

# **Einfluß von Regelungsbauwerken auf die Wasserspiegellagen in Flüssen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der Fakultät für  
Bauingenieur- und Vermessungswesen  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. Frank Ritzert**

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 2001

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Franz Nestmann  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Helmut Scheuerlein

Karlsruhe 2001

## Vorwort

Die Quantifizierung des Einflusses von Energieverlusten an Regelungsbauwerken in Flüssen auf die Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten unter unterschiedlichen geometrischen und sedimentologischen Randbedingungen ist eine weitgehend ungelöste Aufgabe. Hierbei ist insbesondere die Trennung des Rauheitseinflusses der im allgemeinen sandrauhnen Sohle in Flüssen von der Formwiderstandswirkung der Bauwerke problematisch. In dieser Arbeit wird erstmalig die Einstein'sche Rauheitsüberlagerungsmethode auf eine derartige Problemstellung angewendet. Auf der Grundlage einer Dimensionsanalyse werden Funktionen des Widerstands für Regelungsbauwerke am Beispiel nichtüberströmter Bühnen errechnet. Diese werden im Rahmen einer Prognoserechnung zur Quantifizierung der Wasserstandsanhhebung sowie der Fließgeschwindigkeitsreduktion, die aufgrund der Aufzehrung von Energie in Bühnenfeldern entsteht, eingesetzt.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe (TU) in den Jahren 1996 bis 2001. Sie baut auf einer Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe erstellten Gutachten sowie auf Forschungsergebnissen, die im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes Elbe-Ökologie entstanden, auf.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Franz Nestmann. Er hat über Jahre hinweg diese Arbeit fachlich begleitet und meine Forschungsaktivitäten unterstützt. Mein aufrichtiger Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Scheuerlein, dem Leiter des Institutes für Wasserbau der Universität Innsbruck, für die bereitwillige Übernahme des Korreferates und das große Interesse an der Arbeit.

Mein Dank gilt auch meinem Vater für das Korrekturlesen des Manuskriptes und die vielen hilfreichen Hinweise im Zusammenhang mit dessen Gestaltung. Weiterhin danken möchte ich meinen Abteilungsleitern, den Herren Dr.-Ing. Norbert Göbel und Dr.-Ing. Stephan Theobald, für die vielen fachlichen Diskussionen und die Durchsicht des Manuskriptes.

Meinen Kollegen am Institut danke ich für ihre Unterstützung. Weiterhin bedanke ich mich bei meinen wissenschaftlichen Hilfskräften Stanka Savova und Mark Musall.

Karlsruhe, im Juli 2001

Frank Ritzert

## Kurzfassung

Regelungsbauwerke sind in nahezu allen großen Flüssen in Europa und in der ganzen Welt zu finden. Sie wurden gebaut, um der unterschiedlichsten Probleme, die dem Menschen bei der Nutzbarmachung von Flüssen entstanden sind, Herr zu werden. Heutzutage macht insbesondere die Nutzung eines Flusses als Transportweg in den meisten Fällen einen Eingriff des Menschen in die Natur notwendig. Oft zeigt sich jedoch nach dem Um- oder Ausbau eines Flusses, daß die vorhergesagten nicht mit den tatsächlich eintretenden Veränderungen übereinstimmen.

Daher bedarf der Aus- und Umbau von Regelungsbauwerken aufgrund der erforderlichen, zumeist sehr hohen Investitionen eines zuverlässigen Prognosewerkzeugs, das die Bewertung der Folgen zulässt.

Die Hauptfragestellung dieser Arbeit geht dahin, vorherzusagen, wie sich Flussregelbauwerke, insbesondere Buhnen, auf das Strömungsgeschehen und auf die Wasserspiegellage auswirken.

Das Strömungsgeschehen an Regelungsbauwerken wird durch die Bildung von großräumigen Wirbelstrukturen stark beeinflusst. Diese Wirbelbildung macht eine Vorhersage der Wirkung der Einbauten in den Fluß besonders schwierig. Wirbelbildungen sind äußerst komplexe zeit- und ortsabhängige Vorgänge und daher mathematisch sehr schwer zu erfassen. Es war nicht das Ziel dieser Arbeit, Aufschluß über den Verlauf und die Bildung von Wirbelstrukturen an Flußregelungsbauwerken zu geben. Vielmehr wurden in dieser Arbeit auf der Basis der Energie- und Kontinuitätsgleichungen die Charakteristiken der Hauptströmung analysiert, um für die Praxis verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

Es wurde ein Computerprogramm entwickelt, das auf der Basis des Einstein'schen Rauheitenüberlagerungsverfahrens für eine Quantifizierung der hydraulischen Wirkung von den in ein Fließgewässer eingebauten Buhnen eingesetzt werden kann. Die diesem Programm vorgegebenden Eichparameter wurden aus Modellversuchen ermittelt.

Es wurde gezeigt, daß diese Widerstandsbeiwerte im Zusammenspiel mit einer Spiegellinienberechnung zu Berechnungsergebnissen führen, die die Einflüsse von Buhnen in guter Näherung quantifizieren. Das Computerprogramm wurde in das Programm BuSim (Ritzert, 1999) eingearbeitet. Dieses ist in der Lage Längsschnitte von Wasserspiegellagen, Geschwindigkeiten und Abflüssen auf der Grundlage von Landvermessungsdaten zu berechnen und darzustellen. Dieses ganz speziell für die Problematik Regelungsbauwerke optimierte Berechnungsprogramm hebt sich von anderen eindimensionalen Berechnungsverfahren dadurch ab, daß die Einflüsse Sohlreibung und Formwiderstand, verursacht durch Regelungsbauwerke durch getrennte Koeffizienten modelliert werden.

Im Einzelnen wurden zwei Modellversuche mit unterschiedlichen Randbedingungen zur Verifizierung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens in die Untersuchungen einbezogen. Der erste Modellversuch wurde zur Extraktion der Beiwerte eingesetzt (Eichung), der zweite wurde zur Plausibilisierung der Berechnungsmethode mit den Beiwerten aus dem ersten Versuch benutzt (Validierung).

Weiterhin wurden Naturmessungen an einer mit Buhnen geregelten Fließstrecke des Rheins in einem zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen (2D-HN) Modellverfahren verwendet, um die Berechnungsergebnisse mit denen des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens vergleichen zu können.

Zur weiteren Absicherung der in dieser Arbeit eingesetzten Rauheitsüberlagerungsmethode wurden das Prandtl'sche Freistrahlm- und das Prandtl'sche Mischungsweglängenmodell eingesetzt.

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Berechnungsansätze stehen exemplarisch für eine Methode der "Differenzierung von Widerstandseinflüssen", die die Widerstandswirkung von Bauwerksgeometrien von der Rauheitswirkung der im allgemeinen sandrauhem Sohle trennt. Das hydrodynamisch-numerische Modell beruht damit auf empirischen Formelzusammenhängen, die im Rahmen eines festgelegten Gültigkeitsbereiches physikalisch sinnvolle Resultate liefern.

Diese werden in der vorliegenden Arbeit zur Quantifizierung der hydraulischen Wirkung von nichtüberströmten Buhnen eingesetzt. Anhand der Ergebnisse wird die Leistungsfähigkeit der Berechnungsmethode im Rahmen einer Modellvalidierung überprüft.

Die Veränderungen des hydraulischen Verhaltens eines Fließgewässers durch den Einfluß von Bauwerksgeometrien auf das Energieumwandlungsverhalten (Formverluste, Reibungsverluste) wurden in den Berechnungsansätzen explizit berücksichtigt.

Ein Beispiel dafür ist die Wasserspiegelanhebung und Reduzierung der mittleren Fließgeschwindigkeiten bei nichtüberströmten Buhnen aufgrund der Aufzehrung von Strömungsenergie in Wirbelwalzen innerhalb von Buhnenfeldern. Der Energieverlust in den Buhnenfeldern und die sich dadurch ergebenden Auswirkungen auf das Strömungsgeschehen in der Hauptströmung sind aufgrund des Fehlens von Widerstandsgesetzen für umströmte Buhngeometrien bisher nicht berechenbar. Die hier vorgestellten und auf eine derartige Fragestellung erstmals angewendeten Berechnungsansätze sollen eine Quantifizierung der Auswirkung dieses Energieverlustes auf die Wasserspiegellage und die Fließgeschwindigkeit ermöglichen.

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Regelungsbauwerke und Wirbelbildung	3
1.2	Zielsetzung und Inhalt der Arbeit	4
1.3	Zur Erstellung von Berechnungsverfahren	6
<b>2</b>	<b>Allgemeine Aspekte zu Regelungsbauwerken</b>	<b>8</b>
2.1	Literaturrecherche	8
2.2	Ökologische Aspekte beim Aus- und Umbau von Flußregelungsbauwerken	12
2.2.1	Positive Aspekte von Buhnen in ökologischer Hinsicht	12
2.2.2	Negative Aspekte von Buhnen in ökologischer Hinsicht	12
2.2.3	Fazit	12
<b>3</b>	<b>Widerstandsbeiwerte für Flußregelungsbauwerke</b>	<b>13</b>
3.1	Wirbelbildungen an Flußregelungsbauwerken	14
3.2	Grundlagen zur Übertragung von Widerstandsbeiwerten auf Flußregelungsbauwerke aus der Literatur	17
3.2.1	Übertragung von $\zeta$ -Werten ohne Trennung von Form und Reibungswiderstand	19
3.2.2	Übertragung von $\zeta$ -Werten mit getrennten Anteilen an Form- und Reibungswiderstand	24
3.2.3	Übertragung von $C_w$ -Werten ohne Trennung von Form- und Reibungswiderstand	29
3.2.4	Übertragung von Widerstandsbeiwerten von Formkörpern mit Trennung von Reibungs- und Formwiderstand	33
3.3	Zusammenfassung des Kapitels und Ansätze zur Verbesserung der Genauigkeit der Formwiderstandsbeiwerte	36
<b>4</b>	<b>Die Rauheitsüberlagerungsmethode</b>	<b>38</b>
4.1	Grundlagen zur Trennung von Widerstandswirkungen mit RÜ-Ansätzen	38
4.2	Grundlagen zur Herleitung des analytischen Ansatzes	39
4.3	Die Geschwindigkeitsformeln nach Strickler und nach Darcy-Weisbach	41
4.4	Der RÜ-Ansatz nach Einstein, am Beispiel von Buhnen	42
4.5	Folgerungen aus dem Einstein'schen RÜ-Ansatz: Die Rauheitsüberlagerungsbedingung	47

4.6	Folgerungen aus dem Einstein'schen RÜ-Ansatz: Die Einzelwiderstände im Bezug zum Gesamtwiderstand	49
<b>5</b>	<b>Hydraulische Modellversuche</b>	<b>52</b>
5.1	Der BAW-Versuch (Felkel, 1975)	52
5.2	Der Versuch der TU Wien (Ogris, 1994)	57
<b>6</b>	<b>Auswertung der Modellversuche</b>	<b>62</b>
6.1	Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitsbetrachtung	62
6.2	Drei Methoden zur Ermittlung von Widerstandskoeffizienten für Regelungsbauwerke	67
6.3	Auswertungen nach der RÜ-Methode	68
6.3.1	Verfahren zur Gewinnung von Widerstandsbeiwerten mit dem RÜ-Ansatz	71
6.3.2	Bestimmung der äquivalenten Sohlrauheitshöhe in dem BAW-Modellversuch	72
6.3.3	Berechnung der Widerstandsbeiwerte für die Sohle und für die Regelungsbauwerke (hier Buhnen)	75
6.3.4	Verknüpfung der Reibungszahl $\lambda_{\text{rege.}}$ mit dem Koeffizienten $\kappa$	77
6.3.5	Experimentelle Bestimmung $\kappa$ (Kappa)	79
6.3.5.1	Abhängigkeit von $\kappa$ vom Einschränkungmaß $b_f/b_g$ sowie vom Abstands- zu Längenverhältnis $a_b/l_b$ der Buhnen	81
6.3.5.2	Abhängigkeit von $\kappa$ von der Größe der vorgegebenen Abflußfläche	85
6.4	Auswertung nach der Prandtl'schen Freistrahtheorie	88
6.4.1	Berechnungsmethode nach der Prandtl'schen Freistrahtheorie	89
6.5	Auswertungen nach dem Prandtl'schen Mischungsweglängenmodell	96
6.6	Schlußfolgerungen	98
<b>7</b>	<b>Einsatz der Widerstandsbeiwerte für Prognoserechnungen</b>	<b>100</b>
7.1	Herleitung der Berechnungsansätze	100
7.1.1	Validierung der Berechnung für nichtüberströmte Buhnen	104
7.2	Anwendung der Berechnungsansätze auf natürliche Verhältnisse	105
7.2.1	Das Programm BuSim (Berechnung des Rheins bei Iffezheim)	107

7.2.2	Parametervariation mit dem Programm BuSim und Vergleich mit den Ergebnissen von Ogris	110
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>119</b>

Einige Variablen und Zeichen sind nicht in der folgenden Liste aufgeführt. Sie haben nur lokale Bedeutung und sind an der entsprechenden Stelle im Text definiert.

**Abkürzungen:**

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
HN	hydrodynamisch-numerisch
RÜ	Rauheitsüberlagerung

**Dimensionen:**

[L]	Längeneinheit
[T]	Zeiteinheit
[M]	Masseneinheit
[-]	dimensionslos

**Variablen und Konstanten**

A	[L <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
A <sub>⊥</sub>	[L <sup>2</sup> ]	abgeschottete Querschnittsfläche
A <sub>→</sub>	[L <sup>2</sup> ]	frei durchströmbare Querschnittsfläche
A <sub>↓</sub>	[L <sup>2</sup> ]	vertikal projizierte Querschnittsfläche
a <sub>b</sub>	[L]	Buhnenabstand
a <sub>1</sub> , b <sub>1</sub>	[L]	Koeffizienten zur Berücksichtigung der Anordnung von Kammern bei Labyrinthdichtungen
A <sub>ges</sub>	[L <sup>2</sup> ]	abflußwirksame Querschnittsfläche
A <sub>i</sub>	[L <sup>2</sup> ]	anteilige Querschnittsfläche im gegliederten Gerinne
A <sub>o</sub>	[L <sup>2</sup> ]	Oberfläche des umströmten Körpers
A <sub>p</sub>	[L <sup>2</sup> ]	Projektionsfläche des umströmten Körpers (Schattenfläche)
b <sub>f</sub>	[L]	Fahrrinnenweite
b <sub>g</sub>	[L]	Breite des unverbauten Flusses (Glattbreite)
C	[-]	Koeffizient des reinen Wirbelverlustes (ohne Sohlrauheitswirkung)
C'	[-]	Koeffizient des Formverlustes eines Standardeinschränkungsbauwerks
c <sub>w</sub>	[-]	Formwiderstandsbeiwert (Umströmung von Körpern)
D	[L]	hydraulischer Durchmesser
D <sub>j</sub>	[L]	anteiliger hydraulischer Durchmesser im gegliederten Gerinne
e	[ML <sup>2</sup> /T <sup>3</sup> ]	sekundlich zwischen zwei Querschnitten im Abstände 1 in Wirbel umgesetzte Energie
e'	[ML <sup>2</sup> /T <sup>3</sup> ]	sekundlicher Energieumsatz auf der Oberfläche der Länge 1
e''	[ML <sup>2</sup> /T <sup>3</sup> ]	sekundlich in der Volumeneinheit vernichtete Energie
F <sub>d</sub>	[ML/T <sup>2</sup> ]	Kraft, die auf einen Körper aufgrund seines Formwiderstandes einwirkt
F <sub>r</sub>	[ML/T <sup>2</sup> ]	Kraft, die auf einen Körper aufgrund seines Reibungswiderstandes einwirkt



## Nomenklatur

---

$F_w$	$[ML/T^2]$	Kraft, die auf einen Körper aufgrund seines Gesamtwiderstandes einwirkt
$f_m$	$[-]$	Formbeiwert der den Einfluß des Gerinnequerschnitts auf die Reibungszahl berücksichtigt
$g$	$[L/T^2]$	Schwerebeschleunigung
$h$	$[L]$	Wassertiefe
$\Delta h$	$[L]$	Geodätischer Sohlhöhenunterschied, der auf die Fließlänge $l$ gesehen an einem Fluß besteht
$h_b$	$[L]$	Höhe der Buhnen
$h_{\text{prognose}}$	$[L]$	prognostizierte Wasserspiegellage
$h_{\text{schätz}}, h_{\text{ist}}$	$[L]$	Iterationsgrößen zur Berechnung der transzendenten Gleichung für $\lambda_{\text{sohle}}$
$i$	$[-]$	Energieliniengefälle
$i_s$	$[-]$	Sohlgefälle
$j$	$[-]$	Zählvariable
$K's$	$[-]$	Koeffizienten zur Normierung des Koeffizienten $C'$ auf Standardbedingungen
$k_{ss}$	$[L]$	repräsentativer Durchmesser des Sohlenmaterials; äquivalente Sandrauheitshöhe
$k_{str}$	$[L^{1/3}/T]$	Stricklerbeiwert
$l$	$[L]$	Fließlänge
$l_b$	$[L]$	Buhnenlänge
$M$		Böschungsneigung der Buhnen quer zur Fließrichtung
$\Delta p$	$[M/(LT^2)]$	geodätischer Druckhöhenverlust
$Q$	$[L^3/T]$	Abfluß
$R$	$[L]$	hydraulischer Radius
$Re$	$[-]$	Reynoldszahl
$R_j$	$[L]$	anteiliger hydraulischer Radius im gegliederten Gerinne
$U$	$[L]$	benetzter Umfang
$U_{\text{buhne}}$	$[L]$	benetzter Umfang der "Buhnenrauheit" (vertikale Trennfläche)
$U_{\text{ges}}$	$[L]$	gesamter benetzter Umfang
$U_j$	$[L]$	anteilige benetzte Umfänge im gegliederten Gerinne
$U_{\text{sohle}}$	$[L]$	benetzter Umfang im Sohlbereich
$v_m$	$[L/T]$	mittlere Geschwindigkeit (auch im gegliederten Gerinne)
$v$	$[L/T]$	Geschwindigkeit
$V$	$[L^2]$	Wasservolumen pro $m$ Länge
$V_{\text{buhne}}$	$[L/T]$	mittlere Geschwindigkeit im Buhnenfeld
$V_{\text{fahr}}$	$[L/T]$	mittlere Geschwindigkeit in der Fahrrinne
$v(y)$	$[L/T]$	Geschwindigkeit im Wandabstand $y$
$z$	$[L]$	Wasserspiegelanhebung bei Buhnen im Vergleich mit Parallelwerken
$\delta$	$[L]$	Grenzschichtdicke, hier festgelegt nach der 99%-Regel
$\kappa$	$[-]$	Proportionalitätskonstante im Wirbelzähigkeitsansatz; diese wird im Experiment bestimmt und repräsentiert den Buhnenwiderstand

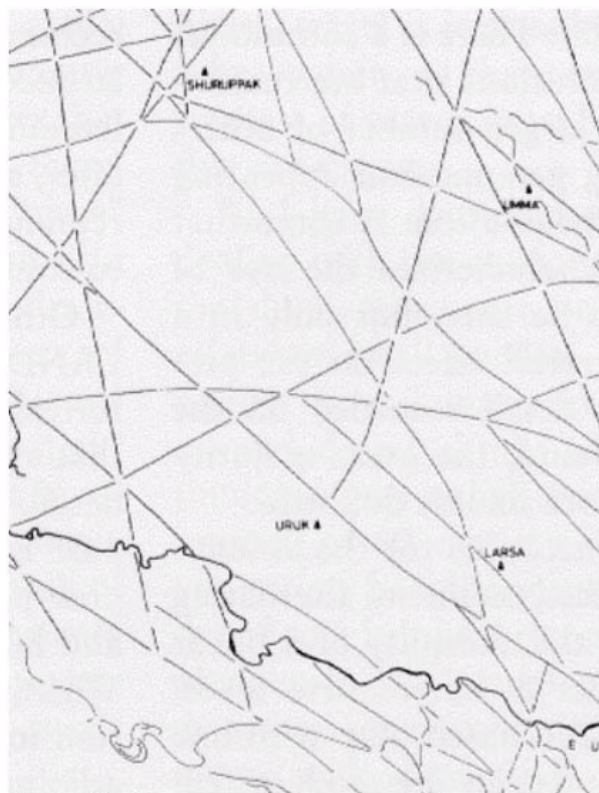
## Nomenklatur

---

$\bar{\kappa}$	[-]	Proportionalitätskonstante, die bei Mittelung über das Einschränkungmaß und/oder das Längen- zu Abstandsverhältnis von Buhnen berechnet wird
$\lambda$	[-]	Reibungszahl (Durchströmung von Körpern)
$\lambda_{\text{buhne}}$	[-]	Buhnenreibungszahl
$\lambda_{\text{ges}}$	[-]	Gesamtreibungszahl im gegliederten Gerinne
$\lambda_j$	[-]	anteilige Reibungszahl im gegliederten Gerinne
$\lambda_{\text{sohle}}$	[-]	Reibungszahl der Sohle; im gegliederten Gerinne mit anteiligen hydraulischen Durchmessern aus der Gleichung für den Übergangsbereich (Prandtl-Colebrook) berechnet
$\eta$	[M/LT]	dynamische Viskosität
	[L <sup>2</sup> /T]	kinematische Zähigkeit
	[L <sup>2</sup> /T]	Wirbelzähigkeit ("Zähigkeit" aufgrund von Turbulenz")
$\Pi_i$	[-]	Pi nach dem Buckinghamtheorem (i=1,...,5) fünf dimensionslose Kennzahlen
$\rho$	[M/L <sup>3</sup> ]	Dichte des Wasser
$\tau_j$	[M/(T <sup>2</sup> L)]	anteilige Schubspannungen im gegliederten Gerinne
$\tau_{\text{int}}$	[M/(T <sup>2</sup> L)]	Interaktionsschubspannung
$\tau(y)$	[M/(T <sup>2</sup> L)]	Schubspannung im Wandabstand y
$\zeta$	[-]	Formwiderstandsbeiwert (Durchströmung von Körpern)

## 1 Einleitung

Regelungsbauwerke sind in nahezu allen großen Flüssen in Europa und in der ganzen Welt zu finden. Sie wurden gebaut, um den unterschiedlichsten Problemen, die dem Menschen bei der Nutzbarmachung von Flüssen entstanden sind, Herr zu werden. Die ältesten Nutzungsarten sind der Transport und die Bewässerung. So kann z.B. aus Luftbildern, die in der Umgebung von Euphrat und Tigris aufgenommen wurden, der Verlauf von alten Bewässerungskanälen, die sich unauslöschlich in die alluviale Erde eingegraben haben, herausgelesen werden (vgl. Abbildung 1-1).



**Abbildung 1-1:** Verlauf von alten Bewässerungskanälen im Bereich des Euphrat bei Uruk, nach LANDSAT-Aufnahmen rekonstruiert

Zitat aus "Saat und Ernte, Handwerk und Industrie", in <http://www.reartworld.com>:

Die Menschen, die hier in vorgeschichtlicher Zeit lebten, haben den Kreislauf des Lebens erkannt, sie haben das Entstehen und Vergehen von Pflanzen, Tieren und Menschen beobachtet und sie haben gelernt, daß man zum eigenen Nutzen lenkend in diesen Kreislauf eingreifen kann. Das ist die erste große Entdeckung. Wir sehen, wie sie pflanzen, säen und ernten. Sie können das Wunder noch kaum begreifen, erkennen aber schon, daß man ihm immer wieder nachhelfen muß. Wo das Gedeihen der

ersten Anpflanzungen, der spärlichen Felder, durch Trockenheit gefährdet ist, finden sie einfache Möglichkeiten, den Boden zu bewässern. Sie ziehen Gräben von den Flüssen zu den Feldern und dämmen die Flüsse gegen Überschwemmungen ein.

Heutzutage macht insbesondere die Nutzung eines Flusses als Transportweg in den meisten Fällen einen Eingriff des Menschen in die Natur notwendig. Andere Nutzungsarten, die einen Eingriff voraussetzen, sind die Energiegewinnung, die Schadstoffableitung oder die Bewässerung.

Damit wird ein natürliches Gleichgewicht, das in langer Zeit entstanden ist, gestört. Über kurz oder lang kann sich aufgrund der Strömungsdynamik ein neues Gleichgewicht einstellen, das in Einklang mit der o.a. Nutzbarmachung stehen sollte. Oft zeigt sich jedoch nach dem Um- oder Ausbau eines Flusses, daß die erwarteten Veränderungen nicht mit den sich einstellenden übereinstimmen. Der Grund hierfür ist sicherlich die Komplexität des Strömungsvorganges in natürlichen Fließgewässern, die zuverlässige Aussagen über Veränderungen nach Um- und Ausbaumaßnahmen oftmals nahezu unmöglich macht.

Auch ist Wissen, das Menschen in früheren Jahren vor Ort im Umgang mit dem strömenden Fluß durch langjährige Erfahrung gewonnen hatten, heute durch weitgehende Automatisierung und Maschinerisierung verloren gegangen. So sind die Folgen des Einbaus von Regelungsbauwerken in den strömenden Fluß meistens auch heute noch nicht vorhersehbar. Insbesondere ist die Quantifizierung der Auswirkungen von baulichen Maßnahmen auf die hydraulischen Verhältnisse aufgrund der komplexen Strömungsgeometrie in natürlichen Flüssen sehr schwierig.

Gerade aber weil aufgrund vieler in der Vergangenheit falsch oder zu intensiv durchgeführter flußbaulicher Maßnahmen in Zukunft vermehrt Umbaumaßnahmen erforderlich werden, ist die Entwicklung von Untersuchungsmethoden zur Quantifizierung hydraulischer Wirkungen notwendig.

Zur Lösung dieses Problems werden zum einen Versuche in verkleinerten physikalischen Modellen durchgeführt und zum anderen rechnergestützte Verfahren angewendet. Modellversuche sind in der Lage, die hydraulischen Verhältnisse sehr genau wiederzugeben, da selbst komplizierteste Strömungsvorgänge in derselben Art und Weise wie in der Natur ablaufen. Die rechnergestützten Verfahren hingegen arbeiten mit einer Vielzahl von empirisch zu ermittelnden Parametern und vernachlässigen oft wesentliche hydraulische Wirkungen. Will man diese Wirkungen berücksichtigen, so stößt man schnell an die Grenzen der Leistungsfähigkeit heutiger Rechnerkapazitäten und Simulationsmodelle. Dennoch werden rechnergestützte Verfahren schon jetzt angewandt und in Zukunft vermehrt angewendet werden, weil zum einen die Größe des zu untersuchenden Fließgewässermodells im Gegensatz zum hydraulischen Modell kein räumliches (Platz-)Problem darstellt und zum

anderen der Zeit- und Kostenaufwand zur Erstellung dieser Modelle, insbesondere auch im Zusammenhang mit steigenden Rechnerleistungen und Kapazitäten, immer kleiner wird. Von großem Interesse ist es daher, zu erfahren, wie sich Regelungsbauwerke grundsätzlich auf das Strömungsgeschehen auswirken. In dieser Arbeit werden daher Berechnungsansätze entwickelt, die auf Fragestellungen, die insbesondere im Zusammenhang mit einer Nutzung des Flusses als Transportweg stehen, die notwendigen Antworten liefern sollen.

## 1.1 Regelungsbauwerke und Wirbelbildung

Das Strömungsgeschehen an Regelungsbauwerken wird durch die Bildung von großräumigen Wirbelstrukturen stark beeinflusst. Diese Wirbelbildung macht eine Vorhersage der Wirkung der Einbauten in den Fluß besonders schwierig. So schreibt Lugt (1979) zu Wirbelströmungen:

Diese Bildung von Wirbeln allerdings ist ein faszinierender und ungewöhnlicher Vorgang. Wirbel werden seit prähistorischer Zeit als mechanisches Prinzip angesehen, um fundamentale Naturerscheinungen zu erklären. Wirbel wurden im Wasser, in der Luft und am Firmament beobachtet. Ihnen maß man mythische und übernatürliche Bedeutung bei.

So sind im keltischen und germanischen Kulturkreis Wirbelmotive und Sagen über Wirbel weitverbreitet. Im Strudel entsteht Leben. Das heidnische Spiralmotiv für Leben wird sogar in den christlichen Kult aufgenommen. Die Abbildung 1-2 zeigt ein schottisches Kreuz, auf dem die Figur des Gekreuzigten als Symbol des neuen Lebens durch eine Spirale ersetzt ist.



**Abbildung 1-2:** Schottisches Kreuz mit Spirale als Symbol des Lebens (aus Mackenzie, 1970)

Wirbelbildungen sind äußerst komplexe zeitabhängige Vorgänge und daher mathematisch sehr schwer zu erfassen. Es soll nicht das Ziel dieser Arbeit sein, Aufschluß über den Verlauf und die Bildung von Wirbelstrukturen an Flußregelungsbauwerken zu geben. Vielmehr werden in dieser Arbeit auf der Basis der Energie- und Kontinuitätsgleichungen die Charakteristiken der Hauptströmung analysiert, um für die Praxis verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

## 1.2 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit

Der Aus- und Umbau von Regelungsbauwerken bedarf aufgrund der erforderlichen, zumeist sehr hohen Investitionen eines zuverlässigen Prognosewerkzeugs, das die Bewertung der Folgen zulässt. Die vorliegende Arbeit soll für diese Art der Aufgabenstellung durch das Aufzeigen von praxisorientierten Modellrechnungen Lösungsmöglichkeiten zeigen.

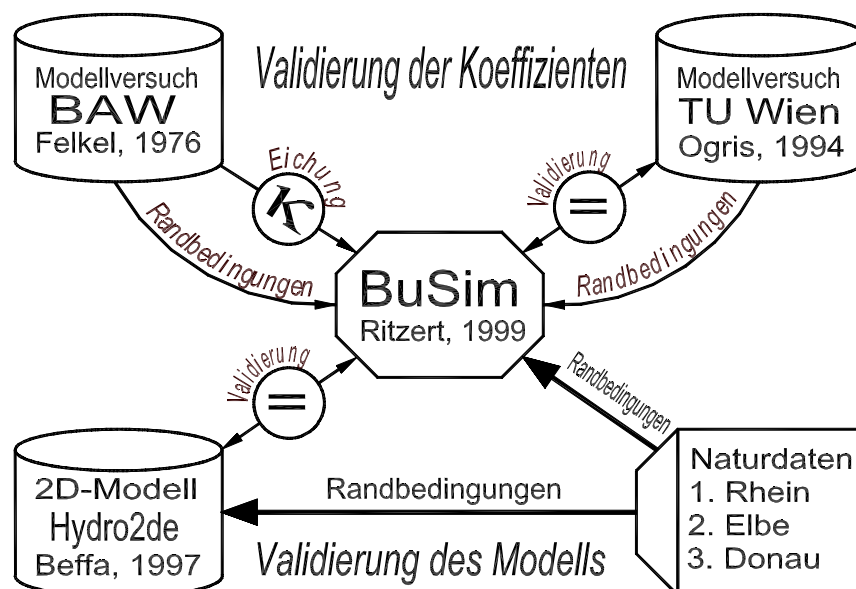
Aus diesem Grund wurden verschiedene Verfahren zur Prognose von hydraulischen Veränderungen aufgrund von Umbauarbeiten im natürlichen Fluß entwickelt. Für kleinräumige Umbaumaßnahmen haben sich hydraulische Modellversuche bewährt. Hierbei wird ein verkleinertes Abbild der natürlichen Strömungsverhältnisse durch ein physikalisches Modell geschaffen. In physikalischen Modellen lassen sich z.B. Strömungsgrößen wie Fließgeschwindigkeit und Wasserspiegellage messen. So können die Veränderungen dieser Größen nach Umbauvarianten, die den Geplanten in der Natur entsprechen, prognostiziert werden. Allerdings ist der Zeit- und Kostenaufwand für derartige Modelle groß.

Daher wurden neben dieser Untersuchungsmethode auch rechnergestützte Verfahren entwickelt. Diese beruhen zum einen Teil auf der sogenannten Koeffizientenhydraulik, zum anderen werden semiempirische Verfahren entwickelt, die auf der Lösung der theoretischen Grundgleichungen z.B. von Navier-Stokes beruhen. Die Koeffizientenhydraulik greift zum Teil auf Formelzusammenhänge zurück, die physikalisch nicht begründet sein müssen. So können Meßergebnisse, die aus hydraulischen Modellen gewonnen wurden, durch Regressionsrechnung zu Formeln verarbeitet werden, die unter Einsatz anderer hydraulischer Parameter zur Prognose von natürlichen Verhältnissen eingesetzt werden.

