvialen Erosions- und Sedimentationsprozesse die kurz- und mittelfristige Formgestaltung der Fließgewässer beschreiben.

In konsequenter Weiterführung solcher Ansätze, die überwiegend phänomenologischer Art sind und sich i.d.R. durch empirische Formelwerke darstellen, wurden durch Briem (2003) sog. Gewässerlandschaften klassifiziert, die dem Anwender detailliert Auskunft über die morphologische Erscheinung sowie das morphologische Entwicklungspotenzial geben.

Die Grundlagen der morphodynamischen Prozesse in Fließgewässern sollen an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden. Hierzu gibt die Fachliteratur umfassend Auskunft (vgl. Kern, 1995, Scherle, 1999, ATV-DVWK, 2000, Lehmann und Nestmann, 2003).

Vielmehr soll aufgezeigt werden, welche Probleme bei der Prognose der morphologischen Entwicklung naturnaher Fließgewässer in der Praxis auftreten. Gemäß dem Stand der Technik werden hierfür hydrodynamische Berechnungsprogramme zur Strömungssimulation mit den in Kap. 3.2.3 genannten Transportansätzen gekoppelt. Als Schnittstelle wird dabei die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (v_m) sowie die Sohlenschubspannung (τ) verwendet. Eine ausführliche Darstellung der gängigen Methoden ist den DVWK-Mitteilungen Nr. 25 (1993) zu entnehmen.

Eindimensionale Berechnungsansätze liefern dabei in der Praxis nur verlässliche Werte bzgl. der Transportmengen. Die Aussagen, die auf Basis eindimensionaler

Simulationen bzgl. der Erosion, Sedimentation und somit bzgl. der gewässermorphologischen Änderungen gemacht werden, sind aufgrund der zahlreichen Vereinfachungen und der vorhandenen Empirie oftmals mit großen Ungenauigkeiten verbunden. Ein gutes Beispiel hierfür liefert Mertens (2004), der aufbauend auf die von ihm entwickelte Widerstandsbeziehung eine gewässermorphologische Entwicklung prognostizieren möchte, jedoch nur eine sehr vage Aussage auf Grundlage einer stark vereinfachten Gerinnegeometrie machen kann.

Der Einsatz zwei- oder dreidimensionaler hydrodynamischer Berechnungsmodelle liefert lokale Fließgeschwindigkeiten und somit auch lokale Sohlschubspannungen. Derzeit ist es in der Praxis deshalb üblich, hochaufgelöste mehrdimensionale Berechnungsansätze zu wählen und die Ergebnisse mit den klassischen Transportansätzen zu koppeln. Für große, ausgebaute Fließgewässer hat sich diese Methode bewährt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Versuch unternommen, für die renaturierte Enz bei Pforzheim eine zweidimensionale Strömungsberechnung mit dem Transportansatz nach Meyer-Peter und Müller (1948) zu koppeln und aus den Ergebnissen die gewässermorphologische Entwicklung zu folgern (vgl. Imiela, 2003). Dabei wurde das für den Rhein von der Bundesanstalt für Wasserbau eingesetzte zweidimensionale instationäre hydrodynamische Modell „Telemac 2D“ sowie das Feststofftransportmodul „Sisyphé“ zur Simulation des Geschiebetriebes verwendet:

- Im Rahmen des Preprocessing wurden aus vorhandenen Geometriedaten der Enz aus den Jahren 1994 und 1997 digitale Geländemodelle (DGM) für den Untersuchungsraum erstellt. Durch einen Vergleich der DGM konnten Differenzmodelle erzeugt werden, welche die realen morphologischen Veränderungen zwischen 1994 und 1997 aufzeigten (vgl. **Abb. 3.27**, oben).
- Ferner wurde für das Modellgebiet ein trianguläres Berechnungsgitter generiert und den einzelnen Flächenelementen Widerstandswerte zugeordnet, die im weiteren Arbeitsverlauf anhand von gemessenen Wasserspiegel-Abfluss-Beziehungen kalibriert wurden. Aus den vorhandenen Naturmessdaten wurden weitere notwendige Randbedingungen (z.B. Kornverteilungen, Wasserstände, etc.) extrahiert.
- Die Berechnungen für den ca. 1300 m langen naturnahen Gewässerabschnitt wurden mit acht parallelen Prozessoren auf einem Großrechner der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführt, da ein einzelner PC keine ausreichende Kapazität für die umfangreichen Rechnungen besitzt.
- Um die trotz der enormen Rechnerleistung sehr hohe Rechenzeit zu verringern, wurde die Annahme getroffen, dass sich signifikante morphologische Veränderungen erst dann im Untersuchungsgebiet einstellen, wenn ein hydrodynamischer Schwellenwert (z.B. die kritische Schubspannung) überschritten wird. Werden in der numerischen Simulation nur die Abflussereignisse einbezogen, die einen

Wert über diesem Schwellenwert bewirken, reduziert sich die zu simulierende Zeit und damit die erforderliche Rechenzeit erheblich.

- Durch Voruntersuchungen musste der Schwellenwert vom Anwender abgeschätzt werden. Hierzu konzentrierte man sich auf die Analyse der Fraktionierung des Sedimentgemisches sowie auf Naturbeobachtungen, wo bei gemessenen Abflüssen ein Geschiebetransport nachgewiesen werden konnte (vgl. **Abb. 3.30**).

Aus den Berechnungsergebnissen wurde ebenfalls auf Basis des DGM ein Differenzenmodell erstellt, so dass ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den realen gewässermorphologischen Änderungen möglich wurde (vgl. **Abb. 3.27**, unten):

- Die umrandeten Bereiche (a) und (b) in **Abb. 3.27** zeigen bei den gemessenen Sohlenänderungen starke Auflandungen, welche durch die numerische Simulation nicht erreicht wurden. Der Grund hierfür liegt bei der Erhebung der Geometriedaten von 1994, die photogrammetrisch ermittelt wurden und in diesem Bereich stark fehlerbehaftet sind.
- Die umrandet markierten Bereiche 1 und 2 in **Abb. 3.27** am oberen Modellrand zeigen einen deutlichen Fehler der Berechnungen auf: Die Sedimentation bzw. Gerinneauflandung wird in diesen Bereichen stark überschätzt. Die Ursache hierfür ist in der falschen Annahme des Geschiebeeintrags in den Modellbereich begründet.

Dies stellt ein allgemeines Problem bei der Prognose der gewässermorphologischen Entwicklungen auf Basis von Strömungs- und Feststoffansätzen dar. Der Anwender geht im Rahmen der Modellierung von einer Feststoffkontinuität aus, d.h. der zeitliche Feststoffeintrag in das Modell entspricht dem zeitlichen Feststoffaustrag aus dem Modell.

Aus dieser ansatztechnisch erforderlichen Annahme wird deutlich, dass der Geschiebe- und Schwebstofftrieb durch den Anwender abzuschätzen ist (i.d.R. gestalten sich solche Messungen bei naturnahen Fließgewässern außerordentlich schwierig).

- Die Bereiche 4 und 5 in **Abb. 3.27** zeigen eine relativ gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit der Realität.

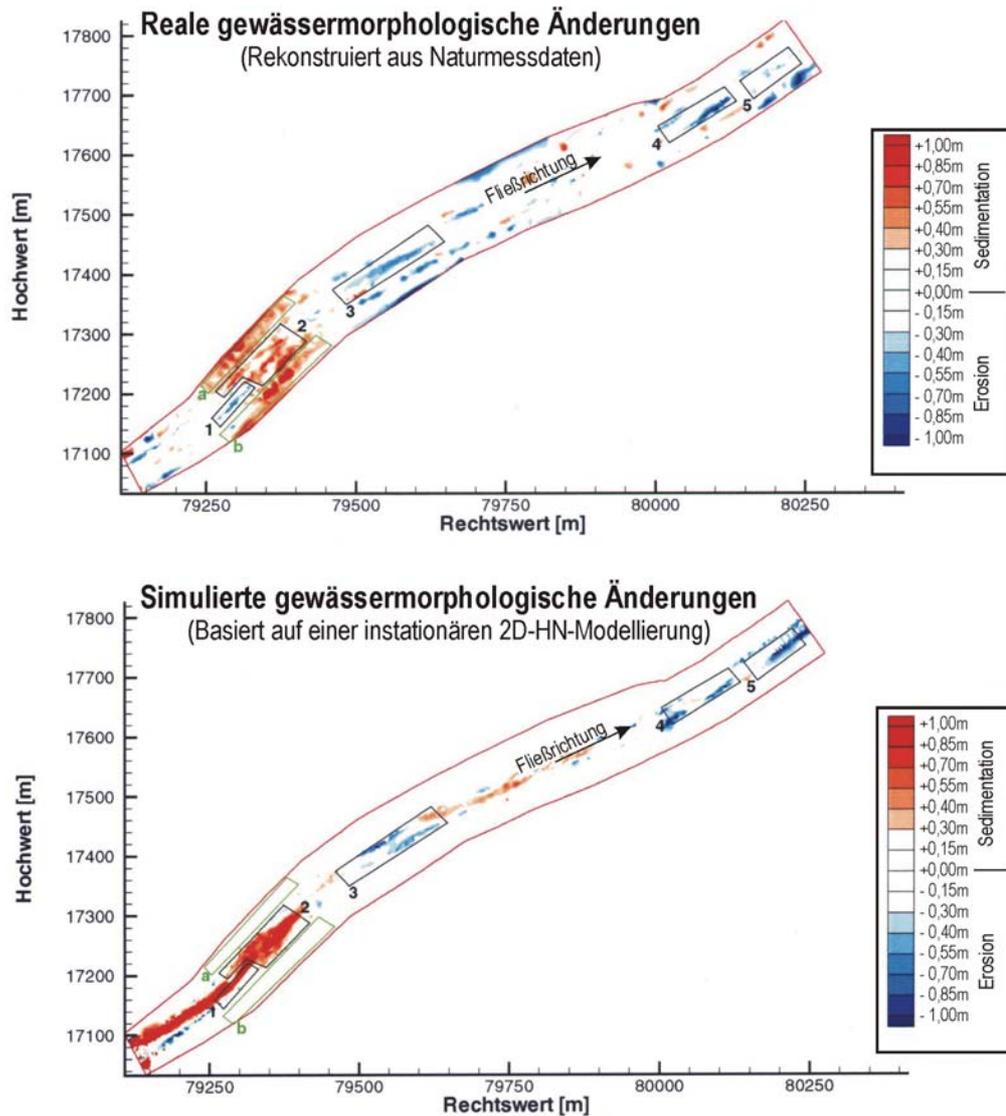


Abb. 3.27: Vergleich der geometrischen Differenzenmodelle. Oben: Reale Änderung der Sohlenlage zwischen 1992 und 1994. Unten: Berechnete Änderung der Sohlenlage zwischen 1992 und 1994. (Lehmann, verändert nach Imiela, 2003)

Das oben genannte Beispiel zeigt sehr anschaulich die derzeitigen Möglichkeiten, die sich bei sehr guter Datengrundlage und unter Verwendung modernster Rechenanlagen bieten.

Ergänzend zu den gängigen Transportansätzen merkt Specht (2002) in seiner Arbeit an, dass auch die ufernahe Vegetation einen entscheidenden Einfluss auf die sedimentologischen Prozesse haben kann. Er dokumentiert dies sehr eindrucksvoll durch Laborversuche, die vom Aufbau her den klassischen Versuchen nach Pasche (1984, vgl. Abb. 3.16) entsprechen, jedoch durch Zugabe von Feststoffen die Wechselwirkungen zwischen Strömung, Vegetationswiderstand und Feststoffsedimentation veranschaulichen.

Das von Specht (2002) erläuterte Phänomen konnte von Lehmann (2003) durch Naturbeobachtungen und –messungen an der Enz bei Pforzheim belegt werden. Insbe-

sondere im Umfeld von buschartiger, starkverzweigter Vegetation (Mittelbewuchs) zeigte Lehmann (2003) einen Verlandungstrend durch die Sedimentation von sandigen Feststofffraktionen auf, der insbesondere durch kleinere und mittlere Hochwasser bewirkt wurde (vgl. **Abb. 3.28**).



Abb. 3.28: Verlandung des Uferbereiches durch Sedimentation feiner Sande nach einem mittleren Hochwasser an der Enz bei Pforzheim. Solche Sedimentationszonen, die stark durch die Ufervegetation beeinflusst werden, können mit den bisherigen numerischen Modellen (vgl. Abb. 3.27) nicht prognostiziert werden. (Aufnahme: Lehmann)

3.3 Gewässerunterhaltungsmethodik

Aufbau und Gliederung:

- 3.3.1 Aufgaben der Gewässerunterhaltung
- 3.3.2 Unterhaltungsmaßnahmen
- 3.3.3 Gewässerunterhaltungsplan
- 3.3.4 Ergänzende Empfehlungen

3.3.1 Aufgaben der Gewässerunterhaltung

Für die Entwicklung der Fließgewässer spielt die Gewässerunterhaltung eine besondere Rolle, da diese nach Abschluss der Umgestaltungsmaßnahmen den Entwicklungsprozess maßgeblich beeinflussen. Durch die Gewässerunterhaltung bei naturnahen Fließgewässern in urbanen Bereichen wird gewährleistet, dass die eigendynamischen Prozesse des Gewässers nicht zu einer Verletzung der anthropogen bedingten Restriktionen führen.

Als anschauliches Beispiel sei hier die Verschärfung der Hochwassergefährdung von gewässernahen Siedlungsbereichen infolge einer starken Vegetationsentwicklung am Gewässerlauf genannt: Wie aus den Formelwerken in Kap. 3.1.2 deutlich wird, wirkt die Vegetation als Strömungswiderstand und führt so zu größeren Fließtiefen bei entsprechenden Abflussereignissen.

Das Beispiel lässt sich ergänzen durch die Einbeziehung gewässermorphologischer Änderungen infolge hydrodynamischer Belastungen und infolge des in Kap. 3.2.4 erwähnten Verlandens vegetationsbestandener Uferbereiche: Eindeutig kann auch in diesem Fall eine Verschlechterung der Hochwassersicherheit abgeleitet werden, wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit noch im Kapitel 6 anhand echter Naturmessdaten aufgezeigt wird.

Die Gewässerunterhaltung hat somit bei urbanen Fließgewässern verstärkt die Aufgabe, den Hochwasserschutz vor dem Hintergrund einer eigendynamischen Gewässerentwicklung zu gewährleisten. Um die hierfür notwendigen Entscheidungen bzgl. durchzuführender Maßnahmen treffen zu können, erfordert es nachhaltige Untersuchungen der hydraulischen und gewässermorphologischen Parameter sowie den zielgerichteten Einsatz der zur Verfügung stehenden Berechnungsmethoden.

Darüber hinaus umfasst die Gewässerunterhaltung die Instandhaltung aller wasserbaulichen Anlagen (z.B. Wehranlagen) und die Beseitigung von Abflussstörungen im Gewässerbett.

Im Einzelnen gehören zu diesen Aufgaben:

- im aquatischen Bereich

Freihalten und Räumen des Gewässerbettes (z.B. Entfernung von Krautwuchs und Auflandungen, Entschlammungen);

- im amphibischen Bereich
 - Ufersicherungsarbeiten (z.B. Sicherung der Ufer unter Verwendung naturnaher Bauweisen und Baustoffe, Mahd von Uferföhricht und Uferstauden);
- im terrestrischen Bereich
 - Pflanzen- und Gehölzpflege sowie die Sicherung der Ufer- und Vorlandbereiche (z.B. Pflanzen und Pflege von Gehölzbeständen, Böschungsmahd zur Sicherung oder Herstellung einer geschlossenen Grasnarbe, Sicherung der Ufer, Vorländer und wasserbaulicher Konstruktionen).

Die rechtliche Grundlage der Gewässerunterhaltung basiert auf § 28 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland (WHG). Ergänzende Regelungen hierzu finden sich im Naturschutzrecht und im Fischereirecht sowie in den Gesetzen auf Landesebene.

Grundsätzlich sollen die Unterhaltungsmaßnahmen sowohl den wasserwirtschaftlichen Belangen als auch denjenigen des Naturschutzes und der Landespflege dienen. Diese Zielsetzung entspricht einer starken Orientierung am § 1a Abs. 1 des WHG, wonach „[...] die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushaltes [...]“ zu bewirtschaften sind. Diese integrale Betrachtungsweise wird auch als naturnahe Gestaltung und Bewirtschaftung des Gewässerbettes bezeichnet (vgl. Patt, Jürjing und Kraus, 2004).

Die Gewässerunterhaltung im urbanen Bereich hat sich demnach am Erhalt der Abflussleistung (und nicht am Erhalt des Ausbauzustandes) sowie an der Funktion des Gewässers als Teil des Naturhaushaltes zu orientieren (vgl. **Abb. 3.29**).

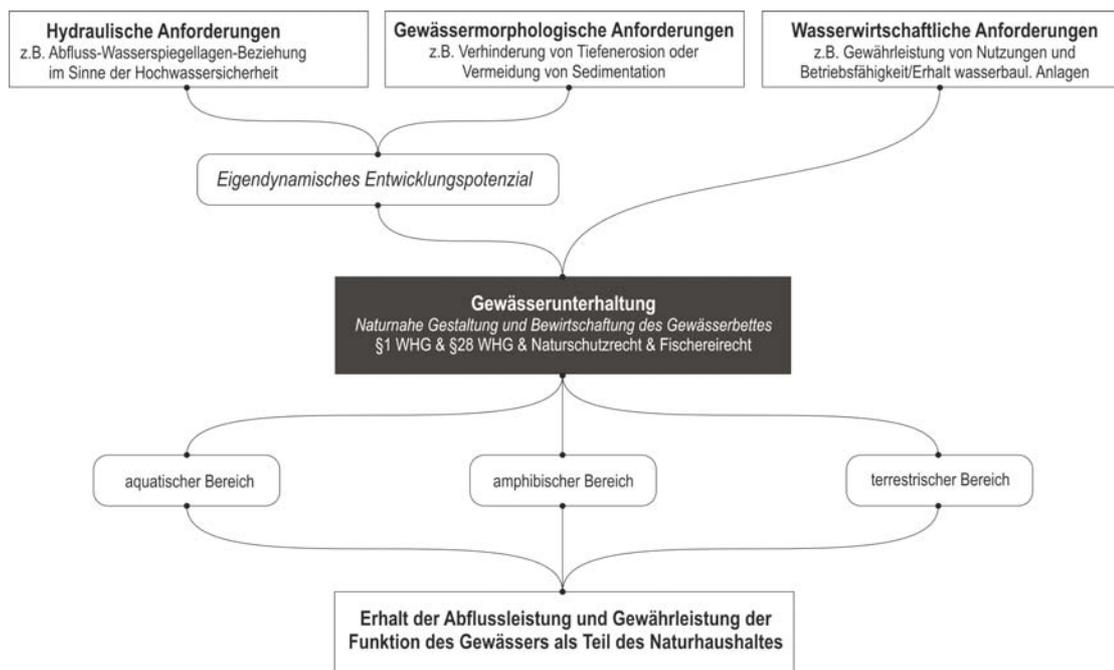


Abb. 3.29: Skizze zur Verdeutlichung der Aufgaben der Gewässerunterhaltung.

3.3.2 Unterhaltungsmaßnahmen

Die Unterhaltungsmaßnahmen müssen sich an den Bewirtschaftungszielen und -anforderungen der § 25a bis § 25d des WHG ausrichten und dürfen die dort genannten Ziele nicht gefährden. Eine ausführliche Erläuterung dieser Maßnahmen ist in Lehmann und Schneider (2004) dargestellt. Einige dieser Arbeiten fallen regelmäßig im Jahresgang an, andere nur bei Bedarf und eher unregelmäßig (vgl. **Tab. 3.4**).

Tab. 3.4: Maßnahmen zur Gewässerunterhaltung (in Anlehnung an Lehmann und Schneider, 2004).

Maßnahmen zur Gewässerunterhaltung	
Regelmäßig wiederkehrende Unterhaltungsmaßnahmen	Unregelmäßig wiederkehrende Unterhaltungsmaßnahmen
Mechanische Unterhaltung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mahd ▪ Krauten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Räumung ▪ Reduzierte Räumung ▪ Gehölzpflege ▪ Beseitigung von Schäden am Gewässerbett ▪ Arbeiten nach Hochwassern und Unwettern ▪ Unterhaltung von wasserbaulichen Anlagen ▪ Wühltierbekämpfung
Biologische Unterhaltung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schafbeweidung ▪ Pflanzenfressende Fische ▪ Konkurrenzstarke Pflanzen 	
Chemische Unterhaltung ¹ : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pflanzentötende Mittel (Herbizide) ▪ Wuchshemmende Mittel (Phytotranquilizer) 	
¹ i.d.R. heute nicht mehr im Einsatz	

3.3.3 Gewässerunterhaltungsplan

Zur Koordinierung und Planung der Unterhaltungsarbeiten im urbanen Bereich sollte ein Unterhaltungsplan aufgestellt werden, in dem alle durchzuführenden Arbeiten im Detail aufgeführt sind. Vor der Aufstellung des Plans ist grundsätzlich zu prüfen, ob der Einsatz von Geräten zwingend erforderlich ist, oder ob das Unterhaltungsziel auch auf andere Weise (z.B. durch Beschattung oder Gewässerumbau) erreicht werden kann.

Um ökologische Aspekte bei Unterhaltungsarbeiten und speziell beim Einsatz von Geräten berücksichtigen zu können, sind oftmals weitergehende faunistische und vegetationskundliche Vorgaben erforderlich. Hier drückt sich wiederum die bereits in Kap. 2.1 erläuterte Interdisziplinarität im naturnahen Wasserbau aus:

Häufigkeit und Zeitpunkt der Unterhaltungsarbeiten haben größeren Einfluss auf die Entwicklung der Lebensgemeinschaften als die Arbeitsweise des eingesetzten Geräts. Eine ständige Störung der natürlichen Sukzession ist hierbei von entscheidendem Nachteil für die Entwicklung der Lebensgemeinschaften (vgl. DVWK, 1999 und ATV-DVWK, 2002).

Da Unterhaltungsmaßnahmen immer einen Eingriff in die bestehenden Standortverhältnisse und Lebensräume bedeuten, sind die Vorteile und Nachteile der verschiedenen Unterhaltungsformen gegeneinander abzuwägen. Somit sollten die Unterhaltungsarbeiten auf

- die biologischen Zyklen (z.B. Laichzeiten der Fische, Brutzeiten der Vögel, jahreszeitlich bedingte Wachstumsperioden der Pflanzen),
- die speziellen Strukturen des Lebensraumes (z.B. empfindlicher Substrataufbau) und
- die hydraulischen Einflussfaktoren (z.B. Hochwasserwahrscheinlichkeiten)

abgestimmt werden.

Der Unterhaltungsplan beinhaltet somit Angaben zur Lokalität und Notwendigkeit sowie zur Art und zum Umfang der Unterhaltungsarbeiten und zur Durchführungszeit. Eine exemplarische Darstellung unterschiedlicher Unterhaltungspläne ist in Lehmann und Schneider (2004) aufgeführt.

3.3.4 Ergänzende Empfehlungen

Die Praxis und die im Rahmen der Arbeit gesammelten Erfahrungen an den Landes-pilotprojekten in Baden-Württemberg haben gezeigt, dass die Umsetzung der im Unterhaltungsplan geforderten Arbeiten oftmals an der Durchführbarkeit bzw. dem dafür notwendigen Aufwand scheitern.

Vielmehr verlässt sich der Praktiker auf sein Erfahrungswissen bzw. „auf sein Auge“ und entscheidet relativ unplanmäßig in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ressourcen über den Einsatz und die Durchführung einzelner Unterhaltungsmaßnahmen. Der Grund vieler „radikaler“ Unterhaltungsarbeiten resultiert oftmals auch aus dem öffentlichen Druck, der auf den Unterhaltungspflichtigen vor Ort lastet.

Andererseits zeigt die Auswertung unterschiedlicher Unterhaltungspläne, welche die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg für die Pilotmesstrecke der renaturierten Enz bei Pforzheim durch Landschaftsplaner und Ingenieurbüros anfertigen lies, dass insbesondere die Berücksichtigung der hydraulischen Belange (Abflussleistung bei Hochwasser) zu großen Differenzen in den einzelnen Unterhaltungsplänen führt:

Aufgrund der Unfähigkeit, die eigendynamische Entwicklung des Gewässerbettes und der Vegetation und damit die Änderung des Widerstandsverhaltens des Systems zu prognostizieren und in vielen Fällen auch durch hydraulische Berechnungen zu simulieren, werden widersprüchliche Aussagen getroffen. Dies lässt sich anschaulich am Beispiel des derzeit aktuellen Unterhaltungsplanes aufzeigen (vgl. Geitz, 2000):

Zum einen wird hier die Aussage gemacht, dass „[...] der ufernahe Bewuchs derart ausdünnen ist, dass die ursprünglich im Rahmen der Planung vorgesehenen be-

wuchsfreien Abflussflächen erhalten bleiben.“ Etwas später wird dann über die Gehölzpflege speziell bei den Weiden vermerkt, dass „[...] die ufernahen Weidenbestände erhalten bleiben sollen und im Rahmen von Pflegearbeiten darauf zu achten ist, dass die Weidenruten biegsam bleiben, so dass es im Hochwasserfall zu einem Umlegen kommt, wodurch das Abflussverhalten nicht beeinträchtigt wird.“ Hieraus ist abzuleiten, dass der Autor des Unterhaltungsplanes das Widerstandsverhalten des durchströmten Bewuchses nicht richtig eingeschätzt hat. Ferner wird mit seiner zweiten Aussage die erste Aussage größtenteils hinfällig, da die Ufer der Enz im Untersuchungsgebiet überwiegend mit Weiden bestanden sind.

Aufbauend auf das zuvor Genannte lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Ein naturnahes Gewässer unterliegt fortwährenden Entwicklungsprozessen, die das Erscheinungsbild und die Funktionalität prägen. Um den Entwicklungen gerecht werden zu können, sollte der Unterhaltungsplan hinsichtlich hydraulischer, morphologischer, ökologischer und nutzungsbedingter Aspekte interdisziplinär abgeleitet und in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden. Für naturnahe Gewässerstrukturen wird eine Aktualisierung im Abstand von drei Jahren empfohlen.
- Um die reale Entwicklung der Gewässermorphologie und der Vegetation für die Erstellung von aktuellen Unterhaltungsplänen besser abschätzen zu können, sollte von dem Unterhaltungspflichtigen ein Monitoring wichtiger, leicht zu erfassender Daten eingefordert werden. Diese Daten sollten jeweils an ein bis zwei Referenzquerschnitten oder -abschnitten erhoben werden. Hierfür eignen sich folgende Datensätze:
 - Geometriedaten des Querschnittes, um morphologische Veränderungen nachvollziehen zu können (z.B. Tiefenerosion, Auflandung der Vorländer, Auflandungen im Bereich des Uferbewuchs, Änderung der Querschnittsform und damit der hydraulischen Abflussfläche, etc.);
 - Abmessungen einiger charakteristischer Bewuchsgruppen, um die Höhen- und Breitenentwicklung besser nachvollziehen zu können. Hierfür eignen sich insbesondere stark verästelte Wuchsformen, die bei größeren Abflussereignissen durchströmt werden. Im Rahmen der Unterhaltungsarbeiten kann auf Grundlage solcher Daten darauf geachtet werden, dass sich die quer zur Hauptfließrichtung angeordnete Bewuchsbreite nicht ändert, um ein Verringern der hydraulisch „freien“ Querschnittsfläche zu verhindern.

Erfahrungen an der Enz in Pforzheim haben gezeigt, dass Bewuchsgruppen, deren Wuchsbreite im Rahmen der Gehölzpflege nahezu konstant gehalten wurde und deren Wuchshöhe sich natürlich entwickelt hat, keine signifikante Verschlechterung der Abflussleistung zur Folge haben. Wuchsanordnungen hingegen, die sich sukzessiv verbreitert haben und

durch Unterhaltungsmaßnahmen in ihrer Wuchshöhe „flexibel und biegsam“ gehalten wurden (z.B. durch das „auf den Stock setzen“ von dreijährigen Weiden), bewirkten eine drastische Reduktion der Abflussleistung und somit eine Anhebung der Wasserspiegellagen im Hochwasserfall.

- Fotographische Dokumentation des Gewässerabschnittes vom immergleichen Standort aus (z.B. von der Mitte einer Brücke), um die eigendynamische Entwicklungen auch visuell dokumentieren zu können. Ferner sind Fotoaufnahmen, die bei Hochwasserabfluss gemacht wurden, für die Hydrauliker wichtige Hilfsmittel zur Modellierung des Strömungsverhaltens.
- Informationen zum Feststofftrieb, die z.B. relativ einfach durch das Beobachten von Verlandungen im Aufweitungsbereich des Hauptquerschnittes gesammelt werden können.

Um beispielsweise Informationen bzgl. der Feststofffrachten bei Hochwasser in der Enz bei Pforzheim zu bekommen, wurde eine Anlandung im Unterwasser einer Wehranlage ca. drei km unterhalb des eigentlichen Untersuchungsgebietes beobachtet und messtechnisch vor und nach einem Hochwasser dokumentiert (vgl. **Abb. 3.30**).



Abb. 3.30: Anlandung von Feststoffen im Bereich einer Gerinneaufweitung unterhalb einer Wehranlage bei Niefern/Enz ca. drei Kilometer unterhalb der Untersuchungsstrecke Pforzheim/Enz. (Aufnahme: Lehmann)

Keine großen Schwierigkeiten...

„Keine großen Schwierigkeiten beim Umgang mit Zahlen, hydraulischen Tafeln und Tabellen hat nur der Anfänger. Wer dagegen Gelegenheit hatte zu beobachten, wie sich ausgebauten Gewässer im Laufe von Jahrzehnten mannigfaltig verändern und damit die ursprünglichen Berechnungsgrundlagen hinfällig werden, der wird die Berechnung wohl nicht ganz in Frage stellen, ihre Bedeutung aber entsprechend gewichten.“

Baumeister G. Schade in seinem Bericht zum Ausbau der unteren Murr bei Steinheim und den eigendynamischen Entwicklungen, die bis 1984 beobachtet wurden. (Schade, 1985, S. 52).

4 Empfehlungen zur Strömungsberechnung

Aufbau und Gliederung:

- | | |
|-------|--|
| 4.1 | <u>Schritt 1:</u> Gerinnegliederung und Parametererfassung |
| 4.1.1 | Gliederung infolge der Gerinnegeometrie |
| 4.1.2 | Gliederung infolge der Vegetation |
| 4.2 | <u>Schritt 2:</u> Berechnung der Teilwiderstandsbeiwerte |
| 4.2.1 | Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit |
| 4.2.2 | Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen der Vegetationssektionen |
| 4.2.3 | Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen der vegetationsfreien Sektionen |
| 4.3 | <u>Schritt 3:</u> Berechnung des Durchflusses |
| 4.4 | Anwendungsbeispiel |

Natürliche und naturnahe Gewässer weisen unregelmäßige Querschnittsformen auf. Zur Durchführung hydraulischer Berechnungen mit Hilfe der derzeit gängigen Fließformeln (vgl. Kap. 3.1) hat der Anwender zunächst die reale Situation zu erfassen und durch geometrische, hydraulische und formbeschreibende Parameter abstrakt darzustellen, so dass eine Kompatibilität zu den geometrie- und Formbedingungen der Berechnungsansätze gewährleistet ist.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass dadurch in der Praxis große Probleme auftreten und in der Abstraktion oftmals der Ursprung gravierender Fehler zu finden ist. Bislang gibt die Fachliteratur hierzu nur wenig Hilfestellung, so dass dem Praktiker derzeit keine konkrete Anwendungsmethodik zur Verfügung steht.

Dieses Kapitel liefert aufbauend auf den in Kap. 2 und Kap. 3 erläuterten Grundlagen und Zusammenhängen eine wissenschaftliche Durchdringung der Thematik und stellt ein praxisnahes methodisches Vorgehen zur Durchflussberechnung bei naturnahen Fließgewässern auf Basis einer eindimensionalen Strömungsanalyse vor. Neu hierbei ist die dreistufige Vorgehensweise zur Quantifizierung sämtlicher im Querschnitt vorhandener Strömungswiderstände. Aufbauend hierauf liefert die Methodik dem Anwender in transparenter Weise widerstandsbezogene Ansätze zur Berechnung der Strömungsgrößen in den betrachteten Querschnittssektionen, woraus sich letztendlich die Fließgeschwindigkeiten, Durchflüsse und/oder Wasserspiegellagen berechnen lassen.

Die im Rahmen der Arbeit erstellte Methodik basiert auf den turbulenz-theoretischen Ansätzen nach Lindner (1982) und Pasche (1984) sowie den Modifikationen und Beobachtungen von Schumacher (1995), Oplatka (1998), Gerstkrasser (2000), Stephan (2002) und Schnauder (2004). Sie ermöglicht die Strömungsberechnung vegetationsbestandener Gewässerläufe und somit eine Prognose von Wasserspiegellagen und/oder Abflusskapazität unter Berücksichtigung der Entwicklung der gewässernahen Vegetation.

Die im Rahmen der folgenden Methodik dargestellten iterativen Berechnungen stellen sich für den Anwender im Vergleich zur Strömungsberechnung mit empirischen Fließformeln kompliziert und aufwendig dar. Durch die Umsetzung der Formelwerke auf EDV-technischer Basis bietet die Methodik jedoch ein sehr komfortables und bezüglich der Ergebnisqualität genaues Verfahren an, dass den hydraulischen Anforderungen eigendynamischer naturnaher Gewässerläufe gerecht wird (vgl. **Anlage 5**). Im Gegensatz zu den empirischen Verfahren muss der Ingenieur keine Schätzungen oder Kalibrierungen empirischer Beiwerte mehr durchführen, sondern kann mit einfach messbaren Eingangsdaten, die direkt vor Ort erhoben werden, die Berechnung der Strömungsgrößen durchführen.

Als Grundlage wird von einem beliebigen, naturnahen Fließgewässerquerschnitt ausgegangen. Hierfür gilt es, auf Basis der vorhandenen Strömungswiderstände die Strömungsgrößen zu berechnen. Die bisherigen entwickelten Verfahren zur Widerstandsquantifizierung erlauben dabei eine Klassifizierung anhand der Querschnittsgeometrie, des Vegetationsbestandes und der Oberflächenrauheiten in sieben unterschiedliche Typen (vgl. **Abb. 4.1**).

Die möglichst genaue Ermittlung des Fließwiderstandes ist, neben der richtigen Darstellung der Querschnittsgeometrie im Abflussmodell, entscheidend für die Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse.

Geometrisch gegliedertes Gerinne mit Vegetation

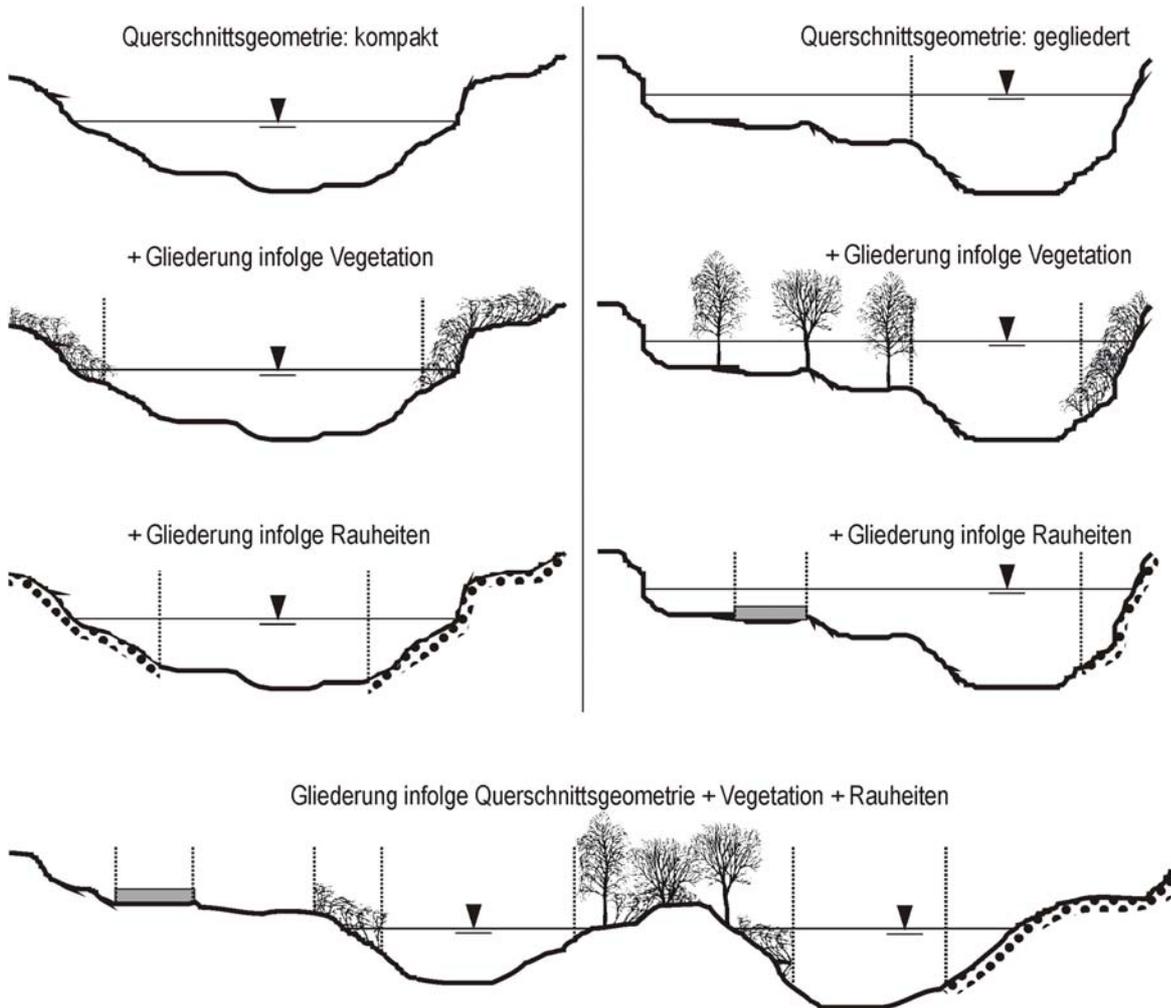


Abb. 4.1: Exemplarische Klassifizierung naturnaher Fließgewässerquerschnitte anhand der Strömungswiderstände infolge Geometrie, Vegetation und Oberflächenrauheit.

Die Verwendung empirischer Formelwerke (z.B. GMS-Formel) eignet sich bei naturnahen Fließgewässerquerschnitten selbst bei entsprechender Erfahrung des Bearbeiters nur zur groben Vorabschätzung, die durchaus praktisch und zeitsparend sein kann. Bei sehr heterogenen Strukturen führt die Anwendung empirischer Formelwerke meist jedoch schnell zu großen Ungenauigkeiten, da...

- ...die verwendeten empirischen Widerstandsbeiwerte (z.B. k_{st} -Wert) von der Fließtiefe abhängig sind und somit eine tiefenabhängige Vorgabe der Beiwerte notwendig wird. Eine solche Vorgabe ist jedoch nur durch die Kalibrierung anhand vorhandener Naturmessungen möglich. In der Praxis sind solche Messungen oftmals nicht vorhanden, weshalb die Vorgabe auf Schätzungen beruht.
- ...die empirischen Beiwerte als Summenparameter der Einzelwiderstände gelten, wodurch bei stark strukturierten und vegetationsbestandenen Gewässerabschnitten Schwierigkeiten bei der Schätzung entstehen. Zudem kann die Auswirkung in-

folge von Entwicklungsprozessen einzelner Strukturelemente in einem Summenparameter nicht exakt abgebildet werden (z.B. bei Wachstum der Vegetation).

- ...für eine Berücksichtigung des Trennflächenwiderstandes, welcher die Interaktionsprozesse zwischen einzelnen Gerinnesektionen abbilden soll, keine allgemeingültigen empirischen Ansätze existieren.
- ...durch eine Fehleinschätzung der empirischen Beiwerte i.d.R. eine lineare Fehlerfortpflanzung auf das Berechnungsergebnis wirkt.

Die aufgezählten Gründe gegen eine Anwendung empirischer Formelwerke lassen sich durch die diskutierten Formelansätze in Kap. 3.1.1.4 untermauern und ausweiten. Hieraus folgt der logische Schluss, dass die Anwendung der allgemeinen Fließformel nach Darcy-Weisbach zur Quantifizierung der Strömungsgrößen in naturnahen Fließgewässerquerschnitten besser geeignet ist. Die Vorteile dieser physikalisch begründeten und dimensionsreinen Formel sind unter anderem:

- Die allgemeine Fließformel stammt ursprünglich aus der Rohrhydraulik und ist aufgrund der dort gegebenen gleichförmigen Schubspannungsverteilung physikalisch bestens fundiert. Zahlreiche Arbeiten und Versuche haben gezeigt, dass diese Formel in modifizierter Form auch zuverlässig auf offene Gerinne mit ungleichförmiger Schubspannungsverteilung angewendet werden kann, woraus letztendlich die neuen Ansätze zur Berechnung des Widerstandsbeiwerts resultierten.
- Es ist möglich, verschiedene Einzelwiderstandsbeiwerte getrennt zu berechnen und zu überlagern, so dass die allgemeine Fließformel für zukünftige Entwicklungen offen ist: Neue Verfahren zur Berechnung des Fließwiderstandes können einfach als Zusatzmodule integriert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird im Folgenden ein methodisches Konzept vorgestellt (und in Kap. 6 anhand der Auswertung von Naturmessdaten auch hinsichtlich seiner Anwendbarkeit und Genauigkeit verifiziert), dass die Quantifizierung der Strömungswiderstände und der Strömungsparameter für den Praktiker transparent schrittweise ermöglicht. Im Zentrum steht ein dreistufiger Ablauf, der jeweils geeignete Arbeitsschritte zusammenfasst (vgl. **Abb. 4.2**).

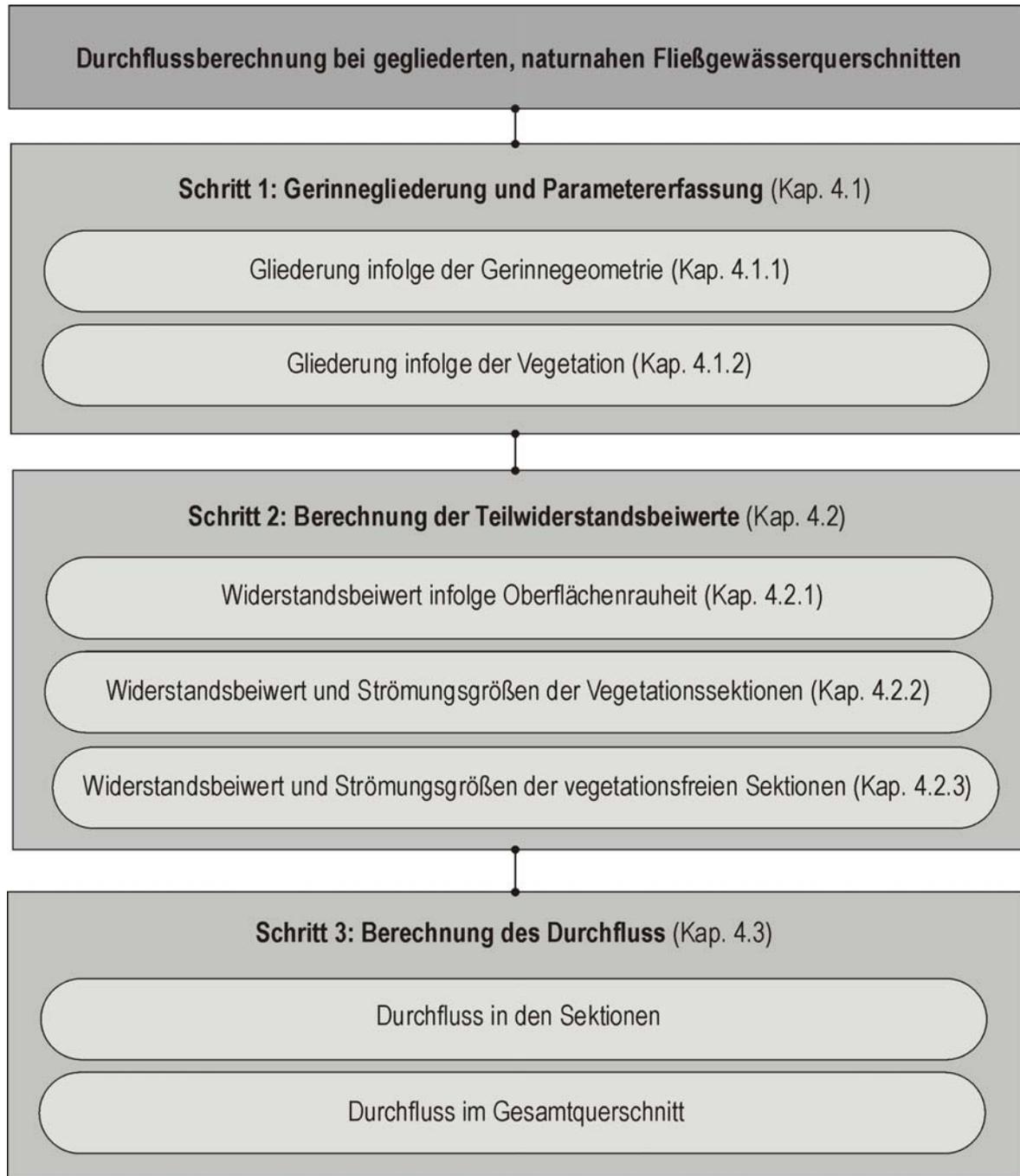


Abb. 4.2: Dreistufiges Ablaufkonzept zur eindimensionalen Strömungsberechnung naturnaher Gewässer.

Neu bei dieser Methodik ist die Untergliederung des Gewässerprofils in beliebig viele Sektionen (Schritt 1). Die Strömungsgrößen werden im Schritt 2 für jede Sektion separat berechnet, wobei hier ggf. die Auswirkungen der Interaktionsprozesse mit berücksichtigt werden. Im Schritt 3 folgt als Synthese vor dem Hintergrund der Kontinuitätsbedingung die sektionsweise Berechnung des Durchflusses, wobei hier ebenfalls die Interaktionsprozesse berücksichtigt werden. Aus den Sektionsdurchflüssen kann abschließend der Gesamtdurchfluss berechnet werden.

4.1 Schritt 1: Gerinnegliederung und Parametererfassung

Ziel dieses Schrittes ist die derzeit in der praktischen Anwendung stark problembehaftete Abstraktion der realen Situation durch wenige Parameter, mit deren Hilfe die Berechnung der strömungsbestimmenden Widerstände möglich werden. Für naturnahe Fließgewässer bedeutet dies in Anlehnung an Kap. 3.1.1.7 die Darstellung des Untersuchungsgebietes durch eine Abfolge charakteristischer Querschnittsdatensätze. Diese Datensätze beinhalten neben der eigentlichen geometrischen Gewässerbettstruktur auch Informationen zur Oberflächenrauheit und Vegetation.

Die Schwierigkeit besteht in der Auswahl der charakteristischen Querschnitte sowie in der Ermittlung der zugehörigen charakteristischen Datensätze bzgl. der Rauheiten und Vegetation. Um eine möglichst genaue Modellierung durchführen zu können, muss hierzu die hydraulische Situation sorgfältig beobachtet werden.

Als Beispiel sei die Abgrenzung von hydraulisch unwirksamen Teilbereichen (z.B. nicht durchströmte und/oder gestaute Bereiche innerhalb eines Querschnittes) erwähnt, deren Berücksichtigung bei der Modellierung unbedingt erforderlich ist. Solche Bereiche werden aufgrund der Erfahrung des Modellierers erkannt und können nicht durch Berechnungen identifiziert werden.

4.1.1 Gliederung infolge der Gerinnegeometrie

Die eindimensionale Strömungsbetrachtung geht davon aus, dass an jeder Stelle im durchflossenen Querschnitt annähernd die gleiche Fließgeschwindigkeit vorherrscht. Ergeben sich aufgrund der Querschnittsgeometrie abschnittsweise stark unterschiedliche Fließtiefen über den Querschnitt, so muss infolge der Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der Fließtiefe (vgl. Gl. 3.11) von unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten in diesen Abschnitten ausgegangen werden. In diesem Fall ist der Querschnitt zu gliedern und dadurch in einzelne Sektionen mit je annähernd gleicher Fließgeschwindigkeit und Fließtiefe aufzuteilen.

An den Sektionsübergängen ergeben sich Diskontinuitätsbereiche, bei denen in Form von Wirbeln ein Massen- und Impulsaustausch auftritt. Um diese Diskontinuitätsbereiche im Strömungsgeschehen zu berücksichtigen, sind an den Sektionsgrenzen fiktive vertikale Trennflächen anzuordnen. Diesen Trennflächen wird im Schritt 2 ein fiktiver Widerstand zugeordnet (Interaktionswiderstand).

Da die gesamten in Kap. 3.1.2 dargestellten Formelwerke zur Quantifizierung der Strömungswiderstände aus Laborversuchen mit geometrisch optimierten Gerinnequerschnitten abgeleitet wurden (vgl. **Abb. 3.15** bis **Abb. 3.17**), muss die reale Situation weitestgehend auf die Grundgeometrie der Laborversuche angepasst werden, um die Anwendbarkeit der Formelwerke zu gewährleisten. Dies drückt sich z.B. durch einheitliche Fließtiefen in den einzelnen Querschnittssektionen aus. Hierzu empfiehlt sich die Verwendung der sog. „hydraulischen Fließtiefe“ (vgl. DIN, 1993). In

Abb. 4.3 sind praxisrelevante Möglichkeiten zur Ableitung der hydraulischen Fließtiefe für unterschiedliche prismatische Sektionen skizziert.

a) Sektionierung durch eine rechteckige Approximation (vgl. **Abb. 4.3, a**):

$$h_{\text{hyd}} = \frac{A}{b_{\text{wsp}}} \quad \text{Gl. 4.1}$$

h_{hyd} hydraulische Fließtiefe (m)
 Adurchflossene Querschnittsfläche (m²)
 b_{wsp}Wasserspiegelbreite (m)

b) Sektionierung durch eine halbtrapezförmige Approximation (vgl. **Abb. 4.3, b**):

$$h_{\text{hyd}} = -\frac{b_{\text{so}}}{n} + \sqrt{\left(\frac{b_{\text{so}}}{n}\right)^2 + \frac{2 \cdot A}{n}} \quad \text{Gl. 4.2}$$

h_{hyd} hydraulische Fließtiefe (m)
 Adurchflossene Querschnittsfläche (m²)
 b_{so}äquivalente Sohlenbreite (m)
 nNeigung der Böschung (1:n)

c) Sektionierung durch eine trapezförmige Approximation (vgl. **Abb. 4.3, c**):

$$h_{\text{hyd}} = -\frac{b_{\text{so}}}{2 \cdot n} + \sqrt{\frac{b_{\text{so}}^2}{4 \cdot n^2} + \frac{A}{n}} \quad \text{Gl. 4.3a}$$

h_{hyd} hydraulische Fließtiefe (m)
 Adurchflossene Querschnittsfläche (m²)
 b_{so}äquivalente Sohlenbreite (m)
 nNeigung der Böschung (1:n)

d) Sektionierung durch eine dreieckige Approximation (vgl. **Abb. 4.3, d**)

$$h_{\text{hyd}} = h_{\text{mittel}} = 0,5 \cdot h_{\text{T}} \quad \text{mit der Böschungsneigung } \tan(\alpha) = \frac{b_{\text{wsp}}}{h_{\text{T}}} \quad \text{Gl. 4.3b}$$

h_{hyd} hydraulische Fließtiefe (m)
 h_{mittel} mittlere Fließtiefe (m)
 h_{T}Höhe der Trennfläche an der Sektionsgrenze (m)
 b_{wsp}Wasserspiegelbreite (m)
 αNeigung der Sektionswand (°)

In **Abb. 4.4** sind die Schritte bezüglich der Sektionierung infolge der Gerinnegeometrie exemplarisch graphisch dargestellt.

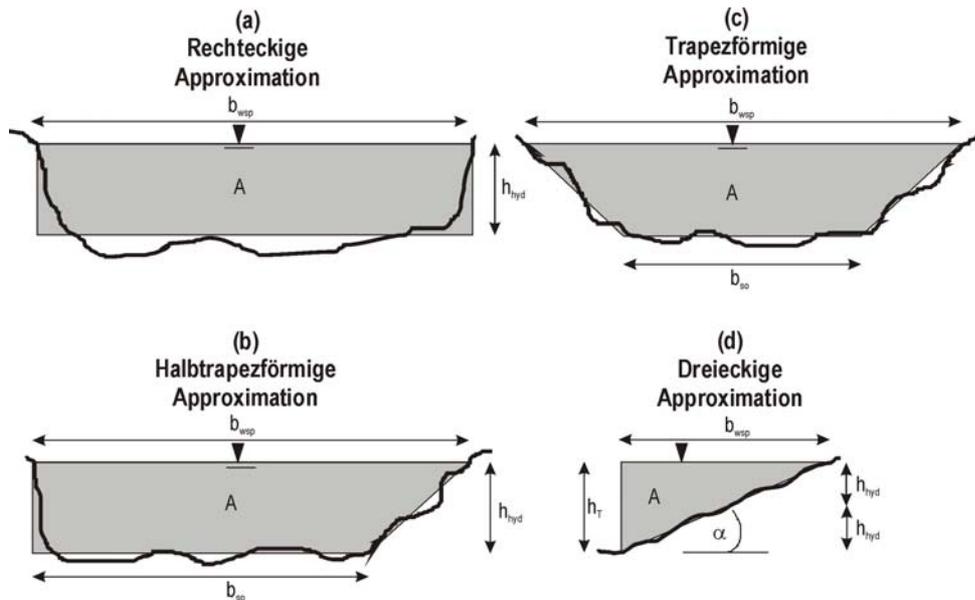


Abb. 4.3: Abstraktion einer realen Sektionsgeometrie als Sektion mit einheitlicher hydraulischer Fließtiefe. (Lehmann, in Anlehnung an DIN, 1993)

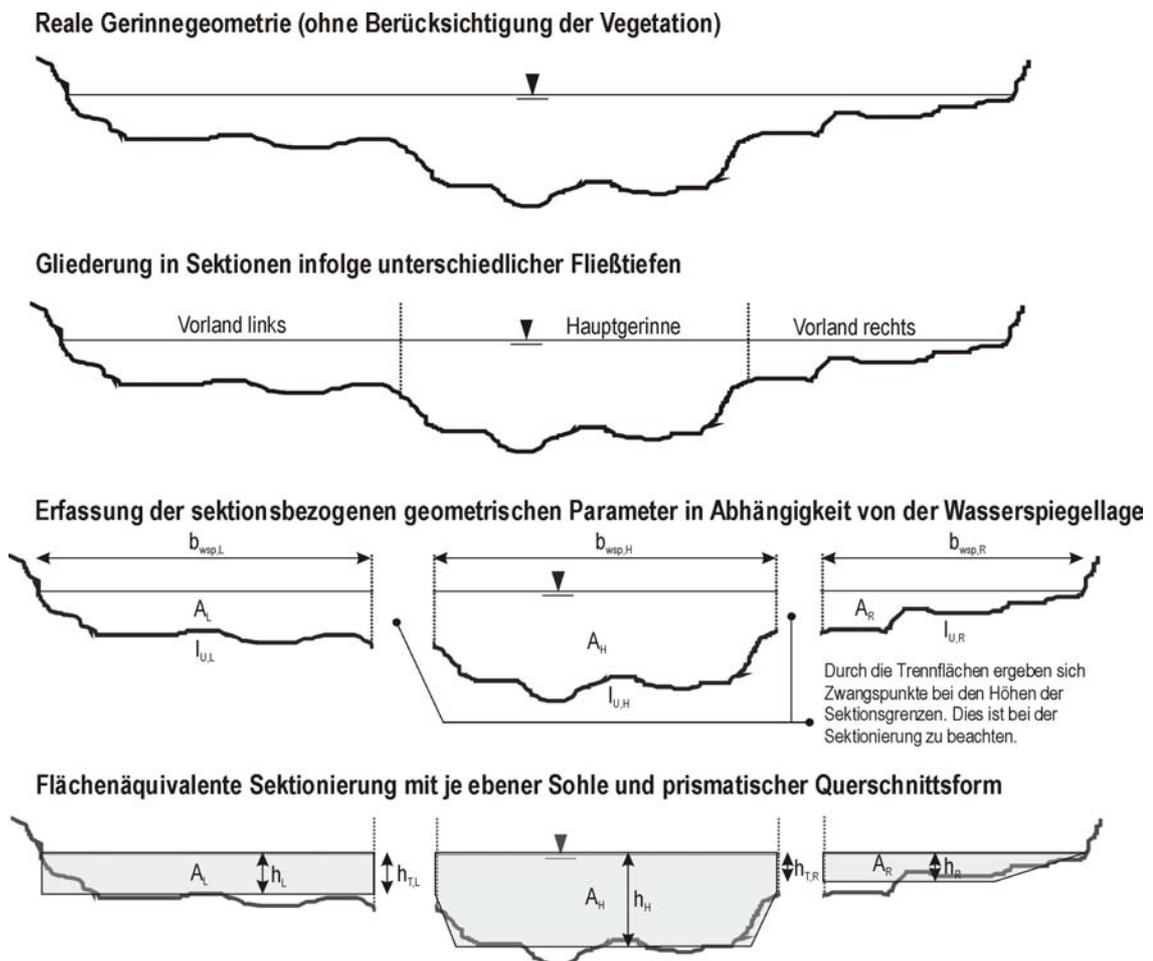


Abb. 4.4: Exemplarische Darstellung der geometrischen Gliederung eines Gewässerquerschnittes.

4.1.2 Gliederung infolge der Vegetation

Bei der Gliederung infolge der Gerinnegeometrie (vgl. Kap. 4.1.1) wurde von näherungsweise einheitlichen Rauheiten in den einzelnen Sektionen ausgegangen. Aufgrund der in Kap. 3.1.2 und in Kap. 3.1.3 erläuterten Modelluntersuchungen sowie durch Beobachtungen in der Natur konnte gezeigt werden, dass an den Rändern vegetationsbestandener Sektionen ähnlich wie in den Trennflächen zwischen den geometrisch gegliederten Sektionen ausgeprägte Wirbel- und Walzenströmungen mit einem intensiven Massen- und Impulsaustausch vorhanden sind.

„Infolge dieser Makroturbulenzen gelangt langsam fließendes Wasser aus den Bewuchszonen in den bewuchsfreien Querschnitt und bremst die Hauptströmung erheblich. Dagegen beschleunigt das Wasser, das aus Kontinuitätsgründen in die Vegetation zurückströmt, den Abfluss im Bewuchs wegen der großen Fließwiderstände relativ wenig.“
(DVWK, 1991, Seite 8).

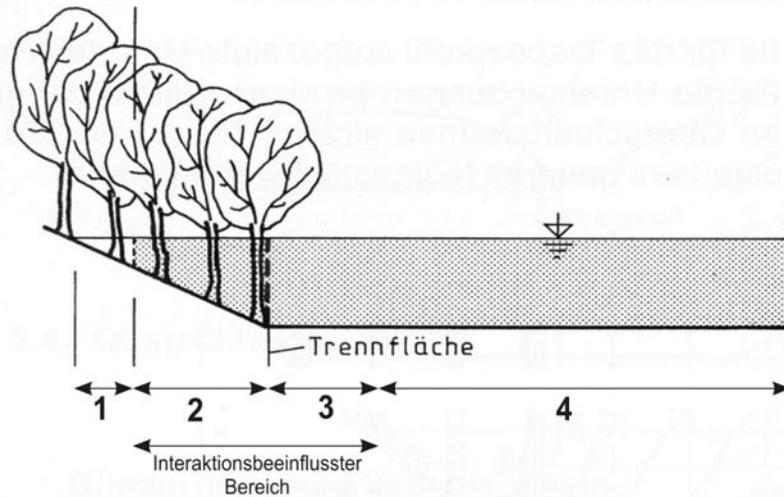
In Anlehnung an **Tab. 3.2** lassen sich die Strömungsvorgänge in Gerinnen mit Vegetationsbestand generell in vier hydraulische Einflussbereiche unterteilen (vgl. **Abb. 4.5**). Die Breite der einzelnen Bereiche spielt bei der Berechnung eine bedeutende Rolle:

Während im Bereich 1 das Abflussgeschehen nur von den Fließwiderständen der Vegetation und/oder der Sohle bestimmt wird, kommen in den Bereichen 2 und 3 die Widerstände aus der Makroturbulenz hinzu. Der von der Vegetation unbeeinflusste Bereich 4, der sich nur bei sehr breiten Querschnitten einstellt, wird nur von der Oberflächenrauheit der Gerinnewandung beeinflusst.

Infolge der vier aufgezeigten hydraulischen Einflussbereiche und der an den Grenzen stattfindenden Strömungsdiskontinuitäten wird bei naturnahen Gewässerquerschnitten nach der geometrischen Gliederung eine ergänzende Gliederung infolge der Vegetation notwendig. Ebenfalls sind hierbei fiktive Trennflächen zwischen den vegetationsbestandenen und freien Sektionen einzufügen (in einigen Fällen wird dadurch die Verschiebung bereits vorhandener Trennflächen aus der zuvor gemachten geometrischen Gliederung notwendig).

Diese fiktiven Trennflächen werden in der vegetationsbestandenen Sektion als Schubspannungsfrei angenommen. An der benachbarten vegetationsfreien Sektion wird die fiktive Trennfläche mit einer Scheinschubspannung beaufschlagt, die durch einen Widerstandsbeiwert ausgedrückt wird. Dieser Widerstandsbeiwert setzt sich aus dem Formwiderstandsbeiwert der Vegetationssektion und aus dem Interaktionswiderstandsbeiwert zusammen.

geometrisch kompakter Querschnitt



geometrisch gegliederte Querschnitt

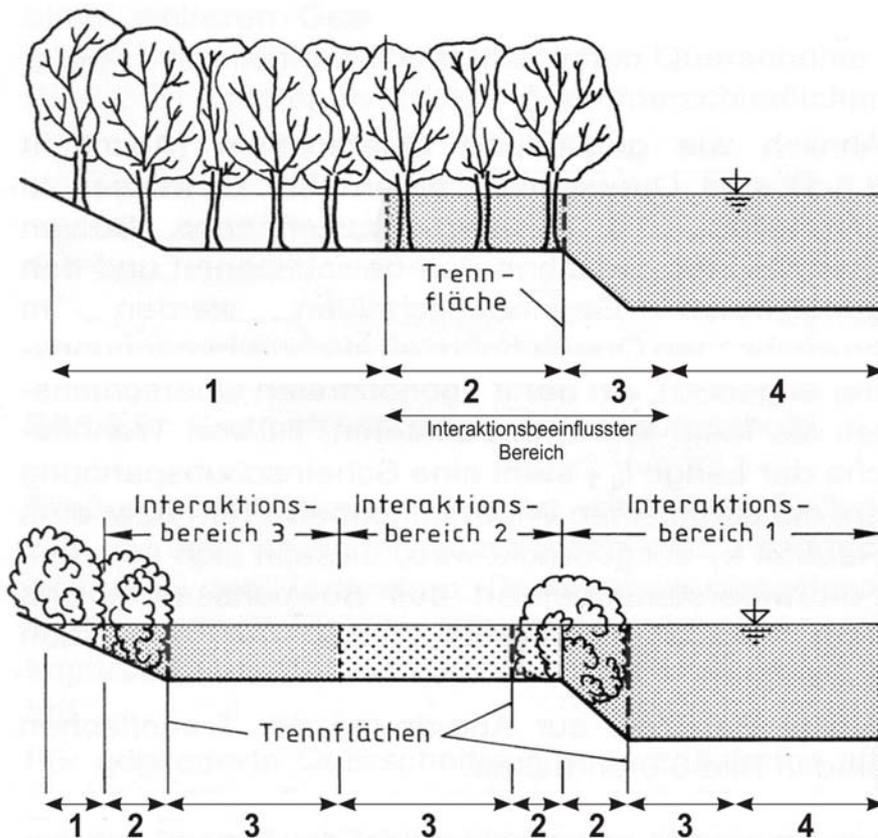


Abb. 4.5: Einteilung vegetationsbestandener Querschnitte in unterschiedliche hydraulische Einflussbereiche. (Verändert nach DVWK, 1991)

Durchströmte, natürliche gewässernahe Vegetation besteht i.d.R. aus Röhrichten, Gräsern, Sträuchern oder Bäumen. Bei der hydraulischen Charakterisierung der Vegetation wird angenommen, dass ein unregelmäßiger Vegetationsbestand in seiner hydraulischen Widerstandswirkung durch eine idealisierte, regelmäßige um- und durchströmte Störkörperansammlung modelliert werden kann. Die Parameter zur Darstellung der Vegetation ergeben sich aus den Formelwerken in Kap. 3.1.2.2 und führen letztendlich bei Kleinbewuchs zu einer äquivalenten Oberflächenrauheit und bei Mittel- und Großbewuchs zu den Anordnungsparametern (a_x und a_y) sowie zu äquivalenten Vegetationsdurchmessern (d_{veg}).

Grundsätzlich hat der Anwender hier zwischen zwei Fällen der Parametererhebung zu unterscheiden:

- Bei der Planung einer naturnahen Gewässerlaufgestaltung und den damit verbundenen hydraulischen Berechnungen ist der Anwender auf das Abschätzen der Vegetationsparameter angewiesen. Hierzu können bei Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung vorhandene Bepflanzungspläne als Grundlage dienen. Des Weiteren lassen sich aus den Zusammenstellungen in Kap. 6 einige Daten als Erfahrungswerte ableiten.
- Soll für ein bestehendes Fließgewässer eine Strömungsberechnung durchgeführt werden, können die Vegetationsparameter durch eine Bestandsaufnahme erhoben werden. Hierfür werden die folgenden Handlungsempfehlungen gegeben.

Im Rahmen einer Ortsbegehung sind zunächst Berechnungsabschnitte anhand der Vegetationsstrukturen einzuteilen. Jeder Berechnungsabschnitt sollte dabei relativ homogene Vegetationsstrukturen aufweisen, was sich nicht nur durch die Art der Vegetation sondern auch durch eine etwa gleiche Vegetationsdichte und annähernd gleichen Vegetationsgrößen ausdrückt.