Voraussetzung ist hierbei, daß insbesondere die geometrischen Randbedingungen des Modells mit denen der Natur übereinstimmen. In der hier vorliegenden Arbeit sollen zum einen physikalisch begründete Formeln aus der Literatur zur Lösung der Problemstellung "Ableitung von Widerstandsbeiwerten zu Regelungsbauwerken im Flußausbau" verwendet werden, zum anderen jedoch auch die o.a. angeführten Regressionsverfahren aus der Koeffizientenhydraulik.

In dieser Arbeit sollen Widerstandsbeiwerte aus hydraulischen Modellversuchen mit Regelungsbauwerken unter Zugrundelegung eines RÜ-Ansatzes<sup>1</sup> abgeleitet werden. Es wird gezeigt, daß diese Widerstandsbeiwerte im Zusammenspiel mit einer Spiegellinienberechnung zu Berechnungsergebnissen führen, die die Einflüsse von Flußregelungsbauwerken in guter Näherung quantifizieren. Das auf der Grundlage des RÜ-Modells basierende Berechnungsverfahren wurde in das Rechnerprogramm BuSim (Ritzert, 1999) eingearbeitet. Dieses ist in der Lage Längsschnitte von Wasserspiegellagen, Geschwindigkeiten und Abflüssen auf der Grundlage von Landvermessungsdaten zu berechnen und darzustellen. **Dieses ganz speziell auf die Problematik Regelungsbauwerke hin entwickelte Berechnungsprogramm hebt sich von anderen eindimensionalen Berechnungsverfahren dadurch ab, daß der Widerstand aufgrund von Sohlreibung und der Formwiderstand, verursacht durch Regelungsbauwerke in Form von Koeffizienten getrennt voneinander vorgegeben werden.**

Im Einzelnen werden zwei Modellversuche mit unterschiedlichen Randbedingungen zur Verifizierung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens in die Untersuchungen einbezogen (vgl. Abbildung 1-3). Der erste Modellversuch wird zur Extraktion der Beiwerte eingesetzt (Eichung), der zweite wird zur Plausibilisierung der Berechnungsmethode mit den Beiwerten aus dem ersten Versuch benutzt (Validierung).



**Abbildung 1-3:** Schemaskizze zum Inhalt der Arbeit

<sup>1</sup> RÜ = Rauheitsüberlagerung

Weiterhin werden Naturmessungen an einer mit Buhnen geregelten Fließstrecke des Rheins in einem zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen (2D-HN) Modellverfahren<sup>2</sup> verwendet, um die Berechnungsergebnisse mit denen des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens vergleichen zu können.

Das zweidimensionale tiefengemittelte Berechnungsverfahren wird auf einen vermessenen Ist-Zustand hin geeicht, um eine kontinuierliche Information über die Wasserspiegel- und Geschwindigkeitsverhältnisse zu erhalten. Aus diesen Ergebnissen, die einen hohen Detaillierungsgrad aufweisen, werden dann mit einem Geoinformationssystem Schnittergebnisse abgeleitet, die mit den Ergebnissen aus den Berechnungen mit dem hier eingesetzten Rauheitsüberlagerungsmodell (RÜ-Modell) verglichen werden können.

### 1.3 Zur Erstellung von Berechnungsverfahren

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Berechnungsansätze stehen repräsentativ für eine Methode der "Differenzierung von Widerstandseinflüssen", die die Widerstandswirkung von Bauwerksgeometrien von der Rauheitswirkung der im allgemeinen sandrauhem Sohle trennt. Sie stützt sich auf im DVWK-Merkblatt 220 (DVWK-Merkblätter 220, 1991) beschriebene Berechnungsmethoden. Das hydrodynamisch-numerische Modell beruht damit auf empirischen Formelzusammenhängen, die im Rahmen eines festgelegten Gültigkeitsbereiches physikalisch sinnvolle Resultate liefern.

Diese werden in der vorliegenden Arbeit zur Quantifizierung der hydraulischen Wirkung von nichtüberströmten Buhnen eingesetzt. Anhand der Ergebnisse wird die Leistungsfähigkeit der Berechnungsmethode im Rahmen einer Modellvalidierung überprüft.

Die Veränderungen des hydraulischen Verhaltens eines Fließgewässers durch den Einfluß von Bauwerksgeometrien auf das Energieumwandlungsverhalten (Formverluste, Reibungsverluste) werden in den Berechnungsansätzen explizit berücksichtigt.

Ein Beispiel dafür ist die Wasserspiegelanhebung und Reduzierung der mittleren Fließgeschwindigkeiten bei nichtüberströmten Buhnen aufgrund der Aufzehrung von Strömungsenergie in Wirbelwalzen innerhalb von Buhnenfeldern. Der Energieverlust in den Buhnenfeldern und die sich dadurch ergebenden Auswirkungen auf das Strömungsgeschehen in der Hauptströmung (Interaktion) sind aufgrund des Fehlens von Widerstandsgesetzen für umströmte Buhngeometrien bisher nicht berechenbar. Die hier vorgestellten und auf eine derartige Fragestellung erstmals angewendeten Berechnungsansätze sollen eine Quantifizierung der Auswirkung dieses Energieverlustes auf die Wasserspiegellage und die Fließgeschwindigkeit ermöglichen.

---

<sup>2</sup> hydro2de, Beffa (1997)



---

Die Berechnungsansätze sind auch auf andere flußbauliche Regelungsmaßnahmen, wie z.B. naturnahe Parallelwerke (Nestmann, 1991) und Sohlschwellen anwendbar.

Daher sollen die aus den hier vorgestellten Berechnungsverfahren gewonnenen Ergebnisse als Entscheidungsgrundlage dafür dienen, ob Flußausbaumaßnahmen mit Hilfe von physikalischen Modellen untersucht werden müssen. Die dort gewonnenen Versuchsergebnisse werden als Grundlage für oben genannte Berechnungsansätze eingesetzt, um zukünftig bei der numerischen Modellierung eine Veränderung der hydraulischen Größen beim Ausbau mit flußbaulichen Maßnahmen besser prognostizieren zu können.

Die in dieser Arbeit vorgelegten Ergebnisse sind auf einen Gültigkeitsbereich beschränkt, der durch die experimentell untersuchten Geometrien, sowie die Abflußvariation (vgl. Kapitel 6) festgelegt ist (Ritzert, Nestmann, 1996).

## 2 Allgemeine Aspekte zu Regelungsbauwerken

### 2.1 Literaturrecherche

Zur Festlegung eines Gültigkeitsbereiches für Simulationsmodelle wurde in der Literatur nach Flußregelungsbauwerken recherchiert. Die für diese Arbeit zur Quantifizierung der hydraulischen Wirkung der Bauwerke auf die Wasserspiegelentwicklung als wichtig erachteten Aspekte wurden dabei ermittelt. Es zeigte sich, daß es im wesentlichen drei zur Flußregelung eingesetzte Bauwerkselemente sind, für die es sinnvoll ist, Lösungsansätze zur Quantifizierung ihrer hydraulischen Wirkung auf der Basis der in dieser Arbeit eingesetzten Berechnungsverfahren zu erarbeiten. Diese sind:

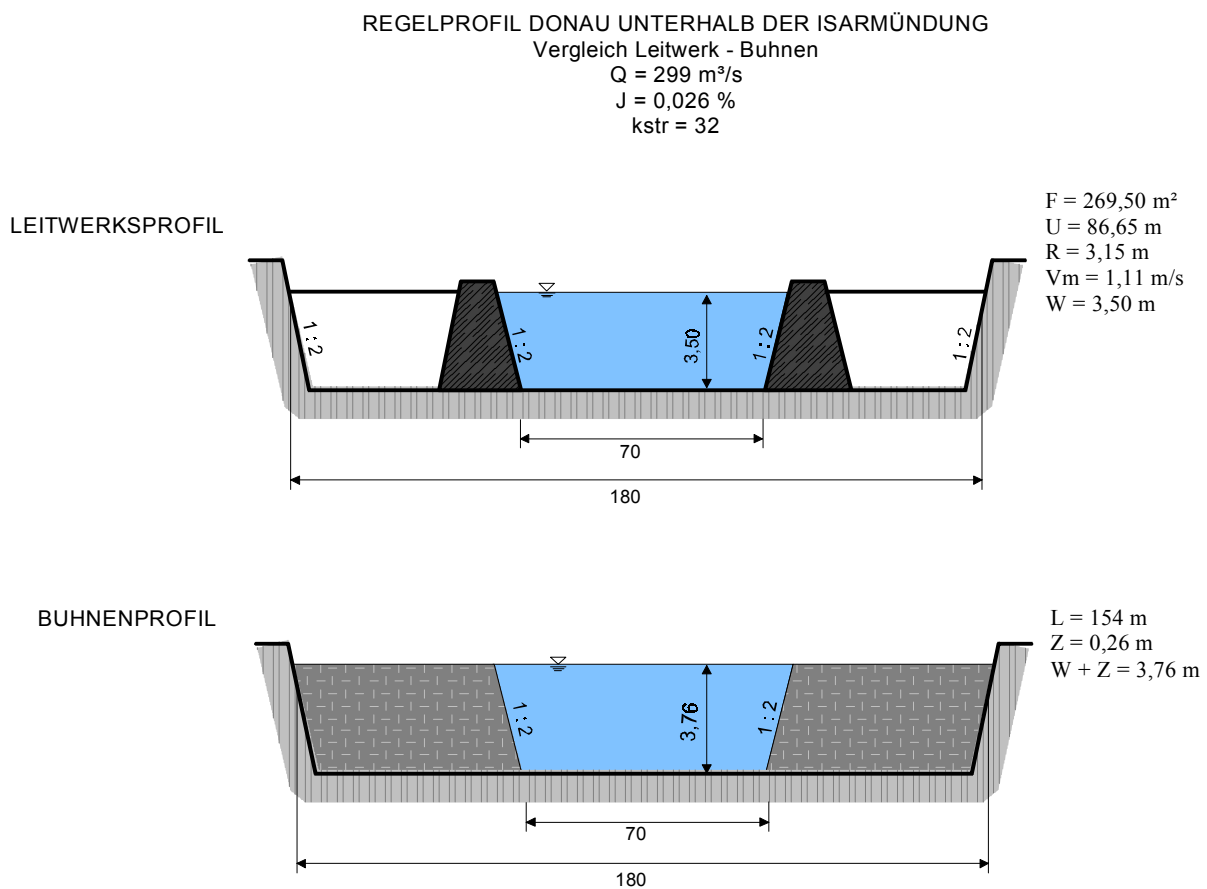
- Bühnen (Querbauten)
- Parallelwerke (Längsbauten)
- Grundswellen

Die nachfolgend aufgeführten, in der Literatur gefundenen, allgemeinen Ausführungen zu Regelungsbauwerken sind gleichermaßen für alle drei Bauwerkstypen zutreffend:

Von grundlegender Bedeutung für die Erstellung der Bauwerke ist in den meisten Fällen das Baumaterial, das an Ort und Stelle zur Verfügung steht. Für die Formgebung zur Erhaltung der Bauwerksstabilität spielt die Art und Größe der Strömungsangriffe eine Rolle. Die durch Bauwerke veränderte Wasserbewegung des Flusses und damit die Beeinflussung der Schiffsverkehrsverhältnisse wird durch die Anordnung der Bauwerke im Fluß, die Neigungen der Körper, deren Höhenlage, den Abstand der Bauwerke untereinander, die Richtung, in der sie in den Strom eingebaut sind, und eine evtl. Kombination mit anderen Flußregelmitteln bestimmt (Neger, 1932).

In der hier vorliegenden Arbeit wird dem Vergleich von Bühnen mit Parallelwerken eine große Bedeutung beigemessen. Dies deshalb, weil sich sehr oft die Frage stellt, ob eine zu regelnde Fließstrecke mit Bühnen oder/und mit Parallelwerken ausgebaut werden soll. Beispiele hierfür sind z.B. die Regelung der Stadtstrecke Bonn/Beuel (Nestmann, 1991) oder eine in Planung befindliche Ausbauvariante der Donau mit flußbaulichen Mitteln. Die in der Abbildung 2-1 angezeigten Ergebnisse hinsichtlich der Wasserspiegelhöhen, die sich bei den beiden Ausbauvarianten unter gleichen hydraulischen Randbedingungen einstellen,

wurden von Ogris 1994 in einem grundlagenwissenschaftlichen Modellversuch für die Donauverhältnisse bei Straubing-Vilshofen ermittelt (vgl. Kapitel 5).



**Abbildung 2-1:** Gegenüberstellung des Versuchsquerschnitts mit eingebauten Bühnen (oben) und eingebautem Parallelwerk nach Ogris (1994)

Die hierbei oft sehr schwierige Entscheidungsfindung ist der ungenügenden Kenntnis über die bei beiden Ausbauvarianten unterschiedliche quantitative hydraulische Wirkung begründet. Welcher Art von Flußregelung der Vorzug zu geben ist, ob einem Ausbau mit Längs- oder/und Querbauten, richtet sich meist nach den örtlichen Verhältnissen und Anforderungen.

Längswerke müssen auf die ganze Länge des Flusses ausgeführt und in gewissen Abständen außerdem noch durch Querdämme mit dem Ufer verbunden sein, während Querbauten in Abständen, die meist der Regelungsbreite nahekommen, gegen den Strom vorgeschoben werden. Neben dem Vorteil, daß das Volumen der Querbauten geringer ist, besteht auch noch die Möglichkeit, die Schiffahrtsrinne, die theoretisch nur annähernd bestimmt werden kann, nachträglich unter geringem Kostenaufwand zu ändern.

Die Ausführung der Bauten quer zur Stromrichtung bedingt andererseits eine starke, gute Sicherung des Bauwerkes gegen Strömungsangriffe. Die Regelung eines Flusses durch Querbauten bietet auch noch den großen Vorteil, daß in die dem Strom entzogenen Flächen selbsttätig Geschiebe eingebracht wird, das nicht nur die Bauwerke und das Ufer schützt, sondern auch zurückgewonnen werden kann.

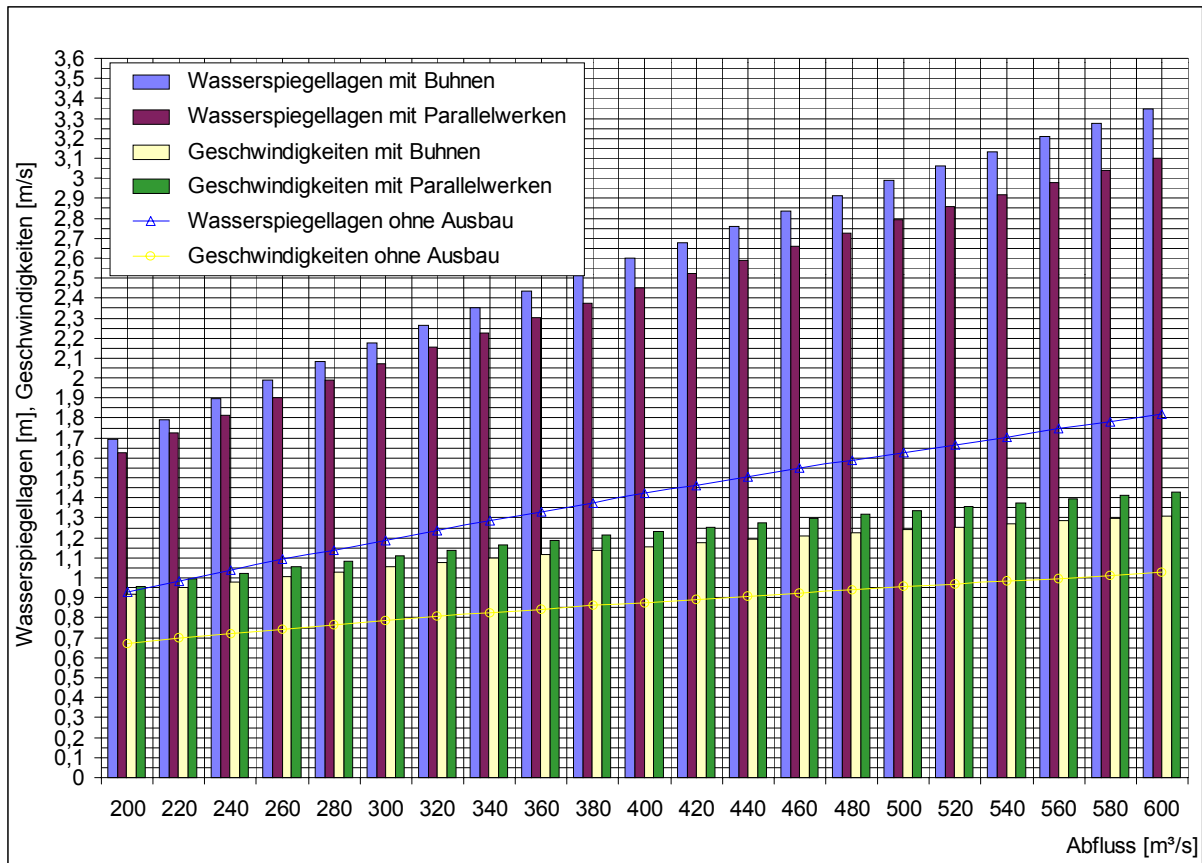
Wenn auch die Schifffahrt eine Uferbildung in der Streichlinie wünscht, so birgt ein Entgegenkommen in dieser Hinsicht eine Gefahr für das gesamte Flußregime in sich: Ein offenes Bühnenfeld entzieht dem Strom mehr Energie als begrenzende Deckwerke; denn im ersten Fall müssen außer den Widerständen der Sohle zwischen den Streichlinien und an den Ufern noch die große Feldwalze und angrenzende kleinere Walzen in Bewegung gehalten werden.

Unter gleichen Umständen (gleiches Gefälle, gleiche Wassermenge) wird durch Anlage einer Bühnenstrecke eine höhere Rauigkeitsziffer erzielt. Die von Winkel (Winkel, 1927) geprägte Bezeichnung des Bühnenfeldes als "Bremskammer" kennzeichnet am besten die Wirkung derselben auf den Fluß. Die Drehbewegung der Wirbel muß durch die Hauptströmung angetrieben werden, was bedeutet, daß dieser Energie entzogen wird und sie damit gebremst wird. Schon Rehbock schreibt 1917,

daß der „Einfluß der Wasserwalzen auf den „Energie-Haushalt“ des Wasserstromes weit wichtiger als der auf die Wasserableitung ist. Die für die Bewegung des Wassers der Walzen und für die Überwindung der dabei zu leistenden Reibungsarbeit, sowie zur Deckung der bei der Mischung verschieden schnell fließender Wasserteile eintretenden Energieverluste erforderliche Energie muß nämlich dem Wasserstrom entnommen werden, da keine andere Energiequelle hierfür zu Verfügung steht.

Daher wird bei einem Ausbau mit Bühnen der Wasserspiegel insgesamt höher verlaufen und sich eine kleinere mittlere Gesamtgeschwindigkeit ergeben als bei einem Ausbau mit Parallelwerken. Die Abbildung 2-2 zeigt quantitativ die prognostizierte Wasserspiegelabsenkung sowie Geschwindigkeitserhöhung bei einer Schließung von an der Elbe vorhandenen Bühnenfeldern (Parallelwerksausbau). Die Grafik wurde mit den hier vorgestellten Berechnungsverfahren erstellt (Nestmann, Ritzert, 1999).

Bei verlandeten Bühnenfeldern würde sich wegen der Verkleinerung der Rauigkeitsziffer die Geschwindigkeit erhöhen und, da sich damit der Durchflußquerschnitt verringert, die Tiefe des Fahrwassers abnehmen. Man hüte sich also davor, größere Strecken, an denen mit Bühnen eine bestimmte Fahrtiefe erreicht wurde, mit Deckwerken abzuschließen (Neger, 1932).



**Abbildung 2-2:** Gegenüberstellung der berechneten Wasserspiegelentwicklung beim Ist-Zustand mit Buhnen und einem fiktiven Ausbau mit Parallelwerken am Elbe-km 372,4-372,7 (Nestmann, Ritzert, 1999)

In der vorliegenden Arbeit wird die o.a. Bremskammerwirkung unter der Vorgabe unterschiedlichster hydraulischer und sedimentologischer Randbedingungen einer Berechnung zugänglich gemacht.

Die Auswirkung einer Abschottung von Buhnenfeldern auf die hydraulischen Verhältnisse (mittlerer Wasserstand, mittlere Geschwindigkeit) kann somit vorausgesagt werden und damit dazu beitragen, die Entscheidungsfindung in der Frage „Buhnen oder Parallelwerke“ leichter zu machen.

## 2.2 Ökologische Aspekte beim Aus- und Umbau von Flußregelungsbauwerken

Biologische Untersuchungen ergaben, daß Buhnen im Gegensatz zu Parallelwerken verschiedene interessante und positive Auswirkungen auf Fließgewässer zeigen und in der Regel ökologische Aufwertungen ergeben.

### 2.2.1 Positive Aspekte von Buhnen in ökologischer Hinsicht

Buhnen beeinflussen die Strömungsverhältnisse so, daß sich eine Vergrößerung der Habitatsheterogenität ergibt. Für Fische sind dabei zum Beispiel neu entstehende Pools wichtig, es können auch Laichplätze entstehen oder Lebensräume für Jungfische in den Flachufeln zwischen Buhnen. In gleicher Weise, aber noch vielfältiger, zeigen sich positive Wirkungen auf die Vergrößerung der Habitatsvielfalt für aquatische Wirbellose.

### 2.2.2 Negative Aspekte von Buhnen in ökologischer Hinsicht

Zwischen Buhnen zeigt sich manchmal eine unnatürlich starke Sedimentation von Feinmaterial, welche als ökologisch nachteilig angesehen wird. An Buhnenstrecken entstehen zwar neue Lebensräume, wenn sie jedoch infolge häufiger Überströmung und Ausspülung zu kurzlebig sind, kann hier ein eigentlicher Falleneffekt beobachtet werden. Zwar kommt dieser Effekt auch in der Natur gelegentlich vor, doch ist in ökologisch intakten Fließgewässern ein Gleichgewicht des Entstehens und Vergehens zu beobachten.

### 2.2.3 Fazit

Es müssen die hydraulischen Eigenheiten der verbauten Fließgewässer vom Ingenieur genau erfasst und schon bei der Bestimmung der Buhnenstandorte sowie beim Bau mit einbezogen werden. Zwar lässt sich mit Buhnen die Struktur- und Habitatsvielfalt fast immer vergrößern, doch sollte das prinzipiell mit Rücksicht auf die ökologischen Eigenheiten des betreffenden Gewässers und die Landschaft geschehen. Diese Arbeit kann dazu beitragen, durch die Analyse der abiotischen Faktoren wie Strömungsgeschwindigkeit und Wasserspiegellage insbesondere im Vergleich mit anderen Regelungsbauwerken (z.B. Parallelwerke) durch Verknüpfung mit den biotischen Parametern Ergebnisse hinsichtlich der ökologischen Bedeutung zu erarbeiten.

### 3 Widerstandsbeiwerte für Flußregelungsbauwerke

Vorbemerkung:

In diesem Kapitel werden Widerstandsbeiwerte verschiedenster Objekte aus der Literatur wiedergegeben mit dem Ziel, die dabei angewandten Methoden auch auf Flußregelungsbauwerke zu übertragen. Daneben werden anhand der Ergebnisse von Modellversuchen Lambdawerte für Gerinneströmungen unter Berücksichtigung verschiedener Rauheiten eines Flussbetts ermittelt, wobei eine von Einstein (1934) beschriebene Rauheitsüberlagerungsmethode angewandt wird.

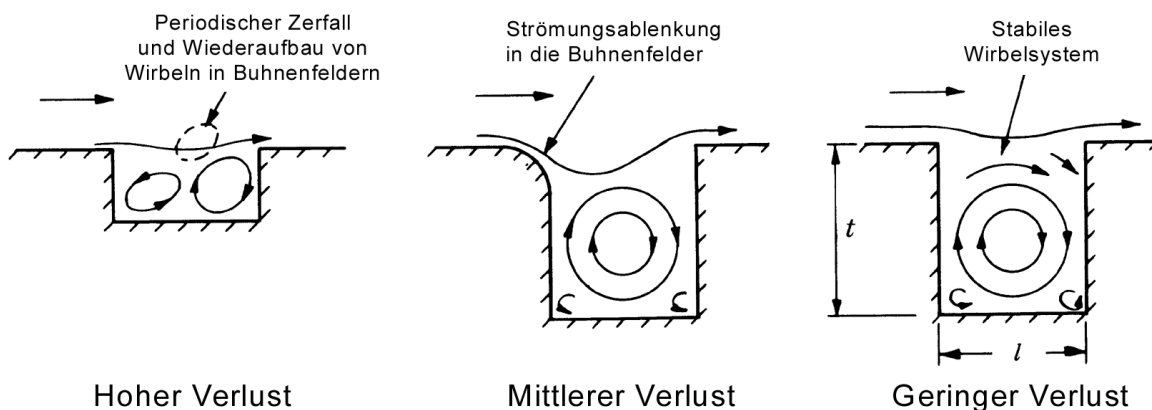
Es wird gezeigt, daß diese Methode, speziell bei naturnahen Szenarien, bei denen sich die Rauheiten von Sohl- und Uferbereich stark unterscheiden, bessere Werte liefert, als die klassischen Methoden. Der Verfasser zeigt, daß insbesondere auch die Wirkung von Buhnen in Fließgewässern mit der Rauheitsüberlagerungsmethode quantifiziert werden kann.

Die Rauheitsüberlagerungsmethode nach Einstein wird in Kapitel 4 beschrieben. Alle weiteren Ergebnisse dieser Arbeit bauen dann darauf auf.

### 3.1 Wirbelbildungen an Flußregelungsbauwerken

Das Widerstandsverhalten von Regelungsbauwerken, wie sie in Flüssen als künstlich errichtete Zwangsstellen eingesetzt werden, hängt im wesentlichen von der Ausbildung und Form der an ihnen entstehenden Rückströmungen (Wirbelbildungen) und Störwellen ab. Durch diese Wirbel- und Wellenbildungen wird dem strömenden Abfluss ein Teil seiner Energie entzogen.

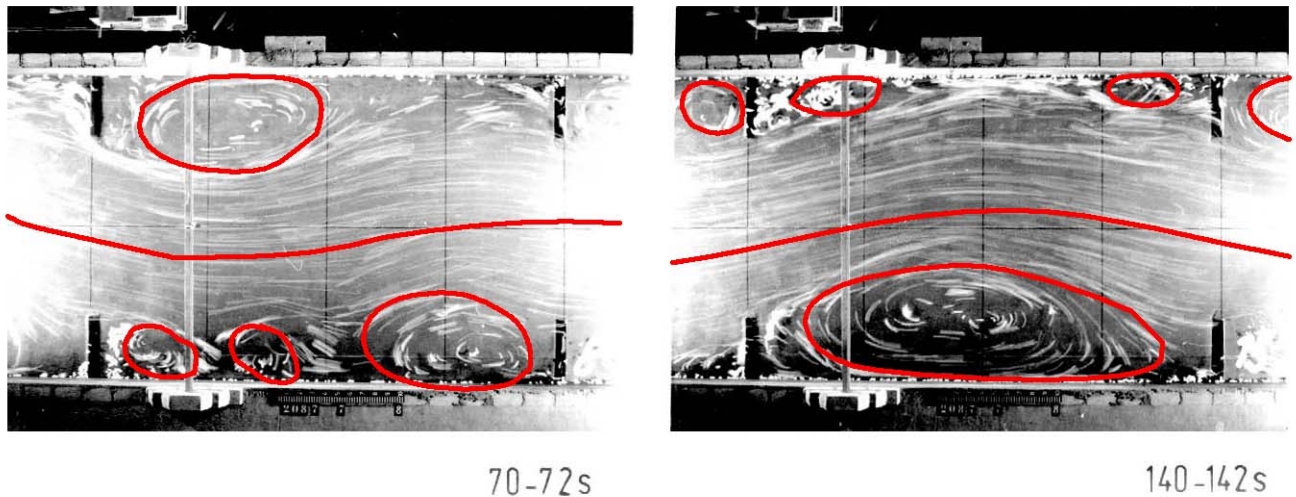
Hierbei kann nach Miller (1978) der sich einstellende Gesamtverlust einer Rückströmzone anhand ihrer Ausbildungsform klassifiziert werden (vgl. Abbildung 3-1). Es ergeben sich sehr hohe Verluste, wenn sich an einem Regelungsbauwerk aufgrund z.B. der Länge einer von der Hauptströmung abgeschotteten „Höhle“ instabile Wirbelsysteme ausbilden. Diese können sich in Abhängigkeit von der Zeit verändern. Das bedeutet, Wirbel zerfallen und bilden sich ständig wieder neu. Dieser instationäre Prozess ist insbesondere bei Buhnen zu beobachten, wenn große Einbauabstände gewählt wurden.



**Abbildung 3-1:** Klassifizierung zur Gesamthöhe des Verlustes bei typischen Rückströmzonenbildungen (Sicht von oben), wie sie bei einer Regelung mit flußbaulichen Mitteln (z.B. Buhnen) entstehen (aus Miller, 1978)

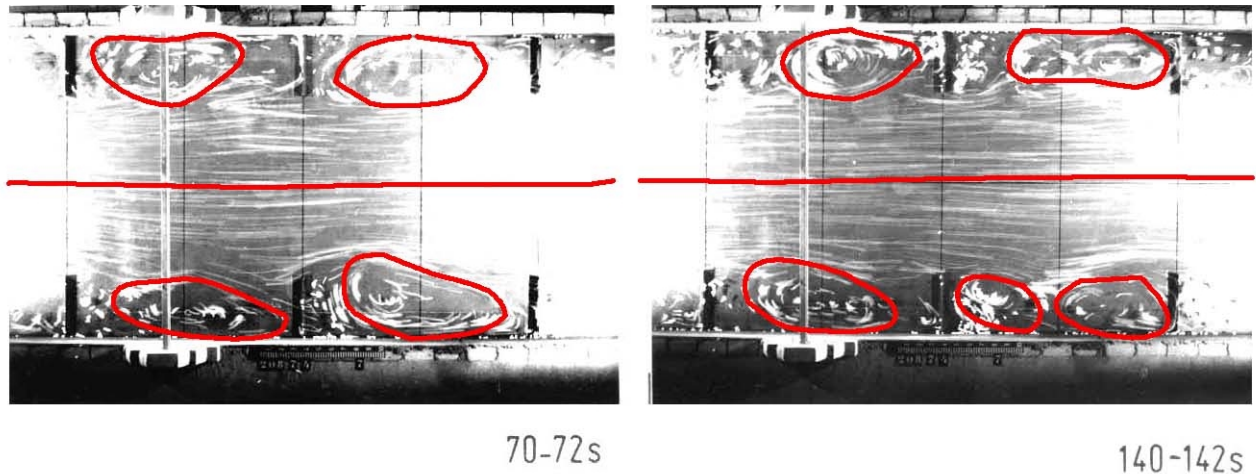


In einer Untersuchung von Tödten (1991) wurden die Einflüsse der Strömungsvorgänge an Bühnen auf die Geometrie der Rückströmungszonen untersucht. Besonders bei zu groß gewählten Bühnenabständen fand Tödten, daß sich eine Schwingung des Stromstrichs um die Mittelachse ergibt. Dieses Phänomen hat seine Ursache in den sich in periodischen Zeitabständen immer wieder neu ausbildenden Ablösungszonen (vgl. Abbildung 3-2).