Um im Feld relativ zügig und zuverlässig repräsentative Vegetationsparameter in den einzelnen Berechnungsabschnitten ermitteln zu können, wird in Anlehnung an DVWK (1991) empfohlen, eine Probefläche (A_{pro}) im Vegetationsbereich zu definieren. Innerhalb dieser Probefläche werden dann je nach Vegetationsart folgende Erfassungen durchgeführt, woraus sich die äquivalenten Vegetationsparameter erfassen lassen:

a) nur Bäume in der Probefläche

Die Anzahl der Bäume (n_B) innerhalb der Probefläche wird erfasst. Durch die Relationsbildung mit der Probefläche kann die Fläche je Baum berechnet werden. Unter der Annahme, dass die Bäume mit einem Abstand a_x in Fließrichtung und einem Abstand $a_y = C \cdot a_x$ quer zur Fließrichtung angeordnet sind, können die äquivalenten Anordnungsparameter bestimmt werden.

$$a_x \cdot a_y = \frac{A_{\text{pro}}}{n_B} \quad \text{und} \quad a_x = C \cdot a_y = \sqrt{\frac{A_{\text{pro}}}{n_B \cdot C}} \quad \text{Gl. 4.4}$$

- a_x äquivalenter Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung (m)
 a_y äquivalenter Abstand der Vegetationselemente quer zur Fließrichtung (m)
 A_{pro} Probefläche (m²)
 n_B Anzahl der Bäume in der Probefläche
 C Faktor, der die Abhängigkeit zwischen a_x und a_y beschreibt (-)

Zusätzlich werden die Stammdurchmesser der Bäume innerhalb der Probefläche erfasst und über die Baumanzahl gemittelt. Findet bei entsprechend großen Fließtiefen nicht nur eine Umströmung der Baumstämme sondern auch eine Durchströmung des Astwerkes statt, so sollte für die betroffenen Bäume ein äquivalenter Vegetationsdurchmesser ermittelt werden.

Damit ist der Durchmesser eines umströmten Kreiszyinders gemeint, dessen Fließwiderstand gleich dem des realen Baumes ist. Hierzu ist für die entsprechende Fließtiefe (h) die angeströmte Fläche des Baumes (A_{veg}) abzuschätzen. Der äquivalente Vegetationsdurchmesser berechnet sich dann unter Annahme der Flächengleichheit (vgl. **Abb. 4.6**).

$$d_{\text{veg}} = \frac{A_{\text{veg}}}{h} \quad \text{Gl. 4.5}$$

- d_{veg} äquivalenter Vegetationsdurchmesser (m)
 A_{veg} tatsächlich angeströmte Vegetationsfläche (m²)
 h Fließtiefe (m)

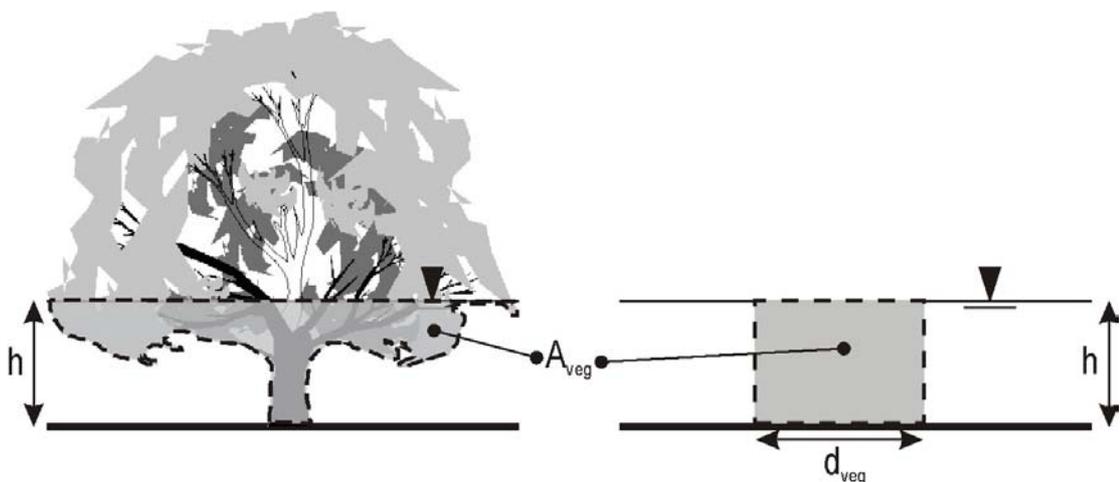


Abb. 4.6: Skizze zur Erläuterung des äquivalenten Vegetationsdurchmessers. (verändert nach DVWK, 1991)

Einige Anhaltswerte sind in **Tab. 4.1** zusammengestellt (vgl. DVWK, 1991).

Tab. 4.1: Aus Naturmessungen abgeleitete äquivalente Vegetationsparameter (vgl. DVWK, 1991).

Vegetationsart	Entwicklungsstand	d_{veg} (m)	a_x (m)	a_y (m)
geschlossener Bewuchs:				
- Röhricht.....	0,003 bis 0,01	0,01 bis 0,03	
- Sträucher (Weiden)..	einjährig.....	0,03	0,25 bis 0,35	
	mehrfjährig.....	0,03 bis 0,06	0,15 bis 0,25	
- Bäume.....	Erlen, fünfjährig.....	0,04 bis 0,1	1,0 bis 5,0	
	Erlen, ältere Bestände..	0,15 bis 0,5	3,0 bis 10,0	
	nur Stamm.....	0,5 bis 1,0	5,0 bis 20,0	
einzelstehende Büsche und Baumgruppen:				
- Büsche.....	mehrfjährig.....	3,5	3,0 bis 10	
- Baumgruppen.....	mehrfjährig.....	1,0	10	

b) nur Sträucher in der Probefläche

Grundsätzlich ist bei Strauchbewuchs zu entscheiden, ob bei der Berechnung eine Berücksichtigung als Kleinbewuchs (in diesem Fall wird eine äquivalente Rauheit k_s angenommen) oder als Großbewuchs stattfinden soll:

Kommt es zu einer kompletten Überströmung der Sträucher, so ist aufgrund der vorhandenen Flexibilität von einem Umbiegen der Strauchruten auszugehen, wodurch sich wiederum die angeströmte Vegetationsfläche und der Strömungswiderstand deutlich gegenüber dem starren Bewuchs reduziert. Deshalb wird in diesem Fall stets die Annahme einer flächigen Rauheit (k_s) empfohlen. Nach den Untersuchungen von Stephan (2002) sollte dabei der k_s -Wert eines überströmten, umgebogenen Strauches stets kleiner als die Wuchshöhe sein. Da hier derzeit noch Forschungsbedarf zur Konkretisierung der anzunehmenden k_s -Werte besteht, wird empfohlen, ca. 1/4 bis 1/3 der Wuchshöhe als k_s -Wert des Strauches anzunehmen.

Findet keine Über-, sondern nur eine Durchströmung der Sträucher statt, so sind die Vegetationsanordnungsparameter (a_x , a_y) durch eine Datenerfassung innerhalb einer Probefläche zu ermitteln. In diesem Fall kann die Probefläche relativ klein gewählt werden ($A_{pro} \approx 25 \text{ m}^2$). Erfasst wird die Anzahl der Äste und Ruten (n_R) innerhalb der Probefläche in ca. einem Meter über dem Boden. Bei Sträuchern kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass $a_x = a_y$ gilt, womit sich die Anordnungsparameter wie folgt ergeben (vgl. Järvella, 2002):

$$a_x = a_y = \sqrt{\frac{A_{\text{pro}}}{n_R}} \quad \text{Gl. 4.6}$$

a_x äquivalenter Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung (m)
 a_y äquivalenter Abstand der Vegetationselemente quer zur Fließrichtung (m)
 A_{pro} Probefläche (m²)
 n_R Anzahl der Äste und Ruten in der Probefläche

Als Vegetationsdurchmesser (d_{veg}) sollte der Mittelwert der Ast- bzw. Rutendurchmesser geschätzt werden. Einige Anhaltswerte sind in **Tab. 4.1** zusammengestellt.

c) einzelstehende Bäume und Sträucher in der Probefläche

Die Anzahl aller Vegetationselemente (n_E) in der Probefläche wird erfasst. Jedem Vegetationselement wird dann eine kreisförmige Grundfläche zugeordnet (A_{grund}). Durch Mittelwertbildung erhält man die Grundfläche pro Vegetationselement innerhalb der Probefläche ($A_{\text{grund,m}}$):

$$A_{\text{grund,m}} = \frac{\sum A_{\text{grund}}}{n_E} \quad \text{Gl. 4.7}$$

$A_{\text{grund,m}}$ gemittelte Grundfläche je Vegetationselement innerhalb der Probefläche (m²)
 A_{grund} abgeschätzte kreisförmige Grundflächenäquivalent jedes Vegetationselementes (m²)
 n_E Anzahl der Vegetationselemente (-)

Ausgehend von der gemittelten Grundfläche ($A_{\text{grund,m}}$) kann der mittlere äquivalente Vegetationsdurchmesser (d_{veg}) berechnet werden:

$$d_{\text{veg}} = \sqrt{\frac{A_{\text{grund,m}} \cdot 4}{\pi}} \quad \text{Gl. 4.8}$$

d_{veg} mittlerer äquivalenter Vegetationsdurchmesser (m)
 $A_{\text{grund,m}}$ gemittelte Grundfläche je Vegetationselement innerhalb der Probefläche (m²)

Die Anordnungsparameter berechnen sich für $a_x = C \cdot a_y$ zu:

$$a_x \cdot a_y = \frac{A_{\text{pro}}}{n_E} \quad \text{und} \quad a_x = C \cdot a_y = \sqrt{\frac{A_{\text{pro}}}{n_E \cdot C}} \quad \text{Gl. 4.9}$$

a_x äquivalenter Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung (m)
 a_y äquivalenter Abstand der Vegetationselemente quer zur Fließrichtung (m)
 A_{pro} Probefläche (m²)
 n_E Anzahl der Vegetationselemente in der Probefläche
 C Faktor (-)

d) Kollektiv aus Bäumen und Sträuchern in der Probefläche

Zunächst ist die Anzahl der Bäume (n_B) in der Probefläche zu erfassen und der mittlere äquivalente Baumdurchmesser ($d_{veg,B}$) abzuschätzen. In einem strauchbestandenen Bereich innerhalb der Probefläche ist eine zweite, kleinere Probefläche ($A_{pro,2}$) einzurichten, innerhalb dieser die Anzahl der Ruten ($n_{R,2}$) zu erfassen und der mittlere Rutendurchmesser ($d_{veg,R}$) abzuschätzen ist. Die Anzahl der Ruten im gesamten Kollektiv der großen Probefläche (A_{pro}) berechnet sich zu:

$$n_R = \frac{n_{R,2}}{A_{pro,2}} \cdot A_{pro} \quad \text{Gl. 4.10}$$

n_R Anzahl der Strauchruten im Kollektiv (-)
 $n_{R,2}$ Anzahl der Strauchruten in der Probefläche 2 (-)
 $A_{pro,2}$ Probefläche 2 (m²)
 A_{pro} Probefläche (m²)

Die Anzahl aller Vegetationselemente (n_E) in der großen Probefläche ergibt sich aus der Summe der erfassten Bäume (n_B) und rechnerisch ermittelten Strauchruten (n_R):

$$n_E = n_B + n_R \quad \text{Gl. 4.11}$$

n_E Anzahl aller Vegetationselemente in der Probefläche (-)
 n_B Anzahl aller Bäume in der Probefläche (-)
 n_R Anzahl aller Ruten in der Probefläche (-) → Gl. 4.10

Auch bei Kollektivbeständen kann wie bei der Strauchvegetation die Annahme $a_x = a_y$ bzgl. der Anordnungsparameter getroffen werden. Daraus ergibt sich dann für diese Parameter:

$$a_x = a_y = \sqrt{\frac{A_{pro}}{n_E}} \quad \text{Gl. 4.12}$$

a_x äquivalenter Abstand der Vegetationselemente in Fließrichtung (m)
 a_y äquivalenter Abstand der Vegetationselemente quer zur Fließrichtung (m)
 A_{pro} Probefläche (m²)
 n_E Anzahl aller Vegetationselemente in der Probefläche (-)

Der gemittelte äquivalente Vegetationsdurchmesser des Kollektivs berechnet sich zu:

$$d_{veg} = \frac{(n_B \cdot d_{veg,B}) + (n_R \cdot d_{veg,R})}{(n_B + n_R)} \quad \text{Gl. 4.13}$$

d_{veg} mittlerer äquivalenter Vegetationsdurchmesser des Kollektivs (m)
 n_B Anzahl der Bäume in der Probefläche (-)
 $d_{veg,B}$ mittlerer äquivalenter Baumdurchmesser (m)
 n_R Anzahl der Ruten in der Probefläche (-)
 $d_{veg,R}$ mittlerer äquivalenter Rutendurchmesser (m)

e) Einreihige Gehölzstreifen entlang der Uferlinie

In der Praxis kommt es oft vor, dass an einem Fließgewässer ein einreihiger Gehölzstreifen steht. In diesem Fall sollten die Vegetationsparameter je nach Vegetationsart wie in den Punkten (a) und (b) ermittelt werden, bei der Berechnung ist jedoch der Quotient $a_{NB}/a_y = 0$ (mit a_{NB} = Nachlaufbreite, vgl. Gl. 4.22 und 4.31) anzusetzen.

In **Abb. 4.7** ist die Gerinnegliederung infolge der Vegetationselemente graphisch schrittweise skizziert. Hieraus wird die qualitative Aufteilung in die unterschiedlichen hydraulischen Einflussbereiche als auch die Festlegung der Trennflächenorte und die Abstraktion der Vegetationselemente deutlich.

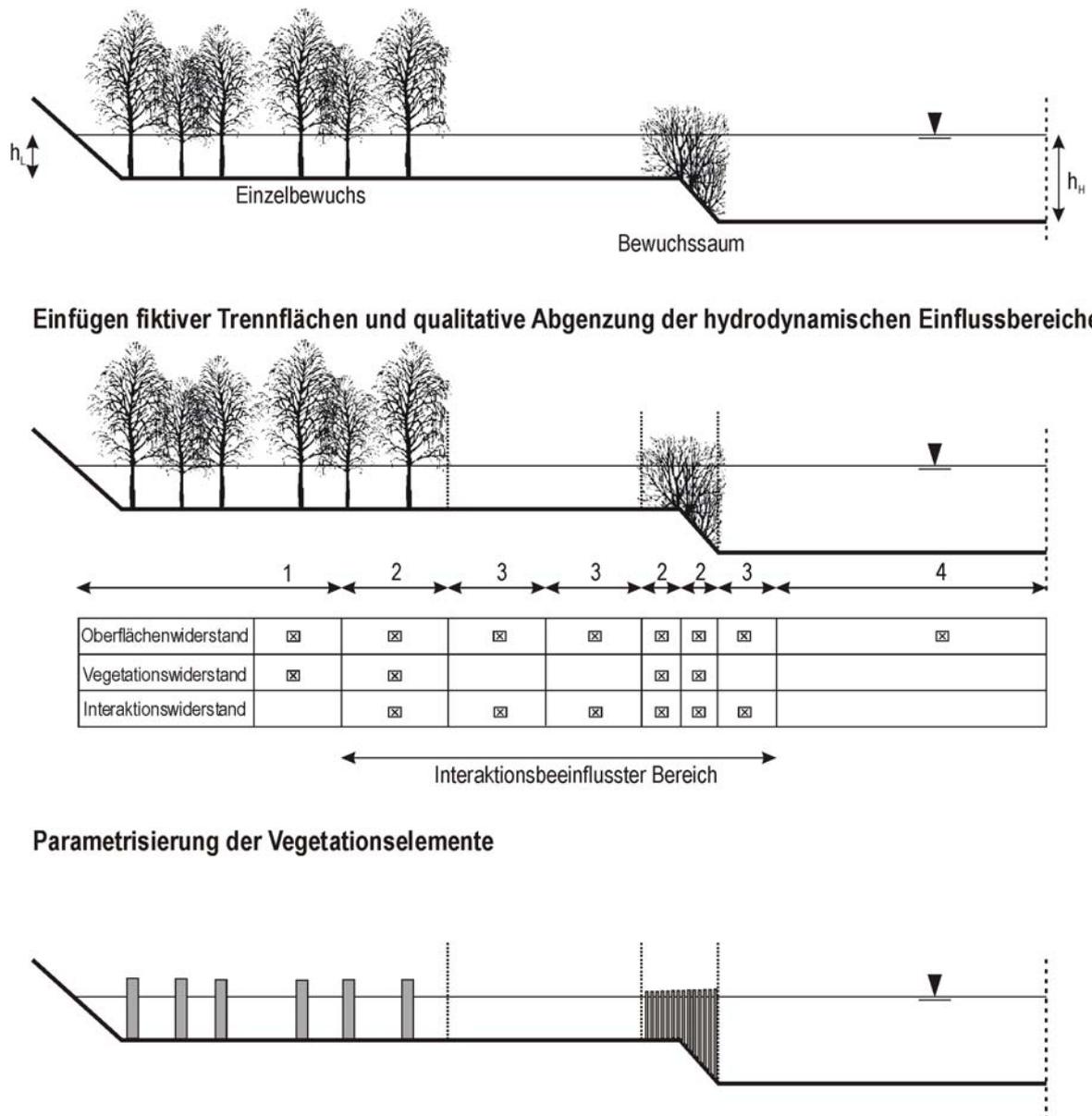


Abb. 4.7: Exemplarische Gerinnegliederung infolge Vegetation.

4.2 Schritt 2: Berechnung der Teilwiderstandsbeiwerte

Im ersten Schritt (vgl. Kap. 4.1) erfolgte die Abstraktion der Gerinnegeometrie und der Widerstandsformen. Um den Anforderungen einer eindimensionalen Strömungsanalyse gerecht zu werden, wurden zudem fiktive Trennflächen definiert, die (ebenefalls widerstandsbehaftet) den Querschnitt in unterschiedliche Sektionen unterteilen.

Die in diesem Schritt durchzuführende Berechnung der Teilwiderstände in den einzelnen Sektionen resultiert aus den Ansätzen in Kap. 3.1.2. Aufbauend auf die dort genannten Ansätze wird hier nun ein methodisches Konzept erläutert, welches die Anwendung der Formelwerke übersichtlich gestaltet.

4.2.1 Widerstandsbeiwert infolge der Oberflächenrauheit

In Anlehnung an Kap. 3.1.2.1 definiert sich der Widerstandsbeiwert (λ_o) nach dem Ansatz von Keulegan (1938) aus

- der äquivalenten Sandrauheit (k_s) (vgl. **Tab. 3.1**),
- dem hydraulischen Radius der betrachteten Sektion (r_{hy}) und
- einem dimensionslosen Beiwert zur Erfassung der Gerinneform (Br):

$$\lambda_o = 8 \cdot \left(2,5 \cdot \ln \left(\frac{r_{hy}}{k_s} \right) + Br \right)^{-2} \quad \text{mit } Br = \begin{cases} 3,25 & \text{für } h/k_s \leq 4 \\ 0,1875 \cdot (h/k_s) + 3,25 & \text{für } 4 < h/k_s < 20 \\ 6,25 & \text{für } h/k_s \geq 20 \end{cases} \quad \text{Gl. 4.14}$$

λ_o	Widerstandsbeiwert infolge der Oberflächenrauheit (-)
r_{hy}	hydraulischer Radius der betrachteten Sektion <u>ohne</u> Trennflächen (m)
k_s	äquivalente Sandrauheit der betrachteten Sektion (m)
Br	Beiwert (-)
h	Fließtiefe in der betrachteten Sektion (m)

Sind in einer Sektion unterschiedliche Oberflächenrauheiten vorhanden, so ist eine Überlagerung möglich (vgl. Kap. 3.1.2.3 a).

Für geometrisch gegliederte Gerinne, deren Strömungsverhalten ausschließlich infolge von Oberflächenrauheiten und Interaktion beeinflusst wird und bei denen keine weiteren Fließwiderstände (z.B. infolge von Vegetation) vorhanden sind, können die in **Anlage 2** vorgestellten Berechnungsabläufe verwendet werden. In **Anlage 3** sind die Anwendungen der Verfahren sowie eine Beurteilung der Ergebnisqualität im Vergleich zu Naturmessdaten dokumentiert.

4.2.2 Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen der Vegetationssektionen

Eingangs muss überprüft werden, ob die Wuchshöhe innerhalb der betrachteten Sektion größer als die Wasserspiegellage ist. Ist dies nicht der Fall oder kommt es infolge der Vegetationflexibilität zu einem Umbiegen der Vegetation und damit letztendlich zu einer kompletten Überströmung (z.B. bei jungen Sträuchern), so sollte die Vegetation nur durch eine äquivalente Rauheit (k_s) charakterisiert werden. Die Widerstandsberechnung erfolgt in diesem Fall dann nach Kap. 4.2.1.

Wird die Vegetation nicht über- sondern nur durchströmt, so erfolgt die Berechnung des Widerstandsbeiwertes aufbauend auf die Ansätze nach Lindner (1982) und Pasche (1984) (vgl. Kap. 3.1.2.2 b). Als Eingangsparameter werden die in Schritt 1 erarbeiteten hydraulisch-geometrischen Parameter benötigt.

Die Vegetation wird im Rahmen des Rechenganges durch die mittleren Bewuchsabstände parallel (a_x) und senkrecht (a_y) zur Fließrichtung sowie durch die mittleren äquivalenten Vegetationsdurchmesser (d_{veg}) charakterisiert. Für die Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeit (v_{veg}) muss zunächst der Formwiderstandsbeiwert (c_{WR}) der zu Kreiszyylinderanordnungen abstrahierten Vegetation berechnet werden.

Hierzu wird das oben genannte Verfahren in einer modifizierten Form angewandt. Dabei ist der c_{WR} -Wert implizit mit der Fließgeschwindigkeit (v_{veg}) gekoppelt, so dass eine iterative Berechnung nach der sog. Predictor-Correktor-Methode erforderlich wird (vgl. Gleichungen 4.15 bis 4.17).

Als Startwert wird der Predictor $c_{WR}=1$ angenommen. Der Gesamtwiderstandsbeiwert $\lambda_{ges,veg}$ der vegetationsbestandenen Sektion setzt sich aus der Summe des Widerstandsbeiwertes der Oberfläche in der Vegetationssektion (λ_0 , vgl. Kap. 4.2.1) und dem Widerstandsbeiwert der Vegetationselemente ($\lambda_{veg,D}$) in diesem Bereich zusammen :

$$\lambda_{ges,veg} = \lambda_0 + \lambda_{veg,D} \quad \text{Gl. 4.15}$$

- $\lambda_{ges,veg}$ Gesamtwiderstandsbeiwert der vegetationsbestandenen Sektion (-)
- λ_0 Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit (-) → Kap. 4.2.1
- $\lambda_{veg,D}$ Widerstandsbeiwert infolge durchströmter Vegetation (-)

mit

$$\lambda_{veg,D} = \frac{4 \cdot c_{WR} \cdot h \cdot d_{veg}}{a_x \cdot a_y} \cdot \cos(\alpha) \quad \text{Gl. 4.16}$$

- $\lambda_{veg,D}$ Widerstandsbeiwert infolge durchströmter Vegetation (-)
- c_{WR} Formwiderstandsbeiwert der angeströmten Vegetationsfläche (-)
- h hydraulische Fließtiefe in der Sektion (m) → Kap. 4.1.1
- d_{veg} mittlerer äquivalenter Vegetationsdurchmesser (m) → Kap. 4.1.2
- a_x, a_y Anordnungsparameter (m) → Kap. 4.1.2
- α Neigungswinkel der Sektionswandung (nur bei dreieckiger Approximation, vgl. Abb.4.3) (°) → Gl. 4.3 b

Die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit (v_{veg}) in der vegetationsbestandenen Sektion erfolgt mit der Fließformel nach Darcy-Weisbach:

$$v_{\text{veg}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{ges,veg}}}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{\text{hy}} \cdot I_{\text{So}}} \quad \text{Gl. 4.17}$$

v_{veg} mittlere Fließgeschwindigkeit in der vegetationsbestandenen Sektion (m/s)
 $\lambda_{\text{ges,veg}}$ Gesamtwiderstandsbeiwert der vegetationsbestandenen Sektion (-)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 r_{hy} hydraulischer Radius (m)
 I_{So} Längsgefälle der Sektion in Fließrichtung (-)

Hierbei ist zu beachten, dass sich der c_{WR} -Beiwert, welcher als Predictor zunächst geschätzt wurde, indirekt über $\lambda_{\text{veg,D}}$ auf die Fließgeschwindigkeit v_{veg} auswirkt. Mit der Predictor-Correktor-Methode wird deshalb ein iterativer Prozess durchlaufen, der den c_{WR} -Wert korrigieren soll.

Zunächst werden dabei die Nachlaufänge a_{NL} und die Nachlaufbreite a_{NB} eines Wirbels hinter einem umströmten Zylinder nach dem Ansatz von Pasche (1984) berechnet:

$$0,03 = 0,9 \cdot \left(\frac{a_{\text{NL}}}{c_{\text{W}\infty} \cdot d_{\text{veg}}} \right)^{-0,7} \cdot \left(1 + \frac{g \cdot a_{\text{NL}} \cdot I_{\text{So}}}{0,5 \cdot v_{\text{veg}}^2} \right)^{-3/2} \quad \text{Gl. 4.18}$$

$$a_{\text{NB}} = 0,24 \cdot a_{\text{NL}}^{0,59} \cdot (c_{\text{W}\infty} \cdot d_{\text{veg}})^{0,41} \quad \text{Gl. 4.19}$$

a_{NL} Nachlaufänge (m) → Abb. 3.8
 a_{NB} Nachlaufbreite (m) → Abb. 3.8
 $c_{\text{W}\infty}$ Formwiderstandsbeiwert eines allein stehenden Kreiszyinders (-)
 v_{veg} mittlere Fließgeschwindigkeit in der vegetationsbestandenen Sektion (m/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 I_{So} Längsgefälle der Sektion in Fließrichtung (-)

mit:

$$\text{Re}_{\text{veg}} = \frac{v_{\text{veg}} \cdot d_{\text{veg}}}{\nu} \quad \text{Gl. 4.20}$$

$$c_{\text{W}\infty} = \begin{cases} 3,07 \cdot \text{Re}_{\text{veg}}^{-0,168} & \text{für } \text{Re}_{\text{veg}} < 800 \\ 1,0 & \text{für } 800 \leq \text{Re}_{\text{veg}} < 8000 \\ 1,2 & \text{für } 8000 \leq \text{Re}_{\text{veg}} < 10^5 \end{cases} \quad \text{Gl. 4.21}$$

Re_{veg} vegetationsbezogene Reynoldszahl (-)
 v_{veg} mittlere Fließgeschwindigkeit in der vegetationsbestandenen Sektion (m/s)
 d_{veg} mittlerer äquivalenter Vegetationsdurchmesser (m)
 ν kinematische Viskosität des Wassers ($\approx 10^{-6}$ m²/s)

Die relative Anströmgeschwindigkeit berechnet sich nach Pasche (1984) zu:

$$v_{\text{rel}} = 1,15 \cdot \left(\frac{a_{\text{NL}}}{a_x} \right)^{-0,48} + 0,5 \cdot \left(\frac{a_{\text{NB}}}{a_y} \right)^{1,1} \quad \text{Gl. 4.22}$$

- v_{rel} relative Anströmgeschwindigkeit (-) → vgl. auch Gl. 3.24
- a_{NL} Nachlauflänge (m) → Abb. 3.8
- a_{NB} Nachlaufbreite (m) → Abb. 3.8
- a_x, a_y Anordnungsparameter (m) → Kap. 4.1.2
→ Achtung bei einreihigen Bewuchsstreifen: Annahme (a_{NB}/a_y) = 0 !

In Abhängigkeit von der relativen Fließtiefe y* vor und nach einem angeströmten Zylinder, welche mit dem Newton-Verfahren in Abhängigkeit von der Froude-Zahl berechnet werden kann, wird nach Lindner (1982) die Quantifizierung des Formwiderstandsbeiwertes infolge von Schwerewellen und Verbauung Δc_W möglich:

$$\Delta c_W = \frac{2}{Fr^2} \cdot (1 - y^*) \quad \text{Gl. 4.23}$$

- Δc_W Formwiderstandsbeiwert eines Kreiszyllinders infolge Schwerewellen (-)
- Fr Froudezahl (-)
- y* relative Fließtiefe vor und hinter einem angeströmten Kreiszyllinder (m)

mit:

$$Fr = \frac{v_{\text{veg}}}{\sqrt{g \cdot h}} \quad \text{Gl. 4.24}$$

$$\frac{y^* \cdot (y^{*2} - 1)}{2 \cdot \left(y^* - \frac{a_y}{a_y - d_{\text{veg}}} \right)} = Fr^2 \quad \text{daraus folgt iterativ } y^* \quad \text{Gl. 4.25}$$

- Fr Froudezahl (-)
- v_{veg} mittlere Fließgeschwindigkeit in der Vegetationssektion (m/s)
- g Erdbeschleunigung (m/s²)
- h hydraulische Fließtiefe in der Sektion (m)
- y* relative Fließtiefe vor und hinter einem angeströmten Kreiszyllinder (m)
- a_y Anordnungsparameter quer zur Fließrichtung (m)
- d_{veg} mittlerer äquivalenter Vegetationsdurchmesser (m)

Die Berechnung des Corrector c'_{WR} erfolgt mit dem Ansatz

$$c'_{\text{WR}} = c_{W\infty} \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{d_{\text{veg}}}{a_y} \cdot c_{W\infty} \right) \cdot v_{\text{rel}} + \Delta c_W \quad \text{Gl. 4.26}$$

- c'_{WR} Corrector (-)
- v_{rel} relative Anströmgeschwindigkeit (m/s)
- Δc_W Formwiderstandsbeiwert eines Kreiszyllinders infolge Schwerewellen (-)
- d_{veg} mittlerer äquivalenter Vegetationsdurchmesser (m)
- a_y Anordnungsparameter quer zur Fließrichtung (m)
- c_{W∞} Formwiderstandsbeiwert eines allein stehenden Kreiszyllinders (-)

Über die Genauigkeitsschranke

$$\left| 1 - \frac{c_{WR}}{c'_{WR}} \right| \approx 0 \quad \text{Gl. 4.27}$$

c_{WR} Predictor (-)
 c'_{WR}Correktor (-)

kann festgestellt werden, ob die Iteration nochmals durchlaufen werden muss. Ist dies der Fall, so ist der Correktor c'_{WR} als neuer Predictor c_{WR} anzunehmen und das Verfahren ab Gl. 4.16 zu wiederholen.

In **Abb. 4.8** ist ein Ablaufdiagramm für den praktischen Berechnungshergang dargestellt.

Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen in einer vegetationsbestandenen Sektion in Anlehnung an Lindner (1982) und Pasche (1984)

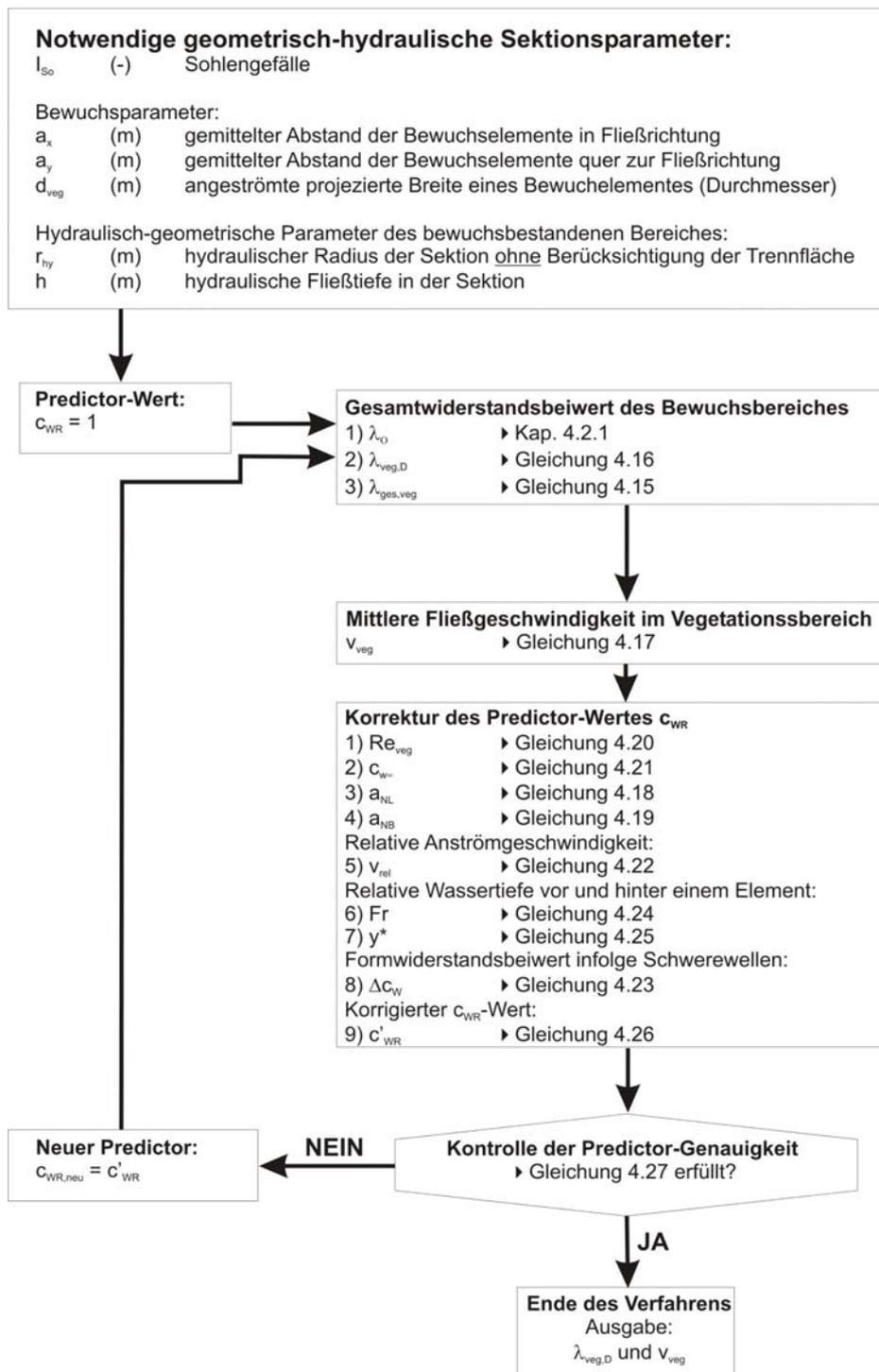


Abb. 4.8: Ablaufdiagramm zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes und der Strömungsgrößen in einer vegetationsbestandenen Sektion.

4.2.3 Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen der vegetationsfreien Sektionen

Wie bereits bei der Berechnung des Widerstandsbeiwertes in den vegetationsbestandenen Sektionen dargestellt, sind auch im Hauptgerinne zahlreiche Strömungsgrößen implizit miteinander gekoppelt. Der Gesamtwiderstandsbeiwert (λ_{ges}) einer vegetationsfreien Sektion setzt sich aus dem Oberflächenwiderstandsbeiwert (λ_0) und dem Widerstandsbeiwert zur Berücksichtigung von Interaktionsprozessen, welcher der fiktiven Trennfläche zugeordnet wird, zusammen. Zur Ermittlung wird ein von Pasche (1984) erarbeitetes Verfahren auf Basis der Predictor-Corrector-Methode angewandt, wobei eine doppeliterative Verschachtelung zu berücksichtigen ist.

Es gehen sowohl die Trennflächengeschwindigkeit (v_T) als auch die von der Interaktion beeinflusste Sektionsbreite (b_3) als Predictor mit in die Berechnung ein. Als Eingangswerte werden die in Kap. 4.2.2 berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit im bewachsenen Bereich (v_{veg}), der Widerstandsbeiwert der benachbarten Vegetationssektion ($\lambda_{\text{ges,veg}}$) sowie die hydraulisch-geometrischen Parameter der betrachteten vegetationsfreien Sektion benötigt.

Zunächst wird die mittlere Fließgeschwindigkeit in der Trennfläche (v_T) als Predictor-Startwert abgeschätzt:

$$\text{Startwert: } v_T = 1,5 \cdot v_{\text{veg}} \quad \text{Gl. 4.28}$$

v_Tmittlere Fließgeschwindigkeit in der Trennfläche (m/s)

v_{veg}mittlere Fließgeschwindigkeit in der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion (m/s) → vgl. Kap. 4.2.2

Zudem wird die interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite (b_3) nach einer Empfehlung von Schumacher (1995) in Abhängigkeit von der zugeordneten Sektionsbreite ($b_{\text{wsp}}/2$) und der hydraulischen Fließtiefe in der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion (h_{veg}) abgeschätzt:

$$b_3 = \begin{cases} b_{\text{wsp}} / 2 & \text{für } b_{\text{wsp}} / h_{\text{veg}} \leq 25 \\ -0,06 \cdot \frac{(b_{\text{wsp}} / 2)^2}{h_{\text{veg}}} + 1,14 \cdot b_{\text{wsp}} / 2 & \text{für } 25 < b_{\text{wsp}} / h_{\text{veg}} \leq 60 \end{cases} \quad \text{Gl. 4.29}$$

b_3interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite (m)

b_{wsp}Wasserspiegelbreite der vegetationsfreien Sektion (m)

h_{veg}hydraulische Fließtiefe der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion (m)

Aufbauend auf diese geschätzten Eingangswerte und mit einem von Pasche (1984) definierten Bewuchsparameter (Ω) wird der dimensionslose slip-velocity-Beiwert (c_T) ermittelt:

$$c_T = -3,27 \cdot \log \Omega + 2,85 \quad \text{Gl. 4.30}$$

c_Tslip-velocity-Beiwert nach Pasche (1984) (-)

ΩBewuchsparameter nach Pasche (-)

Der Bewuchsparameter (Ω) wird aus den Vegetationsparametern (a_x , a_y , a_{NL} , a_{NB}) der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion berechnet:

$$\Omega = \left(0,07 \cdot \frac{a_{NL}}{a_x} \right)^{3,3} + \left(\frac{a_{NB}}{a_y} \right)^{0,95} \quad \text{Gl. 4.31}$$

Ω Bewuchsparameter nach Pasche (1984) (-)
 a_{NL} Nachlauflänge (m) → Gl. 4.18
 a_{NB} Nachlaufbreite (m) → Gl. 4.19
 a_x, a_y Anordnungsparameter der Vegetation (m)
 → Achtung bei einreihigem Bewuchsbestand: Annahme $a_{NB}/a_y = 0!$

mit:

$$0,03 = 0,9 \cdot \left(\frac{a_{NL}}{c_{W\infty} \cdot d_{veg}} \right)^{-0,7} \cdot \left(1 + \frac{g \cdot a_{NL} \cdot I_{So}}{0,5 \cdot v_T^2} \right)^{-3/2} \quad \text{Gl. 4.32}$$

$$a_{NB} = 0,24 \cdot a_{NL}^{0,59} \cdot (c_{W\infty} \cdot d_{veg})^{0,41} \quad \text{Gl. 4.33}$$

$$Re_T = \frac{v_T \cdot d_{veg}}{\nu} \quad \text{Gl. 4.34}$$

$$c_{W\infty} = \begin{cases} 3,07 \cdot Re_T^{-0,168} & \text{für } Re_T < 800 \\ 1,0 & \text{für } 800 \leq Re_T < 8000 \\ 1,2 & \text{für } 8000 \leq Re_T < 10^5 \end{cases} \quad \text{Gl. 4.35}$$

a_{NL} Nachlauflänge (m) → Abb. 3.8
 a_{NB} Nachlaufbreite (m) → Abb. 3.8
 $c_{W\infty}$ Formwiderstandsbeiwert eines allein stehenden Kreiszyllinders (-)
 v_T mittlere Fließgeschwindigkeit in der Trennfläche (m/s)
 g Erdbeschleunigung (m/s²)
 I_{So} Längsgefälle der Sektion in Fließrichtung (-)
 Re_T Trennflächenbezogene Reynoldszahl (-)
 d_{veg} mittlerer äquivalenter Vegetationsdurchmesser (m)
 ν kinematische Viskosität des Wassers ($\approx 10^{-6}$ m²/s)

Der Widerstandsbeiwert einer Trennfläche (λ_T) zur Berücksichtigung der Interaktionsprozesse zwischen einer vegetationsbestandenen und vegetationsfreien Sektion berechnet sich in Abhängigkeit von

- dem Vegetationstyp in der benachbarten Sektion (Faktor c → Gl. 4.38),
- der interaktiosbeeinflussten Breite der benachbarten Vegetationssektion (b_2 → Gl. 4.37)
- dem Bewuchsparameter (Ω → Gl. 4.31),
- dem dimensionslosen slip-velocity-Beiwert (c_T → Gl. 4.30) und

- dem Widerstandsbeiwert der angrenzenden Vegetationssektion ($\lambda_{\text{ges,veg}}$, vgl. Gl. 4.15)

aus der folgenden Beziehung:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \cdot \log \left[0,07 \cdot \left(\frac{b_2}{b_3} \right)^{1,07} \cdot \Omega \right] \quad \text{Gl. 4.36}$$

λ_T Widerstandsbeiwert der fiktiven Trennfläche zur Berücksichtigung der Interaktion (-)
 b_2 interaktionsbeeinflusste Breite der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion (m)
 b_3 interaktionsbeeinflusste Breite der betrachteten vegetationsfreien Sektion (m)
 Ω Bewuchsparameter (-)

mit

$$b_2 = \frac{c \cdot h_T}{\lambda_{\text{ges,veg}} \cdot (0,068 \cdot e^{0,56 \cdot c_T} - 0,056)} \leq b_{\text{wsp,veg}} \quad \text{sonst gilt } b_2 = b_{\text{wsp,veg}} \quad \text{Gl. 4.37}$$

b_2 interaktionsbeeinflusste Breite der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion (m)
 c Beiwert zur Berücksichtigung des Vegetationstyps in der benachbarten Sektion (-)
 h_T Höhe der Trennfläche zwischen den Sektionen (m)
 $\lambda_{\text{ges,veg}}$ Widerstandsbeiwert der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion (-) → Gl. 4.15
 c_T slip-velocity-Beiwert (-)
 $b_{\text{wsp,veg}}$ Wasserspiegelbreite der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion (m)

Für den Beiwert zur Berücksichtigung des Vegetationstyps werden in DVWK (1991) folgende Angaben gemacht:

$$c = \begin{cases} 1,0 & \text{für Vorlandbewuchs} \\ 1,7 & \text{für Böschungsbewuchs} \end{cases} \quad \text{Gl. 4.38}$$

c Beiwert zur Berücksichtigung des Vegetationstyps in der benachbarten Sektion (-)

Der Gesamt-Widerstandsbeiwert der vegetationsfreien Sektion (λ_{ges}) wird iterativ aus der Überlagerung des Widerstandsbeiwertes für die Oberflächenrauheit (λ_0) mit den Trennflächenwiderstandsbeiwerten ($\lambda_{T,i}$) an den Sektionsgrenzen ermittelt:

$$\lambda_{\text{ges}} = \frac{\lambda_0 \cdot l_{U,0} + \sum (\lambda_{T,i} \cdot h_{T,i})}{l_{U,T}} \quad \text{Gl. 4.39}$$

λ_{ges} Widerstandsbeiwert der vegetationsfreien Sektion (-)
 λ_0 Widerstandsbeiwert infolge der Oberflächenrauheit (-) → Kap. 4.2.1
 $l_{U,0}$ benetzter Umfang in der vegetationsfreien Sektion ohne Berücksichtigung der Trennflächen (m)
 $\lambda_{T,i}$ Widerstandsbeiwert der benachbarten Trennflächen (-)
 $h_{T,i}$ Trennflächenhöhe (m)
 $l_{U,T}$ benetzter Umfang in der vegetationsfreien Sektion mit Berücksichtigung der Trennflächen (m)

Die Iteration wird mit dem Startwert r_{hy} der vegetationsfreien Sektion solange durchgeführt, bis die Genauigkeitsanforderung erfüllt ist:

$$\left| 1 - \frac{r'_{hy}}{r_{hy,T}} \right| \approx 0 \quad \text{Gl. 4.40}$$

mit

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{ges}}} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot r_{hy,T} \cdot I_{So}} \quad \text{Gl. 4.41}$$

$$r'_{hy} = \frac{\lambda_o}{\lambda_{ges}} \cdot r_{hy,T} \quad \text{Gl. 4.42}$$

- $r_{hy,T}$ hydraulischer Radius der vegetationsfreien Sektion mit Berücksichtigung der Trennflächen (m)
- r'_{hy} Korrektur-Wert zur Konvergenzfindung (m)
- v mittlere Fließgeschwindigkeit in der vegetationsfreien Sektion mit Berücksichtigung der Interaktion (m/s)
- g Erdbeschleunigung (m/s²)
- I_{So} Sohlgefälle der Sektion (-)
- λ_o Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit (-)
- λ_{ges} Gesamt-Widerstandsbeiwert der vegetationsfreien Sektion (-)

Aus dieser Iteration resultieren dann letztendlich der dimensionslose Widerstandsbeiwert für das bewuchsfreie Hauptgerinne (λ_{ges}) sowie die mittlere Fließgeschwindigkeit (v) in diesem Teilquerschnitt.

Da – wie bereits eingangs erwähnt – diese Größen implizit von den Predictoren abhängen, muss eine Genauigkeitsanforderung durch die Correctoren überprüft werden:

$$\left| 1 - \frac{v_T}{v'_T} \right| \approx 0 \quad \text{Gl. 4.43}$$

mit:

$$v_T^* = \sqrt{\frac{\lambda_T}{8}} \cdot v \quad \text{Gl. 4.44}$$

$$v'_T = c_T \cdot v_T^* \quad \text{Gl. 4.45}$$

- v_T, v'_T mittlere Fließgeschwindigkeit in der Trennfläche (Predictor und Corrector) (m/s)
- v_T^* Schubspannungsgeschwindigkeit in der fiktiven Trennfläche (m/s)
- λ_T Widerstandsbeiwert der Trennfläche (-)
- v mittlere Fließgeschwindigkeit in der Sektion (m/s)
- c_T slip-velocity-Beiwert (-)

Ist Gl. 4.43 nicht erfüllt, so ist das Verfahren ab Gl. 4.30 erneut mit $v_T = v'_T$ zu durchlaufen. In **Abb. 4.9** sind die einzelnen Berechnungsschritte als Ablaufdiagramm dargestellt.

Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen in einer vegetationsfreien Sektion

in Anlehnung an Pasche (1984) und Schumacher (1995)

Notwendige geometrisch-hydraulische Sektionsparameter:

- l_{so} (-) Sohlgefälle
- Bewuchsparameter der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion:
 a_x (m) gemittelter Abstand der Bewuchselemente in Fließrichtung
 a_y (m) gemittelter Abstand der Bewuchselemente quer zur Fließrichtung
 d_{veg} (m) angeströmte projizierte Breite eines Bewuchselementes (Durchmesser)
- Hydraulisch-geometrische Parameter der betrachteten vegetationsfreien Sektion:
 h_{TJ} (m) Höhe der fiktiven Trennfläche zwischen den Sektionen
 $l_{U,o}$ (m) benetzter Umfang ohne Trennflächen
 l_U (m) benetzter Umfang mit Trennflächen
 r_{hy} (m) hydraulischer Radius ohne Trennflächen
 $r_{hy,T}$ (m) hydraulischer Radius mit Trennflächen
 h (m) Fließtiefe in der Sektion
 b_{wsp} (m) Wasserspiegelbreite der Sektion

- Eingangsdaten von der Widerstandsberechnung in der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion:
 v_{veg} (m/s) mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich
 $\lambda_{ges,veg}$ (-) Widerstandsbeiwert im Vegetationsbereich

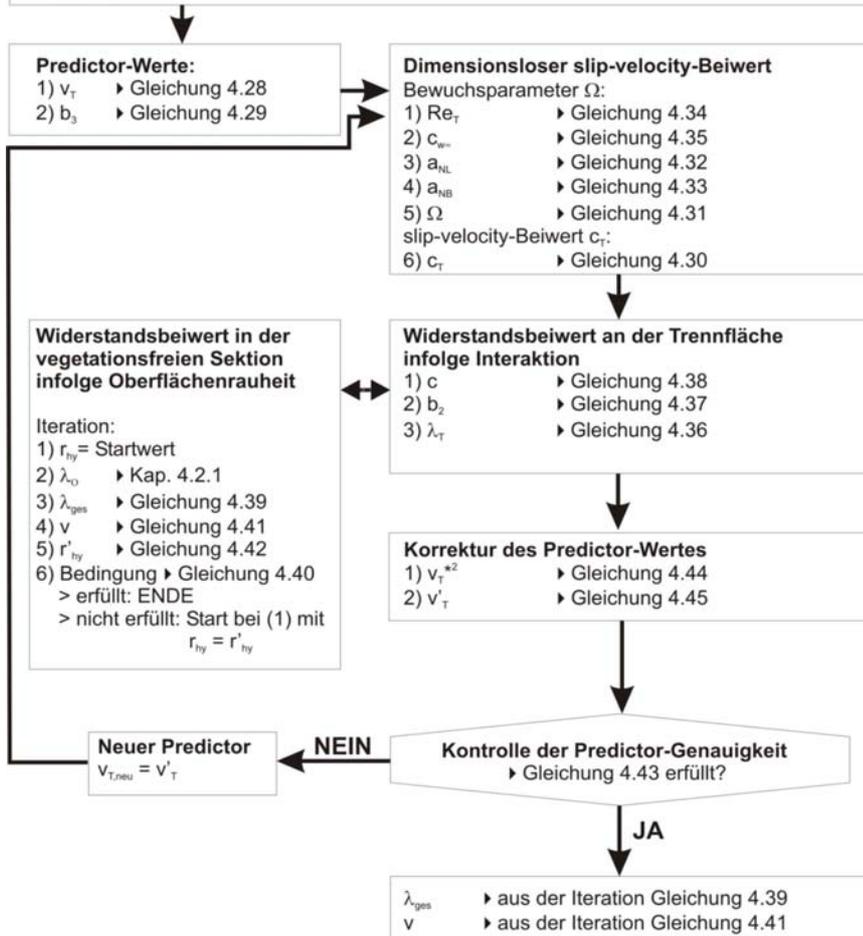


Abb. 4.9: Ablaufdiagramm zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes und der Strömungsgrößen in einer vegetationsfreien Sektion.

4.3 Schritt 3: Berechnung des Durchfluss

Die Summation der Teildurchflüsse in den einzelnen Sektionen ergeben den Gesamtdurchfluss. Für die vegetationsbestandenen Sektionen ist zu berücksichtigen, dass sich infolge der Interaktion der Durchfluss um den Betrag $\Delta Q_{\text{veg,int}}$ vergrößert:

$$Q_{\text{ges}} = \sum (Q_{\text{veg}} + \Delta Q_{\text{veg,int}}) + Q \quad \text{Gl. 4.46}$$

mit

$$Q_{\text{veg}} = v_{\text{veg}} \cdot A_{\text{veg}} \quad \text{Gl. 4.47}$$

$$Q = v \cdot A \quad \text{Gl. 4.48}$$

$$\Delta Q_{\text{veg,int}} = \frac{1}{4} \cdot b_2 \cdot \frac{A_{\text{veg}}}{b_{\text{wsp,veg}}} \cdot (v_T - v_{\text{veg}}) \quad \text{Gl. 4.49}$$

- Q_{ges} Durchfluss im gesamten Querschnitt (m^3/s)
- Q_{veg} Durchfluss in einer vegetationsbestandenen Sektion (m^3/s)
- Q Durchfluss in einer vegetationsfreien Sektion (m^3/s)
- $\Delta Q_{\text{veg,int}}$ Durchflussanteil in einer vegetationsbestandenen Sektion infolge Interaktion (m^3/s)
- b_2 interaktionsbeeinflusste Breite der Vegetationssektion (m)
- A_{veg} Querschnittsfläche der Vegetationssektion (m^2)
- $b_{\text{wsp,veg}}$ Wasserspiegelbreite der Vegetationssektion (m)
- v_T Fließgeschwindigkeit in der Trennfläche (m/s)
- v_{veg} Fließgeschwindigkeit in der Vegetationssektion (m/s)

In **Abb. 4.10** ist die Berechnung des Gesamtdurchfluss als Ablaufdiagramm dargestellt.

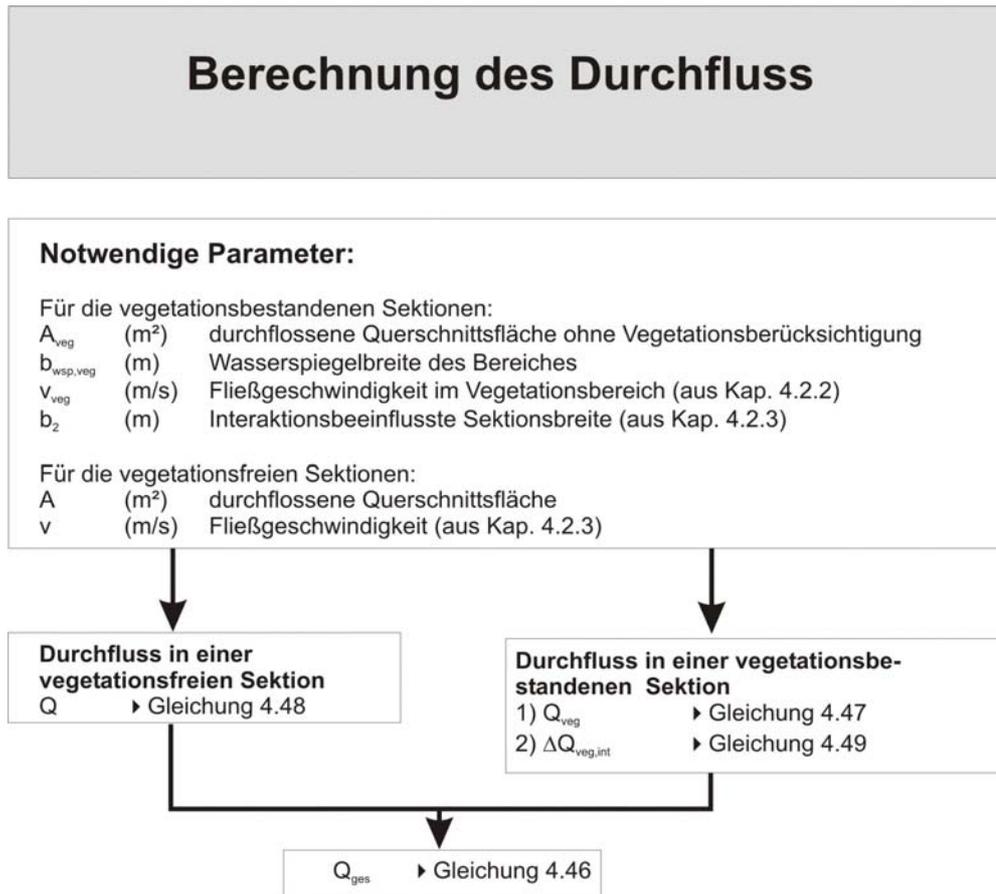


Abb. 4.10: Ablaufdiagramm zur Berechnung des Gesamtdurchfluss in einem naturnahen Gewässerquerschnitt.

4.4 Anwendungsbeispiel

Das folgende Berechnungsbeispiel wurde DVWK (1991) entnommen, um im Vergleich zur dortigen Berechnung die Vorteile der zuvor erläuterten Anwendungsmethodik exemplarisch und nachvollziehbar zu verdeutlichen. Weitere Zahlenbeispiele sind dem Kap. 6 zu entnehmen.

Mit einer eindimensionalen Strömungsberechnung soll unter der Annahme von Normalabflussverhältnissen die Abflusskapazität eines naturnahen Gewässerquerschnittes berechnet werden.

Schritt 1: Gerinnegliederung und Parametererfassung

Hierzu erfolgte im Rahmen einer Begehung die Einmessung der geometrischen Querprofilaten sowie die Erfassung von Art, Anzahl und Lage der in diesem Abschnitt befindlichen Vegetationselemente (vgl. **Abb. 4.11**). Aufgrund der Gerinnegeometrie und des Vegetationsbestandes ergibt sich eine Gliederung in drei Sektionen.

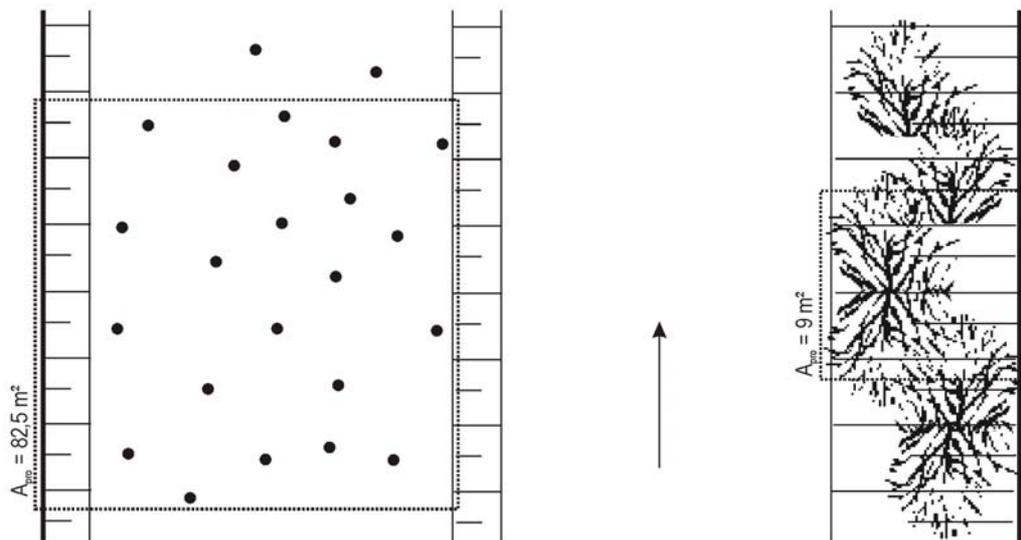
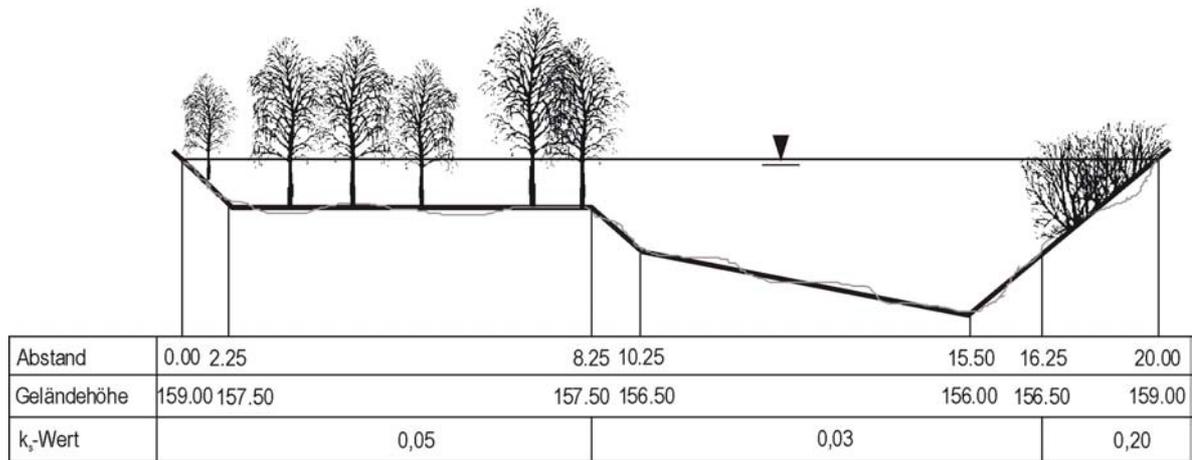


Abb. 4.11: Querschnitt und Draufsicht auf den betrachteten Gerinneabschnitt. (Verändert nach DVWK, 1991)

▪ Sektion 1: Linker Vorlandbereich (Erlenbewuchs / Großbewuchs)

Die Sektion wird als Halbtrapezform beschrieben. Hieraus ergeben sich folgende geometrische Werte:

$$A = 10,70 \text{ m}^2, h = 1,50 \text{ m}, b_{\text{so}} = 6,00 \text{ m}, b_{\text{wsp}} = 8,25 \text{ m}, l_U = 8,70 \text{ m}, r_{\text{hy}} = 1,23 \text{ m}$$

Um die Vegetationsparameter in dieser Sektion zu erfassen, wurde eine Probefläche definiert, die sich quer zur Fließrichtung über die gesamte Sektion ausbreitet und eine Länge von 10 m aufweist (vgl. **Abb. 4.11**): $A_{\text{pro}} = 8,25 \cdot 10 = 82,5 \text{ m}^2$. Nach Kap. 4.1.2 (a) und Gl. 4.4 ergibt sich unter der Annahme einer Gleichverteilung der Elemente $a_x = a_y \approx 2,00 \text{ m}$. Da von den Erlen überwiegend nur die Stämme umströmt werden und kein Astwerk durchströmt wird, wurde der Vegetationsdurchmesser aus der Mittelwertbildung der Stammdurchmesser aller Elemente in der Probefläche zu $d_{\text{veg}} = 0,10 \text{ m}$ ermittelt.

▪ **Sektion 2: Rechter Uferbereich (Weidenbewuchs / Mittelbewuchs)**

Sektion 2 wird als Dreiecksform modelliert. Hieraus ergeben sich folgende geometrische Werte:

$$A = 4,69 \text{ m}^2, h_{\text{mittel}} = 1,25 \text{ m}, b_{\text{wsp}} = 3,75 \text{ m}, l_U = 4,50 \text{ m}, r_{\text{hy}} = 1,04 \text{ m}, \alpha = 33^\circ$$

Eine Überströmung der Sträucher sowie eine Umbiegen fand nicht statt. Die Vegetationsparameter wurden entsprechend 4.1.2 (b) unter Auszählen der Weidenruten in einer definierten Probefläche (vgl. **Abb. 4.11**) ermittelt:

$$A_{\text{pro}} = 9,00 \text{ m}^2, n_R = 150 \rightarrow a_x \approx 0,30 \text{ m}, a_y \approx 0,20 \text{ m}, d_{\text{veg}} = 0,03 \text{ m}$$

▪ **Sektion 3: Hauptgerinne**

Die linke und rechte Seite in Sektion 3 sind bereits durch die Trennflächen der benachbarten Sektionen 1 und 2 vorgegeben. Der Querschnitt in Sektion 3 wird als Trapezform angenommen. Hierfür werden die folgenden geometrischen Werte ermittelt:

$$A = 20,50 \text{ m}^2, h = 2,56 \text{ m}, b_{\text{wsp}} = 8,00 \text{ m}, l_{U,o} = 8,40 \text{ m}, l_U = 12,08, r_{\text{hy,T}} = 1,69 \text{ m}, r_{\text{hy}} = 2,53 \text{ m}$$

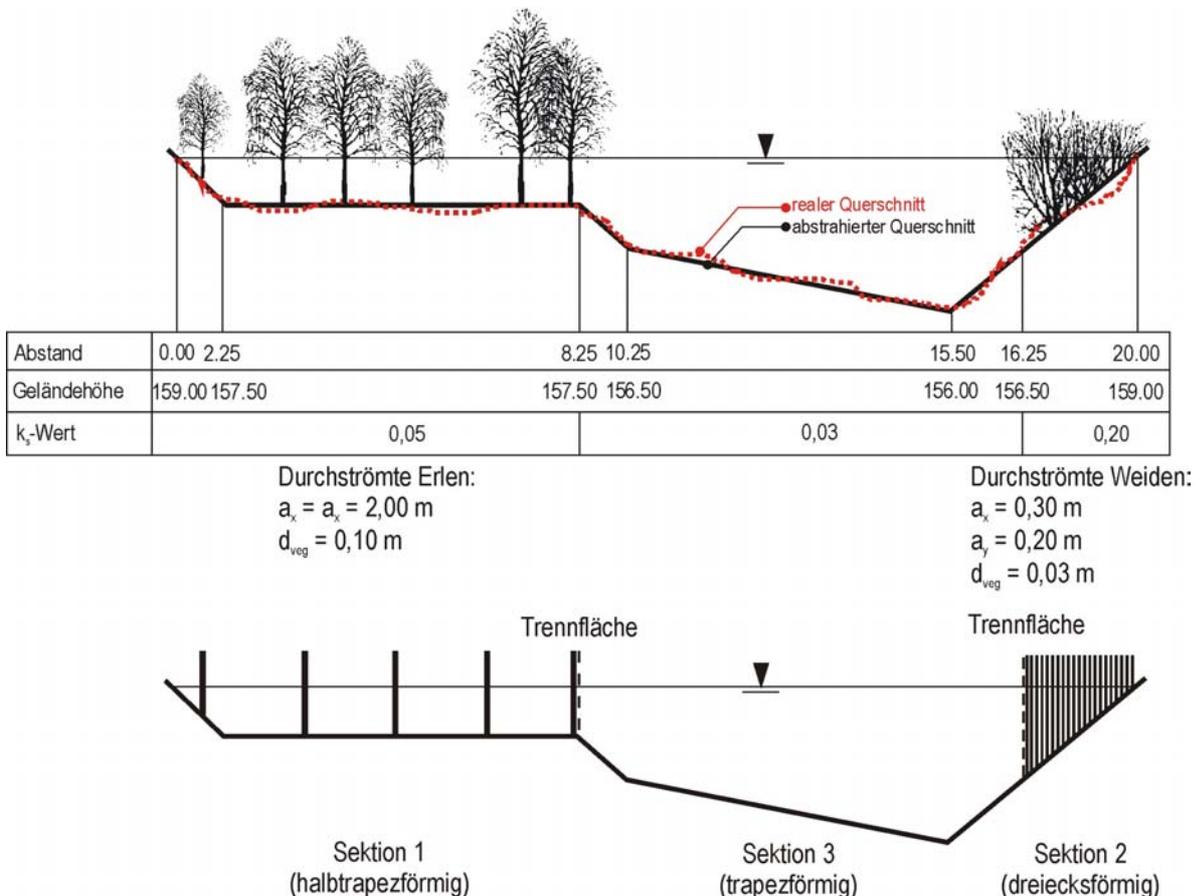


Abb. 4.12: Gliederung des Querschnittes infolge der Geometrie und der Vegetation.

Schritt 2: Berechnung der Teilwiderstandsbeiwerte

Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an die Kapitel 4.2.1 (Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit), Kap. 4.2.2 (Widerstandsbeiwert in den vegetationsbestandenen Sektionen 1 und 2) und Kap. 4.2.3 (Widerstandsbeiwert in der vegetationsfreien Sektion 3). In den nachfolgenden Tabellen sind die Berechnungsschritte, Zwischenergebnisse und Endergebnisse dargestellt. Dabei wurde nach den entsprechenden Ablaufdiagrammen in den genannten Kapiteln verfahren.

Tab. 4.2: Berechnungsmatrix für Sektion 1.

Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen in der vegetationsbestandenen Sektion Nr. 1				
Notwendige geometrisch-hydraulische Sektionsparameter:				
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe	
Sohlengefälle	l_{So}	-	0,001	
Abstand der Bewuchselemente in Fließr.	a_x	m	2,00	
Abstand der Bewuchselemente quer zur Fließr.	a_y	m	2,00	
angeströmte äquivalente Vegetationsbreite	d_{veg}	m	0,10	
hydraulischer Radius (ohne Trennfläche)	r_{hy}	m	1,23	
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,50	
äquivalente Sandrauheit der Oberfläche	k_s	m	0,05	
Berechnungsablauf nach Abb. 4.8				
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe	Gleichung
Predictor-Wert	c_{WR}	-	0,96	←
Gesamtwiderstandsbeiwert des Vegetationsbereiches				
	h/k_s	-	30,00	
Formbeiwert für die Gerinneform	Br	-	6,25	Gl. 4.14
Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit	λ_o	-	0,04	Gl. 4.14
Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation	$\lambda_{veg,D}$	-	0,14	Gl. 4.16
Gesamtwiderstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}$	-	0,18	Gl. 4.15
Mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich				
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v_{veg}	m/s	0,73	Gl. 4.17
Korrektur des Predictor-Wertes				
Vegetationsbezogene Reynoldszahl	Re_{veg}	-	72557,31	Gl. 4.20
Formwiderstandsbeiwert Einzelelement	c_{Woo}	-	1,20	Gl. 4.21
Hilfswert Gl. 4.18 linke Seite zur Zielwertsuche muss 0,03 ergeben...			0,03	
Nachlauflänge	a_{NL}	m	8,39	Gl. 4.18
Nachlaufbreite	a_{NB}	m	0,35	Gl. 4.19
Relative Anströmgeschwindigkeit	v_{rel}	m/s	0,65	Gl. 4.22
Froudezahl	Fr^2	-	0,0358	Gl. 4.24
Hilfswert Gl. 4.25 linke Seite zur Zielwertsuche muss Fr^2 -Wert ergeben...			0,0358	
Relative Fließtiefe vor/hinter einem Element	y^*	-	0,9980	Gl. 4.25
Formwiderstandsbeiwert infolge Schwerewellen	Δc_{Ww}	-	0,11	Gl. 4.23
Korrigierter c_{WR} -Wert	c_{WR}'	-	0,96	Gl. 4.26
Kontrolle der Predictor-Genauigkeit - Verfahrenskonvergenz				
Genauigkeitsschranke	ϵ	-	0,00	Gl. 4.27
Ausgangswerte bei Verfahrenskonvergenz				
Gesamtwiderstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}$	-	0,18	
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v_{veg}	m/s	0,726	

Tab. 4.3: Berechnungsmatrix für Sektion 2.

Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen in der vegetationsbestandenen Sektion Nr. 2

Notwendige geometrisch-hydraulische Sektionsparameter:

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe
Sohlengefälle	l_{So}	-	0,001
Abstand der Bewuchselemente in Fließr.	a_x	m	0,30
Abstand der Bewuchselemente quer zur Fließr.	a_y	m	0,20
angeströmte äquivalente Vegetationsbreite	d_{veg}	m	0,03
hydraulischer Radius (ohne Trennfläche)	r_{hy}	m	1,04
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,25
äquivalente Sandrauheit der Oberfläche	k_s	m	0,20

Berechnungsablauf nach Abb. 4.8

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe	Gleichung
Predictor-Wert	c_{WR}	-	1,30	←
Gesamtwiderstandsbeiwert des Vegetationsbereiches				
	h/k_s	-	6,25	
Formbeiwert für die Gerinneform	Br	-	4,42	Gl. 4.14
Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit	λ_O	-	0,11	Gl. 4.14
Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation	$\lambda_{veg,D}$	-	2,71	Gl. 4.16
Gesamtwiderstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}$	-	2,82	Gl. 4.15
Mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich				
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v_{veg}	m/s	0,17	Gl. 4.17
Korrektur des Predictor-Wertes				
Vegetationsbezogene Reynoldszahl	Re_{veg}	-	5106,64	Gl. 4.20
Formwiderstandsbeiwert Einzelelement	c_{Woo}	-	1,00	Gl. 4.21
Hilfswert Gl. 4.18 linke Seite zur Zielwertsuche muss 0,03 ergeben...			0,03	
Nachlauflänge	a_{NL}	m	1,29	Gl. 4.18
Nachlaufbreite	a_{NB}	m	0,07	Gl. 4.19
Relative Anströmgeschwindigkeit	v_{rel}	m/s	0,72	Gl. 4.22
Froudezahl	Fr^2	-	0,0024	Gl. 4.24
Hilfswert Gl. 4.25 linke Seite zur Zielwertsuche muss Fr^2 -Wert ergeben...			0,0024	
Relative Fließtiefe vor/hinter einem Element	y^*	-	0,9996	Gl. 4.25
Formwiderstandsbeiwert infolge Schwerewellen	Δc_W	-	0,36	Gl. 4.23
Korrigierter c_{WR} -Wert	c_{WR}'	-	1,30	Gl. 4.26
Kontrolle der Predictor-Genauigkeit - Verfahrenskonvergenz				
Genauigkeitsschranke	ϵ	-	0,00	Gl. 4.27

Ausgangswerte bei Verfahrenskonvergenz

Gesamtwiderstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}$	-	2,82
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v_{veg}	m/s	0,170

Tab. 4.4: Berechnungsmatrix für Sektion 3.

Widerstandsbeiwert und Strömungsgrößen in der vegetationsfreien Sektion Nr. 3					
Notwendige geometrisch-hydraulische Sektionsparameter:					
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe		
			linke Seite	rechte Seite	
Sohlengefälle	l_{So}	-		0,001	
Bewuchs- und Strömungsparameter der benachbarten vegetationsbestandenen Sektion					
Abstand der Bewuchselemente in Fließr.	a_x	m	2,00	0,30	
Abstand der Bewuchselemente quer zur Fließr.	a_y	m	2,00	0,20	
angeströmte äquivalente Vegetationsbreite	d_{veg}	m	0,10	0,03	
Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich	v_{veg}	m/s	0,73	0,17	
hydraulische Fließtiefe in der vegetationsbest. Sektion	h	m	1,50	1,25	
Widerstandsbeiwert der Vegetationssektion	$\lambda_{ges,veg}$	-	0,18	2,82	
Geometrisch-hydraulische Parameter der bewuchsfreien Sektion					
benetzter Umfang ohne Trennflächen	$l_{U,o}$	m		8,08	
hydraulischer Radius (ohne Trennfläche)	r_{hy}	m		2,53	
Trennflächenhöhe am Sektionsrand	h_T	m	1,50	2,50	
benetzter Umfang mit Trennflächen	l_U	m		12,08	
hydraulischer Radius (mit Trennflächen)	$r_{hy,T}$	m		1,69	
hydraulische Fließtiefe in der Sektion	h	m		2,50	
Wasserspiegelbreite der Sektion	b_{vsp}	m		8,00	
äquivalente Sandrauheit der Oberfläche	k_s	m		0,03	
Berechnungsablauf nach Abb. 4.9					
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe		Gleichung
			linke Trennfl.	rechte Trennfl.	
Interaktionswiderstand an den Trennflächen					
Prediktor-Werte					
Fließgeschwindigkeit an der Trennfläche	v_T	m/s	0,78	0,57	Gl. 4.28
Breiten/Tiefen-Verhältnis	b_{so}/h	-	5,33	6,40	
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_3	m	4,00	4,00	Gl. 4.29
Dimensionsloser slip-velocity-Beiwert					
Trennflächenbezogene Reynoldszahl	Re_T	-	78000	17100	Gl. 4.34
Formwiderstandsbeiwert Einzelement	c_{Woo}	-	1,2	1,2	Gl. 4.35
Hilfswert Gl. 4.32 linke Seite zur Zielwertsuche muss 0,03 ergeben...			0,03	0,03	
Nachlaufänge	a_{NL}	m	8,39	3,27	Gl. 4.32
Nachlaufbreite	a_{NB}	m	0,35	0,12	Gl. 4.33
Bewuchsparameter	Ω	-	0,21	1,04	Gl. 4.31
slip-velocity-Beiwert	c_T	-	5,07	2,79	Gl. 4.30
Widerstandsbeiwert an der Trennfläche infolge der Interaktion					
Beiwert zur Berücksichtigung des Vegetationstyps	c	-	1	1,7	Gl. 4.38
interaktionsbeeinflusste Breite der benachb. Vegetationssketion	b_2	m	7,39	3,75	Gl. 4.37
Widerstandsbeiwert an der Trennfläche infolge der Interaktion	λ_T	-	0,10	0,18	Gl. 4.36
Widerstandsbeiwert der vegetationsfreien Sektion infolge Oberflächenrauheit					
	h/k_s	-		83,33	
Formbeiwert für die Gerinneform	Br	-		6,25	Gl. 4.14
Predictorwert hydraulischer Radius mit Trennflächen	$r_{hy,T}$	m		1,16	
Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit	λ_O	-		0,03	Gl. 4.14
Gesamt-Widerstandsbeiwert der Sektion	λ_{ges}	-		0,07	Gl. 4.39
Mittlere Fließgeschwindigkeit in der Sektion	v	m/s		1,34	Gl. 4.41
Korrekturwert hydraulischer Radius	r_{hy}'	m		1,16	Gl. 4.42
Genauigkeitsschranke zur Verfahrenskonvergenz	ϵ	-		0,00	Gl. 4.40
Korrektur des Predictor-Wertes					
Schubspannungsgeschwindigkeit in der Trennfläche	v_T^*	m/s	0,15	0,20	Gl. 4.44
Korrektor-Wert	v_T'	m/s	0,78	0,57	Gl. 4.45
Kontrolle der Predictor-Genauigkeit - Verfahrenskonvergenz					
Genauigkeitsschranke	ϵ	-	0,00	0,00	Gl. 4.43
Ausgangswerte bei Verfahrenskonvergenz					
Gesamtwiderstandsbeiwert	λ_{ges}	-		0,07	
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v	m/s		1,343	

Schritt 3: Berechnung des Durchfluss

Der Durchfluss berechnet sich auf Grundlage der sektionweise berechneten Strömungsgrößen analog dem Verfahren aus Kap. 4.3. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengetragen.

Tab. 4.5: Matrix zur Berechnung des Gesamtdurchfluss.

Berechnung des Durchfluss					
Notwendige geometrisch-hydraulische Sektionsparameter:					
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Sektion 1	Größe Sektion 2	Sektion 3
Für die vegetationsbestandenen Sektionen:					
Durchflossene Querschnittsfläche	A_{veg}	m ²	10,70	4,69	-
Wasserspiegelbreite	$b_{wsp,veg}$	m	8,25	3,75	-
Fließgeschwindigkeit	v_{veg}	m/s	0,726	0,170	-
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	7,97	3,75	-
Für die vegetationsfreie Sektion:					
Durchflossene Querschnittsfläche	A	m ²	-	-	20,50
Fließgeschwindigkeit	v	m/s	-	-	1,343
Fließgeschwindigkeit an der Trennfläche	v_T	m/s	0,78	0,57	-
Berechnungsablauf nach Abb. 4.10					
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe	Gleichung	
Durchfluss in der vegetationsfreien Sektion 3					
Durchfluss	Q	m ³ /s	27,53	Gl. 4.48	
Durchfluss in der vegetationsbestandenen Sektion 1					
Durchfluss	Q_{veg}	m ³ /s	7,76	Gl. 4.47	
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,14	Gl. 4.49	
Durchfluss in der vegetationsbestandenen Sektion 2					
Durchfluss	Q_{veg}	m ³ /s	0,80	Gl. 4.47	
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,47	Gl. 4.49	
Gesamtdurchfluss					
Gesamtdurchfluss	Q_{ges}	m ³ /s	36,70	Gl. 4.46	

Eine Simulation der Reduktion der Abflussleistung durch eine langfristige Vegetationsentwicklung in den Sektionen 1 und 2 zeigt deutlich die Vorteile des Verfahrens:

Simuliert wird in einem zweiten Berechnungslauf der linksufrige Erlenbestand (Sektion 1) nach einer mehrjährigen Entwicklung: Bei gleich bleibenden Anordnungsparametern ($a_x = a_y = 2,0$ m) hat sich der Stammdurchmesser von 0,1 m auf 0,3 m vergrößert. Hierdurch hat der Durchfluss in der Sektion 1 um ca. 37% abgenommen. Infolge der Interaktionsprozesse verringert sich der Durchfluss im Hauptgerinne (Sektion 3) um ca. 7%. Die Durchflusskapazität des Gesamtquerschnittes hat um ca. 13% abgenommen. Die Teilergebnisse sind in **Tab. 4.6** dargestellt.

Tab. 4.6: Berechnungsergebnisse zum zweiten Berechnungslauf: Simulation einer Entwicklung des Erlenbestandes in Sektion 1.

Werte	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3
a_x (m)	2,00	0,30	-
a_y (m)	2,00	0,20	-
d_{veg} (m)	0,30	0,03	-
λ (-)	0,59	2,82	0,08
v (m/s)	0,41	0,17	1,25
Q (m ³ /s)	4,96	1,21	25,69
Q_{ges} (m ³ /s)	31,87		

Ein dritter Berechnungslauf untersucht zusätzlich zur Entwicklung der Erlen in Sektion 1 noch eine massive Verdichtung der Sträucher am rechten Ufer (Sektion 3). Hieraus resultiert letztendlich eine Reduktion der Durchflusskapazität von ca. 47% im Gesamtquerschnitt. Das strauchbewachsene Ufer (Sektion 2) wird in dieser Simulation quasi nicht mehr durchflossen. Die Interaktionsprozesse wirken sich auf den Abfluss im Hauptgerinne (Sektion 3) und sogar noch auf das linke Vorland (Sektion 1) aus. Die Teilberechnungsergebnisse sind in **Tab. 4.7** dargestellt.

Tab. 4.7: Berechnungsergebnisse zum dritten Berechnungslauf: Simulation einer Entwicklung des Erlenbestandes in Sektion 1 und des Strauchbestandes in Sektion 2.

Werte	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3
a_x (m)	2,00	0,10	-
a_y (m)	2,00	0,10	-
d_{veg} (m)	0,30	0,05	-
λ (-)	0,59	68,00	0,08
v (m/s)	0,41	0,04	1,25
Q (m ³ /s)	4,33	0,00	15,06
Q_{ges} (m ³ /s)	19,39		

Bewertung der Methodik:

Mit Hilfe der vorgestellten dreistufigen Arbeitsweise kann der Anwender transparent eine komplexe reale hydraulische Situation zur Berechnung aufbereiten und diverse Entwicklungsszenarien simulieren. Unter Verwendung von Tabellenkalkulationssoftware (z.B. MS Excel) ist der Anwender zudem in der Lage, mit Hilfe der Ablaufdiagramme (vgl. **Abb. 4.8**, **Abb. 4.9** und **Abb. 4.10**) digitale Berechnungsformulare zu nutzen, welche die Durchführung der Berechnungen enorm erleichtern. Ein Programm ist exemplarisch in **Anlage 4** dargestellt.

Der Geruch des Wassers

„Man kann es riechen. Im allgemeinen gilt Wasser als geruchlos. Aber man kann es riechen. Ich kann mich an den Geruch verschiedener Flüsse und Meere erinnern. Und auch wenn es nicht das Wasser selbst ist, das so riecht, sondern nur die Verbindung von Wasser mit etwas anderem, so ist doch das Schöne an diesen Gerüchen, an die ich mich erinnere, dass es Gerüche des Wassers sind. [...]

Noch bevor ich mich setze und schaue, noch bevor ich in das Wasser gesehen habe, rieche ich seine kühle Frische, diesen Atem des Wassers in der frühlingshaften Luft, rieche, wie das Aufschwappen der Wellen an den Rändern des Flussbettes die Steine dazu bringt, ihren gewölbeähnlichen Geruch auszuströmen, benetzt von Wasser, beschienen von einer blassen Frühjahrs Sonne. Und dann sehe ich, wie das Wasser mit leichtem Wellenschlag den Steinen in alle Poren kriecht und ihnen ihre volle Färbung wiedergibt und ihren eigenen Geruch, dem Atem des Wassers und der Steine.“

John von Düffel, 2003: Vom Wasser (Roman). München (Seite 9 und Seite 10).

5 Empfehlungen zur Vegetationsanordnung

Aufbau und Gliederung:

5.1	Interaktion Strömung – Vegetation - Feststoffe
5.2	Weiterführende qualitative Untersuchungen an einem Modell
5.2.1	Modelltechnische Grundlagen
5.2.2	Modellaufbau und Kalibrierung
5.2.3	Versuchsdurchführung
5.3	Analyse der Modellergebnisse und Ableitung von Empfehlungen

In Kap. 3.2.4 wurde bereits erläutert, dass gewässermorphologische Entwicklungen aus dem Zusammenspiel zwischen Strömung, Strömungswiderständen und bewegten Feststoffen resultieren. Hierbei ist zwischen zwei unterschiedlichen Arten der Entwicklung zu unterscheiden:

- Kurzfristige, extreme morphologische Veränderungen finden als Folge großer Feststoffbewegungen ausgelöst durch extreme Abflussereignisse statt. Aus gewässermorphologischer Sicht spricht man dabei von Katastrophenereignissen. Der Begriff wurde von der ursprünglichen Theorie des „catastrophism-flood event“ nach Beaty (1974) abgeleitet.
- Die langfristig viel häufiger auftretenden kleineren Hochwasserereignisse spielen nach der sog. „uniformatism-Theorie“ (vgl. Wolman und Miller, 1960) eine ebenso bedeutende Rolle für die gewässermorphologische Entwicklung. Besonders bei kleineren Hochwässern kommt es infolge der Interaktion zwischen Strömung und Vegetation zu einem Quertransport von Feststoffen in den Vegetationsbereich hinein. Die dort additiv stattfindende Sedimentation führt langfristig zu Problemen bei der Gewässerunterhaltung.

Im Rahmen dieses Kapitels wird zunächst ein Überblick über den Kenntnisstand bezüglich des o.g. interaktionsbedingten Feststofftransportes gegeben. Aufbauend auf

diesen Kenntnissen wird mit Hilfe wasserbaulicher Modellversuche eine qualitative Untersuchung der Sedimentationsprozesse innerhalb von durchströmter Vegetation bei speziellen, in der gewässernahen Landschaftsplanung oft verwendeten Vegetationsanordnungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser an Naturmessdaten kalibrierten Versuche werden analysiert und daraus allgemeingültige Empfehlungen für eine unterhaltungsoptimierte (sedimentationsarme) Vegetationsanordnung entlang naturnaher Gewässerläufe abgeleitet.

5.1 Interaktion Strömung – Vegetation – Feststofftransport

Wie bereits in Kap. 3.1 und Kap. 4 gezeigt wurde, ist der Einfluss von durchströmter baum- und/oder strauchartiger Vegetation auf das Strömungsgeschehen erheblich. An der Trennfläche zwischen einer vegetationsbestandenen und einer freien Sektion kommt es zu einem Massen- und Impulsaustausch. Die dadurch hervorgerufenen Wirbel- und Walzenströmungen (sog. „Makroturbulenz“) stehen in enger Wechselwirkung mit den Prozessen an der alluvialen Gewässersohle und haben direkten Einfluss auf das Transportverhalten der Feststoffe. Durch diese Interaktion sind in den beeinflussten Bereichen der vegetationsfreien Sektionen zahlreiche Prozesse zu beobachten (vgl. **Abb. 5.1**).

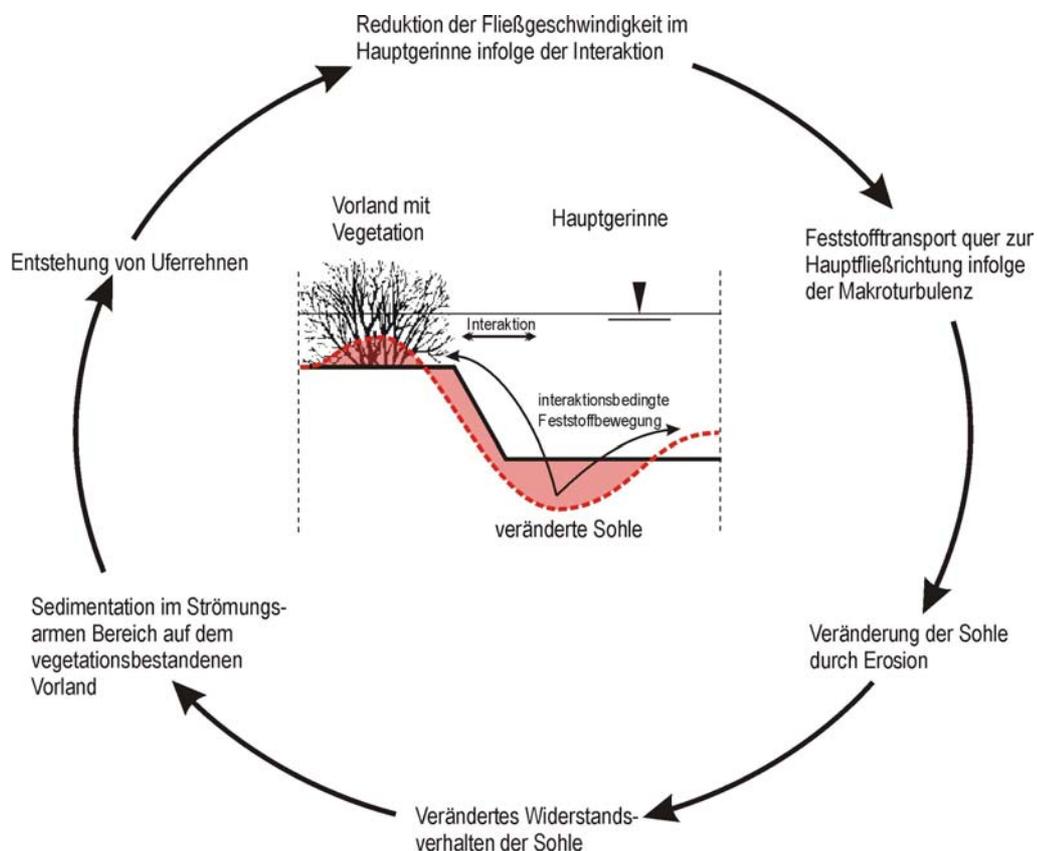


Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Interaktion zwischen Strömung, Vegetation und Feststofftransport in einem Gerinne.

Specht (2002) untersuchte den Einfluss von starrem, durchströmtem Böschungsbewuchs auf die hydraulisch-sedimentologischen Verhältnisse in trapezförmigen Gerinnen. Das Ziel der Laborversuche bestand in der Quantifizierung des ufernahen Vegetationseinflusses auf den Geschiebetransport im Hauptgerinne. Aus dimensionsanalytischen Überlegungen leitete Specht ab, dass der vegetationsbeeinflusste Geschiebetransport im Hauptgerinne vom Geschiebetransport ohne Vegetationseinfluss sowie von den Bewuchsgrößen abhängt.

Specht entwickelte somit keinen neuen Transportansatz, sondern er erweiterte den Ansatz nach Meyer-Peter und Müller (1948, vgl. Kap. 3.2.3.1) um einen Bewuchsbeiwert (σ_B):

$$\Phi^* = \Phi_{\text{MPM}} \cdot \sigma_B \quad \text{Gl. 5.1}$$

Φ^* Transportintensität unter Berücksichtigung des Vegetationseinfluss (-)

Φ_{MPM} Transportintensität nach dem Ansatz von Mayer-Peter und Müller (-) → vgl. Gl. 3.24 ff

σ_B Bewuchsparameter nach Specht (-)

Die Formelwerke zur Berechnung von σ_B leitete Specht empirisch aus seinen Versuchsergebnissen in einem trapezförmigen Laborgerinne ab. Mit Hilfe einer Übertragungsfunktion soll die Anwendung seiner Formelwerke auf beliebige Bewuchsanordnungen ermöglicht werden. Aufgrund einer bisher fehlenden Verifikation dieser Formelwerke durch Naturmessdaten kann derzeit keine Aussage über die Qualität des Ansatzes gemacht werden.

Interessant und für die Praxis relevant sind jedoch die Beobachtungen, die Specht bei seinen Versuchen gemacht hat:

- Der Einfluss der Vegetation auf den Geschiebetransport geht bei lichter Vegetationsanordnung mehr und mehr zurück;
- Bei vollständig dichter, palisadenartiger Vegetationsanordnung entlang der Uferlinie, bei der nahezu keine Makroturbulenz mehr vorhanden ist, geht der Einfluss der Vegetation auf den Geschiebetransport ebenfalls stark zurück. Der Einfluss der Vegetationsdichte ist bei einem Verhältnis von $a_x/d_{\text{veg}} = a_y/d_{\text{veg}} = 10$ bereits um ca. 20% niedriger und nimmt weiter ab. Diese Beobachtungen decken sich auch mit den Strömungsphänomenen, welche Becker (1999) in ihrer Arbeit an gegliederten Doppeltrapezquerschnitten untersucht hat;
- Bei schmalen Gerinnen und beidseitiger Ufervegetation erhöht sich der Geschiebetrieb erheblich. Specht hat hierfür Extremfälle mit einer Zunahme des Geschiebetriebs um mehr als 100% nachgewiesen;
- Liegt nur eine einseitige Ufervegetation vor, ist der Vegetationseinfluss auf den Geschiebetransport bis zu 2/3 geringer als bei beidseitiger Ufervegetation. In diesem Fall ist die Entstehung einer Querneigung der alluvialen Gewässersohle mit Tiefpunkt an der vegetationsbestandenen Böschungsunterkante zu beobachten;

- Feststoffe, welche in die dichte Ufervegetation durch die Makroturbulenz eingespült werden, sedimentieren dort aufgrund der sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten nahezu vollständig. Durch diese Ausfilterung entstehen letztendlich Uferreihen.

Aufbauend auf die in der Literatur genannten Untersuchungsergebnisse sowie aufgrund eigener Erfahrungen an den Pilotmessstrecken des Landes Baden-Württemberg kann speziell zu den Uferreihen folgende wichtige Aussage gemacht werden:

Die Rehenbildung stellt in der wasserbaulichen Praxis ein bedeutendes Transportphänomen dar: Die Rehen bestehen i.d.R. aus nährstoffhaltigen sandigen Material. Relativ schnell siedelt sich dort eine Primärvegetation an (z.B. Brennesseln), deren Durchwurzelung zu einer Stabilisierung des Rehenkörpers führt. Beim nächsten Hochwasserereignis ist die Rehne bereits erosionsresistent und wirkt wie ein ufernaher Damm entlang des Gewässers. Hierdurch verschlechtert sich zum einen die Abflussleistung des Gerinnes und zum anderen bewirkt die „Eindämmung“ größere Fließgeschwindigkeiten im Hauptgerinne, wodurch infolge erhöhter Schubspannungen eine größere Feststofftransportkapazität einsetzt. Hierdurch kann es zu Tiefenerosion und zu einem stärkeren Anwachsen der Rehen infolge seitwärts transportierter Feststoffe kommen.

Im Rahmen der Gewässerunterhaltung werden daher die Rehen geräumt, was insbesondere in vegetationsbestandenen Bereichen nur in Handarbeit und aus Naturschutzsicht auch nur zu bestimmten Zeiten möglich wird.

Da derzeit die komplexen, instationären Vorgänge der Rehenbildung nicht physikalisch derart beschrieben werden können, dass für die Praxis taugliche Prognose- und Simulationsverfahren zur Verfügung stehen, wurde anhand der Beobachtungen an den Pilotmessstrecken in Baden-Württemberg ein wasserbauliches Modellkonzept erarbeitet, das auf qualitative Untersuchungen aufbaut.

5.2 Weiterführende qualitative Untersuchungen an einem Modell

Ziel der wasserbaulichen Modellversuche ist es, die Sedimentationsprozesse feinkörniger Feststofffraktionen in Abhängigkeit von der ufernahen Vegetationsanordnung zu dokumentieren und zu analysieren. Aus den Beobachtungen am wasserbaulichen Modell sollen qualitative Empfehlungen hinsichtlich einer optimierten Vegetationspflege abgeleitet werden.

5.2.1 Modelltechnische Grundlagen

Im Unterschied zu einem mathematischen Modell bzw. zu einem Gedankenmodell ist das wasserbauliche Modell ein physikalisches Modell, das als sog. „ähnliches Mo-

dell“ im weitesten Sinne eine geometrisch verkleinerte Abbildung der Natursituation darstellt (vgl. Kobus, 1978). Das wasserbauliche Modell simuliert die Natur, indem versucht wird, die zu untersuchenden Prozesse hinsichtlich ihrer Geometrie, Kinematik und Dynamik ähnlich abzubilden und durch Schnittstellen physikalisch exakt zu simulieren (vgl. **Abb. 5.2**).

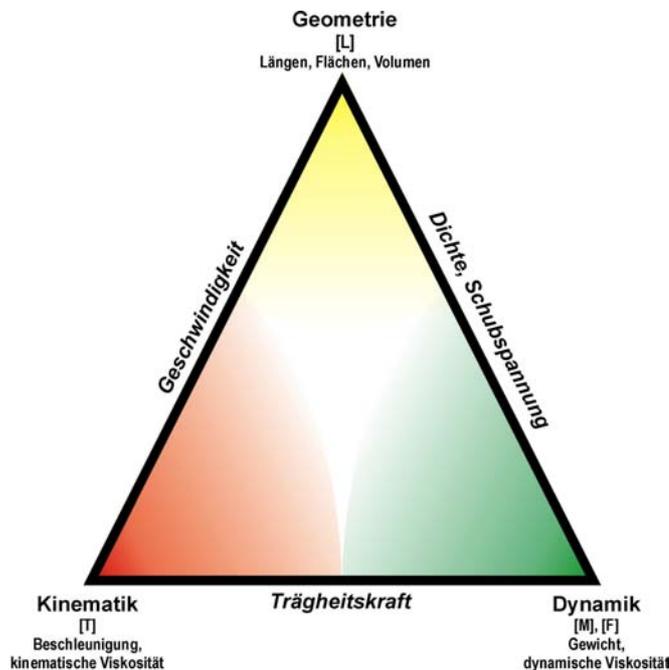


Abb. 5.2: Eckpunkte und exemplarische Schnittstellen in einem physikalischen Modell unter Einhaltung der Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell.

Nur wenn alle im Folgenden erläuterten Ähnlichkeiten eingehalten sind, ist die vollkommene mechanische Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell gewährleistet (vgl. Dorer, 1984):

- Geometrische Ähnlichkeit

Die Geometrie zwischen der Natur und dem Modell ist ähnlich: alle Längen, Flächen, Volumina und Höhen können durch die gleiche Maßstabszahl (Index r für Ratio) zwischen Natur und Modell umgerechnet werden:

$$\ell_r = \frac{\ell_N}{\ell_M} \quad \text{Gl. 5.2}$$

ℓ_rMaßstabszahl (-)

ℓ_NLänge in der Natur (m)

ℓ_MLänge im Modell (m)

- Kinematische Ähnlichkeit

Bei der kinematischen Ähnlichkeit können die Zeit-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorgänge mit der jeweils gleichen Maßstabszahl zwischen

Natur und Modell umgerechnet werden. Für kinematisch-ähnliche wasserbau-liche Modelle bedeutet dies, dass die Stromlinienbilder von Natur und Modell ähnlich sind. Hieraus wird ersichtlich, dass für die kinematische Ähnlichkeit in diesem Fall die geometrische Ähnlichkeit eine Voraussetzung ist.

$$t_r = \frac{t_N}{t_M}; v_r = \frac{\ell_N/t_N}{\ell_M/t_M} = \frac{\ell_r}{t_r}; a_r = \frac{\ell_N/t_N^2}{\ell_M/t_M^2} = \frac{\ell_r}{t_r^2} \quad \text{Gl. 5.3}$$

- t_r Zeitmaßstabszahl (-)
- t_N Zeit in der Natur (s)
- t_M Zeit im Modell (s)
- v_r Geschwindigkeitsmaßstabszahl (-)
- a_r Beschleunigungsmaßstabszahl (-)
- ℓ_r Modellmaßstabszahl (-) → vgl. Gl. 5.2
- ℓ_N Länge in Natur (m)
- ℓ_M Länge im Modell (m)

▪ Dynamische Ähnlichkeit

Bei der dynamischen Ähnlichkeit können alle Kräfte mit der gleichen Maßstabszahl zwischen Modell und Natur transferiert werden. Somit müssen in diesem Fall die Kraftecke zwischen Natur und Modell ähnlich sein (vgl. Bollrich, 1989). Für die dynamische Ähnlichkeit bei einem wasserbaulichen Modell bedeutet dies, dass die resultierende Kraft auf ein Fluidteilchen in einer Strömung im Modell die gleiche Richtung hat wie in der Natursituation. Hierzu sind die geometrische und die kinematische Ähnlichkeit eine notwendige Voraussetzung.

$$F_r = \frac{F_N}{F_M} \quad \text{Gl. 5.4}$$

- F_r Kraftmaßstabszahl (-)
- F_N Kraft in der Natur (N)
- F_M Kraft im Modell (N)

Das Strömungsgeschehen in einem offenen Gerinne wird primär beeinflusst von Schwerkraft, Trägheitskräften und Reibungskraften. Sekundär wirken zudem noch Kapillarkräfte, Elastizitätskräfte und ggf. einige andere Kräfte.

Im wasserbaulichen Modell wird bei Modellfließtiefen über 0,03 m angenommen, dass die Trägheits- und Schwerkraft das Strömungsverhalten dominieren; der Einfluss der inneren Zähigkeitskräfte des Wasserkörpers wird vernachlässigt (vgl. Bollrich, 1989). Hierdurch wird die Anwendung der Froude'schen Ähnlichkeitsgesetze möglich.

$$Fr_N = Fr_M \Leftrightarrow \frac{v_N}{\sqrt{g \cdot l_N}} = \frac{v_M}{\sqrt{g \cdot l_M}} \tag{Gl. 5.5}$$

- Fr_i.....Froudezahl (-)
- v_i.....Fließgeschwindigkeit (m/s)
- g.....Erdbeschleunigung (m/s²)
- l_i.....Länge (m)

Neben der aus den Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzen resultierenden hydraulischen Ähnlichkeit soll zwischen Natur und Modell auch eine Ähnlichkeit bzgl. des Feststofftransportes und der Sedimentation im ufernahen Bereich zwischen Vorland und Hauptgerinne vorhanden sein. Die Schwierigkeit der Nachbildung dieser sog. „sedimentologischen Ähnlichkeit“ besteht hauptsächlich darin, dass die natürlichen Feststoffe nicht ohne Weiteres auf den Modellmaßstab verkleinert werden können, weil bei zu kleinen Partikeldurchmessern Kohäsionskräfte signifikant werden und sich das Material dadurch bindig verhält.

Dorer (1984) empfiehlt deshalb die Verwendung von einem leichteren Feststoffmaterial im Modellbetrieb, woraus größere Partikelabmessungen resultieren. Hiermit ändert sich für die Betrachtung der Feststoffbewegung im Modell nach Kobus (1978), Bollrich (1989) und Nestmann (1992) jedoch der sedimentologische Zeitmaßstab (vgl. **Abb. 5.3**).

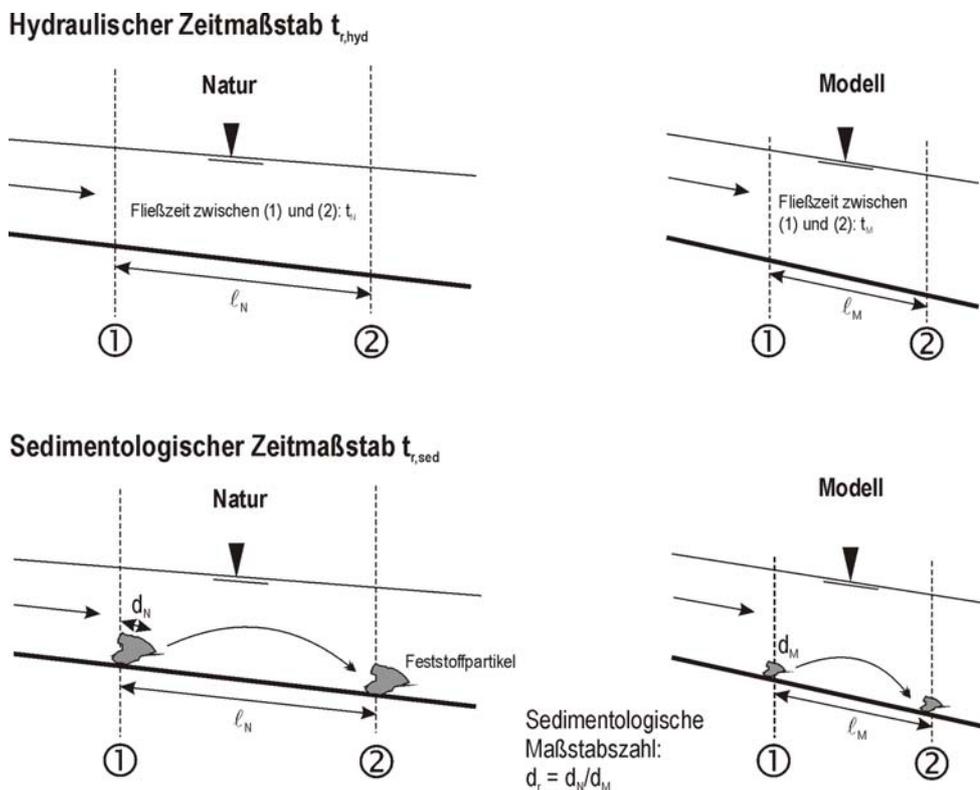


Abb. 5.3: Skizze zum hydraulischen und sedimentologischen Zeitmaßstab. (Verändert nach Nestmann, 1992)

„Der [sedimentologische] Zeitmaßstab ist der Maßstab, der die Kompromisse und Unstimmigkeiten bei der Wahl der übrigen Maßstäbe aufnehmen muss. Zu seiner genauen und vor allem sicheren Bestimmung wird daher bei allen größeren Modellversuchen mit Feststofftransport ein sog. „historischer Versuch“ angestellt. Dies ist das Nachfahren einer Naturereignisfolge der Sohlenentwicklung, aus der dann durch Vergleich von Natur und Modell eine zeitliche Eichung des Modells vorgenommen werden kann.“ (Kobus, 1978 in Bollrich, 1989, Seite 47).

5.2.2 Modellaufbau und Kalibrierung

Wie bereits in Kap. 5.2.1 dargestellt, müssen zur Ermittlung des sedimentologischen Zeitmaßstabes sowie zur Validierung sowohl der hydraulischen als auch der feststoffdynamischen bzw. sedimentologischen Ähnlichkeit Naturereignisse im Modell nachgefahren werden. Als Modellgebiet wurde hierfür aufgrund der guten Naturdatenlage (vgl. Kap. 6) ein Abschnitt der renaturierten Enz beim Landespegel in Pforzheim ausgewählt (vgl. **Abb. 5.4**).

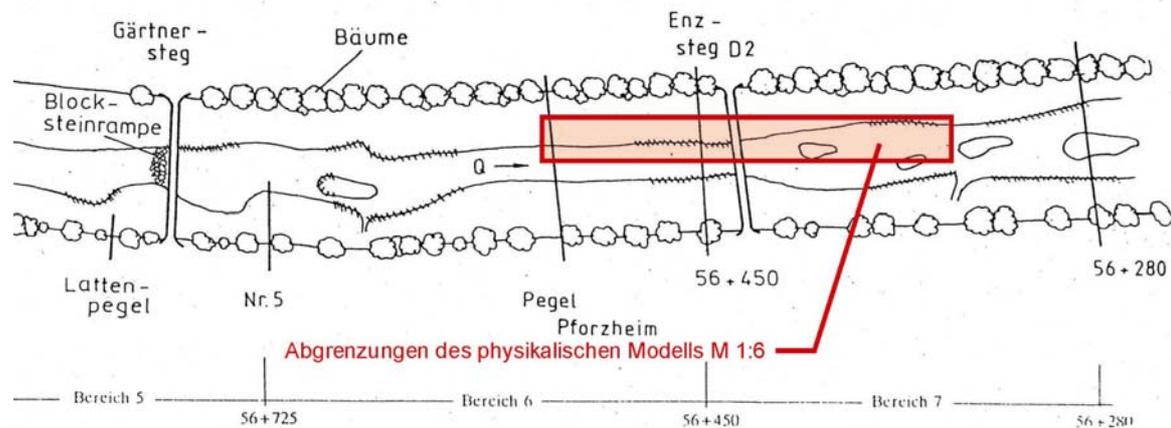


Abb. 5.4: Lage des Modellgebietes Pforzheim/Enz (rechteckige Markierung). Deutlich zu erkennen ist, dass nicht der gesamte Flussschlauch, sondern nur ein ufernaher Gewässerausschnitt im wasserbauartigen Modell nachgebildet wurde.

Für den in **Abb. 5.4** dargestellten Abschnitt konnten seit dem Jahr 1992 die Sedimentationsprozesse im Bereich der Ufervegetation durch erhobene geometrische Daten und Vegetationskartierungen gut belegt werden. Hierfür wurde u.a. ab dem Jahr 2000 das Messnetz in diesem Abschnitt verfeinert. Zudem zeigte die Auswertung der Querschnittsvermessungen, dass sich im Gewässerbett seit den letzten 10 Jahren keine signifikanten morphologischen Veränderungen ergeben haben; nur entlang der Uferzonen fand in Abhängigkeit der Vegetation mehr oder weniger eine Auflandung bzw. Bildung von Uferrehnen statt. Durch die Einbeziehung des Messquerschnittes vom Landespegel Pforzheim am oberwasserseitigen Modellrand waren zu-

dem etliche Wasserstands-Abfluss- bzw. Wasserstands-Geschwindigkeitsmessungen als Kalibrierungsdaten vorhanden.

Für das wasserbauliche Modell stand im Theodor-Rehbock-Labor der Universität Karlsruhe (TH) eine 60,0 m lange und 2,50 m breite gerade Versuchsrinne zur Verfügung (vgl. **Abb. 5.5** und **Abb. 5.6**). Die Steuerung der Anlage wird komplett PC-gestützt durchgeführt. Dabei können folgende Parameter durch den Nutzer gesteuert werden:

- Durchflussregelung (stationär/instationär);
- Feststoffzugabe am Einlaufbereich (konstante Zugabemenge/zeitlich veränderliche Zugabemenge);
- Feststoffrückführung incl. Messung der Rückführungsmenge.

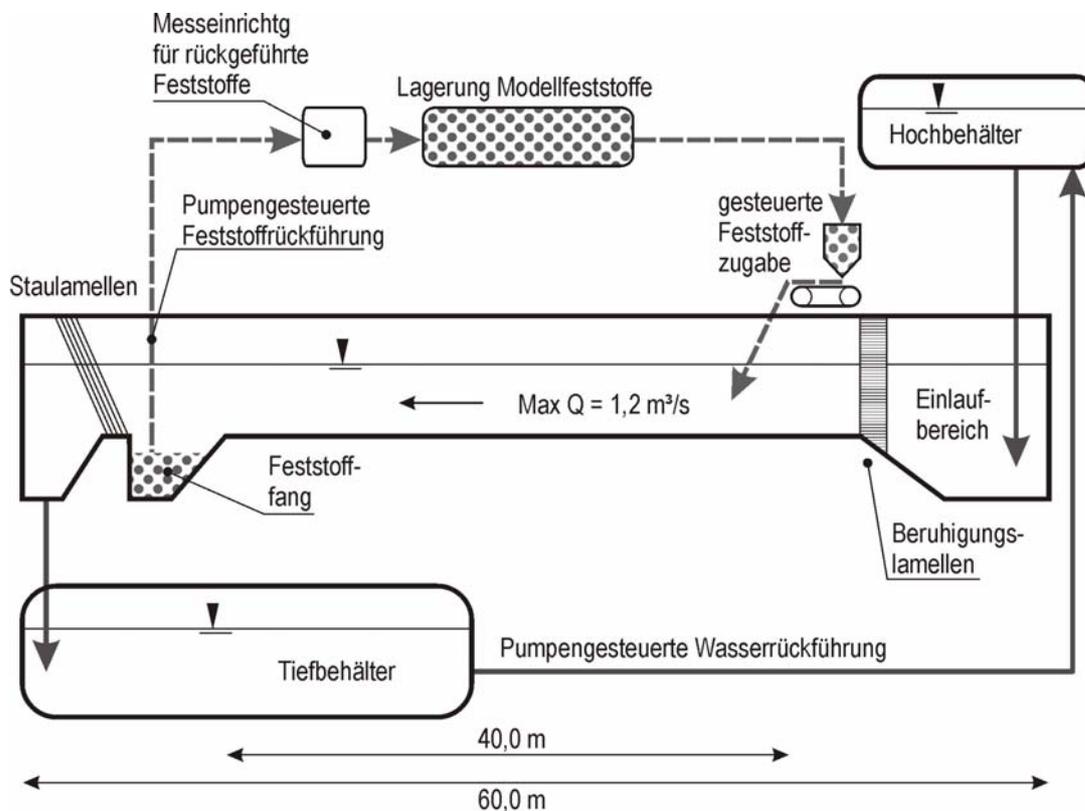


Abb. 5.5: Schematische Darstellung der Versuchsrinne.

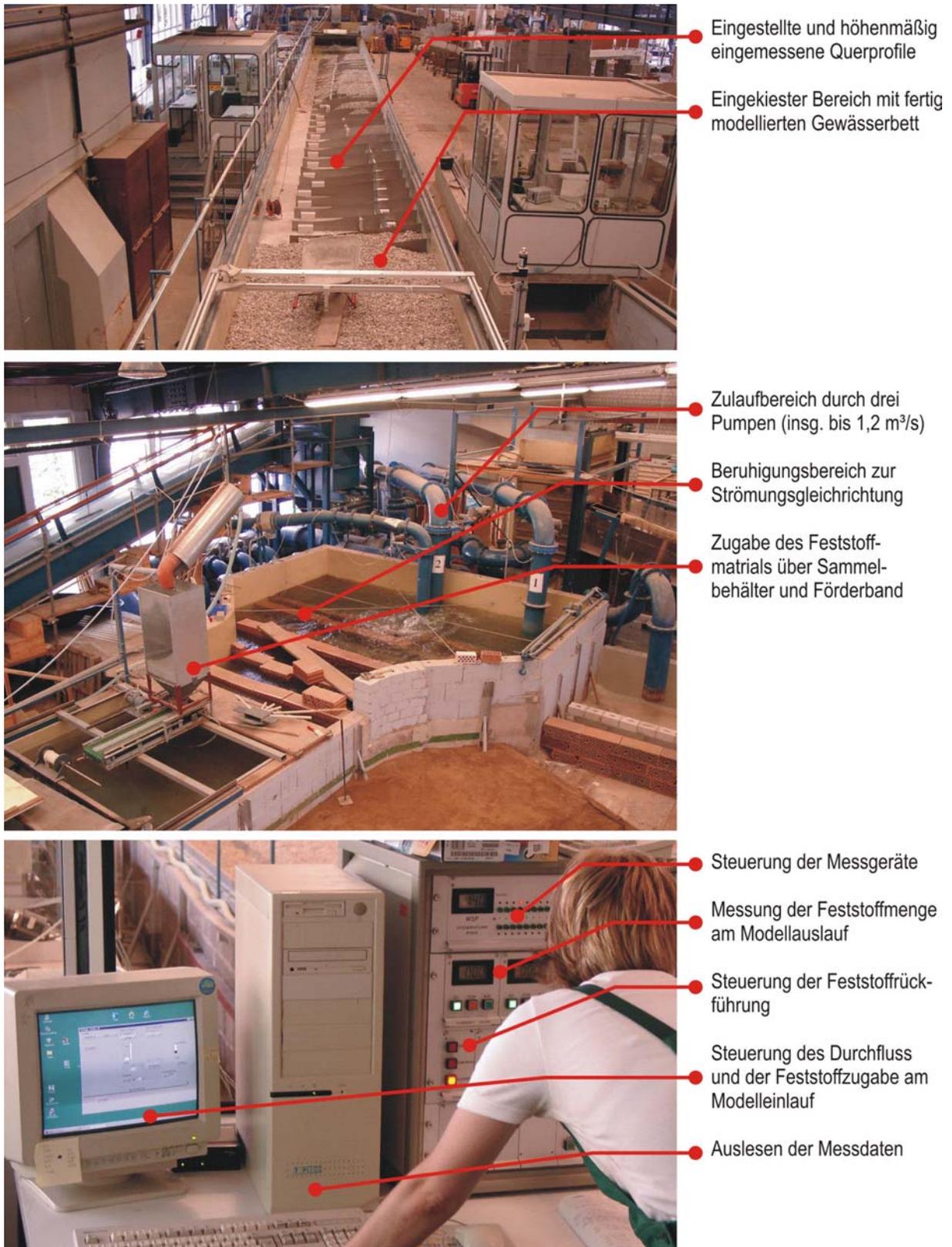


Abb. 5.6: Fotodokumentation der Laborrinne während des Bauzustandes (oben), des Einlaufbereiches mit der Feststoffzugabe am oberen Modellrand (mitte) sowie der Ausrüstung der Laborkabine zur Versuchsstandsteuerung und Erfassung der Messdaten (unten).

Aus den Abmessungen der Laborrinne und der Größe des abgesteckten Modellgebietes in der Natur wurde eine Modellmaßstabszahl $\ell_r = 6,0$ ermittelt. Die Modellierung der Modellstrecke erfolgte durch den geometrisch ähnlichen Einbau modellmaßstäblich skalierten Querschnittsformen (vgl. **Abb. 5.7**). Die Datengrundlage der Querschnitte bildete eine Vermessung des Bereiches direkt nach Fertigstellung der Renaturierungsarbeiten im Jahr 1992. Nach Einstellen der Querschnitte erfolgte die Modellierung des Gewässerbettes durch Einkieseln. (vgl. **Abb. 5.7**).

Als Modellfeststoff wurde ein bereits im Theodor-Rehbock-Labor in großen Mengen vorhandenes Polystyrol-Granulat mit einer Dichte von $\rho_{PVC} = 1300 \text{ kg/m}^3$ verwendet. Dieses Granulat hat sich bereits bei Modellversuchen zur Transportkörperbildung entlang der Sohle im Bereich der Untereibe bewährt (vgl. Wang, Büchele und Nestmann, 2002).

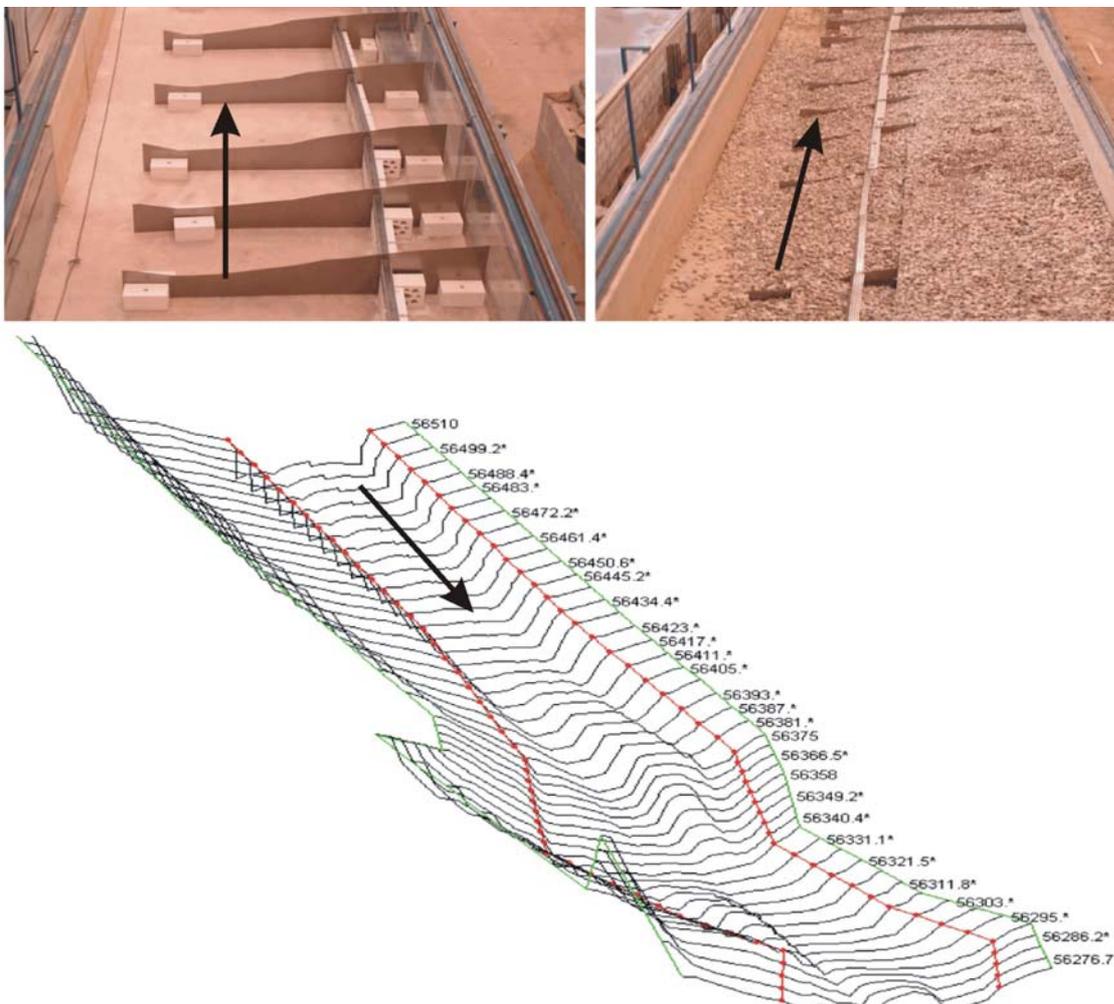


Abb. 5.7: Modell nach dem Einstellen der Querschnitte (links) und nach dem Einkieseln (rechts). Unten sind alle verwendeten Querprofile isometrisch dargestellt.

Zur Simulation der ufernahen Vegetation wurden biegsame Robinienäste, künstliche Koniferen, Besenborsten und junge Weidenäste verwendet (vgl. **Abb. 5.8**).

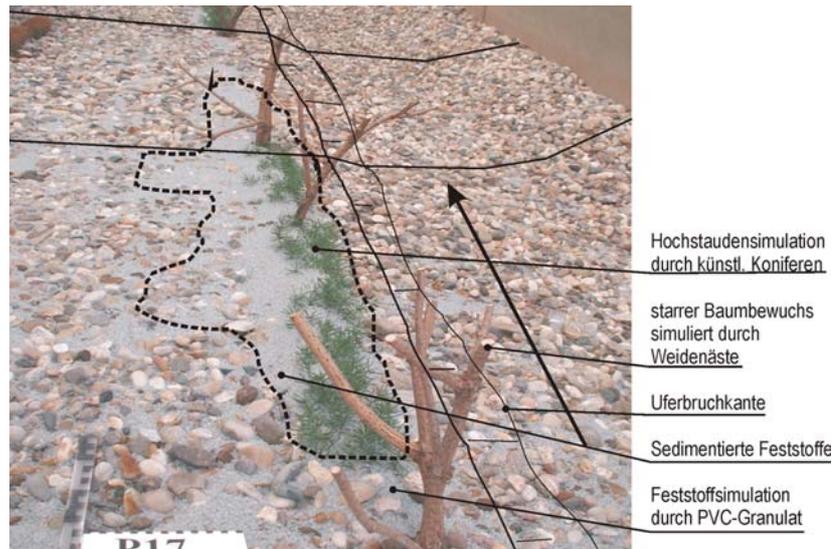


Abb. 5.8: Simulation der Vegetation durch Astmaterial und künstliche Koniferen.

Die Modellkalibrierung erfolgte anhand von ausgewählten in der Natur gemessenen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen am Landespegel im Bereich zwischen MQ und MHQ sowie durch Messung und Vergleich von lokalen Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Untersuchungsgebietes. Hierzu wurde zum einen auf die bereits vorhandene Datenbasis zurückgegriffen (vgl. Kap. 6). Zum anderen wurden seit dem Jahr 2000 hierfür gesonderte Fließgeschwindigkeitsmessungen innerhalb des Untersuchungsgebietes durchgeführt.

Eine Kalibrierung der Geschiebezugabe in das Modell war aufgrund fehlender Geschiebemessungen in der Natur nicht möglich. Hier wurde im Rahmen von Vorversuchen auf Basis eines visuellen Vergleichs der Sedimentationsfelder in der Natur und im Modell für bekannte und photographisch dokumentierte Hochwasserereignisse eine angepasste Zugabemenge gewählt (vgl. **Abb. 5.9**).



Abb. 5.9: Vergleich der Sedimentationsfelder nach einem Hochwasserereignis. Links ist die Situation in der Natur dokumentiert; rechts das Ergebnis des hydraulisch ähnlichen Modells mit abgelagerten Modellfeststoffen (hellblaue Bereiche).

5.2.3 Versuchsdurchführung

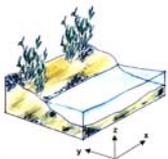
In dem kalibrierten Modell wurde entlang einer 8,0 m langen Referenzstrecke die Vegetationsanordnung in den einzelnen Versuchsserien modifiziert. Es wurden insgesamt 11 unterschiedliche Versuchsanordnungen mit je drei Versuchsläufen gefahren, um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Jeder Versuchslauf lief dabei nach dem gleichen Schema ab:

- 1) Langsames Einregulieren des Durchflusses auf ca. 0,4 m³/s. Dieser Durchfluss entspricht einem mittleren Hochwasserabfluss in der Natur und liegt damit genau in dem Bereich, in dem die Rehenbildung beobachtet wurde.
- 2) Kalibrieren der Fließtiefen entlang des oberen Modellbereiches durch Verstellen der Staulamellen am unteren Modellende. Im Anschluss daran fand eine erweiterte Kalibrierung durch Überprüfung der lokalen Fließgeschwindigkeiten im Modell statt.
- 3) Zweistündige Zugabe der Feststoffmenge unter Einhaltung der aus den Vorversuchen ermittelten realistischen Zugabemenge. Während dieser Zeit wurden Foto- und Videoaufnahmen von der Situation im Bereich der Referenzstrecke angefertigt.
- 4) Langsame Reduktion von Durchfluss und Feststoffzugabe bis zum Modellstillstand.
- 5) Fotografische Dokumentation der Sedimentationszonen im Referenzabschnitt.
- 6) Vermessung der Modellsohle durch eine PC-gesteuerte Flächenabtastung mit einem Ultraschallsensor. Vergleich der Messungen vor und nach dem Versuchslauf und anfertigen einer Differenzenmatrix zur Dokumentation der Sohlenänderung.

5.3 Analyse der Modellergebnisse und Ableitung von Empfehlungen

In **Anlage 5** sind die Beobachtungen bei den 11 gefahrenen Versuchsanordnungen mit je unterschiedlicher Vegetationsanordnung ausführlich dokumentiert und analysiert. Zusammenfassend lassen sich daraus die folgenden Empfehlungen zur Vegetationsanordnung und Unterhaltung an naturnahen Fließgewässern ableiten.

- Anordnung kollektiver Bewuchsbestände auf dem Vorland (Serie 1)

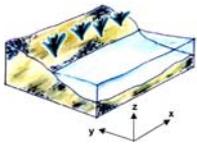


Kollektive Bewuchsanordnungen bewirken eine Sedimentation von feinstpartikulären Feststoffen innerhalb des Kollektivs und auch in der strömungsberuhigten Zone hinter dem Kollektiv. Die Abmessungen der Sedimentationszone im Strömungsschatten des Kollektivs können mit dem Ansatz nach Pasche

(1984) zur Berechnung der Nachlauflänge und -breite hinter einem angeströmten Störkörper abgeschätzt werden.

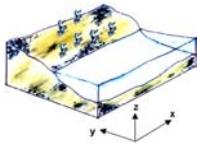
Während der Versuche konnte bezüglich der Sedimentationstendenz kein „Status Quo“ zwischen dem Feststoffeintrag und -austrag aus dem Kollektiv festgestellt werden, so dass die Verlandung stetig anwächst. Aus diesem Grund ist bei solchen kollektiven Vegetationsanordnungen mit einem erhöhten Unterhaltungsaufwand zu rechnen.

- Ufersaum aus Hochstaudenfluren und kleinen, biegsamen Gehölzen (Serie 2)



Für die Praxis im naturnahen Wasserbau sind uferparallele Hochstaudenfluren aufgrund der Versuchsergebnisse nicht empfehlenswert. Die sehr intensive Sedimentation feiner Feststoffe infolge eines Ausfilterungsprozesses zwischen der dichten, krautartigen Vegetation führt zur Ausbildung von Uferrehnen. Im Rahmen von Unterhaltungsarbeiten ist die Beseitigung dieser Uferrehnen aufwendig, da die Hochstaudenfluren durch sehr dichtes Astwerk und oftmals auch durch giftige Pflanzensubstanzen (z.B. die Herkulesstaude beobachtet an der Enz in Pforzheim) verklaust sind.

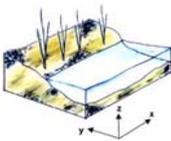
- Auswirkung von Gehölzstummel durch Auslichtungsarbeiten (Serie 3)



Diese Versuchserie wurde auf Anregung der Flussmeisterei Pforzheim und des Tiefbauamtes der Stadt Karlsruhe durchgeführt. Nach Aussage der dortigen Kollegen ist in der Praxis zu beobachten, dass nicht fachgerecht zurückgeschnittene Weiden bei Hochwasserereignissen eine besonders hohe lokale Sedimentation von Feststoffen in ihrem Umfeld bewirken.

Die Versuche bestätigten diese Beobachtungen: als maßgebend für die Sedimentationsrate wurde zum einen die Dichte bzw. –anordnung sowie der Stammdurchmesser festgestellt. Zum anderen bewirkte das Vorhandensein einzelner zusätzlich eingebrachter feiner Zweige, die im Modell einen unsauberen Rückschnitt des Weidenkörpers simulieren sollten, eine enorme Zunahme der Sedimentationsrate in diesem Bereich.

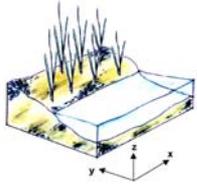
- Dichter Saum aus älteren Weiden bzw. Bäumen entlang der Uferlinie (Serie 4)



Diese Vegetationsanordnung stellt eine häufig anzutreffenden Situation bei Fließgewässern in urbanen Bereichen dar. Der alte gewässernahe Baumbestand wird erhalten, dazwischen werden „Sichtfenster“ zum Gewässer freigehalten, um den Menschen einen Zugang zum Wasser und Erholungsraum zu bieten. Die Modellversuche führten hier zu einer sehr geringen Sedimentationstendenz.

Auch im Sinne des Hochwasserschutzes ist es vorteilhaft, überwiegend nur umströmte Stämme als Widerstände im Strömungsgebiet zu haben, anstelle durchströmter, stark verästelter Vegetation, welche einen größeren Widerstand bewirkt.

- Zweireihige Anordnung eines Weidenbestandes (Serie 5 bis 8)



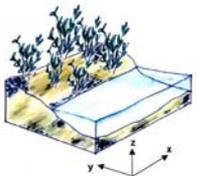
Hier wurde grundsätzlich eine stärkere Verlandung der landseitigen zweiten Vegetationsreihe im Vergleich zur ufernahen ersten Vegetationsreihe festgestellt.

Eine Erklärung des Phänomens ist durch die Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeiten im Hochwasserfall möglich: die ufernahe Weidenreihe erfährt im Vergleich zur uferfernen Reihe eine stärkere Durchströmung infolge der Interaktion mit dem Hauptgerinne. Diese Interaktion ist bei der uferfernen Reihe nicht mehr signifikant vorhanden, so dass hier der Ausfilterungsprozess ungestört von der interaktiven Makroturbulenz stattfindet. Zudem sind auf dem Vorlandbereich infolge der geringeren Fließtiefen die Fließgeschwindigkeiten geringer. Die Sedimentation muss also im Umfeld der uferfernen Reihe intensiver stattfinden.

Ergänzend konnte beobachtet werden, dass bei dichter Vegetationsanordnung eine größere Sedimentationstendenz vorhanden ist. Dies betrifft sowohl die ufernahe Weidenreihe als auch die auf dem Vorland verlaufende Reihe.

Für die Praxis lässt sich hieraus die Empfehlung ableiten, dass im Rahmen der Gewässerunterhaltung insbesondere während der Entwicklungszeit der jungen Weiden darauf zu achten ist, dass die Vegetationsdichte nicht zu groß wird. Durch regelmäßiges Auslichten des Vegetationsbestandes kann bewirkt werden, dass sich die angepflanzten Jungweiden gut entwickeln und schnell eine hydraulisch-sedimentologisch günstige Wuchshöhe erreichen.

- Querreihig-diagonale Anordnung eines Weidenbestandes (Serie 9 bis 11)



Der Versuch zeigte eine sehr starke Sedimentationstendenz innerhalb der Bewuchszone. Die Ausbildung einer Rehne direkt entlang der Uferlinie sowie einer parallel dazu verlaufenden zweiten Rehne am vorlandseitigen Rand der Bewuchsgruppe konnte dabei nachgewiesen werden.

Für die wasserbauliche Praxis bedeuten diese Beobachtungen, dass im Rahmen der Gewässerunterhaltung darauf zu achten ist, dass es infolge der Vegetationsentwicklung nicht zu einer Ausbreitung des Bewuchsbestandes quer zur Fließrichtung kommt: Die ufernahen Gehölzbestände sind demnach so zu entwickeln, dass sie in die Höhe wachsen, sich dabei jedoch nicht in die Breite quer zur Fließrichtung ausdehnen.

Neben der in diesem Fall stark vorhandenen Sedimentationstendenz wirkt eine solche Bewuchsanordnung hydraulisch ähnlich wie ein Querriegel und mechanisch wie ein Grobrechen. Es besteht daher die Gefahr des Versatzes mit Getreibsel und Totholz sowie daraus resultierend ein rascher Anstieg des Strömungswiderstandes. Hierdurch kann es oberwasserseitig zu einer signifikanten Erhöhung der Wasserspiegellagen kommen, was sich nachteilig auf die Hochwassersicherheit auswirkt.

Die Synthese aus den Beobachtungen erlaubt eine weiterführende Einbeziehung der Wuchsform. In Anlehnung an die Formen und Höhen europäischer Bauch- und Strauchweiden (vgl. **Abb. 5.10**) macht hinsichtlich der Verlandungserscheinungen eine praxistaugliche Klassifizierung in drei Gruppen Sinn. Daraus lassen sich exemplarisch Empfehlungen für andere Baumarten der Weichholzzone (z.B. für Erlen und Eschen) ableiten.

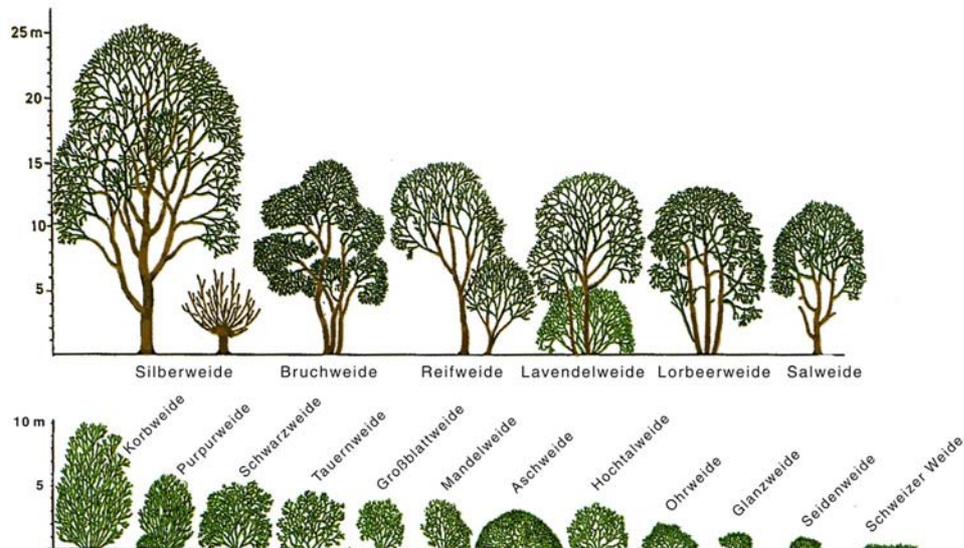


Abb. 5.10: Wuchsformen und -höhen europäischer Weiden. (Schiechtl, 2002)

- Buschartige Wuchsformen (z.B. Ohrweide, Aschweide)

Kennzeichnend sind niedrige Wuchshöhen in Verbindung mit einer bodennahen kreisförmig bzw. elliptischen Erscheinung. Durch den dichten Ast- und Blattbestand in unmittelbarer Bodenhöhe bewirkt diese Wuchsform eine sehr starke Sedimentation bzw. das Ausfiltern feinpartikulärer Feststoffe aus der Strömung. Das Räumen dieser Ablagerungen im Rahmen der Gewässerunterhaltung ist mit erheblichen Aufwand und Eingriffen in den Bewuchsbestand verbunden.

- Strauchartige Wuchsformen (z.B. Schwarzweide, Korbweide)

Diese Wuchsform ist durch eine starke Verästelung und Belaubung über die gesamte Wuchshöhe gekennzeichnet. Die Querschnittfläche ist elliptisch bis hin zu rechteckförmig. In Abhängigkeit vom Belaubungszustand nimmt die Sedimentationstendenz zu. Ferner bewirken die biegsamen Verästelungen ein Auskämmen von Getreibsel und Müll aus der Strömung, was zu einer Verklausung führen kann und wodurch sich zum einen der hydraulische Widerstand und zum anderen die Verlandungserscheinungen verstärken.

- Baumartige Wuchsformen (z.B. Salweide, Silberweide)

Diese Wuchsform ist durch einen Hauptstamm gekennzeichnet. Die Verästelung beginnt erst in einer Höhe, die i.d.R. bei Hochwasserabflüssen nicht mehr überströmt wird. Deshalb ist der hydraulische Widerstand eher gering, das Verlandungsverhalten entspricht den typischen Kolkerscheinungen von elliptischen Körpern in einer Strömung (vgl. **Abb. 5.11**).



Abb. 5.11: Kolkerscheinung und Verlandungsbild um einen umströmten Stamm. (Schneider)

Das Festhalten von Tatsachen...

Einmal kündigte der Physiker Leo Szilard seinem Freund Hans Bethe an, er wolle ein Tagebuch führen: „Ich habe nicht vor, etwas zu veröffentlichen. Ich möchte die Tatsachen nur festhalten, damit Gott Bescheid weiß.“

Daraufhin fragte Bethe: „Glauben Sie nicht, dass Gott die Tatsachen schon kennt?“ – „Ja“, erwiderte Szilard, „die Tatsachen kennt er. Aber diese Version der Tatsachen kennt er noch nicht.“

Aus: Bill Bryson, 2003: Eine kurze Geschichte von fast allem. München (Seite 9).

6 Naturuntersuchung mit Verfahrensanwendung

Aufbau und Gliederung:

6.1	Untersuchungsgebiet „Landespilotmessstrecke Pforzheim/Enz“
6.2	Datengrundlage
6.3	Dokumentation der Gewässerentwicklung (bisherige Untersuchungen)
6.4	Hydraulische Berechnungen
6.5	Gewässermorphologische Untersuchungen
6.6	Diskussion der Ergebnisse

6.1 Untersuchungsgebiet „Landespilotmessstrecke Pforzheim/Enz“

Die vorhergehenden Kapitel 4 und 5 haben Berechnungsvorgaben und weiterführende Empfehlungen aufgezeigt. Die Empfehlungen wurden anhand hydraulischer Bemessungsverfahren und im wasserbaulichen Modellversuch erarbeitet und auf der Basis umfangreicher Naturmessdaten der Enz bei Pforzheim verifiziert.

Die Enz im Stadtgebiet Pforzheim wies vor der naturnahen Umgestaltung ein in Hochwasserdämme eingefasstes, naturfern ausgebautes Doppeltrapezprofil auf. Ihre Ufer waren mit einem durchgehenden Brennessel-Saum bewachsen, die Vorländer erschienen als monotones Einheitsgrünland ohne jeglichen Gehölzanteil. Der Gesamtzustand der Enz wurde als „stark morphologisch geschädigt“ bewertet (vgl. Pro Aqua, 1994).

Die naturnahe Umgestaltung der Enz im Stadtgebiet Pforzheim war eine Teilmaßnahme der Landesgartenschau 1992. Neben der ökologischen Verbesserung des Gewässers wurde im Wesentlichen eine Aufwertung stadtnaher Erholungsflächen durch freiraumplanerische Maßnahmen verfolgt. Die Gewässerentwicklung wurde durch diverse Einzelmaßnahmen erreicht bzw. initiiert:

- Durch Bühnenbauwerke wurde bei fast allen Abflusssituationen ein gewundener Lauf geschaffen;
- Zonen unterschiedlichster Fließgeschwindigkeiten und Sohlrauheiten wurden in den Gewässerlauf integriert;

- Überwasser- und Unterwasserinseln wurden in aufgeweiteten Gewässerabschnitten eingebaut;
- Eine heterogene Uferausbildung mit überwiegend flachen Neigungen wurde konsequent im gesamten Untersuchungsgebiet ausgeführt;
- Die Ufersicherung erfolgte durch ingenieurbioologische Bauweisen, wobei überwiegend standorttypische Gehölze und Sträucher verwendet wurden;
- Neben der Ansaat von standortgerechten Gräsern und Kräutern wurden sog. „Tabuzonen“ für eine ungestörte Sukzession belassen;
- Durch die Verwendung gewässertypischer Steinarten und -größen sollte die Möglichkeit der Substratumlagerung gegeben werden.
- Drei Kilometer stromabwärts der naturnah umgestalteten Strecke wurde ein zusätzlicher Pegel (Eutingen/Enz) errichtet, um die Auswirkungen der eigendynamischen Entwicklungen auf die Messwertqualität am Landespegel Pforzheim/Enz (der innerhalb der Naturmessstrecke liegt) dokumentieren zu können.

In **Tab. 6.1** und in **Tab. 6.2** sind die charakteristischen Merkmale des Untersuchungsgebietes zusammengefasst.

Tab. 6.1: Gewässerbeschreibung der Enz bei Pforzheim.

Gewässer Hauptgewässer / Flussgebiet Kartengrundlage	Enz Neckar / Rhein TK 25 Nr. 7118, Landesvermessungsamt Ba.-Wü.
Verwaltungsdaten: Regierungsbezirk Landkreis Gemeinde Träger der Unterhaltung	Karlsruhe Stadtkreis Pforzheim Stadt Pforzheim Land Baden-Württemberg
Daten zum Untersuchungsgebiet: Umgestaltungsstrecke Länge Höhe ü. NN.	im Stadtgebiet Pforzheim, unterhalb der Nagold-Einmündung, Flusskilometer 56+000 bis 58+000 ca. 2 km ca. 240,00 m+NN
Randbedingungen: Gewässertyp Naturraum Geologie Bodenprofil Nutzung des Talraumes Bemessungshochwasser	Berglandfluss Kraichgau (Umgestaltungsstrecke); Enzhöhen, Schwarzwald-Randplatten und Obere Gäue (Einzugsgebiet) Oberer und mittlerer Buntsandstein, Muschelkalk Flussgerölle der Enz, Schluff, Sand und Kies Wohngebiete, Industrieanlagen, Sportplätze, Wasserfassungen, Kläranlage HQ _{Bem} = 540 m ³ /s ≈ HQ ₂₀₀

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung der Tabelle...

Hydrologische Daten:	
Pegelname	Pforzheim-Kläranlage / Enz
Pegel / Nr.	0004422
Lage	Fluss-km 56+539 oberhalb der Mündung rechts
Pegelnullpunkt	PNP = 241,25 m+NN
Einzugsgebiet	$A_{Eo} = 1479 \text{ km}^2$
Pegelmesszeitraum	1933 bis 2000
NQ	2,33 m ³ /s (10.01.1934)
MNQ	5,24 m ³ /s
MQ	17,5 m ³ /s
MHQ	169 m ³ /s
HQ	532 m ³ /s (21.12.1993)
HQ ₁	33,4 m ³ /s
HQ ₅	230 m ³ /s
HQ ₁₀	284 m ³ /s
Datenquelle	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Rheingebiet, Teil 1: Hoch- und Oberrhein. 2000 (1.11.1999 bis 31.12.2000) Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
Leitbildentwicklung:	
Letzter Ausbau	Begradigung, Doppeltrapezprofilierung (1902-1907)
Gewässergüte	II (mäßig belastet)
Pot. natürliche Vegetation	Silberweiden-Auwald und Eichen-Ulmen-Auwald
Ökologische Defizite vor der naturnahen Umgestaltung	Eingeschränkte Gewässerdynamik, Uferverbau mit Steinpflaster, Vorland gehölzfrei, monotones Einheitsgrünland
Naturnahe Umgestaltung	1990-1991

Tab. 6.2: Strukturmerkmale vor und nach der naturnahen Umgestaltung.

Strukturmerkmale...	...vor der Umgestaltung	...nach der Umgestaltung
Linienführung	gestreckt bis gerade	MW-Bett geschwungen und z.T. verzweigt, HW-Bett gestreckt
Längsprofil Tiefenvarianz	Gefälle $I_{So} \approx 2,7 \text{ ‰}$ mäßig	unterschiedliches Gefälle große Tiefenvarianz
Querprofil Breitenvarianz	eingedeichtes Doppeltrapezprofil extrem gleichförmig	unterschiedliche Bettbreiten, MW-Bett mit Wechselprofil, trapezförmiges HW-Bett z.T. künstl. gestaltet
Uferbeschaffenheit Verzahnung Wasser-Land	abrupter Übergang, da amphibische Zone fehlt; Abkopplung des Gewässers von der Aue durch HW-Dämme	Strauchufer (naturgemäße Bauweisen), Röhrichufer, Hochstaudenufer, Verzahnung z.T. eingeschränkt durch Steinwurf, z.T. gute Verzahnung (Flachwasserzonen)

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung der Tabelle...

Strukturmerkmale...	...vor der Umgestaltung	...nach der Umgestaltung
Sohlbeschaffenheit	hohe Substratdiversität	vielfältiges Substratmosaik
Fließverhalten	bei MQ schnell fließend bis schießend	langsam fließend bis nahezu schießend (im Bereich der Sohlrampe); große Strömungsdiversität
Gehölzstruktur	im Vorland fehlend, auf Deichschulter Pappeln	Strauchvegetation (Weiden werden am MW-Bett langfristig durch Erlen abgelöst), Gehölzgruppen im Vorland und an den Deichen
Vegetationszonierung	Zonierung kaum vorhanden, schmale Rohrglanzgras- bzw. Neophytenstreifen	durch Umgestaltungsmaßnahme Grobzonierung in Röhrlichtzone, Weichholz-, Hartholzzone und Hochstaudenfluren
Kleinstrukturen	Fischunterstände, vielfältiges Geschiebemosaik	Ergeben sich durch Substratumlagerungen, Umlagerung der Inseln und z.T. durch Anlandungen
Bemerkungen		Ein außergewöhnliches Hochwasserereignis im Dezember 1993 verursachte größere strukturelle Veränderungen, ohne jedoch die im Stadtgebiet von Pforzheim geforderte Hochwassersicherheit zu verletzen.
Fotodokumentation		

In **Abb. 6.1** ist das Untersuchungsgebiet kartographisch dargestellt. **Abb. 6.2** vermittelt einen Eindruck über die zehnjährige Entwicklung des Untersuchungsgebietes zwischen 1992 und 2002.

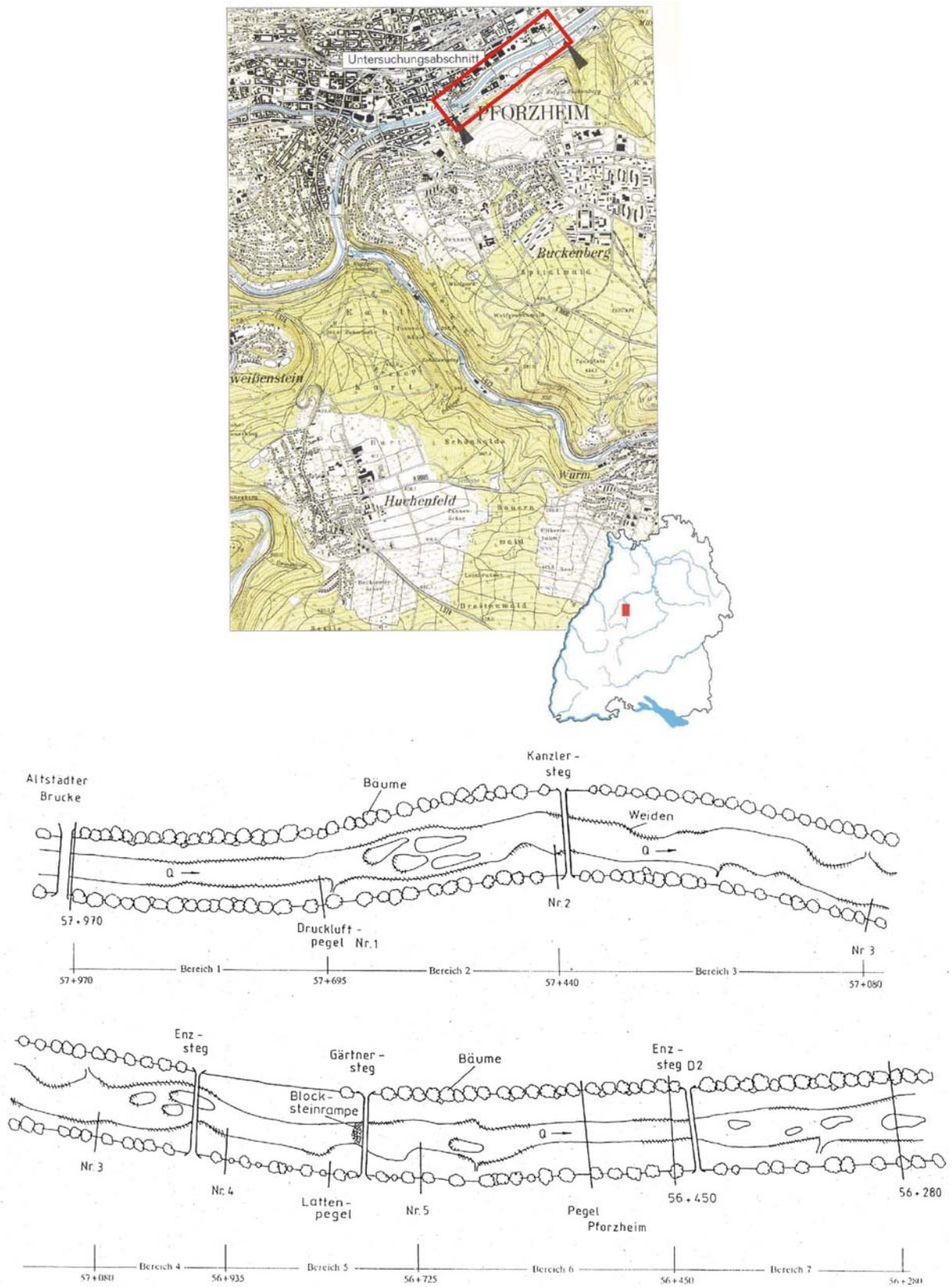


Abb. 6.1: Darstellung des Untersuchungsgebietes mit der Lage der Messpegel 1 bis 5. (Verändert nach LfU, 1995)



Abb. 6.2: Dokumentation der Entwicklung anhand standortgleicher Fotoaufnahmen (oben, Standort auf dem Kanzlersteg mit Blick in Fließrichtung) und Luftbildaufnahmen (unten). (Lehmann und LfU)

Anhand der gewässermorphologischen Strukturmerkmale wird das Untersuchungsgebiet (nach der Umgestaltung) in sieben charakteristische Bereiche (vgl. **Abb. 6.1**, unten) eingeteilt.

- Bereich 1: Enz-km 57+970 bis 57+695 (275 m)

Der Bereich erstreckt sich von der Altstätter Brücke in einer langgezogenen Linkskrümmung bis kurz vor die erste größere Inselgruppe (vgl. **Abb. 6.3**). Das Mittelwasserbett besitzt trapezförmige Profilquerschnitte ohne Unregelmäßigkeiten und wird sowohl links- als auch rechtsufrig von einem Vegetationsstreifen gesichert. Die beiden Vorlandbereiche sind mit Gras bewachsen. Entlang der Hochwasserschutzdeiche befindet sich ein einreihiger Baumbestand.



Abb. 6.3: Blick entlang des Bereich 1 mit Vegetation im unbelaubten Zustand (links: Aufnahme vom Januar 2003) und im belaubten Zustand (rechts: Aufnahme im Juli 2003). Standort war die Altstätter Brücke mit Blick in Fließrichtung.

- Bereich 2: Enz-km 57+695 bis 57+440 (255m)

Dieser Bereich besteht im Wesentlichen aus einem Aufweitungsbereich mit vier Inseln, die bereits vollständig bewachsen sind (vgl. **Abb. 6.4**). Die Querschnittsaufweitung erfolgte durch Reduzierung der Vorlandbreiten. Das Mittelwasserbett weist unregelmäßige Querschnitte mit teilweise starken Einengungen auf. Es ist ebenfalls mit Steinwurf und Böschungsbewuchs gesichert. Die Vorländer sind wie im Bereich 1 mit Gras bewachsen. Entlang der Hochwasserschutzdeiche befindet sich ein einreihiger Baumbestand.



Abb. 6.4: Blick entgegen Fließrichtung zum Bereich 2. Aufnahme vom Juli 2003.

- Bereich 3: Enz-km 57+440 bis 57+080 (360 m)

Der Bereich 3 ist durch ausgeprägte Flach- und Stillwasserbereiche, hervorgerufen durch Buchten, Ufervorsprünge sowie unterschiedliche Böschungsneigungen, gekennzeichnet (vgl. **Abb. 6.5**). Dadurch besitzt das Mittelwasserbett der Enz in diesem Abschnitt eine pendelnde Linienführung. Die Sicherung des Mittelwasserbettes erfolgte nur lokal und überwiegend im Bereich der Ufervorsprünge. Die Vorländer sind mit Gras und vereinzelt Bäumen bewachsen, wobei die Breite der Vorlandstreifen entsprechend der unregelmäßigen Flussbettgestaltung variiert. Der Baumbestand entlang der Hochwasserschutzdeiche ist einreihig und dicht.



Abb. 6.5: Blick in Fließrichtung entlang des Bereiches 3. Unbelaubter Zustand (links: Aufnahme vom Januar 2003) und belaubter Zustand (rechts: Aufnahme vom Juli 2003).

- Bereich 4: Enz-km 57+080 bis 56+935 (145 m)

Bereich 4 umfasst einen Aufweitungsbereich mit Inseln (vgl. **Abb. 6.6**). Im Gegensatz zum Bereich 2 sind hier Teile der Steinbefestigungen an der Oberstromseite der Inseln erodiert. Im Nachlauf der Inseln haben sich Ablagerungszonen ergeben, so dass insgesamt eine eigendynamische Umbildung der Inselstrukturen beobachtet wurde. Die Flussbettaufweitung erfolgte wiederum durch eine Verringerung der Vorlandbreiten. Zur Sicherung des Mittelwasserbettes wurde entlang der Ufer Steinwurf und Böschungsbewuchs eingesetzt. Die Vorländer sind grasbewachsen und vereinzelt mit Bäumen bestanden. Entlang der Hochwasserschutzdeiche verläuft ein einreihiger Baumbestand.



Abb. 6.6: Blick entgegen Fließrichtung entlang des oberen Teiles von Bereich 4. Deutlich sind noch die alten Inselkopfsicherungen zu erkennen. An der rechten Bildseite ist eine durch Umlagerung neu entstandene neue Insel im Nachlaufbereich der alten Insel zu erkennen. Aufnahme vom Juli 2003.

- Bereich 5: Enz-km 56+935 bis 56+725 (210 m)

Im Bereich 5 verläuft das Mittelwasserbett (mit Ausnahme zweier Buchten) geradlinig und regelmäßig (vgl. **Abb. 6.7**). Die erste, kleinere Bucht liegt Oberstrom des Gärtnersteges. Die zweite, größere Bucht liegt Unterstrom des Gärtnersteges und hat sich seit Beginn der Untersuchungen durch Ablagerungen verkleinert. In Höhe des Gärtnersteges befindet sich eine Raue Rampe in aufgelöster Bauweise und nur wenige Meter stromaufwärts ein Einlaufbauwerk für die Kühlwasserentnahme des nahe gelegenen Heizkraftwerkes. Die Vorländer sind mit Gras bewachsen. Zwei kleinere Bereiche sind mit Weidengruppen bestanden und stellenweise befinden sich einzelne Bäume auf den Vorländern. Der rechte Hochwasserdeich besitzt einen lichten, einreihigen Baumbestand. Der linke Hochwasserdeich ist unbewachsen, da hier im Rahmen der Landesgartenschau eine Tribüne in die Uferflanke eingebaut wurde.



Abb. 6.7: Blick in Fließrichtung entlang des Bereich 5. Aufnahme vom Juli 2003.

- Bereich 6: Enz-km 56+725 bis 56+450 (275 m)

Dieser Bereich umfasst einen kleinen Aufweitungsbereich mit einer Insel sowie einen langen, geraden Flussabschnitt im Bereich des Landespegels Pforzheim-Kläranlage (vgl. **Abb. 6.8**). Am Landespegel befindet sich eine Sohlschwelle, um im direkt oberhalb liegenden Messprofil auch bei Niedrigwasser Flügelmessungen durchführen zu können. Hinter der Schwelle befindet sich ein Tosbecken. Die Enz besitzt in diesem Bereich noch weitestgehend ein kanalisiertes und befestigtes Flussbett. Die Vorlandbereiche weisen Grasbewuchs, Weidenbestände und vereinzelte Bäume auf. Die Hochwasserschutzdeiche besitzen links der Enz einen dichten, rechts der Enz einen eher lichten einreihigen Baumbestand.



Abb. 6.8: Blick nach Oberstrom zum Bereich 6, der sich von der Pegelschwelle (Bildmitte) nach Oberwasser erstreckt. Aufnahme vom Juli 2003.

- Bereich 7: Enz-km 56+450 bis 56+280 (170 m)

Bereich 7 umfasst bei beibehaltener gerader Linienführung einen gestreckten Aufweitungsbereich mit Inseln (vgl. **Abb. 6.9**). Im Nachlauf der Inseln haben sich Ablagerungszonen ergeben, so dass insgesamt eine eigendynamische Umbildung der Inselstrukturen beobachtet wurde. Die Flussbettaufweitung erfolgte durch eine Verringerung der Vorlandbreiten. Zur Sicherung des Mittelwasserbettes wurde entlang der Ufer Steinwurf und Böschungsbewuchs eingesetzt. Die Vorländer sind grasbewachsen und vereinzelt mit Bäumen bestanden. Entlang der Hochwasserschutzdeiche verläuft ein einreihiger Baumbestand.



Abb. 6.9: Blick in Fließrichtung entlang Bereich 7. Unbelaubter Zustand (links: Aufnahme vom Januar 2003) und belaubter Zustand (rechts: Aufnahme vom Juli 2003).

An den Bereichsgrenzen wurden im Rahmen der Pilotuntersuchung zur eigendynamischen Entwicklung einer naturnah gestalteten Fließgewässerstrecke innerhalb einer Ortslage durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Sonderpegel (Druckluftpegel) zur Wasserstandsaufzeichnung installiert (vgl. **Tab. 6.3**). Die Pegel wurden von 1992 bis 2002 durch die Landesanstalt betrieben und unterhalten. Aus der zehnjährigen Wasserstandserfassung resultiert vor dem Hintergrund der Abflussmessungen bzw. Wasserstands-Abfluss-Beziehung am Landespegel Pforzheim-Kläranlage (am unteren Ende des Untersuchungsgebietes) ein umfangreicher Datenpool mit Wasserstands-Abfluss-Daten entlang der gesamten Gewässerstrecke im Untersuchungsgebiet.

Tab. 6.3: Daten zu den Sonderpegeln im Untersuchungsgebiet Pforzheim/Enz (vgl. auch Abb. 6.1)

Pegelname	Station (Enz-km)	Pegelnulldpunkt (m+NN)
Sonderpegel 0	57+970	244,33
Sonderpegel 1	57+716	244,05
Sonderpegel 2	57+443	243,29
Sonderpegel 3	57+094	242,59
Sonderpegel 4	56+934	242,36
Sonderpegel 5	56+721	241,68
Landespegel Pforzheim-Kläranlage	56+539	241,25

6.2 Datengrundlage

Im Rahmen des Landesprojekt an der naturnah umgestalteten Enz in der Stadt Pforzheim wurde von der Landesanstalt für Umweltschutz zur Datenerfassung und Dokumentation hinsichtlich der eigendynamischen Entwicklung ein zeitlicher- und fachlicher Rahmen vorgegeben und koordiniert. In **Tab. 6.4** ist der zeitliche Rahmen der Untersuchungen nach den unterschiedlichen beteiligten Fachdisziplinen

gegliedert. In **Tab. 6.5** ist der fachliche Rahmen, ebenfalls untergliedert nach Fachdisziplinen, dargestellt.

Tab. 6.4: Zeitlicher Rahmen zur Datenerfassung an der Pilotstrecke Pforzheim/Enz. (Verändert nach Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Ref. 41.2, 1990, intern)

Landespilotstrecke „Pforzheim/Enz“ → Zeitlicher Rahmen													
Disziplin	Untersuchungsgegenstand	Voruntersuchung	Entwicklungsphase: 1991 bis 2002										
			92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02
Hydrologie	Abflussdynamik		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Geodäsie	Längs- und Querprofile		X		X			X		X			
Hydraulik	Erfassung der Wasserspiegellagen	1989, 1990	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Morphologie	Lauf- und Querprofilentwicklung, Erosions- und Sedimentationsbereiche, Substratumlagerungen, Deckschichtbildung			X	X					X			X
Wasserbau	Ingenieurbiologische Bauweisen (Stabilität, etc)	1989	X	X									
Ökologie	Makrozoobenthos	1991	X	X	X								
	Fischfauna	1991		X	X								
	Bodenkäfer				X								
	Sonstige Tiergruppen	1988		X									
	Vegetation		X	X	X						X		
	Biotopstrukturen der gewässernahen Umgebung	1988											
Gewässerentwicklung	Gehölze, krautige Vegetation, Sohle- und Uferzustand, Gewässerunterhaltung	1989	X	X	X						X		

Tab. 6.5: Fachlicher Rahmen zur Datenerfassung an der Pilotstrecke Pforzheim/Enz. (Verändert nach Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Ref. 41.2, 1990, intern)

Landespilotstrecke „Pforzheim/Enz“ → Fachlicher Rahmen			
Disziplin	Untersuchungsgegenstand	Art der Untersuchung und Zielsetzung	Untersuchungszeitraum
Hydrologie	Abflussdynamik, Sonderpegelnetz	Statistische Untersuchungen Niederschlag-Abfluss	ganzjährig
Geodäsie	Längs- und Querprofile	Terrestrische Geländeerfassung, Detailvermessung standortgleicher Flussprofile	November bis April
Hydraulik	Erfassung der Wasserspiegellagen und der Strömungsverhältnisse	Archivierung der Sonderpegeldaten. Entwicklung und Anwendung geeigneter hydraulischer Berechnungsverfahren	ganzjährig
Morphologie	Lauf- und Querprofilentwicklung, Erosions- und Sedimentationsbereiche, Substratumlagerungen, Deckschichtbildung	Digitales Geländemodell für Massenbilanzierung. Untersuchung des Substrats hinsichtlich Fraktionen und Korngrößen	ganzjährig
Wasserbau	Ingenieurbiologische Bauweisen (Stabilität, etc)	Kartierung und Bewertung der diversen Bauweisen hinsichtlich Stabilität, Vitalität und hydraulischer Wirkung	Vegetationsperiode und bei Hochwasserereignissen
Ökologie	Makrozoobenthos	Quantitative Untersuchung repräsentativer Choriotope; Ermittlung der Gewässergüte; Statistische Untersuchungen; Physikalisch-chemische Messungen	Frühjahr, Sommer, Spätherbst
	Fischfauna	Qualitative und Quantitative Erhebung des Bestandes repräsentativer Gewässerabschnitte durch Elektrobefischung; Statistische Auswertung.	Sommer und Winter
	Bodenkäfer	Bodenökologische Analyse (Diversität, Faunistik, Feuchteindikation); Quantitative und semiquantitative Erhebung der Besiedlung ausgewählter Biotope. Im terrestrischen Bereich Untersuchung ausgewählter Transekte und Abschnitte.	Frühjahr, Herbst, Wasserwechselzone auch im Sommer, Trockenstandorte März bis April
	Sonstige Tiergruppen	Qualitative Erhebung, je nach Tiergruppe zur speziellen ökologische Indikation	je nach Tiergruppe
	Vegetation	Standortanalyse, Sukzessionsforschung; Erhebung des Gesellschaftsinventars sowie zusätzliche Transekt- und Detailkartierung	Wasservegetation im Hochsommer, Ufervegetation von Juni bis August
	Biotopstrukturen der gewässernahen Umgebung	Untersuchung abhängig vom Biotoptyp; Aussagen zur Biotopvernetzung	je nach Biotoptyp
Gewässerentwicklung	Gehölze, krautige Vegetation, Sohle- und Uferzustand, Gewässerunterhaltung	Vergleich Entwicklungszustand – Entwicklungsziel; Ableiten von Unterhaltungsempfehlungen	ganzjährig

Aufgrund des in den obigen Tabellen dargestellten umfangreich erhobenen Datenmaterials erfolgte im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Absprache mit der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg die digitale Archivierung eines Großteils der vorhandenen Daten in einer Datenbank. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit in der hydraulischen und morphologischen Auswertung der Daten liegt, wurde die Datenbank so konzipiert, dass eine gezielte Filterung der Daten möglich wurde.

Das digital archivierte Material umfasst Fotos, Vermessungsdatensätze, Wasserstandsmessungen an den Sonderpegeln, Abfluss-Wasserstands-Daten am Landespegel Pforzheim-Kläranlage, Vegetationskartierungen, Unterhaltungspläne und Luftbilder von diversen Befliegungen. Für das Datenbanksystem wurde als Plattform das Programm Access 2000 von Microsoft verwendet. Hierzu wurden in SQL (Structure Query Language von Microsoft) Scripte und Module programmiert, die das Einlesen, Sortieren, Filtern und Auslesen der Daten ermöglichen.

Aufgrund der zahlreichen Relationen (Datenpools) bzw. Datenarten wurde eine relationale Datenbankstruktur gewählt: Die Daten werden (z.T. als Hyperlinks) in Tabellen gespeichert, zwischen denen Beziehungen definiert werden. Damit alle relevanten Informationen im Datenbanksystem berücksichtigt und Verknüpfungen untereinander dokumentiert werden können, wurde eine graphische Darstellung mit Hilfe des Entity-Relationship-Modelles (ER-Modell) erstellt. Das ER-Modell bildet in diesem Fall anwenderorientiert alle Elemente des relationalen Datenbanksystems ab.

Um Probleme beim Einsatz der Datenbank zu vermeiden (z.B. vielfache Datenredundanz, kurzweilige Datenkonsistenz, Anomalien durch Löschvorgänge, etc.) wurde eine dreistufige Normalisierung der Relationen durchgeführt. Hierzu wurde objektorientiert auf bereits vorhandene Module der Firma Microsoft zugegriffen.

Damit die Datenbank anwenderfreundlich und benutzerorientiert eingesetzt werden kann und zugleich ein Schutz der Datenrelationen gegeben ist, wurden Formularmodule erstellt, die den Anwender interaktiv durch das Programm führen sollen. Der Kern der Datenbank besteht aus untereinander verknüpften Relationen, in denen die Datensätze tabellarisch abgelegt bzw. verlinkt sind (vgl. **Abb. 6.10, linke Seite**). Über diverse Abfragemodule wird es möglich, die Daten nach verschiedenen Kriterien zu filtern und entsprechend eines Sortierschlüssels (Primärschlüssel, Index oder Fremdschlüssel) in einem Ergebnisbericht als Datentabelle auszuschreiben. Hier sind ebenfalls Schnittstellen zu typischen weiteren Anwendungsprogrammen erstellt worden (vgl. **Abb. 6.10, rechte Seite**).

Eine Plausibilisierung der Messdaten (insbesondere der Wasserstandsmessungen) war notwendig, da der Betrieb der Sonderpegel (Druckluftpegel) oftmals fehlerbehaftet war. Hierzu wurde es nötig, alle Pegelaufzeichnungen des zehnjährigen Untersuchungszeitraumes (ca. 5000 m² Papier bzw. 12 Aktenordner mit Pegelaufzeichnungen mit über 356.000 Datensätzen) durchzusehen und die zahlreichen handschriftlichen Vermerke der Pegelwärter zu interpretieren sowie die Auswirkungen auf die Datenqualität im betreffenden Zeitraum zu untersuchen (vgl. **Abb. 6.11**). Die geprüften Daten wurden anschließend digitalisiert und in die Datenbank überführt.

Eine weitere Plausibilisierung der Messdaten erfolgte mit der Datenbank. Hier wurde die Relation der Wasserstandsänderung zur Abflussänderung an jedem Pegel (vgl. **Abb. 6.12**) und korrelativ zum Landespegel überprüft (vgl. **Abb. 6.13**). Daten, die bei dieser Analyse auffällig aus dem Rahmen gefallen sind, wurden als fehlerhaft ge-

kennzeichnet. Exemplarisch ist in **Abb. 6.14** dargestellt, welche Datenmenge letztendlich als verlässlich eingestuft wurde und zur Auswertung verwendet worden ist.

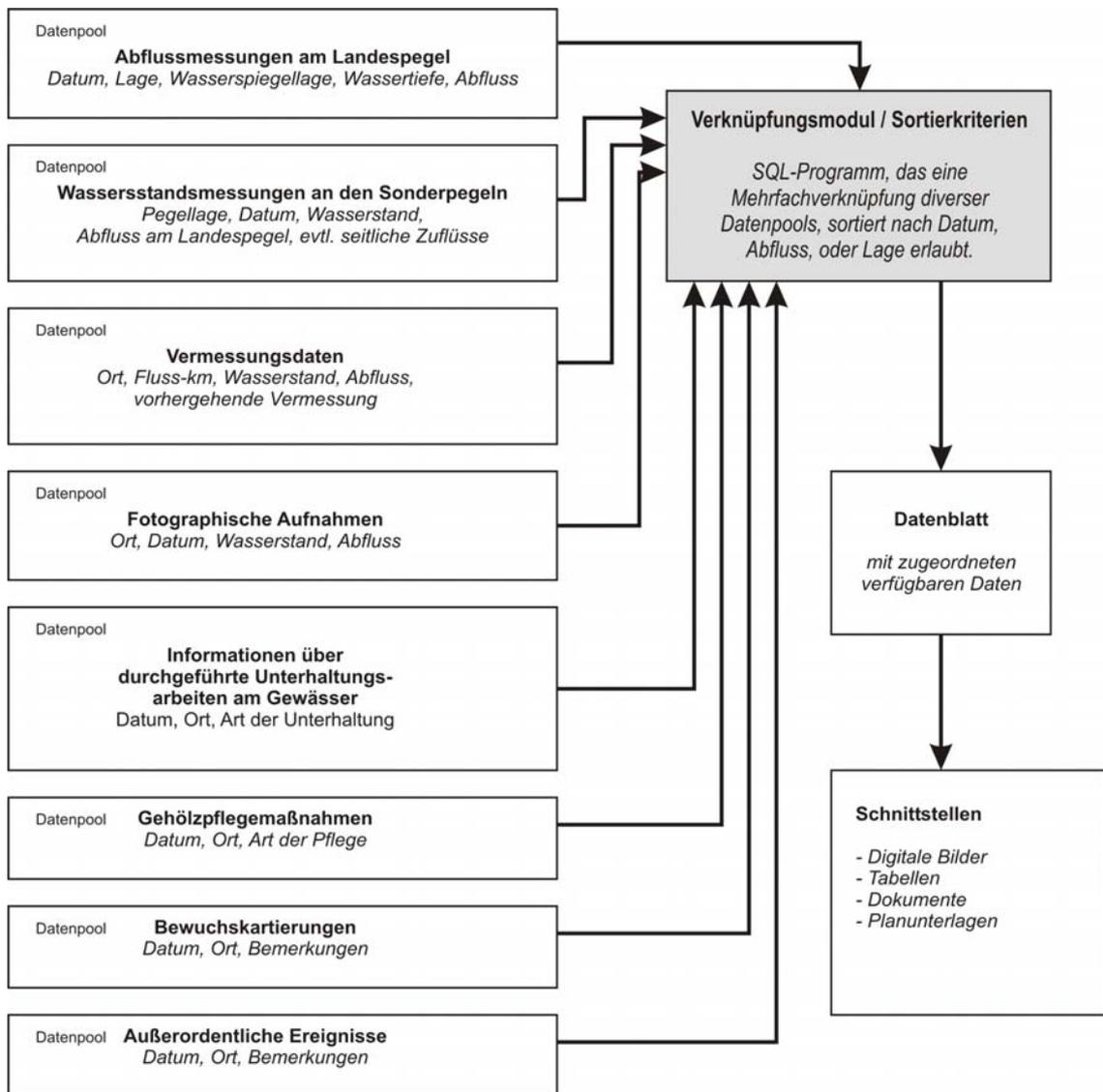
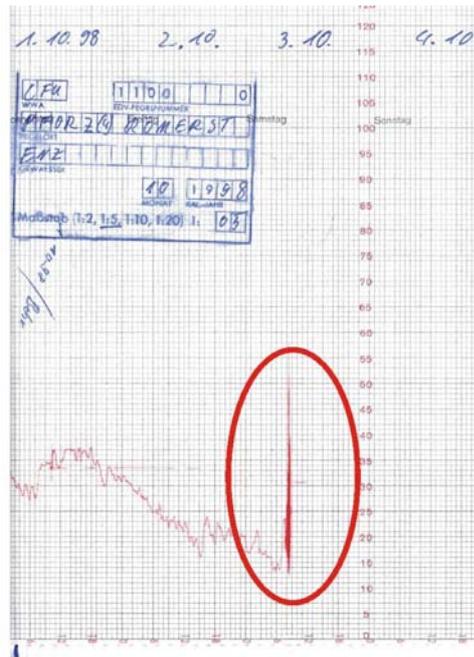


Abb. 6.10: Schematischer Aufbau der Datenbank für eine gezielte Datenzusammenführung von Naturmessdaten.



Höchstwasserstandsregel: Plorzheim Nr. 5

Datum	wirklich		momentane Anzeige an Höchstwasser- standspegel	Pegelgerät zurückgesetzt auf Stand Fogellatte (siehe Spalte 5)		Kurz- zeichen	Auswertung beobacht. Zeitraum/Höchststand in c von - bis / - Spalte 4
	Tageszeit	on/Latte		ja	nein (siehe "Anmerkung")		
1	2	3	4	5	6	7	8
17.6.92	8.55	wirklich	124	46		/u.	8.5.92 - 17.6.92
9.7.92	8.00	"	78	38		/u.	17.6.92 - 9.7.92
20.8.92	10.30	"	124	22		/u.	9.7.92 - 20.8.92
4.9.92	13.35	"	93 93	62		/u.	
22.9.92	13.40	"	64	36	Maßnahme an Tis an überpruft	Neu	
24.9.92	11.00	22.5	53	60	Maßnahme an Tis an überpruft	/u.	
6.10.92	11.20	25.5	76	60	Maßnahme an Tis an überpruft	/u.	
6.10.92	11.35	25.5	-	25.5		/u.	
4.11.92	12.00	45	119	45		/u.	4.11. - 4.11.
19.11.92	9.35	73	94	70	97	/u.	4.11. - 19.11.

Abb. 6.11: Bei der Datenübertragung zu berücksichtigende Faktoren: Fehlbetrieb eines Sonderpegels (oben); Umbaumaßnahme an der Pegelmesseinrichtung (unten). Vor der Datendigitalisierung musste das gesamte Material gesichtet und geprüft werden, um falsche Datensätze zu streichen.

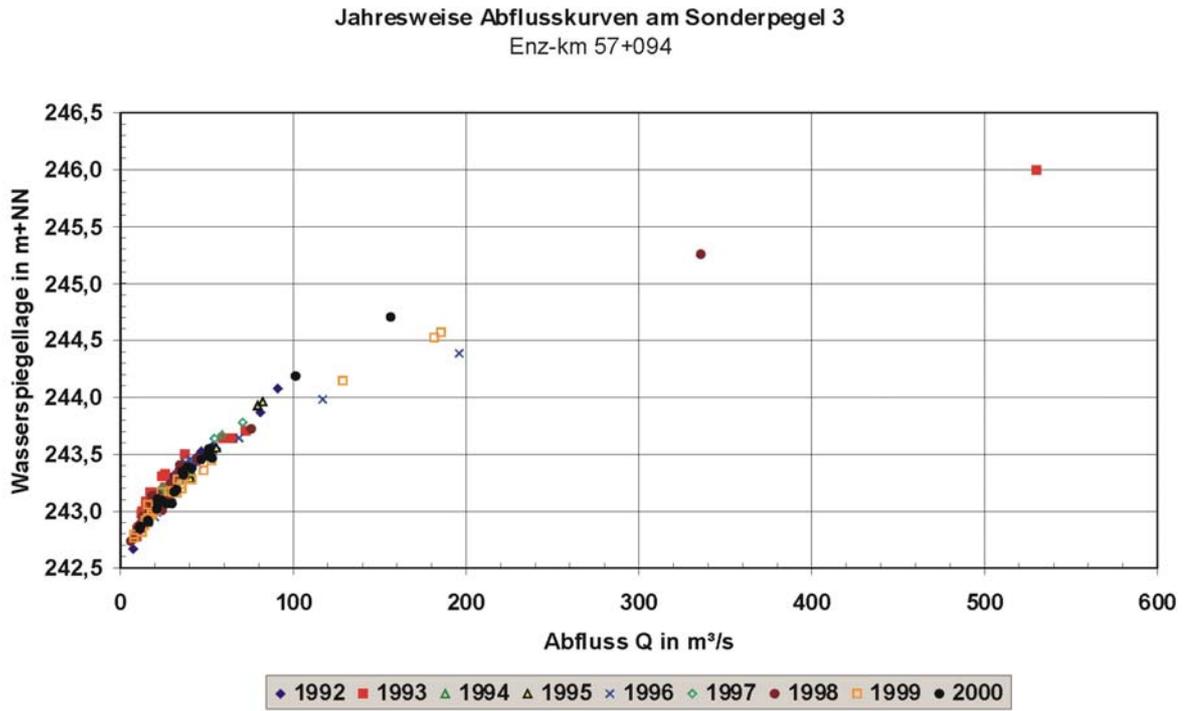


Abb. 6.12: Jahresweise Wasserstands-Abfluss-Beziehung am Sonderpegel 3 nach der Datenplausibilisierung.

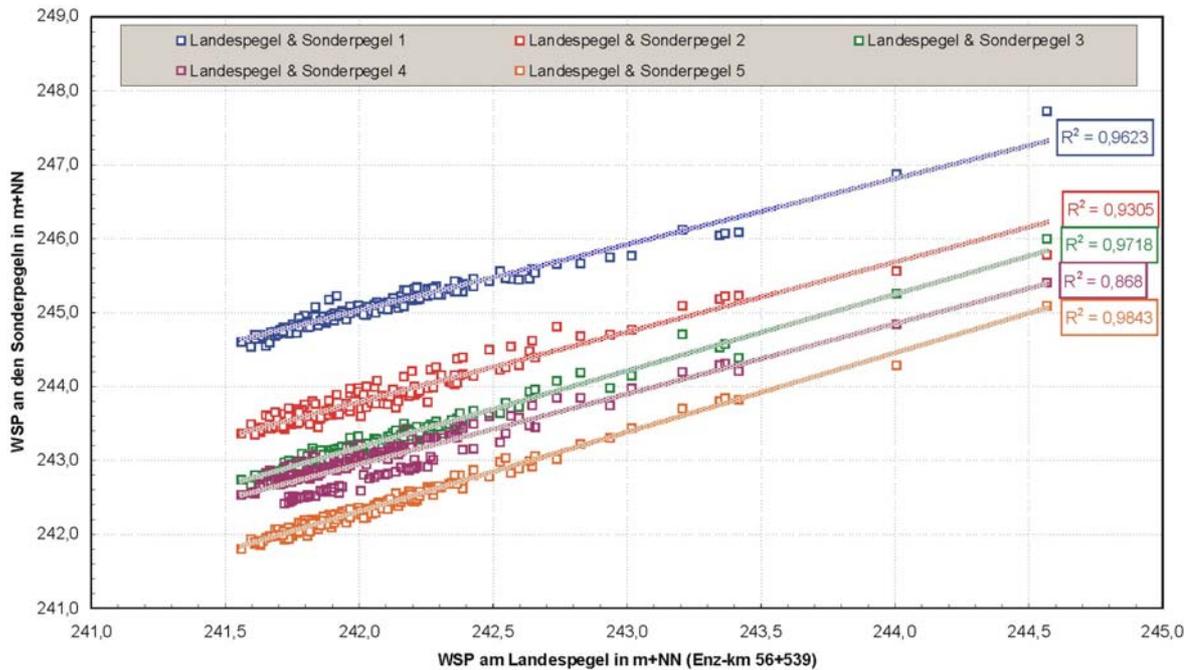


Abb. 6.13: Korrelation zwischen den Wasserständen an den Sonderpegeln und am Landespegel. Die Abbildung enthält bereits nur die plausibilisierten Daten.

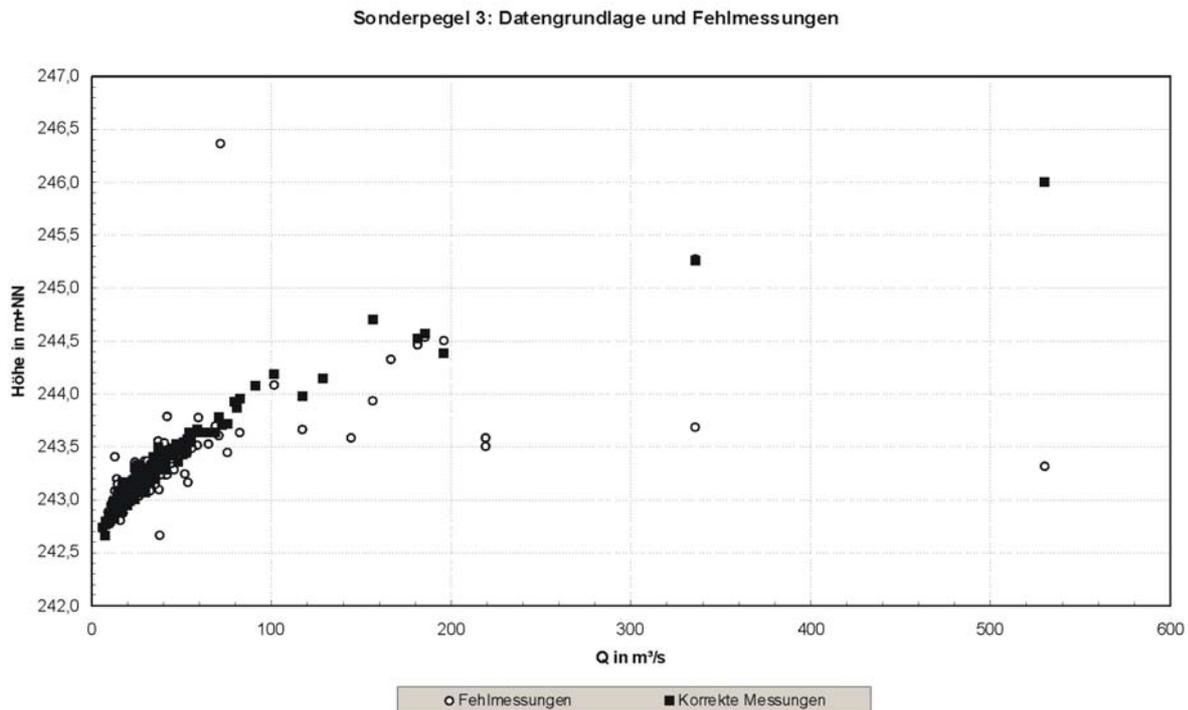


Abb. 6.14 Darstellung der im Rahmen der Plausibilisierung als „falsch“ gekennzeichneten Messungen im Vergleich zu den als „wahr“ gekennzeichneten Messungen am Sonderpegel 3.

6.3 Dokumentation der Gewässerentwicklung (bisherige Untersuchungen)

Dieses Kapitel gibt einen chronologischen Überblick über alle bisherigen Untersuchungen an der Landes-Pilotgewässerstrecke „Pforzheim/Enz“. Aufgrund der Menge an bisherigen Untersuchungen wird hierzu jeweils neben dem Jahr, dem Autor und dem Titel nur eine kurze Beschreibung der wesentlichen Inhalte gegeben.

Jahr 1988

- Ökoplan Berlin & ARGE Landesgartenschau Pforzheim, 1988: Ökologisches Gutachten.
 - Aufnahme des vorhandenen Arten- und Biotopvorkommen. Erarbeitung von Entwicklungszielen des Arten- und Biotopschutzes für die umgestaltete Enz.

Jahr 1989

- Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1989: Renaturierung der Enz in Pforzheim. Wasserbauliches Gutachten. Im Auftrag der Stadt Pforzheim und des Wasserwirtschaftsamtes Freudenstadt.
 - Untersuchungen an einem wasserbaulichen Modell (Maßstab 1:40) zur Umgestaltung der Enz.

- Hier wurde zunächst die Neugestaltung des Gewässerbettes im Hinblick auf das Strömungsverhalten und die Fließgeschwindigkeiten im Hauptbett untersucht.
- In einem zweiten Schritt wurde ein sog. Entwicklungszustand modelliert, bei dem durch Einbau entsprechender Störkörper eine voll entwickelte Vegetation hinsichtlich der Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss untersucht wurde.
- Durch das wasserbauliche Modell konnte eine wichtige Grundlage zur Laufgestaltung, Bepflanzungsplanung und zur Gewässerunterhaltung erarbeitet werden.
- Es wurden keine Versuche mit beweglicher Sohle oder mit Feststoffzugabe durchgeführt, so dass keinerlei Prognosen hinsichtlich morphodynamischer Entwicklungen gemacht werden konnte. Dies hat sich im Nachhinein insbesondere in den Inseln- und Buchtenbereichen als nachteilig erwiesen.
- ARGE Landesgartenschau Pforzheim 1992, 1989: Landschaftspflegerischer Begleitplan zur geplanten Enznaturierung Pforzheim. Endbericht. Im Auftrag des Wasserwirtschaftsamtes Freudenstadt.
 - Qualitative Beschreibung des Arten- und Biotoppotenzials
 - Qualitative Beschreibung des Gewässerpotenzials und des klimatischen Regenerationspotenzials
 - Qualitative Beschreibung des Erlebnis- und Erholungspotenzials
 - Eine Liste der zu wählenden Pflanzenarten wurde erarbeitet

Jahr 1991

- Büro Pro Aqua, 1991: Ökologische Untersuchung und Bewertung der Enz in Pforzheim im September 1990 im Zusammenhang mit der Umgestaltung zur Landesgartenschau 1992. Endbericht. Im Auftrag des Wasserwirtschaftsamtes Freudenstadt.
 - Der Bericht legt den gewässerökologischen Zustand der Enz vor der Renaturierung dar. Erhoben wurden die Makroinvertebraten-Fauna und die Fischfauna. Zusätzlich wurden physikalisch-chemische Messungen durchgeführt.
- Umweltministerium Baden-Württemberg, 1991: Bauweisen des naturnahen Wasserbaus. Umgestaltung der Enz in Pforzheim. (Handbuch Wasser 2, Heft 2).
 - Dokumentation der Arbeiten im Rahmen der naturnahen Umgestaltung der Enz in Pforzheim vor, während und kurz nach der Bauphase 1990-1991

Jahr 1992

- Büro Kienle, 1992: Pflegekonzept zum landschaftspflegerischen Begleitplan des Flusskraftwerkes Eutingen. Endbericht.
 - Darstellung der Pflegemaßnahmen für die Enz oberhalb des Wasserkraftwerkes Eutingen/Enz¹².
 - Das Entwicklungsziel für die Vegetation ist in Planwerken dargestellt
- Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1992: Erarbeitung von Abfluss-Wasserstandsbeziehungen für naturnah gestaltete Fließgewässer. Teil A: Vorgehensweise bei der Ermittlung der Abfluss-Wasserstandsbeziehungen für den naturnah umgestalteten Abschnitt der Enz in Pforzheim. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Der Bericht befasst sich mit den Anforderungen an eine Untersuchung zur Berechnung des Widerstandsverhaltens naturnaher Fließgewässer.
 - Das Untersuchungsgebiet wird beschrieben
 - Eine Vorgehensweise wird dargestellt
- Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1992: Erarbeitung von Abfluss-Wasserstandsbeziehungen für naturnah gestaltete Fließgewässer. Teil B: Anwendung für die Landespilotstrecke Pforzheim/Enz. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Der Bericht befasst sich mit den Untersuchungen zur Berechnung des Widerstandsverhaltens naturnaher Fließgewässer. Vor dem Hintergrund der vorhandenen Naturmessdaten werden unterschiedliche Berechnungsansätze angewendet, verglichen und bewertet.
- Umweltministerium Baden-Württemberg, 1992: Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern. Teil I: Leitfaden. Teil II: Dokumentation ausgewählter Projekte. (Handbuch Wasserbau Baden-Württemberg, Heft 2)
 - Darstellung des Einbaus einzelner Maßnahmen an der Enz in Pforzheim

Jahr 1993

- Büro Pro Aqua, 1993: Limnologische Untersuchungen zur Effizienzkontrolle an der umgestalteten Enz in Pforzheim hinsichtlich der Entwicklung der Fischfauna, Wirbellosenfauna sowie der Gewässergüte. Zwischenbericht.
 - Der Bericht untersucht den gewässerökologischen Zustand der Enz von 1992/1993

¹² Dieses Kraftwerk wurde zeitgleich mit der Umgestaltung der Enz in Pforzheim erbaut. Die Anlage befindet sich etwa 2 km stromabwärts des Untersuchungsgebietes.

- Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 1993: Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung an der naturnah umgestalteten Enz in Pforzheim. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Der Bericht dokumentiert und analysiert die Zusammenhänge zwischen Einzelmaßnahmen im Rahmen der Renaturierung (z.B. Linienführung, Ufersicherungen, Begrünung) und der Vegetationsentwicklung entlang der Ufer und auf den Vorländern
- Flussmeisterstelle Pforzheim-Calw, 1994: Pflegekonzept zur naturnahen Umgestaltung der Enz in Pforzheim. Im Auftrag des Amtes für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Freudenstadt.
 - Das Konzept enthält generelle Unterhaltungsstrategien für die ersten fünf bis sieben Jahre nach der Umgestaltung (sog. Entwicklungspflege).
 - Ein detaillierter Pflegeplan für das Jahr 1993 ist beigelegt
- Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1993: Hydraulische Bemessungsgrundlagen für Fließgewässer. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - In Weiterführung der Untersuchungen aus dem Jahr 1992 werden hier nun allgemeingültige Ansätze und Handlungsvorgaben erarbeitet und exemplarisch auf ausgewählte Datensätze der Enz angewendet. Alle Anwendungsempfehlungen stützen sich auf die empirische Fließformel nach Gauckler, Manning und Strickler. Innovativ sind jedoch die Vorgaben und Formblätter zur schnellen Erfassung von Naturdaten.
- Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 1993: Vegetationsstrukturen an der naturnah umgestalteten Enz in Pforzheim. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Der Bericht zeigt die Vegetationsstrukturen entlang der renaturierten Enz auf. Differenziert wird dabei zwischen angepflanzter Vegetation und sukzessiv aufgekommene Vegetation.
 - Die Vegetationsstrukturen entlang der Uferbereiche werden hinsichtlich ihrer Stabilität gegenüber aufgetretenen hydrodynamischen Belastungen während vergangener Hochwasserereignisse bewertet.
- Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 1993: Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung an der naturnah umgestalteten Enz in Pforzheim. Detailerhebungen im erweiterten Uferbereich und Bearbeitung von Dauerbeobachtungsflächen. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Der Bericht ist die Fortsetzung der Arbeit des Instituts aus dem Jahr 1992

- Der Zustand von Dauerbeobachtungsflächen wird erläutert
- Das Ausbreitungsverhalten neophytischer Vegetation wird dokumentiert

Jahr 1994

- Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim, 1994: Unterhaltungskonzept zur naturnahen Umgestaltung der Enz bei Pforzheim unter ökologischen und hydraulischen Gesichtspunkten. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Grundlage ist das Unterhaltungskonzept der Flussmeisterstell Calw aus dem Jahr 1993 sowie die Ergebnisse der wasserbaulichen Modellversuche aus dem Jahr 1989
 - Das Unterhaltungskonzept soll für die Jahre 1993 bis 1996 gelten und nennt besonders Unterhaltungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung der Hochwassersicherheit im Untersuchungsgebiet.
- Büro Pro Aqua, 1994: Limnologische Untersuchungen zur Effizienzkontrolle an der umgestalteten Enz in Pforzheim hinsichtlich der Fischfauna, Wirbellosenfauna sowie der Gewässergüte.
 - Der Bericht vergleicht die Untersuchungsergebnisse aus der Zeit vor der Renaturierung (1991) und nach der Renaturierung (1993)
 - Die Auswirkungen der naturnahen Umgestaltung auf die limnologisch-faunistische Entwicklung wird dargestellt und analysiert.
- Büro für Entomologie und Ökologie, 1994: Naturnahe Umgestaltung der Enz in Pforzheim – Bodenkäferuntersuchung 1994. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Der Bericht erläutert die Auswirkungen der naturnahen Umgestaltung auf die ufer- und auenbewohnenden Bodenkäfergesellschaften
 - Der Bodenkäferbestand 1994 wurde aufgenommen und mit Werten von Vergleichsbiotopen verglichen
- Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1994: Bewertung der naturnahen Bauweisen an der Enz nach dem Hochwasser vom Dezember 1993. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Vergleich der Gewässerlaufstrukturen vor und nach dem Extremhochwasser im Dezember 1993 (ca. HQ₂₀₀)
 - Dokumentation morphologischer Veränderungen – insbesondere im Bereich der Inseln und der Buchten
 - Dokumentation von Schäden an den ingenieurb biologischen Bauweisen zur Ufersicherung

- Rückrechnung der hydrodynamischen Belastungen während des Hochwasserereignisses anhand gemessener Wasserspiegellagen
- Ableitung von Empfehlungen hinsichtlich der Stabilität ingenieurbiologischer Bauweisen zur Ufersicherung

Jahr 1995

- Hohmann, J., Konold, W., 1995: Renaturierung von Fließgewässern. Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung an der Enz in Pforzheim.
 - Die Arbeit befasst sich mit der Entwicklung naturnah umgestalteter Fließgewässer unter ökologischen Gesichtspunkten
 - Zusammenhänge zwischen den Maßnahmen der Umgestaltung und der Vegetationsentwicklung werden exemplarisch an der Enz erarbeitet und allgemeingültig projiziert
- Umweltministerium Baden-Württemberg, 1995: Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern – Teil III: Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben. Erste Zwischenergebnisse der Erfolgskontrolle. (Handbuch Wasser 2, Heft 20)
 - Zusammenfassung der Ergebnisse aus den bis 1994 durchgeführten Untersuchungen. Dabei wird hauptsächlich auf die Entwicklung der Gewässerflora und –fauna eingegangen.

Jahr 1999

- Schiffer, S., Wiegner, O., 1999: Topographisch-hydrographische Aufnahme der Enz im ehemaligen Landesgartenschauengelände Pforzheim und Darstellung der Veränderungen in Plänen und in Auto-CAD Map. Diplomarbeit an der Fachhochschule Karlsruhe im Fachbereich Geoinformationswesen.
 - Vermessung einzelner Gewässerprofile und vergleichende Darstellung der Daten mit Profilen, die im Rahmen photogrammetrischer Vermessungen in den Jahren 1994 durch die Landesanstalt für Umweltschutz erhoben wurden.
- Gentil, C., 2000: Berechnung von Widerstandsbeiwerten naturnaher Fließgewässer. Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH).
 - Austesten von diversen empirischen und halbempirischen Berechnungsverfahren an sieben ausgewählten Wasserstands-Abfluss-Beziehungen, die am Landespegel Pforzheim-Kläranlage erhoben wurden.

Jahr 2000

- Büro Geitz und Partner, 2000: Musterunterhaltungsplan Enz für den Streckenabschnitt der naturnah ausgebauten Pilotstrecke in Pforzheim. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
 - Sehr ausführliche Darstellung der notwendigen Unterhaltungsarbeiten zur Gewährleistung der Hochwassersicherheit
 - Mit einer eindimensionalen Berechnung auf Basis empirischer Formelwerke wird hier das Abfluss-Wasserstandsverhalten berechnet. Das Büro macht dabei eine Fehlinterpretation des Widerstandsverhaltes der ufernahen Vegetation, da es stets von einem kompletten Umlegen der Strauchbestände bei Hochwasser ausgeht und somit viel zu „glatte“ Rauheitsbeiwerte für die Vegetation annimmt.

Jahr 2002

- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), 2002: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg. Karlsruhe (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Heft 76).
 - Kalibrierung empirischer Widerstandsbeiwerte für ausgewählte Abflussergebnisse an der Enz in Pforzheim für alle Sonderpegelstellen
 - Darstellung des Verlaufes empirischer Widerstandsbeiwerte über die Fließtiefe auf Basis der kalibrierten Stützstellen

Jahr 2003

- Lehmann, B., 2003: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Zwischenbericht zum BWPlus-Forschungsvorhaben BWC 21019: Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Empfehlungen zur naturnahen Entwicklung ausgebauter Fließgewässer in Ortslagen unter Berücksichtigung des Hochwasserschutzes. Veröffentlicht unter www.fz-karlsruhe/bwplus.de.
 - Erstellen einer Datenbank zur Archivierung der Naturmessdaten
 - Auswertung der Naturmessdaten Pforzheim/Enz hinsichtlich morphologischer Veränderungen
 - Photographische Dokumentation der Gewässerentwicklung

Jahr 2004

- Lehmann, B., 2004: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Zwischenbericht zum BWPlus-Forschungsvorhaben BWC 21019: Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Empfehlungen zur naturnahen Entwicklung ausgebauter Fließgewässer in Ortslagen unter Berücksichtigung des Hochwasserschutzes. Veröffentlicht unter www.fz-karlsruhe/bwplus.de.

- Konzeptentwicklung für wasserbauliche Modellversuche zur qualitativen Beschreibung der Interaktion zwischen Strömung, Vegetation und Feststofftransport
- Hydrodynamisch-numerische Simulation ausgewählter Abflussereignisse an der Enz in Pforzheim auf Grundlage der Naturdatenbasis (1D und 2D)
- Koppelung der Berechnungsergebnisse mit Feststofftransportmodellen zur Simulation der Feststoffbewegung im Untersuchungsgebiet

6.4 Hydraulische Berechnungen

In diesem Kapitel wird die in Kap. 4 erarbeitete Methodik zur Strömungsberechnung naturnaher Gewässerstrukturen unter Verwendung der erhobenen Naturmessdaten eingesetzt und verifiziert. Hierzu werden exemplarische Abflussereignisse im Bereich von $HQ_1 = 33 \text{ m}^3/\text{s}$ bis über $HQ_{10} = 284 \text{ m}^3/\text{s}$ eindimensional unter Verwendung der universellen Fließformel bei Anwendung der turbulenz-theoretischen Ansätze zur Widerstandsquantifizierung nachgerechnet. Als Eingangsdaten dienen die geometrischen Querschnittsdaten, die gemessenen Wasserspiegellagen sowie die aus Bewuchskartierungen entnommenen Vegetationsanordnungsparameter. Berechnet wird jeweils der Abfluss in den einzelnen Sektionen und im gesamten Querschnitt.

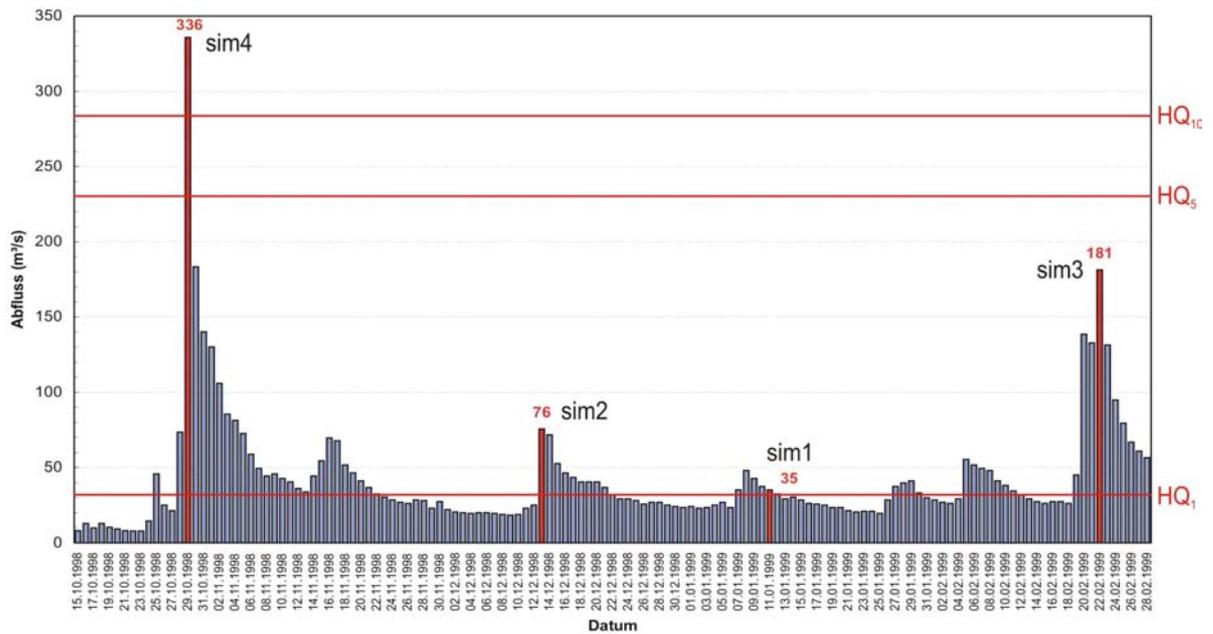
Die Beurteilung der Berechnungsergebnisse erfolgt relativ zum gemessenen Abfluss am Landespegel Pforzheim-Kläranlage, der als wahrer Wert angenommen wird. Weil die Abflusskurve am Landespegel nur im Bereich zwischen NQ und MQ durch zahlreiche Messwerte abgesichert ist, im Hochwasserbereich demgegenüber aber nur einzelne unsichere Messwerte existieren, ist der Verlauf der Abflusskurve in diesem Abflussspektrum zwar tendenziell bekannt, eine Interpolation jedoch infolge fehlender Stützstellen mit Unsicherheiten verbunden.

Abflussbestimmungen durch Vielpunktmessungen mit einem Messflügel sind insbesondere bei Hochwasserabflüssen mit Unsicherheiten von bis zu $\pm 10\%$ verbunden (vgl. Pegelvorschrift der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1978). An der Pegelanlage Pforzheim-Kläranlage kam es sogar während Messungen bei Hochwasser vor, dass aufgrund der hohen Strömungsbelastungen die Messung im Hauptgerinne nicht vollständig möglich war bzw. die komplette Pegel-Seilkrananlage abgerissen wurde. Nach Rücksprache mit dem Referat für Pegelmesswesen der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg wurde beschlossen, die Abflusskurve am Pegel Pforzheim-Kläranlage im Abflussbereich über HQ_1 mit einer Ungenauigkeit von $\pm 10\%$ anzunehmen. Demnach ist im Folgenden die Abflusskurve durch zwei einhüllende Kurven dargestellt.