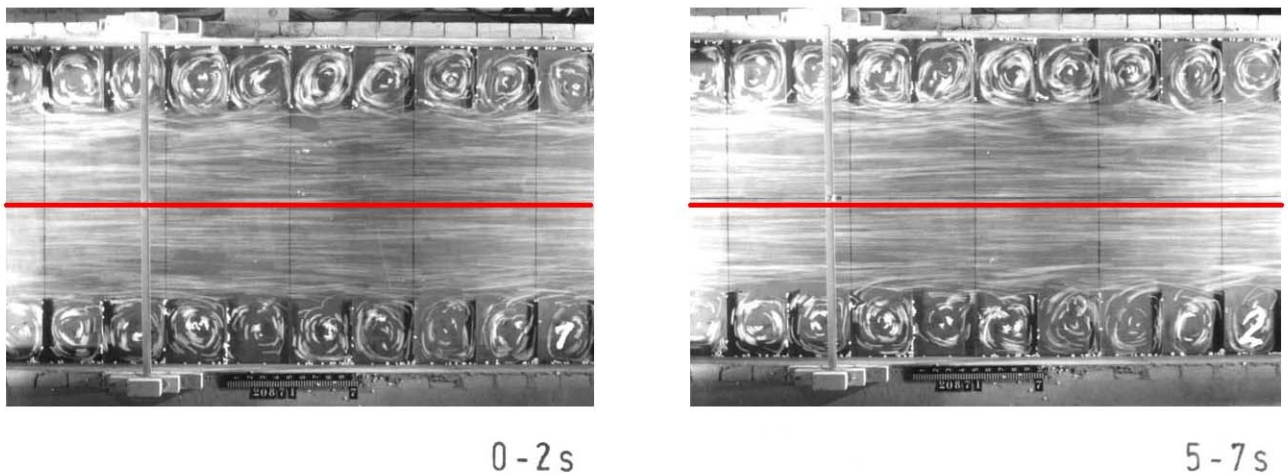
**Abbildung 3-2:** Wirbelausbildungen im Modellversuch in Abhängigkeit von der Zeit visualisiert (rot); Schwingungen des Stromstrichs um die Mittelachse bei sehr groß gewählten Bühnenabständen (Felkel, 1975)

In der hier vorgelegten Arbeit werden derartige Zustände, die nur bei sehr großen Bühnenabständen auftreten, nicht berücksichtigt. Es wird vorausgesetzt, daß sich Strömungszustände einstellen, die von der Zeit unabhängig (stationär) verlaufen und sich damit kontrollierbare, stabile Verlustzustände einstellen. Die Abbildung 3-3 zeigt, daß sich bei Bühnenabständen, die in etwa das Dreifache der Bühnenlänge betragen keine wesentlichen Verlagerungen des Stromstrichs in Abhängigkeit von der Zeit mehr ergeben.



**Abbildung 3-3:** Wirbelausbildungen im Modellversuch in Abhängigkeit von der Zeit visualisiert (rot); Bei Bühnenabständen die das Dreifache der Bühnenlänge betragen ergeben sich weitgehend keine Instabilitäten des Stromstrichs mehr (Felkel, 1975)

Beim Einbau von Bühnen mit einem Längen- zu Abstandsverhältnis von 1:1 ergeben sich keine Instabilitäten des Stromstrichs und nahezu jedes Bühnenfeld wird von einem stabilen Einzelwirbel beherrscht (vgl. Abbildung 3-4).



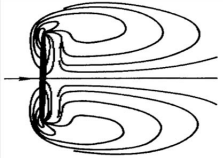
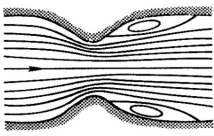
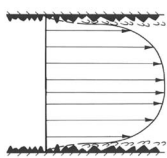
**Abbildung 3-4:** Wirbelausbildungen im Modellversuch in Abhängigkeit von der Zeit visualisiert; Bei Bühnenlängen zu Abstandsverhältnissen von 1:1 sind Wirbel und damit der Stromstrich vollkommen stabil (Felkel, 1975)

Im folgenden Teil der Arbeit sollen die Grundlagen zur Bestimmung von Widerstandsbeiwerten, die bei derartigen Verlustformen zeitinvariante Werte annehmen, erläutert werden.

### 3.2 Grundlagen zur Übertragung von Widerstandsbeiwerten auf Flußregelungsbauwerke aus der Literatur

Die für das numerische Modell notwendigen Koeffizienten werden aus hydraulischen Modellversuchen abgeleitet. Im Rahmen einer Literaturstudie wurden Modellversuche recherchiert. Hierbei zeigte sich, daß Widerstandsbeiwerte zu diesem Themengebiet existieren, wobei aber unterschiedliche Methoden zu ihrer Bestimmung eingesetzt wurden. Einfachere Methoden ermitteln jeweils nur einen Widerstandsbeiwert für das gesamte System, während die komplexeren nach den im Einzelnen auftretenden Verlustformen differenzieren.

Die einfacheren Verfahren bestimmen den Gesamtverlust und geben einen repräsentativen Koeffizienten hierfür an. Tabelle 3-1 listet die wichtigsten drei Koeffizienten auf, klassifiziert nach ihrem Anwendungsgebiet, die für eine Übertragung auf Flußregelungsbauwerke in Frage kommen.

Widerstandsbeiwert	$c_w$ -Wert	$\zeta$ -Wert	$\lambda$ -Wert
<b>Anwendungsgebiet</b>	Umströmung von Körpern Offene Systeme- Formwiderstände	Durchströmung von Körpern Geschlossene Systeme- Formwiderstände	Durchströmung von Körpern Geschlossene Systeme- Reibungswiderstände
<b>Definition</b>	$c_w = \frac{F_w}{\left(\frac{\rho v_0^2}{2}\right) A_p}$	$\zeta = \frac{2 \Delta p}{\rho v^2}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{k_{ss}}{3.71 f_m D}\right)$
<b>Beispiel</b>	 Isotachenverläufe bei der senkrechten Anströmung einer Platte	 Isotachenverläufe bei der Durchströmung einer Engstelle in einem Rohr	 Turbulentes Geschwindigkeitsprofil, aufgenommen über Wandrauheiten in einem Rohr

**Tabelle 3-1:** Auf Regelungsbauwerke übertragbare Widerstandszahlen und ihre Anwendungsgebiete; eine Konvertierung erfolgt von links ( $c_w$ ) nach rechts ( $\lambda$ )

$c_w$ -Werte werden im Allgemeinen bei der Umströmung von Körpern ermittelt, während der  $\zeta$ - und der  $\lambda$ -Beiwert zumeist in geschlossenen Systemen bestimmt werden. Da Flußregelungsbauwerke immer in einem geschlossenen System, dem „Fluß“, eingebaut werden, sind hier auch nur der  $\zeta$ -Beiwert und der  $\lambda$ -Beiwert maßgebend. Allerdings wurden  $\zeta$ -Beiwerte für Formkörper bisher kaum erarbeitet. Dagegen liegen  $c_w$ -Beiwerte aus diversen experimentellen Untersuchungen verwandter Fachbereiche in einer großen Anzahl vor (Schöberl, 1990).

Nach Naudascher (1992) kann die gesamte Literatur über den Strömungswiderstand unmittelbar auf den örtlichen Energieverlust übertragen werden, und zwar sowohl hinsichtlich der physikalischen Zusammenhänge als auch hinsichtlich der Zahlenwerte. Naudascher zeigt Konvertierungsmöglichkeiten zur Überführung von  $c_w$ - in  $\zeta$ -Werte auf.

Durch die Anwendung dieser Konvertierungsgesetze besteht die Möglichkeit eine Lösung für individuelle Problemstellungen bei Regelungsbauwerken zu finden. Weiterhin kann der  $\zeta$ -Wert unter Vorgabe von geometrischen Parametern auch in einen  $\lambda$ -Wert konvertiert werden (Gleichung 3-1). Diese Möglichkeit ist für den Einsatz von Beiwerten aus der Literatur in den in dieser Arbeit eingesetzten RÜ-Verfahren von Bedeutung.

$$\lambda = \zeta \frac{D}{l} = \frac{A_{\perp}}{A_{\rightarrow}} c_w \frac{D}{l} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

In Gleichung 3-1 bezeichnet  $A_{\perp}$  die abgeschottete Querschnittsfläche und  $A_{\rightarrow}$  die freidurchströmbare Querschnittsfläche. Das Verhältnis dieser beiden Größen wird als Verbauungsverhältnis bezeichnet und überführt den für offene Systeme (vgl. Tabelle 3-1) ermittelten  $c_w$ -Wert in einen für geschlossene Systeme gültigen  $\zeta$ -Wert (vgl. Rouse, 1957). So ist z.B. der Widerstandsbeiwert für eine angeströmte Rechteckplatte in einem offenen System, in dem sich die Strömung unendlich ausdehnen kann, eine Funktion des Seitenverhältnisses, während dieser in einem geschlossenen System (z.B. Rohr, Gewässer) eine Funktion des Verbauungsverhältnisses ist. So fand Cidarer (1976), daß die Anwendung eines  $c_w$ -Wertes ohne Konvertierung auf geschlossene Systeme zu Abweichungen zwischen Messung und Rechnung von bis zu 100 % führt.

Ein komplexeres Verfahren, das nach einzelnen auftretenden Verlustformen an Flußregelungsbauwerken differenziert, wird z.B. von Kindsvater und Carter (1955) vorgestellt. Hierbei werden die Widerstandseinflüsse abhängig nach der jeweils untersuchten Bauwerksform und Sohlrauheitshöhe differenziert und in einer Abflußformel multiplikativ miteinander verknüpft. Diese Beiwerte lassen sich unter Einsatz von Konvertierungsgesetzen direkt mit Beiwerten, die aus den RÜ-Verfahren entstammen, vergleichen.

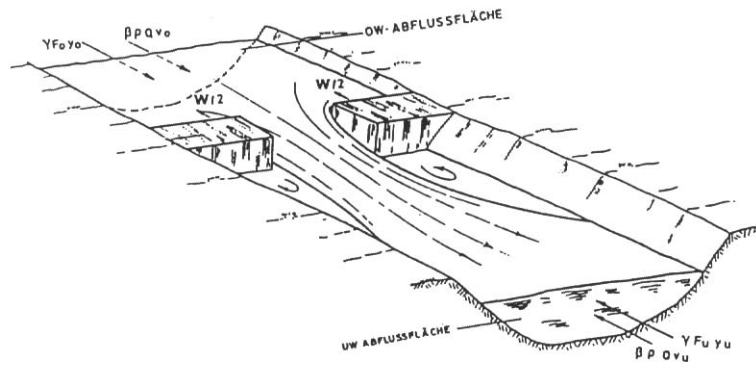
Da diese Arbeit ganz auf die Erarbeitung von Widerstandsbeiwerten hin ausgerichtet ist, sollen die o.a. Möglichkeiten im folgenden anhand von Beispielen dargestellt werden. Hierfür werden zuerst die Grundlagen zur Bestimmung der Widerstandszahlen erläutert. Diese sind jedem Lehrbuch zur experimentellen Strömungslehre zu entnehmen und wurden hier auf die Thematik „Flußregelungsbauwerke“ zugeschnitten.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß ohne eine Trennung in Form- und Reibungswiderstand (Sohleneinfluß) keine Übertragung von Versuchsdaten aus der Literatur (auch unter Verwendung der Konvertierungsgesetze) auf andersgelagerte Problemstellungen mit insbesondere vollkommen anderen Sohrauheiten möglich sind. In diesem Fall müssen die dem jeweiligen Versuch zugrundeliegenden Rahmenbedingungen bekannt sein, dann kann der Gesamtbeiwert z.B. unter Einsatz des in Kapitel 4 beschriebenen RÜ-Verfahrens in einen Form- und einen Reibungsanteil aufgeteilt werden um so eine Übertragung auf z.B. Naturbedingungen zu ermöglichen. Eine Ausnahme besteht, wenn durch die Versuchsbedingungen keine Widerstandsüberlagerung gegeben ist, was z.B. bei einer Rohrblende der Fall ist.

Die nachfolgenden Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus hydraulischen Modellversuchen mit Ergebnissen unter Zugrundelegung eines Widerstandsbeiwertes aus der Literatur dienen in erster Linie der Verifizierung des in Kapitel 4 beschriebenen Rauheitenüberlagerungsverfahrens. Hier werden nur Übereinstimmungen in der Größenordnung der Ergebnisse überprüft.

### 3.2.1 Übertragung von $\zeta$ -Werten ohne Trennung von Form und Reibungswiderstand

In Bezug auf Flußregelungsbauwerke wurde in der Fachliteratur zum Thema Widerstandsbeiwerte in geschlossenen Systemen gesucht. Querbauten wie z.B. Buhnen liegt hierbei im wesentlichen eine Düsenwirkung zugrunde, bei der der Formwiderstand überwiegt. Für ein Einschränkungsbauwerk (vgl. Abbildung 3-5), wie es z.B. beim Einbau von Widerlagern für Brückenpfeiler eingesetzt wird, kann zum Vergleich eine in ein Rohr eingebaute Blende herangezogen werden. Ein derartiges Bauwerk würde dem Einbau eines einzelnen Buhnenpaares entsprechen. Die Literatur über derartige Bauwerke kann daher durchaus zur Bestimmung des Widerstandes für Buhnenbauwerke herangezogen werden.



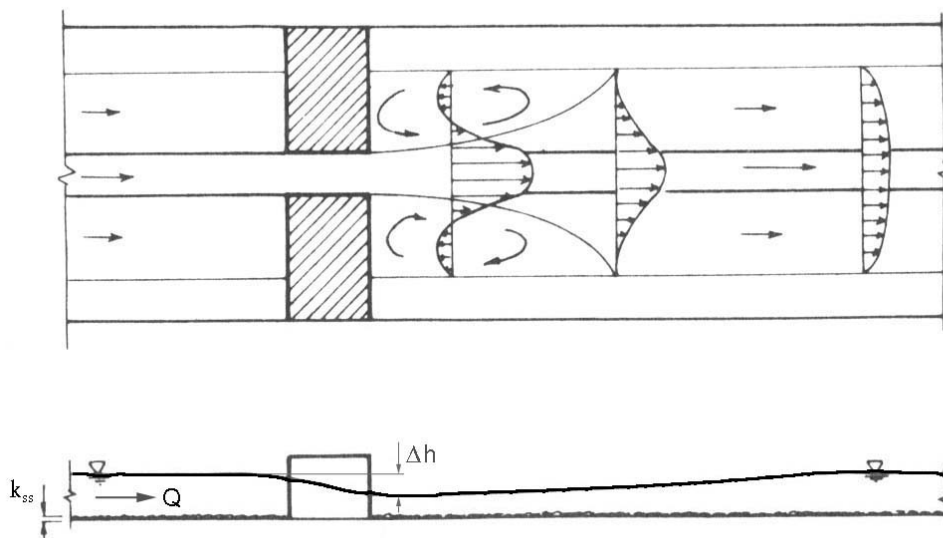
**Abbildung 3-5:** Umströmung eines Einschränkungsbauwerks (aus Schöberl, 1990)

Für den Verlust an diesem Einzelbauwerk wird die allgemeine Formel zur Bestimmung von  $\zeta$ -Werten angegeben:

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho v^2}$$

**Gleichung 3-2**

wobei  $\Delta p$  hier der geodätische Druckhöhenverlust ist, dessen Größe aus der Höhe des Wasserspiegelverfalls  $\Delta h$  am Bauwerk bestimmt werden kann (vgl. Abbildung 3-6).



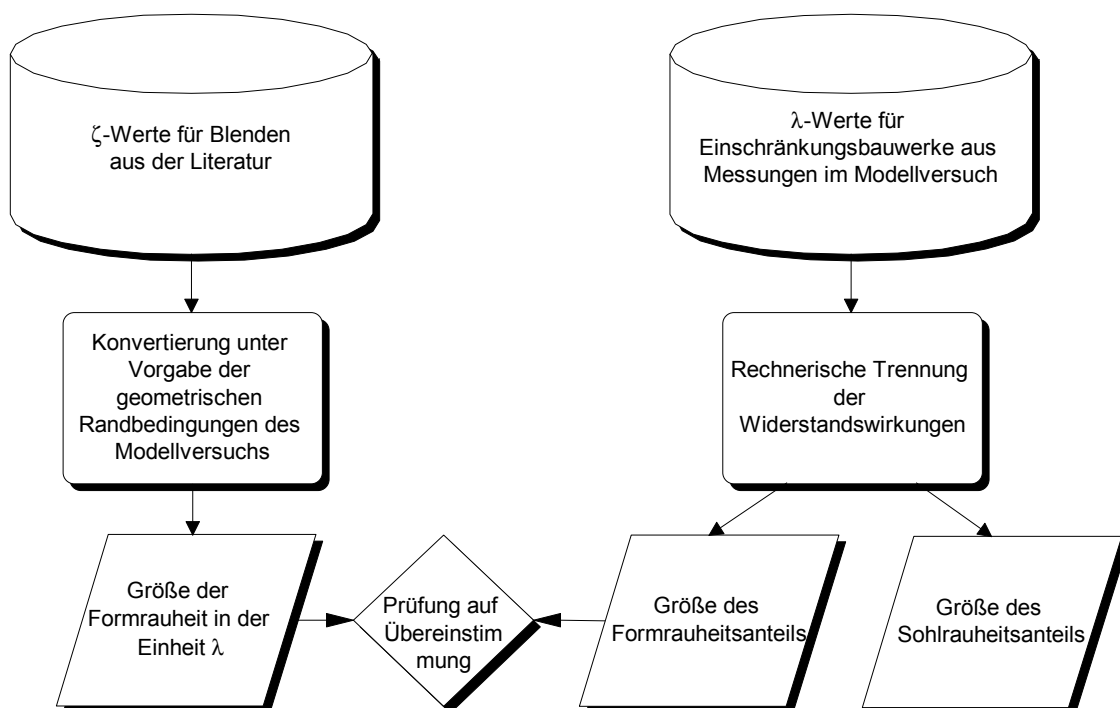
**Abbildung 3-6:** Draufsicht und Seitenansicht eines Einschränkungsbauwerks, mit qualitativen Angaben über Strömungsausbildung und Parameterwahl (Cidarar, 1976)

$\zeta$  kann demnach in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit  $v$  und des damit zusammenhängenden Wasserspiegelverfalls  $\Delta h$  bestimmt werden (Schröder, 1966):

$$\zeta = \frac{2 g \Delta h}{v^2}$$

**Gleichung 3-3**

In der Literatur wurde nach  $\zeta$ -Beiwerten gesucht, denen eine ähnliche Problemstellung zugrundeliegt. Hier fand sich, daß eine Verengung durch eine Blende in einem Rohr vergleichbare Formwiderstände erzeugt wie ein Einschränkungsbauwerk, eingebaut in einen freifließenden Fluß. Kindsvater (1955) hat im Hinblick auf Flußregelungsbauwerke derartige Versuche in Rohren durchgeführt.

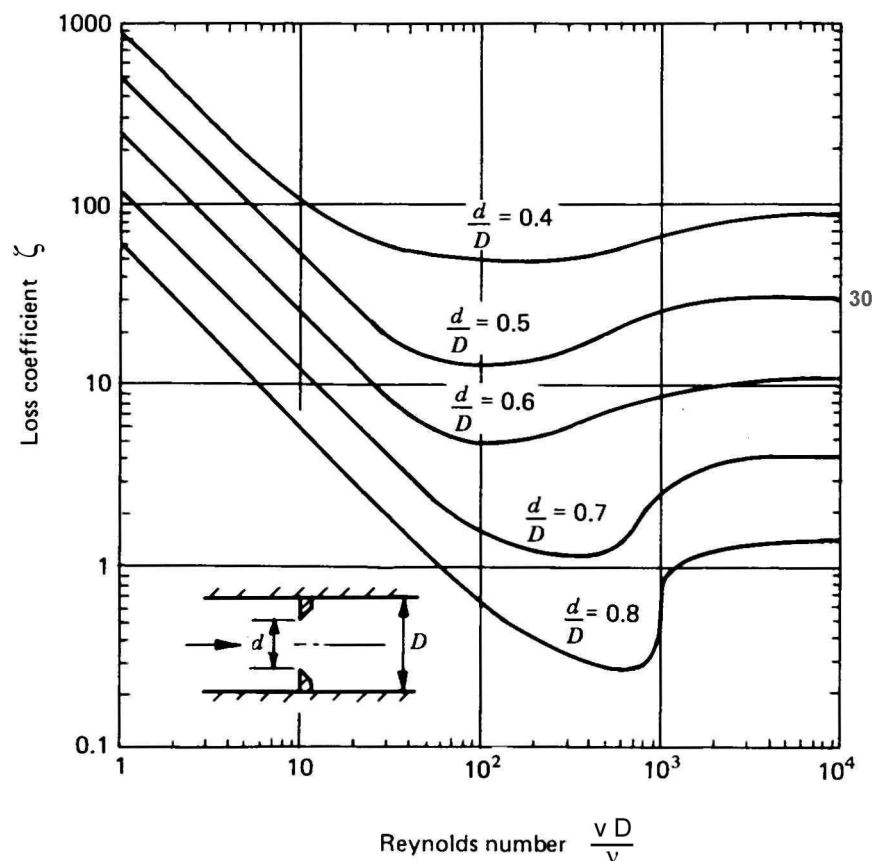


**Abbildung 3-7:** Ablaufschema zum Vergleich von  $\zeta$ -Widerstandsbeiwerten aus der Literatur mit  $\lambda$ -Widerstandsbeiwerten, die aus Modellversuchen ermittelt wurden; Einschränkungsbauwerk

Auch Cidarer (1976) schreibt, daß sich grundsätzlich die Ergebnisse von Untersuchungen aus der Rohrhydraulik auf die Verhältnisse der Gerinnehydraulik übertragen lassen. Im

Rahmen seiner Untersuchungen zu Einschränkungsbauwerken hat Cidarer diese Möglichkeit zur Bestimmung des Widerstandsverhaltens an Brückenwiderlagern genau beschrieben. Das einzige Problem bei der quantitativen Übertragung besteht darin, daß keine Sohlschubspannungen berücksichtigt werden. Durch die Anwendung der in Kapitel 4 beschriebenen Rauheitenüberlagerungsmethode kann jedoch der Anteil der Formrauheiten direkt den „Blendenrauheiten“ gegenübergestellt werden und so dennoch ein quantitativer Vergleich angestellt werden (vgl. Abbildung 3-7).

Die Abbildung 3-8 zeigt den vom Einschränkungsmaß (vgl. Kapitel 6) und der Anströmgeschwindigkeit abhängigen Widerstandsbeiwert  $\zeta$ . Das plötzliche Ansteigen der Widerstandskurven läßt sich durch das Auftreten von Turbulenz erklären. Das Nachlaufgebiet der Wirbel wird schlagartig verkleinert. Dieses Strömungsverhalten wird auch „Eiffel-Prandtl-Paradoxon“ genannt und kann in der einschlägigen Literatur nachgelesen werden (Lugt, 1979). In natürlichen Fließgewässern herrschen fast immer vollausgebildete turbulente Verhältnisse und daher spielen derartige Effekte so gut wie keine Rolle.

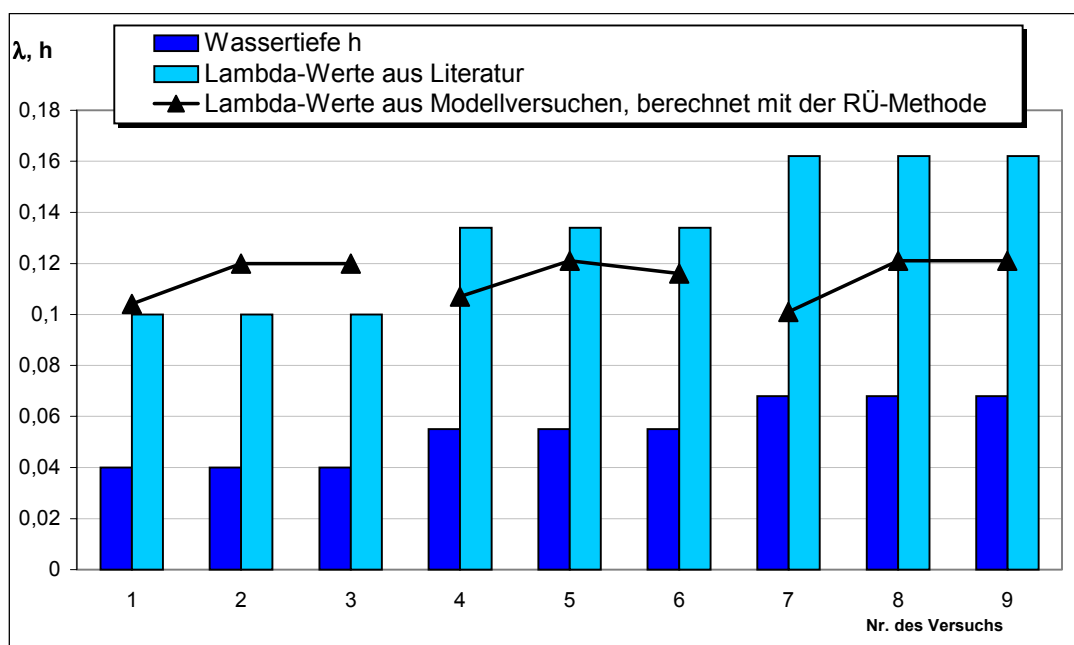


**Abbildung 3-8:** Abhängigkeit des  $\zeta$ -Wertes vom Einschränkungsmaß und der Anströmgeschwindigkeit bei Blenden in Rohren (Kindsvater, 1955; abgebildet in Miller, 1978)



Setzt man voraus, daß mit dem Erreichen von vollturbulenten Verhältnissen im Modellversuch der Widerstandsbeiwert unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit wird (Wert der Reynoldszahl um 2000, vgl. Nikuradse-Diagramm, 1936), so kann in einer ersten Näherung das Diagramm von Kindsvater (1955) zu höheren Reynoldszahlen hin extrapoliert werden. Insofern können die Widerstandszahlen an den Kurven (vgl. Abbildung 3-8) am rechten Ordinatenrand abgelesen werden.

Im Vorgriff auf Kapitel 4 wurden hier schon die Widerstandsbeiwerte eingezeichnet, die nach der Rauheitsüberlagerungsmethode ermittelt wurden. Für ein Einschränkungmaß von  $A_\zeta/A_\delta = 0,5$  ergibt sich ein Verlustkoeffizient von  $\zeta = 30$ . Legt man die Auswertung eines Modellversuchs (Felkel, 1975) mit dem gleichen Einschränkungmaß für nichtüberströmte Buhnen (vgl. Kapitel 6) nach der RÜ-Methode zugrunde, so ergeben sich die drei in Abbildung 3-9 durchgezogen dargestellten Kurvenverläufe des Widerstandsbeiwertes  $\lambda$ . Der Knick in den Kurven ist auf eine Abhängigkeit von den Buhnenabständen zurückzuführen. Hierauf wird in Kapitel 6 näher eingegangen. Die Balken in der Abbildung bezeichnen die Wassertiefen und die aus der Literatur berechneten Widerstandsbeiwerte. Hierfür wurden die geometrischen Verhältnisse aus dem Modellversuch mit dem Verlustkoeffizienten multipliziert (Gleichung 3-1).

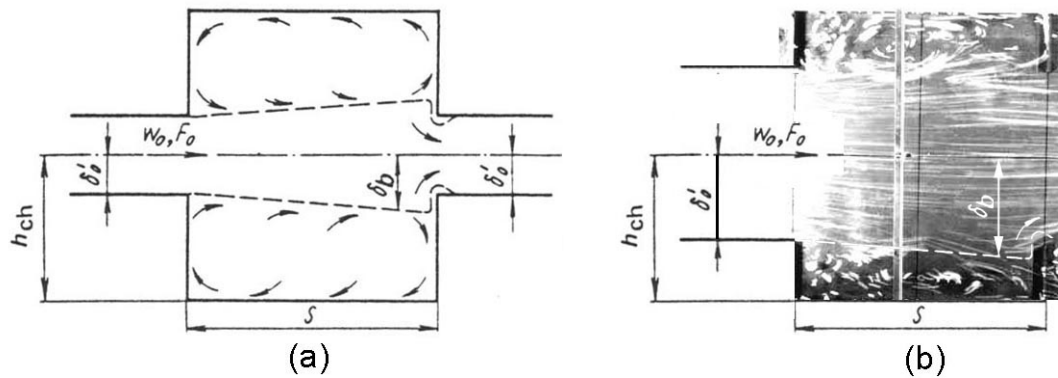


**Abbildung 3-9:** Gegenüberstellung von recherchierten und in  $\lambda$ -Werte konvertierten  $\zeta$ -Werten aus der Literatur mit berechneten  $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen; Einschränkungsbauwerk

Die nach der RÜ-Methode (vgl. Kapitel 4) berechneten Werte sind weitgehend unabhängig von der Wassertiefe während die aus der Literatur konvertierten Werte aufgrund des konstanten Widerstandsbeiwertes (hydraulisch vollrauhes Verhalten) eine deutliche Abhängigkeit von der Wassertiefe aufweisen. Aufgrund des sehr konstanten Gesamtwiderstandsbeiwertes von  $0,0317 \pm 0,001$  über alle in dem Modellversuch variierten Abflüsse kann davon ausgegangen werden, daß die Abhängigkeit des Formwiderstandes von der Wassertiefe in diesem Versuch sehr gering ist und daher die RÜ-Methode eine bessere Approximation liefern muß als die Rückrechnung aus der Literatur. Im Mittel führt die Rechnung aus der Literatur zu einem Widerstandsbeiwert von **0,132** [(ca. viermal so groß wie der Gesamtwiderstand als Folge der Parallelschaltung der Widerstände, vgl. Kapitel 4) für das Einschränkungsbauwerk, wobei die Auswertung der Modellversuche nach der RÜ im Mittel den um ca. 15 % niedrigeren Wert von **0,115** (vgl. Abbildung 3-7) liefert]. Dieses Resultat ist plausibel aufgrund des zu erwartenden höheren Widerstandes eines einzelnen Bühnenpaares (Einschränkungsbauwerk), bei dem Abschattungseffekte durch Nachbarbauten fehlen. Aufgrund der guten Übereinstimmung der o.a. Werte konnte gezeigt werden, daß die Recherche zu Widerstandsbeiwerten aus der Literatur zu verwertbaren Ergebnissen führt. Darüberhinaus konnte so auch ein Beweis für die Richtigkeit des in dieser Arbeit eingesetzten Rauheitenüberlagerungsverfahrens nach Einstein erbracht werden.

### 3.2.2 Übertragung von $\zeta$ -Werten mit getrennten Anteilen an Form- und Reibungswiderstand

In der Fachliteratur zu Widerstandsbeiwerten in geschlossenen Systemen wurde nach Problemstellungen gesucht, die zur Bestimmung von Widerstandsbeiwerten für nichtüberströmte Bühnen in Frage kommen. Hier fand sich ein Problem aus der Abdichtungstechnik (vgl. Abbildung 3-10), die geeignet erscheint. Der Formelaufbau zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes für Labyrinthdichtungen ist möglichst universell gehalten, um vielfältigen Varianten dieser Abdichtungsform gerecht werden zu können. Darüberhinaus wurden in dieser Formel Form- und Reibungswiderstand getrennt. Ein weiterer Vorteil bei der Übertragung dieser Problemstellung auf Bühnenbauwerke liegt darin, daß aufgrund einer Aneinanderreihung von Kammern bei Labyrinthdichtungen auch Abschattungseffekte (vgl. Kapitel 1.1.1) berücksichtigt werden können.

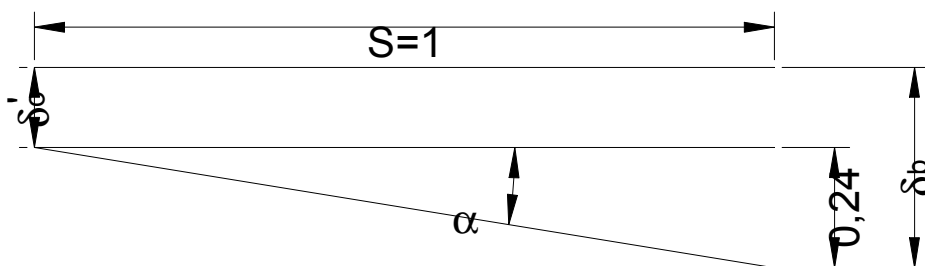


**Abbildung 3-10:** Fließzustand in einem Labyrinth (Idelchik, 1986); die Darstellung anhand der Zelle eines einzelnen Labyrinths (a) kann mit der Visualisierung des Strömungszustandes in einem einzelnen Bühnenfeld (b) verglichen werden

Bei der Untersuchung der Übertragbarkeit von Widerstandsbeiwerten von Labyrinthdichtungen auf Bühnenbauwerke fiel eine interessante Formel zur Berechnung der Strahlablösung in Labyrinthströmungen auf, die von Abramovich (1960) aufgestellt wurde:

$$\frac{\delta_b}{\delta_0'} = 0.24 \frac{S}{\delta_0'} + 1$$

**Gleichung 3-4**



**Abbildung 3-11:** Skizze zur Definition des Winkels  $\alpha$  bei Strahlablösung in Labyrinthströmungen nach Abramovich (1960)

Setzt man die Lauflänge  $S$  zu 1.0 so ergibt sich für den Ablösestrahl (vgl. Abbildung 3-11):

$$\alpha = \arctan 0.24 = 13^\circ \quad \text{Gleichung 3-5}$$

Überträgt man den Strömungszustand in Labyrinthdichtungen auf den in Bühnenfeldern, dann würde dies bedeuten, daß sich der Ablösestrahl unter einem Winkel von 13 Grad in ein Bühnenfeld ausbreitet.