Bei der Auswahl exemplarischer Ereignisse wurde auf folgende Randbedingungen geachtet:

- Es sollten bewusst nur Abflussereignisse im Spektrum von MQ bis etwa HQ_{10} gewählt werden, da hier aufgrund der sich einstellenden Fließtiefen von einem komplexen Widerstands- und Interaktionsverhalten im Gewässerprofil auszugehen ist. Sowohl eine Untersuchung von Abflüssen, bei denen keine Überflutung der Bewuchssektionen bzw. der Ufer- und Vorlandbereiche stattfindet als auch die Untersuchung von sehr extremen Abflüssen bedingt keine Anwendung der Methodik aus Kapitel 4. Für diese Fälle können nach wie vor empirische Ansätze angewendet werden (vgl. **Anlage 2**).
- Die zeitliche Nähe aller untersuchten Abflussereignisse sollte vorhanden sein, damit eine signifikante Vegetationsentwicklung, wie sie z.B. im Zeitraum von mehreren Jahren beobachtet wurde, nicht zu berücksichtigen war;
- Alle zu untersuchenden Abflussereignisse sollten während der gleichen Jahreszeit stattgefunden haben, um von einem ähnlichen Belaubungszustand ausgehen zu können.
- Gute Kartierungsunterlagen und aussagekräftiges Bildmaterial von der Vegetation im untersuchten Gewässerabschnitt mussten vorhanden sein, damit die für die Berechnung notwendigen Vegetationsparameter abgeleitet werden konnten;
- Die Gewässerbettgeometrie sollte möglichst im Zeitraum der zu untersuchenden Ereignisse erhoben worden sein, um morphologische Entwicklungen, die zwischen dem Untersuchungszeitraum und der Gewässerbettvermessung stattgefunden haben könnten, auszuschließen;

Die oben genannten Randbedingungen wurden als Filterkriterien in die erstellte Datenbank eingegeben. Die Suche ergab einen optimalen Untersuchungszeitraum im Winter 1998/1999. Damals haben zeitnah einige Abflussereignisse im Bereich zwischen HQ_1 und HQ_{10} stattgefunden. Vier der Ereignisse wurden ausgewählt (vgl. **Abb. 6.15**), da hierzu von vier Sonderpegeln (Nr. 0, 2, 3 und 4) gutes Datenmaterial vorlag. Zwei der Sonderpegel waren aufgrund technischer Defekte ausser Betrieb (Nr. 1 und 5).



Nr.	Datum	Q _{gemessen} in m ³ /s	Wasserstand in m+NN			
			Sonderpegel 0	Sonderpegel 2	Sonderpegel 3	Sonderpegel 4
1	11.01.1999	35	245,07	243,83	243,24	243,09
2	13.12.1998	76	245,45	244,29	243,72	243,58
3	22.02.1999	181	246,05	245,19	244,53	244,29
4	29.10.1998	336	246,88	245,96	245,26	244,84

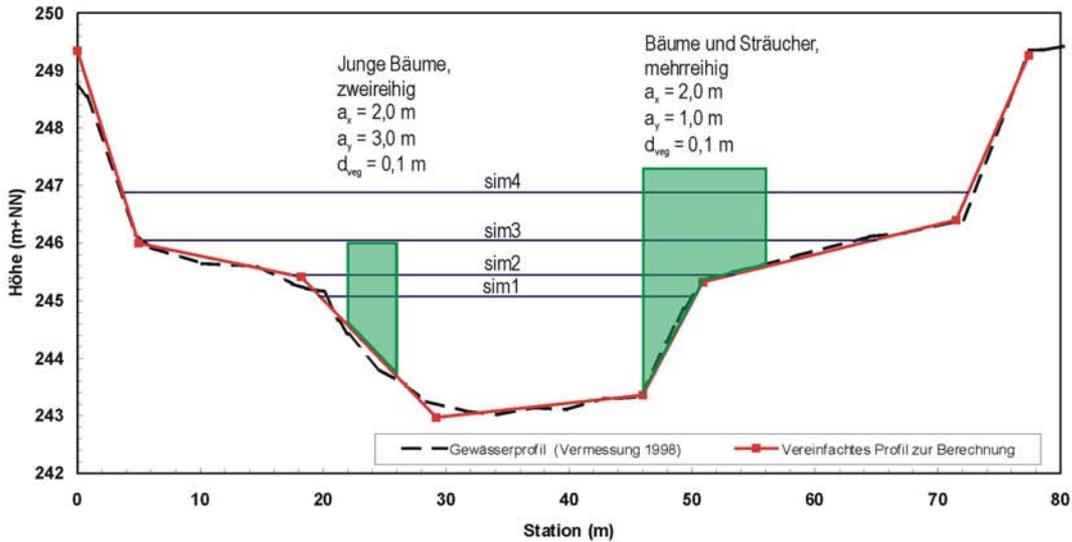
Abb. 6.15: Abflussganglinie am Landespegel Pforzheim-Kläranlage (→ Abb. 6.1) während des Winters 1998/99. Markiert sind die vier Abflussereignisse, die methodisch untersucht wurden.

Für den Untersuchungszeitraum war eine aktuelle Vermessung der Gewässerprofile an den Sonderpegeln vorhanden. Ebenso standen die Auswertungen von Sohlenproben aus dem Jahr 1997 zur Verfügung. Hieraus wurde die äquivalente Rauheit der Gewässersohle (Hauptgerinne) abgeleitet.

Auf Grundlage von Fotos sowie der Vegetationskartierungsdaten aus dem Jahr 1999 wurden im Bereich der Sonderpegel 0 bis 4 die Anordnungsparameter (a_x , a_y und d_{veg}) rekonstruiert. Bereits hier zeigte sich, dass die Kartierungsdaten eine vollständige Ableitung der Parameter nicht ermöglichten, da insbesondere bei der Strauchvegetation keine Angaben zur Strauchdichte gemacht wurden. Durch nachträgliche Erhebungen im Feld im Sommer 2004 konnten diese Datenlücken geschlossen werden.

Die charakteristischen Querschnitte an den Sonderpegeln wurden abstrahiert und in Anlehnung an den Vegetationsbestand sektioniert. Mit Hilfe des erstellten Excel-Programmes erfolgte dann die eigentliche Berechnung der Durchflüsse in Abhängigkeit von den gemessenen Wasserständen. Alle Zwischen- und Endergebnisse zu den einzelnen Berechnungen sind tabellarisch in **Anlage 6** dargestellt. Im Folgenden sind die Berechnungsergebnisse zusammengetragen und relativ zu den in der Natur ermittelten Abflusswerten dargestellt (vgl. **Abb. 6.16 bis 6.20**).

Sonderpegel 0 – Enz-km 57+970 (vgl. **Abb. 6.3**)



Rechnung Nr.	Naturmessdaten			Verfahrensanwendung		relativer Fehler (%)
	gemessene Wasserspiegellage (m+NN)	Abfluss nach Messung am Landespegel Q_{gem} (m ³ /s)	Bemerkung	berechneter Abfluss Q_{ber} (m ³ /s)	Differenz $\Delta Q = Q_{gem} - Q_{ber}$ (m ³ /s)	
SP1_sim1	245,07	35,0	ca. HQ ₁	37,8	-2,76	7,88
SP1_sim2	245,45	76,0		73,0	3,04	4,00
SP1_sim3	246,05	181,0	ca. MHQ	191,1	-10,13	5,60
SP1_sim4	246,88	336,0	> HQ ₁₀	333,3	2,72	0,81

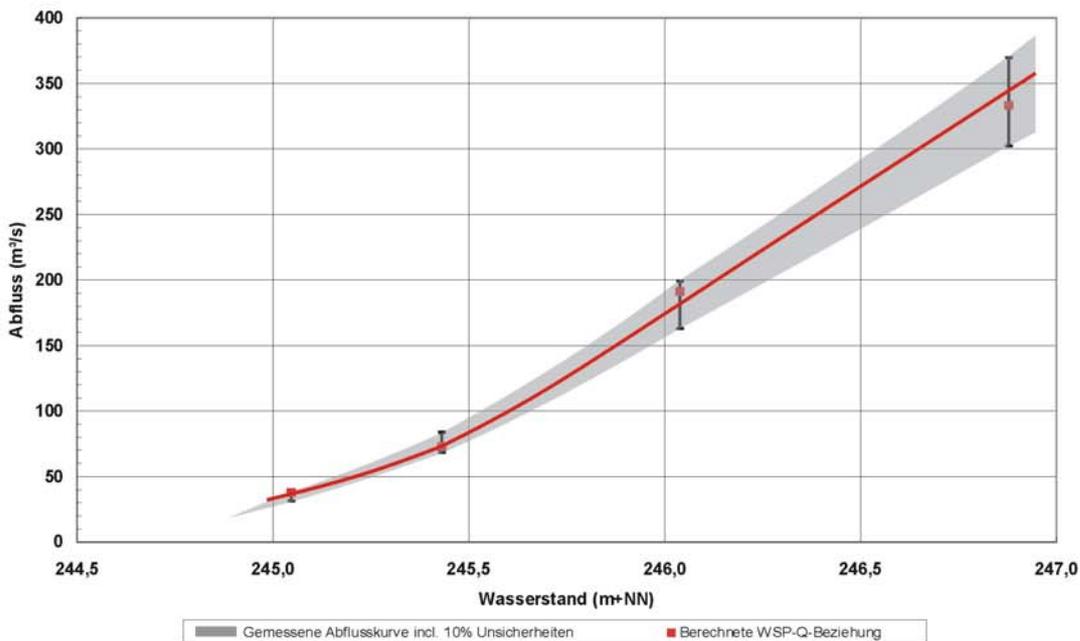
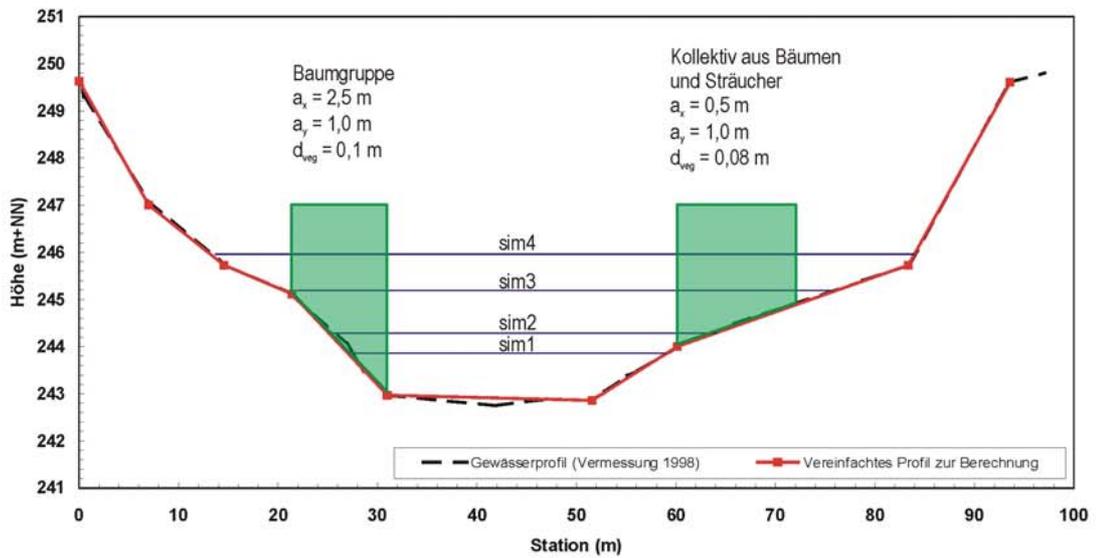


Abb. 6.16: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 0 bei Enz-km 57+970.

Sonderpegel 2 – Enz-km 57+443 (vgl. Abb. 6.4)



Rechnung Nr.	Naturmessdaten			Verfahrensanwendung		relativer Fehler (%)
	gemessene Wasserspiegellage (m+NN)	Abfluss nach Messung am Landespegel Q_{gem} (m ³ /s)	Bemerkung	berechneter Abfluss Q_{ber} (m ³ /s)	Differenz $\Delta Q = Q_{gem} - Q_{ber}$ (m ³ /s)	
SP_2_sim1	243,83	35,0	ca. HQ ₁	27,3	7,69	21,98
SP_2_sim2	244,29	76,0		63,7	12,33	16,22
SP_2_sim3	245,19	181,0	ca. MHQ	180,8	0,16	0,09
SP_2_sim4	245,96	336,0	> HQ ₁₀	318,1	17,93	5,34

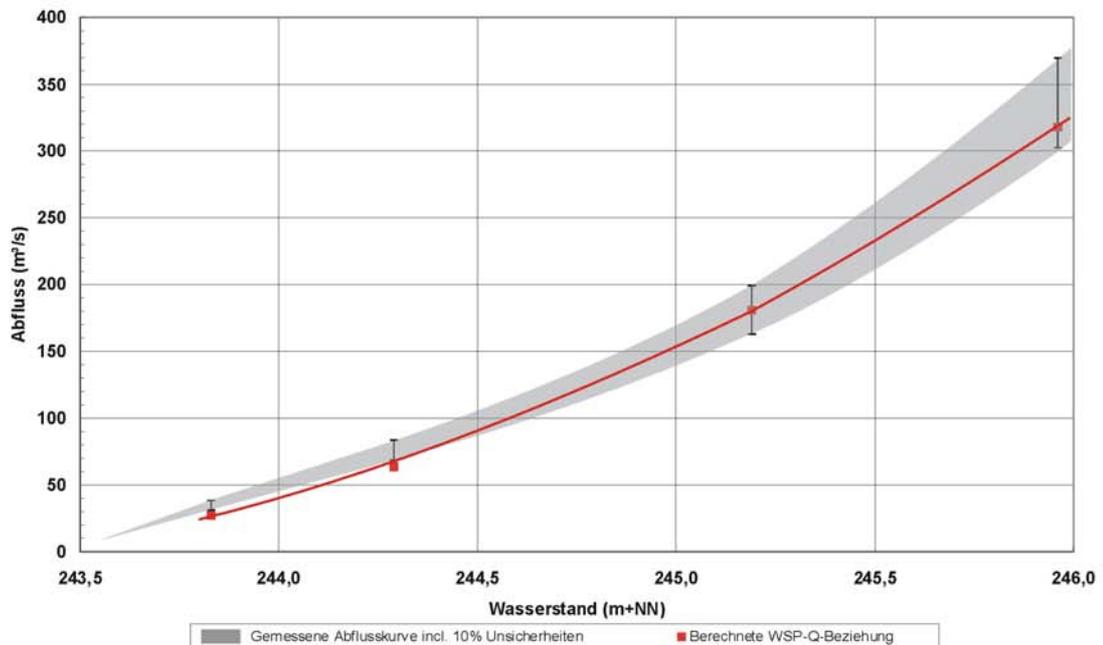
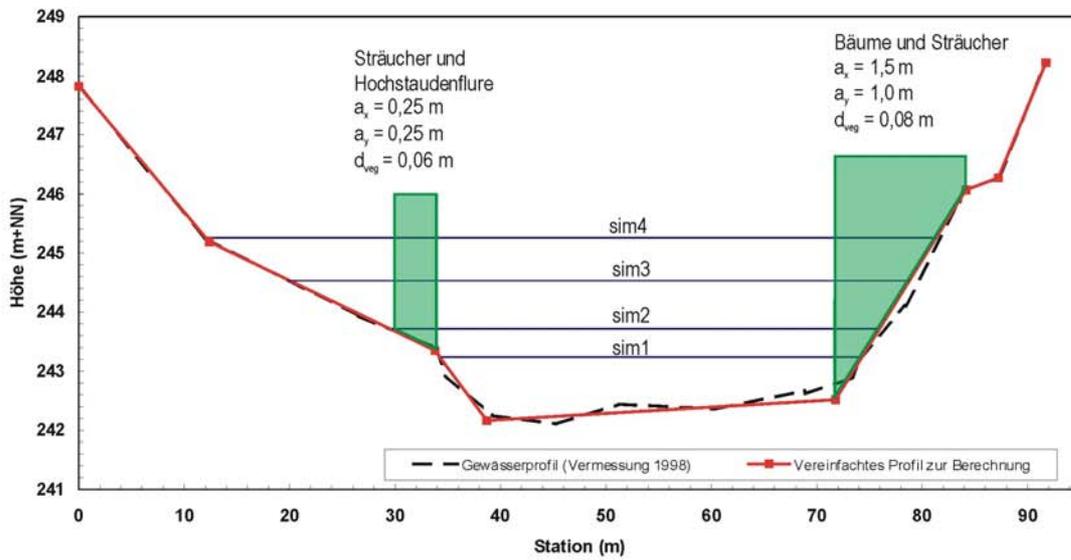


Abb. 6.17: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 2 bei Enz-km 57+443.

Sonderpegel 3 – Enz-km 57+094 (vgl. Abb. 6.5)



Rechnung Nr.	Naturmessdaten			Verfahrensanwendung		relativer Fehler (%)
	gemessene Wasserspiegellage (m+NN)	Abfluss nach Messung am Landespegel Q_{gem} (m ³ /s)	Bemerkung	berechneter Abfluss Q_{ber} (m ³ /s)	Differenz $\Delta Q = Q_{gem} - Q_{ber}$ (m ³ /s)	
SP3_sim1	243,24	35,0	ca. HQ ₁	32,9	2,06	5,88
SP3_sim2	243,72	76,0		76,7	-0,70	0,93
SP3_sim3	244,53	181,0	ca. MHQ	192,6	-11,63	6,43
SP3_sim4	245,26	336,0	> HQ ₁₀	337,2	-1,19	0,36

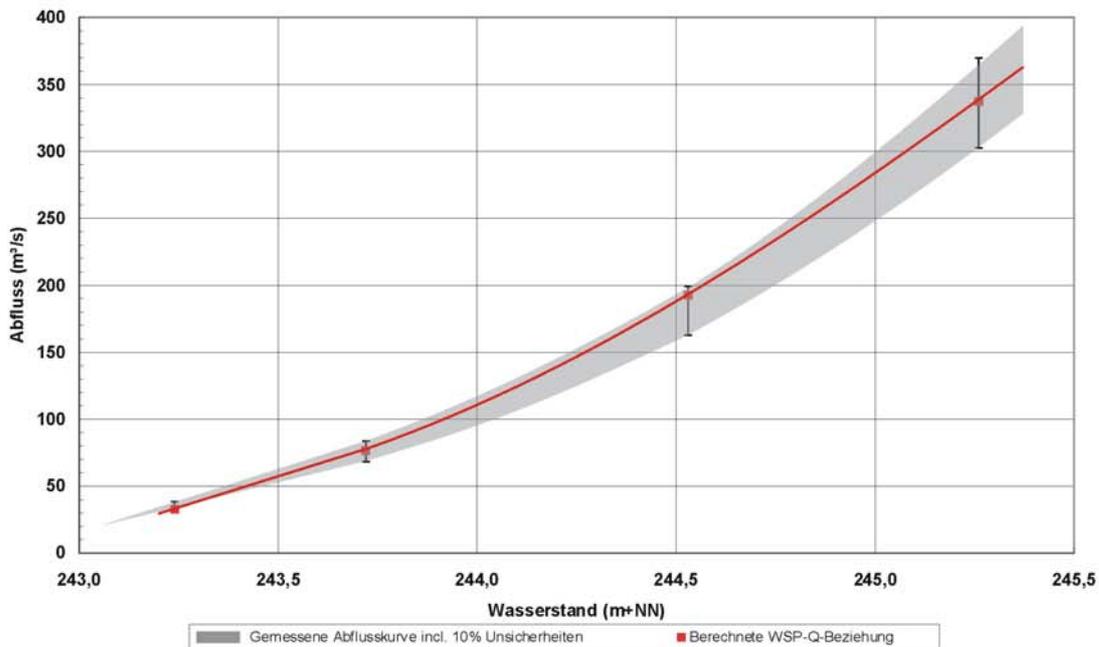
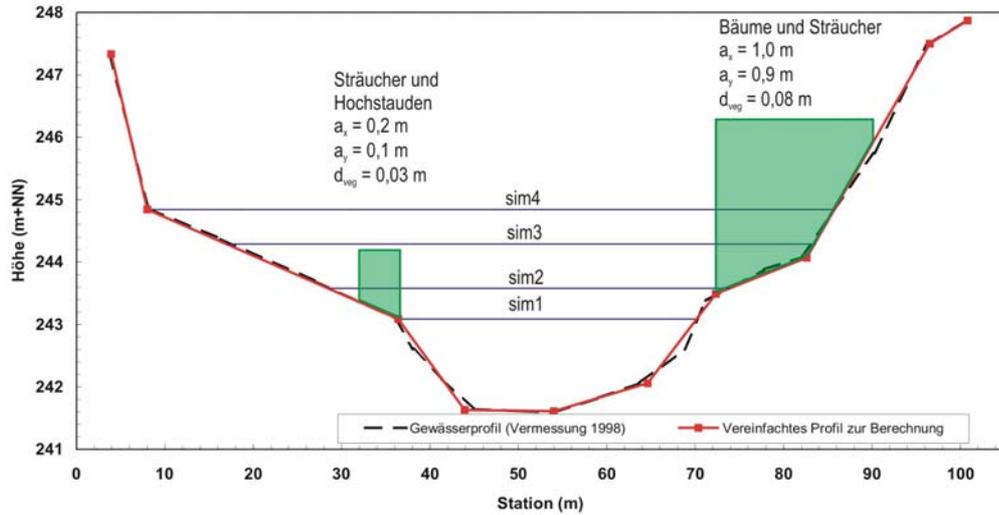


Abb. 6.18: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 3 bei Enz-km 57+094.

Sonderpegel 4 – Enz-km 56+934 (vgl. **Abb. 6.7**)



Rechnung Nr.	Naturmessdaten			Verfahrensanwendung		relativer Fehler (%)
	gemessene Wasserspiegellage (m+NN)	Abfluss nach Messung am Landespegel Q_{gem} (m^3/s)	Bemerkung	berechneter Abfluss Q_{ber} (m^3/s)	Differenz $\Delta Q = Q_{gem} - Q_{ber}$ (m^3/s)	
SP4_sim1	243,09	35,0	ca. HQ ₁	42,7	-7,73	22,08
SP4_sim2	243,58	76,0		84,3	-8,35	10,98
SP4_sim3	244,29	181,0	ca. MHQ	193,4	-12,35	6,83
SP4_sim4	244,84	336,0	> HQ ₁₀	316,4	19,62	5,84

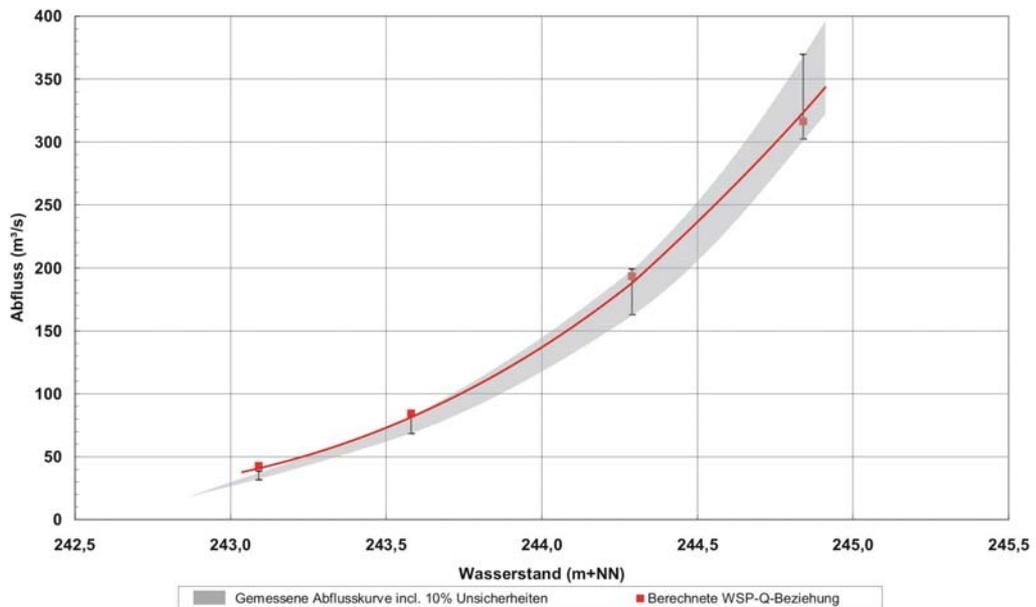


Abb. 6.19: Ergebnisse der Berechnungen für den Sonderpegel 4 bei Enz-km 56+934.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen auf, dass die in Kapitel 4 erarbeitete Methodik zu zuverlässigen Ergebnissen bei vegetationsbestandenen schmalen Fließgewässern führt. Bei allen Berechnungen konnten die Naturmessungen gut nachvollzogen werden.

Der Vorteil in der Anwendung der neuen Methodik liegt trotz der intensiven Rechenarbeit und der vielen Eingangsparameter in der einfachen Simulation der Bewuchsentwicklung. Allein durch das Ändern der Vegetationsparameter (a_x , a_y und d_{veg}) können so optimale Unterhaltungsstrategien unter Gewährleistung der Hochwassersicherheit erarbeitet werden:

Durch eine stützstellenbezogene Berechnung der Wasserspiegellagen an den Sonderpegeln für den Bemessungsabfluss $BQ = 540 \text{ m}^3/\text{s}$ (vgl. **Tab. 6.1**) auf Basis der erarbeiteten Methodik und unter Verwendung der Vegetationsanordnungsparameter, die durch eine Begehung in 2004 erhoben wurden, konnte gezeigt werden, in welchen Gewässerabschnitten infolge der Bewuchsentwicklung aktuell eine Gefahr bei Hochwasser besteht (vgl. **Abb. 6.20**).

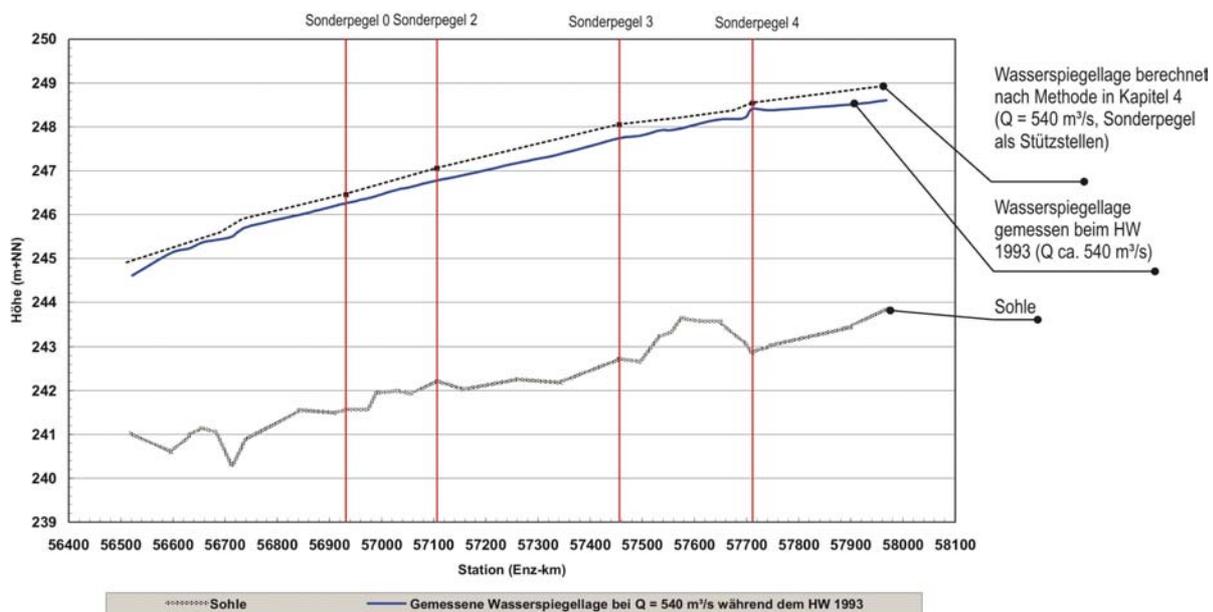


Abb. 6.20: Darstellung der Wasserspiegellagen beim Bemessungsabfluss $BQ = 540 \text{ m}^3/\text{s}$.

Diese Information kann als wesentliche Grundlage für die Erstellung eines Unterhaltungsplanes verwendet werden. Deutlich ist zu erkennen, dass sich im Mittel trotz mehrjähriger Bewuchsentwicklung nur eine Anhebung der Wasserspiegellagen um ca. 0,25 m ergeben hat. Begründet ist diese Feststellung durch die Tatsache, dass sich der ufernahe Bewuchs überwiegend in die Höhe, jedoch infolge der Unterhaltungsmaßnahmen nicht signifikant in die Breite und Länge bzw. Fläche entwickelt hat.

6.5 Gewässermorphologische Untersuchungen

Unter Federführung der LFU wurden 1992, 1994, 1997 und 1998 terrestrische Vermessungen im Untersuchungsgebiet durchgeführt um morphologische Veränderungen dokumentieren zu können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese geodätischen Daten miteinander verglichen, um morphologische Entwicklungen zwischen 1992 und 1998 zu dokumentieren. Durch eigene terrestrische Vermessungen in den Jahren 2002 und 2003 konnten die vorliegenden Daten aus dem Jahr 1998 stellenweise noch aktualisiert werden, so dass nun ein Beobachtungszeitraum von 1992 bis 2003 ausgewertet werden kann.

Mit einbezogen werden dabei die Auswertungen von Geitz (2000), der im Rahmen der Erarbeitung eines Muster-Unterhaltungsplanes die topographischen Geländedaten von 1992, 1994 mit einer eigenen Geländeerfassung von 1997 verglichen hat.

Bereich 1 und 2 (Enz-km 57+970 bis 57+440)

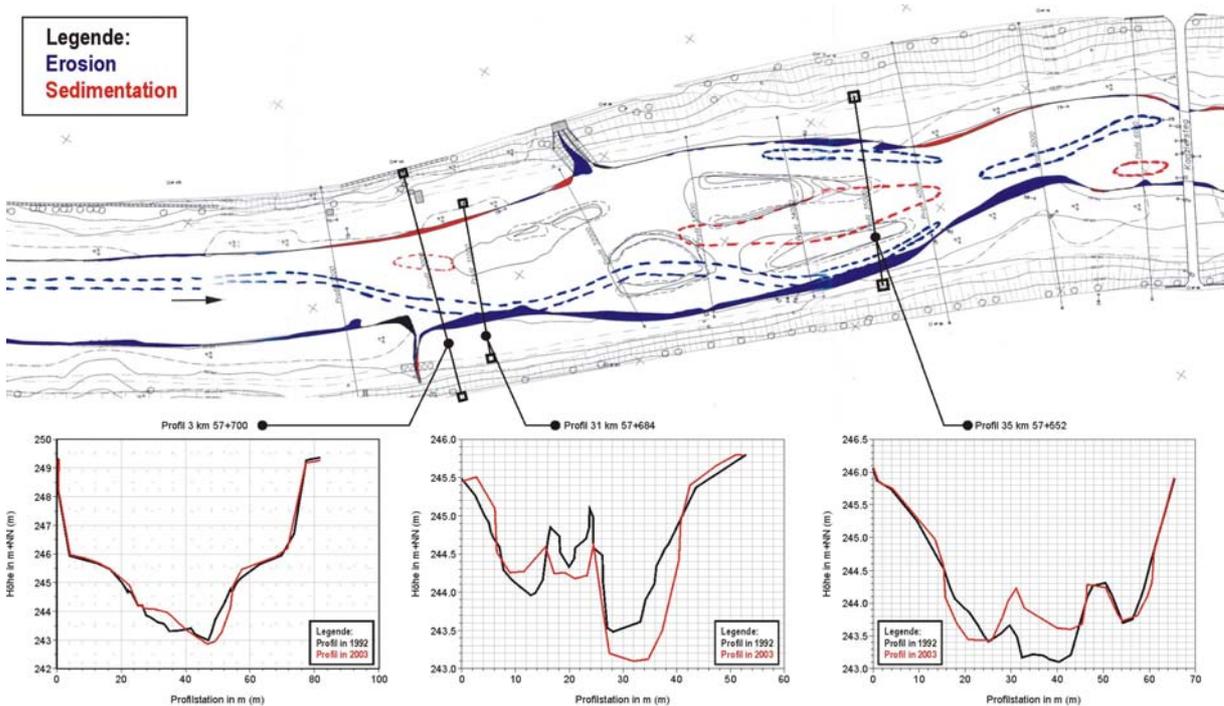


Abb. 6.21: Morphologische Entwicklungen in den Bereichen 1 und 2. (Schneider und Lehmann)

In diesem Bereich wurde 1992 das Mittelwasserbett aufgeweitet und vier Inseln angelegt. Bereits während dem Extremereignis im Dezember 1993 (ca. HQ₂₀₀) zeigte sich infolge einer großflächigen Erosion der Inselkörper eine starke morphologische Veränderung. Innerhalb des Untersuchungszeitraumes wurde eine Seitenerosion des

rechten Ufers erfasst. Gleichzeitig fanden entlang des linken Uferbereiches Sedimentationsprozesse statt.

Der Talweg hat sich generell in den Profilen 3 und 31 näher an das rechte Ufer verlagert. Ursache hierfür sind die beiden flussabwärts gelegenen Inseln. Im Profil 35 ist zu erkennen, dass der ursprünglich angelegte Talweg zwischen den beiden Inseln aufsedimentiert ist und die ehemals vier einzelnen Inseln immer mehr zu einer großen Insel zusammenwachsen. Weiterhin ist eine Aufsedimentierung der Inselfläche in Verbindung mit einer Verlängerung des Inselkörpers nachzuweisen.

Die Seitenerosion in Profil 5 resultiert aus der starken Einengung des Flussbettes nach der Aufweitungsstrecke im Bereich der Inselgruppe.

Bereich 3 und 4 (Enz-km 57+440 bis 56+935)

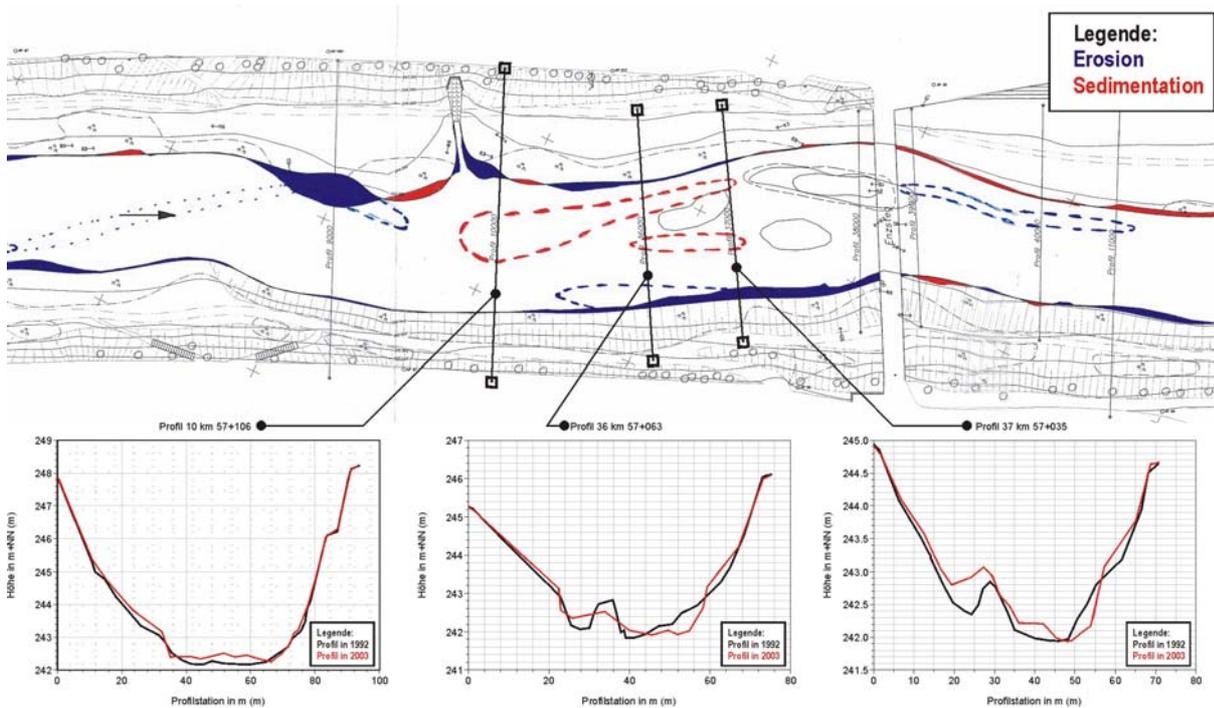


Abb. 6.22: Morphologische Entwicklungen in den Bereichen 3 und 4. (Schneider und Lehmann)

Die Sedimentationslinien in **Abb. 6.22** vermitteln den Eindruck, als würde in diesem Bereich eine große Insel entstehen. Bei genauerer Betrachtung der Querprofile sieht man aber, dass es in Profil 10 zu einer Auflandung kam, die auf das zu tiefe Ausbaggern bei der Umgestaltung des Querschnitts in 1991 zurückzuführen ist.

In den Profilen 36 und 37 ist zu erkennen, dass sich die Insel an der unteren Bereichsgrenze immer mehr in Richtung des linken Ufers umlagert. Es ist damit zu rechnen, dass in einigen Jahren die jetzige Insel die neue Uferkante bildet.

Gleichzeitig findet eine kontinuierliche Seitenerosion entlang des rechten Ufers statt. Hier ist davon auszugehen, dass dieser Prozess weiterhin anhalten wird, sofern die Uferkante nicht durch ingenieurbioologische Bauweisen geschützt wird.

Bereich 5 und 6 (Enz-km 56+935 bis 56+450)

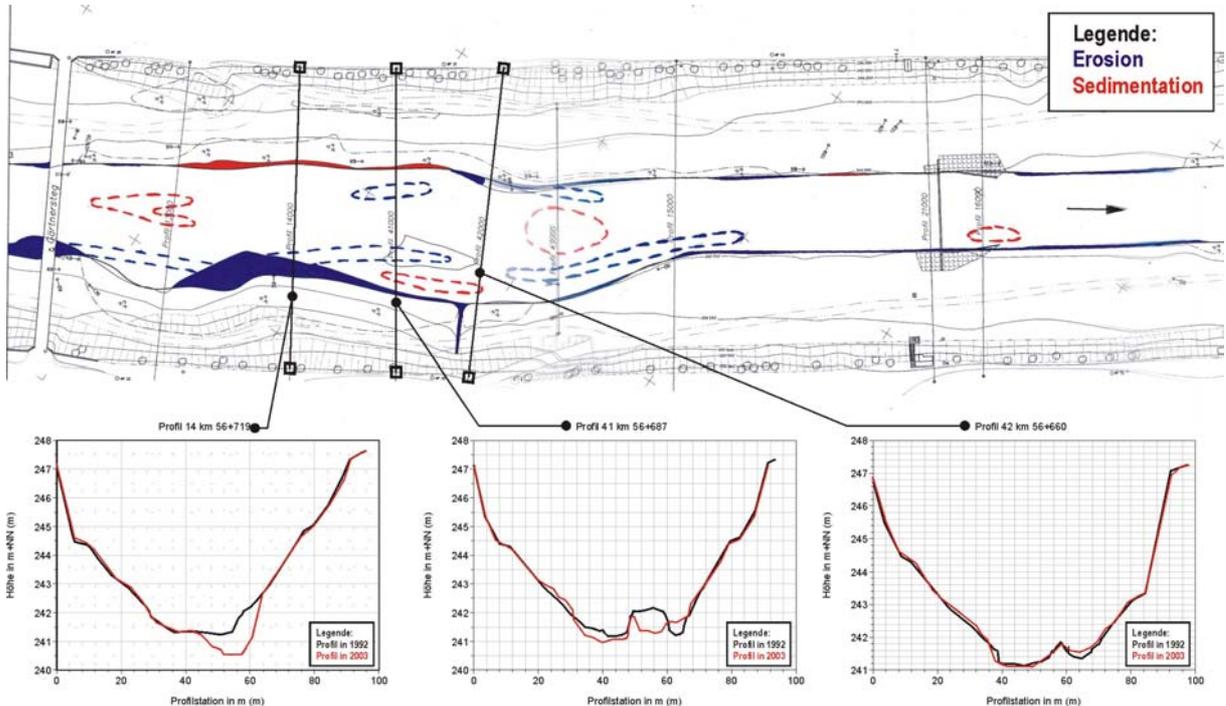


Abb. 6.23: Morphologische Entwicklungen in den Bereichen 5 und 6. (Schneider und Lehmann)

Im Bereich des Profils 14 wurde insbesondere nach den anfänglichen extremen Hochwasserereignissen ($\geq HQ_5$ zwischen 1992 und 1994) eine starke Seitenerosion in Verbindung mit einer Tiefenerosion nachgewiesen.

Die Seitenerosion ist auf den natürlich gebildeten mäandrierenden Talweg und die Einengung des Querschnittes zurückzuführen. Ursache für die relativ starke Tiefenerosion von stellenweise mehr als einem Meter war die Erdbewegung während der Umgestaltungsarbeiten in 1992:

Hier wurde seinerzeit die bestehende Deckschicht der Enzsohle aufgerissen und mit feinerem Substrat aufgefüllt. Bei den folgenden Hochwasserereignissen konnte dieses Substrat schnell erodiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde im Januar 2004 durch Sohlenprobennahme untersucht, ob sich mittlerweile infolge von Hiding-Effekten wieder eine stabile Sohle ausgebildet hat. Die Untersuchung ergab eine ausgeprägte Deckschicht; die Analyse der Vermessungsergebnisse zwischen 1998 und 2003 bestätigte die Stabilität der Sohlenlage.

Der Inselkopf bei Profil 41 wurde bereits während des Hochwassers im Dezember 1993 abgetragen; gleichzeitig kam es zu einer Sedimentation des Materials am un-

terstromig gelegenen rechten Uferbereich. Ursache hierfür waren Sekundärströmungen im Aufweitungsbereich.

Bereich 7 (Enz-km 56+450 bis 56+280)

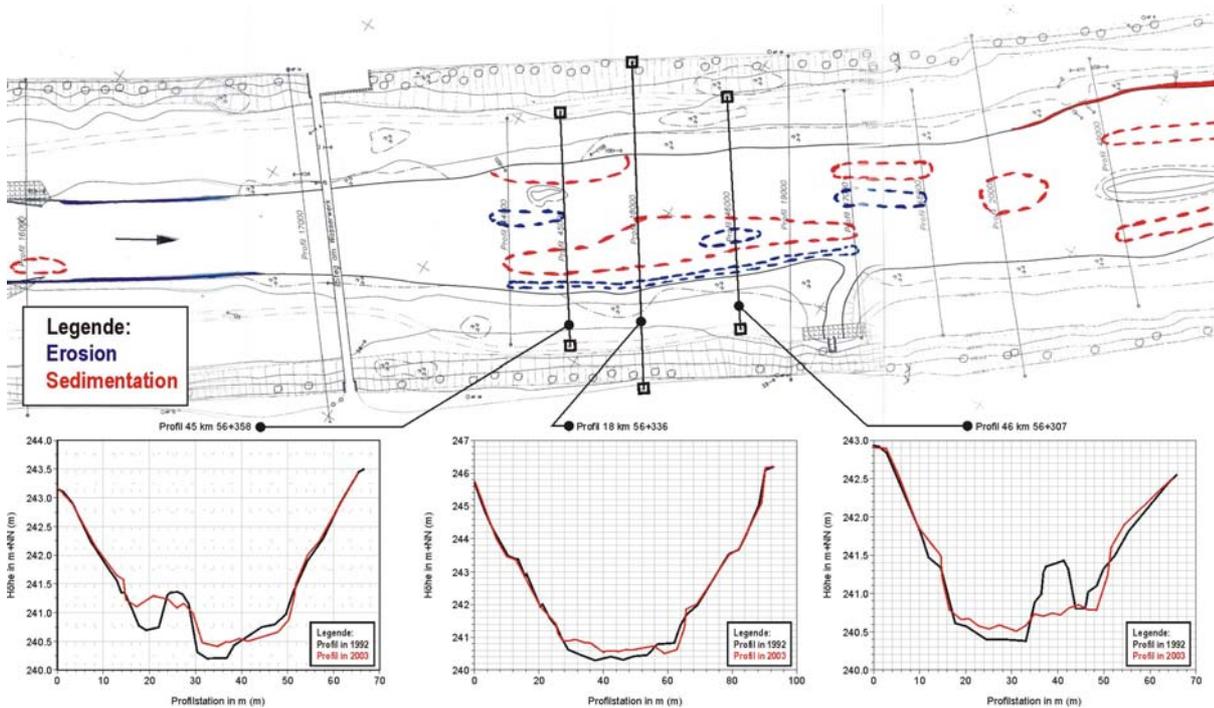


Abb. 6.24: Morphologische Entwicklungen im Bereich 7. (Schneider und Lehmann)

Die im Rahmen der Umgestaltung durchgeführte Aufweitung der Fließstrecke unterhalb des Landespegels Pforzheim-Kläranlage führte zu einer Anlandung entlang des ursprünglich angelegten Talwegs geführt. Gleichzeitig wurde der Inselkopf der ersten Insel im linken Flussbettbereich größtenteils abgetragen.

Der Talweg hat sich im Profil 44 und 45 von der Flussmitte weiter nach rechts verlagert, worin auch der Grund für die Abtragung der Insel bei Profil 46 zu sehen ist.

6.6 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der vorliegenden Naturmessdaten hinsichtlich hydraulischer und morphologischer Fragestellungen hat gezeigt, dass mit Hilfe der in den Kapitel 4 und 5 erarbeiteten Empfehlungen eine gute Analyse der eigendynamischen Gewässerentwicklung möglich ist.

Zur hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer

Die in Kapitel 4 dargestellte Methodik zur Quantifizierung der Widerstände und des Strömungsverhaltens bei naturnahen Fließgewässern überzeugt bei fachgerechter Anwendung relativ zu den bisherigen empirischen Berechnungsverfahren durch eine gute Ergebnisqualität. Um die Methodik wirtschaftlich, also mit vertretbarem Aufwand in der Praxis anwenden zu können, wird zukünftig eine EDV-technische Umsetzung notwendig. Dann kann eine Implementierung in bewährte Berechnungsmodelle erfolgen. Dem Anwender steht so ein leistungsfähiges Tool zur Verfügung, das insbesondere bei Bächen und kleinen bzw. schmalen Flüssen mit Ufer- und Vorlandbewuchs eingesetzt werden kann.

Ziel dieser Entwicklung muss es sein, operationelle Hochwassermanagementtools dem Anwender zur Verfügung zu stellen, die für naturnahe Fließgewässerstrukturen verlässliche hydraulische Aussagen liefern. Der Einsatzbereich solcher bereits bestehender Tools (vgl. z.B. Oberle, 2004) kann damit auf kleinere, stärker durch das Widerstandsverhalten der Ufer- und Vorlandvegetation beeinflusste Fließgewässersysteme erweitert werden.

Zur naturnahen Gewässerunterhaltung im urbanen Bereich

Bezüglich der Entwicklung und Unterhaltung naturnaher Fließgewässer sind neue Denkweisen erforderlich. Die in Kap. 5 erarbeiteten qualitativen Aussagen zeigen den zukünftigen Trend naturnaher Gewässerunterhaltung auf:

Anstelle von umfangreichen Planunterlagen mit detailliert vermerkten Zustandsvorstellungen und komplexen Regelwerken mit zahlreichen pauschalen Aussagen muss der Unterhaltungspflichtige durch Schulungen ein besseres Verständnis der Wechselwirkungsprozesse zwischen Strömung, Vegetation und Feststoffverhalten vermittelt bekommen. Hierzu eignen sich insbesondere solche anschaulichen, qualitativen Untersuchungen am wasserbaulichen Modell, wie sie in Kap. 5 erläutert wurden.

Die selbst praktizierte Umsetzung der soeben genannten Forderung durch die Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (Abt. III: ökologischer Wasserbau) und dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe (Abt. Gewässerpflege) hat am Beispiel der Umgestaltung der Alb bei Karlsruhe gezeigt, dass durch einen regelmäßigen fachlichen Austausch zwischen Theorie und Praxis auf beiden Seiten ein neues Verständnis bezüglich der tatsächlichen Probleme in der Gewässerunterhaltung entsteht. Hiervon profitiert die Forschung und direkt auch die Praxis.

7 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist es, Empfehlungen bzgl. einer naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Bereich zu geben. Die Arbeit ist somit nicht als Grundlagenuntersuchung einzuordnen – vielmehr werden ganzheitlich und interdisziplinär die Wechselwirkungen des Strömungsverhaltens, der Morphodynamik und des sog. „naturnahen Wasserbaus“ berücksichtigt.

Auf der einen Seite liefern wissenschaftliche Grundlagenuntersuchungen immer neue und modifizierte Berechnungsverfahren, welche dem Anwender hydraulische und/oder morphologische Entwicklungen an naturnahen Gewässerabschnitten prognostizieren sollen. Auf der anderen Seite scheidet in der Praxis die Anwendung aufgrund der Tatsache, dass noch keinerlei weitreichende Handlungsempfehlungen vorliegen bzw. die wissenschaftliche Durchdringung des Theorie-Praxis-Transfers bislang nicht konsequent behandelt wurde.

Die **Einleitung** führt anhand einer chronologischen Dokumentation der Entwicklungen im Bereich des Wasserbaus in die Thematik ein. **Kapitel 1** leitet ausgehend von der zentralen Problemstellung die Struktur der Arbeit ab und ordnet den unterschiedlichen Themenkomplexen einzelne „Etappenzielen“ zu.

Das **Kapitel 2** diskutiert die Anforderungen der naturnahen Gewässerentwicklung. Dabei wird zunächst auf die vorhandenen fachlich-interdisziplinären Beziehungen eingegangen und daraus spezielle Anforderungen für die Gewässerentwicklung in urbanen Bereichen abgeleitet. Neu dabei ist die Zusammenstellung einer ausführlichen Bewertungsmatrix für abiotische und biotische sowie hydraulische und morphologische Indikatoren einer Gewässerlandschaft im urbanen Kulturraum. Hierauf aufbauend erfolgt eine Einordnung von Anforderungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Bereich in die derzeitige Planungsmethodik, wodurch der Praxistransfer hergestellt wird.

Die Arbeit konzentriert sich im Folgenden auf die Wechselwirkung zwischen Strömung, Morphologie und Vegetation entlang naturnaher Fließgewässer.

In **Kapitel 3** wird hierzu der derzeitige Stand des Wissens erläutert. Dabei wird zwischen der Hydraulik und dem Feststofftransport naturnaher Gewässerstrukturen unterschieden. Es wurde viel Mühe darauf verwendet, dem Leser in diesem Kapitel eine chronologische Dokumentation der wissenschaftlichen Entwicklung auf diesem Gebiet zu erläutern. Als Praxistransfer wird abschließend die Verwendung der gängigsten Verfahren im Rahmen der Gewässerunterhaltungsmethodik dargestellt. Hierdurch werden anwendungsbezogene Schwachstellen bzw. Probleme identifiziert.

Das **Kapitel 4** baut auf den Grundlagen und Problemen der vorangegangenen Diskussion auf. Aufgrund der Analyse derzeitiger Probleme wird in Anlehnung an bereits vorhandene, bewährte Verfahren und Konzepte eine neue Methodik entwickelt, die

es dem Anwender ermöglicht, geeignete Berechnungsverfahren zu wählen und entsprechende Eingangsparameter zu erfassen bzw. deren Signifikanz zu beurteilen. Die Verfahren der erläuterten Methodik sind auf der einen Seite mathematisch komplex – auf der anderen Seite wird es dem Anwender jedoch hiermit möglich, Vegetationsentwicklungen an naturnahen Fließgewässern durch einfache Parameteränderung zu simulieren und sofort die Auswirkungen auf das Strömungsverhalten, die Abflusskapazität und die Wasserspiegellagen mit sehr guter Genauigkeit zu berechnen. Um die Rechenarbeit zu vereinfachen wurde die Methodik als digitales Excel-Arbeitsblatt programmiert, so dass nach Eingabe der notwendigen Parameter die Berechnungen EDV-gestützt durchgeführt werden können.

In **Kapitel 5** werden als Ergänzung zu den hydraulischen Empfehlungen aus Kapitel 4 die Ergebnisse durchgeführter qualitativer Untersuchungen an einem wasserbaulichen Modell analysiert und praxisorientierte Empfehlungen zur Gestaltung und Pflege naturnaher Gewässer im urbanen Bereich abgeleitet. Die Verwendung eines sehr großen, komplexen Modells (Maßstab 1:6) mit beweglicher Sohle und steuerbarer Feststoffzugabe ermöglichte eine sehr anschauliche Dokumentation der Strömungs-Feststoff-Interaktionen, die letztendlich durch Sedimentations- und Erosionsprozesse die Dynamik der Gewässermorphologie prägen. Neu bei diesem Untersuchungskonzept ist, dass hier in erster Linie eine Analyse mikro- und mesoskaliger Prozesse erfolgte und nicht – wie bei vielen anderen Modellen dieser Art – eine Untersuchung makroskaliger Prozesse im Vordergrund stand.

Die Anwendung, Überprüfung bzw. Verifikation sowie eine Diskussion und Beurteilung der erarbeiteten Empfehlungen aus den Kapitel 4 und 5 erfolgt anhand von realen Naturmessdaten, die in **Kapitel 6** ausgewertet werden. Im Vorfeld dazu wird zunächst die Naturmessstrecke beschrieben sowie die Entstehung des Datenpools dokumentiert. Nach der Erstellung einer digitalen Datenbank konnte eine endgültige Archivierung sämtlicher zur Verfügung stehender Daten einer 12-jährigen Beobachtungsreihe (die durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg koordiniert wurde) durchgeführt werden. Die Prüfung der über 350.000 vorhandenen Datensätze wurde durch die digitale Verwaltung zwar vereinfacht, das Kapitel dokumentiert jedoch anhand von Beispielen den Aufwand, der in fast zweijähriger manuelle Auswertung betrieben werden musste, um eine gute Datenqualität zu gewährleisten.

Schlussbemerkung:

Die Arbeit richtet sich zum einen an Wissenschaftler, da derzeitige Wissenslücken bei der Anwendung bewährter Verfahren dokumentiert werden. Zum anderen dient die Arbeit für den praktisch tätigen Ingenieur als Leitfaden für die Entwicklungsplanung und hydraulische Bemessung naturnaher Fließgewässer.

Mit Hilfe der erarbeiteten **Methodik zur hydraulischen Berechnung** naturnaher Fließgewässer können die derzeitigen turbulenz-theoretischen Ansätze nun relativ einfach und dank der Umsetzung der Methodik mit einem EDV-Berechnungsmodul (auf Basis der Software MS Excel) auch transparent angewendet werden. Simulatio-

nen der Vegetationsentwicklung und die Berechnung der daraus resultierenden strömungsmechanischen Auswirkungen sind mit guter Genauigkeit nun einfach und schnell möglich. Der typische Einsatzbereich erstreckt sich dabei auf Bäche und kleine bzw. schmale Flüsse mit Ufer- und Vorlandvegetation. Somit werden in diesen Fällen Berechnungsverfahren mit empirischen Beiwerten, die i.d.R. bei solchen Fragestellungen abgeschätzt werden müssen, hinfällig.

Die aus der Fachliteratur abgeleiteten und zum Teil modifizierten Verfahren zur Erhebung der Eingangsdaten sollen dazu beitragen, dass auch die Datengrundlage zukünftig schneller und besser erfasst werden kann und dadurch „Eingangsfehler“ eingedämmt werden.

Die aus Modellversuchen abgeleiteten **Empfehlungen bezüglich der Vegetationsanordnung und -pflege** entlang naturnaher Gewässerläufe sollen insbesondere bei der Planung und Unterhaltung eine ergänzende Rolle zu den landschaftsplanerischen und gartenbautechnischen Aspekten spielen. Die Arbeit beinhaltet ein spezielles Versuchskonzept, welches in der Synthese mit Naturbeobachtungen realer Entwicklungsprozesse zu allgemeinen Empfehlungen führt, die einen wesentlichen Beitrag für die Praxis leisten.

Der zusammengestellte **Pool an Naturmessdaten** wird anderen Wissenschaftlern als wertvolle Datenquelle dienen. Die plausibilisierten und aufbereiteten Daten, die durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg während des 12-jährigen Untersuchungszeitraumes an der renaturierten innerstädtischen Fließgewässerstrecke Pforzheim/Enz erhoben wurden, sind weltweit einmalig. Durch die im Rahmen der Arbeit erfolgte Sortierung und Archivierung steht dieser Datenpool nun weiteren Untersuchungen offen.

Literatur

- Ackers, P., White, W.R., 1973: Sediment transport: a new approach an analysis. Proc. ASCE Journal of the Hydraulic Division (Vol. 99, HY 11): pages 2041-2060.
- Ahnert, F., 1973: Inhalt und Stellung der funktionalen Methode in der Geomorphologie. Geographische Zeitschrift (Beiheft 33): Seiten 105-113.
- Ashida, K., Michiue, M. (1973): Studies on bed load transport rate in alluvial streams. Trans. JSCE (Vol. 4).
- Ball, P., 2002: H₂O Biographie des Wassers. München.
- Baudirektion Kanton Zürich, 2000: Wasserbau im Kanton Zürich. Zürich.
- Bayerisches Amt für Wasserwirtschaft, 1998: Spektrum Wasser 1 – Hochwasser. Eigenverlag. München.
- Bazin, H.E., 1865: Recherches hydrauliques, memoires presentes par divers savants. Paris (Science Mathematiques et Physiques, Series 2, Vol. 19).
- Beaty, C.B., 1974: Debris flows, alluvial fans and a revitalized catatrophiosm. (Z. Geomorph. N. F., Suppl. Bd. 21): Seiten 39-51.
- Becker, C., 1999: Der Einfluss von kurzen Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluss in Flüssen mit gegliederten Querschnitt. (Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 202).
- Bernhardt, C., 2003: Die Begradigung des Oberrheins im Rückblick. In: Kasseler Wasserbau-Forschungsberichte und Materialien, Kassel, S. 75-85 (Gehämmte Flüsse – besiegte Natur, Gewässerkultur in Geschichte und Gegenwart, Band 18/2003).
- Bernhart, H.H, Lehmann, B., 2003: Gewässerentwicklungsplanung zum Wettbewerb der Stadt München anlässlich der naturnahen Umgestaltung der Isar auf Höhe der Gemarkung des Deutschen Museums. Hydraulische und gewässermorphologische Nachweise.
- Bertram, H.-U., 1985: Über den Abfluss in Trapezgerinnen mit extremer Böschungrauheit. Mitteilungen aus dem Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig (Heft 86).
- Blench, T., 1969: Mobile bed fluviology – a regime theory treatment of canals and rivers. The University of Alberta press.
- Blind, H., 1987: Wasserbauten aus Beton. Berlin.
- Bollrich, G., 1989: Technische Hydromechanik Band 2 (2. Auflage). Berlin.

-
- Bollrich, G., 1996: Technische Hydromechanik 1. Berlin.
- Bretschneider, H., Schulz, A., 1985: Anwendung von Fließformeln bei naturnahen Gewässerausbau. Hamburg (Schriftenreihe des DVWK, Heft 72).
- Briem, E., 2003: Gewässerlandschaften der Bundesrepublik Deutschland. ATV-DVWK Arbeitsbericht. Hennef.
- Bryson, B., 2003: Eine kurze Geschichte von fast allem. München.
- Businger, J.-A., 1975: Aerodynamics of vegetated surfaces. In: Heat and Mass Transfer in the Biosphere. Transferprocesses in plant environment. Eds.: D.A. de Vries et al: Advances in Therman Engineering 3. pp 139-165.
- Chang, H.H, 1988: Fluvial processes in river engineering. New York.
- Chorley, R.J., Kennedy, B.A., 1971: Physical geography – a systems approach. London.
- Chow, V.T., 1959: Open-Channel Hydraulics. London.
- Colebrook, C.F, White, C.M., 1937: Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proceedings of the Royal Society of London Series A (Volume 161): Pages 367-387.
- Day, T.J., 1980: A study of the transport of graded sediments. (HRS Wallingford, Report No. IT 190).
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 1987: Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau. Weinheim.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK), 2000: Morphodynamische Prozesse in Fließgewässern. Arbeitsbericht. Hennef.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK), 2002: Aktuelle Hinweise zur Unterhaltung von Fließgewässern im Flachland. Hennef.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), 2001: Freizeit und Erholung an Fließgewässern. Hamburg (Merkblätter Heft 603/2000).
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1987: Erfahrungen bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern. Hamburg (Schriften Heft 79).
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1988: Feststofftransport in Fließgewässern – Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis. Hamburg (Schriften Heft 87).
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1990: Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. Hamburg (Schriften Heft 92).
-

-
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1991: Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Hamburg (Merkblätter Heft 220/1991).
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1993: Hydraulische und sedimentologische Berechnungen naturnah gestalteter Fließgewässer. Mitteilungen (Heft Nr. 25). Bonn.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1994: Hydraulisch-sedimentologische Berechnungen naturnah gestalteter Fließgewässer. Hamburg (Mitteilungen Heft 25).
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1996: Fluss und Landschaft – ökologische Entwicklungskonzepte. Bonn (Merkblätter zur Wasserwirtschaft 240/1996).
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (Hrsg.), 1997: Uferstreifen an Fließgewässern – Funktion, Gestaltung und Pflege. Bonn (Merkblätter Heft 244/1997).
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 1999: Ökologische Aspekte bei der mechanischen Gewässerunterhaltung. DVWK Materialien (Nr. 4/99). Bonn.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (Hrsg.), 2000: Gestaltung und Pflege von Wasserläufen in urbanen Gebieten. Bonn (Merkblätter Heft 253/2000).
- Deutsches Institut für Normung (DIN), 1993: DIN-Taschenbuch 211 – Wasserwesen. Begriffe und Normen. Berlin (3. Auflage).
- Dittrich, A., 1998: Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Karlsruhe (Mitteilungen des Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe TH, Heft 198).
- Dorer, H., 1984: Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (Heft Nr. 54). Karlsruhe.
- Du Boys, P., 1879 : Le Rhone et les Riviers a lit affouillable. Mem. Doc. Ann. Pont et Chaussee (Ser. 5, Bd. XVIII).
- Düffel, J., 2003: Vom Wasser. München.
- DVWK, 1988: Feststofftransport in Fließgewässern – Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis, Hamburg (DVWK Schriften, Heft 87).
- Egiazaroff, I.V., 1965: Calculation of non-uniform sediment concentrations. Journal of Hydraulic Division, ASCE (Vol. 91, No. 4): pages 225-248.
- Einstein, H.A., 1934: Der hydraulische oder Profil-Radius. Schweizerische Bauzeitung (103, Heft 8): Seiten 89-91.

-
- Engelund, F. Hansen, E., 1967: A monograph on sediment transport in alluvial streams. Kopenhagen.
- Engelund, F., Hansen, E., 1966: Investigation of flow in alluvial streams. Acta Polytechnica Scandinavia, Kopenhagen.
- Evers, P., 1983: Untersuchung der Strömungsvorgänge in gegliederten Gerinnen mit extremen Rauheitsunterschieden. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH Aachen (Heft 45).
- Felkel, K., 1960: Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (Heft 15): Seiten 34-51.
- Fenzl, R.N., 1962: Hydraulic resistance of broad shallow vegetated channels. Thesis, University of California at Davis, California.
- Garbrecht, G., 1961: Abflussberechnung für Flüsse und Kanäle. Die Wasserwirtschaft (Heft 51): Seiten 40-45 und Seiten 72-77.
- Geiger, W.F., Dreiseitl, 1995: Neue Wege für das Regenwasser – Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten. München.
- Geitz, P., 2000: Musterunterhaltungsplan Enz für den Streckenabschnitt der naturnah ausgebauten Pilotstrecke in Pforzheim. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Unveröffentlicht.
- Gewässerdirektion südlicher Oberrhein/Hochrhein, 2004: Integriertes Rheinprogramm (IRP). Stand: Juni 2004 http://www.irp.baden-wuerttemberg.de/frame_irp.htm
- Graf, W.H., 1971: Hydraulics of Sediment Transport. New York.
- Graf, W.H., 1991: Flow resistance over a gravel bed: Its consequence on initial sediment movement. In: Bhattacharji, S., Friedman, G.M., Neugebauer, H.J., Seilacher, A. (Hrsg.): Lecture Notes in Earth Sciences, Pages 17-32, Berlin.
- Haber, B., 1982: Über den Erosionsbeginn bei der Überströmung von flexiblen Rauheitselementen. Mitteilungen aus dem Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig (Heft 74).
- Hager, W.H., 1994: Die historische Entwicklung der Fließformeln. In: Schweizer Ingenieur und Architekt (Nr. 9, Seiten 123-133).
- Hahn, H.H., 1970: Umwelt von Morgen. (Umschau Nr. 16): Seiten 495-500.
- Hahn, H.H., 1971: Umweltplanung – ein Grund zur Zusammenarbeit von Wissenschaftler, Politiker und Ingenieur. (Umwelt VDI, Heft I).

-
- Hahn, H.H., 1976: Möglichkeiten der Planung von Flussgebietssanierungen. In: Umweltschutz im Bereich des Wasserbaus. (Hrsg.: H.H. Hahn) Seiten 53-83 (Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, 14). Berlin.
- Hahn, H.H., Tödten, H., 1980: Naturmessungen zum Schwebstofftransport in gestauten Fließgewässern. Sonderforschungsbereich 80 (SFB 80/MET/179). Karlsruhe.
- Hahn, H.H., 2001: Stadtentwässerungsanlagen – Realität und Wunschdenken. In: Wassermanagement im 21. Jahrhundert. Seite, 205-211. Essen.
- Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt (HMLU) (Hrsg.), 1972: Ausbau der Diemel. Kassel.
- Hey, R.D., 1978: Determinate hydraulic geometry of river channels. Journal of the hydraulic Division (Vol. 104, No. HY 6, ASCE, June 1978): pages 869-885.
- Hey, R.D., 1979: Flow resistance in gravel-bed rivers. Journal of the hydraulic Division (Vol. 105, No. HY 4, ASCE): pages 365-380.
- Holden, A.P., James, C.S., 1989: Boundary shear distribution on flood-plains. Journal of Hydraulic Research (Vol. 27, No. 1): pages 75-89.
- Horton, R., 1933: Separate roughness coefficients for channel bottom and sides. Engineering News Record (Vol. 111, No. 22): pages 652-653.
- Hunziker, R.P., 1995: Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (Heft Nr. 138).
- Hütte, M., 2000: Ökologie und Wasserbau – ökologische Grundlagen von Gewässerverbauung und Wasserkraftnutzung. Berlin.
- Imiela, M., 2003: Langfristige mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung zum morphologischen Gleichgewichtszustand anhand von Modellversuchen und einer Renaturierungsmaßnahmen an der Enz. Diplomarbeit am Institut für Hydromechanik und am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH).
- Indlekofer, H., Rouvé, G., 1980: On hydraulic capacity of rivers with vegetated banks and flood-plains. Proceedings, IAHR-Symposium on River Engineering, Belgrad, D. 15: pages 1-8.
- Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), 2003: Morphologische Berechnungen mit Sedimentmischungen – Zukunftsmusik oder eine realistische Alternative?. (Bericht Nr. II-19).
- Järvelä, J., 2002: Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. Journal of Hydrology (Vo. 269, No. 1): pages 44-54.

-
- Kaiser, O., Schüle, F., 2004: Bewertung städtischer Fließgewässer. Wasserwirtschaft (Heft 4/2000): Seiten 20-26.
- Kaiser, W., 1984: Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergehölzzonen. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Konstruktiver Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH Darmstadt (Nr. 23).
- Kamphius, J., 1974 : Determination of sand-roughness for fix beds. Journal of Hydr. Res. (Vol. 12, No. 2): pages 193-203.
- Kellerhals, R., 1967: Stable channels with gravel-paved beds. Journal of Waterway Div. (ASCE 93/1): pages 63-84.
- Kern, K., 1994: Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung. Geomorphologische Entwicklung von Fließgewässern. Berlin.
- Keulegan, G.H., 1938 : Laws of turbulent flow in open channels. Research Paper 1151 (Journal of Research, National Bureau of Standards, 21).
- Kinsinger, C., Löffler, E.W., 1995: Die Bedeutung der Gewässerstruktur und – morphodynamik beim Fließgewässerschutz. (Magazin Forschung der Universität des Saarlandes 2/1995).
- Kironoto, B., Graf, W.H., 1992: Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow. Lausanne (Rapport Annuel, Laboratoire des Recherches Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale des Lausanne).
- Knight, D.W., 1992: SERC – Flood Channel Facility – experimental data phase A. Hydraulics Research Ltd. (Report SR 314). Wallingford.
- Knight, D.W., Hamed, M.E., 1984: Boundary shear in symmetrical compound channels. Journal of Hydraulic Engineering (Vol. 110, No. 10): pages 1412-1430.
- Knight, D.W., Shiono, K., 1990: Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel. Journal of Hydraulic Research (Vol. 28, No. 2): pages 175-196.
- Knighton, D., 1984: Fluvial forms and processes. London.
- Kobus, H., 1978: Wasserbauliches Versuchswesen. DVWW-Mitteilungen (Heft Nr. 4). Essen.
- Kouwen, N., 1988: Field estimation of the biomechanical properties of grass. Journal of Hydraulic (Vol. 26, Number 5).
- Kouwen, N., 1990: A modern approach to the design of grassed channels. National Conference of Irrigation and Drainage Engineering and Watershed Management Symposium. Durango, Colorado, 09.-13.07.1990.
- Kouwen, N., Unny, T.E., 1973: Flexible roughness in open channels. Journal of Hydraulic Division (ASCE, HY 5): pages 713-727.

-
- Lacy, G., 1930: Stabel channels in alluvium. Minutes of Proc. of the Institute of Civil Engineering (Vol. 229, Paper No. 4736).
- Laguzzi, M., 1994: Modelling of sediment mixtures. (Report No. Q 1660 WL Delft Hydraulics).
- Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)(Hrsg.), 1995: Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Stuttgart.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 1998: Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahrensbeschreibung für kleine bis mittelgroße Fließgewässer.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 1999: Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahrensbeschreibung für kleine bis mittelgroße Fließgewässer.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1978: Pegelvorschrift. Hannover und Bonn.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), 1995: Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern. Teil III: Dokumentation der Entwicklung ausgewählter Pilotvorhaben. Karlsruhe (Handbuch Wasser 2, Heft 20).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), 2000: Gewässerentwicklung in Baden-Württemberg. Teil 3: Arbeitsanleitung zur Erstellung von Gewässerentwicklungsplänen. Karlsruhe (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Heft 72).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), 2002: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 1: Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. Karlsruhe (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Heft 74).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), 2003: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg. Karlsruhe (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Heft 76).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), 2003: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 4: Numerische Modelle zur Strömungssimulation. Karlsruhe (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Heft 79).
- Lange, G., Lecher, K., 1986: Gewässerregelung und Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern. Hamburg.
- Lehmann, B, Nestmann, F., 2003: Morphodynamik von Fließgewässern. Kursbegleitendes Skript. Eigenverlag des Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH).

-
- Lehmann, B, Schneider, S., 2004: Naturnahe Gewässer: Grundlagen, Planungen, Maßnahmen. Kursbegleitendes Skript. Eigenverlag des Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH).
- Lehmann, B., 2003: Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Zwischenbericht zum BWPlus-Forschungsvorhaben BWC 21019. Veröffentlicht unter www.fz-karlsruhe/bwplus.de.
- Lehmann, B., Nestmann, F., 2000: Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit in Fließgewässern – Raue Rampen und Verbindungsgewässer. In: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Oberirdische Gewässer – Gewässerökologie. Heft 63. Karlsruhe.
- Lehmann, B., Oberle, P., Theobald, S., 2002: Hydraulik naturnaher Fließgewässer – Teil 4: Numerische Modelle zur Strömungssimulation. In: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Oberirdische Gewässer – Gewässerökologie. Heft 77. Karlsruhe.
- Leopold, L.B., Maddock, T., 1953: The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Geolog. Survey Prof (Paper 252): pages 1-57.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1964: Fluvial processes in geomorphology. London.
- Li, R.M., Shen, H.W., 1973: Effect of tall vegetations on flow and sediment. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE, Vol. 99, No. 5): pages 793-814.
- Lindner, K., 1982: Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen. Braunschweig (Mitteilungen des Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 75).
- Mackin, J.H., 1948: Concept of the graded river. Bulletin of the Geol. Soc. of Amerika (Vol. 59, Mai 1948): pages 463-512.
- Mangelsdorf, J., Scheurmann, K., 1980: Flussmorphologie – Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure. München.
- Marquet, D., 2004: Der Zorn. Bergisch Gladbach.
- Maser, X., Sedell, Y, 1994 : From the forest to the sea : The ecology of wood in streams, rivers, estuaries and oceans. Delray Beach.
- Maurer, M., 2002: Zuverlässigkeit von Berechnungen des Feststofftransportes. Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München. (Heft 83).
- Mertens, W., 1989: Zur Frage der hydraulischen Berechnung naturnaher Fließgewässer. Wasserwirtschaft (Jahrgang 79, Heft 4): Seiten 170-179.

-
- Mertens, W., 1997: Grundlagen hydraulisch-sedimentologischer Berechnungen. Hamburg (DVWK-Schriften Heft 118): Seiten 19-42.
- Mertens, W., 2004: Zur Berechnung naturnaher Wasserläufe nach DVWK-Merkblatt 220 und DVWK-Mitteilungen 25. Wasserwirtschaft (Jahrgang 94, Heft 3): Seiten 20-24.
- Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948: Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. Schweizer Bauzeitung (Jahrgang 67, Heft 3).
- Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948: Formulas for bed-load transport. Proc. second Congress IAHR, Stockholm.
- Mosonyi, E., 1970: Johann Gottfried Tulla. Festschrift. Karlsruhe.
- Myers, R.C., Elsayy, E.M., 1975: Boundary shear in channel with flood-plain. Journal of Hydraulic Engineering (Vol. 101, No. 7): pages 933-946.
- Nadolny, I., 1994: Morphologie und Hydrologie naturnaher Flachlandbäche unter gewässertypologischen Gesichtspunkten. Karlsruhe (Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe. Heft 189).
- Naudascher, E., 1992: Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. 2. Auflage, Wien.
- Nestmann, F., 1980: Berechnung des ungleichförmigen Abfluss. In: DVWK Fortbildungslehrgang für technische Hydraulik „Stationäre Gerinneströmungen“, 14.-17.04.1980, Karlsruhe, Kapitel 7: Seiten 207-260.
- Nestmann, F., 1987: Gerinneströmung mit seitlichem Zufluss / Gerinneströmung mit seitlichem Abfluss. In.: Naudascher, E., 1987: Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke, Wien, Kapitel 7.3 und 7.4. Seiten 284-311.
- Nestmann, F., 1991: Fließformeln, Rauheitsbeiwerte im Flussbau und Leistungssteigerung von Bundeswasserstraßen. In: Binnenschifffahrt Nr. 1,2. Seiten 26-29.
- Nestmann, F., 1992: Improvement of the upper rhine, tail water Iffezheim. In: ISRS, 5th international symposium on river sedimentation. Sediment management proceeding (Vol. III). Karlsruhe.
- Nestmann, F., 1993: Oberrheinausbau, Wassermodell mit beweglicher Sohle des UW Iffezheim. In: Mittelungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 70, Karlsruhe. Seiten 97-132.
- Nestmann, F., 1996: Eigenschaften und Nutzungen von Fließgewässern. In: Wasserwirtschaft Jg. 86, Heft 7/8: Seiten 378-383.

-
- Nestmann, F., 2002: Wasserbau und Wasserwirtschaft. Studiumbegleitende Materialien Teil 1. Eigenverlag des Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH).
- Nestmann, F., 2003: Forschungstransfer – Beispiele der Synthese zwischen Wissenschaft und Praxis in der Wasserwirtschaft. In: Informationsveranstaltung „Hydraulik naturnaher Fließgewässer“ Karlsruhe, 2.12.2003. Seiten 3-5.
- Nestmann, F., Bachmeier, G., 1987: Anwendung von Luftmodellen im strömungsmechanischen Versuchswesen des Flussbaus. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 61. Seiten 65-98.
- Nestmann, F., Du, C., 1997: Selection of suitable methods for terrain modelling for river engineering. In: International Journal of Sediment Research Vol. 12, No. 3: pages 40-46.
- Nestmann, F., Kleine, R., 1981: Messtechnische Bestimmung des Lufteintrags in hydraulischen Modellen und Grenzen der Übertragbarkeit der Modellmessungen. In: DVWK-Workshop „Wasserbauliches Versuchswesen“ im März 1981. Karlsruhe.
- Nestmann, F., Kron, A., 1999: Hochwasser. Naturereignis oder Technikfolge? In: Symposium Naturkatastrophen in Mittelgebirgsregionen. Karlsruhe, 11./12.10.1999. Tagungsband. Seiten 7-9.
- Nestmann, F., Zimmermann, C., 1989: Ströme und Kanäle als Ingenieurbauwerke oder gestaltete Natur. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Nr. 64. Seiten 91-105.
- Newson, M., Sear, D., 1994: River conservation, river dynamics, river maintenance: contradictions? English nature.
- Nezu, I., Onitsuka, K., 2001: Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements. Journal of Hydraulic Research (Vol. 39, No. 6): pages 629-642.
- Nicollet, G., Uan, M., 1979: Ecoulements permanents à surface libre en lits composés. La Houille Blanche (Vol. 34, No. 1): pages 21-30.
- Nikuradse, J., 1932: Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren. (Verein Deutscher Ingenieure, Forschungsheft 356).
- Nuding, A., 1991: Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit Ufergebüsch. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Konstruktiver Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH Darmstadt (Heft 35).
- Obendorf, K., 1978: Abflussverhalten offener Gerinne unter besonderer Berücksichtigung lebender Bauelemente. Dissertation RWTH Aachen.
- Obendorf, K., 1978: Rauigkeitsverhalten und Ermittlung von Rauigkeitsbeiwerten beim naturnahen Ausbau der Gewässer. Mitteilungen des Instituts für

-
- Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH Aachen (Heft 25): Seiten 49-198.
- Oberle, P., 2004: Integrales Hochwassersimulationssystem Neckar. Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen und Übertragung. Karlsruhe (Mitteilungen des Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe TH, Heft 226). Derzeit in Druck.
- Oplatka, M., 1998: Stabilität von Weidenverbauungen an Flussumfern. Zürich (Mitteilungen der Versuchsanstalt für Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 156).
- Otto, A., 1991: Grundlagen einer morphologischen Typologie der Bäche. Karlsruhe (Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 180).
- Pasche, E., 1984: Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematische Erfassung. Aachen (Mitteilungen des Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft RWTH Aachen, Heft 52).
- Patt, H. (Hrsg.), 2001: Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. Berlin.
- Patt, H., 2003: Wasserbauliche Erfordernisse an die Umgestaltung von Fließgewässern in urbanen Bereichen. Dresden (Wasserbauliche Mitteilungen des Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Heft 24).
- Patt, H., Jürging, P., Krauss, W., 1998: Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. Berlin.
- Patt, H., Jürging, P., Krauss, W., 2004: Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. 2. überarbeitete Auflage. Berlin.
- Pernecker, L., Vollmers, H.-J., 1965: Neue Betrachtungsmöglichkeiten des Feststofftransports in offenen Gerinnen. Die Wasserwirtschaft (55. Jahrgang).
- Petryk, S., Bosmajian, G., 1975: Analysis of flow through vegetation. Journal of Hydraulic Division (HY 7, Vol. 101): Pages 871-883.
- Plate, E., Quraishi, A., 1965: Modeling of velocity distributions inside and above tall crops. Journal of Appl. Meteorol. (Vol. 4, No. 3): pages 400-408.
- Posey, C.J., 1967: Computation of discharge including overbank flow. Civil Engineering (Vol. 37, Number 4): pages 63-78.
- Press, H., 1956: Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen. Berlin.
- Press, H., 1959: Wehre. 2. erw. Auflage. Berlin.
- Pro Aqua, 1994: Limnologische Untersuchungen zur Effizienzkontrolle an der umgestalteten Enz in Pforzheim hinsichtlich der Fischfauna, Wirbellosenfauna sowie der Gewässergüte. Abschlussbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

-
- Rajaratnam, N., Ahmadi, R., 1979: Interaction between main channel and flood plain flows. *Journal of Hydraulic Engineering* (Vol. 105, No. 5): pages 573-588.
- Rajaratnam, N., Ahmadi, R., 1981: Hydraulics of channels with flood-plains. *Journal of Hydraulic Research* (No. 1): pages 43-60.
- Raudkivi, A.J., 1982: *Grundlagen des Sedimenttransportes*. Berlin.
- Reichardt, H., 1941: Über eine neue Theorie der freien Turbulenz. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik* (Band 21, Heft 5): Seiten 217-264.
- Richter, A., 1973: *Strömungskräfte auf starre Kreiszyylinder zwischen parallelen Wänden*. Dissertation am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe (TH).
- Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik vom 20.12.2000. Herausgegeben vom Rat der Europäischen Gemeinschaft (EU), 2000 = 2000/60/EG, Brüssel.
- Rickert, K., Barleben, J., Billib, H., 1980: *Der Einfluss biologischer Maßnahmen auf den Abflusswiderstand und die Abflussgeometrie offener Gerinne*. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlicher Wasserbau der Universität Hannover (unveröffentlicht).
- Rijn, L.C. van, 1984: Sediment transport Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* (ASCE, Vol. 110, No. 10): pages 1431-1456.
- Ritterbach, E., 1988: *Die Berechnung naturnaher mäandrierender Fließgewässer*. Aachen (Mitteilungen des Institut für Wasserwirtschaft und Wasserbau der RWTH Aachen, Heft 71).
- Rosgen, D.L., 1993: *Applied River Morphology*. Pagosa Springs.
- Rouvé, G., 1987: *Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau*. (Forschungsbericht DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft). Weinheim.
- Schade, G., 1985: *Ausbau und Pflege der Murr auf den Markungen Erdmannshausen, Steinheim und Murr*. In: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): *Ökologische Untersuchungen an der ausgebauten unteren Murr, Landkreis Ludwigsburg 1977-1982*, S. 49-60. Karlsruhe.
- Scherle, J., 1999: *Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen*. Grundlagen, Leitbilder, Planung. Karlsruhe (Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 199).
- Schiechtl, H.M., Stern, R., 2002: *Naturnaher Wasserbau*. Anleitung für ingenieurbio-logische Bauweisen. Berlin.
- Schlichting, H., 1982: *Grenzschicht-Theorie*. Karlsruhe.

-
- Schnauder, I., 2004: Strömungsstruktur und Impulsaustausch in gegliederten Gerinnen mit Vorlandvegetation. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Karlsruhe (TH). Druck in Vorbereitung.
- Schneider, S., 2003: Unterhaltungsstrategien für naturnahe Gewässer innerhalb von Ortslagen unter Berücksichtigung morphologischer Entwicklungen am Beispiel der Naturmessstrecke Enz/Pforzheim. Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe.
- Schumacher, F., 1995: Zur Durchflussberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin (Heft Nr. 127).
- Schumm, S.A., Lichty, R.W., 1965: Time, space and causality in geomorphology. *American Journal of Science* (Vol. 263, Feb. 1965): Pages 110-119.
- Sellin, R.H.J., 1964: A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood-plain. *La Houille Blanche* (No. 7): pages 793-802.
- Seminara, G., Blondeaux, P., 2001: *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. New York.
- Shen, H.W., Li, R.M., 1973: Analysis of resistance over staggered roughness. *Journal of the Hydraulic Division* (Vol. 99, No. 11): pp 2169-2174.
- Shields, A., 1936: Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau (Heft 26).
- Specht, F.-J., 2002: Einfluss von Gerinnebreite und Uferbewuchs auf die hydraulisch-sedimentologischen Verhältnisse naturnaher Fließgewässer. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig.
- Stephan, U., 2002: Zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation. *Wiener Mitteilungen* (Band 180).
- Strickler, A., 1923: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Bern (Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, Heft 16).
- Task Force, 1963: Friction Factors in open channels. Report of Task Force on Friction Factors in Open Channels. *Journal of Hydraulic Division, ASCE* (Vol. 89, HY 2, March): Pages 97-143.
- Thornton, C.I., 2000: Calculation shear stress at channel-overbank interfaces in straight channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering* (Vol. 126, No. 12): pages 929-936.

-
- Truckenbrodt, E., 1996: Fluidmechanik – Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. Berlin (4. Auflage).
- Vanoi, V., 1975: Sedimentation Engineering. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice (No. 54).
- Vetter, M., 1988: Gesamttransport von Sedimenten in offenen Gerinnen. Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München (Heft 26).
- Vetter, M., 1988: Vergleich von Modellen des Schwebstofftransportes in offenen Gerinnen mit Messergebnissen. Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München (Heft 8).
- Wang, Y., Büchele, B., Nestmann, F., 2002: Wirkung instationären Abflussverhaltens auf den Dünentransport in der Elbe. In: Nestmann, F., Büchele, B. (Hrsg.), 2002: Morphodynamik der Elbe. Schlussbericht des BMBF-Verbundprojekt. Karlsruhe.
- White, D.S., 1993: Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. Journal N. Am. Benthol. Soc. (Vol. 12): pages 61-69.
- Wolman, M.G., Miller, J.P., 1960: Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. (Journal of Geology, Vol. 68): pages 54-74.
- Wormleaton, P.R., Merret, D.J., 1990: An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/flood-plain sections. Journal of Hydraulic Research (Vol. 28, No. 2): pages 157-174.
- Wright, R.R.; Carstens, M.R., 1970: Linear-momentum flux to overbank sections. Journal of the Hydraulics Divisions (Vol. 96, HY 9): pages 1782-1793.
- Wu, W., Wang, S.S.Y., Jia, Y., 2000: Non uniform sediment transport in alluvial rivers. Journal of Hydraulic Research (Vol. 38, No. 6): pages 427-434.
- Yalin, M.S., Da Silva, A.M., 2001: Fluvial Processes. International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR, AIRH). Delft.
- Yalin, M.S., Scheuerlein, H., 1988: Friction Factors in alluvial rivers. Bericht des Institut für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft in Oberrach (Bericht Nr. 59).
- Yen, C., Overton, D.E., 1973: Shape effects on resistance in flood-plain channels. Journal of the Hydraulic Division (Vol. 99, No. 1): pages 219-238.
- Zanke, U., 1982: Grundlagen der Sedimentbewegung. Berlin.
- Zanke, U., 1987: Sedimenttransportformeln für Bed-Load im Vergleich. (Mitteilungen des Franzius-Institus für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 64).

Weiterführende Literatur

- Baudirektion Kanton Zürich, 2000: Wasserbau im Kanton Zürich, Zürich.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft., 1996: Abfluss- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten – Grundlagen zum intergralen Wildbachschutz, München (Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 27).
- Bellin, K., 1987: Erfahrungen bei Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern, Berlin (DVWK Schriften 79)
- Binder, W., 1979: Grundzüge der Gewässerpflege, München (Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 10).
- Briem, E., 2002: Formen und Strukturen der Fließgewässer. ATV-DVWK Arbeitsbericht. Hennef.
- Brockett, S., 1999: Die EU-Wasserrahmenrichtlinie – Ein Überblick. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde: Sedimentbewegung in europäischen Flussgebieten, Koblenz, 15-25 (BfG Mitteilungen, Heft 22).
- Bui, M.D., 2000: Transport feiner Sedimente im Wasser, Paper des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- DVWK, 1988: Feststofftransport in Fließgewässern – Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis, Hamburg (DVWK Schriften, Heft 87).
- DVWK, 1997: Uferstreifen an Fließgewässern – Funktion, Gestaltung und Pflege, Bonn (DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 244/1997).
- DVWK-Gemeinnützige Fortbildungsgesellschaft für Wasserwirtschaft und Landschaftsentwicklung (GFG) mbH, 1999: Ufergehölze und Gehölzpflege, Mainz.
- Elliott, A.H., 2000: Settling of fine Sediment in a channel with emergent Vegetation. Journal of hydraulic Engineering (August 2000): 570-577.
- Felkel, K., 1960: Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): Mitteilungsblatt, Karlsruhe, 34-52 (Mitteilungsblatt Nr. 15).
- Flach, A.J.; Pieters, J., 1969: Zur Größe der Rauigkeitsbeiwerte in Wasserläufen als Funktion der Verkrautung, Bonn (Schriftenreihe des deutschen nationalen Komitees der internationalen Kommission für Be- und Entwässerung, Heft 2).

-
- Gehrig, W., 1967: Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. (Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover, Heft 29).
- Gerstkraser, C., 2000: Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern. Grundlagen zum Abu, Belastbarkeit und Wirkungsweisen, Wien (Dissertationen der Universität für Bodenkultur Wien, Nr. 52).
- Haber, B., 1982: Über den Erosionsbeginn bei der Überströmung von flexiblen Rauheitselementen, Braunschweig (Mitteilungen des Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 74/1982).
- Höfer, H.U., 1984: Beginn der Sedimentbewegung bei Gewässersohlen mit Riffeln oder Dünen, Darmstadt (Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Nr. 32).
- Irmer, U., 1999: Erfordernisse zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie in Deutschland. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde: Sedimentbewegung in europäischen Flussgebieten, Koblenz, 26-38 (BfG Mitteilungen, Heft 22).
- Kaiser, W.; Schröder, W., 1985: Fließwiderstand von Ufergehölz. Wasser und Boden 5(1985): 246-248.
- Kron, W., 1996: Stochastische Simulation des Geschiebetransports am Zusammenfluss zweier Gewässer. (Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Heft 59).
- Mertens, W., 1994: Hydraulisch-sedimentologische Berechnungen naturnah gestalteter Fließgewässer – Berechnungsverfahren für die Ingenieurpraxis, Bonn (DVWK Mitteilungen 25).
- Müller, G.; Kaden, S., 1969: Beitrag zur Diskussion über Schleppspannungen auf Böschungen. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 19 (Heft 12/1969): 421-423.
- Pasche, E., 2003: Grundlagen der Hydraulik. Skriptentwurf für den Lehrbetrieb an der Technischen Hochschule Hamburg-Harburg.
- Patra, K.; Kar, S., 2000: Flood interaction of meandering river with floodplains. Journal of hydraulic Engineering (August 2000): 593-604.
- Pusch, M.; Feld, C.; Hoffmann, A., 1999: Schwemmgut – kostenträchtiger Müll oder wertvolles Element von Flußökosystemen? Wasserwirtschaft 89(1999): 280-284.
- Rehm-Softwareprodukte, 2004: Flussbau 1D – Grundlagen und Vergleich der Berechnungsverfahren. Unterlagen zur Schulung am 31.03.2004 in Ulm.

-
- Rickert, K., Nickel, A., 2003: Naturnahe Regelung von Fließgewässern. Unterlagen zum Kurs WH06 des Weiterbildungsstudiums „Wasser und Umwelt“ der Universität Hannover.
- Rouvé, G., 1992: Feststofftransport und Gewässerökologie. Möglichkeiten der Berechnung und Risikobewertung. (Mitteilungen des Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westphälischen Technischen Hochschule Aachen, Heft 90).
- Schoklitsch, A., 1914: Über Schleppkraft und Geschiebepbewegung, Leipzig.
- Schröder, R., 1985: Geschiebetransportformeln im Vergleich. In: Schröder, R., Sammlung von Kurzberichten 1978-1983, Darmstadt, 65-66 (Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Nr. 30).
- Schröder, R., 1985: Gewässersohle und kritische Schleppspannung. In: Schröder, R., Stofftransport im Wasser – Darmstädter wasserbauliches Kolloquium 1985, Darmstadt, 7-22 (Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Nr. 35).
- Schröder, R., 1985: Vergleichbarkeit von Geschiebetransportformeln. Wasserwirtschaft 75(1985): 217-221.
- Schröder, R., 1990: Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten, Berlin (DVWK Schriften 92)
- Schröder, R.; Heinzelmann, C., 1987: Auswirkungen der biologischen Sohlenbesiedlung auf den Geschiebetransport in Fließgewässern. Wasser und Boden 11(1987): 571-575.
- Sönnichsen, D., Gesch, A., 2002: Gewässer in Ortslagen – Aspekte zur Unterhaltung, Gestaltung, Hochwasserschutz. In: Wasser und Boden, 54/7+8. Seiten 83-87.
- Steiger, A., 1918: Haltbarkeit der Uferbauten in Bezug auf die Schleppkraft des fließenden Wassers. Schweizerische Bauzeitung Band LXXII (Heft Nr. 4/1918): 32-35.

ANLAGEN

Inhalt

Anlage 1: Widerstandsbeiwert λ_{Kouwen}	1
Anlage 2: Berechnungsverfahren für gegliederte Gerinne	3
Verfahren nach Posey (1957)	3
Verfahren nach Sellin (1964).....	6
Verfahren nach Wright und Carstens (1970).....	8
Verfahren nach Nicollet und Uan (1979)	11
Verfahren nach Wormleaton und Merret (1990).....	13
Anlage 3: Verfahrensverifikation für vegetationsfreie Querschnitte	16
Anlage 4: Interaktives Excel-VBA-Programm	21
Aufbau und Bedienung des Programms.....	21
Programmlisting (Auszug)	24
Anlage 5: Dokumentation der Modellversuche	29
Serie 1: Bewuchskollektiv auf dem Vorland	30
Serie 2: Überströmte Hochstaudenfluren entlang des Ufers	32
Serie 3: Auf den Stock gesetzter Mittelbewuchs	34
Serie 4: Einreihiger durchströmter Mittelbewuchs ohne Blätter	36
Serie 5: Zweireihiger durchströmter Mittelbewuchs ohne Blätter	38
Serie 6: Zweireihiger durchströmter Mittelbewuchs – belaubt ($a_x = 0,06 \cdot a_y$)	40
Serie 7: Zweireihiger durchströmter Mittelbewuchs – belaubt ($a_x = 0,20 \cdot a_y$)	43
Serie 8: Zweireihiger durchströmter Mittelbewuchs – belaubt ($a_x = 0,67 \cdot a_y$)	44
Serie 10: Mehrreihiger diagonal angeordneter durchströmter Mittelbewuchs - belaubt ($a_x = 1,17 \cdot a_y$).....	50
Serie 11: Mehrreihiger diagonal angeordneter durchströmter Mittelbewuchs - belaubt ($a_x = 2,33 \cdot a_y$).....	51
Anlage 6: Berechnungsergebnisse Pforzheim/Enz	52

Anlage 1: Widerstandsbeiwert λ_{Kouwen}

Kouwen (1988 und 1990) führte im Feld und im Labor Untersuchungen durch, um eine empirische Beziehung für die Berechnung des dimensionslosen Widerstandsbeiwertes bei überströmter, flexibler Vegetation ($h_{\text{veg}} \ll h \rightarrow$ Kleinbewuchs) abzuleiten. In seiner Arbeit wird der Widerstandsbeiwert λ_{Kouwen} in Relation zur Bewuchshöhe im strömungsbedingt gelegten Zustand (h'_{veg} , vgl. **Abb. A - 1**), zur Fließtiefe (h) im Vegetationsbereich und zur Steifigkeit (MEI) der Bewuchselemente gesetzt:

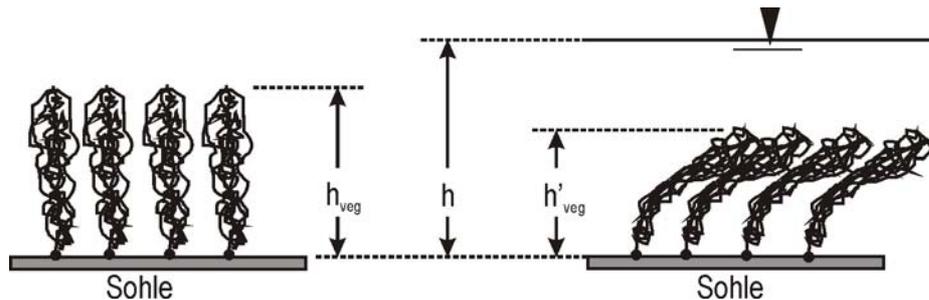


Abb. A - 1: Definitionsskizze zur Bewuchshöhenangabe bei überströmtem Bewuchs.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{Kouwen}}}} = a + b \cdot \log\left(\frac{h}{h'_{\text{veg}}}\right)$$

- λ_{Kouwen} Widerstandsbeiwert für überströmte Vegetation (-)
 a, b empirische Parameter (-)
 h Fließtiefe im Vegetationsbereich (m)
 h'_{veg} Höhe der gelegten überströmten Vegetation (m)

Die Steifigkeit (MEI) der Vegetationselemente ist in der Natur nicht direkt messbar. Kouwen gibt daher speziell für untersuchte Grasarten empirische Formeln an, mit denen der Parameter MEI vereinfacht aus der Vegetationshöhe h_{veg} abgeleitet werden kann:

$$\text{MEI} = \begin{cases} 319 \cdot h_{\text{veg}}^{3,3} & \rightarrow \text{Gras in der Vegetationsphase} \\ 25,4 \cdot h_{\text{veg}}^{2,26} & \rightarrow \text{abgestorbenes Gras} \end{cases}$$

- MEI Steifigkeit der Bewuchselemente ($\text{kg} \cdot \text{m}^3 / \text{s}^2$)
 h_{veg} Vegetationshöhe (m)

Für andere überströmte Bewuchsarten (z.B. Stauden) liegen derzeit noch keine Erfahrungswerte für die Steifigkeit (MEI) vor. Kouwen beschreibt in seiner Arbeit jedoch ein Verfahren, bei dem mit Hilfe eines kippenden Brettes direkt im Feld die Steifigkeit ermittelt werden kann.

Die Parameter a und b variieren in Abhängigkeit von der Biegung des Bewuchses (vgl. **Tab. A - 1**). Diese wird über das Verhältnis der steifigkeitsabhängigen kritischen

Schubspannungsgeschwindigkeit (v^*_{krit}) zur rechnerischen Schubspannungsgeschwindigkeit (v^*) ohne Vegetation ausgedrückt:

$$v^*_{krit} = \text{Min} \begin{cases} 0,028 + 6,33 \cdot \text{MEI} \\ 0,23 \cdot \text{MEI}^{0,106} \end{cases} \text{ und } v^* = \sqrt{g \cdot h \cdot I_E}$$

- v^*_{krit}staeufigkeitsabhängige kritische Schubspannungsgeschwindigkeit (m/s)
- MEI.....Steifigkeit der Vegetationselemente (kg·m³/s²)
- v^*rechnerische Schubspannungsgeschwindigkeit ohne Vegetation (m/s)
- g.....Erdbeschleunigung (m/s²)
- h.....Fließtiefe (m)
- I_EEnergiliniengefälle (-)

Tab. A - 1: Matrix zur Bestimmung der Parameter a und b

Durchbiegungsparameter v^*/v^*_{krit}	Parameter	
	a	b
< 1,0	0,15	1,85
1,0 bis 1,5	0,20	2,70
1,5 bis 2,5	0,28	3,08
> 2,5	0,29	3,50

Die Bewuchshöhe (h'_{veg}) der gelegten überströmten Vegetation gibt Kouwen nach folgender empirischen Beziehung an:

$$h'_{veg} = 0,14 \cdot h_{veg} \cdot \left[\frac{\left(\frac{\text{MEI}}{\rho_w \cdot g \cdot h \cdot I_E} \right)^{0,25}}{h_{veg}} \right]^{1,59}$$

- h'_{veg}Vegetationshöhe im überströmten umgelegten Zustand (m)
- h_{veg}Vegetationshöhe (m)
- MEI.....Steifigkeit der Vegetationselemente (kg·m³/s²)
- ρ_wDichte des Wassers (kg/m³)
- g.....Erdbeschleunigung (m/s²)
- h.....Fließtiefe (m)
- I_EEnergiliniengefälle (-)

Anlage 2: Berechnungsverfahren für gegliederte Gerinne

Verfahren nach Posey (1957)

Nach dem einfachen und auf die empirische Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler aufbauenden Verfahren von Posey ergibt sich der Gesamtabfluss in einem gegliederten Gerinne ohne Mittel- und Großbewuchs auf den Vorländern und entlang der Böschungen aus der Summe der Teilabflüsse, welche separat für die Vorländer und das Hauptgerinne ermittelt werden.

In Abhängigkeit von einem Verhältnis der mittleren Wassertiefe auf dem Vorland zur hydraulischen Fließtiefe im Hauptgerinne (h_H) schlägt Posey zwei unterschiedliche Berechnungsgänge vor. Eine Auswertung von Naturdaten im Rahmen der vorliegenden Arbeit hat jedoch gezeigt, dass deutlich bessere Berechnungsergebnisse erzielt werden, wenn anstelle der mittleren Wassertiefe auf dem Vorland die mittlere Trennhöhenhöhe $h_{T,m}$ verwendet wird:

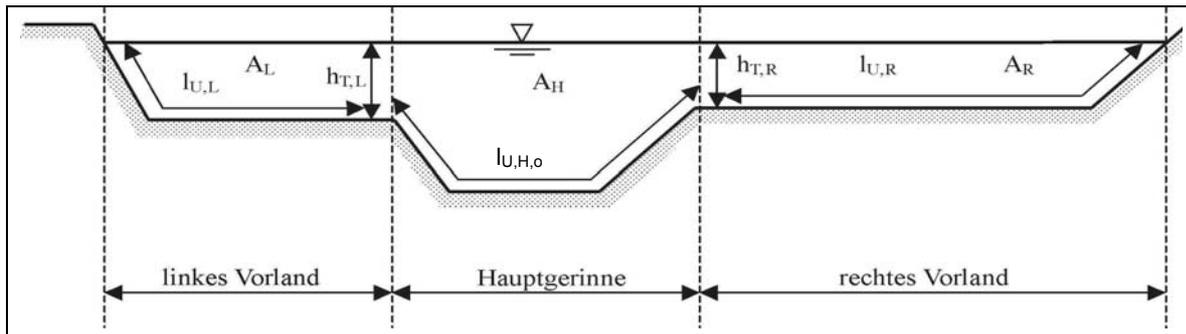
1) $h_{T,m} > h_H/2$:

Eine Gliederung in unterschiedliche Fließquerschnitte ist aufgrund der großen Fließtiefe sowohl über dem Vorland als auch über dem Hauptgerinne nicht mehr erforderlich. Die Abflussberechnung kann daher wie für ein kompaktes Gerinne erfolgen, indem z.B. eine Rauheitsüberlagerung nach dem Verfahren von Einstein (1934) und Horton (1933) durchgeführt wird.

2) $h_{T,m} \leq h_H/2$:

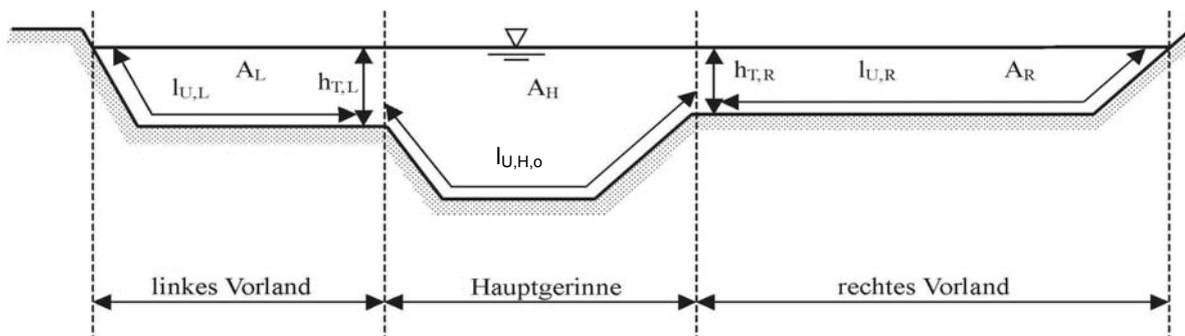
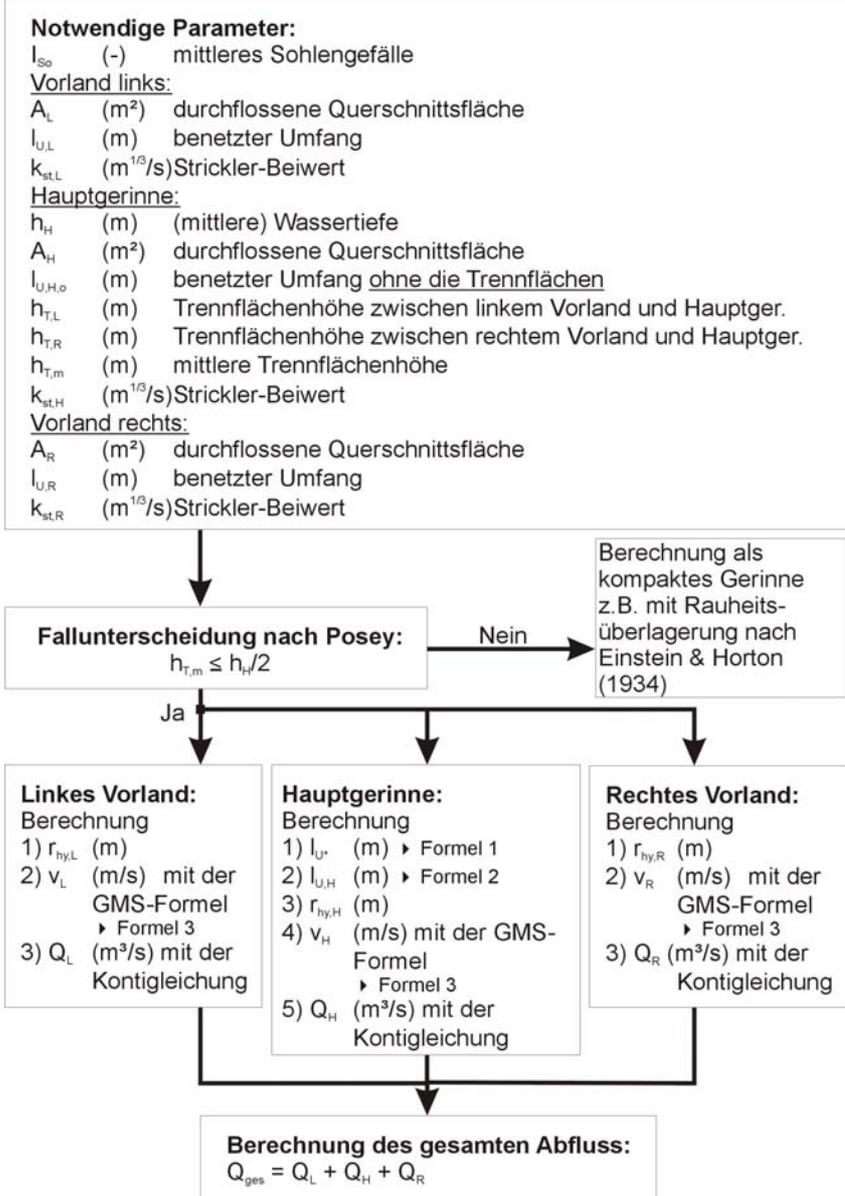
Hier erfolgt eine gegliederte Berechnung. Zum benetzten Umfang des Hauptgerinnes wird ein Anteil l_U^* dazuaddiert. Durch Anwendung der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler können dann die Teilabflüsse über den Vorländern und im Hauptgerinne ermittelt werden. Die Summe aller Teilabflüsse ergibt den Gesamtabfluss.

Auf der folgenden Seite sind die notwendigen Formeln zusammengestellt. Die darauf folgende Seite enthält ein für die Anwendung erstelltes Ablaufdiagramm.



linkes Vorland → Index L	Hauptgerinne → Index H	rechtes Vorland → Index R
	Mittlere Trennflächenhöhe: $h_{T,m} = \frac{1}{2} \cdot (h_{T,L} + h_{T,R})$	
Benetzter Umfang: $I_{U,L}$ Die Trennfläche $h_{T,L}$ wird <u>nicht</u> zum benetzten Umfang des Vorlandes dazugezählt!	Benetzter Umfang: $I_{U,H}^* = h_{T,m} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot h_{T,m}}{h_H}\right)$ Formel 1 $I_{U,H} = I_{U,H,0} + I_{U,H}^*$ Formel 2	Benetzter Umfang: $I_{U,R}$ Die Trennfläche $h_{T,R}$ wird <u>nicht</u> zum benetzten Umfang des Vorlandes dazugezählt!
Hydraulischer Radius: $r_{hy,L} = A_L / I_{U,L}$	Hydraulischer Radius: $r_{hy,H} = A_H / I_{U,H}$	Hydraulischer Radius: $r_{hy,R} = A_R / I_{U,R}$
Strickler-Beiwert : $k_{st,L}$ Wahl aus Tabellen, durch Rückrechnung aus vorhandenen Messdaten oder durch Schätzen.	Strickler-Beiwert : $k_{st,H}$ Wahl aus Tabellen, durch Rückrechnung aus vorhandenen Messdaten oder durch Schätzen.	Strickler-Beiwert : $k_{st,R}$ Wahl aus Tabellen, durch Rückrechnung aus vorhandenen Messdaten oder durch Schätzen.
GMS-Formel: $V_L = k_{st,L} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot r_{hy,L}^{2/3}$	GMS-Formel: $V_H = k_{st,H} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot r_{hy,H}^{2/3}$ Formel 3	GMS-Formel: $V_R = k_{st,R} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot r_{hy,R}^{2/3}$
Teilabfluss: $Q_L = v_L \cdot A_L$	Teilabfluss: $Q_H = v_H \cdot A_H$	Teilabfluss: $Q_R = v_R \cdot A_R$
Gesamtabfluss : $Q = \sum Q_i = Q_L + Q_H + Q_R$		

Gegliedertes Gerinne ohne Mittel- und Großbewuchs
Verfahren nach Posey (1957)



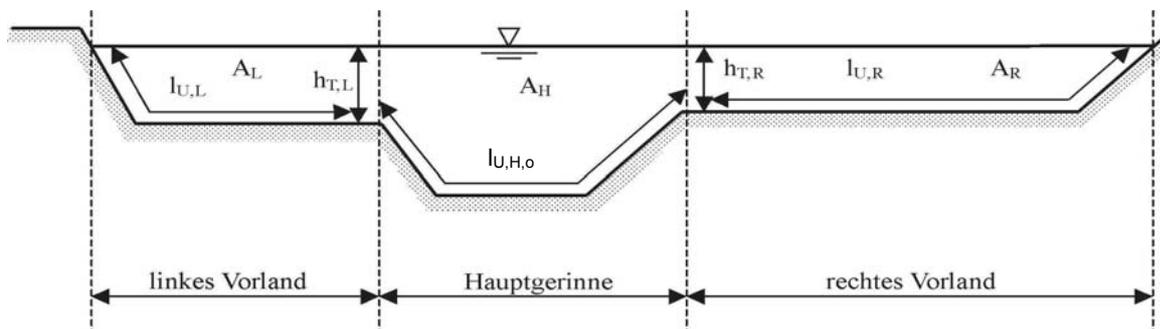
Verfahren nach Sellin (1964)

Bei dem ebenfalls auf die empirische Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler aufbauenden Verfahren von Sellin wird der Gesamtabfluss in einem gegliederten Gerinne aus der Summe der Teilabflüsse, welche separat für die Vorländer und das Hauptgerinne ermittelt werden, berechnet.

Die fiktiven Trennflächen zwischen dem Hauptgerinne und den Vorländern ($h_{T,L}$ und $h_{T,R}$) werden vertikal bis zur Wasseroberfläche angesetzt und ganz dem benetzten Umfang des Hauptgerinnes zugerechnet:

$$l_{U,H} = l_{U,H,0} + h_{T,L} + h_{T,R}$$

Formel 4



Auf der folgenden Seite ist für die Anwendung ein Ablaufdiagramm dargestellt.

Gegliedertes Gerinne ohne Mittel- und Großbewuchs

Verfahren nach Sellin (1964)

Notwendige Parameter:

I_{So} (-) mittleres Sohlgefälle

Vorland links:

A_L (m^2) durchflossene Querschnittsfläche

$l_{U,L}$ (m) benetzter Umfang

$k_{st,L}$ ($m^{1/3}/s$) Strickler-Beiwert

Hauptgerinne:

A_H (m^2) durchflossene Querschnittsfläche

$l_{U,H,o}$ (m) benetzter Umfang ohne die Trennflächen

$h_{T,L}$ (m) Trennflächenhöhe zwischen linkem Vorland und Hauptger.

$h_{T,R}$ (m) Trennflächenhöhe zwischen rechtem Vorland und Hauptger.

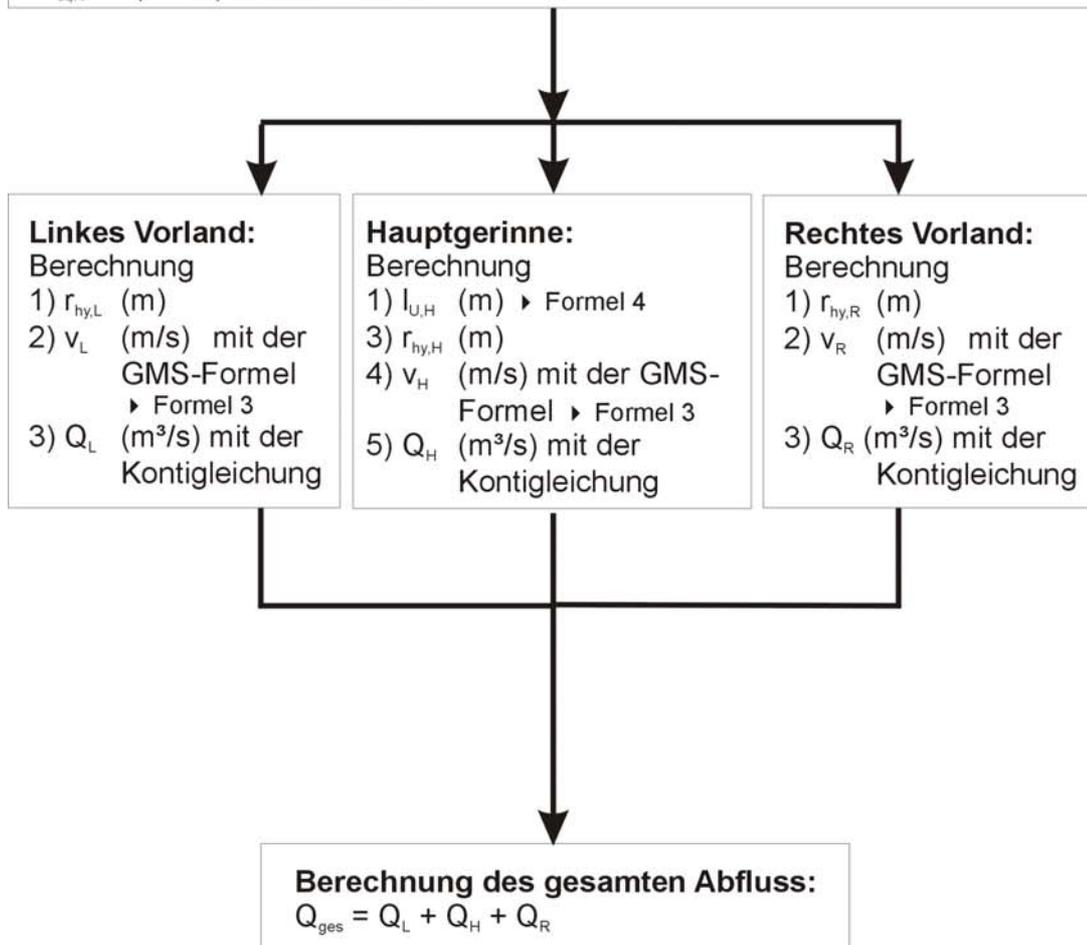
$k_{st,H}$ ($m^{1/3}/s$) Strickler-Beiwert

Vorland rechts:

A_R (m^2) durchflossene Querschnittsfläche

$l_{U,R}$ (m) benetzter Umfang

$k_{st,R}$ ($m^{1/3}/s$) Strickler-Beiwert



Verfahren nach Wright und Carstens (1970)

Wright und Carstens führten in einem Luftmodell Untersuchungen an einem halben Doppeltrapezprofil mit hydraulisch glatten Wänden durch. Im Gegensatz zu den meisten anderen Autoren (welche an der Trennfläche zwischen Hauptgerinne und Vorland eine fiktive Scheinschubspannung oder fiktive Rauheit ansetzten und diese dann stets dem Hauptgerinne zuordnen) berücksichtigt das Verfahren von Wright und Carstens eine Scheinschubspannung τ_T , welche den Vorländern zugeordnet wird.

Durch die Auswertung der im Rahmen der Arbeit zusammengetragenen Naturmessdaten konnte das Verfahren von Wright und Carstens durch eine Modifikation die fiktiven Trennflächen betreffend noch weiter verbessert werden:

Zur Berechnung der Scheinschubspannung verwenden Wright und Carstens den Ansatz für die mittlere Sohlenschubspannung im Gesamtgerinne:

$$\tau_T = \tau_{S_{0,H}} = \rho \cdot g \cdot r_{hy,ges} \cdot I_{S_0} \quad \text{Formel 5}$$

mit

$$r_{hy,ges} = \sum \frac{A_i}{I_{U,i}} = \frac{A_L + A_H + A_R}{I_{U,L} + I_{U,H,0} + I_{U,R}} \quad \text{Formel 6}$$

Der hydraulische Radius für das Hauptgerinne ermittelt sich unter Berücksichtigung der mittleren Trennflächenhöhe $h_{T,m}$ aus:

$$h_{T,m} = \frac{h_{T,L} + h_{T,R}}{2} \quad \text{Formel 7}$$

$$r_{hy,H} = \frac{A_H}{I_{U,H,0} + h_{T,m}} \quad \text{Formel 8}$$

Die mittleren Fließgeschwindigkeiten und letztendlich die Teilabflüsse in den Teilquerschnitten werden mit einer von Wright und Carstens modifizierten Form der Darcy-Weisbach-Gleichung berechnet:

- Hauptgerinne: $Q_H = A_H \cdot \sqrt{\frac{8}{\lambda_H}} \cdot \sqrt{g \cdot r_{hy,H} \cdot I_{S_0}}$ Formel 9

- Vorland links: $Q_L = A_L \cdot \sqrt{\frac{8}{\lambda_L}} \cdot \sqrt{g \cdot r_{hy,L}} \cdot \sqrt{I_{S_0} + \frac{\tau_T \cdot h_{T,L}}{\rho \cdot g \cdot A_L}}$ Formel 10

- Vorland rechts: $Q_R = A_R \cdot \sqrt{\frac{8}{\lambda_R}} \cdot \sqrt{g \cdot r_{hy,R}} \cdot \sqrt{I_{S_0} + \frac{\tau_T \cdot h_{T,R}}{\rho \cdot g \cdot A_R}}$ Formel 11

Die Widerstandsbeiwerte können dabei nach folgendem Ansatz ermittelt werden:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda_i}} = 2,5 \cdot \ln\left(\frac{r_{hy,i}}{k_{s,i}}\right) + 2,5 \cdot \ln(14,83 \cdot f_i) \quad \text{Formel 12}$$

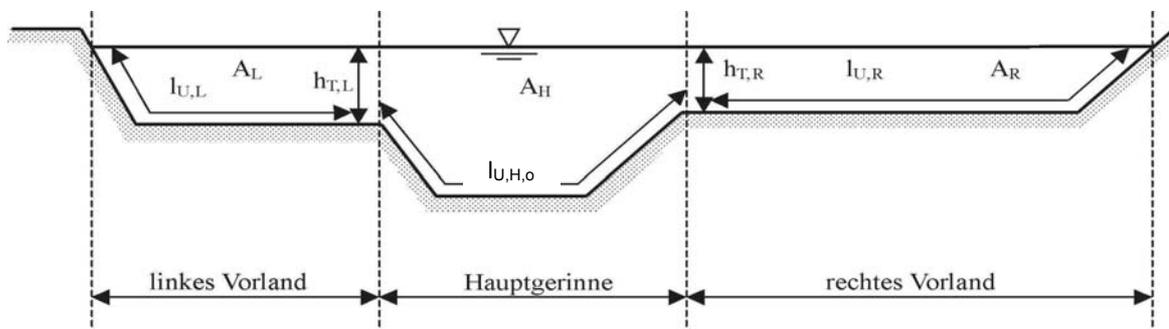
Der Index i steht dabei stellvertretend für das Hauptgerinne (H), das linke (L) oder rechte (R) Vorland. Für den Formbeiwert f_i gilt:

$$f_i = \begin{cases} 0,74 \rightarrow \frac{b_{wsp,i}}{h_i} \geq 25 \\ 0,83 \rightarrow \frac{b_{wsp,i}}{h_i} < 25 \end{cases} \quad \text{Formel 13}$$

mit

$$h_i = \frac{A_i}{b_{wsp,i}} \quad \text{Formel 14}$$

Auf der folgenden Seite ist für die Anwendung ein Ablaufdiagramm dargestellt.



Gegliedertes Gerinne ohne Mittel- und Großbewuchs

Verfahren nach Wright & Carstens (1970)

Notwendige Parameter:

I_{So} (-) mittleres Sohlengefälle

Vorland links:

A_L (m²) durchflossene Querschnittsfläche

$I_{U,L}$ (m) benetzter Umfang

$k_{s,L}$ (m) Äquivalente Sandrauheit

$b_{wsp,L}$ (m) Wasserspiegelbreite über dem Vorland

Hauptgerinne:

A_H (m²) durchflossene Querschnittsfläche

$I_{U,H,o}$ (m) benetzter Umfang ohne die Trennflächen

$h_{T,L}$ (m) Trennflächenhöhe zwischen linkem Vorland und Hauptger.

$h_{T,R}$ (m) Trennflächenhöhe zwischen rechtem Vorland und Hauptger.

$k_{s,H}$ (m) Äquivalente Sandrauheit

$b_{wsp,H}$ (m) Wasserspiegelbreite über dem Hauptgerinne

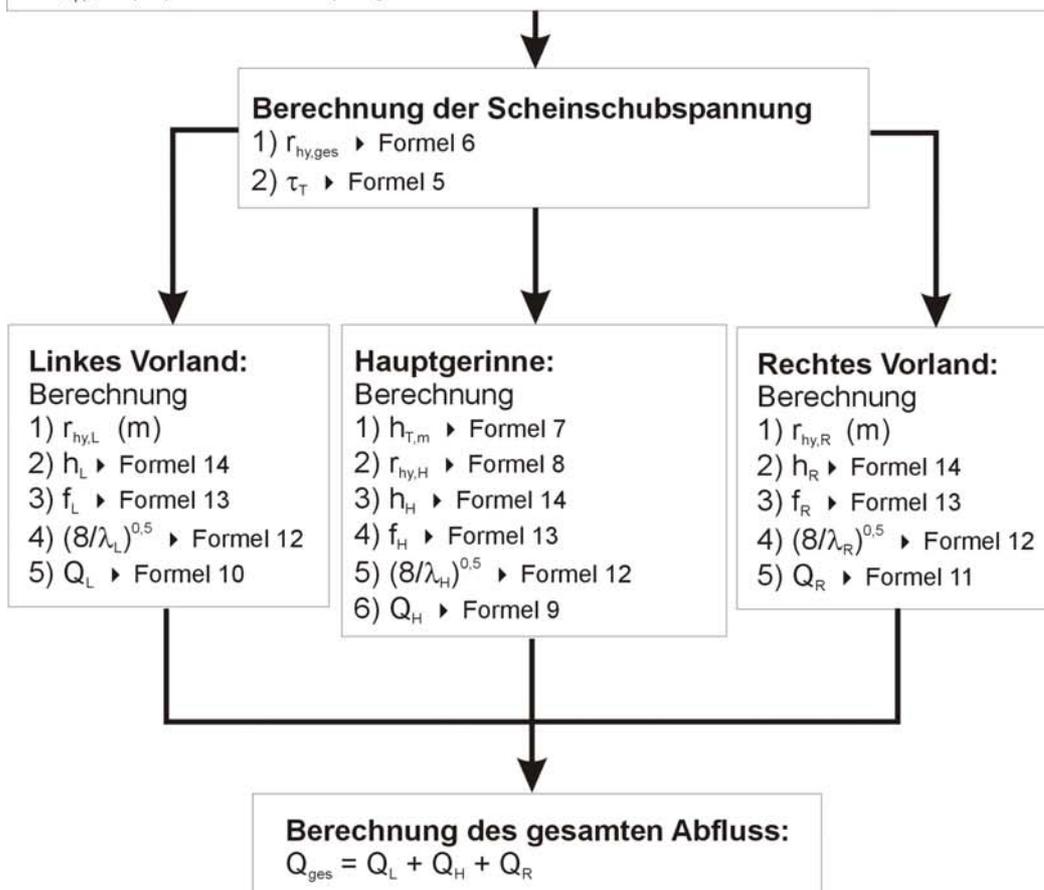
Vorland rechts:

A_R (m²) durchflossene Querschnittsfläche

$I_{U,R}$ (m) benetzter Umfang

$k_{s,R}$ (m) Äquivalente Sandrauheit

$b_{wsp,R}$ (m) Wasserspiegelbreite über dem Vorland



Verfahren nach Nicollet und Uan (1979)

Nicollet und Uan haben hydraulische Laborversuche an symmetrischen Doppeltrapezprofilen mit unterschiedlichen Breitenverhältnissen von Hauptgerinne (b_H) und Vorland (b_V) durchgeführt. Sie deckten mit Ihren Untersuchungen Querschnittsgeometrien mit einem Verhältnis von $b_H/b_V = 0,5$ und $b_H/b_V = 1,5$ ab.

Die beiden Autoren entwickelten ein Verfahren zur Berechnung des Abflusses in einem Schritt. Aufgrund der im Rahmen der Arbeit zusammengetragenen Naturmessdaten konnte das Verfahren für nichtsymmetrische Doppeltrapezprofile aufbereitet werden:

$$Q_{\text{ges}} = \sqrt{I_{S_0}} \cdot \left[C_N \cdot k_{\text{st},H} \cdot A_H \cdot r_{\text{hy},H}^{2/3} + k_{\text{st},V} \cdot r_{\text{hy},V}^{2/3} \cdot \sqrt{A_V^2 + A_V \cdot A_H \cdot (1 - C_N^2)} \right] \quad \text{Formel 15}$$

mit

$$A_V = A_L + A_R \quad \text{Formel 16}$$

$$I_{U,V} = I_{U,L} + I_{U,R} \quad \text{Formel 17}$$

$$r_{\text{hy},V} = \frac{A_V}{I_{U,V}} \quad \text{Formel 18}$$

Die Berechnung des vorlandbezogenen Strickler-Beiwertes $k_{\text{st},V}$ erfolgt durch die Wichtung nach Einstein (1934) und Horton (1933) unter alleiniger Berücksichtigung der Vorlandbereiche:

$$k_{\text{st},V} = \left[\frac{I_{U,V}}{\frac{I_{U,L}}{k_{\text{st},L}^{1,5}} + \frac{I_{U,R}}{k_{\text{st},R}^{1,5}}} \right]^{2/3} \quad \text{Formel 19}$$

Nicollet und Uan führten aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen einen Korrekturfaktor C_N ein. Diesen Korrekturfaktor ermittelten Sie mit Hilfe eines geometrischen Parameters P , welcher das Ausuferen ins Vorland charakterisiert. In Abhängigkeit vom Parameter P wird C_N wie folgt ermittelt:

$$P = \frac{I_{U,V}}{I_{U,H,0}} \quad \text{Formel 20}$$

$$C_{N,0} = 0,9 \cdot \left(\frac{k_{\text{st},H}}{k_{\text{st},V}} \right)^{-1/6} \quad \text{Formel 21}$$

$$C_N = \left\{ \begin{array}{l} C_{N,0} \rightarrow P > 1 \\ \frac{1}{2} \cdot [(1 - C_{N,0}) \cdot \cos(\pi \cdot P) + 1 + C_{N,0}] \rightarrow P \leq 1 \end{array} \right\} \quad \text{Formel 22}$$

Auf der folgenden Seite ist für die Anwendung ein Ablaufdiagramm dargestellt.

Gegliedertes Gerinne ohne Mittel- und Großbewuchs

Verfahren nach Nicollet & Uan (1979)

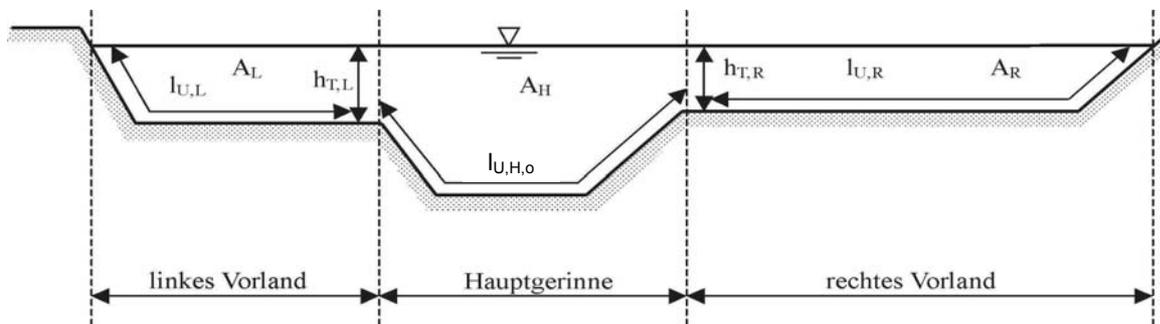
Notwendige Parameter: I_{s0} (-) mittleres SohlgefälleVorland links: A_L (m^2) durchflossene Querschnittsfläche $I_{U,L}$ (m) benetzter Umfang $k_{st,L}$ ($m^{1/3}/s$) Strickler-BeiwertHauptgerinne: A_H (m^2) durchflossene Querschnittsfläche $I_{U,H,0}$ (m) benetzter Umfang ohne die Trennflächen $k_{st,H}$ ($m^{1/3}/s$) Strickler-BeiwertVorland rechts: A_R (m^2) durchflossene Querschnittsfläche $I_{U,R}$ (m) benetzter Umfang $k_{st,R}$ ($m^{1/3}/s$) Strickler-Beiwert**Ermittlung des Korrekturfaktors C_N**

Vorwerte:

1) $k_{st,v}$ ▶ Formel 192) A_v ▶ Formel 163) $I_{U,v}$ ▶ Formel 174) $r_{hy,v}$ ▶ Formel 18

Geometrischer Parameter P:

5) P ▶ Formel 20

Korrekturfaktor $C_{N,0}$:6) $C_{N,0}$ ▶ Formel 217) C_N ▶ Formel 22**Berechnung des gesamten Abfluss:** Q_{ges} ▶ Formel 15

Verfahren nach Wormleaton und Merret (1990)

Wormleaton und Merret gehen von hydrostatisch und strömungsbedingt resultierenden Kräften aus, welche auf eine vertikale fiktive Trennfläche zwischen dem Vorland und dem Hauptgerinne wirken. Unter Normalabflussbedingungen müssen diese Kräfte in einem Gleichgewicht zueinander stehen. Aus diesem Gleichgewicht ergibt sich die strömungsbeeinflussende Interaktion in Form eines Impulsaustausches zwischen den Gerinneteilen.

Aus hydraulischen Untersuchungen an gegliederten Laborgerinnen leiten die Autoren sog. Interaktions-Indizes für das Hauptgerinne (ϕ_H) und die Vorländer (ϕ_V) ab, welche sich nach empirischen Gleichungen aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Hauptgerinne und dem Vorland sowie unter Einbeziehung geometrischer Parameter bestimmen lassen:

$$\phi_H = 1 - \frac{\tau_T \cdot (h_{T,L} + h_{T,R})}{\rho \cdot g \cdot A_H \cdot l_{S0}} \quad \text{Formel 23}$$

$$\phi_V = 1 + \frac{A_H}{A_V} \cdot (1 - \phi_H) \quad \text{Formel 24}$$

mit

$$A_V = A_L + A_R \quad \text{Formel 25}$$

$$l_{U,V} = l_{U,L} + l_{U,R} \quad \text{Formel 26}$$

$$r_{hy,V} = \frac{A_V}{l_{U,V}} \quad \text{Formel 27}$$

$$r_{hy,H} = \frac{A_H}{l_{U,H,0}} \quad \text{Formel 28}$$

Die Scheinschubspannung (τ_T) wird nach folgendem empirischen Ansatz ermittelt:

$$\tau_T = 3,325 \cdot \Delta v_m^{1,451} \cdot (h_{T,L} + h_{T,R})^{-0,354} \cdot (b_{wsp,L} + b_{wsp,R})^{0,519} \quad \text{Formel 29}$$

Die Differenz zwischen den mittleren Geschwindigkeiten in den Gerinneteilen (Δv_m) ermittelt man, indem zunächst der Mittelwert der Fließgeschwindigkeiten auf dem Vorland berechnet wird (z.B. mit der Fließformel nach Darcy-Weisbach) und dieser Wert dann von der Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne subtrahiert wird. Dabei sollte beachtet werden, dass die Trennflächenhöhen $h_{T,L}$ und $h_{T,R}$ nicht zum benetzten Umfang addiert werden.

$$\Delta v_m = v_{m,H} - 0,5 \cdot (v_{m,L} + v_{m,R}) \quad \text{Formel 30}$$

Fließgeschwindigkeit nach Darcy-Weisbach:

$$v_{m,i} = \left[2,5 \cdot \ln \left(\frac{r_{hy,i}}{k_{s,i}} \right) + 2,5 \cdot \ln(14,83 \cdot f_i) \right] \cdot \sqrt{g \cdot r_{hy,i} \cdot I_{So}} \quad \text{Formel 31}$$

mit:

$$h_i = \frac{A_i}{b_{wsp,i}} \quad \text{Formel 32}$$

$$f_i = \begin{cases} 0,74 \rightarrow \frac{b_{wsp,i}}{h_i} \geq 25 \\ 0,83 \rightarrow \frac{b_{wsp,i}}{h_i} < 25 \end{cases} \quad \text{Formel 33}$$

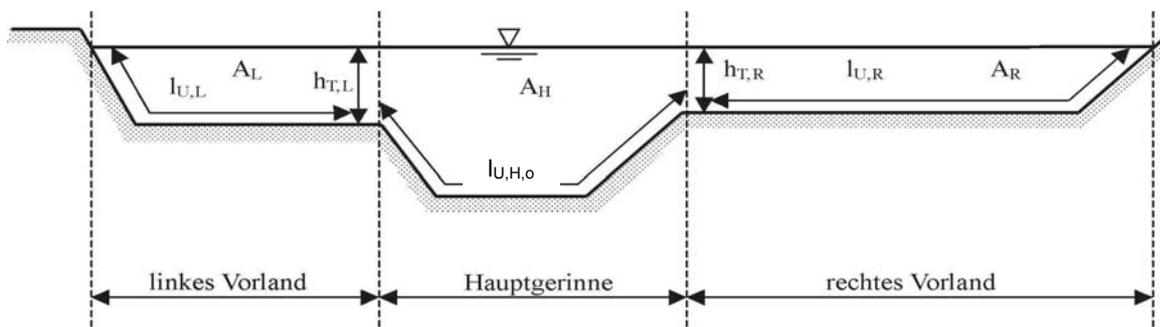
Die Berechnung des Gesamtabflusses erfolgt durch die Summation der Teilabflüsse. Dazu wird von den Autoren hier eine modifizierte Form der Gauckler-Manning-Strickler Fließformel angegeben:

$$Q_H = A_H \cdot k_{st,H} \cdot r_{hy,H}^{2/3} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot \sqrt{\phi_H} \quad \text{Formel 34}$$

$$Q_v = A_v \cdot k_{st,v} \cdot r_{hy,v}^{2/3} \cdot \sqrt{I_{So}} \cdot \sqrt{\phi_v} \quad \text{Formel 35}$$

mit:

$$k_{st,v} = \left[\frac{I_{U,v}}{\frac{I_{U,L}^{1,5}}{k_{st,L}^{1,5}} + \frac{I_{U,R}^{1,5}}{k_{st,R}^{1,5}}} \right]^{2/3} \quad \text{Formel 36}$$



Auf der folgenden Seite ist für die Anwendung ein Ablaufdiagramm dargestellt.