Spannring hat 1999 zur Bauweise und Anordnung von Bühnen im Fluß eine Formel zur Abschätzung des Bühnenabstands beschrieben. Diese Formel leitet sich aus Beobachtungen von Winkel (1928) ab, der bei Versuchen mit Bühnen beobachtet hat, daß die Stromlinie im Anschluß an den Bühnenkopf um einen Winkel von etwa 6 Grad in ein Bühnenfeld abgelenkt wird. Der zur Erreichung von stabilen Strömungsverhältnissen einzuhaltende Bühnenabstand berechnet sich demnach zu:

$$a_b = \frac{l_b}{2 \sin(6^\circ)} = 4.78 l_b \quad \text{Gleichung 3-6}$$

Weiterhin schreibt Spannring, daß die Erfahrung zeigt, daß ein auf der Basis dieser Formel berechneter Bühnenabstand zu groß ist und daß dennoch in der jüngeren Literatur immer wieder auf diese Formel verwiesen wird.

Setzt man nun als Winkel für den Ablösestrahl statt 6 Grad die in Gleichung 3-5 von Abramovich für Labyrinthdichtungen gefundenen 13 Grad ein, dann ergibt sich auch sofort ein kleinerer zu wählender Bühnenabstand, nämlich:

$$a_b = \frac{l_b}{2 \sin(13^\circ)} = 2.22 l_b \quad \text{Gleichung 3-7}$$

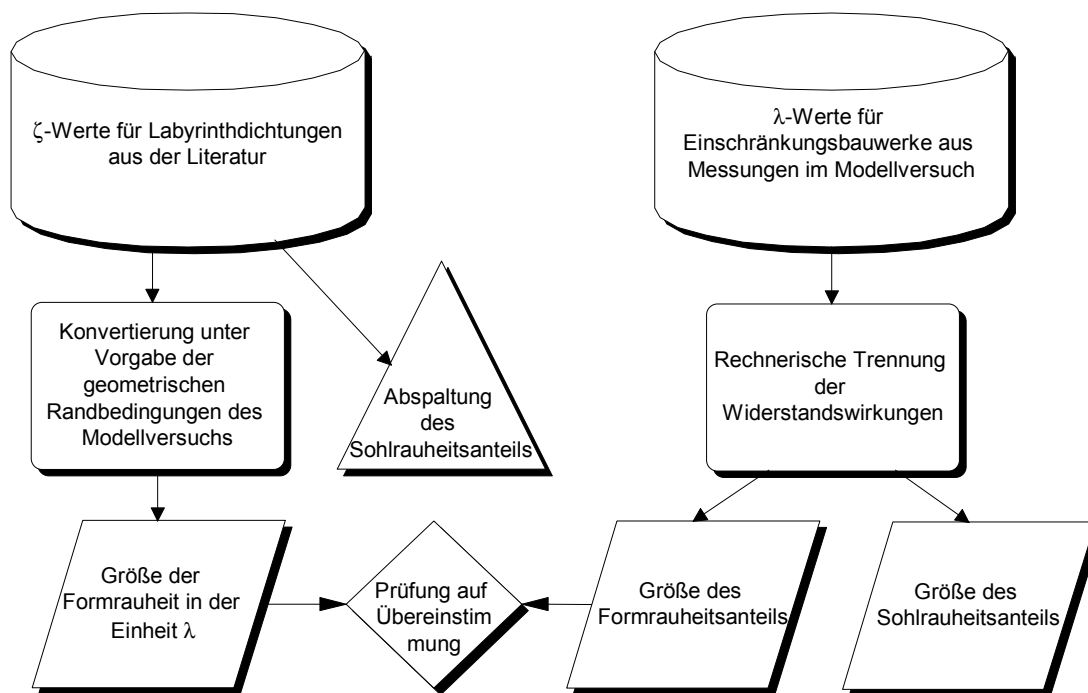
Diese neue Abschätzung für das Abstands- zu Längenverhältnis kann sehr gut mit den Beobachtungen aus einem BAW-Modellversuch (vgl. Kapitel 5) plausibilisiert werden. Betrachtet man die Abbildungen 3-2 bis 3-4 so wird deutlich, daß bei einem Abstands- zu Längenverhältnis größer als 3:1 instationäre Wirbelbildungen, die die Fahrinne und damit die Schifffahrt stören können, auftreten<sup>1</sup>. Bei dem nach Gleichung 3-7 berechneten Abstands- zu Längenverhältnis wird, unabhängig vom Einschränkungmaß, ein Minimum der Formwiderstandswirkung erreicht. Das nach Gleichung 3-7 berechnete Abstands- zu Län-

<sup>1</sup> Diese Beobachtung schlägt sich auch sehr deutlich in dem Verlauf des nach der RÜ für das Regelungsbauwerk Bühne berechneten Widerstandskoeffizienten nieder (vgl. Kapitel 6.3.5.2).

genverhältnis führt beim Einbau von Buhnen also mit Sicherheit zu besseren Verhältnissen für die Schifffahrt als das nach Gleichung 3-6 berechnete. Der Widerstandsbeiwert  $\zeta$  für Labyrinthdichtungen ist nach Idelchik (1953):

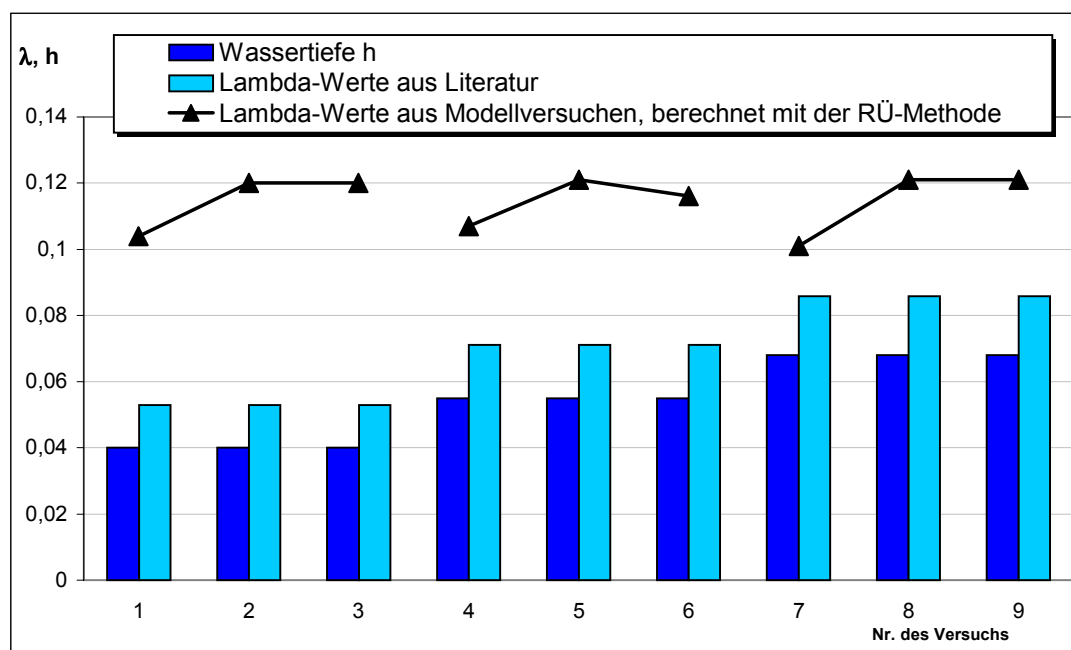
$$\zeta = 1 + \zeta' + z(a_1 + \zeta' b_1 + \zeta_{fr}) \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Hierbei ist  $\zeta'$  ein Formbeiwert, der die Eckenrundung berücksichtigt,  $z$  ist die Anzahl der Kammern (nichtdurchströmte Bereiche) und  $a_1$  sowie  $b_1$  sind Koeffizienten, die die Anordnung der Kammern relativ zur Hauptströmungsrichtung berücksichtigen.



**Abbildung 3-12:** Ablaufschema zum Vergleich von  $\zeta$ -Widerstandsbeiwerten aus der Literatur mit  $\lambda$ -Widerstandsbeiwerten, die aus Modellversuchen ermittelt wurden; Labyrinthdichtung

Wertet man die Gleichung 3-8 mit Werten aus dem Modellversuch (Felkel, 1975) aus, so ergibt sich für den reinen Formwiderstand ein mittlerer  $\zeta$ -Wert von 16 und damit das in Abbildung 3-13 gezeigte Auswertungsergebnis.



**Abbildung 3-13:** Gegenüberstellung von recherchierten und in  $\lambda$ -Werte konvertierten  $\zeta$ -Werten aus der Literatur mit berechneten  $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen; Labyrinthdichtungen

Die Übertragung eines Widerstandsbeiwertes für Labyrinthdichtungen auf den Fall „nicht-überströmte Bühnen“ führt zu dem Ergebnis, daß der Formwiderstand der Bühnen unterschätzt wird. Es ergibt sich hier ein mittlerer  $\lambda$ -Wert aus der Literatur von **0,07** der einem Wert von **0,115**, gewonnen aus Modellversuchen, gegenübersteht. Dies entspricht einer Abweichung von 36 %. Der Grund für diese hohe Abweichung liegt in der Vorgehensweise der additiven Überlagerung von Widerstandsbeiwerten für eine Problemstellung, bei der Widerstände parallel zusammenwirken und nicht in Serie. Beim Durchströmen z.B. einer Bühnenreihe liegt eine Parallelschaltung von Reibungswiderstand, der infolge der Sohlrauheit und Formwiderstand, der infolge der Bauwerksanströmung entsteht, vor. Addiert man diese die Strömung verzögernden Widerstände, so wird vorausgesetzt, daß in den Bühnenfeldern der gleiche Abfluß herrscht, wie in der Hauptströmung. Hierbei kann die Wirbelbewegung in den Bühnenfeldern als fiktiver Abfluß angesehen werden, der entstehen muß, um überhaupt erst eine Widerstandswirkung zu ermöglichen. Sicherlich ist aber dieser fiktive Abfluß nicht so groß wie der der Hauptströmung. Aus diesem Grund wird der Widerstand in den Bühnenfeldern unterschätzt. In Analogie zur Elektrotechnik muß die Spannung, die aufgrund des Fließgefälles anliegt zu unterschiedlichen Strömen in den verschiedenen großen Einzelwiderständen führen. Dieser Tatsache kann aber eine additive Überlage-

nung der Widerstände nicht gerecht werden<sup>2</sup>. Vergleicht man die in Kapitel 4.6 hergeleitete Gleichung 3-9:

$$\lambda_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} \frac{A_1}{A_1 + A_2} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{A_2}{A_1 + A_2}} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

von ihrem Aufbau her mit der Formel zur Parallelschaltung von elektrischen Widerständen:

$$R_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad \text{Gleichung 3-10}$$

so wird deutlich, daß der RÜ-Ansatz den o.a. Sachverhalt berücksichtigt. Das Verhältnis der Teilabflußflächen zur Gesamtfläche als Vorfaktor muß zur Anpassung der Teilströme bei einer in allen Teilquerschnitten als gleich angenommenen mittleren Geschwindigkeit eingesetzt werden (vgl. Kapitel 4).

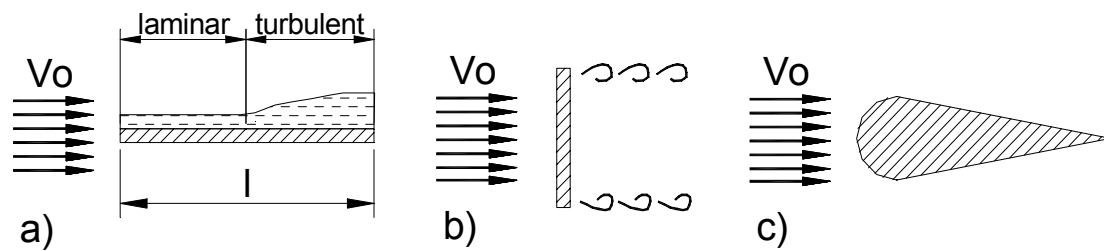
### 3.2.3 Übertragung von $C_w$ -Werten ohne Trennung von Form- und Reibungswiderstand

Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen von Reibungs- und Formwiderstand bei offenen und geschlossenen Systemen, sollen im Folgenden die Grundlagen zur Ermittlung von  $c_w$ -Werten beschrieben werden. Der Gesamtwiderstand in einem Fließgewässer setzt sich, wie schon oben erwähnt, aus einem durch Schubspannungen längs der Grenzschicht entstehenden Reibungswiderstand und einem infolge Strömungsablösung und Wirbelbildung an dreidimensionalen Sohlformen und z.B. Regelungsbauwerken entstehenden Formwiderstand zusammen. Hierbei ist der Reibungswiderstand mit Hilfe der Grenzschichttheorie weitgehend berechenbar, während der theoretisch schwer zu erfassende Formwiderstand im Wesentlichen experimentell bestimmt werden muß. Je nach Form der Sohle bzw. der in den Fluß eingebauten Bauwerke, überwiegt entweder der Reibungs- oder der Formwiderstand. Im Falle eines gerade durchströmten kreisrunden Rohres beträgt das Verhältnis von Reibungs- zu Formwiderstand 100:0, im Falle einer senkrecht angeströmten Platte beträgt es 0:100, und bei z.B. angeströmten Brückenpfeilern liegt das Verhältnis von Reibungs- zu

---

<sup>2</sup> Die Einstein'sche RÜ (vgl. Kapitel 4) berücksichtigt dieses Verhalten durch parallelgeschaltete Widerstände.

Formwiderstand zwischen diesen beiden Extremwerten (vgl. Abbildung 3-14). Flußregelungsbauwerke wie z.B. Buhnen verursachen im Wesentlichen Formwiderstände, während die Strömungen über den Sohlnauheiten im Allgemeinen als reine Reibungswiderstände angesehen werden können. Daher sind bei der Recherche nach Widerstandsbeiwerten für die Regelungsbauwerke Buhnen und Grundswellen nur Versuche ausgewählt worden, bei denen der Reibungswiderstand eine untergeordnete Rolle spielt (Fall b, vgl. Kapitel 3.2.1).



**Abbildung 3-14:** Verhältnis von Reibungs- zu Formwiderstand bei unterschiedlichen Anströmbedingungen

Bei sehr schlanken und stromlinienförmigen Körpern umhüllt die Grenzschicht den ganzen Körper, d.h. es gibt keine Wirbel und keinen Formwiderstand, sondern nur einen Reibungswiderstand. Die auf diesen Körper wirkende Kraft berechnet sich zu:

$$F_r = c_r \left( \frac{\rho v_0^2}{2} \right) A_0 \quad \text{Gleichung 3-11}$$

mit  $A_0$  als Oberfläche des umströmten Körpers. Für den Reibungsbeiwert  $c_r$  gelten ähnliche Abhängigkeiten wie bei durchströmten Rohren. Die Bestimmung des Formwiderstandes ergibt sich durch Integration über die Druckkomponenten in Strömungsrichtung vor und hinter dem Körper. Man faßt ihn zusammen zu:

$$F_d = c_d \left( \frac{\rho v_0^2}{2} \right) A_p \quad \text{Gleichung 3-12}$$

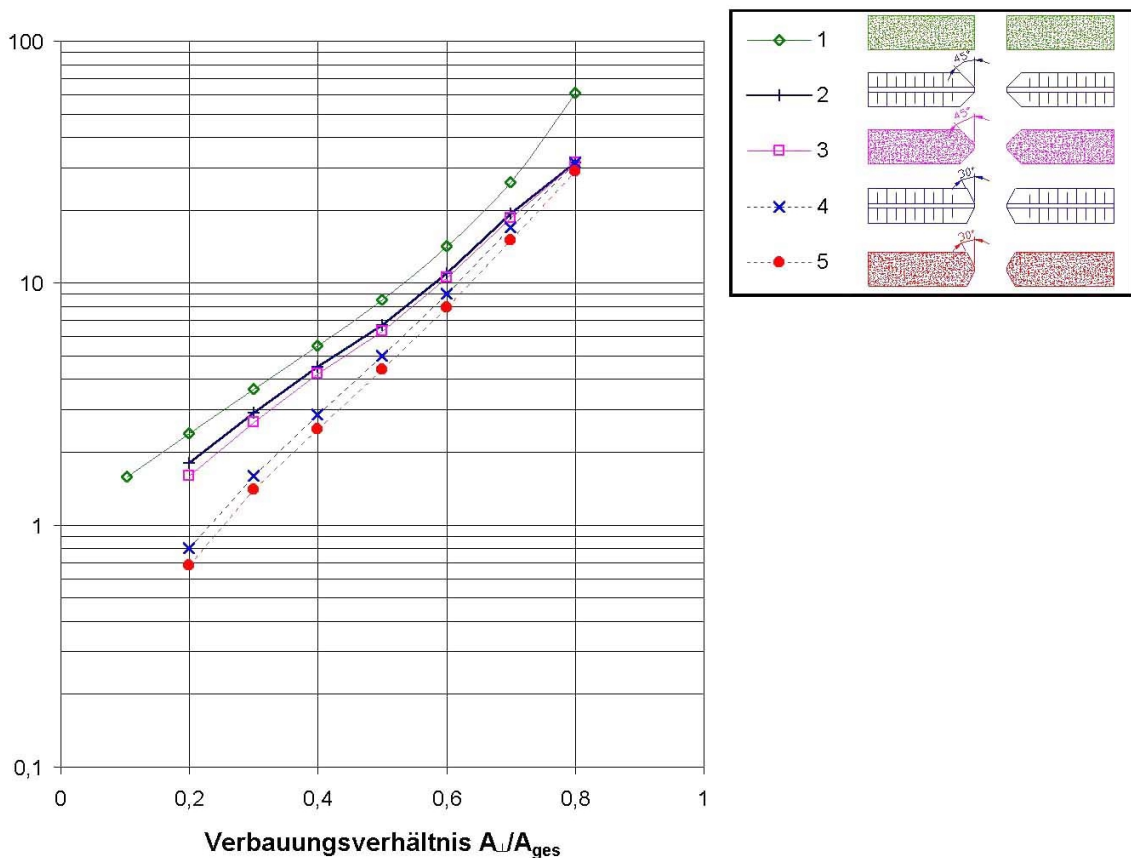
mit  $A_p$  als Projektionsfläche des Körpers, auch Schattenfläche genannt.  $c_d$  ist durch Messung der Druckverteilung bestimmbar. In der Regel führen die Messungen jedoch sofort zum Gesamtwiderstand. Dieser setzt sich aus Reibungs- und Formwiderstand zusammen:



$$F_w = c_w \left( \frac{\rho v_0^2}{2} \right) A_p \quad \text{Gleichung 3-13}$$

Für Körper mit rascher Strahlablösung (praktisch reiner Formwiderstand) hängt der  $c_w$ -Wert nur von der Körperform, für alle anderen Körper auch von der Reynolds'schen Zahl ab. Für einige Körper können Widerstandszahlen aus Tabellen (Miller, 1978) entnommen werden. Für das nichtüberströmbare Einschränkungsbauwerk (vgl. Abbildung 3-5) hat Cidarar (1977)  $c_w$ -Werte bestimmt (vgl. Abbildung 3-15).

$c_w$

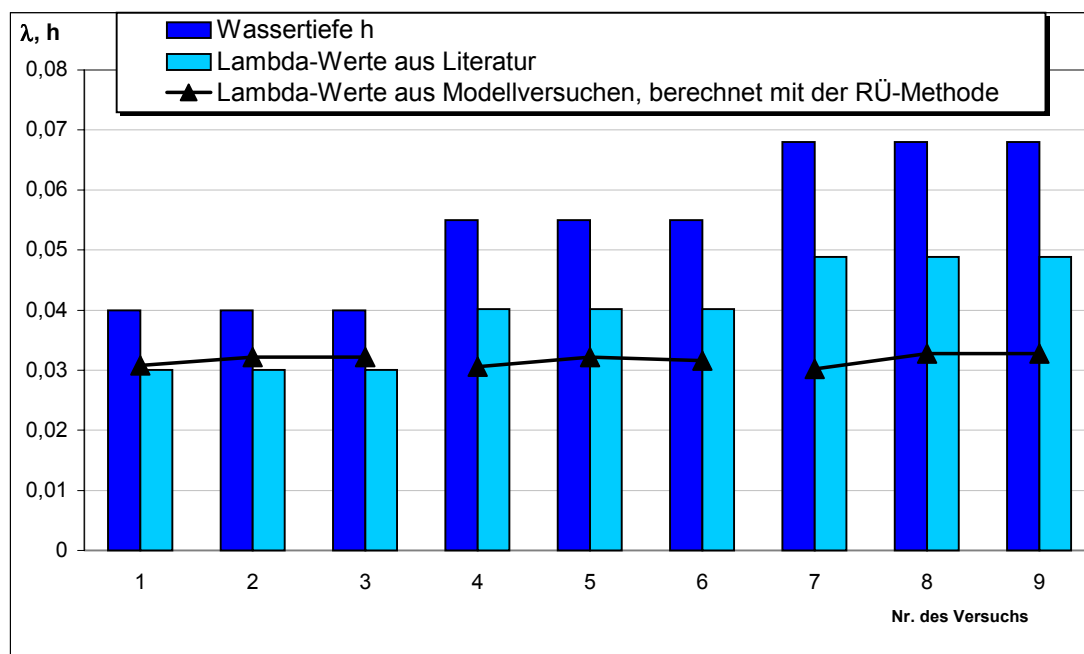


**Abbildung 3-15:**  $c_w$ -Werte für ein Einschränkungsbauwerk in Abhängigkeit von verschiedenen Bauwerksformen (Cidarar, 1977; entnommen aus Schöberl, 1990)

Überträgt man den  $c_w$ -Wert aus Abbildung 3-15 mit der Gleichung 3-1 auf einen  $\zeta$ -Wert, so ergibt sich bei einem Verbauungsverhältnis von 0,5 (Definition mit Gesamtfläche im Nenner) ein maximaler  $c_w$ -Wert von 9, d.h. nach Gleichung 3-1 ein  $\zeta$ -Wert von 9 (Verbauungsverhältnis = 1). Legt man den Modellversuch (Felkel, 1975) mit entsprechender Bühnen-

kopfform (ohne Abrundung) zugrunde, so stimmen die nach Darcy-Weisbach mit den gemessenen Abflüssen berechneten Gesamtreibungszahlen mit den nach den o.a. Konvertierungsgesetzen unter Einsatz von Diagrammen aus der Literatur (vgl. Abbildung 3-15) berechneten Reibungszahlen gut überein.

Die Auswertung eines Modellversuchs zu nichtüberströmten scheibenförmigen Buhnen (vgl. Kapitel 5) ergibt bei der Berechnung die drei durchgezogen dargestellten Kurvenverläufe (Gesamtwiderstand, vgl. Abbildung 3-16). Setzt man in Gleichung 3-1 den hydraulischen Durchmesser, die Länge der Meßrinne (45 m) sowie den aus dem Diagramm von Cidarer (vgl. Abbildung 3-15) abgeleiteten  $c_w$ -Wert von 9 ein, so ergeben sich die in Balkenform dargestellten und von der Wassertiefe abhängigen Werte. Im Mittel hat der  $\lambda$ -Wert aus den Modellversuchen einen Wert von **0,0317** und der  $\lambda$ -Wert aus der Literatur einen Wert von **0,0397**. Das bedeutet, der Literaturwert liegt um 25 % über dem Wert aus den Modellversuchen. Diese Abweichung ist darauf zurückzuführen, daß Cidarer in seiner Rinne wesentlich höhere Sohlrauheiten als in den Modellversuchen der BAW eingesetzt hat und zum Anderen darauf, daß, wie schon im vorangegangenen Kapitel beschrieben, bei einem einzelnen Einschränkungsbauwerk Abschattungseffekte durch Nachbarbauten (Buhnenreihe) keine Rolle spielen.



**Abbildung 3-16:** Gegenüberstellung von recherchierten und in  $\lambda$ -Werte konvertierten  $c_w$ -Werten aus der Literatur mit berechneten  $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen

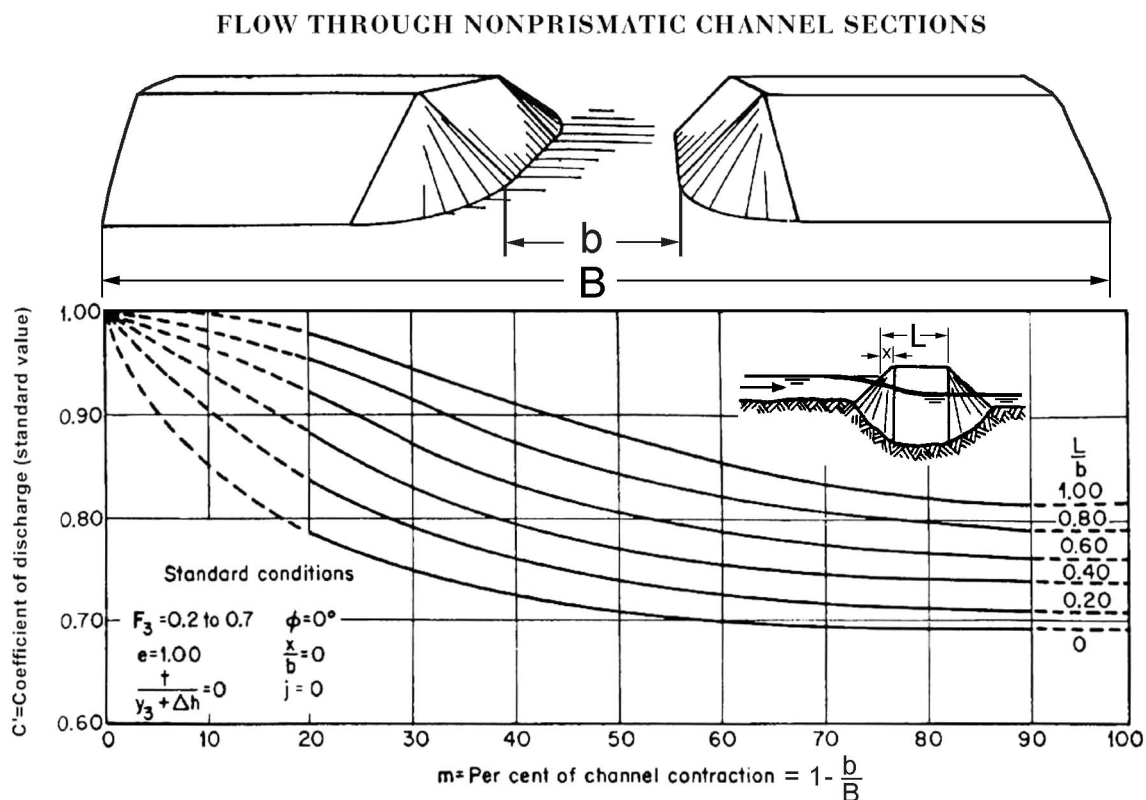
Trotz der o.a. Abweichung konnte eine relativ gute Approximation des Widerstandes erreicht werden. Noch genauere Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn der den Literaturwerten zugrundeliegende Versuchsaufbau genauer analysiert wird und entsprechend der geometrischen Parameter (eingesetzte Sohlrauheit  $l$ ) eine Trennung des Gesamtwiderstandes in Reibungsanteil und Formanteil unter Einsatz des in dieser Arbeit eingesetzten RÜ-Verfahrens vorgenommen wird.

### 3.2.4 Übertragung von Widerstandsbeiwerten von Formkörpern mit Trennung von Reibungs- und Formwiderstand

Für einige Einschränkungsbauwerke wurden von Kindsvater und Carter (1955) Diagramme mit Trennung von Form- und Reibungswiderstand aufbereitet (Ven Te Chow, 1959).

Hier wurden Widerstandsbeiwerte für einzelne Einschränkungsbauwerke experimentell ermittelt. Im Wesentlichen basieren diese Verlustberechnungen auf der Bernoullischen Formel, wobei der Gesamtverlust in einen Form- und einen Reibungsverlust unterteilt wird. Der Formverlust wurde für ein Standardeinschränkungsbauwerk aus Versuchen abgeleitet (vgl. Abbildung 3-17, Koeffizient  $C'$ ). Alle darauf aufbauenden Versuche mit vom Standardbauwerk abweichenden Bauformen wurden durch sogenannte Anpassungskoeffizienten (vgl. Gleichung 3-14 und Abbildung 3-18, Koeffizient  $K$ ) berücksichtigt. Der Formverlust (Koeffizient  $C$ ) wurde durch eine multiplikative Verknüpfung des Koeffizienten  $C'$  (Standardbedingungen) mit den Korrektorkoeffizienten  $K$  für von der Norm abweichende Einschränkungsbauwerke berechnet. Dieses Verfahren hat den Vorteil, die im Experiment zu untersuchende Anzahl von Einschränkungsbauwerksvarianten zu verringern. So können durch Kombination der Anpassungskoeffizienten andere Bauwerksvarianten, die so nicht experimentell untersucht wurden, dennoch berechnet werden.

Von Kindsvater und Carter wurden einige typische Konstellationen im Labor nachgestellt und daraus Anpassungskoeffizienten ermittelt, die sich auch auf Varianten dieser Konstellationen anwenden lassen.

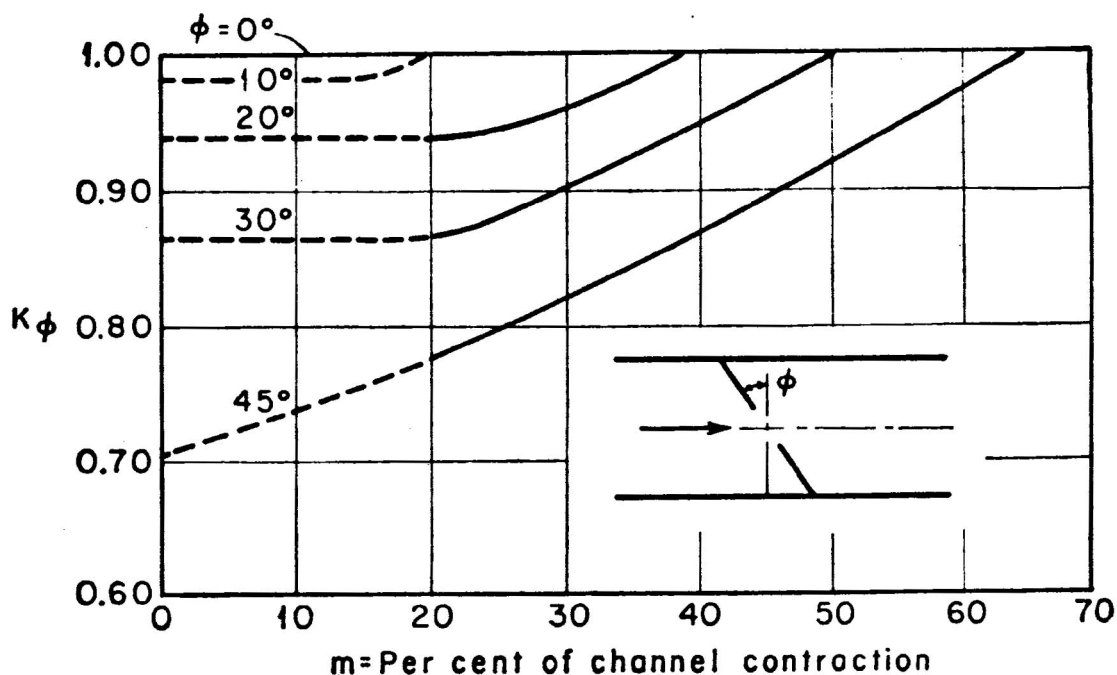


**Abbildung 3-17:** Widerstandsbeiwert  $C'$  für ein Einschränkungsbauwerk (aus Ven Te Chow, 1959)

Der Koeffizient  $C$  stellt hierbei den Wirbelverlust, der aufgrund von Turbulenz in den Ablöse-zonen entsteht, dar. Der Verlust, der durch die Reibung an den Sohlrauheiten entsteht, ist hierin nicht enthalten. Für die praktische Anwendung kann man den Koeffizienten  $C$  als Produkt vieler einzelner Verlustkoeffizienten ansehen, von denen jeder einzelne die individuellen Einflüsse beinhaltet, die das Einschränkungsbauwerk auf die Strömung ausübt (vgl. Gleichung 3-14).

$$C = C' \cdot K_F \cdot K_r \cdot K_w \cdot K_\phi \cdot K_y \cdot K_x \cdot K_e \cdot K_t \cdot K_j \quad \text{Gleichung 3-14}$$

Der Koeffizient  $C$  repräsentiert die Gesamtheit der Formwiderstandswirkung des Einschränkungsbauwerks. Die  $K$ 's sind Koeffizienten, die zur Normierung des Koeffizienten  $C'$  auf Standardbedingungen eingesetzt werden. So steht z.B. der Koeffizient  $K_\phi$  für die Abhängigkeit des Winkels des Einschränkungsbauwerks zur Hauptströmungsrichtung (vgl. Abbildung 3-18).



**Abbildung 3-18:** Korrekturkoeffizient zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der Einbaulage eines Einschränkungsbauwerks in Bezug zur Hauptströmungsrichtung (aus Ven Te Chow, 1959)

Je stärker das Einschränkungsbauwerk von den zuvor festgelegten Standardbedingungen abweicht, umso mehr Korrekturkoeffizienten werden benötigt. Cidarer (1977) schreibt zu dieser Methode:

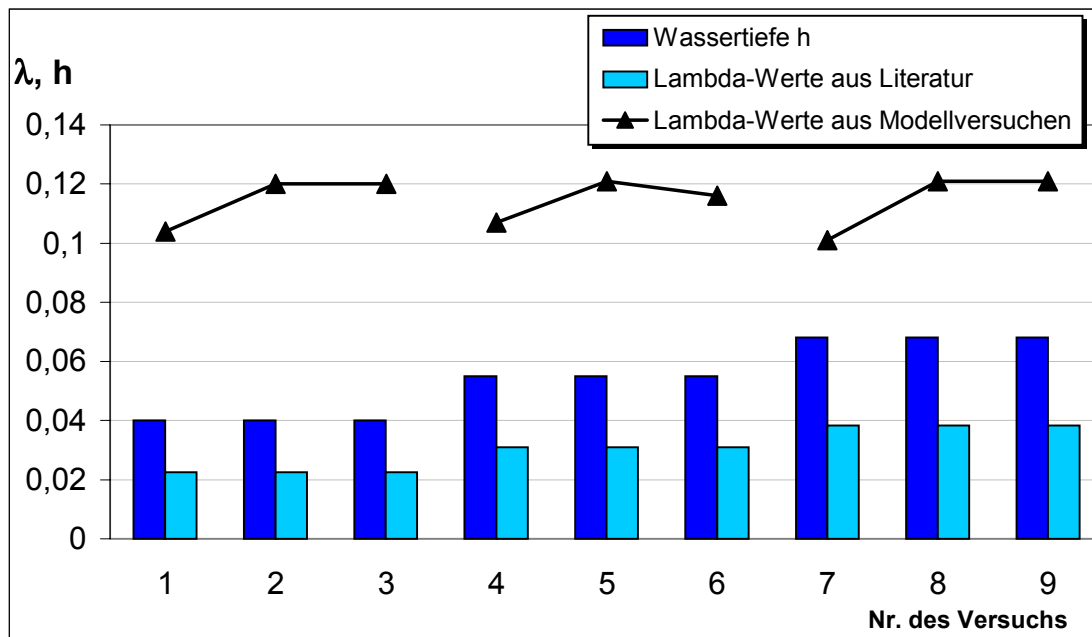
Vergleichsuntersuchungen weisen jedoch nach, daß die gewählte multiplikative Verknüpfung von Teilfaktoren oft übergroße Unsicherheiten in die Endergebnisse einfließen läßt, wodurch das Verfahren für die Praxis an Wert verliert.

Das Resultat der Übertragung soll hier dennoch dargelegt werden. Für ein Einschränkungsmaß  $b/B$  von 50 % ergibt sich ein Wert für  $C$  von 0,8. Übertragen auf die Bedingungen des Modellversuchs der BAW (Felkel, 1975) ergibt sich die folgende Formel zur Bestimmung des Formwiderstandsbeiwertes  $\zeta$ :

$$\zeta = \left( \frac{1}{C} \right)^2 - 1$$

**Gleichung 3-15**

Mit der Gleichung 3-15 ergibt sich ein  $\zeta$ -Wert von **0,563**. Das mit diesem Wert berechnete Ergebnis ist in Abbildung 3-19 dargestellt.



**Abbildung 3-19:** Gegenüberstellung von rechnerischen und in  $\lambda$ -Werte konvertierten  $\zeta$ -Werten aus der Literatur mit berechneten  $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen; Einschränkungsbauwerk, Beiwert C

Dies bedeutet, daß der Literaturwert um 73% unter dem Wert aus dem Modellversuch liegt. Dieses schlechte Resultat liegt darin begründet, daß, wie auch bei der Übertragung eines  $\zeta$ -Beiwertes aus der Literatur, dessen Wert additiv aus Form- und Reibungswiderstand zusammengesetzt ist (vgl. Kapitel 3.2.2) und die Parallelschaltung der Widerstände nicht berücksichtigt wird.

### 3.3 Zusammenfassung des Kapitels und Ansätze zur Verbesserung der Genauigkeit der Formwiderstandsbeiwerte

Aus den in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren zur Übertragung von Widerstandsbeiwerten aus der Literatur auf Meßergebnisse aus Modellversuchen der BAW (vgl. Kapitel 5) zieht der Verfasser folgende Schlüsse:

Die Übertragung des Beiwertes (Kapitel 3.2.1) einer Rohrblende führte zu guten Ergebnissen. Hierdurch wird die Wahl des in dieser Arbeit eingesetzten RÜ-Verfahrens nach Ein-

stein bestätigt. Da bei Rohrblenden insbesondere unmittelbar unterhalb der Kontraktionsstelle keine Sohl Schubspannungen auftreten, kann der Formwiderstand hier direkt dem der RÜ entstammenden Wert des Formanteils gegenübergestellt werden.

Die in Kapitel 3.2.3 erfolgte Übertragung eines Beiwertes zu Einschränkungsbauwerken, der für einen Vergleich des im Modellversuch ermittelten Gesamtwiderstandes herangezogen wurde, führte ebenfalls zu einer guten Übereinstimmung. Der Grund für die Abweichung ist hier in einer im Modellversuch des Einschränkungsbauwerks gewählten, gegenüber der in den Modellversuchen (Felkel, 1975) eingesetzten wesentlich größeren Sohlrauheit zu finden. Beide in der Literatur zu findenden Verfahren zu Widerstandsbeiwerten mit additiver Überlagerung von Form- und Reibungswiderstand versagten bei der Übertragung auf den Modellversuch. Dies aufgrund der ungenügenden Berücksichtigung des Nebeneinanderwirkens (Parallelschaltung) und darüberhinaus in Verbindung miteinander stehender Widerstandsformen (Interaktion).

## 4 Die Rauheitsüberlagerungsmethode

Diese Arbeit hat die Ableitung von Widerstandsbeiwerten für Flußregelungsbauwerke zum Ziel. Hierfür muß, wie schon im vorangegangenen Kapitel beschrieben, der Formwiderstand der Bauwerke von dem Reibungswiderstand der im allgemeinen sandrauhon Sohle getrennt werden. In Kapitel 3 wurde gefunden, daß die additive Überlagerung der Widerstandsbeiwerte die Interaktionswirkung von Hauptströmung und Kammern nicht berücksichtigt. Darüberhinaus wurde festgestellt, daß der RÜ-Ansatz nach Einstein Werte liefert, die in ihrer Größenordnung mit Verlustbeiwerten aus der Literatur gut übereinstimmen. Daher wird im folgenden Teil der vorliegenden Arbeit die Methode der RÜ im Einzelnen beschrieben.

### 4.1 Grundlagen zur Trennung von Widerstandswirkungen mit RÜ-Ansätzen

Viele wasserbauliche Problemstellungen, bei denen Druckrohr- und Offene-Gerinne-Abflüsse eine Rolle spielen, sind mit dem sogenannten RÜ-Problem zu charakterisieren. Ausgebauten oder naturbelassenen Gerinnen ist meist eine über den benetzten Umfang abschnittsweise wechselnde Wandungsrauigkeit zu eigen. So existieren im Regelfall an den Gerinneböschungen andersartige Rauheiten als an der Sohle. Dies hat seinen Grund beispielsweise in der vorhandenen Vegetation oder in einem künstlichen Deckwerk auf den Böschungen. Um diesen über den Fließquerschnitt wechselnden Rauigkeiten Rechnung zu tragen, wurden in der Vergangenheit sogenannte RÜ-Ansätze entwickelt. Der bekannteste Ansatz hierzu ist der von Einstein, der 1934 in seiner Schrift "Der hydraulische oder Profilradius" Ansätze zur Berechnung von Mehrfachrauheiten vorlegte.

Nach Indlekofer (1981), der verschiedene Überlagerungsansätze von mehreren Autoren miteinander verglich, ist auch nur dieser Ansatz physikalisch sinnvoll, da er die Bedingungen bezüglich der Durchflußfläche, der Wandschubkraft, des Abflusses und des Fließgesetzes erfüllt.

Der Einsteinsche Ansatz wurde unter Verwendung der Fließformel nach Manning-Strickler entwickelt und gilt für kompakte Querschnitte, da angenommen wird, daß in den Teilabflußflächen, die den einzelnen Rauheiten zuzuordnen sind, jeweils die gleiche mittlere Geschwindigkeit herrscht. Im Experiment hat man festgestellt, daß sich bei einer Aufspaltung der Teilabflußflächen durch eine gedachte Trennlinie im rechten Winkel zu den Isotachen, Verhältnisse einstellen, die die o.a. Annahme rechtfertigen (vgl. Abbildung 4-4).

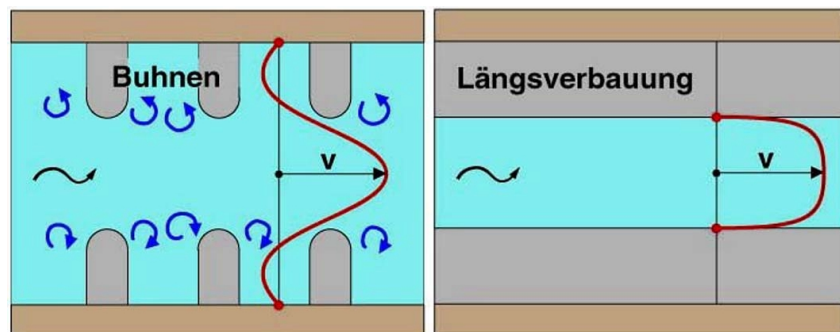


## 4.2 Grundlagen zur Herleitung des analytischen Ansatzes

Einsteins Veröffentlichung ist weiter unten auszugsweise wiedergegeben. Seine Interpretationen und Formeln wurden vom Verfasser auf Regelungsbauwerke übertragen. Einstein fand, daß der hydraulische Radius, ähnlich wie die Reynold'sche Zahl, einen inneren Sinn hat. Diese innere Begründung hängt nach seiner Ansicht mit der Energieumwandlung zusammen. Voraussetzung ist, daß der Abfluß voll turbulent ist, was in fast allen praktischen Fällen von Wasserabflüssen erfüllt ist. Der Vorgang der Energieumwandlung lässt sich demnach in zwei Teile zerlegen:

### 1. *Aufrollen der Randschicht mit starkem Geschwindigkeitsgefälle in Einzelwirbel*

Dies kann man sich z.B. bei Bühnenfeldströmungen so vorstellen, daß sich makroskopische Wirbel bilden, gerade in Bereichen mit starkem Geschwindigkeitsgefälle, also am Übergang der Hauptströmung in die Bühnenfelder. Bei Längsverbauungen bilden sich im Bereich der Randschicht ebenfalls Wirbel, die aber sehr viel kleiner ausfallen als die bei Bühnen (vgl. Abbildung 4-1). Im Allgemeinen wird diese Art von „Energieverlust“ **örtlicher Verlust** genannt.



**Abbildung 4-1:** Charakteristische horizontale Verteilung der Fließgeschwindigkeiten bei Bühnenverbauungen (links) und Längsverbauungen (Weber et al., 2000)

### 2. *Umwandlung der Wirbelenergie im ganzen Abflußquerschnitt durch innere Reibung.*

Diese Art des Energieverlustes wird als kontinuierlich verteilter bzw. als **Reibungsverlust** bezeichnet. Für den einfachen Fall eines einheitlich wirkenden Abflußquerschnittes mit konstanter Rauigkeit längs der ganzen Oberfläche kann man die mittlere Geschwindigkeit unter folgender Annahme berechnen (Zitat Einstein):

Die sekundlich zwischen zwei Querschnitten im Abstände  $l$  in Wirbel umgesetzte Energie  $e$  verteile sich gleichmäßig auf den benetzten Umfang  $U$ , so daß:

$$e' = \frac{e}{U} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

den sekundlichen Energieumsatz auf der Oberfläche der Länge  $l$  bedeutet.

Weiterhin nimmt er an, daß die Umwandlung der Energie sich gleichmäßig über den ganzen Querschnitt verteilt, was bei vollausgebildeter Turbulenz richtig ist. Es ergibt sich damit für die sekundlich in der Volumeneinheit umgewandelte Energie:

$$e'' = \frac{e}{A_{ges}} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Bezeichnet man mit  $V$  das Wasservolumen (pro  $m$  Länge), in dem die Energie derjenigen Wirbel vernichtet wird, die an der Oberfläche der Länge  $l$  gebildet worden sind, so kann man anschreiben, die an der Flächeneinheit umgesetzte Energie  $e'$  sei:

$$e' = V e'' \quad \text{Gleichung 4-3}$$

oder:

$$V = \frac{e'}{e''} = \frac{e}{U} \frac{A_{ges}}{e} = \frac{A_{ges}}{U} = R \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Das ist der hydraulische Radius, der nach Einstein folgendermaßen definiert ist:

Der hydraulische Radius ist gleich dem Wasservolumen, in dem die Energie der an der Einheit der Oberfläche gebildeten Wirbel umgewandelt wird.

Das bedeutet, daß zur Berechnung von Querschnitten mit über den Umfang veränderlichen Rauigkeiten physikalisch sinnvolle mathematische Beziehungen geschaffen werden können. Diese leitet Einstein verbal folgendermaßen her:

Zunächst stellt man sich den Querschnitt in  $j$  gleiche Flächenanteile untergliedert vor. Nimmt man für alle Flüssigkeitsteilchen gleiche Geschwindigkeit an, dann liefern bei einem bestimmten Energieliniengefälle für diesen Energieumsatz auch alle Flüssigkeitsteilchen gleichviel Energie, so daß die Energie, die ein Flächenelement umsetzt, von einem  $j$ -tel des Wasservolumens stammt.

In einem natürlichen Fließgewässer ist diese Annahme sicherlich nicht richtig, so daß eine Kompensation derselben erfolgen muß. Die Annahme ist jedoch Grundvoraussetzung für die Herleitung der grundlegenden Bilanzgleichung nach Einstein. Einstein schreibt dazu:

Da die Turbulenz über den Querschnitt gleichmäßig verteilt angenommen ist, wird dieses  $j$ -tel der Wirbelenergie auch in einem  $j$ -tel des Wasservolumens zerstört. Es liegt nun nahe, den Vorgang so aufzufassen, daß das energieliefernde Volumen für ein bestimmtes Oberflächenelement aus den gleichen Teilchen besteht, in denen nachher die Wirbelenergie vernichtet wird. Auf diese Weise kann man Einheiten, bestehend aus einem Oberflächenelement und dem zugehörigen Volumen bilden, die in energetischer Hinsicht selbständig sind. Diese Selbständigkeit drückt sich darin aus, daß der Energietransport durch die Abgrenzungsfläche gegen die benachbarten Elemente überall gleich Null ist. In dem einfachsten Falle des kreisrunden Rohres sieht man aus Symmetriegründen ohne weiteres, daß das zu einem Umfangselement gehörige Volumen durch die beiden Radien in den Endpunkten des Elementes begrenzt sein muß. Auf jeden Fall liegen die Begrenzungslinien in der Richtung des Energietransportes, und es liegt nahe, sie in erster Näherung senkrecht zu den Isotachen anzunehmen, wie es auch für den Impulsaustausch üblich ist (vgl. Abbildung 4-4).

Diese Annahme wird als „Kriterium der Schubspannungsfreiheit“ nach Einstein bezeichnet, weil im Verlauf einer Begrenzungslinie senkrecht zu den Isotachen zwangsläufig keine Schubspannungen auftreten können.

Einstein verwendet zur Herleitung seiner Ansätze "irgendeine" Geschwindigkeitsformel, nämlich die von Strickler. Im folgenden sollen seine Ansätze jedoch unter Verwendung der Darcy-Weisbachformel angeschrieben werden. Diese bietet den Vorteil, daß die Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit  $v_m$  in Abhängigkeit von einer geometrisch bestimmbarer Größe, der Rauheit (z.B. äquivalente Sandrauheit  $k_s$ , in m bzw. mm) möglich ist. Allerdings entstehen bei der Verwendung der Darcy-Weisbachformel im Zusammenspiel mit der RÜ-Problematik komplizierte Formelzusammenhänge, die nur iterativ gelöst werden können. Aufgrund der heute zur Verfügung stehenden Rechnerleistung ist eine derartige Vorgehensweise aber gerade wegen der physikalisch sinnvolleren Darcy-Weisbachbeziehung gerechtfertigt.

### 4.3 Die Geschwindigkeitsformeln nach Strickler und nach Darcy-Weisbach

Die Stricklerformel wurde definiert um eine Beziehung zwischen der mittleren Geschwindigkeit und dem Reibungsbeiwert zu schaffen und kann nicht physikalisch begründet werden. Sie wurde geschaffen, um überhaupt einen Zusammenhang zwischen den o.a. Größen herstellen zu können und hat sich aufgrund ihrer relativ einfachen Anwendbarkeit in der

Praxis durchgesetzt. Die Beziehung nach Darcy-Weisbach hingegen kann physikalisch plausibel aufgrund einer Gleichgewichtsbetrachtung zwischen treibenden Kräften und bremsenden Kräften hergeleitet werden. Sie ist in der Anwendung jedoch wegen impliziter Formelzusammenhänge schwieriger zu handhaben. Im Folgenden wird jeweils die Stricklerformel, mit der die Einstein'sche Überlagerungsformel abgeleitet wurde, der entsprechenden Beziehung nach Darcy-Weisbach in Tabellenform gegenübergestellt. Auf eine Herleitung der Darcy-Weisbachgleichung wird hierbei verzichtet, da sie jedem Lehrbuch der Hydraulik entnommen werden kann.

Strickler	Darcy-Weisbach
$v_m = k_{\text{str}} i^{1/2} R^{2/3}$	$v_m = \sqrt{\frac{8 g i R}{\lambda}}$

**Tabelle 4-1:** Geschwindigkeitsformeln nach Strickler und nach Darcy-Weisbach

- mit  $\lambda$  = Reibungszahl  
 $v_m$  = mittlere Geschwindigkeit [m/s]  
 $k_{\text{str}}$  = Stricklerbeiwert [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ]  
 $i$  = Energieliniengefälle  
 $R$  = hydraulischer Radius [m]  
 $g$  = Schwerebeschleunigung [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

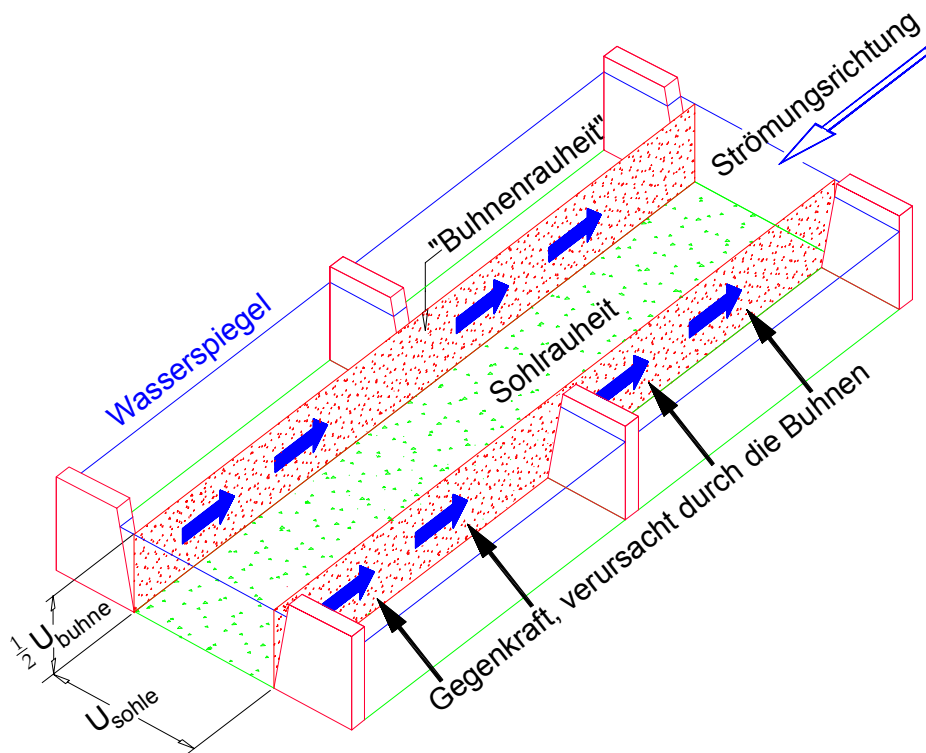
Im Folgenden wird gezeigt, wie auf Grund der Einstein'schen Definition des hydraulischen Radius die unterschiedlichen Rauheitswirkungen bei einer Regelung mit Buhnen voneinander getrennt werden können.

#### 4.4 Der RÜ-Ansatz nach Einstein, am Beispiel von Buhnen

Nach Einstein kann man

auf den ganzen Querschnitt irgendeine Geschwindigkeitsformel anwenden, die damit ohne weiteres auch für irgendeine Einheit gilt, für die die in der Formel vorkommenden Größen ( $v_m$ ,  $k_{\text{str}}$ ,  $i$  und  $R$ ) den entsprechenden Wert besitzen wie im Gesamtquerschnitt.

Die physikalische Interpretation nach Einstein wird hier ergänzt durch die Herleitung der RÜ unter Verwendung der Darcy-Weisbachformel, angewendet am Beispiel von Buhnen. Es muß Gleichgewicht herrschen zwischen der treibenden Kraft aufgrund der Gefällewirkung und den Widerstandskräften, die über den Querschnitt mit wechselnder Rauigkeit verteilt wirken. Die geodätische Druckhöhendifferenz  $\Delta h$  multipliziert mit der gesamten Querschnittsfläche muß im Gleichgewicht stehen mit der Summe der über den Querschnitt verteilten Reibungsschubspannungen, multipliziert mit der Oberfläche, an der diese angreifen. Hierbei wird die aufgrund von z.B. Buhnen einsetzende, bremsende Wirkung (Gegenkraft) auf die Hauptströmung als Scheinschubspannung angesehen, die in einer fiktiven senkrecht stehenden Begrenzung wirkt, die durch die Buhnenfüße verläuft. Die Abbildung 4-2 zeigt die Vorstellung von der Trennung der Rauheitswirkungen bei Buhnen.



**Abbildung 4-2:** Modellvorstellung zur Trennung der Rauheitswirkungen bei Buhnen; vertikale Trennfläche (rot), in der Scheinschubspannungen (blaue Pfeile) angenommen werden

In einem Querschnitt mit wechselnder Wandrauheit wird nicht mehr auf jedem Oberflächenelement gleichviel Energie in Wirbel umgesetzt. Nach Einstein kann man in diesem Fall

energetische Einheiten bilden, bei denen sich je nach Rauigkeit das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, also der hydraulische Radius ändert. Diese Einheiten verhal-

ten sich so, als wären sie Teile eines Querschnitts mit konstanter Rauigkeit, gleicher Geschwindigkeit und gleichem Energieliniengefälle. Unter dieser Annahme kann man auf die Einheiten einzeln die Abflussgleichung anwenden und erhält bei  $j$  Einheiten  $j$  Gleichungen:

Strickler	Darcy-Weisbach
$\frac{v_m}{i^{1/2}} = k_1 R_1^{2/3} = k_2 R_2^{2/3} = \dots = k_j R_j^{2/3}$	$\frac{v_m}{(8 g i)^{1/2}} = \left(\frac{R_1}{\lambda_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{R_2}{\lambda_2}\right)^{1/2} = \dots = \left(\frac{R_j}{\lambda_j}\right)^{1/2}$

**Tabelle 4-2:** Bildung von energetischen Einheiten zur Herleitung der RÜ nach Einstein, angeschrieben mit den Geschwindigkeitsformeln nach Strickler und nach Darcy-Weisbach

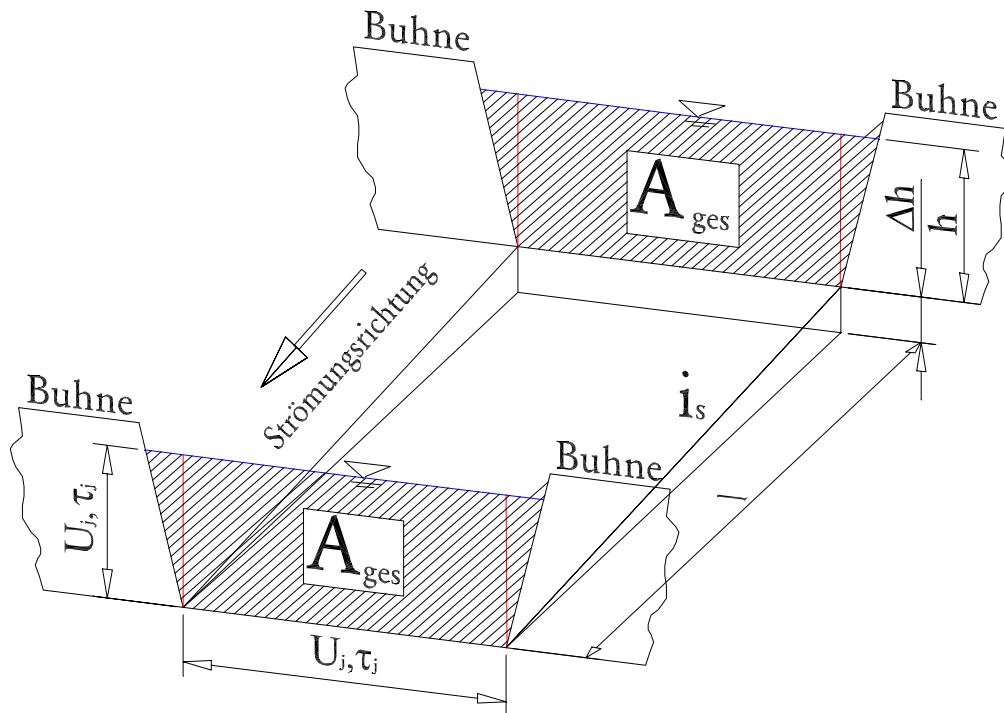
Eine weitere Gleichung erhält man aus der Überlegung, daß sich für jede Einheit die Fläche als Produkt von hydraulischem Radius und Umfangselement ergibt:

Strickler	Darcy-Weisbach
$A_{\text{ges}} = \sum_j U_j R_j$	$A_{\text{ges}} = \sum_j U_j R_j$

**Tabelle 4-3:** Die Aufsummierung der Teilabflußflächen

- mit
- $A_{\text{ges}}$  = abflußwirksame Fläche [m<sup>2</sup>]
  - $U_j$  = anteiliger benetzter Umfang [m]
  - $R_j$  = anteiliger hydraulischer Radius [m]
  - $j$  = Zählvariable

Die Abbildung 4-3 dient zur Veranschaulichung der im Folgenden hergeleiteten RÜ nach Einstein und basiert auf der Geschwindigkeitsformel nach Darcy-Weisbach.



**Abbildung 4-3:** Schemaskizze zur Herleitung der Gleichgewichtsbedingung nach Darcy-Weisbach im Zusammenhang mit Buhnenbauwerken

Auf einer beliebigen Länge  $l$  verringert sich die geodätische Höhe eines Flusses um den Wert  $\Delta h$ . Es entsteht somit eine geodätische Druckhöhendifferenz, die auf die abflußwirksame Fläche (Flußquerschnitt) wirkt. Dieser Kraft stehen die Widerstandskräfte entgegen, die über den Umfang des Flußbetts an unterschiedlichen Rauheiten verteilt wirken. Es ergibt sich damit folgender Formelzusammenhang:

$$\rho g \Delta h A_{\text{ges}} = l \sum_j \tau_j U_j \quad \text{Gleichung 4-5}$$

mit  $\rho$  = Dichte [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\Delta h$  = Gefälle [m]  
 $l$  = Fließlänge [m]  
 $\tau_j$  = anteilige Schubspannung [N/m<sup>2</sup>]

$$\text{Mit } i = \frac{\Delta h}{l} = \text{Fließgefälle} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

und dem Dimensionsansatz (z.B. Zierep, 1982):

$$\sqrt{\frac{\tau_j}{\rho}} = v_m \sqrt{\frac{\lambda_j}{8}} \quad \text{Gleichung 4-7}$$

mit  $\lambda_j$  = anteilige Reibungszahl

folgt 
$$\lambda_{ges} U_{ges} = \sum_j \lambda_j U_j \quad \text{Gleichung 4-8}$$

mit  $\lambda_{ges}$  = Gesamtreibungszahl

$U_{ges}$  = gesamter benetzter Umfang [m]

Die **Gleichung 4-8** ist identisch mit der im DVWK-Merkblatt (1991, Kapitel 3.4) angegebenen. Sie wurde dort jedoch ohne Herleitung angegeben.