Gegliedertes Gerinne ohne Mittel- und Großbewuchs

Verfahren nach Wormleaton & Merret (1990)

Notwendige Parameter:

I_{so} (-) mittleres Sohlgefälle

Vorland links:

A_L (m^2) durchflossene Querschnittsfläche

$I_{U,L}$ (m) benetzter Umfang

$k_{s,L}$ (m) Äquivalente Sandrauheit

$b_{wsp,L}$ (m) Wasserspiegelbreite über dem Vorland

Hauptgerinne:

A_H (m^2) durchflossene Querschnittsfläche

$I_{U,H,o}$ (m) benetzter Umfang ohne die Trennflächen

$k_{s,H}$ (m) Äquivalente Sandrauheit

$b_{wsp,H}$ (m) Wasserspiegelbreite über dem Hauptgerinne

Vorland rechts:

A_R (m^2) durchflossene Querschnittsfläche

$I_{U,R}$ (m) benetzter Umfang

$k_{s,R}$ (m) Äquivalente Sandrauheit

$b_{wsp,R}$ (m) Wasserspiegelbreite über dem Vorland

Bestimmung der hydraulischen Radien:

1) $I_{U,v}$ ▶ Formel 26

2) A_v ▶ Formel 25

3) $r_{hy,v}$ ▶ Formel 27

4) $r_{hy,H}$ ▶ Formel 28

Bestimmung der Scheinschubspannung τ_T :

Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne:

1) h_H ▶ Formel 32

2) f_H ▶ Formel 33

3) $v_{m,H}$ ▶ Formel 31

Fließgeschwindigkeit über dem Vorland:

linkes Vorland
4) h_L ▶ Formel 32

5) f_L ▶ Formel 33

6) $v_{m,L}$ ▶ Formel 31

rechtes Vorland

h_R ▶ Formel 32

f_R ▶ Formel 33

$v_{m,R}$ ▶ Formel 31

Differenz der Geschwindigkeiten:

7) Δv_m ▶ Formel 30

Scheinschubspannung:

8) τ_T ▶ Formel 29

Bestimmung der Interaktions-Indizes:

1) ϕ_H ▶ Formel 23

2) ϕ_v ▶ Formel 24

Abflussberechnung:

1) Q_H ▶ Formel 34

2) $k_{st,v}$ ▶ Formel 36

3) Q_v ▶ Formel 35

4) $Q_{ges} = Q_H + Q_v$

Anlage 3: Verfahrensanwendung für vegetationsfreie Querschnitte

Am unteren Ende der Landespilotmessstrecke Pforzheim/Enz, die bereits im Jahr 1990 naturnah umgestaltet wurde und seitdem durch ein Monitoring von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg beobachtet wird, befindet sich der ehemalige Landespegel „Pforzheim-Kläranlage / Enz“. Dieser Pegel wurde im Rahmen des Monitoring zur Erfassung von Wasserstands-Abfluss-Beziehungen eingesetzt.

Um eine Veränderung der Abflusskurve am Pegel infolge eigendynamischer Entwicklungen der Gewässermorphologie und der Vegetation zu verhindern, wurden im Rahmen eines Gutachtens von Bernhart und Becker (1989) Empfehlungen bezüglich der Gewässerunterhaltung im Bereich der Pegelanlage gemacht:

„Bisher [Anm.: Zustand vor der Renaturierung] kann von einer parallelen Zuströmung und somit von einem zur Flussachse symmetrischen Geschwindigkeitsprofil ausgegangen werden. Um dies auch weiterhin zu gewährleisten, wird das derzeitige Profil im Pegelbereich beibehalten. [...] Die Länge der unverändert bleibenden Gewässerstrecke ergibt sich aus den Ergebnissen der Modellversuche: Die Umgestaltung endet oberhalb des Pegels bei km 56+600, der Pegel befindet sich bei km 56+530.“ (Bernhart und Becker, 1989, Seite 27).

Eine gleiche Aussage wurde im Rahmen des Gutachtens auch für den Bereich unterhalb der Pegelanlage getroffen (vgl. Bernhart und Becker, 1989, Seite 28 f). Eine Auswertung der im Lauf der Jahre durchgeführten Querschnittsvermessungen hat ergeben, dass sich infolge der vorhandenen Uferbefestigungen im Bereich des Pegel keine morphologischen Veränderungen ergeben haben (vgl. **Abb. A - 2**).

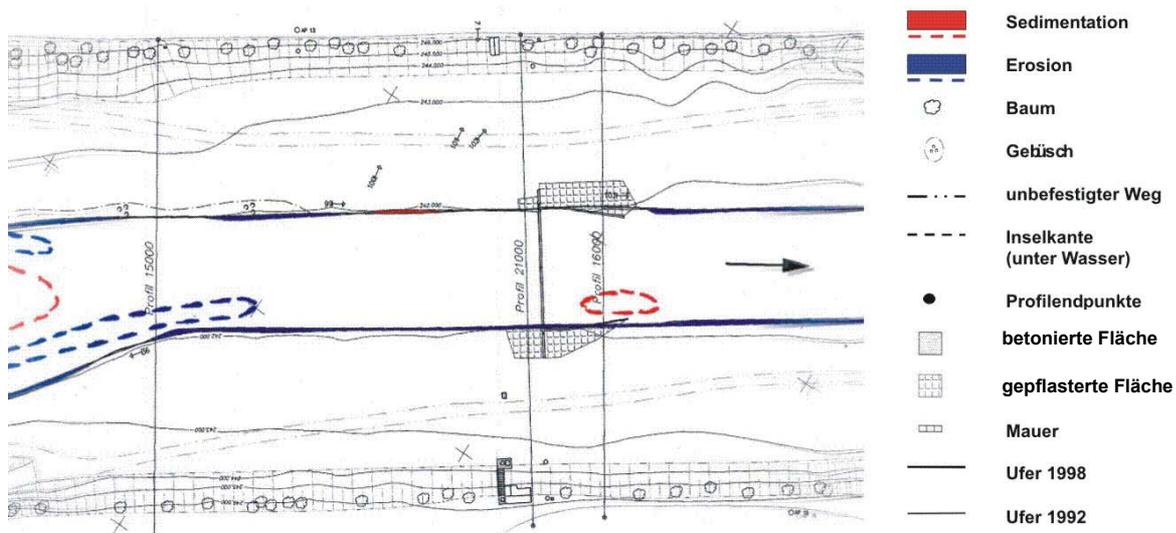
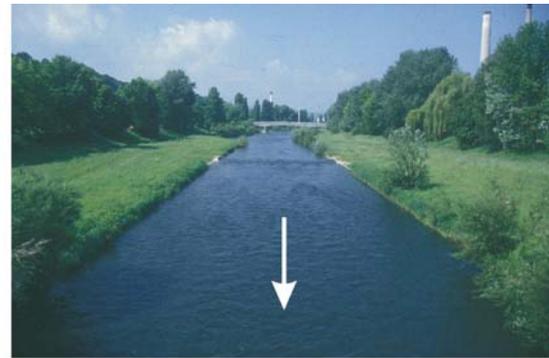


Abb. A - 2: Dokumentation der morphologischen Veränderungen im Bereich der Pegelanlage Pforzheim-Kläranlage/Enz. (Lehmann und Schneider)

Der Vergleich aufgenommener Fotos dokumentiert jedoch, dass sich der Bewuchs im Verlauf der letzten 12 Jahre ausgedehnt hat (vgl. **Abb. A - 3**), woraus sich sicherlich Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse im Pegelbereich ergeben haben. Aufgrund fehlender Informationen kann diese Auswirkung jedoch nicht quantifiziert werden. Die Abflusskurve am Pegel wird daher als Referenz angenommen.



09.02.1992



25.05.1995



17.09.1997



01.07.1999



04.08.2003



04.04.2004

Abb. A - 3: Entwicklung des Vorlandbewuchs im Bereich der Pegelanlage Pforzheim/Enz. (Lehmann)

Ohne die Auswirkungen der Bewuchsentwicklung auf die Wasserstandsmessungen am Pegel weiter zu berücksichtigen, soll durch Anwendung der in Anlage 2 erläuterten Verfahren und Vergleich der Ergebnisse mit realen Durchflussmessungen am

Pegel eine Verfahrensanwendung und Bewertung der Ergebnisqualität dokumentiert werden. Es wird daher im Folgenden davon ausgegangen, dass das Abflussgeschehen im Bereich des Pegels nur durch Oberflächenrauheiten und die Querschnittsform bestimmt wird.

Folgende Eingangsdaten wurden für die Verfahren verwendet:

- Geometrische Daten zur Modellierung des charakteristischen Querschnittes;
- Wasserspiegellage, für die der Durchfluss mit den Verfahren berechnet und anschließend mit dem Ergebnis der realen Durchflussmessung verglichen werden soll;
- Äquivalente Sandrauheit für das Hauptgerinne, abgeleitet aus der Kornverteilungskurve des Sohlenmaterials. Zusätzlich fand unter Verwendung von Fließgeschwindigkeitsmessungen eine Kalibrierung statt;
- Äquivalente Sandrauheit für die grasbewachsenen Vorländer, abgeleitet aus den Empfehlungen der Fachliteratur;
- Aus Fließgeschwindigkeitsmessungen kalibrierte und für den Hochwasserabflussbereich extrapolierte empirische Strickler-Beiwerte für das Hauptgerinne (vgl. **Abb. A - 4**);
- Geschätzte empirische Strickler-Beiwerte für die Vorlandbereiche.

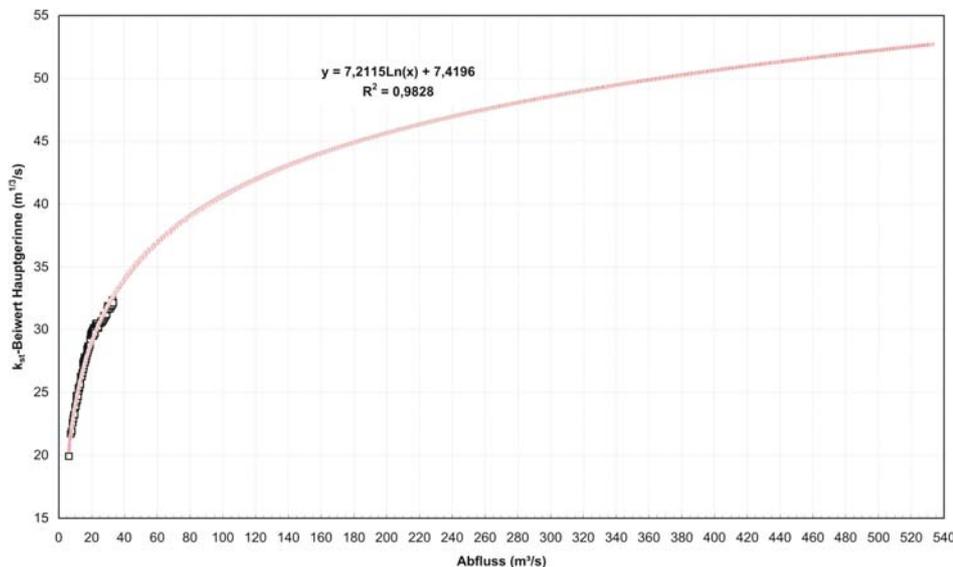


Abb. A - 4: Extrapolation der empirischen Strickler-Beiwerte für das Hauptgerinne anhand kalibrierter Werte aus dem mittleren Abflussbereich. (Lehmann)

Auf den folgende Seiten sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt sowie die Abweichungen zu den Naturmessdaten dokumentiert. Hieraus wird eine gute Ergebnisqualität ersichtlich, so dass bei Strömungssituationen, die nur durch Oberflächenrauheiten beeinflusst werden, eine zuverlässige Anwendbarkeit gegeben ist.

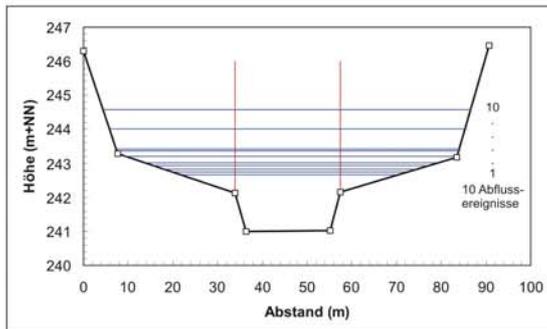
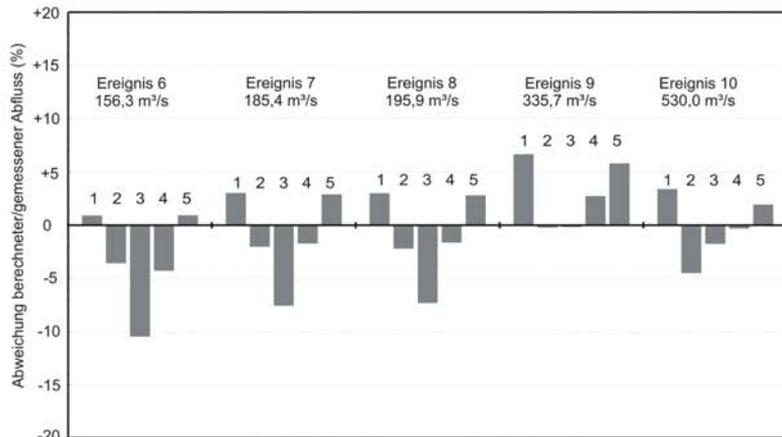
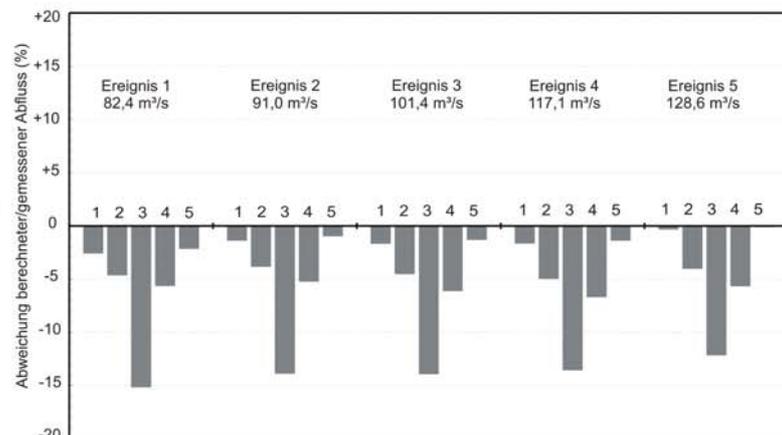
Landespegel Pforzheim / Enz (Enz-km 56+539)

Prozentuale Abweichungen zwischen 10 berechneten und gemessenen Abflusswerten als Funktion der relativen Wassertiefe auf dem Vorland h_V und dem Hauptgerinne h_H nach den fünf unterschiedlichen Berechnungsansätzen aus Anlage 2.

Ereignis Nr.	Datum, Abfluss (MM.JJJJ) ; (m³/s)	Relative Überflutungshöhe h_V/h_H (-)	Abweichung gemessene/berechnete Abflüsse				
			Posey 1957	Sellin 1964	Wright & Carstens 1970	Nicollet & Uan 1979	Wormleaton & Merret 1990
1	12.1995 ; 82,4	0,16	-2,61	-4,66	-15,18	-5,65	-2,18
2	03.1992 ; 91,0	0,17	-1,40	-3,87	-13,91	-5,24	-0,99
3	03.2000 ; 101,4	0,19	-1,70	-4,54	-13,95	-6,14	-1,34
4	07.1996 ; 117,1	0,21	-1,67	-5,00	-13,59	-6,71	-1,40
5	12.1999 ; 128,6	0,22	-0,35	-4,05	-12,17	-5,67	-0,13
6	01.2000 ; 156,3	0,24	0,90	-3,59	-10,49	-4,30	0,92
7	12.1999 ; 185,4	0,29	3,02	-2,03	-7,57	-1,75	2,88
8	07.1996 ; 195,9	0,30	3,00	-2,21	-7,32	-1,66	2,80
9	10.1998 ; 335,7	0,44	6,67	-0,24	-0,19	2,71	5,79
10	12.1993 ; 530,0	0,80	3,39	-4,53	-1,76	-0,34	1,92

Legende zu den angewandten Verfahren

- 1 = Verfahren nach Possey (1957)
- 2 = Verfahren nach Sellin (1964)
- 3 = Verfahren nach Wright & Carstens (1970)
- 4 = Verfahren nach Nicollet & Uan (1979)
- 5 = Verfahren nach Wormleaton & Merret (1990)



Enz, Ortslage Pforzheim

Landespegel (Enz-km 56+539)

Vergleich gängiger Berechnungsverfahren


Universität Karlsruhe
Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik

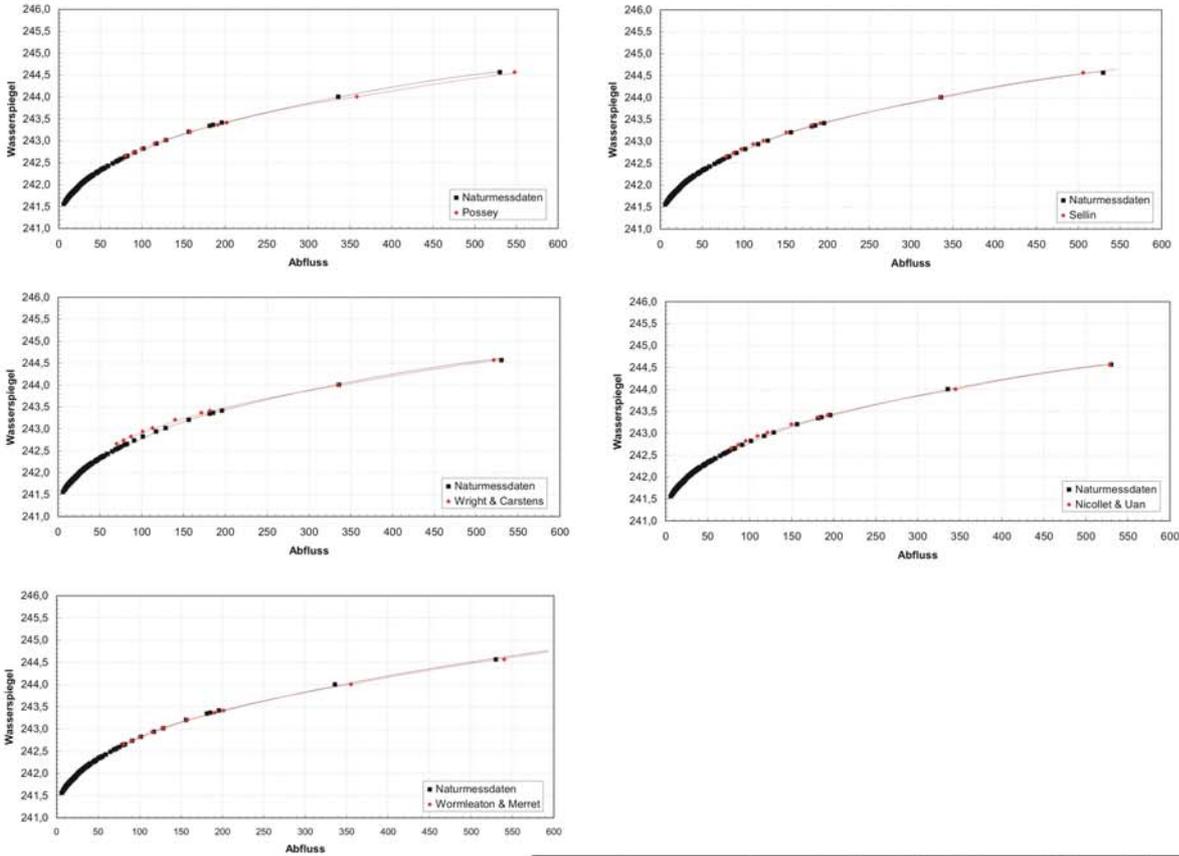
Stand: Herbst 2004

Bearbeitung: Dipl.-Ing. B. Lehmann

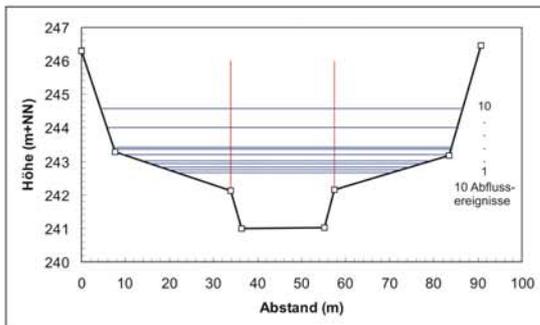

Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg

Landespegel Pforzheim / Enz (Enz-km 56+539)

Vergleich der Abflusskurven aus den Naturmessdaten und den berechneten Wasserspiegel-Abfluss-Beziehungen für die 10 größten Hochwasserereignisse zwischen 1992 und 2000.



Ereignis Nr.	Datum, Abfluss (MM.JJJJ) ; (m³/s)	Abweichung $\Delta WSP = WSP_{\text{Berechnet}} - WSP_{\text{Gemessen}}$ (m)				
		Possey 1957	Sellin 1964	Wright & Carstens 1970	Nicollet & Uan 1979	Wormleaton & Merret 1990
1	12.1995 ; 82,4	+0,05	+0,05	+0,16	+0,05	+0,02
2	03.1992 ; 91,0	+0,05	+0,05	+0,15	+0,05	+0,00
3	03.2000 ; 101,4	+0,04	+0,05	+0,13	+0,06	+0,01
4	07.1996 ; 117,1	+0,02	+0,05	+0,10	+0,06	+0,01
5	12.1999 ; 128,6	+0,01	+0,05	+0,09	+0,05	+0,00
6	01.2000 ; 156,3	+0,00	+0,02	+0,06	+0,04	+0,00
7	12.1999 ; 185,4	+0,00	+0,00	+0,05	+0,02	-0,02
8	07.1996 ; 195,9	+0,00	+0,00	+0,05	+0,02	-0,03
9	10.1998 ; 335,7	-0,05	+0,01	-0,01	-0,03	-0,04
10	12.1993 ; 530,0	-0,04	+0,05	-0,03	+0,00	-0,02
Mittelwert der Abweichung (m)		+0,01	+0,03	+0,08	+0,03	-0,01



Enz, Ortslage Pforzheim

Landespegel (Enz-km 56+539)

Vergleich der Abflusskurven


Universität Karlsruhe
Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik

Stand: Herbst 2004

Bearbeitung: Dipl.-Ing. B. Lehmann


Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg

Anlage 4: Interaktives Excel-VBA¹-Programm

Aufbau und Bedienung des Programms

Das Programm stellt eine EDV-technische Umsetzung der Methodik aus Kapitel 4 dar. Als Plattform dient das Kalkulationsprogramm Microsoft Excel in der Version 2000 oder höher. Unter der Excel-Oberfläche stehen dem Anwender Ein- und Ausgabetableaus zur Verfügung. Die eigentlichen Berechnungen werden durch Unter-routinen durchgeführt.

Das Programmsystem umfasst insgesamt drei Berechnungsmatrizen, welche in der Ansicht als Registerkarten angezeigt werden (vgl. **Abb. A - 5**):

- Berechnung bei einer vegetationsbestandenen Sektion,
- Berechnung bei einer vegetationsfreien Sektion, die beidseitig von vegetationsbestandenen Sektionen eingegrenzt wird,
- Berechnung bei einer vegetationsfreien Sektion, die einseitig an eine vegetationsbestandene Sektion anschließt.

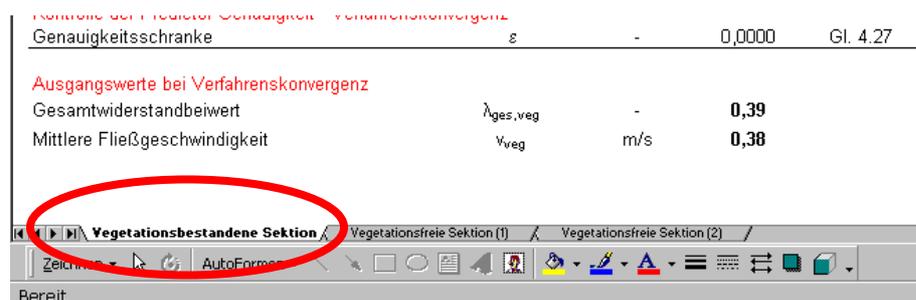


Abb. A - 5: Registerkarten zur Auswahl der Berechnungsmatrix. (Lehmann)

Jede Matrix ist nach dem selben Schema aufgebaut: Alle gelb hinterlegten Felder benötigen eine Werteingabe durch den Benutzer (vgl. **Abb. A - 6**). Nach Eingabe aller benötigten Daten wird die Berechnung durch Klick auf den [Start]-Knopf gestartet. Der Anwender kann die Anzahl der Berechnungsläufe direkt im oberen Teil der Matrix ablesen (vgl. **Abb. A - 7**).

Bei Konvergenz von Predictor und Korrektur ist die Berechnung beendet und das Programm schreibt die Zwischen- und Endergebnisse in die Matrix (vgl. **Abb. A - 8**). Zudem kann der Anwender in der Kommentarspalte direkt entnehmen, nach welcher Gleichung das jeweilige Zwischenergebnis berechnet wurde (vgl. **Abb. A - 9**). Am unteren Matrixrand sind die zur Durchflussrechnung benötigten Übergabewerte dargestellt (vgl. **Abb. A - 10**).

¹ VBA = Visual Basic for Applications von der Firma Microsoft.

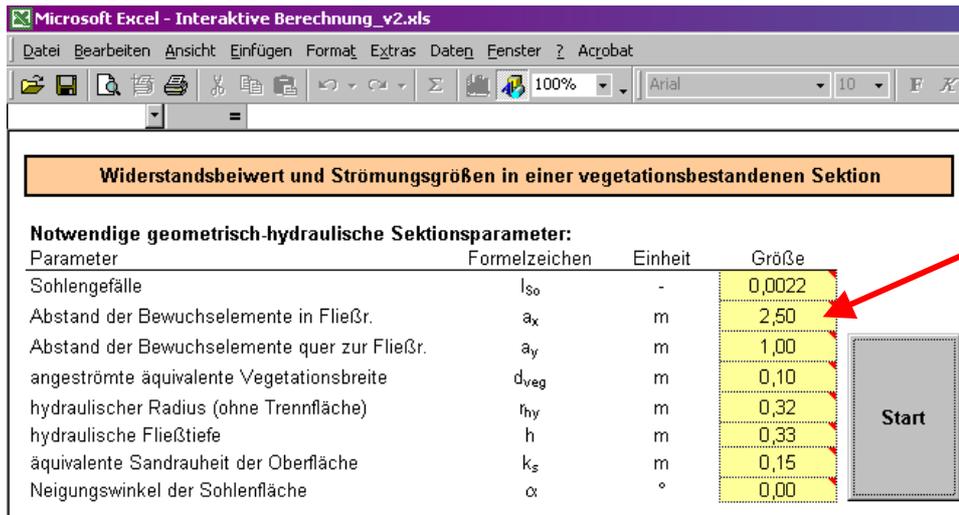


Abb. A - 6: Kennzeichnung von Eingabefeldern. (Lehmann)

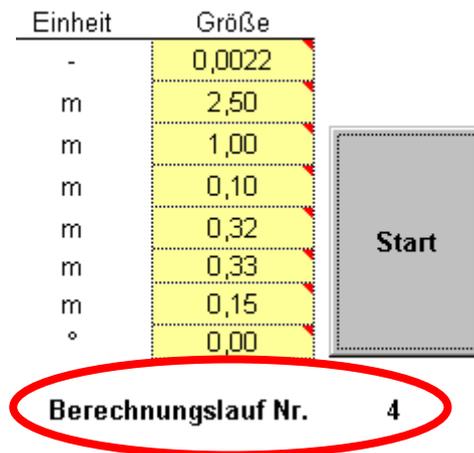


Abb. A - 7: Start-Knopf und Anzahl der Berechnungsläufe. (Lehmann)

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Größe	Gleichung
Predictor-Wert	c_{WR}	-	1,6952	
Gesamtwiderstandsbeiwert des Vegetationsbereiches				
Formbeiwert für die Gerinneform	E_r	-	3,25	Gl. 4.14
Widerstandsbeiwert infolge Oberflächenrauheit	λ_D	-	0,30	Gl. 4.14
Widerstandsbeiwert der durchströmten Vegetation	$\lambda_{veg,D}$	-	0,09	Gl. 4.16
Gesamtwiderstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}$	-	0,39	Gl. 4.15
Mittlere Fließgeschwindigkeit im Vegetationsbereich				
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v_{veg}	m/s	0,38	Gl. 4.17
Korrektur des Predictor-Wertes				
Vegetationsbezogene Reynoldszahl	Re_{veg}	-	37551,32	Gl. 4.20
Formwiderstandsbeiwert Einzelelement	c_{Woo}	-	1,20	Gl. 4.21
Hilfswert Gl. 4.18 linke Seite zur Zielwertsuche muss 0,03 ergeben...			0,0300	
Nachlauflänge	a_{NL}	m	3,09	Gl. 4.18
Nachlaufbreite	a_{NB}	m	0,18	Gl. 4.19
Relative Anströmgeschwindigkeit	v_{rel}	m/s	1,11	Gl. 4.22
Froudezahl	Fr^2	-	0,0436	Gl. 4.24
Hilfswert Gl. 4.25 linke Seite zur Zielwertsuche muss etwa Fr^2 -Wert ergeben...			0,0436	
Relative Fließtiefe vor/hinter einem Element	y^*	-	0,9949	Gl. 4.25
Formwiderstandsbeiwert infolge Schwerewellen	Δc_{Ww}	-	0,23	Gl. 4.23
Korrigierter c_{WR} -Wert	c_{WR}'	-	1,6952	Gl. 4.26
Kontrolle der Predictor-Genauigkeit - Verfahrenskonvergenz				
Genauigkeitsschranke	ε	-	0,0000	Gl. 4.27

Abb. A - 8: Darstellung der Zwischenergebnisse bei Verfahrenskonvergenz. (Lehmann)

Größe	Gleichung
1,6952	←
2,20	
3,25	Gl. 4.14
0,30	Gl. 4.14
0,09	Gl. 4.16
0,39	Gl. 4.15

Abb. A - 9: Kommentarspalte mit Verweis auf die angewandte Gleichungen. (Lehmann)

Ausgangswerte bei Verfahrenskonvergenz

Gesamtwiderstandbeiwert	$\lambda_{ges,veg}$	-	0,39
Mittlere Fließgeschwindigkeit	v_{veg}	m/s	0,38

Abb. A - 10: Endergebnis der Berechnung. (Lehmann)

Nach Beendigung der Berechnung kann der Anwender einen Komplettausdruck durchführen. Auf einem DIN A-4 Blatt werden dann die jeweiligen Berechnungsergebnisse für jede Sektion übersichtlich dargestellt (vgl. **Abb. A - 11**).

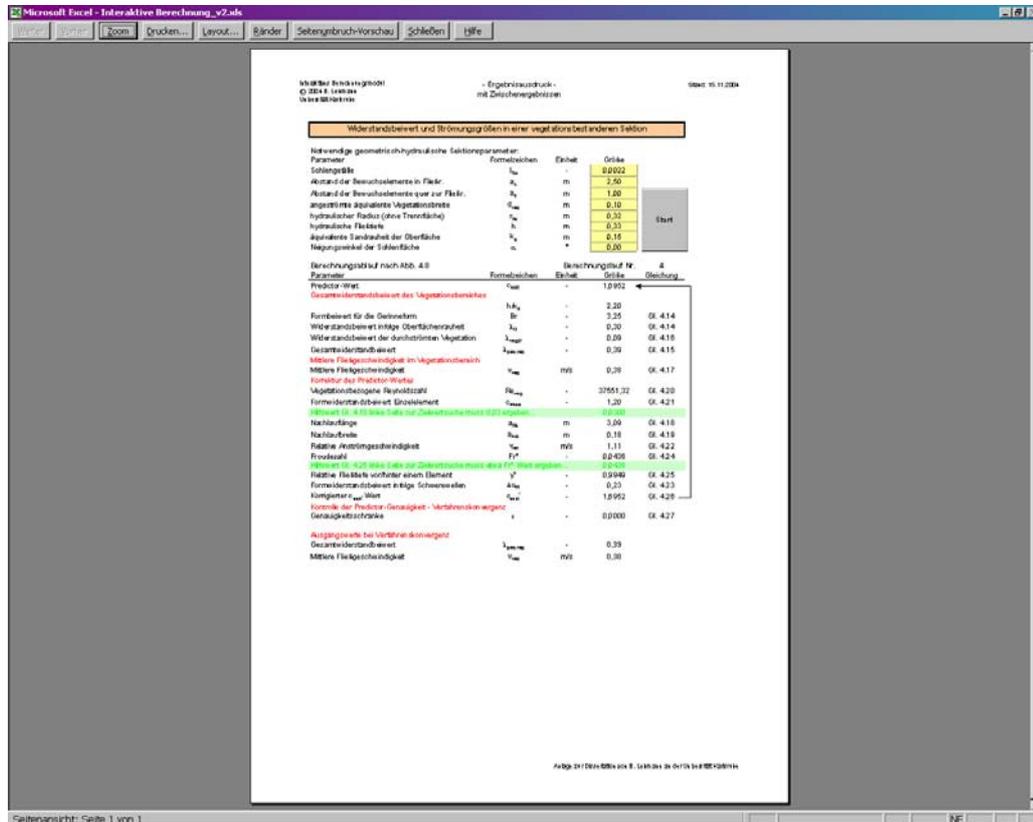


Abb. A - 11: Ergebnisausdruck. (Lehmann)

Programmlisting (Auszug)

```
'BERECHNUNG DER WIDERSTANDS- UND STRÖMUNGSPARAMETRE BEI EINER VEGETATIONSBESTANDENEN
'SEKTION (c) 2004: Dipl.-Ing. Boris Lehmann

'Eingangswerte
cwrpre = 1
iso = Cells(6, 5).Value
ax = Cells(7, 5).Value
ay = Cells(8, 5).Value
dveg = Cells(9, 5).Value
rhy = Cells(10, 5).Value
h = Cells(11, 5).Value
ks = Cells(12, 5).Value
alpha = Cells(13, 5).Value

For zaehler = 1 To 1000 Step 1
Cells(15, 6) = zaehler
Cells(17, 5) = cwrpre

'Berechnung von Lambda Sohle
10 Br = 6.25
If h / ks < 20 Then Br = 0.1875 * (h / ks) + 3.25
If h / ks <= 4 Then Br = 3.25
Lo = 8 * (2.5 * Log(rhy / ks) / Log(2.718282) + Br) ^ (-2)
Cells(19, 5) = Br
Cells(20, 5) = Lo

'Berechnung von Lveg
Lveg = 4 * cwrpre * h * dveg / (ax * ay) * Cos(alpha)
Cells(22, 5) = Lveg

'Berechnung von Lges
Lges = Lo + Lveg
Cells(23, 5) = Lges

'Berechnung von vveg
vveg = (8 * 9.81 * rhy * iso / Lges) ^ 0.5
Cells(25, 5) = vveg

'Korrektur des Predictor-Wertes
'Berechnung von cwoo
Reveg = vveg * dveg / 10 ^ (-6)
cwoo = 1.2
If Reveg < 10 ^ 5 Then cwoo = 1
If Reveg < 800 Then cwoo = 3.07 * Reveg ^ (-0.168)
'Iterative Berechnung von aNL und aNB
For aNL = 0.01 To 100 Step 0.001
wert = 0.9 * (aNL / (cwoo * dveg)) ^ (-0.7) * (1 + 9.81 * aNL * iso / (0.5 * vveg ^
2)) ^ (-3 / 2)
'Cells(29, 5) = wert
'Cells(30, 5) = aNL
If wert <= 0.03 Then GoTo 1000
Next aNL
1000 aNB = 0.24 * aNL ^ 0.59 * (cwoo * dveg) ^ 0.41
Cells(29, 5) = wert
Cells(30, 5) = aNL
Cells(31, 5) = aNB
'relative Anströmgeschwindigkeit
vrel = 1.15 * (aNL / ax) ^ (-0.48) + 0.5 * (aNB / ay) ^ 1.1
Cells(32, 5) = vrel
'relative Fließtiefe vor und hinter einem Element
Fr = vveg / (9.81 * h) ^ 0.5
Fr2 = Fr ^ 2
Cells(33, 5) = Fr2
For y = 1 To 0.001 Step -0.00001
wert2 = y * (y ^ 2 - 1) / (2 * (y - ay / (ay - dveg)))
'Cells(34, 5) = wert2
```

Fortsetzung nächste Seite...

```
        'Cells(35, 5) = y
        If wert2 > Fr2 Then GoTo 2000
    Next y
2000    Cells(34, 5) = wert2
        Cells(35, 5) = y
        'Formwiderstandsbeiwert infolge Schwerewellen
        dcw = 2 / Fr2 * (1 - y)
        Cells(36, 5) = dcw
        'Korrektor-Wert
        cwrkor = 1.31 * vrel + dcw
        Cells(37, 5) = cwrkor

    'Genauigkeitsschranke
    epsilon = Abs(1 - cwrpre / cwrkor)
    Cells(39, 5) = epsilon
    cwrpre = cwrkor
    If epsilon < 0.0001 Then GoTo 3000
    Next zaehler

3000    Cells(42, 5) = Lges
        Cells(43, 5) = vveg

End Sub
```

```

Private Sub CommandButton1_Click()

'BERECHNUNG DER WIDERSTANDS- UND STRÖMUNGSPARAMTER BEI EINER VEGETATIONSFREIEN
'SEKTION (mit zwei benachbarten Sektionen)
'(c) 2004 Dipl.-Ing. B. Lehmann

'Einlesen der Daten
iso = Cells(7, 5).Value
'Sektion linksseitig
axl = Cells(9, 5).Value
ayl = Cells(10, 5).Value
dvegl = Cells(11, 5).Value
vvegl = Cells(12, 5).Value
hl = Cells(13, 5).Value
Lgesvegl = Cells(14, 5).Value
bsol = Cells(15, 5).Value
'Sektion rechtsseitig
axr = Cells(9, 6).Value
ayr = Cells(10, 6).Value
dvegr = Cells(11, 6).Value
vvegr = Cells(12, 6).Value
hr = Cells(13, 6).Value
Lgesvegr = Cells(14, 6).Value
bsor = Cells(15, 6).Value
'vegetationsfreie Sektion
luo = Cells(17, 5).Value
rhyo = Cells(18, 5).Value
hTl = Cells(19, 5).Value
hTr = Cells(19, 6).Value
lut = Cells(20, 5).Value
rhyt = Cells(21, 5).Value
h = Cells(22, 5).Value
bwsp = Cells(23, 5).Value
ks = Cells(24, 5).Value

'Predictor-Werte
vTl = 1.5 * vvegl
vTr = 1.5 * vvegr

For zaehler = 1 To 1000 Step 2
Cells(26, 7) = zaehler
Cells(31, 5) = vTl
Cells(31, 6) = vTr
b3l = -0.06 * (bwsp / 2) ^ 2 / hl + 1.14 * bwsp / 2
If (bwsp / hl) <= 25 Then b3l = bwsp / 2
Cells(32, 5) = bwsp / hl
Cells(33, 5) = b3l
b3r = -0.06 * (bwsp / 2) ^ 2 / hr + 1.14 * bwsp / 2
If (bwsp / hr) <= 25 Then b3r = bwsp / 2
Cells(32, 6) = bwsp / hr
Cells(33, 6) = b3r

'Bewuchsparameter Omega
ReTl = vTl * dvegl / (10 ^ (-6))
Cells(35, 5) = ReTl
ReTr = vTr * dvegr / (10 ^ (-6))
Cells(35, 6) = ReTr
cwool = 1.2
If ReTl < 8000 Then cwool = 1
If ReTl < 800 Then cwool = 3.07 * ReTl ^ (-0.168)
Cells(36, 5) = cwool
cwoor = 1.2
If ReTr < 8000 Then cwoor = 1
If ReTr < 800 Then cwoor = 3.07 * ReTr ^ (-0.168)
Cells(36, 6) = cwoor

For aNll = 0.001 To 100 Step 0.001

```

Fortsetzung nächste Seite...

```

wertl = 0.9 * (aNl1 / (cwool * dvegl)) ^ (-0.7) * (1 + 9.81 * aNl1 * iso / (0.5 * vT
l ^ 2)) ^ (-3 / 2)
If wertl <= 0.03 Then GoTo 1000
Next aNl1
1000 Cells(37, 5) = wertl
Cells(38, 5) = aNl1
For aNlR = 0.001 To 100 Step 0.001
wertR = 0.9 * (aNlR / (cwoor * dvegr)) ^ (-0.7) * (1 + 9.81 * aNlR * iso / (0.5 * vT
r ^ 2)) ^ (-3 / 2)
If wertR <= 0.03 Then GoTo 2000
Next aNlR
2000 Cells(37, 6) = wertR
Cells(38, 6) = aNlR
aNb1 = 0.24 * aNl1 ^ 0.59 * (cwool * dvegl) ^ 0.41
Cells(39, 5) = aNb1
aNbR = 0.24 * aNlR ^ 0.59 * (cwoor * dvegr) ^ 0.41
Cells(39, 6) = aNbR

omegal = (0.07 * aNl1 / axl) ^ 3.3 + (aNb1 / ayl) ^ 0.95
Cells(40, 5) = omegal
omegar = (0.07 * aNlR / axr) ^ 3.3 + (aNbR / ayr) ^ 0.95
Cells(40, 6) = omegar

'slip-velocity Beiwert
cT1 = (-3.27) * (Log(omegal) / (Log(10))) + 2.85
Cells(41, 5) = cT1
cTr = -3.27 * Log(omegar) / Log(10) + 2.85
Cells(41, 6) = cTr

'Widerstandsbeiwert an der Trennfläche infolge Interaktion
cl = Cells(43, 5).Value
cr = Cells(43, 6).Value

b2l = cl * hT1 / (Lgesvegl * (0.068 * 2.718281 ^ (0.56 * cT1) - 0.056))
If b2l > bsol Then b2l = bsol
Cells(44, 5) = b2l
b2r = cr * hTr / (Lgesvegr * (0.068 * 2.718281 ^ (0.56 * cTr) - 0.056))
If b2r > bsor Then b2r = bsor
Cells(44, 6) = b2r

LT1 = 1 / (-2 * Log(0.07 * (b2l / b3l) ^ 1.07 * omegal) / Log(10)) ^ 2
Cells(45, 5) = LT1
LTr = 1 / (-2 * Log(0.07 * (b2r / b3r) ^ 1.07 * omegar) / Log(10)) ^ 2
Cells(45, 6) = LTr

'Widerstandsbeiwert der vegetationsfreien Sektion
Cells(47, 5) = h / ks
Br = 6.25
If h / ks < 20 Then Br = 0.1875 * (h / ks) + 3.25
If h / ks <= 4 Then Br = 3.25
Cells(48, 5) = Br

rhypre = rhyo

For i = 1 To 1000 Step 1
Cells(49, 5) = rhypre
Lo = 8 * (2.5 * Log(rhypre / ks) / Log(2.71828) + Br) ^ (-2)
Cells(50, 5) = Lo
Lges = (Lo * luo + LT1 * hT1 + LTr * hTr) / lut
Cells(51, 5) = Lges
vges = (8 * 9.81 * rhyt * iso / Lges) ^ 0.5
Cells(52, 5) = vges
rhykor = Lo / Lges * rhyo
Cells(53, 5) = rhykor
Schranke = Abs(1 - rhykor / rhypre)
If Schranke < 0.001 Then GoTo 3000
rhypre = rhykor
Next i

3000 Debug.Print i, rhypre, rhykor, Schranke

```

Fortsetzung nächste Seite...

```
'Korrektur des Prediktor-Wertes
vTschubl = (LTl / 8) ^ 0.5 * vges
Cells(56, 5) = vTschubl
vTschubr = (LTr / 8) ^ 0.5 * vges
Cells(56, 6) = vTschubr

vTkorl = cTl * vTschubl
Cells(57, 5) = vTkorl
vTkorr = cTr * vTschubr
Cells(57, 6) = vTkorr

'Genauigkeitsschranke
epsilon1 = Abs(1 - vTl / vTkorl)
Cells(59, 5) = epsilon1
epsilonR = Abs(1 - vTr / vTkorr)
Cells(59, 6) = epsilonR

        If epsilon1 < 0.01 Then GoTo 4000
vTl = vTkorl
4000        If epsilonR < 0.01 Then GoTo 5000
vTr = vTkorr
5000        If epsilon1 < 0.01 And epsilonR < 0.01 Then GoTo 6000
Next zaehler

6000    Cells(62, 5) = Lges
        Cells(63, 5) = vges

End Sub
```

Anlage 5: Dokumentation der Modellversuche

Neben den Modellläufen zur Kalibrierung wurden insgesamt 11 Versuchsserien durchgeführt. Jede Versuchsserie ist jeweils durch eine in der Praxis typischen Vegetationsanordnung gekennzeichnet (vgl. **Tab. A - 2**).

Tab. A - 2: Zusammenstellung der Vegetationsanordnungen der einzelnen Versuchsserien.

Nr.	Vegetationsart	Vegetationsanordnung	Parameter $a_x = K \cdot a_y$
1	Bewuchskollektiv	Gruppiert auf dem Vorland	-
2	überströmte Hochstaudenfluren	einreihig, parallel zur Fließrichtung	-
3	Auf den Stock gesetzter Mittelbewuchs	zweireihig, parallel zur Fließrichtung	$a_x = 0,20 \cdot a_y$
4	Durchströmter Mittelbewuchs ohne Blattwuchs	einreihig, parallel zur Fließrichtung	-
5		zweireihig, parallel zur Fließrichtung	$a_x = 0,06 \cdot a_y$
6	Durchströmter Mittelbewuchs mit Blattwuchs	zweireihig, parallel zur Fließrichtung	$a_x = 0,06 \cdot a_y$
7			$a_x = 0,20 \cdot a_y$
8			$a_x = 0,67 \cdot a_y$
9	Durchströmter Mittelbewuchs mit Blattwuchs	mehreihig, diagonal zur Fließrichtung	$a_x = 3,50 \cdot a_y$
10			$a_x = 1,17 \cdot a_y$
11			$a_x = 2,33 \cdot a_y$

Auf den folgenden Seiten werden die qualitativen Versuchsergebnisse fotografisch dokumentiert und erläutert. Hierzu wird zunächst die Vegetationsanordnung skizziert und die im Modell beobachtete Sedimentation im Vegetationsbereich durch eine Panoramadraufsicht dokumentiert. Im Anschluss daran werden die Beobachtungen phänomenologisch beschrieben und ggf. durch weiteres Bildmaterial ergänzt.

Serie 1: Bewuchskollektiv auf dem Vorland

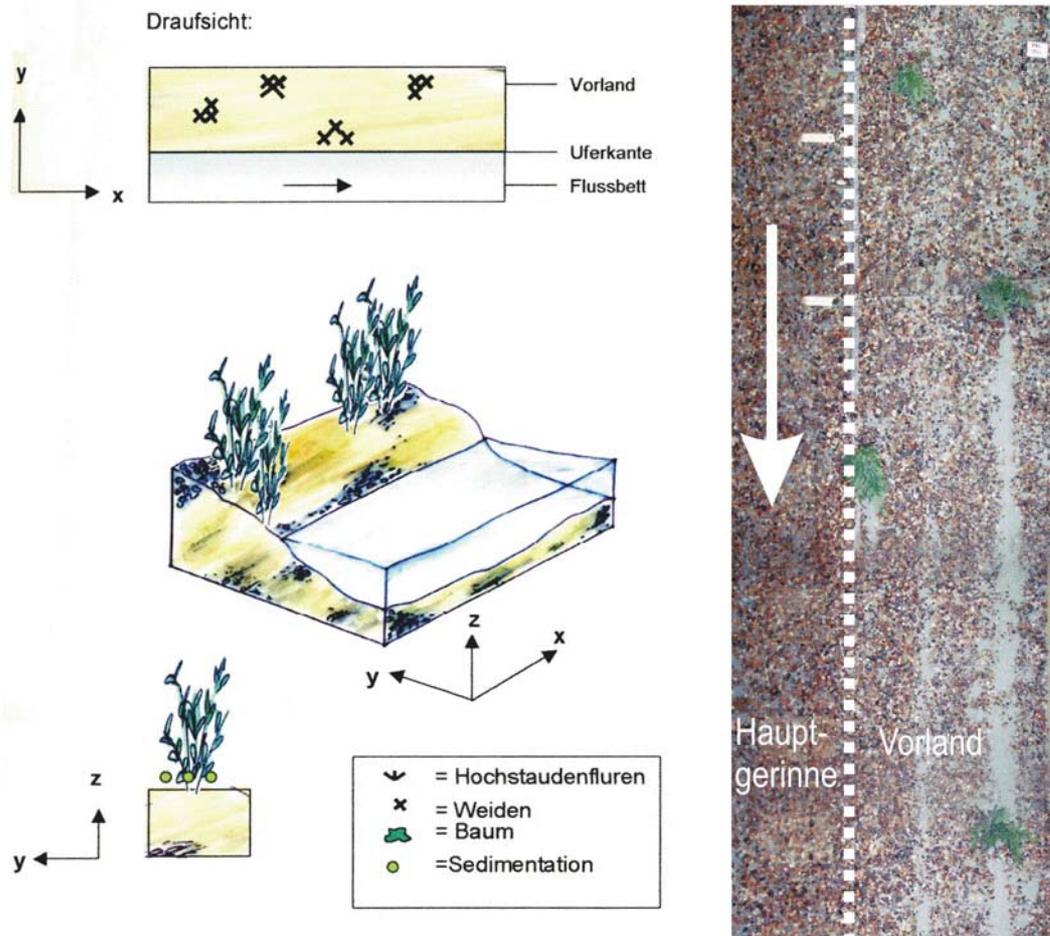
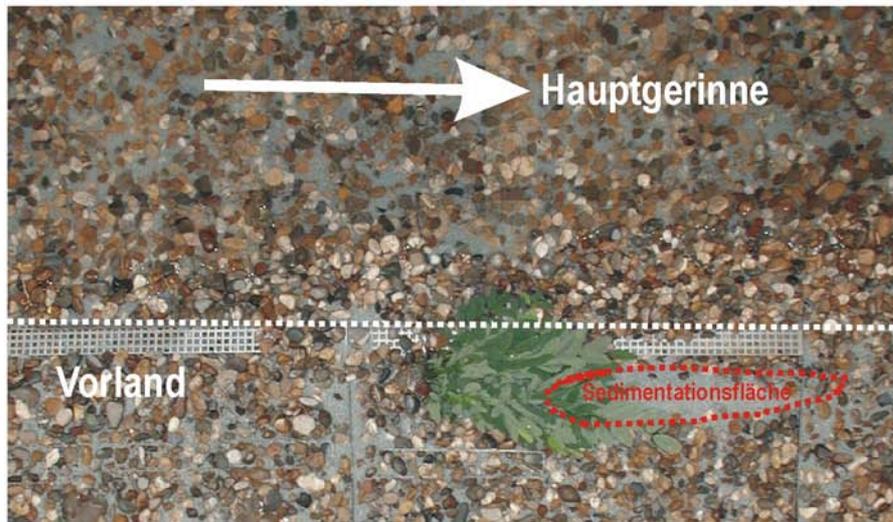


Abb. A - 12: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Bei dieser Versuchsserie wurde die Anordnung mehrerer Bewuchskollektive auf dem Vorlandbereich simuliert. Dabei wurden zwei Kollektivgruppen direkt am Ufer platziert; zwei weitere Gruppen wurden etwa in Vorlandmitte eingebaut. Das Bewuchskollektiv wurde aus biegsamen Robinienzweigen angefertigt und simuliert somit ein Kollektiv aus jungen Bäumen und Sträuchern.

Die Versuchsserie ergab, dass sich im Strömungsschatten des Bewuchskollektivs Feststoffe ablagern und dadurch eine Sedimentationsfahne sichtbar wird. Diese Beobachtung konnte durch mehrere Situationen in der Natur verifiziert werden (vgl. **Abb. A - 13**).

Modell



Natur



Abb. A - 13: Vergleich der Sedimentationsbeobachtungen im Strömungsschatten eines Bewuchskollektivs im Modellversuch (hellblaue Bereiche) und in der Natur. (Lehmann)

Für die Praxis im naturnahen Wasserbau bedeutet dies, dass die Verwendung von kollektiven Bewuchsanordnungen zur Sedimentation von feinpartikulären Feststoffen innerhalb des Kollektivs und auch in der strömungsberuhigten Zone hinter dem Kollektiv führt. Die Abmessungen der Sedimentationszone im Strömungsschatten des Kollektivs können mit dem Ansatz nach Pasche (1984) zur Berechnung der Nachlauflänge und -breite hinter einem angeströmten Störkörper abgeschätzt werden.

Serie 2: Überströmte Hochstaudenfluren entlang des Ufers

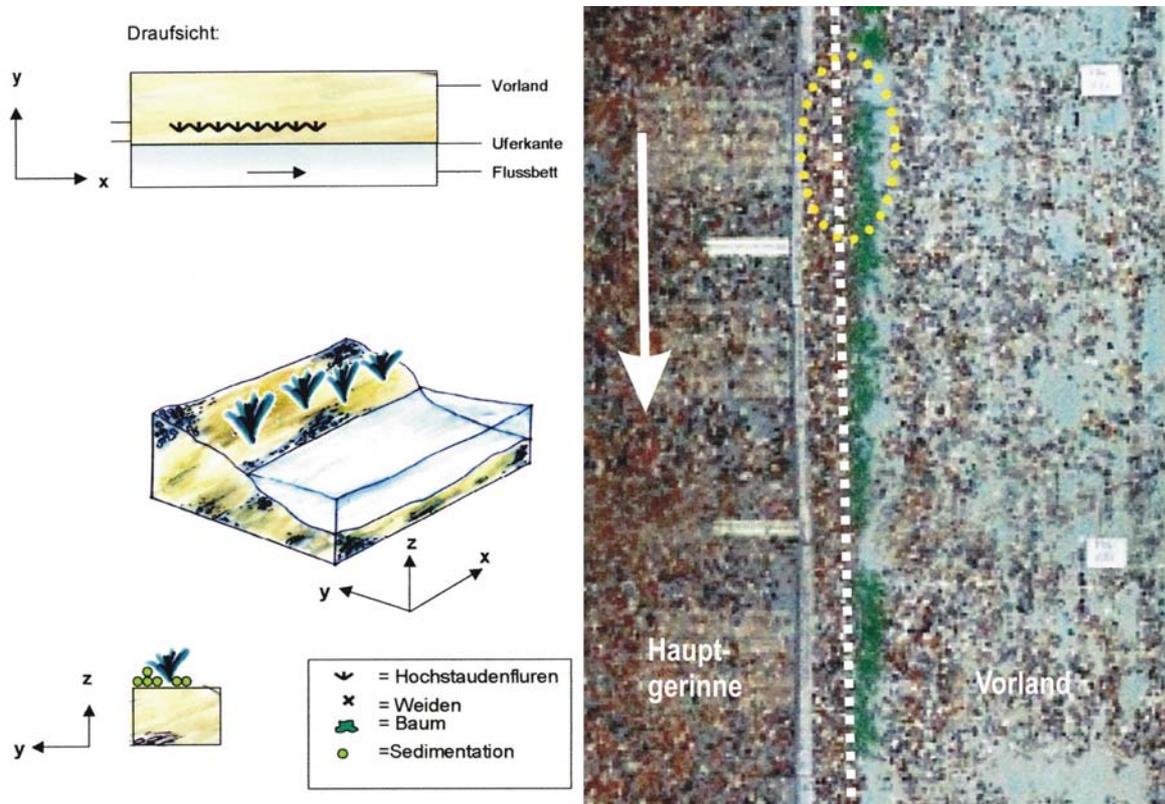


Abb. A - 14: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Im Modellversuch wurden zur Simulation von kraut- und röhrichtartigen Hochstaudenfluren künstliche Koniferen aus relativ weichem, biegsamen Kunststoff verwendet.

Innerhalb der Hochstaudenfluren, die während der Versuche komplett überströmt waren, wurde eine enorm hohe Sedimentationsrate beobachtet (vgl. **Abb. A - 15**, links). Dies entspricht der „Ausfilterung“ feiner Sedimente, die Specht (2002) in seiner Arbeit bereits erwähnt hat. Ferner wurde beobachtet, dass bei allen gefahrenen Versuchen der oberwasserseitige Anfang der Hochstaudenreihe keine Sedimentation bewirkt; erst nach einer nicht quantifizierbaren Bewuchsreihenlänge kommt es zur starken Sedimentation der Feststoffe (vgl. **Abb. A - 15**, rechts).

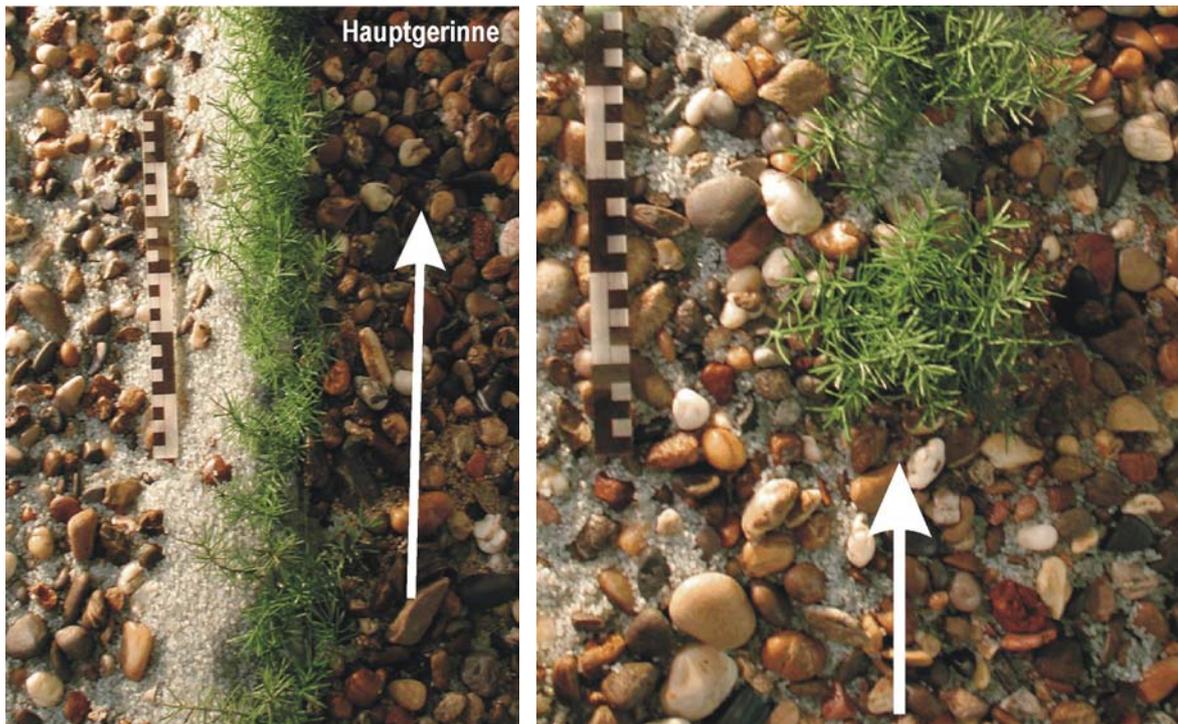


Abb. A - 15: Starke Sedimentation der Feststoffe innerhalb der Hochstaudenfluren (links). Im Bereich des oberwasserseitigen Anfangs der Hochstaudenreihe wurde bei allen Versuchen eine sedimentationsfreie Zone festgestellt (Rechts). Die Quantifizierung der Zonenlänge war nicht möglich. (Schneider)

Die geringe Sedimentationserscheinungen im Kopfbereich der Strauchreihe in **Abb. A – 15** rechts zeigen auf, dass die Anordnung von „Strauchinseln“ entlang des Gewässers zu deutlich weniger Sedimentationserscheinungen führen wird, als ein durchgehender Strauchsaum. Zudem sind so ausreichende Sichtfenster zum Wasserlauf vorhanden, was insbesondere im Hinblick auf die Naherholung im urbanen Bereich eine wichtige Rolle spielt.

Für die Praxis im naturnahen Wasserbau sind uferparallele Hochstaudenfluren aufgrund der Versuchsergebnisse nicht empfehlenswert. Die sehr intensive Sedimentation feiner Feststoffe infolge eines Ausfilterungsprozesses zwischen der dichten, krautartigen Vegetation führt zur Ausbildung von Uferrehnen. Im Rahmen von Unterhaltungsarbeiten ist die Beseitigung dieser Uferrehnen aufwendig, da die Hochstaudenfluren durch sehr dichtes Astwerk und oftmals auch durch giftige Pflanzensubstanzen (z.B. bei der sog. Herkulesstaude) verklaust sind.

Wirtschaftlich ist die Beseitigung der Uferrehnen nur mit Einsatz von Großgeräten (Bagger, Raupe) bei vollständiger Vegetationsentfernung möglich.

Serie 3: Auf den Stock gesetzter Mittelbewuchs

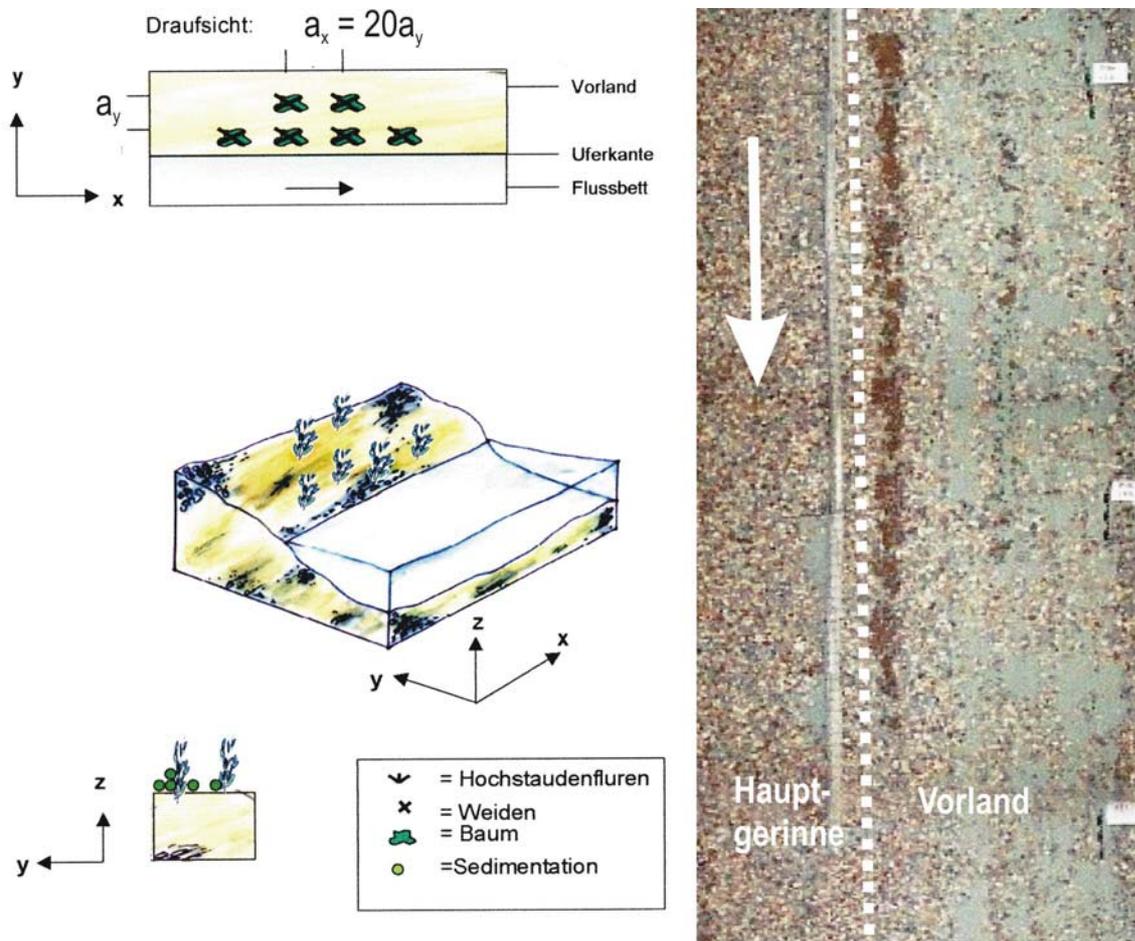


Abb. A - 16: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Diese Versuchserie wurde auf Anregung der Flussmeisterei Pforzheim und des Tiefbauamtes der Stadt Karlsruhe durchgeführt. Nach Aussage der dortigen Kollegen ist in der Praxis zu beobachten, dass nicht fachgerecht zurückgeschnittenen Weiden (buschartiger Ausschlag) bei Hochwasserereignissen eine besonders hohe lokale Sedimentation von Feststoffen in ihrem Umfeld bewirken.

Die Versuche bestätigten diese Beobachtungen: als maßgebend für die Sedimentationsrate wurde zum einen die Vegetationsdichte bzw. -anordnung sowie der Stammdurchmesser festgestellt (vgl. **Abb. A - 17**). Zum anderen bewirkte das Vorhandensein einzelner zusätzlich eingebrachter feiner Zweige, die im Modell einen unsauberen Rückschnitt des Weidenkörpers simulieren sollten, eine enorme Zunahme der Sedimentationsrate in diesem Bereich (vgl. **Abb. A - 18**).