Mit  $v_m = \sqrt{\frac{8 g i R}{\lambda}}$  (vgl. Tabelle 4-1) folgt:

Strickler	Darcy-Weisbach
$A_{ges} = \frac{v_m^{3/2}}{i^{3/4}} \sum_j \frac{U_j}{k_{str_j}^{1/2}}$	$A_{ges} = \frac{v_m^2}{8 g i} \sum_j \lambda_j U_j$

**Tabelle 4-4:** Beziehung zur Berücksichtigung von Mehrfachrauheiten nach Einstein, angeschrieben mit den Geschwindigkeitsformeln nach Strickler und nach Darcy-Weisbach

Die Rauheitsüberlagerungsformel nach Einstein, hergeleitet mit der Geschwindigkeitsformel nach Strickler und mit der Gleichgewichtsbeziehung nach Darcy-Weisbach, kann somit angegeben werden. Einstein:

Sind  $i$  und die verschiedenen  $k_{str}$  zusammen mit den zugehörigen Umfangselementen  $U_j$ , sowie die Fläche  $A_{ges}$  bekannt, so lassen sich mit Hilfe der  $j+1$  Gleichungen die  $j$   $R$ -Werte sowie  $v_m$  bestimmen; insbesondere dieses erhält man wie folgt:



Einstein/Strickler	Einstein/Darcy-Weisbach
$v_m^{3/2} = i^{3/4} \frac{A_{\text{ges}}}{\sum_j \frac{U_j}{k_j^{3/2}}}$	$v_m^2 = 8 g i \frac{A_{\text{ges}}}{\sum_j U_j \lambda_j}$

**Tabelle 4-5:** RÜ nach Einstein, aufgelöst nach der mittleren Geschwindigkeit, mit den Geschwindigkeitsformeln nach Strickler und nach Darcy-Weisbach

#### 4.5 Folgerungen aus dem Einstein'schen RÜ-Ansatz: Die Rauheitsüberlagerungsbedingung

Setzt man in Tabelle 4-4 für  $v_m$  die in Tabelle 4-1 angegebene Geschwindigkeitsformel nach Darcy-Weisbach ein, so ergibt sich die folgende Beziehung, die als der Kern der Einstein'schen RÜ angesehen werden kann.

$$\frac{R_j}{\lambda_j} = \frac{R_{\text{ges}}}{\lambda_{\text{ges}}} = \text{const.}$$

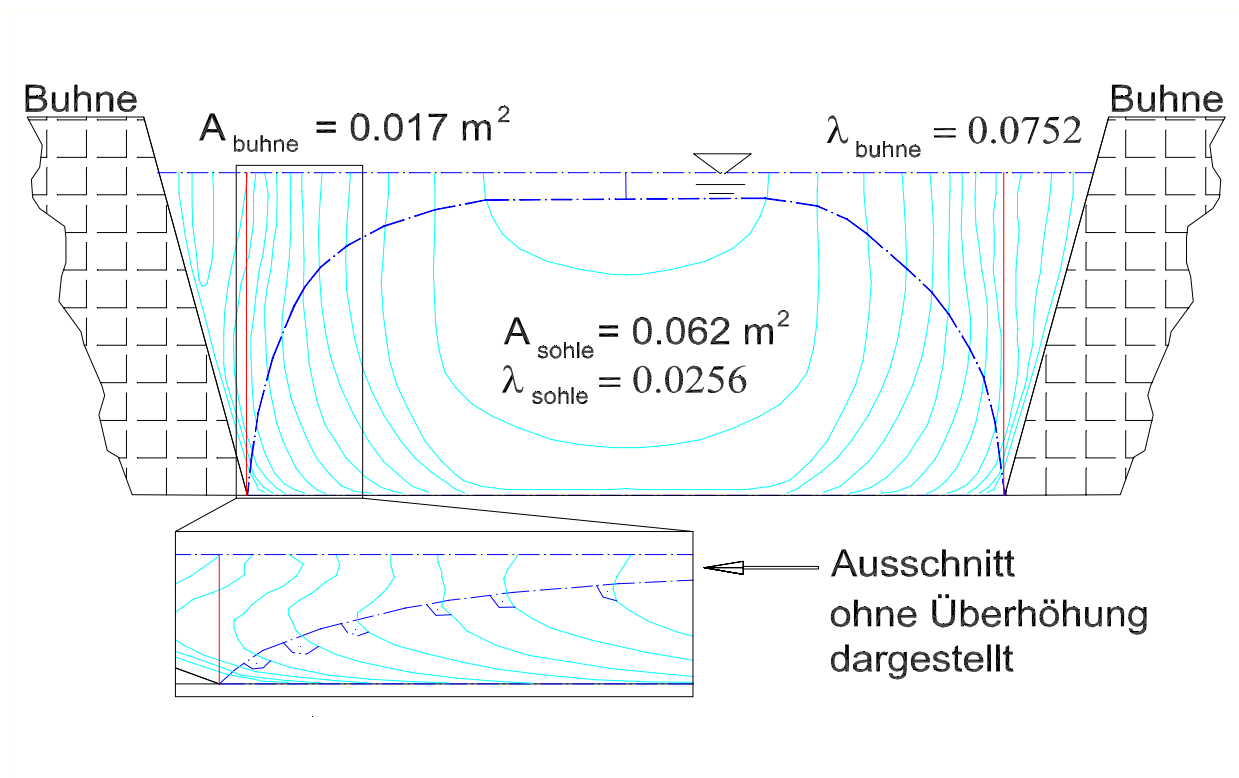
**Gleichung 4-9**

Bei Buhnen wirken im Fließquerschnitt der Sohlwiderstand und der Buhnenwiderstand gleichzeitig. Überträgt man diese Annahme auf die Gleichung 4-9 so erhält man folgende Beziehung:

$$\frac{\lambda_{\text{buhne}}}{\lambda_{\text{sohle}}} = \frac{R_{\text{buhne}}}{R_{\text{sohle}}} = \frac{A_{\text{buhne}}}{A_{\text{sohle}}} \frac{U_{\text{sohle}}}{U_{\text{buhne}}}$$

**Gleichung 4-10**

Mit einem Modellversuch für nichtüberströmte Buhnen (Felkel, 1975) wurden die Einstein'schen Annahmen anhand aufgezeichneter Isotachenverläufe überprüft (vgl. Abbildung 4-4). Die Reibungszahlen wurden hierbei mit der RÜ-Formel berechnet. Das Verhältnis der Reibungszahlen in den „einzelnen“ Querschnitten (aufgeteilt nach dem „Kriterium der Schubspannungsfreiheit“, vgl. Kapitel 4.2) stimmte hierbei gut mit dem Verhältnis der hydraulischen Radien überein (vgl. Tabelle 4-6).



**Abbildung 4-4:** Trennung des abflußwirksamen Bereichs zwischen Buhnenbauwerken nach dem Kriterium der Schubspannungsfreiheit von Einstein in Flächenanteile, die den Widerstandseinflüssen von Buhnen und Sohle zugeordnet werden (10-fach überhöht dargestellt; Felkel, 1975)

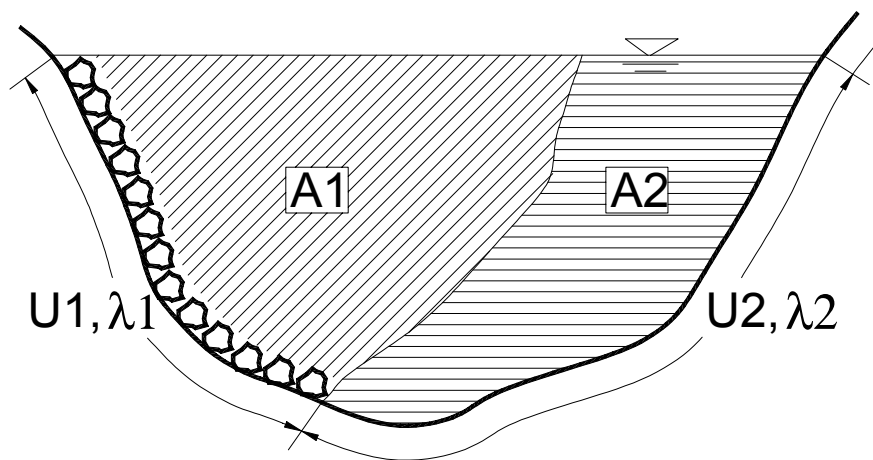
$\frac{\lambda_{\text{bühne}}}{\lambda_{\text{sohle}}}$	$\frac{R_{\text{bühne}}}{R_{\text{sohle}}}$
mit der RÜ-Formel nach Einstein berechnet	Verhältnis der hydraulischen Radien, gemessen
2,9	3,0

**Tabelle 4-6:** Gegenüberstellung der mit dem „Kriterium der Schubspannungsfreiheit“ vermessenen hydraulischen Radien von Buhnen und Sohle zum Verhältnis der Reibungsbeiwerte

Damit ist gezeigt, daß das Einstein'sche „Kriterium der Schubspannungsfreiheit“ die RÜ-Bedingung (vgl. Gleichung 4-9) in dem hier untersuchten Fall erfüllt.

#### 4.6 Folgerungen aus dem Einstein'schen RÜ-Ansatz: Die Einzelwiderstände im Bezug zum Gesamtwiderstand

Im folgenden wird gezeigt, wie sich beim RÜ-Ansatz nach Einstein die Einzelwiderstände in Bezug zum Gesamtwiderstand verhalten. Stellt man die **Gleichung 4-8** zur Berechnung der Gesamtreibungszahl um und setzt die Gleichung 4-9 ein, so wird die Flächenzuordnung zu den Reibungszahlen deutlich. Dies wird beispielhaft für einen Berechnungsfall mit zwei über den Fließquerschnitt verteilt wirkenden, verschiedenen Fließwiderständen angeschrieben (vgl. Abbildung 4-5).



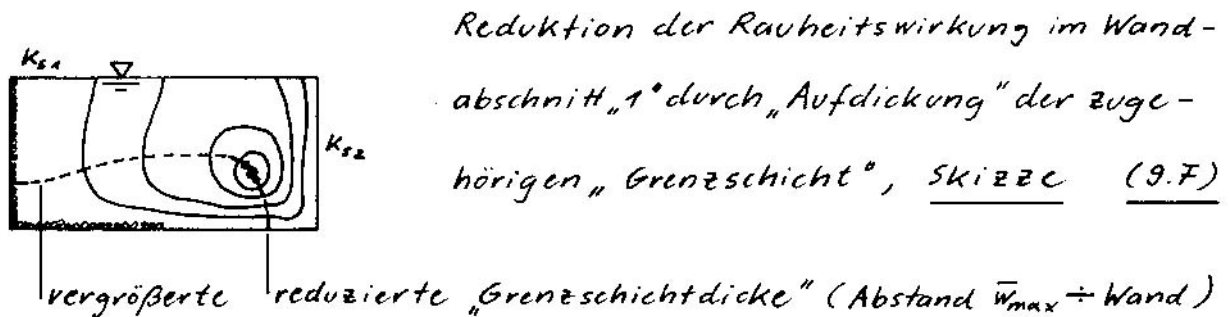
**Abbildung 4-5:** Schemaskizze zur Verdeutlichung der Parameterzuordnung bei einem Berechnungsfall mit zwei über einen Fließgewässerquerschnitt verteilten ungleichen Betttrauheiten

Daraus folgt, daß der Gesamtwiderstand umgekehrt proportional zur Summe der reziproken Teilwiderstände ist. Deren Anteile werden mit dem jeweiligen Flächenanteil multipliziert (vgl. Gleichung 4-11).

$$\lambda_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} \frac{A_1}{A_1 + A_2} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{A_2}{A_1 + A_2}} \quad \text{Gleichung 4-11}$$

Diese Beziehung wurde schon in Kapitel 3.2.2 angeschrieben, um die Analogie zur Parallelschaltung von elektrischen Widerständen aufzuzeigen. An dieser Stelle wird gezeigt, in welchem Bezug der Vorfaktor zu den inversen Teilwiderständen steht. Aufgrund der Annahme einer konstanten mittleren Geschwindigkeit in den Teilquerschnitten (vgl. Kapitel 4.2) muß eine Gewichtung der Teilwiderstände erfolgen. Tatsächlich muß bei größeren Rauheiten

durch die „Aufdickung der Grenzschicht“ (vgl. Abbildung 4-6) die aufgrund des „Kriteriums der Schubspannungsfreiheit“ dieser Rauheit zugeordnete Fläche einen verhältnismäßig größeren Anteil an der Gesamtfläche zugeordnet bekommen.



**Abbildung 4-6:** Verschiebung des Geschwindigkeitsmaximums (Aufdickung der Grenzschicht) aufgrund von unterschiedlichen Wandrauheiten im Fließquerschnitt (aus Söhngen, 1987)

Dadurch wird die Annahme einer eigentlich zu großen Geschwindigkeit über dem rauheren Anteil sowie einer zu kleinen Geschwindigkeit über dem glatteren Teil ausgeglichen. Die Auswertung des Modellversuchs nach den mittleren Geschwindigkeiten in den Teilquerschnitten mit der Gleichung 4-12 zeigen die in Tabelle 4-7 aufgelisteten Werte.

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_i A_i v_i}{A_{\text{ges}}}$$

**Gleichung 4-12**

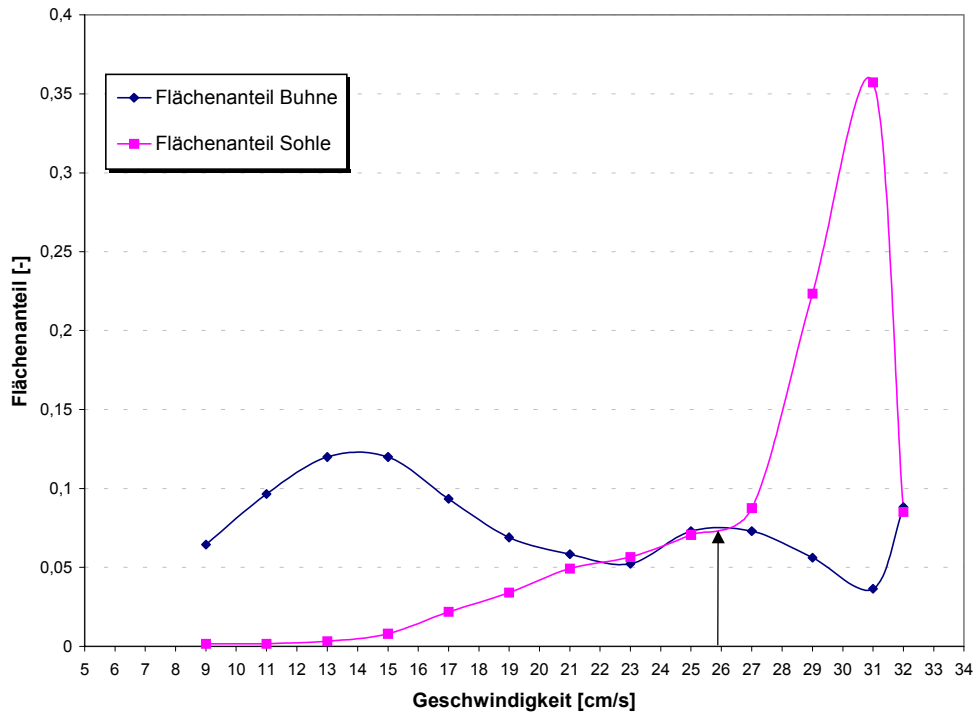
	Mittlere Geschwindigkeit gesamt [m/s]	Mittlere Geschwindigkeit	Mittlere Geschwindigkeit
	0,26 m/s	0,28 m/s	0,20 m/s
<b>Flächen</b>	0,088 m <sup>2</sup>	0,062 m <sup>2</sup>	0,026 m <sup>2</sup>
<b>Abflüsse</b>	22,6 l/s	17,4 l/s	5,2 l/s

**Tabelle 4-7:** Auswertung der mittleren Geschwindigkeit für den Gesamtquerschnitt sowie für die Teilquerschnitte

Die mittlere Geschwindigkeit im Bühnenbereich wird bei Annahme einer gleich großen mittleren Geschwindigkeit über den gesamten Querschnitt um ca. 30 % gegenüber dem Anteil im Sohlbereich überschätzt. Da die Geschwindigkeit quadratisch in die Berechnung des Widerstandsbeiwertes eingeht, beträgt der Fehler hierfür ca. 70 %. Der Flächenanteil

des Bühnenanteils an der Gesamtfläche beträgt ca. 30 %. Wird dieser Flächenanteil berücksichtigt, so wird der Bühnenwiderstandsbeiwert um ca. 70 % verringert und damit der Fehler des Widerstandsbeiwertes kompensiert.

Diese Eigenschaft der Gleichung 4-11 wird auch deutlich bei der Auswertung der Isotachen (vgl. Abbildung 4-4) nach Flächenanteilen der Geschwindigkeit (vgl. Abbildung 4-7).



**Abbildung 4-7:** Geschwindigkeitsabhängige Flächenanteile für den nach Bühnen- und Sohlenteil differenzierten Abflußbereich

Die Annahme einer mittleren Geschwindigkeit von 26 cm/s (vgl. Tabelle 4-7) über den gesamten Querschnitt bedeutet gleiche Flächenanteile für die Geschwindigkeiten im Bühnen- sowie im Sohlbereich. Das heißt, in diesem Geschwindigkeitsbereich sind die Abflußanteile für beide Bereiche gleich. Dieses Ergebnis der Isotachenauswertung bestätigt damit das Kriterium der Schubspannungsfreiheit im Zusammenspiel mit der Annahme einer gleichen mittleren Geschwindigkeit in den Teilabflußbereichen.

## 5 Hydraulische Modellversuche

Zur Gewinnung von Widerstandsbeiwerten für Regelungsbauwerke müssen physikalische Modellversuche ausgewertet werden. Von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurden unveröffentlichte Meßergebnisse eines von Felkel 1975 durchgeführten wasserbaulichen Modellversuchs zur Verfügung gestellt. Darüberhinaus standen auch die Auswertungsergebnisse, aufgezeichnet in einem Gutachten der TU Wien (Ogris, 1994) zur Verfügung, die auf Grundlage einer mit den BAW-Versuchsrahmenbedingungen identischen Versuchsanordnung gewonnen wurden. Die Meßergebnisse aus dem BAW-Versuch wurden eingesetzt um die Widerstandsbeiwerte für Regelungsbauwerke (hier: Buhnen) abzuleiten, während die Ergebnisse aus dem Modellversuch der TU Wien für eine Validierung der Prognoserechnungen mit den RÜ-Ansatz, dem die o.a. Widerstandsbeiwerte vorgegeben wurden, eingesetzt wurde. Diese wechselseitige Absicherung der Berechnungsergebnisse führt damit zu einer guten Validierung der in dieser Arbeit eingesetzten Berechnungsverfahren.

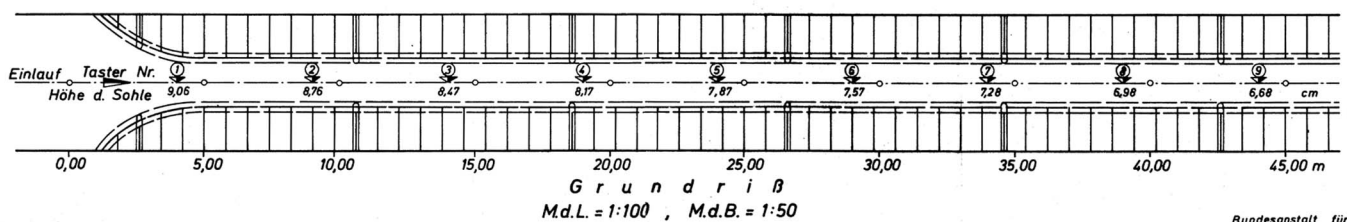
### 5.1 Der BAW-Versuch (Felkel, 1975)

Die Experimente wurden in einer 45 Meter langen und 2,50 Meter breiten rechteckförmigen Betonrinne (vgl. Abbildung 5-1) mit rechtwinklig und beidseitig angeordneten Modellbuhnen durchgeführt. Die Rinnenneigung betrug hierbei 0,595 ‰. Vor Einbau der Buhnen wurde der Versuchskanal "leer" gemessen, d.h. die Abflüsse für die unverbauten Querschnitte wurden angegeben. Bei der Einstellung des Wasserspiegels über eine verstellbare Klappe am Rinnenende wurden über die Kanallänge möglichst gleichbleibende Wassertiefen eingestellt (Normalabflußbedingungen). Hierfür wurde der Durchfluß über ein Meßwehr zugeführt. Bei der Bestimmung der Wasserspiegellagen war man bestrebt, den Durchfluß so zu dosieren, daß sich die vorgegebenen Wassertiefen möglichst über die gesamte Rinnenlänge gleichmäßig einstellten. Da indessen, nicht zuletzt infolge der Wirkung der Einbauten, ein strenger Normalabfluß nicht immer erreichbar war, sind in den Versuchsanlagen die über die Rinnenlänge gemittelten Wassertiefen angegeben und außerdem auch die maximalen und minimalen Werte aus sechs Messungen. In der Anlage wurden ferner für alle im Rahmen der Versuchsreihen gemessenen Zustände die im Modell aufgetretenen mittleren Wasserspiegellängsgefälle angegeben.



**Abbildung 5-1:** Versuchsstand der BAW mit eingebauten Modellbuhnen

In gleichen Abständen von jeweils fünf Metern waren über den Rinnenachsen stationäre Spitzentaster angeordnet (vgl. Abbildung 5-2).



**Abbildung 5-2:** Grundriß der Versuchsrinne mit Buhnen und Anordnung von Spitzentastern zur Vermessung der Wasserspiegellagen

Insgesamt wurden fünf Versuchsreihen durchgeführt. In den ersten drei Versuchen bestanden die Modellbuhnen aus rechteckigen, sieben Zentimeter hohen Zinkblechen. Diese Form wurde gewählt, um besonders deutliche Auswirkungen auf den Abfluß zu erzielen. Bei den weiteren Versuchsreihen bestanden die ebenfalls sieben Zentimeter hohen Modellbuhnen aus Beton, hatten einen horizontalen Rücken und einen trapezförmigen Querschnitt mit einer neunzehn Zentimeter langen Basis. Die Böschungsneigungen betragen nach oberstrom 1:1, nach unterstrom 1:1,5 und am Buhnenkopf 1:2,5. Diese gegenüber praktischen Ausführungen recht steilen Buhnenböschungen wurden im Modell bevorzugt, um auch eine dichte Aufeinanderfolge von Buhnen untersuchen zu können. Betrachtet man das Modell als höhenverzerrt, so kann man den trapezförmigen Querschnitt rechnerisch so transformieren, daß man Vielfache oder Bruchteile der genannten Böschungsneigungen erhält.

Variiert wurden die Buhnenabstände, bezogen auf die Regelungsbreite und die Buhnenlänge, sowie die Wassertiefen, bezogen auf die Buhnenhöhen. In den Versuchsreihen 1-3 bestanden die Modellbuhnen aus rechteckigen Zinkblechen, in den Versuchsreihen 4-5 aus Betonbuhnen (vgl. Tabelle 5-1). Die Betonbuhnen waren mit einer Kopfneigung von 1:2,5 versehen. Nach oberstrom (luvseitig) betrug ihre Böschungsneigung 1:1, nach unterstrom (leeseitig) 1:1,5 (vgl. Tabelle 5-2).

Geometrische Kenngrößen der Versuchsreihen 1-3											
	$b_g$ [m]	$l_b$ [m]	$a_b$ [m] (variiert)				$h_b$ [m]	$h$ [m] (variiert)			
<b>VS1</b>	2,288	0,574	0,570	1,140	1,710	---	0,07	0,025	0,040	0,055	0,068
<b>VS2</b>	2,500	0,500	0,500	1,000	2,000	3,000	0,07	0,030	0,045	0,060	0,070
<b>VS3</b>	2,500	0,625	0,625	1,250	---	---	0,07	0,030	0,045	0,060	0,070

**Tabelle 5-1:** Geometrische Kenngrößen der Versuchsreihen 1-3

- mit  $b_g$  = Wasserspiegelbreite des Flußlaufs bei Normalabfluß [m]  
 $l_b$  = Buhnenlänge [m]  
 $a_b$  = Buhnenabstand [m]  
 $h_b$  = Buhnenhöhe [m]  
 $h$  = Wassertiefe [m]



Geometrische Kenngrößen der Versuchsreihen 4-5											
Böschungsneigungen in und quer zur Fließrichtung											
	$b_g$ [m]	$l_b$ [m]	$a_b$ [m] (variiert)				$h_b$ [m]	$h$ [m] (variiert)			
VS4	1,325	0,588	0,50	1,00	2,00	4,00	0,07	0,030	0,045	0,060	0,070
VS5	0,725	0,888	0,80	1,60	3,20	6,40	0,07	0,030	0,045	0,060	0,070

Tabelle 5-2: Geometrische Kenngrößen der Versuchsreihen 4-5

Die Wasserspiegellagen wurden längs der Rinnenachse an neun stationären Spitzentastern abgelesen (vgl. Abbildung 5-3). Jeder Versuch wurde zweimal wiederholt und das arithmetische Mittel aus den drei Meßwerten gebildet.

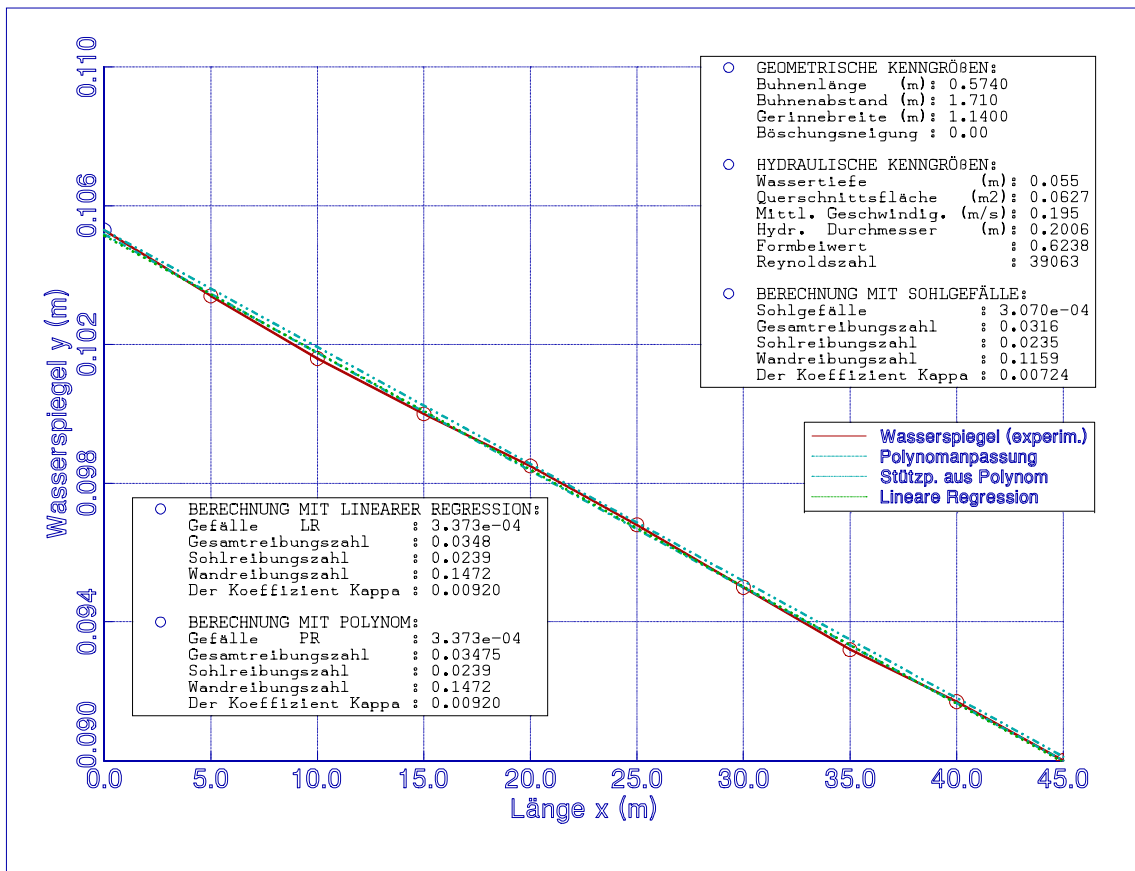
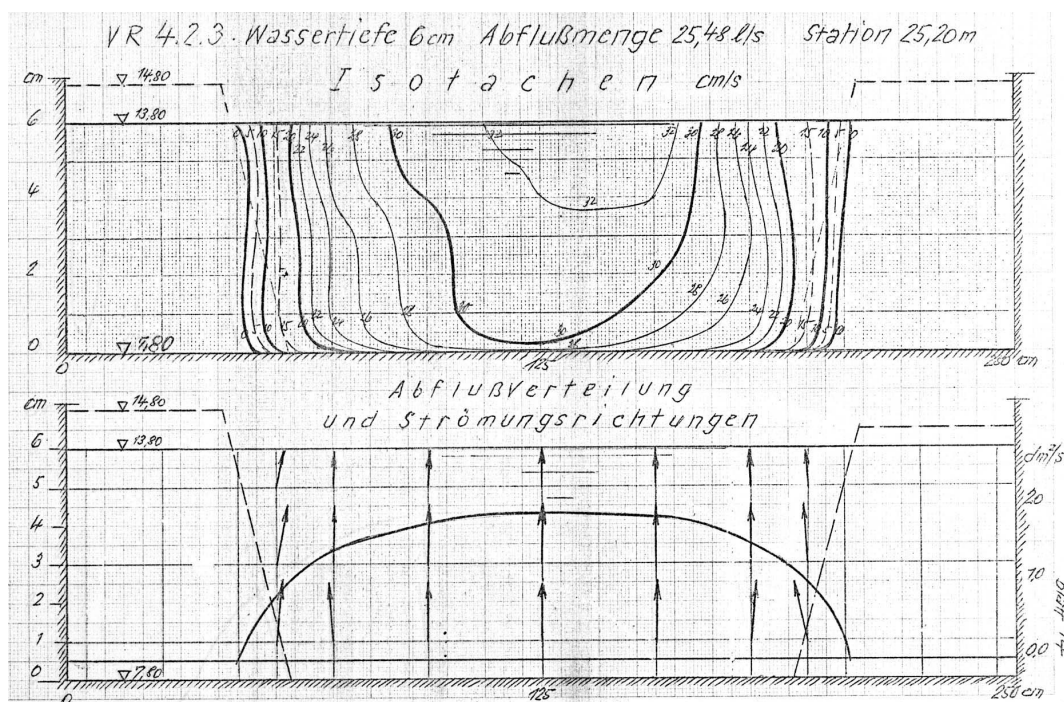
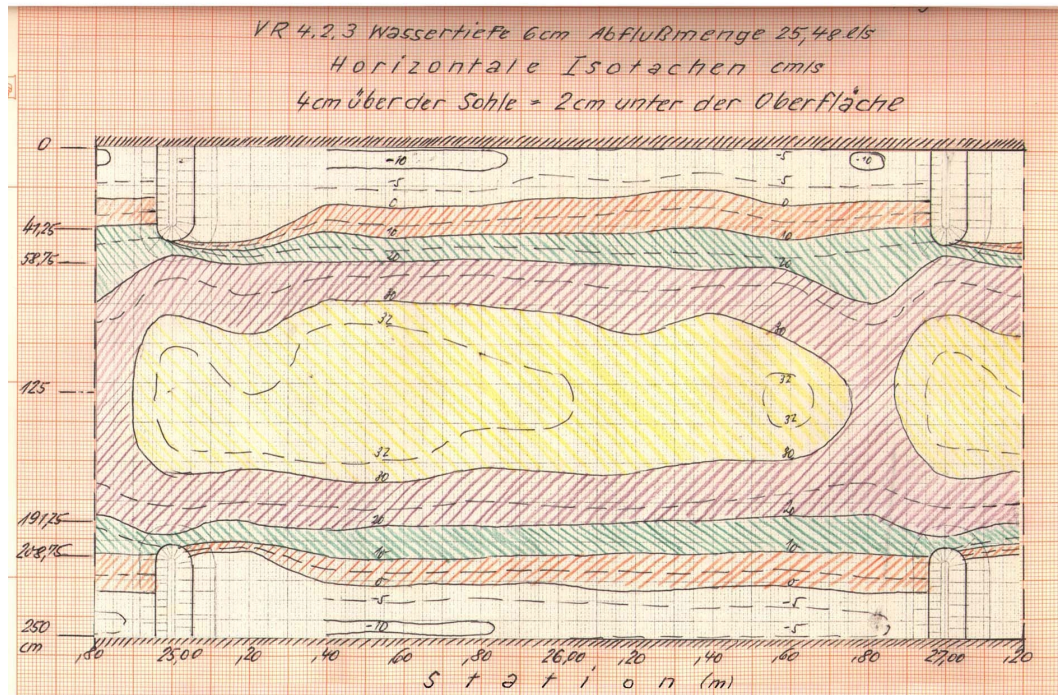


Abbildung 5-3: Vermessene Wasserspiegellage (rote Punkte) im Modellversuch der BAW sowie Auswertungsergebnisse, die mit dem RÜ-Ansatz gewonnen wurden

Das gleiche gilt für die Abflüsse. Sämtliche gemessenen Werte sind in Anlagen in Tabellenform festgehalten. In den Anlagen sind aus den Abflüssen, den gemittelten Wassertiefen und den Wasserspiegelgefällen die mittleren Fließgeschwindigkeiten und die Geschwindigkeitsbeiwerte nach der Gleichung von Manning-Gauckler-Strickler berechnet, einmal für den unverbauten Gerinnequerschnitt ohne Berücksichtigung der von den Bühnen eingenommenen Teile, zum andern für Fließquerschnitte, die um die letzteren vermindert sind. Größe und horizontale Richtung der örtlichen Geschwindigkeit wurden in einzelnen Punkten mit einer Zylindermeßsonde gemessen. Die Linien gleicher Fließgeschwindigkeiten (Isotachen) sowie die örtlichen Strömungsrichtungen wurden gezeichnet (vgl. Abbildung 5-4). Ferner wurde die Verteilung des Abflusses auf den Querschnitt angegeben. Außer dem Isotachenverlauf in Rinnenquerschnitten wurde die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten in Horizontalschnitten gemessen und in Form von horizontal verlaufenden Isotachen dargestellt (vgl. Abbildung 5-5).



**Abbildung 5-4:** Linien gleicher Fließgeschwindigkeiten (Isotachen) und die örtlichen Strömungsrichtungen in Rinnenquerschnitten (Felkel, 1976)

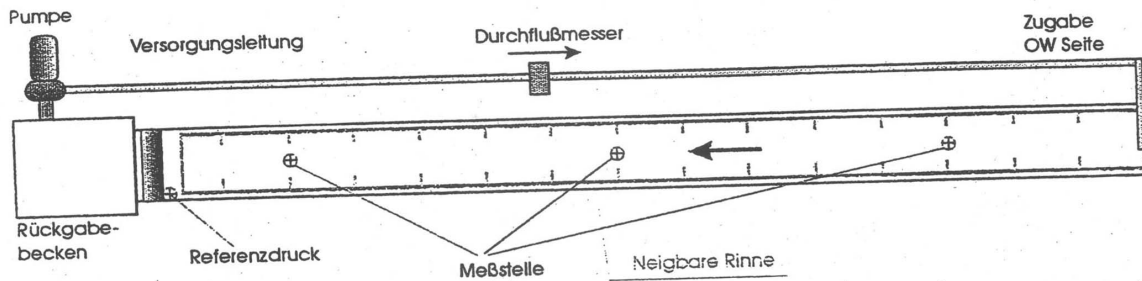


**Abbildung 5-5:** Isotachen zur Darstellung der Verteilung der Fließgeschwindigkeiten in Horizontalschnitten (Felkel, 1976)

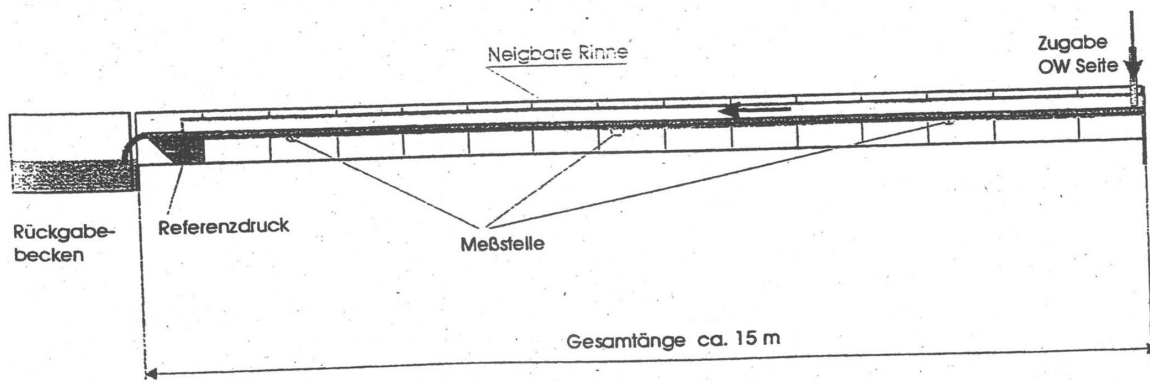
## 5.2 Der Versuch der TU Wien (Ogris, 1994)

Im Rahmen der Untersuchung zu Ausbauvarianten der Donaustrecke zwischen Straubing und Vilshofen wurde 1994 ein Gutachten an der TU Wien (1994) erstellt. Dieses hatte die Untersuchung einer flußbaulichen Lösung zur Gewinnung von für die Schifffahrt ausreichenden Wassertiefen zum Inhalt. Insbesondere die Eignung von Buhnen zur Herstellung von im Raumordnungsverfahren festgelegten Ausbautiefen wurde hier mit hydraulischen Modellversuchen überprüft. In diesem Zusammenhang wurden auch Grundlagenuntersuchungen zur Sohlrauhigkeit und der Buhnenwirkungsweise durchgeführt. Hier wurde die spiegelhebende Wirkung der Buhnen im Vergleich mit einem Parallelwerksausbau auf das gleiche Einschränkungsmaß in einem Modellversuch überprüft und dokumentiert. Diese spiegelhebende Wirkung ist eine Folge der Energieverluste in den Buhnenfeldern und daher können diese Untersuchungen zur Überprüfung der mit dem RÜ-Ansatz abgeleiteten Widerstandsbeiwerte für Buhnen herangezogen werden (vgl. Abbildung 1-3). Die Versuche wurden in einer Modellrinne mit einem Maßstab von 1:200 gegenüber den Naturverhältnissen bei Straubing-Vilshofen mit beidseitig angeordneten Modellplexiglasbuhnen durchgeführt (vgl. Abbildung 5-6).

## Grundriß - Vollmodell 1:200



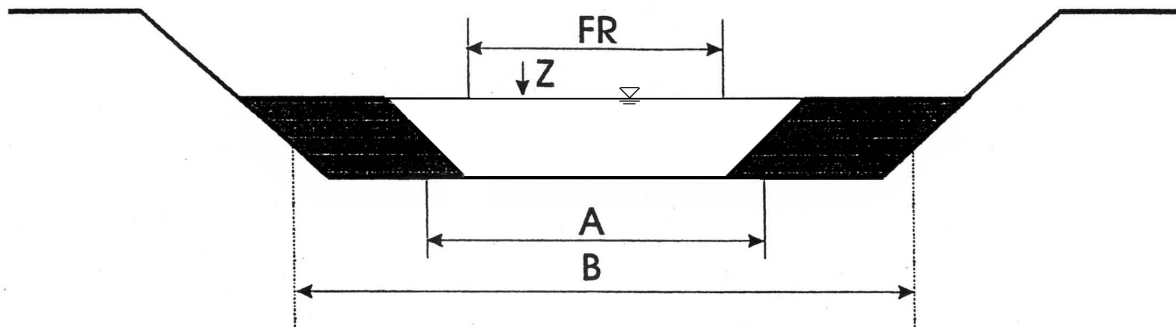
## Längsschnitt - Vollmodell 1:200



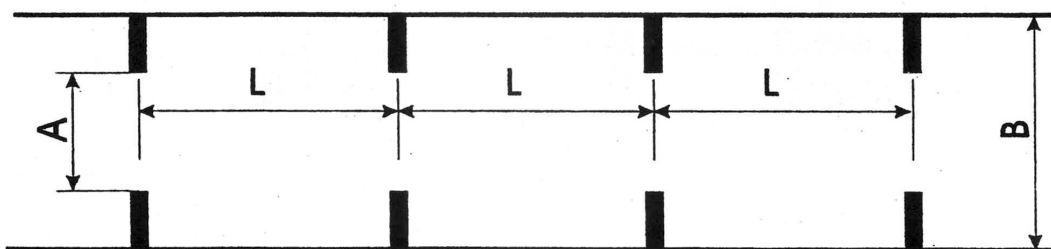
**Abbildung 5-6:** Gesamtanordnung der Versuchsanlage zur Untersuchung der spiegelhebenden Wirkung von Bunnen (Ogris, 1994)

Die Abbildung 5-7 zeigt einen Querschnitt der Versuchsrinne mit den Bezeichnungen der Geometrieparameter nach Ogris. Das Abstands- zu Längenverhältnis der eingebauten Bunnen liegt in dem in dieser Arbeit zugrundegelegten Untersuchungsbereich von  $1 \leq a_b/l_b \leq 3$  (vgl. Kapitel 3).

## Schnitt



## Grundriß



**Abbildung 5-7:** Querschnitt durch die Versuchsrinne mit den Bezeichnungen der Geometrieparameter nach Ogris (1994)

Die nach Ogris (1994) definierten dimensionslosen Parameter sind weitgehend identisch mit den in der Dimensionsanalyse (vgl. Kapitel 6) hergeleiteten. Daher ist eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Nach Ogris wird als Verbauung der folgende Parameter definiert:

$$\text{Verbauung} \hat{=} B - A$$

**Gleichung 5-1**

Das in der Dimensionsanalyse hergeleitete Einschränkungsmaß steht im direkten Zusammenhang mit dem Verbauungsgrad:

$$\frac{b_f}{b_g} = 1 - \frac{1}{B} (B - A)$$

**Gleichung 5-2**

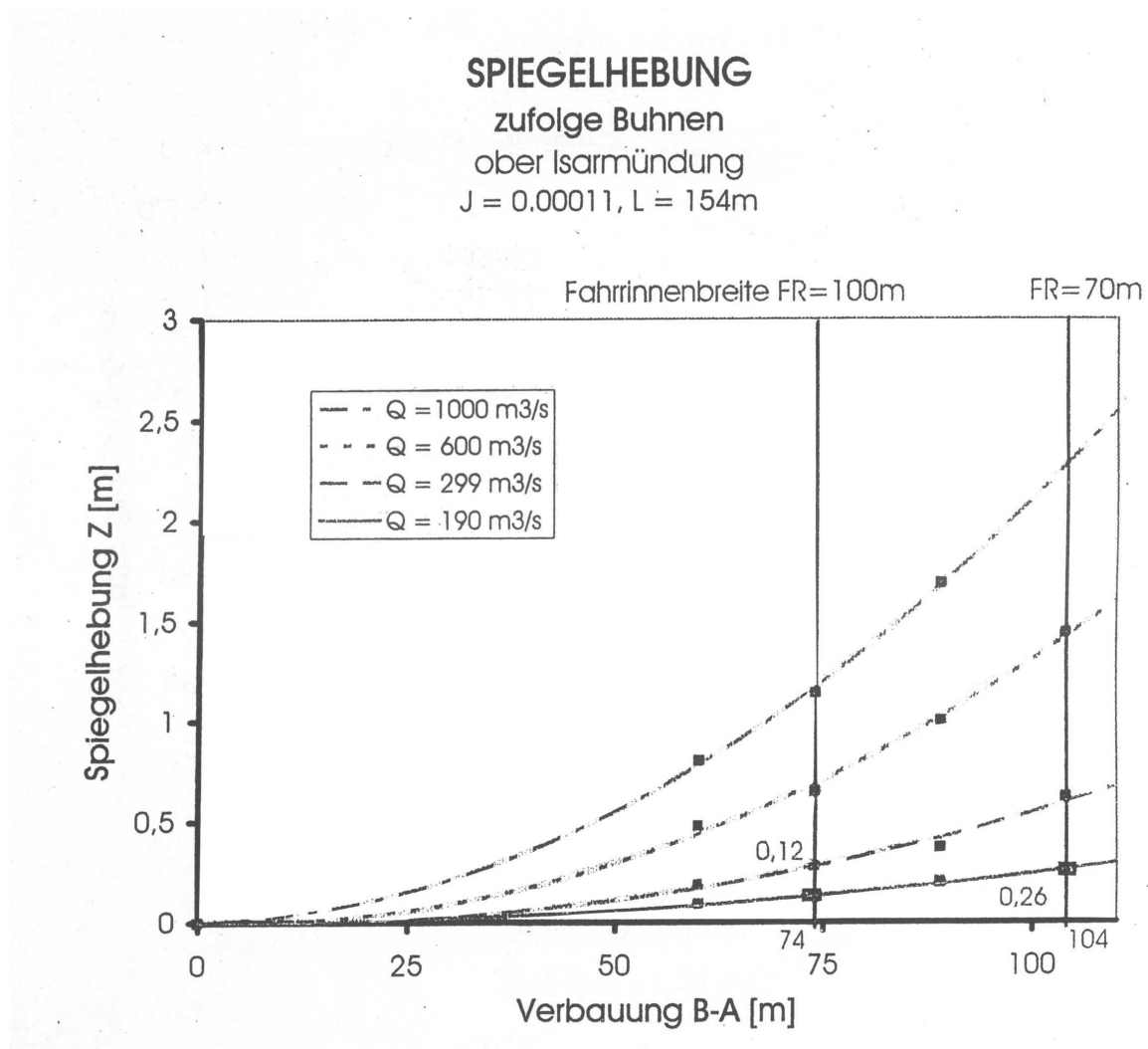
Somit ist eine einfache Vergleichbarkeit der Ergebnisse der o.a. Untersuchung zur spiegelhebenden Wirkung von Buhnen (vgl. Kapitel 7) mit den Ergebnissen der in dieser Arbeit

abgeleiteten Widerstandsbeiwerte möglich. Auch das Abstands- zu Längenverhältnis kann mit den nach Abbildung 5-7 angegebenen Parametern dargestellt werden:

$$\frac{a_b}{l_b} = \frac{2L}{B-A}$$

**Gleichung 5-3**

Zur Bestimmung der Bühnenwirkung wurden in dem Modellversuch die zwischen den Bühnen liegenden Räume abgeschottet. Die sich einstellende Wasserspiegellage wurde von der Wasserspiegellage mit Bühnen abgezogen. Durch diese Differenzenbildung ergab sich der Spiegelhebungswert  $z$  (vgl. Abbildung 5-8).



**Abbildung 5-8:** Spiegelhebungswerte  $z$  aufgrund der Bühnenwirkung in Abhängigkeit von der Verbauung aufgetragen (aus Ogris, 1994)

In dem Gutachten wurden in tabellarischer Form (vgl. Tabelle 5-3) Werte der Spiegelhebung  $z$  für verschiedene hydraulische Verhältnisse an der Donau im Bereich zwischen Straubing und Vilshofen angegeben.

5.3 Bühnenwirkung				
<i>I Bereich</i>	oberhalb Isarmündung		Unterhalb Isarmündung	
Gefälle in [‰]	0,11		0,26	
Q bei ENR in [m <sup>3</sup> /s]	190		299	
Regelprofilbreite B in [m]	180		180	
Fahrrinnenbreite A in [m]	100	70	100	70
B-A	80	110	80	110
Verbauungsgrad $b_f/b_g$	0,5	0,38	0,5	0,38
Abstands- zu Längenverhältnis $a_b/l_b$ bei L = 100 m	2,5	2,86	2,5	2,86
Abstands- zu Längenverhältnis $a_b/l_b$ bei L = 154 m	3,85	2,8	3,85	2,8
Spiegelhebung $z$ in [m] bei L = 100 m Bühnenabstand	0,10	0,24	0,12	0,26
Spiegelhebung $z$ in [m] bei L = 154 m Bühnenabstand	0,12	0,26	0,16	0,28

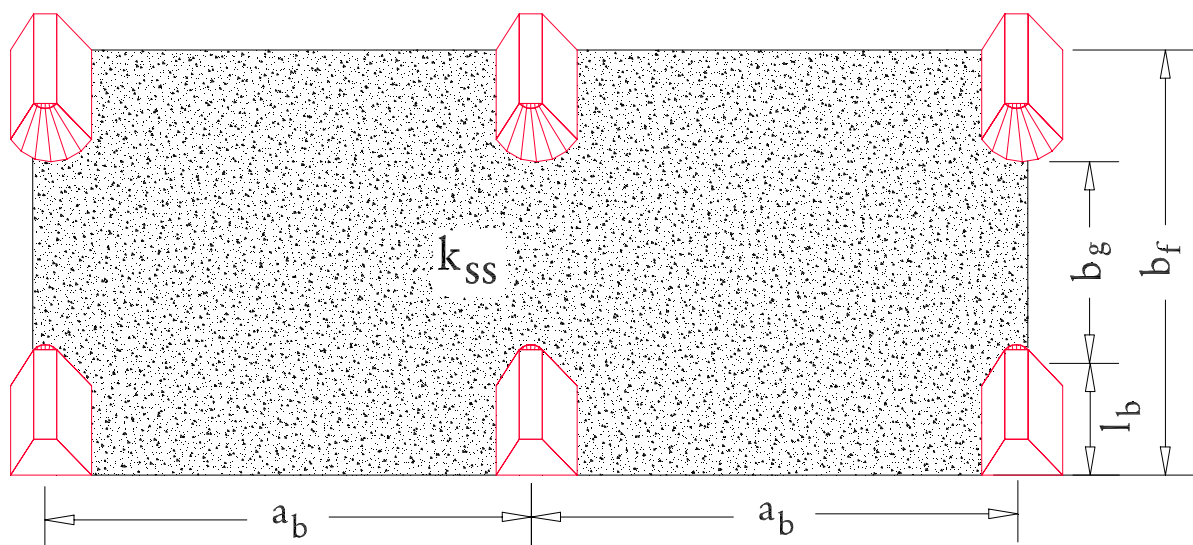
**Tabelle 5-3:** Ergebnisse in tabellarischer Form aus dem Gutachten der TU Wien (Ogris, 1994); Ergänzungen des Verfassers sind grau hinterlegt

Diese Tabelle wurde um den nach Gleichung 5-2 berechneten Verbauungsgrad  $b_f/b_g$  sowie um das Abstands- zu Längenverhältnis  $a_b/l_b$  erweitert. Dies mit dem Ziel, die in Kapitel 7 angegebenen Werte für die Spiegelhebung  $z$  unter verschiedenen geometrischen Randbedingungen abzusichern.

## 6 Auswertung der Modellversuche

### 6.1 Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitsbetrachtung

Zur Festlegung der physikalischen Parameter, die beim Ausbau eines Fließgewässers mit Regelungsbauwerken von Bedeutung sind, wird im folgenden für den Fall von Bühnenbauwerken eine Dimensionsanalyse nach der Buckinghammethode (Hughes und Brighton, 1967) wiedergegeben. Da in dieser Arbeit Modellversuche im Hinblick auf eine Übertragung auf die Großausführung „Fluß“ ausgewertet werden, kommt der Dimensionsanalyse und in diesem Zusammenhang der Ähnlichkeitsbetrachtung eine besondere Bedeutung zu. Die problemrelevanten Variablen werden nach geometrischen, kinetischen sowie Fluidparametern klassifiziert. Unter der Voraussetzung inkompressibler Medien treten in der Fluidmechanik die drei Basisgrößen Masse (M), Länge (L) und Zeit (T) auf. Diese werden entsprechend der Grundeinheit des jeweiligen physikalischen Parameters in der Spalte Dimension angeschrieben.



**Abbildung 6-1:** Darstellung der relevanten geometrischen Parameter bei einer Regelung mit Bühnenbauwerken

mit  $k_{ss}$  = Repräsentativer Durchmesser des Sohlenmaterials [m]



Geometrische Parameter		
Art	Nomenklatur	Dimension
Wasserspiegelbreite des Flußlaufs bei Normalabfluß	$b_g$	L
Buhnenlänge	$l_b$	L
Buhnenabstand	$a_b$	L
Repräsentativer Durchmesser des Sohlenmaterials (z.B. Kies)	$k_{ss}$	L

**Tabelle 6-1:** Relevante geometrische Parameter bei einer Regelung mit Buhnenbauwerken

Kinetische Parameter		
Art	Nomenklatur	Dimension
Mittlere Fließgeschwindigkeit	$V_m$	$\frac{L}{T}$
Fallbeschleunigung	$g$	$\frac{L}{T^2}$

**Tabelle 6-2:** Relevante kinetische Parameter bei einer Regelung mit Buhnenbauwerken

Fluidparameter		
Art	Nomenklatur	Dimension
Dichte des Wassers	$\rho$	$\frac{M}{L^3}$
Dynamische Viskosität	$\eta$ ( $\eta = \nu \rho$ )	$\frac{M}{L T}$

**Tabelle 6-3:** Relevante Fluidparameter bei einer Regelung mit Buhnenbauwerken

Insgesamt ergeben sich für den Fall „Buhnenbauwerke“ acht voneinander unabhängige Variablen, von denen jeweils vier miteinander kombiniert als Potenzprodukte angeschrieben werden. Daraus ergeben sich fünf dimensionslose Kennzahlen (Acht Variable minus drei Grundgrößen) die im folgenden hergeleitet, beschrieben und bezüglich ihrer Sensitivität beurteilt werden.

## I. Abstands- zu Längenverhältnis

$$(\mathbf{v}_m)^{x_1} \rho^{y_1} (l_b)^{z_1} a_b = \left(\frac{L}{T}\right)^{x_1} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{y_1} (L)^{z_1} L = L^0 M^0 T^0 \longrightarrow \Pi_1 = \frac{a_b}{l_b} \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Die Bildung dieses für Bühnenbauwerke grundlegenden und dimensionslosen Verhältnisses grenzt die Anzahl der im Modell zu untersuchenden Varianten stark ein. Darüberhinaus ist hierdurch die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus in der Vergangenheit durchgeführten Modellversuchen auf andersgelagerte aktuelle Problemstellungen möglich. Auch der nächste dimensionslose Term ist von dieser grundlegenden Bedeutung für die Untersuchung von Bühnenbauwerken.

## II. Einschränkungmaß

$$(\mathbf{v}_m)^{x_2} \rho^{y_2} (b_g)^{z_1} l_b = \left(\frac{L}{T}\right)^{x_2} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{y_2} (L)^{z_1} L = L^0 M^0 T^0 \longrightarrow \Pi_2 = \frac{b_f}{b_g} \quad \text{Gleichung 6-2}$$

Wie im Kapitel 6.3.5.2 gezeigt werden wird, hat diese dimensionslose Kennzahl neben dem Abstands- zu Längenverhältnis entscheidenden Einfluß auf das Widerstandsverhalten von Bühnenbauwerken.

## III. Kornreynoldszahl

$$(\mathbf{v}_m)^{x_3} \rho^{y_3} \eta^{z_3} k_{ss} = \left(\frac{L}{T}\right)^{x_3} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{y_3} \left(\frac{M}{L T}\right)^{z_3} L = L^0 M^0 T^0 \longrightarrow \Pi_3 = \frac{v_m k_{ss}}{\nu} \quad \text{Gleichung 6-3}$$

Großen Einfluß auf die Turbulenzproduktion und damit auf den Gesamtwiderstand hat die Größe der Sohlrauheitserhebungen. Daher spielt die auf das einzelne Korn bezogene sogenannte Kornreynoldszahl eine große Rolle, wenn man die Natur im Modell abbilden will. Wenn man RÜ-Ansätze anwendet, bei denen eine Trennung der Widerstandswirkungen erfolgt, muß diese Größe jedoch nicht unbedingt Ähnlichkeitsgesetzen genügen, um Modellversuche hinsichtlich der Wirkung von Einbauten auszuwerten.

So waren z.B. die Betonrauheiten in den Modellversuchen der BAW (vgl. Kapitel 5) viel zu klein, um eine direkte Übertragung auf Naturverhältnisse vornehmen zu können. Im Mittel ergaben sich in den Modellversuchen gegenüber der in Kapitel 7 vorgestellten Fließstrecke des Rheins unterstrom der Staustufe Iffezheim ca. 100fach kleinere Kornreynoldszahlen als in der Natur.

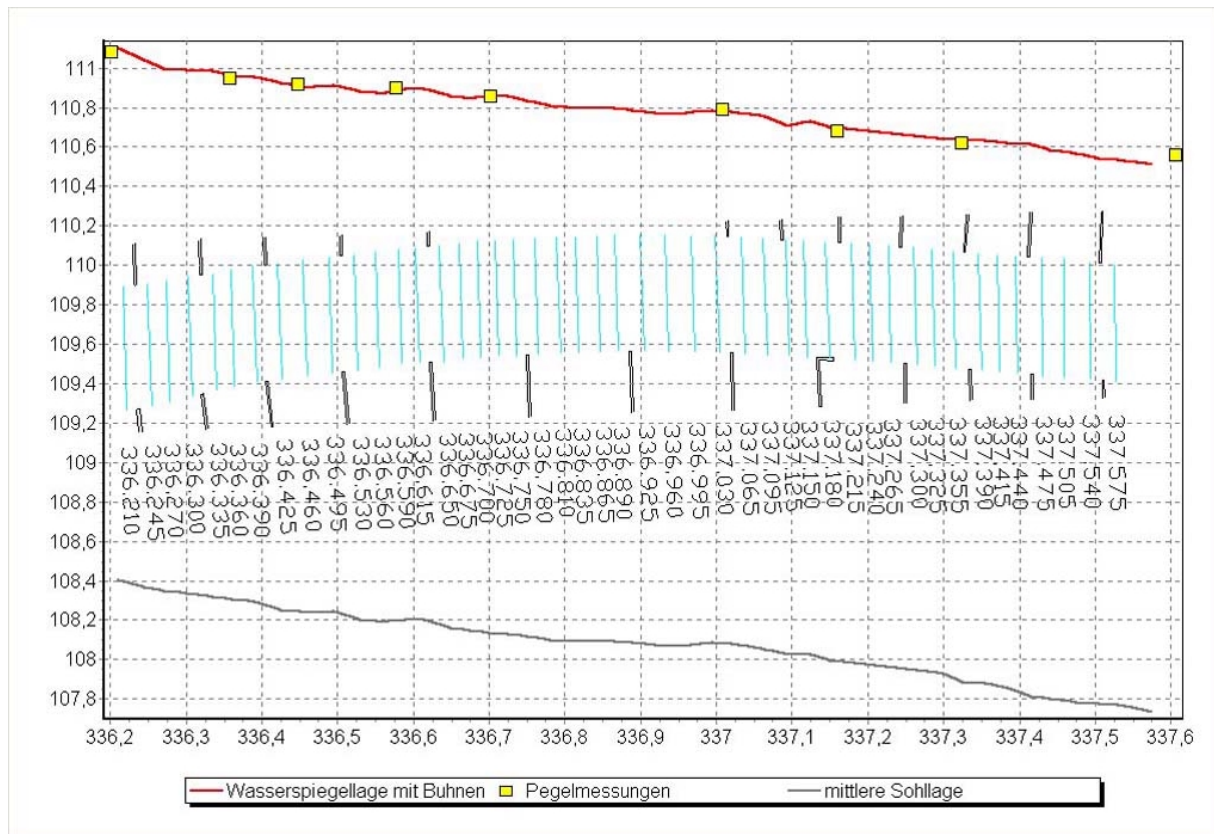
#### IV. Froudezahl

$$(v_m)^{x_4} \rho^{y_4} g^{z_4} a_b = \left(\frac{L}{T}\right)^{x_4} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{y_4} \left(\frac{L}{T^2}\right)^{z_4} L = L^0 M^0 T^0 \longrightarrow \Pi_4 = \frac{v_m^2}{g a_b} \quad \text{Gleichung 6-4}$$

Die Froudezahl, gebildet mit der charakteristischen Länge des Bühnenabstands, deckt den Einfluß der Ausbildung des Wasserspiegels (Oberflächenwellen, lokale Absenkung an Bauwerken) im Vergleich zum Verlauf des Fließgewässerbettes, ab. Setzt man näherungsweise Normalabflußbedingungen und stationäre Fließverhältnisse voraus, so spielt dieser Einfluß hier eine geringe Rolle (s.a. Spannring, 1999). Daß die Froudezahl von untergeordneter Bedeutung bei der Berechnung von Regelungsbauwerken ist, kann auch bei Schöberl (1990) nachgelesen werden:

Die Verluste hoher, nicht überströmbarer Einschränkungsbauwerke, werden primär durch die mit der Strömungseinschürung einhergehenden Ablösungswirbel verursacht. Cidarer (1977) gelang es,  $C_w$  – Beiwerte sowohl theoretisch als auch über ergänzende Modellversuche für beliebige Kontraktionsverhältnisse abzuleiten. Die Angaben sind in diesem Fall auf die ungestörte Unterwasserströmung bezogen. Die ergänzenden Experimente wiesen unter diesen Bedingungen nur einen geringfügigen Froudeeinfluß nach.

Gemessene Wasserspiegellagen für die mit Bühnen ausgebaute Rheinstrecke unterstrom der Staustufe Iffezheim zeigen auch deutlich, daß die Differenz zwischen der mittleren Wasserspiegellage und der mittleren Sohlenlage annähernd konstant bleibt. Diese Beobachtung bestätigt die o.a. Annahmen (vgl. Abbildung 6-2).



**Abbildung 6-2:** Mit dem Programm BuSim (Ritzert, 1999) berechnete Wasserspiegellage, Pegelmessungen und mittlere Sohlage für einen Rheinabschnitt unterstrom der Staustufe Iffezheim

## V. Kombination von Reynolds und Froudezahl

$$(\nu_m)^{x_5} \rho^{y_5} \eta^{z_5} g = \left(\frac{L}{T}\right)^{x_5} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{y_5} \left(\frac{M}{L T}\right)^{z_5} \left(\frac{L}{T^2}\right) = L^0 M^0 T^0 \longrightarrow \Pi_5 = \frac{\nu_m^3}{\nu g}$$

**Gleichung 6-5**

Diese Ähnlichkeitskennzahl entsteht bei der Bildung des Produkts aus Reynolds- und Froudezahl (Zierp, 1991). Sie ist praktisch unerfüllbar und spielt aufgrund der Ausführungen zu III. und IV. keine Rolle für die Berechnung von Buhnenbauwerken.

Fazit :

Grundlegend für die Übertragbarkeit von Modellversuchen mit den Regelbauwerken „Buhnen“ auf die Großausführung „Fluß“ ist das Längen- zu Abstandsverhältnis und das Einschränkungmaß.

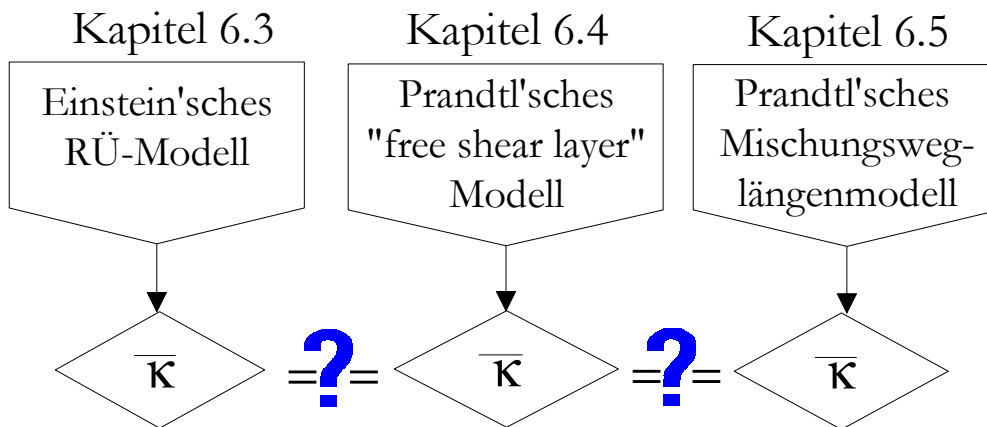
Darüberhinaus würde auch die auf das einzelne Korn bezogene Reynoldszahl, die Sohlrauhheitserhebungen charakterisiert, eine Rolle spielen. Diese Ähnlichkeit kann jedoch durch die Anwendung des RÜ-Ansatzes „umgangen“ werden. Die Froude'sche Ähnlichkeit spielt aufgrund des geringen Oberflächenwelleneinflusses eine untergeordnete Rolle.

Unter Zugrundelegung der o.a. dimensionslosen Parameter können die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Modellversuche hinsichtlich ihrer physikalischen Wechselwirkungen beurteilt werden. Somit ist eine einfache Vergleichbarkeit verschiedener Modelle mit unterschiedlichen Randbedingungen gewährleistet. Darüberhinaus können die Modellversuche auf die Großausführung „Fluß“ übertragen werden, indem die dimensionslosen Parameter in Übereinstimmung gebracht werden.

## 6.2 Drei Methoden zur Ermittlung von Widerstandskoeffizienten für Regelungsbauwerke

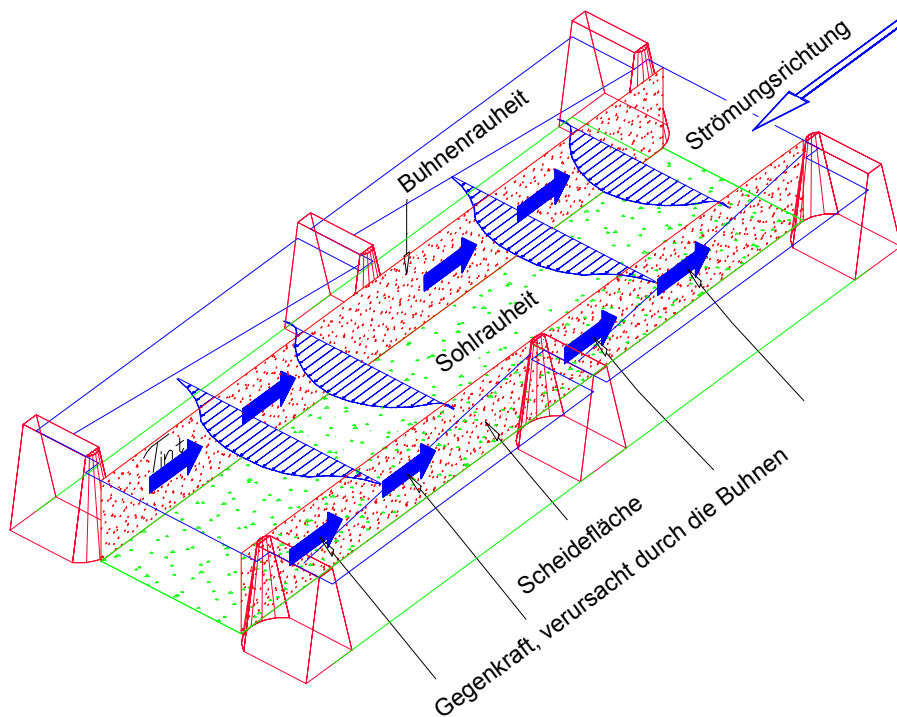
In den folgenden Kapiteln werden drei Methoden zur Ermittlung von Widerstandskoeffizienten für Regelungsbauwerke vorgestellt. Voraussetzung ist die Auswertung der Modellversuche nach der RÜ-Methode, weil darin die physikalischen Grundlagen für eine Übertragung der Modellversuche auf den „großen Fluß“ enthalten sind. Die Anwendung des Prandtl'schen Mischungsweglängenmodells und des Prandtl'schen Freistrahlmmodells dient in erster Linie der Absicherung des Einstein'schen RÜ-Modells (vgl. Abbildung 6-3).