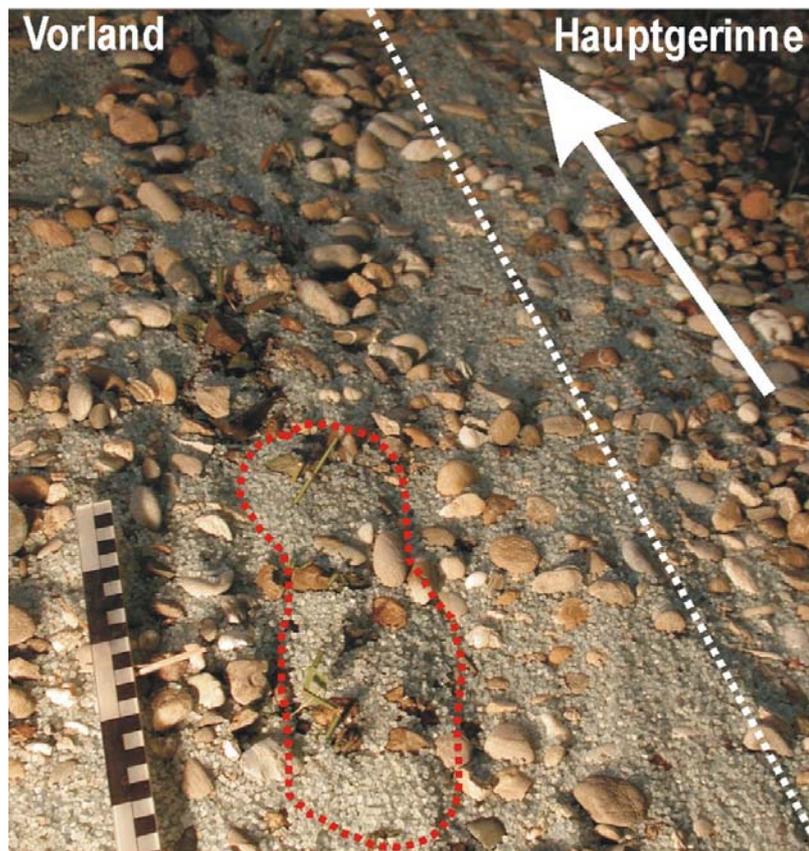


Abb. A - 17: Sedimentationsbild nach der Versuchsdurchführung. (Schneider)



Abb. A - 18: Unsauber zurückgeschnittene Weiden verstärken die Sedimentationsrate. (Schneider)

Serie 4: Einreihiger durchströmter Mittelbewuchs ohne Blätter

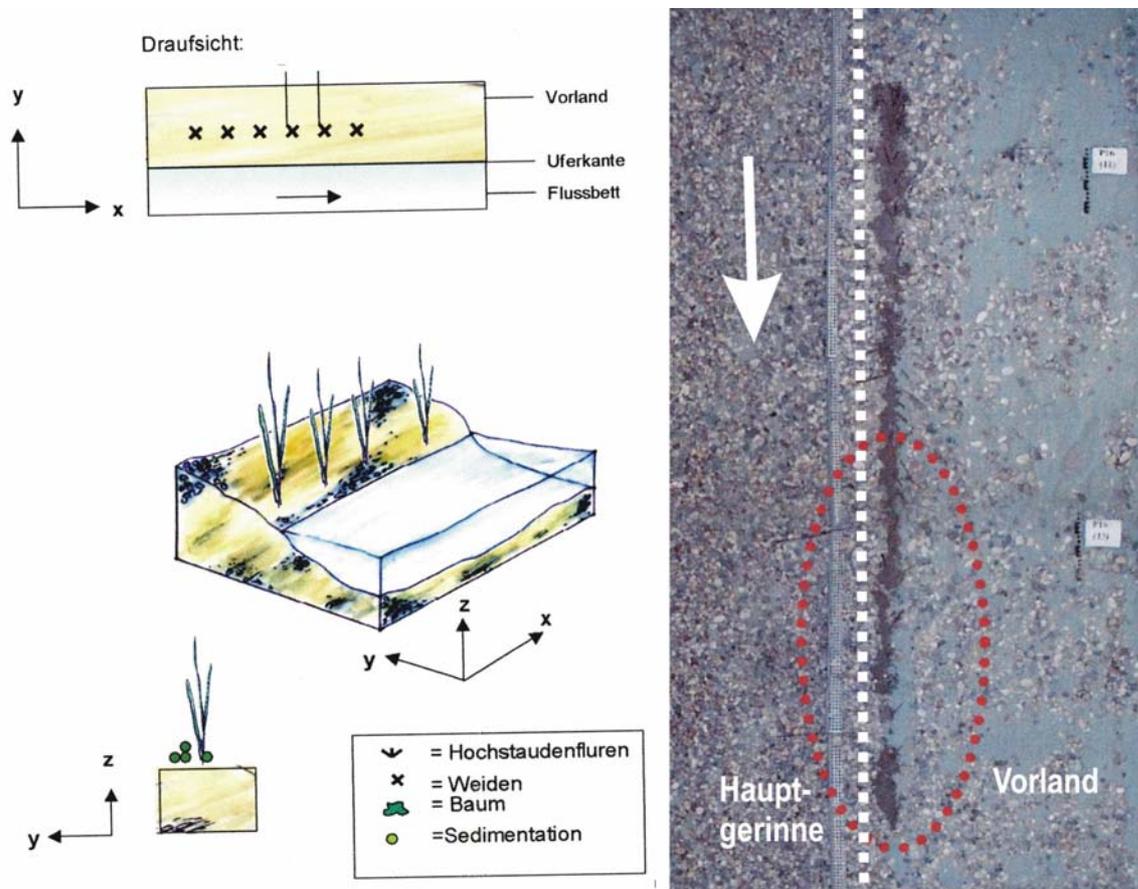


Abb. A - 19: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Simuliert wurde hier ein uferparalleler einreihiger Bestand aus älteren Weiden mit einer lockeren Bestandsdichte. Im Hochwasserfall werden hauptsächlich die unteren, eher starren Weidenstämme umströmt, eine Durchströmung des Astwerkes bzw. ein komplettes strömungsbedingtes Umlegen des Weidenwuchses findet aufgrund der Wuchshöhe nicht statt. Zwischen den einzelnen Weiden befinden sich keine weiteren Vegetationselemente.

Die Versuchsserie hat gezeigt, dass ein solcher palisadenartiger lichter Bestand aus alten, großwüchsigen Weiden bzw. Bäumen keine signifikanten Sedimentationsercheinungen bewirkt (vgl. **Abb. A - 20**). Im hinteren Teil der im Modell eingebauten Weidenreihe konnte nach langer Versuchslaufzeit eine geringe Verlandung bewirkt werden, die jedoch bei einer Durchflussänderung größtenteils wieder erodiert wurde.

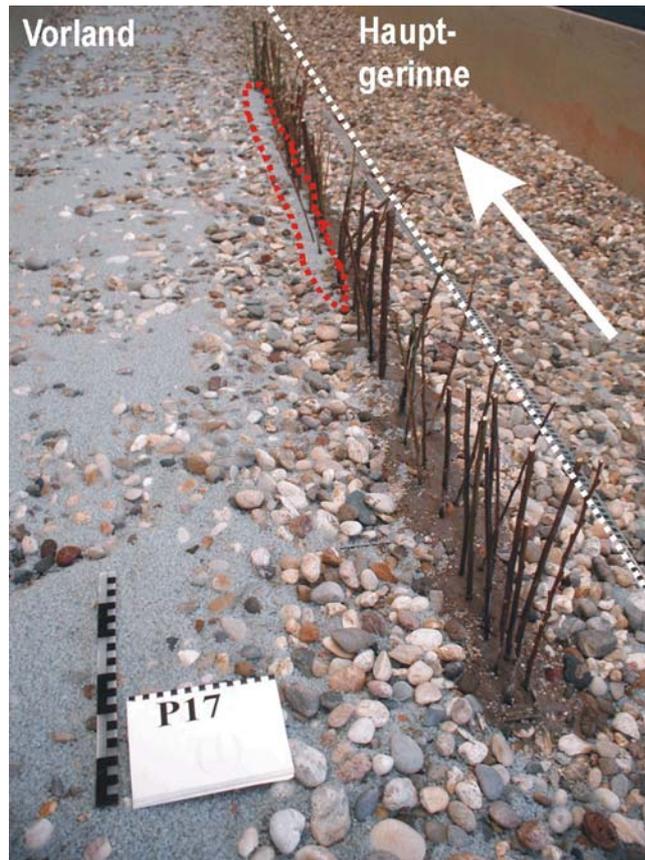


Abb. A - 20: Feststoffsedimentation (hellblaue Bereiche) bei einem einreihigen lichten Weidenbestand. (Schneider)

In der Praxis des naturnahen Wasserbau entspricht diese Vegetationsanordnung einer häufig anzutreffenden Situation bei Fließgewässern in urbanen Bereichen. Der alte Baumbestand oberhalb der Mittelwasserlinie wird erhalten, dazwischen werden „Sichtfenster“ zum Gewässer freigehalten, um den Menschen einen Zugang und Erholungsraum zu bieten. Die Gewässerunterhaltung ist in diesem Fall gut durchführbar, da die Zugänglichkeit zum Wasser und zum Ufer nicht durch weiteren Bewuchs gestört wird.

Auch im Sinne des Hochwasserschutzes ist es vorteilhaft, überwiegend nur umströmte Stämme als Widerstände im Strömungsgebiet zu haben, anstelle durchströmter, stark verästelter Vegetation, welche einen größeren Widerstand bewirkt.

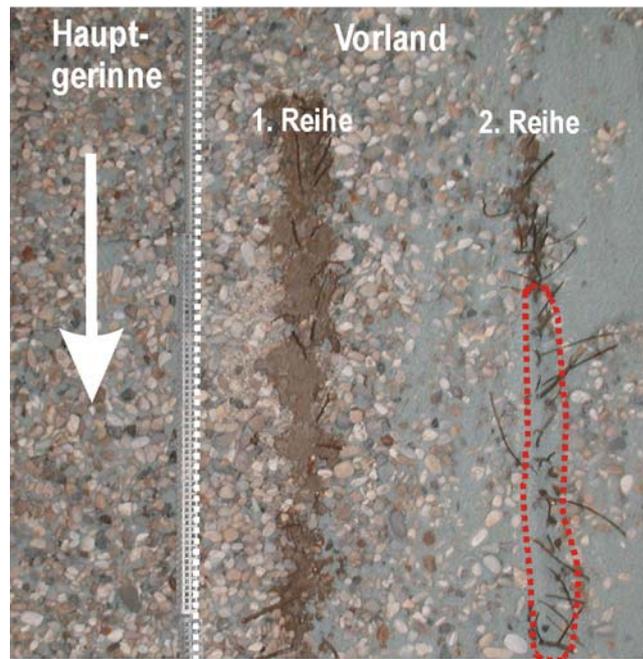


Abb. A - 22: Feststoffsedimentation (hellblaue Bereiche) bei einem zweireihigen lichten Weidenbestand. (Schneider)

Eine Erklärung des Phänomens ist durch die Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeiten im Hochwasserfall möglich: die ufernahe Weidenreihe (1. Reihe in Abb. A - 22) erfährt im Vergleich zur 2. Reihe eine stärkere Durchströmung infolge der Interaktion mit dem Hauptgerinne. Diese Interaktion ist bei der 2. Reihe nicht mehr signifikant vorhanden, so dass hier der Ausfilterungsprozess ungestört von der interaktiven Makroturbulenz stattfindet. Zudem sind auf dem Vorlandbereich infolge der geringeren Fließtiefen die Fließgeschwindigkeiten geringer. Die Sedimentation muss also im Umfeld der 2. Reihe intensiver stattfinden.

Serie 6: Zweireihiger durchströmter Mittelbewuchs – belaubt ($a_x = 0,06a_y$)

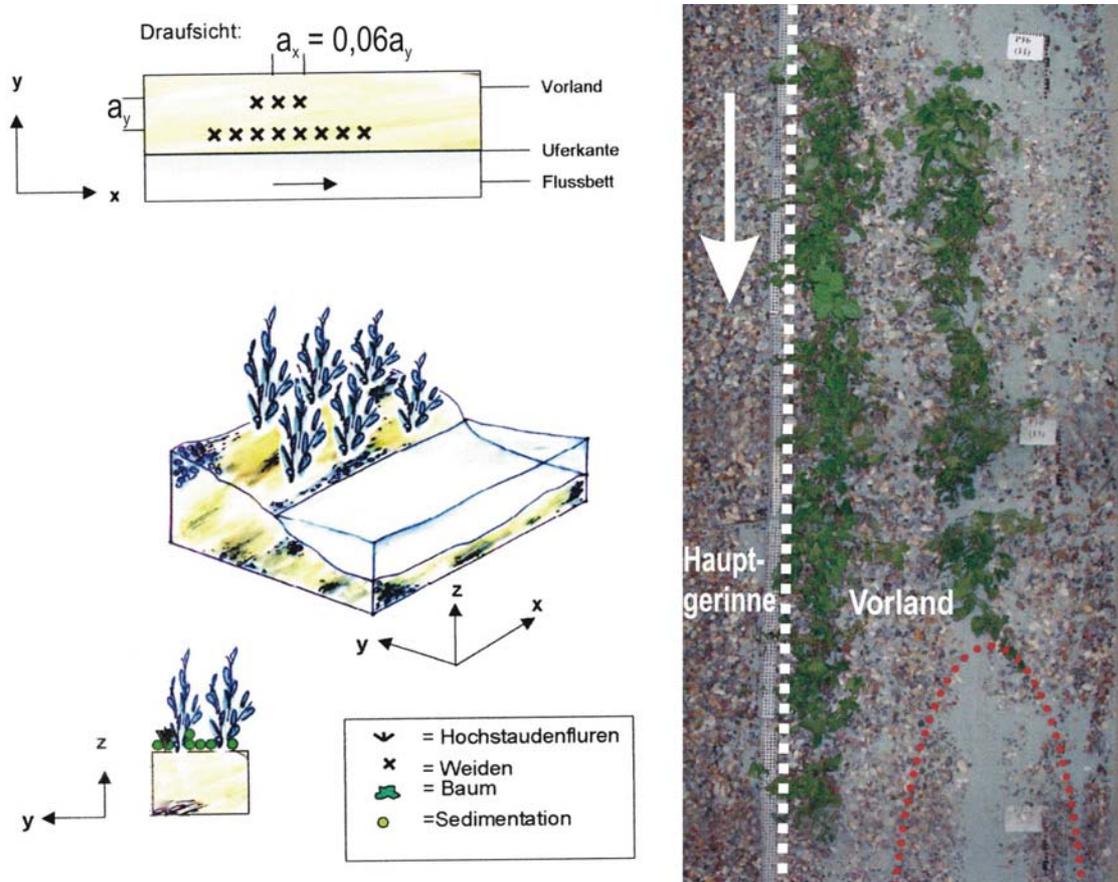


Abb. A - 23: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Diese Versuchsserie entspricht von der Vegetationsanordnung her der Serie Nr. 5. Durch die Verwendung von biegsamen Robinienzweigen mit Blättern im Modell wurden junge Weidenbestände im belaubten Zustand simuliert. Der Durchmesser des Hauptstammes der Weiden beträgt in diesem Entwicklungsstadium ca. 0,10 m. Die ufernahen Weiden werden beim Hochwasserereignis so stark umströmt, dass es zu einem Umlegen kommt und schließlich eine Durch- und Überströmung stattfindet.

Der simulierte Zustand entspricht somit dem typischen Entwicklungsstand einer Weidenkultur, die vor ca. drei Jahren z.B. im Rahmen einer naturnahen Gewässerlaufgestaltung angepflanzt wurde. Hierbei ist in der Praxis oft zu beobachten, dass während dieser Entwicklungszeit die Besatzdichte rapide zunimmt, da neben der Anpflanzung eine sukzessive Vegetationsentwicklung stattfindet und im Rahmen der Gewässerunterhaltung keine ausreichende Auslichtung stattfindet.

Ergänzend zu den Beobachtungen aus Serie 5 (gleiche Anordnung, unbelaubter Zustand) konnte hier beobachtet werden, dass insgesamt eine größere Sedimentationstendenz vorhanden ist (vgl. **Abb. A - 24**). Dies betrifft sowohl die ufernahen Weiden-

reihe (1. Reihe) als auch die auf dem Vorland verlaufende Reihe (2. Reihe). Hinter beiden Weidenreihen konnte jeweils eine deutliche Sedimentation entlang der Nachlaufzone festgestellt werden (vgl. **Abb. A - 25**).



Abb. A - 24: Sedimentation innerhalb der zweiten Weidenreihe. (Schneider)



Abb. A - 25: Sedimentation entlang der Nachlaufzone hinter einer Weidenreihe. (Schneider)

Für die Praxis lässt sich aus den Serien 5 und 6 die Empfehlung ableiten, dass im Rahmen der Gewässerunterhaltung insbesondere während der Entwicklungszeit der jungen Weiden darauf zu achten ist, dass die Vegetationsdichte nicht zu groß wird. Durch regelmäßiges Auslichten des Vegetationsbestandes kann bewirkt werden, dass sich die angepflanzten Jungweiden gut entwickeln und schnell eine hydraulisch-sedimentologisch günstige Wuchshöhe erreichen.

Serie 7: Zweireihiger durchströmter Mittelbewuchs – belaubt ($a_x = 0,20 \cdot a_y$)

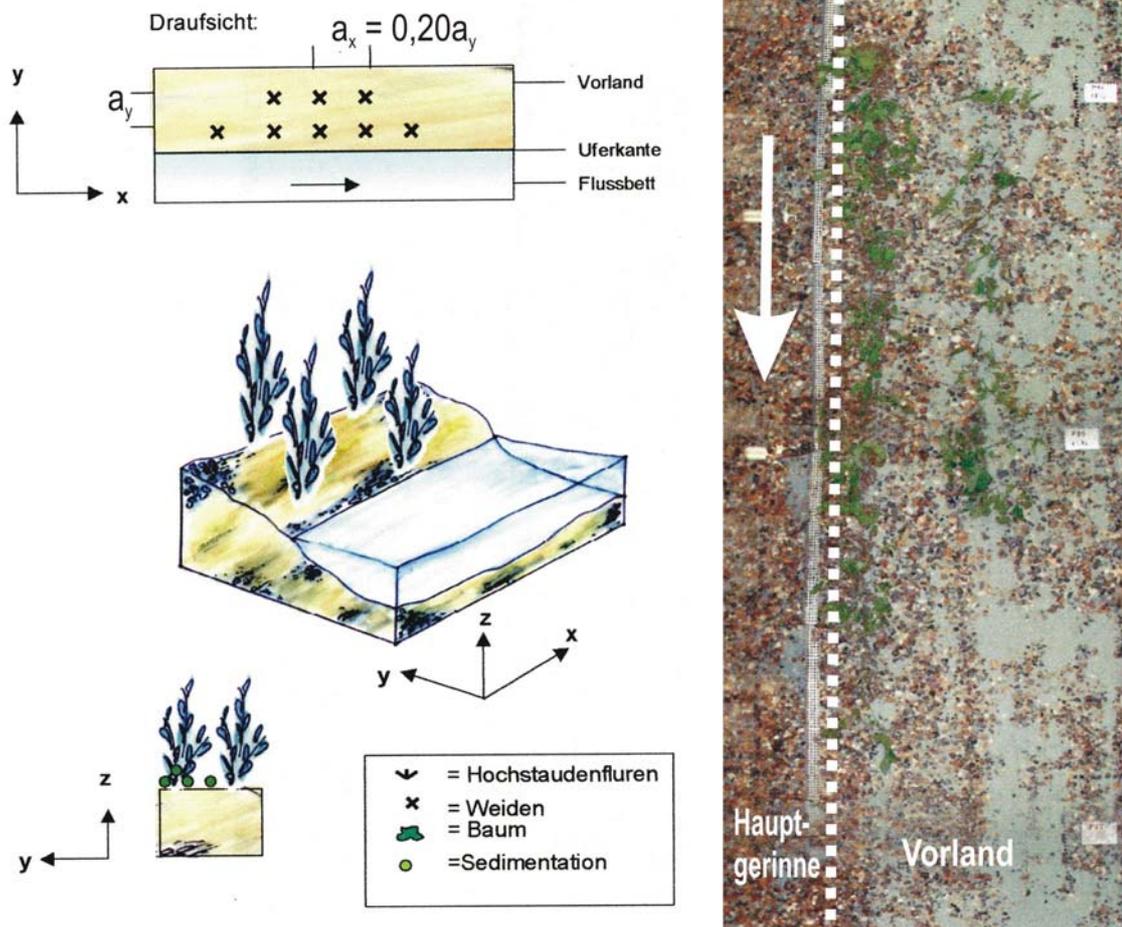


Abb. A - 26: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Diese Serie unterscheidet sich gegenüber der Serie 6 durch einen dreifach größeren Weidenabstand in Fließrichtung (a_x); der Weidenabstand quer zur Fließrichtung (a_y) wurde unverändert beibehalten. Damit wird hier nun der Zustand simuliert, der während der Entwicklungszeit angepflanzter Jungweiden empfohlen wird: die Weiden können relativ ungestört von anderer sukzessiver Vegetation aufwachsen – im Rahmen von Unterhaltungsarbeiten wird die Vegetationsdichte relativ konstant gehalten.

Die Beobachtungen bei dieser Versuchsserie zeigten eindeutig, dass die Sedimentationstendenz innerhalb der Weidenreihen trotz der vorhandenen Belaubung stark nachlässt. Daher kann durch diese Versuchsserie die Empfehlung von Serie 6 validiert werden.

Serie 8: Zweireihiger durchströmter Mittelbewuchs – belaubt ($a_x = 0,67 \cdot a_y$)

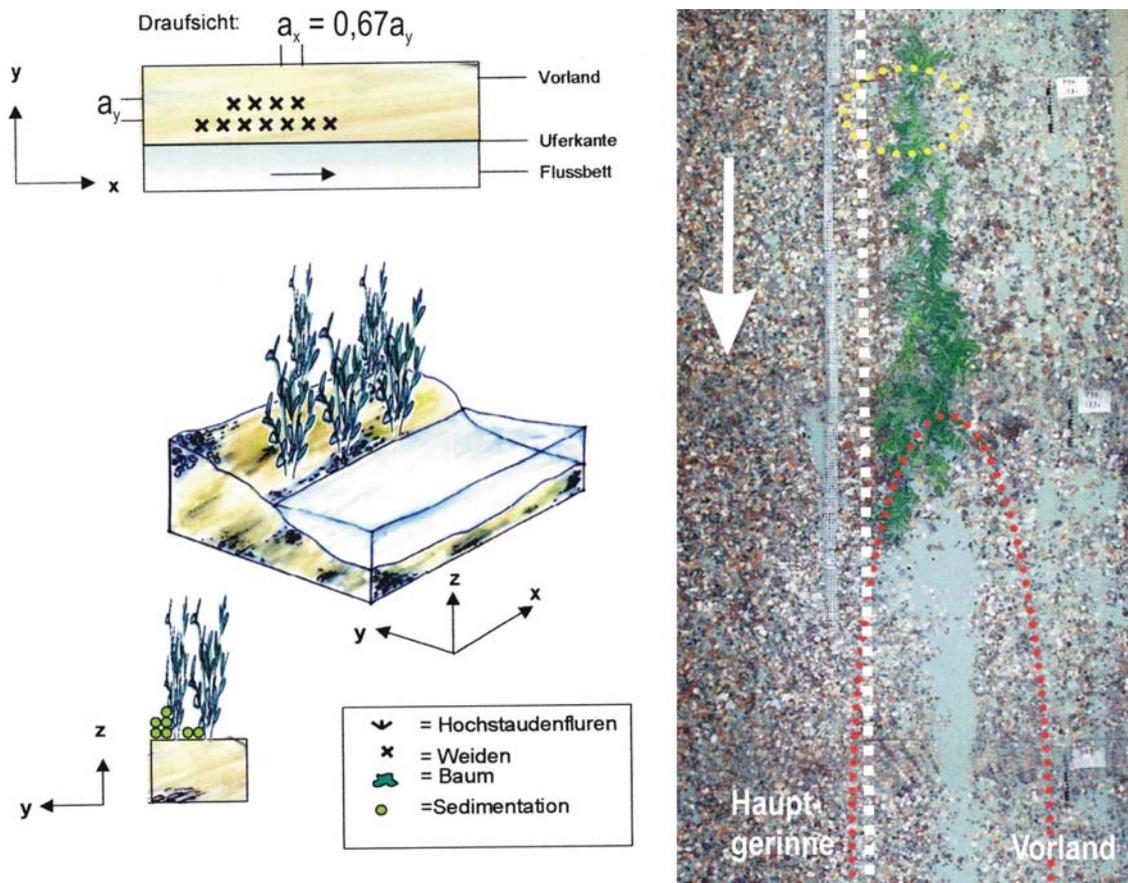


Abb. A - 27: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Im Gegensatz zur Serie 7 wurde nun der Weidenabstand quer zur Fließrichtung (a_y) um den Faktor drei verkleinert (vgl. **Abb. A - 28**). Es handelt sich somit um die Simulation eines lokal doppelten Pflanzenbestandes – eine in der Landschaftsplanung oft verwendete typische Gestaltungsform.

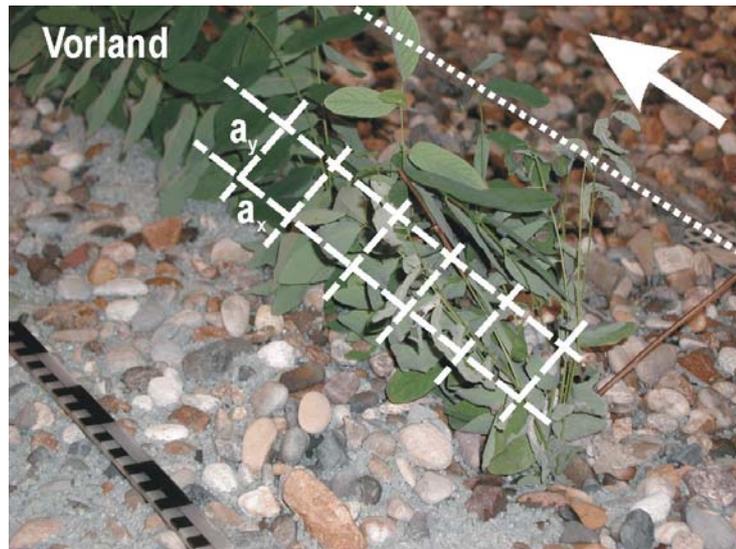


Abb. A - 28: Anordnung der beiden Weidenreihen in sehr dichtem Abstand quer zur Fließrichtung ($a_x \approx a_y$). (Schneider)

Diese Vegetationsanordnung wurde an der renaturierten Enz bei Pforzheim oft angepflanzt, um eine naturnahe und nachhaltige Erosionsresistenz der Uferpartien zu erreichen. Die Beobachtungen im Modellversuch decken sich auch in diesem Fall mit den Beobachtungen in der Natur: Die Sedimentationstendenz ist entlang der zweiten Reihe wesentlich größer als entlang der ersten Reihe (direkt an der Uferlinie) (vgl. **Abb. A - 29**). In der Natur wurden sogar innerhalb der ersten Reihe Erosionsnester bzw. Uferabbrüche festgestellt.

Aus diesem Grund wurde an den Stellen, wo dieses Phänomen an der renaturierten Enz beobachtet wurde, die zweite Vegetationsreihe im Rahmen der Gewässerunterhaltung ausgerichteter, wodurch sich eine Abnahme der Sedimentationserscheinungen bei Hochwasserabflüssen zeigte.

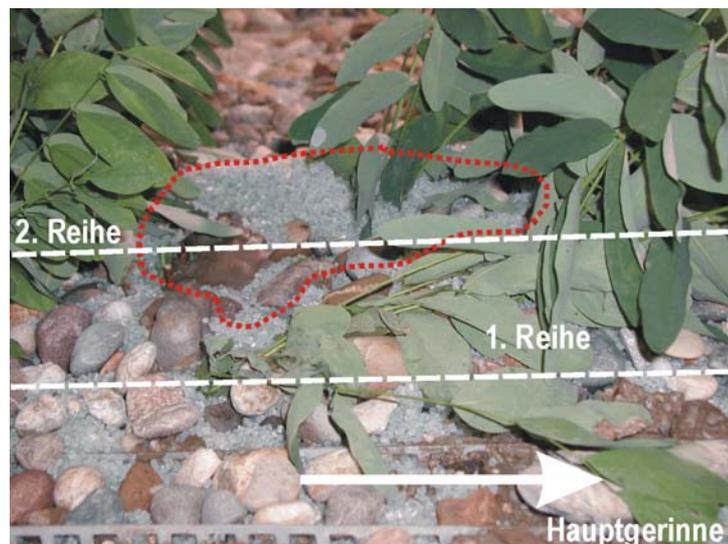


Abb. A - 29: Die zweite Vegetationsreihe hat eine wesentlich höhere Sedimentationstendenz als die ufernahe erste Reihe. (Schneider)

Serie 9:
Mehrreihiger diagonal angeordneter durchströmter Mittelbewuchs -
belaubt ($a_x = 3,5 \cdot a_y$)

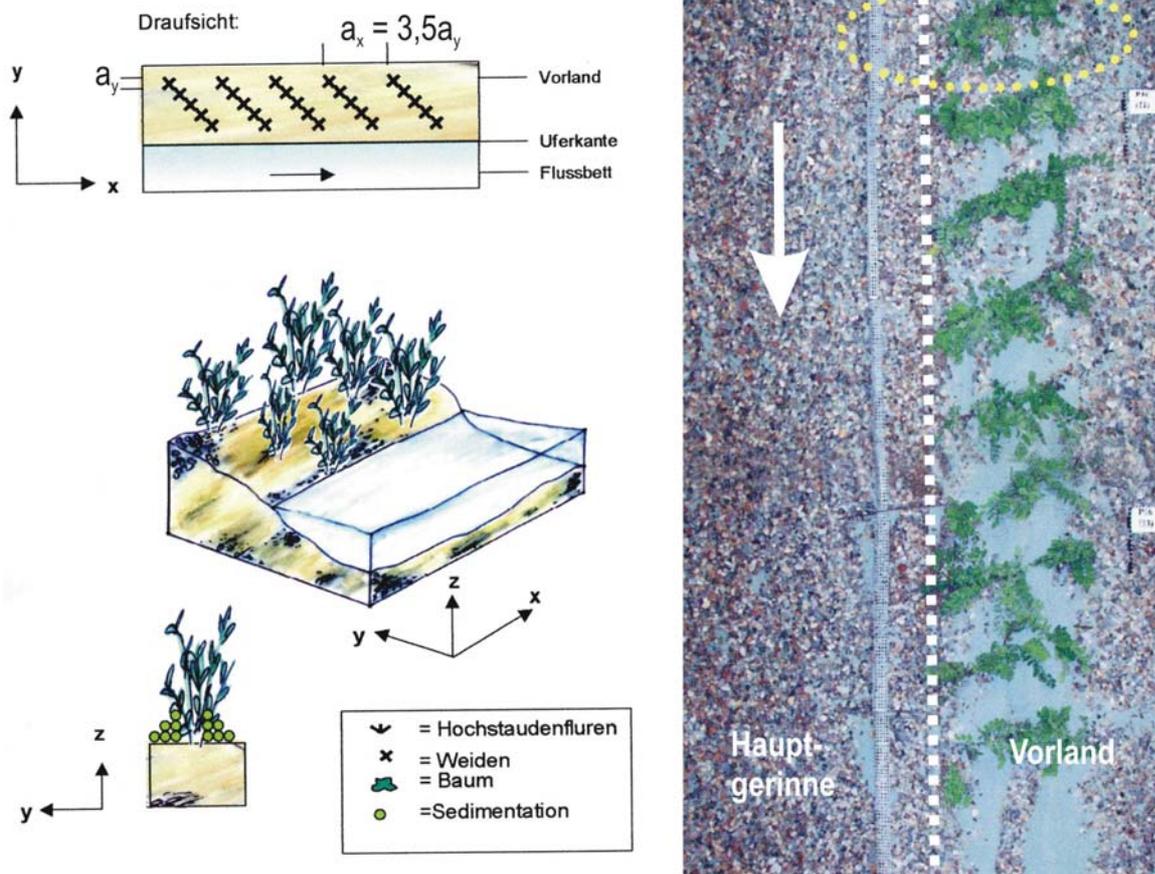


Abb. A - 30: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

In dieser Serie wurde eine dichte, in mehreren Reihen diagonal zur Fließrichtung versetzte Vegetationsanordnung junger Weidenbestände simuliert. Der Abstand quer zur Fließrichtung (a_y) betrug dabei etwa $1/3$ des Abstandes längs zur Fließrichtung (a_x).

Der Versuch zeigte eine sehr starke Sedimentationstendenz innerhalb der Bewuchszone. Die Ausbildung einer Rehne direkt entlang der Uferlinie sowie einer parallel dazu verlaufenden zweiten Rehne am vorlandseitigen Rand der Bewuchszgruppe konnte dabei nachgewiesen werden (vgl. **Abb. A - 31**).

Zudem wurden in der Nachlaufzone hinter der Bewuchszzone eine starke Verlandung beobachtet, die sich weit stromabwärts erstreckte (vgl. **Abb. A - 32**).



Abb. A - 31: Bildung paralleler Rehen im Bereich der Vegetation. (Schneider)

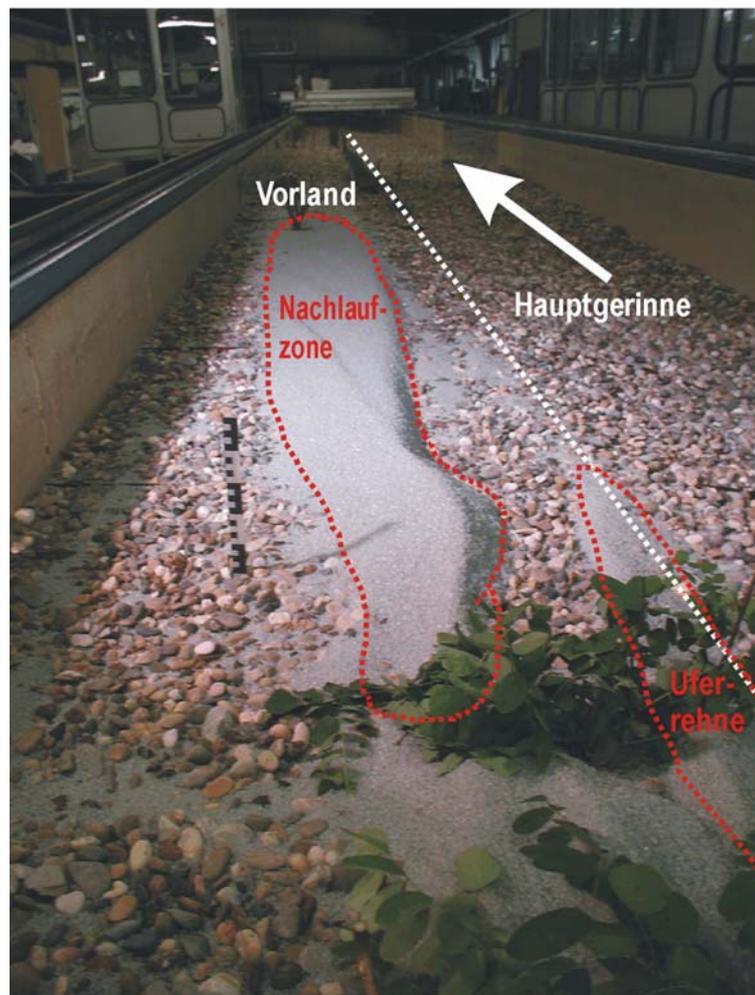


Abb. A - 32: Starke Verlandung innerhalb der Nachlaufzone hinter der Bewuchsgruppe. (Schneider)

Besonders die Sedimentation innerhalb der Nachlaufzone konnte in der Natur mehrfach gut beobachtet werden (vgl. **Abb. A - 33**).

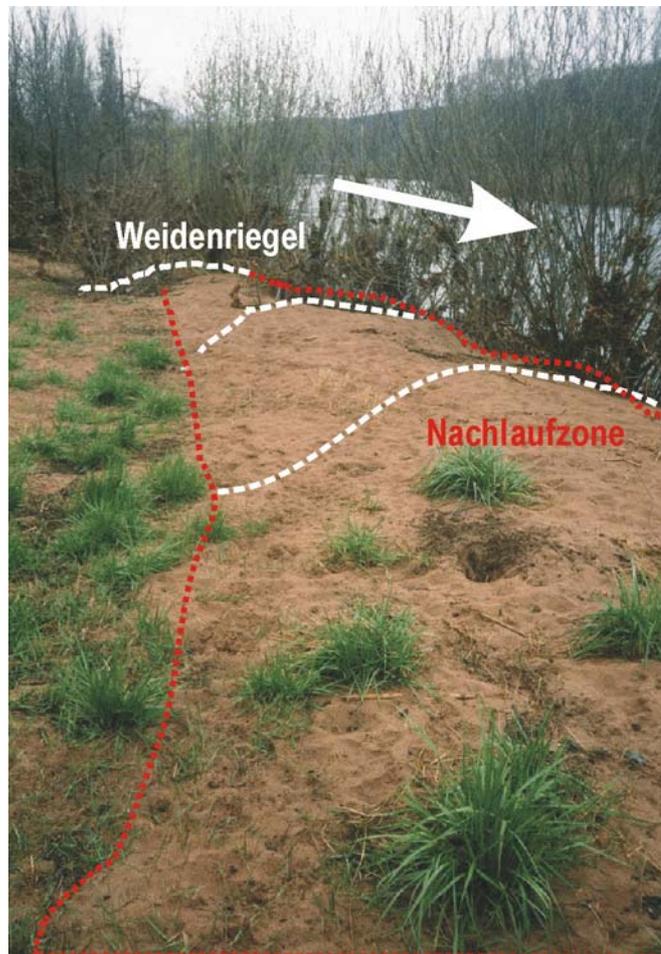


Abb. A - 33: Sedimentation hinter den Weidenriegeln. Deutlich ist die Rehenbildung auch in diesem Bereich zu erkennen. (Lehmann)

Für die wasserbauliche Praxis bedeuten diese Beobachtungen, dass im Rahmen der Gewässerunterhaltung darauf zu achten ist, dass es infolge der Vegetationsentwicklung nicht zu einer Ausbreitung des Bewuchsbestandes quer zur Fließrichtung kommt: Die ufernahen Gehölzbestände sind demnach so zu entwickeln, dass sie in die Höhe wachsen, sich dabei jedoch nicht in die Breite quer zur Fließrichtung ausdehnen.

Neben der in diesem Fall stark vorhandenen Sedimentationstendenz wirkt eine solche Bewuchsanordnung hydraulisch ähnlich wie ein Querriegel und mechanisch wie ein Grobrechen (vgl. **Abb. A - 34**). Es besteht daher die Gefahr des Versatzes mit Getreibsel und Totholz sowie daraus resultierend ein rascher Anstieg des Strömungswiderstandes. Hierdurch kann es oberwasserseitig zu einer signifikanten Erhöhung der Wasserspiegellagen kommen, was sich nachteilig auf die Hochwassersicherheit auswirkt.



Abb. A - 34: Verklausalung einer querläufigen Bewuchsanordnung durch Geschwemmsel und Totholz. (Lehmann)

Serie 10:
Mehrreihiger diagonal angeordneter durchströmter Mittelbewuchs -
belaubt ($a_x = 1,17 \cdot a_y$)

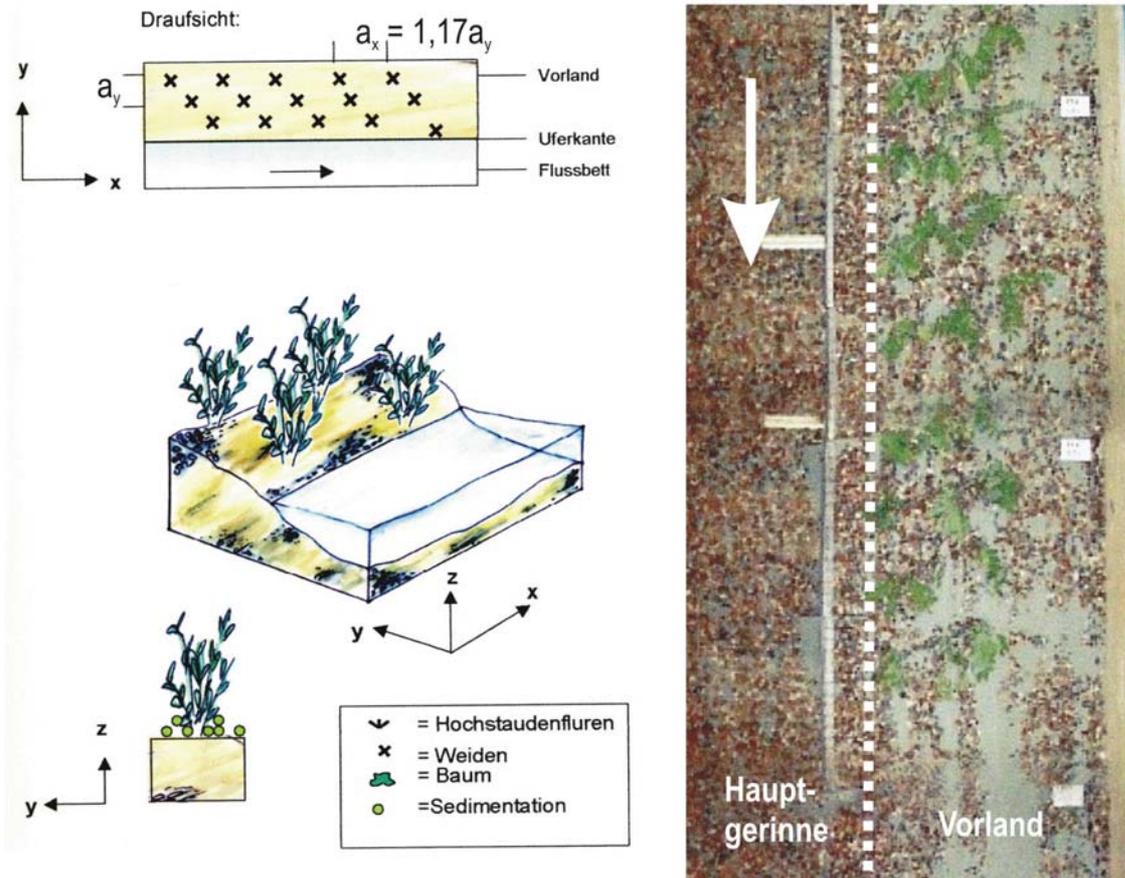


Abb. A - 35: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Die Grundanordnung dieser Serie entspricht der Serie Nr. 9 – nur die Bewuchsabstände quer zur Fließrichtung (a_y) wurden um den Faktor drei vergrößert. Die Versuche ergaben eine geringere Sedimentationsrate innerhalb des Vegetationsbestandes, wobei nach wie vor noch eine deutliche Rehnenbildung beobachtet wurde.

Auch die Sedimentation im Bereich der Nachlaufzone hinter der Bewuchsanordnung wurde etwas schwächer beobachtet.

Serie 11: Mehrröhiger diagonal angeordneter durchströmter Mittelbewuchs - belaubt ($a_x = 2,33 \cdot a_y$)

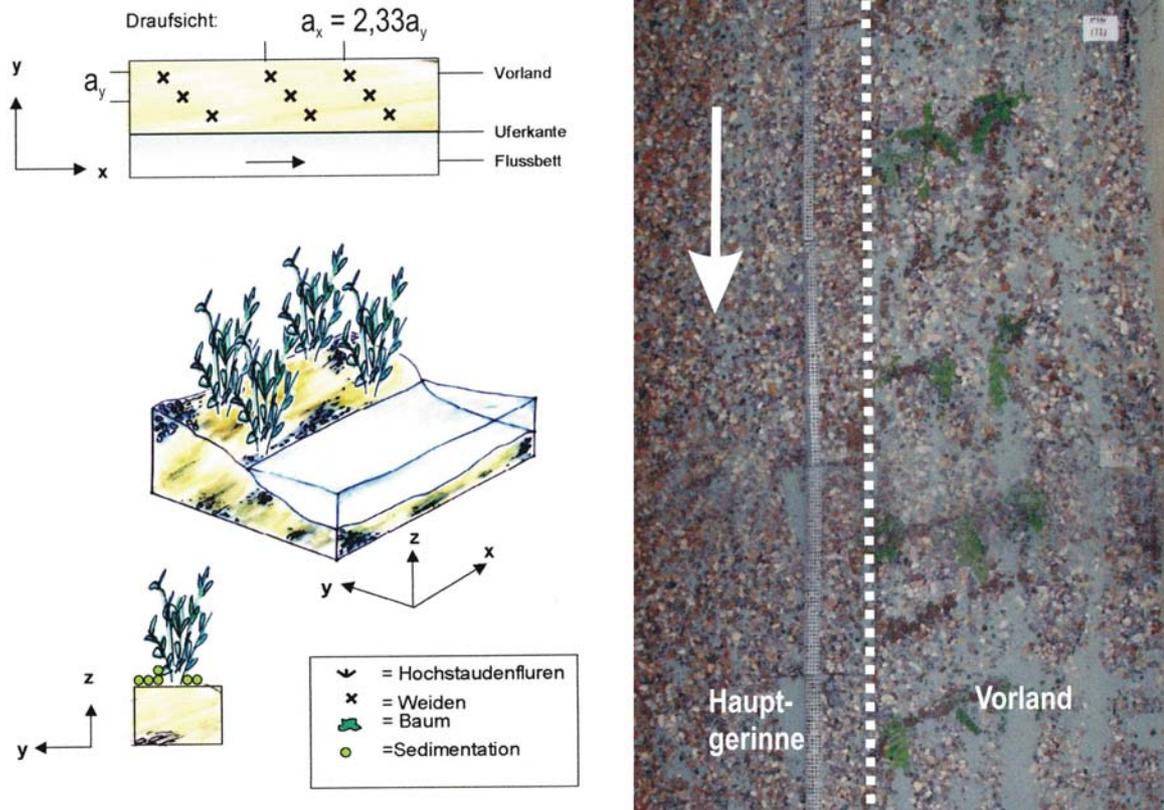


Abb. A - 36: Anordnung der Vegetationselemente auf dem Vorland (links) und Sedimentationstendenzen in der Draufsicht (rechts, hellblaue Bereiche). (Schneider und Lehmann)

Bei dieser Serie wurde im Vergleich zur Serie Nr. 10 der Bewuchsabstand in Fließrichtung (a_x) verdoppelt. Hierdurch war ein starker Rückgang der Rehenbildung zu beobachten – jedoch fand im Bewuchsbereich nach wie vor eine flächige Sedimentation statt. Die Sedimentationstendenz sowohl innerhalb der Bewuchsgruppe als auch in der Nachlaufzone ist im Vergleich zu den Serien 9 und 10 deutlich geringer.

Für die wasserbauliche Praxis sind solche Queranordnungen von Bewuchsreihen zu vermeiden - einige Gründe hierfür wurden bereits bei der Serie Nr. 9 genannt. Die Serien 10 und 11 haben gezeigt, dass selbst bei starker Ausrichtung der Bewuchsreihen nach wie vor eine flächenhafte Sedimentation stattfindet.

Anlage 6: Berechnungsergebnisse Pforzheim/Enz

Station: Sonderpegel Pforzheim/Enz 1 - Enz-km 57+970, PNP = 244,045 m+NN
Rechnungslauf: SP1_sim1

Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	4 & 3	3	1 & 2	1		
Sohlennneigung	l_{So}	-	0,00220	0,00220	0,00220	0,00220		
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,00	2,00	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	3,00	1,00	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,10	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	2,00	4,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	1,70	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,30	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,40	0,80	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{vsp}	m	4,00	4,30	20,00	2,38		
Querschnittfläche	A	m ²	3,58	3,68	37,64	0,44		
hydraulische Fließtiefe	h	m	0,90	0,85	1,88	0,18		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,37	1,71	1,42	0,00		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	1,42	0,00	1,71	0,37		
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	4,14	4,63	20,07	2,41		
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	5,93	6,34	23,20	2,78		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	0,87	0,79	1,88	0,18		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,60	0,58	1,62	0,16		
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	4,00	4,30	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,35	0,33	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	1,08	0,67	0,84	0,29		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,13	0,30	0,09	0,36		
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	3,87	2,46	31,61	0,13		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	-0,31	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	3,87	2,15	31,61	0,13		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s						38

Station: Sonderpegel Pforzheim/Enz 1 - Enz-km 57+970, PNP = 244,045 m+NN
Rechnungslauf: SP1_sim2

Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3	1 & 2	1		
Sohlennneigung	l_{So}	-	0,00220	0,00220	0,00220	0,00220		
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,00	2,00	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	3,00	1,00	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,10	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	2,00	4,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	1,70	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,30	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,40	0,80	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{vsp}	m	4,00	7,48	20,00	4,50		
Querschnittfläche	A	m ²	5,10	5,63	44,88	1,69		
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,28	0,75	2,24	0,38		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,75	2,09	1,80	0,00		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	1,80	0,00	2,09	0,75		
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	4,14	7,86	20,07	4,56		
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	6,69	9,95	23,96	5,31		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,23	0,72	2,24	0,37		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,76	0,57	1,87	0,32		
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	4,00	7,48	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,57	0,52	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	1,28	0,66	1,38	0,58		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,13	0,29	0,08	0,19		
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	6,53	3,72	61,93	0,98		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	-0,20	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	6,53	3,52	61,93	0,98		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s						73

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 1 - Enz-km 57+970, PNP = 244,045 m+NN							
Rechnungslauf:		SP 1_sim3							
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6	
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3 & 5	1 & 2	1	2		
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00220	0,00220	0,00220	0,00220	0,00220		
Vegetationsparameter									
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	3,00	1,00	0,00	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	2,00	4,00	0,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	1,70	0,00	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit									
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,15	0,10	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,40	0,80	0,00	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter									
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	4,00	10,00	20,00	17,20	9,10		
Querschnittfläche	A	m ²	7,50	11,39	57,24	8,20	2,05		
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,88	1,14	2,86	0,48	0,23		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	1,35	2,69	2,40	0,00	0,45		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	2,40	0,45	2,69	1,35	0,00		
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	4,14	10,40	20,07	17,28	9,11		
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	7,89	13,54	25,16	18,63	9,56		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,81	1,10	2,85	0,47	0,23		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,95	0,84	2,28	0,44	0,21		
Hydraulische Parameter									
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	4,00	10,00	0,00	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	1,15	1,33	0,00	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	1,56	0,73	2,83	0,81	0,38		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,13	0,36	0,05	0,12	0,28		
Durchflusswerte									
Durchfluss	Q, Q _{veg}	m ³ /s	11,70	8,31	161,99	6,64	0,78		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	1,71	0,00	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	Q _{Sektion}	m ³ /s	11,70	10,02	161,99	6,64	0,78		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s							191

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 1 - Enz-km 57+970, PNP = 244,045 m+NN							
Rechnungslauf:		SP 1_sim4							
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6	
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3 & 5	1 & 2	1	2		
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00220	0,00220	0,00220	0,00220	0,00220		
Vegetationsparameter									
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	3,00	1,00	0,00	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	2,00	4,00	0,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	1,70	0,00	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit									
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,15	0,10	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,40	0,80	0,00	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter									
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	4,00	10,00	20,00	18,20	16,59		
Querschnittfläche	A	m ²	10,82	19,69	73,83	22,43	13,88		
hydraulische Fließtiefe	h	m	2,71	1,97	3,69	1,23	0,84		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	2,18	3,52	3,23	0,00	1,28		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	3,23	1,28	3,52	2,18	0,00		
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	4,14	10,39	20,07	18,57	16,62		
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	9,55	15,19	26,82	20,75	17,90		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	2,61	1,90	3,68	1,21	0,84		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	1,13	1,30	2,75	1,08	0,78		
Hydraulische Parameter									
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	4,00	10,00	0,00	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	1,23	1,43	0,00	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	2,19	1,10	3,04	1,91	1,37		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,09	0,27	0,05	0,06	0,08		
Durchflusswerte									
Durchfluss	Q, Q _{veg}	m ³ /s	24	22	224	43	19	0	
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	1,62	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sektionsdurchfluss	Q _{Sektion}	m ³ /s	23,70	23,28	224,44	42,84	19,02	0,00	
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s							333

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 2 - Enz-km 57+443, PNP = 243,290 m+NN							
Rechnungslauf:		SF2_sim1							
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6	
Nachbarsektionen	-	Nr.	2	1					
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00280	0,00280					
Vegetationsparameter									
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,50	0,00					
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	1,00	0,00					
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,00					
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	6,00	0,00					
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	0,00					
Oberflächenrauheit									
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,18					
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	2,00	0,00					
Querschnittgeometrische Parameter									
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	3,86	28,04					
Querschnittfläche	A	m ²	1,66	22,46					
hydraulische Fließtiefe	h	m	0,43	0,80					
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,00	0,86					
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	0,86	0,00					
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	3,95	28,10					
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	4,81	28,96					
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	0,42	0,80					
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,35	0,78					
Hydraulische Parameter									
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	3,86	0,00					
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,36	0,00					
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,62	1,17					
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,24	0,13					
Durchflusswerte									
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	1,03	26,28					
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	0,00					
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	1,03	26,28					
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s						27	

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 2 - Enz-km 57+443, PNP = 243,290 m+NN							
Rechnungslauf:		SF2_sim2							
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6	
Nachbarsektionen	-	Nr.	3	3	1 & 2				
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00280	0,00280	0,00280				
Vegetationsparameter									
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,50	0,50	0,00				
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	1,00	1,00	0,00				
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,08	0,00				
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	6,00	6,00	0,00				
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	1,00	0,00				
Oberflächenrauheit									
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,18				
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	2,00	2,00	0,00				
Querschnittgeometrische Parameter									
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	5,76	3,98	29,16				
Querschnittfläche	A	m ²	3,80	0,58	35,69				
hydraulische Fließtiefe	h	m	0,66	0,15	1,22				
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,00	0,29	1,32				
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	1,32	0,00	0,29				
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	5,91	3,99	29,24				
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	7,23	4,28	30,85				
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	0,64	0,15	1,22				
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,53	0,14	1,16				
Hydraulische Parameter									
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	5,67	0,47	0,00				
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,56	0,35	0,00				
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,75	0,25	1,70				
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,25	0,55	0,09				
Durchflusswerte									
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	2,85	0,15	60,67				
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	0,00	0,00				
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	2,85	0,15	60,67				
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s						64	

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 2 - Enz-km 57+443, PNP = 243,290 m+NN							
Rechnungslauf:		SP2_sim3							
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6	
Nachbarsektionen	-	Nr.	3	3 & 4	1 & 2	2			
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00280	0,00280	0,00280	0,00280			
Vegetationsparameter									
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,50	0,50	0,00	0,00			
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	1,00	1,00	0,00	0,00			
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,08	0,00	0,00			
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	6,00	6,00	0,00	0,00			
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	1,00	0,00	0,00			
Oberflächenrauheit									
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,18	0,10			
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	2,00	2,00	0,00	0,00			
Querschnittgeometrische Parameter									
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	9,57	11,88	29,16	3,75			
Querschnittfläche	A	m ²	10,62	9,39	61,94	0,73			
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,11	0,79	2,12	0,19			
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,00	1,19	2,22	0,39			
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	2,22	0,39	1,19	0,00			
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	9,82	11,91	29,24	3,77			
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	12,04	13,49	32,65	4,16			
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,08	0,79	2,12	0,19			
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,88	0,70	1,90	0,18			
Hydraulische Parameter									
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	9,57	5,18	0,00	0,00			
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,97	0,75	0,00	0,00			
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,88	0,58	2,67	0,35			
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,31	0,52	0,06	0,34			
Durchflusswerte									
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	9,35	5,45	165,38	0,26			
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,24	0,17	0,00	0,00			
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	9,58	5,62	165,38	0,26			
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s					181		

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 2 - Enz-km 57+443, PNP = 243,290 m+NN							
Rechnungslauf:		SP2_sim4							
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6	
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3 & 5	1 & 2	1	2		
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00280	0,00280	0,00280	0,00280	0,00280		
Vegetationsparameter									
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	2,50	0,50	0,00	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,10	0,08	0,00	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	6,00	6,00	0,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,70	1,00	0,00	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit									
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,18	0,10	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter									
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	9,57	11,88	29,16	7,69	12,00		
Querschnittfläche	A	m ²	18,32	18,53	84,39	3,75	12,50		
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,91	1,56	2,89	0,49	1,04		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,84	1,96	2,99	0,00	1,96		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	2,99	1,16	1,96	0,84	0,00		
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	9,80	11,91	29,24	7,54	12,17		
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	13,63	15,03	34,19	8,38	14,13		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,87	1,56	2,89	0,50	1,03		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	1,34	1,23	2,47	0,45	0,88		
Hydraulische Parameter									
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	9,57	9,26	0,00	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	1,29	1,09	0,00	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,95	0,62	3,07	0,96	1,86		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,45	0,89	0,06	0,12	0,07		
Durchflusswerte									
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	17,40	11,49	259,08	3,60	23,25		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	1,56	1,70	0,00	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	18,96	13,19	259,08	3,60	23,25		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s					318		

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 3 - Enz-km 57+094, PNP = 242,587 m+NN						
Rechnungslauf:		SP3_sim1						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	2	1				
Sohlennneigung	l_{so}	-	0,00190	0,00190				
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	1,50	0,00				
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	1,00	0,00				
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,08	0,00				
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	6,00	0,00				
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,00	0,00				
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,18				
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	2,00	0,00				
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{vsp}	m	2,50	38,01				
Querschnittfläche	A	m ²	0,90	32,24				
hydraulische Fließtiefe	h	m	0,36	0,85				
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,72	0,00				
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	0,00	0,72				
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	2,60	38,15				
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	3,32	38,87				
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	0,35	0,85				
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,27	0,83				
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	2,50	0,00				
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,27	0,00				
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,42	1,01				
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,30	0,12				
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	0,38	32,56				
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	0,00				
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	0,38	32,56				
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s						33

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 3 - Enz-km 57+094, PNP = 242,587 m+NN						
Rechnungslauf:		SP3_sim2						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	3	3	1 & 2			
Sohlennneigung	l_{so}	-	0,00190	0,00190	0,00190			
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	0,25	1,50	0,00			
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	0,25	1,00	0,00			
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,06	0,08	0,00			
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	4,00	6,00	0,00			
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,00	1,00	0,00			
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,18			
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	1,33	2,00	0,00			
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{vsp}	m	3,76	4,13	38,01			
Querschnittfläche	A	m ²	0,70	2,48	50,11			
hydraulische Fließtiefe	h	m	0,19	0,60	1,32			
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,00	1,20	0,37			
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	0,37	0,00	1,20			
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	3,78	4,30	38,15			
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	4,15	5,50	39,72			
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	0,19	0,58	1,31			
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,17	0,45	1,26			
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	0,53	4,13	0,00			
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,24	0,44	0,00			
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,14	0,58	1,50			
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	1,53	0,26	0,08			
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	0,10	1,44	75,17			
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	0,00	0,00			
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	0,10	1,44	75,17			
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s						77

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 3 - Enz-km 57+094, PNP = 242,587 m+NN						
Rechnungslauf:		SP3_sim3						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3	1 & 2	1		
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00190	0,00190	0,00190	0,00190		
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	0,25	1,50	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	0,25	1,00	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,06	0,08	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	4,00	6,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,00	1,00	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,18	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	1,33	2,00	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	3,76	7,03	38,01	10,20		
Querschnittfläche	A	m ²	3,74	7,07	81,01	4,13		
hydraulische Fließtiefe	h	m	0,99	1,01	2,13	0,40		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,81	2,01	1,18	0,00		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	1,18	0,00	2,01	0,81		
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	3,78	7,31	38,15	10,23		
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	5,77	9,32	41,34	11,04		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	0,99	0,97	2,12	0,40		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,65	0,76	1,96	0,37		
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	0,72	7,03	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,37	0,73	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,16	0,68	2,28	0,58		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	6,09	0,32	0,06	0,18		
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q _{veg}	m ³ /s	0,60	4,81	184,70	2,40		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,04	0,09	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	Q _{Sektion}	m ³ /s	0,64	4,90	184,70	2,40		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s					193	

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 3 - Enz-km 57+094, PNP = 242,587 m+NN						
Rechnungslauf:		SP3_sim4						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3	1 & 2	1		
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00190	0,00190	0,00190	0,00190		
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	0,25	1,50	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	0,25	1,00	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,06	0,08	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	4,00	6,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,00	1,00	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,18	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	1,33	2,00	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	3,76	9,53	38,01	17,63		
Querschnittfläche	A	m ²	6,49	13,06	108,76	13,58		
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,73	1,37	2,86	0,77		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	1,54	2,74	1,91	0,00		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	1,91	0,00	2,74	1,54		
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	3,78	9,92	38,15	17,70		
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	7,23	12,66	42,80	19,24		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,72	1,32	2,85	0,77		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,90	1,03	2,54	0,71		
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	1,06	9,53	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,48	0,98	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,16	0,71	2,85	1,17		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	10,62	0,39	0,05	0,08		
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q _{veg}	m ³ /s	1,04	9,27	309,97	15,89		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,15	0,88	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	Q _{Sektion}	m ³ /s	1,18	10,15	309,97	15,89		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s					337	

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 4 - Enz-km 56+934, PNP = 242,355 m+NN						
Rechnungslauf:		SP4_sim1						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	-					
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00200					
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	0,00					
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	0,00					
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,00					
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	0,00					
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	0,00					
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,22					
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,00					
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{vsp}	m	33,61					
Querschnittfläche	A	m ²	36,21					
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,08					
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,00					
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	0,00					
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	33,86					
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	33,86					
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,07					
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	1,07					
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	0,00					
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,00					
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	1,18					
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,12					
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	42,73					
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00					
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	42,73					
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s				43		

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 4 - Enz-km 56+934, PNP = 242,355 m+NN						
Rechnungslauf:		SP4_sim2						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	2 & 3	1	1			
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00200	0,00200	0,00200			
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	0,20	0,00	0,00			
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	0,10	0,00	0,00			
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,03	0,00	0,00			
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	1,00	0,00	0,00			
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,00	0,00	0,00			
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,22	0,10			
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,33	0,00	0,00			
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{vsp}	m	4,39	35,93	3,30			
Querschnittfläche	A	m ²	1,91	53,13	0,63			
hydraulische Fließtiefe	h	m	0,44	1,48	0,19			
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	0,38	0,49	0,00			
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	0,49	0,00	0,38			
benetzter Umfang <u>ohne</u> Trennfläche	$l_{U,o}$	m	4,39	36,21	3,32			
benetzter Umfang <u>mit</u> Trennfläche	$l_{U,T}$	m	5,26	36,70	3,70			
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	0,44	1,47	0,19			
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,36	1,45	0,17			
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	0,22	0,00	0,00			
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,24	0,00	0,00			
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,11	1,58	0,30			
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	5,56	0,09	0,34			
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q_{veg}	m ³ /s	0,21	83,95	0,19			
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	0,00	0,00			
Sektionsdurchfluss	$Q_{Sektion}$	m ³ /s	0,21	83,95	0,19			
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s				84		

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 4 - Enz-km 56+934, PNP = 242,355 m+NN						
Rechnungslauf:		SP4_sim3						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3	1 & 2	1		
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200		
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	0,20	1,00	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	0,10	0,90	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,03	0,08	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	1,00	6,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,00	1,00	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,25	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,33	2,00	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	4,39	11,38	35,93	15,00		
Querschnittfläche	A	m ²	5,03	5,38	81,99	8,18		
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,15	0,47	2,28	0,55		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	1,09	0,80	1,20	0,00		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	1,20	0,00	0,80	1,09		
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	4,39	11,41	36,21	15,04		
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	6,68	12,21	38,21	16,13		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,15	0,47	2,26	0,54		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,75	0,44	2,15	0,51		
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	4,39	3,17	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,45	0,58	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	0,96	0,49	2,18	0,87		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,20	0,31	0,07	0,11		
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q _{veg}	m ³ /s	4,83	2,64	178,74	7,12		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	0,00	0,03	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	Q _{Sektion}	m ³ /s	4,83	2,67	178,74	7,12		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s					193	

Station:		Sonderpegel Pforzheim/Enz 4 - Enz-km 56+934, PNP = 242,355 m+NN						
Rechnungslauf:		SP4_sim4						
Parameter	Zeichen	Einheit	Sektion 1	Sektion 2	Sektion 3	Sektion 4	Sektion 5	Sektion 6
Nachbarsektionen	-	Nr.	3 & 4	3	1 & 2	1		
Sohlenneigung	l_{so}	-	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200		
Vegetationsparameter								
Abstand in Fließrichtung	a_x	m	0,20	1,00	0,00	0,00		
Abstand quer zur Fließrichtung	a_y	m	0,10	0,90	0,00	0,00		
äquivalenter Durchmesser	d_{veg}	m	0,03	0,08	0,00	0,00		
Vegetationshöhe	h_{veg}	m	1,00	6,00	0,00	0,00		
Vegetationstyp - Beiwert	c	-	1,00	1,00	0,00	0,00		
Oberflächenrauheit								
Sohlerauheit	k_s	m	0,10	0,10	0,18	0,10		
Vegetationsrauheit bei überstr. Veg.	$k_{s,veg}$	m	0,33	2,00	0,00	0,00		
Querschnittgeometrische Parameter								
Wasserspiegelbreite	b_{wsp}	m	4,39	13,48	35,93	24,00		
Querschnittfläche	A	m ²	7,44	12,15	98,75	19,68		
hydraulische Fließtiefe	h	m	1,69	0,90	2,75	0,82		
Trennflächenhöhe links	$h_{T,l}$	m	1,64	1,35	1,75	0,00		
Trennflächenhöhe rechts	$h_{T,r}$	m	1,75	0,00	1,35	1,64		
benetzter Umfang ohne Trennfläche	$l_{U,o}$	m	4,39	13,59	36,21	24,06		
benetzter Umfang mit Trennfläche	$l_{U,T}$	m	7,78	14,94	39,31	25,70		
hydraulischer Radius ohne Trennfläche	$r_{hy,o}$	m	1,69	0,89	2,73	0,82		
hydraulischer Radius mit Trennfläche	$r_{hy,T}$	m	0,96	0,81	2,51	0,77		
Hydraulische Parameter								
Interaktionsbeeinflusste Sektionsbreite	b_2	m	4,39	4,82	0,00	0,00		
Trennflächen-Fließgeschwindigkeit	v_T	m/s	0,62	0,80	0,00	0,00		
mittlere Fließgeschwindigkeit	v, v_{veg}	m/s	1,51	0,58	2,78	1,27		
Widerstandsbeiwert	$\lambda_{ges,veg}, \lambda_{ges}$	-	0,12	0,42	0,05	0,08		
Durchflusswerte								
Durchfluss	Q, Q _{veg}	m ³ /s	11,23	7,05	274,53	24,99		
Interaktionsbedingter Zuschlag	$\Delta Q_{veg,int}$	m ³ /s	-1,66	0,24	0,00	0,00		
Sektionsdurchfluss	Q _{Sektion}	m ³ /s	9,58	7,29	274,53	24,99		
Gesamtdurchfluss im Querschnitt	Q_{ges}	m³/s					316	