So werden im Folgenden Ergebnisse des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$ , abgeleitet aus dem Prandtl'schen Mischungswegansatz sowie aus der Prandtl'schen Freistrahtheorie mit den Ergebnissen aus der RÜ-Methode verglichen. Die weitgehende Übereinstimmung der  $\kappa$ -Werte aus allen drei Verfahren ist ein weiterer Beweis für die Richtigkeit der Anwendung des RÜ-Ansatzes nach Einstein (1934) auf Regelungsbauwerke.



**Abbildung 6-3:** Vergleich der berechneten Widerstandskoeffizienten für Regelungsbauwerke mit drei unterschiedlichen Methoden

### 6.3 Auswertungen nach der RÜ-Methode



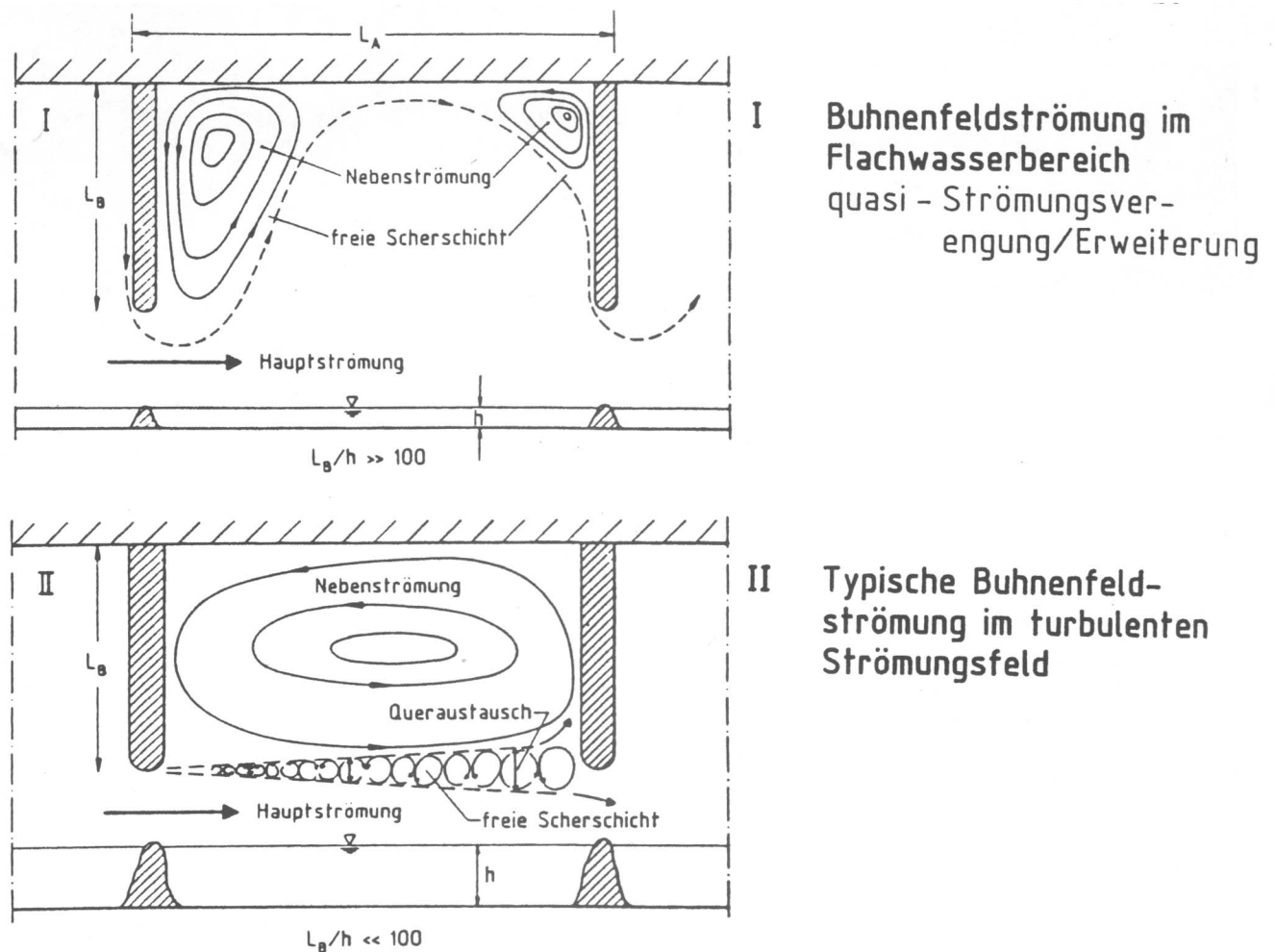
**Abbildung 6-4:** Qualitative horizontale Geschwindigkeitsprofile bei nichtüberströmten Buhnen (blau) mit eingezeichneten Scheidflächen (rot)

Aus den im vorangegangenen Kapitel 5 beschriebenen Modellversuchen sollen Widerstandsbeiwerte abgeleitet werden, die zur Berechnung des "großen" Flusses eingesetzt werden können. Zu diesem Zweck ist es notwendig, den an Regelungsbauwerken auftretenden Formwiderstand, ausgedrückt in einer Reibungszahl  $\lambda_{\text{rge}}$  vom Rauheitseinfluß des freien Fließquerschnitts zu trennen. Diese Rauheitentrennung wird unter Zugrundelegung des RÜ-Ansatzes nach Einstein vollzogen. Im folgenden wird diese Vorgehensweise am Beispiel von nichtüberströmten Buhnen gezeigt.

Der Formwiderstand der Buhnen, erzeugt durch komplizierte Wirbelumströmungen, wird als in einer fiktiven senkrechten Begrenzung, die in Fließrichtung durch die Buhnenfüße verläuft, wirkend angesehen. Rehbock (1917) bezeichnete diese senkrechte Begrenzung aufgrund von Beobachtungen in Modellversuchen als Scheidefläche (vgl. Abbildung 6-4). Im Einzelnen schreibt er:

In einem normal zur Drehachse geführten Querschnitt zeigen die Wasserwalzen oft eine langgestreckte Form. In diesem Fall kann eine durch die Drehachse der Walzen hindurchgehende „Scheidefläche“ festgestellt werden, welche die Walzen in zwei oft ungleiche Hälften zerlegt, von denen die eine Abwärtsströmung, die andere aber Aufwärtsströmung zeigt. Bei den Hauptwalzen liegen die Abwärtsströmung aufweisenden Teile der Walzen an der Stromseite der Scheidefläche, bei den Nebenwalzen erster Ordnung aber an der entgegengesetzten Seite. Durch die Scheidefläche selbst geht das Wasser normal hindurch, und zwar bei den Hauptwalzen stromaufwärts der Hauptdrehachse nach der Stromseite hin, stromabwärts von dieser Achse aber vom Strom fort. Bei den Hauptwalzen erster Ordnung ist die Strömungsrichtung in der Scheidefläche entgegengesetzt.

In dieser sogenannten Scheidefläche wird die Energie, die von der Hauptströmung zum Antrieb der Wirbel in den Buhnenfeldern benötigt wird, dissipiert. Nestmann (1987) beschreibt eingehend die Vorgänge des Massen- und Impulsaustausches in dieser Scheidefläche und veranschaulicht, wie sich Buhnenfeldströmungen im Flachwasserbereich ausbilden und wie derselbe Vorgang unter turbulenten Strömungsbedingungen abläuft (vgl. Abbildung 6-5). Hierbei wird deutlich, daß nur unter turbulenten Strömungsbedingungen eine Scheidefläche, die sich im Streichlinienverlauf ausbildet, entsteht.



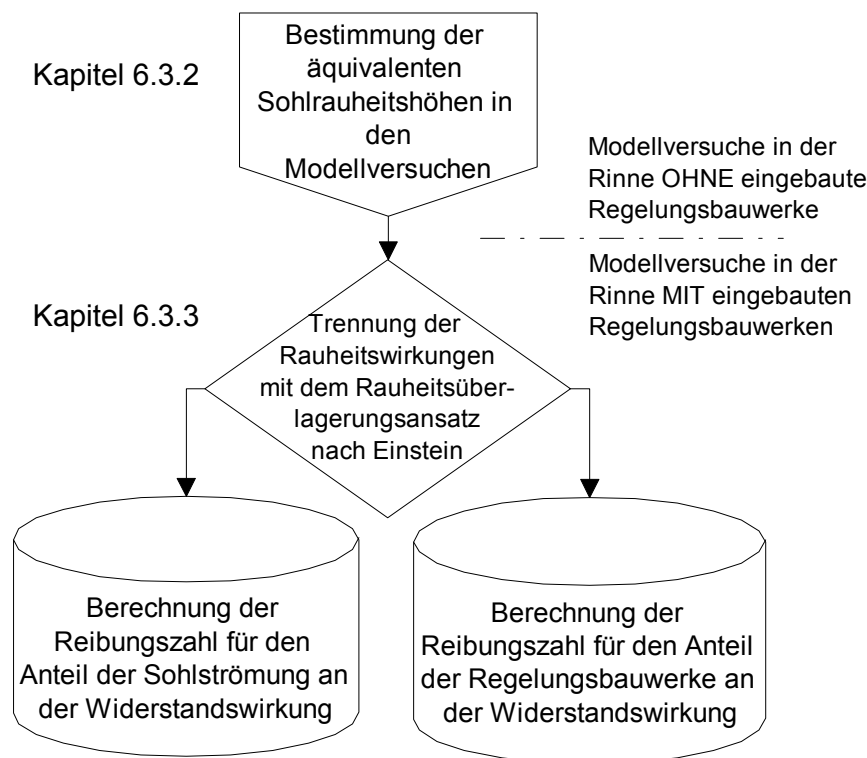
**Abbildung 6-5:** Prinzipskizze zur Darstellung von Rückströmgebieten in Bühnenfeldern in Abhängigkeit der relativen Bühnenfeldgröße  $l_b/h$  (Nestmann, 1987)

6.3.1 Im folgenden wird die Modellvorstellung zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes mit dem RÜ-Ansatz beschrieben. Die Scheidefläche sei mit einer fiktiven Sandrauheit versehen, die als Flächenrauheit die Formrauheit der Bühnen approximiert. Die an dieser Flächenrauheit angreifende Wandschubspannung wird als Interaktionsschubspannung  $\tau_{int}$  bezeichnet. Physikalisch läßt sich diese deuten als Reibungsspannung, die infolge der Geschwindigkeitsabfälle in den Bühnenfeldern entsteht. Die Abbildung 6-4 verdeutlicht die o.a. angeführten Randbedingungen. Im weiteren werden die Techniken zur Auswertung der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Modellversuche beschrieben, die zur Bestimmung eines Widerstandsbeiwertes eingesetzt werden.



## 6.3.2 Verfahren zur Gewinnung von Widerstandsbeiwerten mit dem RÜ-Ansatz

Das in Kapitel 4 beschriebene Verfahren zur Trennung von Rauheitswirkungen nach Einstein wird im folgenden mit Auswertungsergebnissen aus den Modellversuchen (vgl. Kapitel 5) beschrieben. Die Abbildung 6-6 zeigt das Verfahren, das für die Bestimmung eines Widerstandsbeiwertes, der für die im Modellversuch untersuchten Bauwerkseinbauten in eine Modellrinne angewandt wird.



**Abbildung 6-6:** Schema zur Bestimmung eines Widerstandsbeiwertes für Regelungsbauwerke

Zunächst wird die äquivalente Sohlrauheitshöhe in einer Versuchsrinne ohne Einbauten (Regelungsbauwerke) bestimmt. Hierfür werden Abflußmessungen bei verschiedenen Wasserstandshöhen ausgewertet. Dann werden Abflußmessungen in der Versuchsrinne mit Einbauten zur Auswertung mit dem Einstein'schen RÜ-Modell durchgeführt. Hieraus lassen sich Widerstandsbeiwerte, getrennt für die Sohle und für die Einbauten, ermitteln. Die einzelnen Schritte zur Bestimmung des für Übertragungen auf Naturverhältnisse wesentlichen Widerstandsbeiwertes für die Einbauten werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

## 6.3.3 Bestimmung der äquivalenten Sohlrauheitshöhe in dem BAW-Modellversuch

Zur Trennung der Widerstandswirkung der Buhnen von der des freien Fließquerschnitts mit dem RÜ-Ansatz muß die äquivalente Sandrauheitshöhe  $k_{ss}$  der Betonsohle aus den Versuchen für den unverbauten Querschnitt bestimmt werden. Diese Sandrauheitshöhe ist ein Maß für das Widerstandsverhalten des freien Fließquerschnitts. Das Widerstandsverhalten der BAW-Versuchsreihe (Felkel, 1975) für die unverbauten Querschnitte ist im hydraulisch glatten sowie im Übergangsbereich klassifiziert. Damit sind die  $k_{ss}$ -Werte von der Wassertiefe  $h$  abhängig. Die Gesamtreibungszahl  $\lambda_{ges}$  berechnet sich zu:

$$\lambda_{ges} = \frac{2 g D i}{v_m^2} \quad \text{Gleichung 6-6}$$

- mit  $\lambda_{ges}$  = Gesamtreibungszahl  
 $g$  = Schwerebeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]  
 $D$  = hydraulischer Durchmesser [m]  
 $i$  = Energieliniengefälle  
 $v_m$  = mittlere Geschwindigkeit [m/s]

Mit der verallgemeinerten Widerstandsgleichung nach Prandtl-Colebrook (Idelchick, 1986) ergibt sich der  $k_{ss}$ -Wert:

$$k_{ss} = 3.71 f_m D \left[ 10^{\frac{-1}{2\sqrt{\lambda_{ges}}}} - \frac{2.51}{\text{Re} f_m \sqrt{\lambda_{ges}}} \right] \quad \text{Gleichung 6-7}$$

- mit  $k_{ss}$  = äquivalente Sohlrauheitshöhe [m]  
 $\text{Re}$  = Reynoldszahl  
 $f_m$  = Formfaktor

Der Formfaktor  $f_m$  wird nach Söhngen (1987) berechnet. Dieser ermöglicht die Berechnung von vom Kreisquerschnitt abweichenden Querschnittsformen mit der ursprünglich nur für Kreisrohre gültigen Prandtl-Colebrook-Approximation.

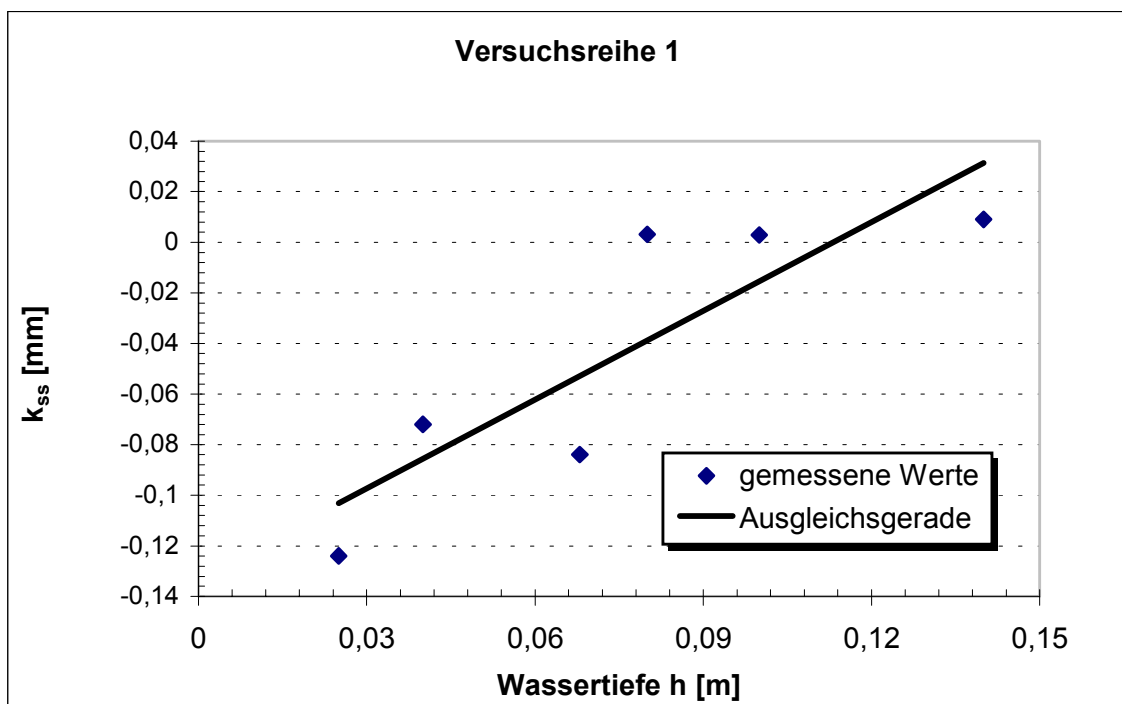
$$f_m = 0.7 \frac{h}{b_g} + 0.59 \quad \text{Gleichung 6-8}$$

- mit  $h$  = Wassertiefe [m]  
 $b_g$  = Glattbreite [m]

Für die BAW-Versuchsreihe 1 (vgl. Kapitel 5) ergeben sich die folgenden  $k_{ss}$ -Werte (vgl. Tabelle 6-4):

Versuchsreihe 1					
Gerinnebreite [m]	Wassertiefe [m]	Sohlgefälle [‰]	Reynoldszahl []	Reibungszahl []	$k_{ss}$ -Wert [mm]
2,288	0,025	0,307	13820	0,0293	-0,12400
2,288	0,040	0,307	29780	0,0249	-0,07200
2,288	0,068	0,307	71956	0,0195	-0,08400
2,288	0,080	0,307	88112	0,0206	0,00323
2,288	0,100	0,307	124982	0,0190	0,00288
2,288	0,140	0,307	207829	0,0172	0,00909
Ausgleichsgerade (vgl. Abbildung 6-7) : $k_{ss} = 1.17021 h - 0.13248$					
Korrelationskoeffizient = 0.85					

**Tabelle 6-4:** Äquivalente Sohlrauheitshöhen aus den Modellversuchen ohne eingebaute Regelbauwerke der Versuchsreihe 1 (leere Versuchsrinne)

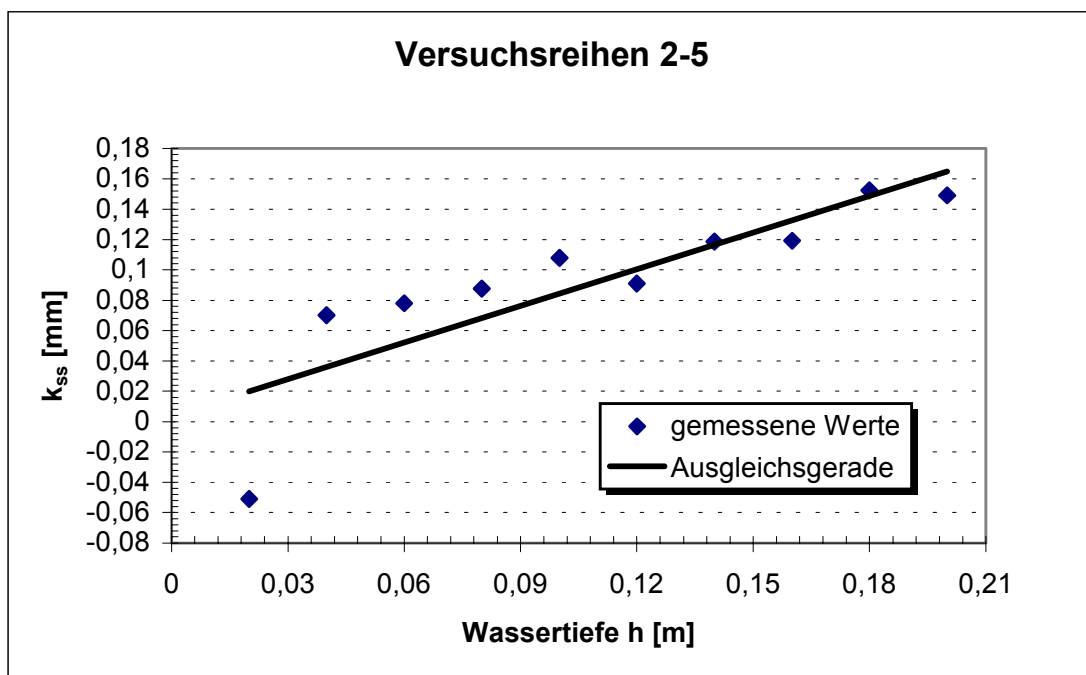


**Abbildung 6-7:** Ausgleichsgerade für die  $k_{ss}$ -Werte der Versuchsreihe 1

Für die BAW-Versuchsreihen 2-5 (vgl. Kapitel 5) ergeben sich die folgenden  $k_{ss}$ -Werte (vgl. Tabelle 6-5 und Abbildung 6-8):

Versuchsreihe 2-5					
Gerinnebreite [m]	Wassertiefe [m]	Sohlgefälle [‰]	Reynoldszahl [ ]	Reibungszahl [ ]	$k_{ss}$ -Wert [mm]
2,5	0,020	0,595	13458	0,0312	-0,0510
2,5	0,040	0,595	40427	0,0264	0,0700
2,5	0,060	0,595	77826	0,0230	0,0779
2,5	0,080	0,595	122278	0,0211	0,0877
2,5	0,100	0,595	171285	0,0201	0,1080
2,5	0,120	0,595	228313	0,0187	0,0909
2,5	0,140	0,595	283728	0,0184	0,1188
2,5	0,160	0,595	345540	0,0177	0,1191
2,5	0,180	0,595	403756	0,0170	0,1525
2,5	0,200	0,595	470216	0,0172	0,1491
Ausgleichsgerade (vgl. Abbildung 6-8) : $k_{ss} = 0,80624 h + 0,00361$					
Korrelationskoeffizient = 0.85					

**Tabelle 6-5:** Äquivalente Sohlrauheitshöhen aus den Modellversuchen ohne eingebaute Regelbauwerke der Versuchsreihe 2-5 (leere Versuchsrinne)



**Abbildung 6-8:** Ausgleichsgerade für die  $k_{ss}$ -Werte der Versuchsreihen 2-5

### 6.3.4 Berechnung der Widerstandsbeiwerte für die Sohle und für die Regelungsbauwerke (hier Buhnen)

Es ergeben sich im Falle sehr kleiner Wassertiefen negative  $k_{ss}$ -Werte (vgl. Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5) aufgrund der glatten Wände in den Modellversuchen. Zur Abspaltung des Rauheitseinflusses des freien Fließquerschnitts von dem der Buhnen wurden diese Werte abhängig von der Anströmteufe eingesetzt. Die anteilige Reibungszahl  $\lambda_{\text{sohle}}$  berechnet sich mit der Gleichung 4-9 und der Gleichung 6-7 zu:

$$\lambda_{\text{sohle}} = \left[ -2 \log \left( \frac{2.51 \nu \lambda_{\text{ges}}}{\lambda_{\text{sohle}}^{1.5} f_m D v_m} + \frac{\lambda_{\text{ges}} k_{ss}(h)}{\lambda_{\text{sohle}} 3.71 D f_m} \right) \right]^{-2} \quad \text{Gleichung 6-9}$$

mit  $\lambda_{\text{sohle}}$  = Sohlreibungszahl

$\nu$  = kinematische Zähigkeit [m<sup>2</sup>/s]

Die Gleichung 6-9 ist transzendent und muß mit einem Iterationsverfahren gelöst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zu diesem Zweck ein Einsetzverfahren gewählt. Hierbei wird die rechte Seite der Gleichung unter Vorgabe eines Schätzwertes berechnet. Weicht der errechnete Wert von dem Schätzwert ab, so wird der Ergebniswert als neuer Schätzwert eingesetzt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt bis die Abweichung der beiden Werte eine sogenannte Iterationsschranke unterschreitet. Für die hier vorliegenden Untersuchungen wurden die in Tabelle 6-6 angegebenen Werte eingesetzt.

Vorgaben für die Iteration	Startwert für $\lambda_{\text{sohle}}$	Iterationsschranke
	0,05	10 <sup>-8</sup>

**Tabelle 6-6:** Vorgabe von Schätzwerten für die iterative Berechnung der Sohlreibungszahl nach Gleichung 6-9

Die Trennflächenreibungszahl  $\lambda_{\text{rege}}$  ergibt sich mit Gleichung 4-4 zu:

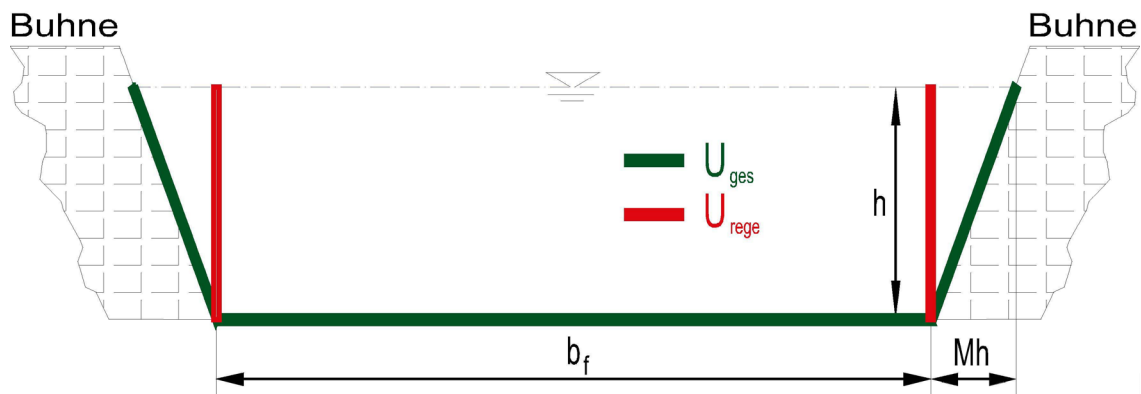
$$\lambda_{\text{rege}} = \left( \lambda_{\text{ges}} - \lambda_{\text{sohle}} \frac{U_{\text{sohle}}}{U_{\text{ges}}} \right) \frac{U_{\text{ges}}}{U_{\text{rege}}} \quad \text{Gleichung 6-10}$$

mit  $U_{\text{ges}}$  = Benetzter Umfang des Gesamtquerschnitts [m]

$U_{\text{sohle}}$  = Benetzter Umfang im Sohlbereich [m]

$U_{\text{rege}}$  = Benetzter Umfang im Bauwerksbereich [m]

Die eingesetzten Werte für die benetzten Umfänge werden hierbei wie folgt definiert (vgl. Abbildung 6-9):



**Abbildung 6-9:** Schemaskizze zur Definition der benetzten Umfänge bei der Anwendung der RÜ auf nichtüberströmte Buhnen

$$\text{mit } U_{ges} = b_f + h \sqrt{M^2 + 1}$$

$$U_{sohle} = b_f$$

$$U_{rege} = 2h$$

wobei  $M$  = Böschungsneigung der Buhnen quer zur Fließrichtung

Mit der o.a. Definition der benetzten Umfänge ergibt sich für eine Berechnung der Reibungszahl für nichtüberströmte Buhnen:

$$\lambda_{rege} = \left( \lambda_{ges} - \lambda_{sohle} \frac{b_f}{b_f + 2h\sqrt{1+M^2}} \right) \times \left( \frac{b_f}{2h} + \sqrt{1+M^2} \right) \quad \text{Gleichung 6-11}$$

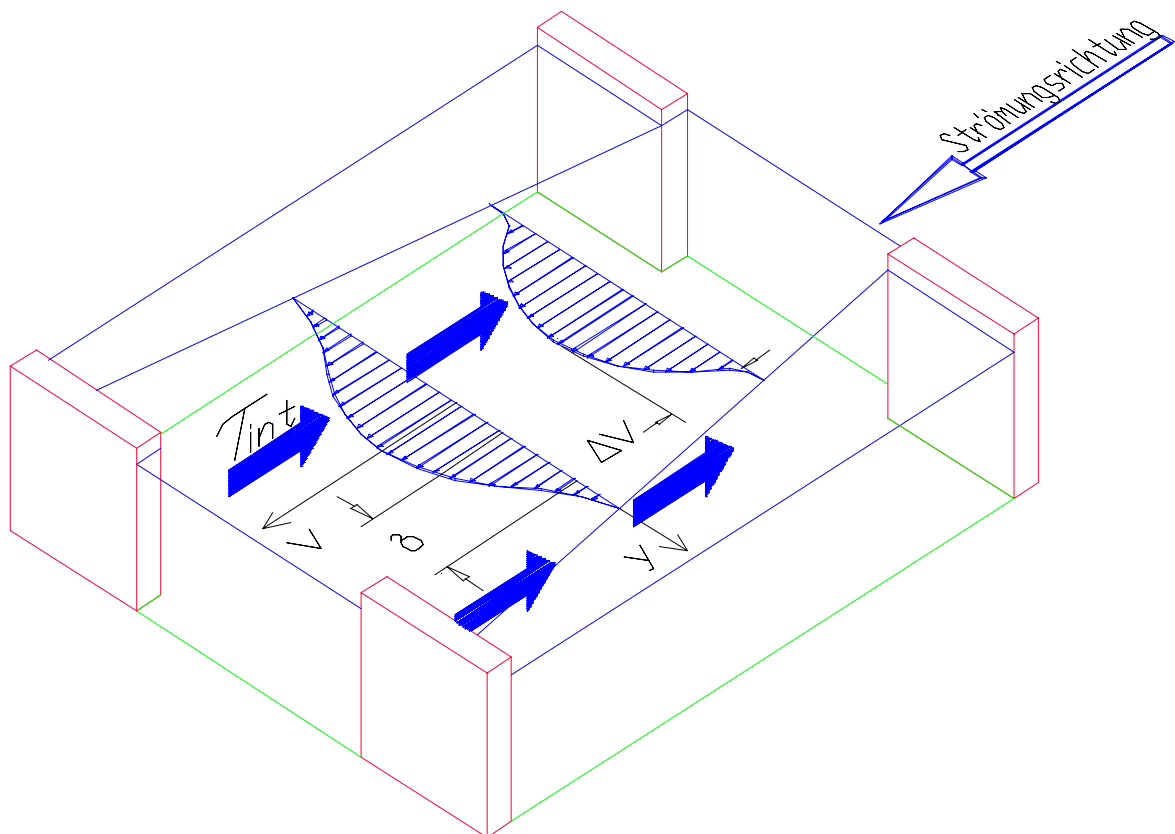
Die Reibungszahl  $\lambda_{rege}$  (vgl. Gleichung 6-10) ist ein Maß für das Widerstandsverhalten der an Regelungsbauwerken entstehenden Formverluste. Aus der Theorie zur Ausbreitung eines Freistrahls in einen ruhenden Raum kann diese so berechnete Reibungszahl in einen Bezug zu einer empirischen Konstanten gestellt werden, deren Wert sich aus der Prandtl'schen Freistrahls Theorie ergibt. Die Aufbereitung dieses einfachen Modells dient in erster Linie der Validierung des RÜ-Verfahrens zur Berechnung von Widerstandsbeiwerten von Regelungsbauwerken. Eine gute Übereinstimmung der empirischen Konstanten aus der Literatur mit den hier abgeleiteten Widerstandsbeiwerten zeigt, daß das eingesetzte RÜ-Verfahren nach Einstein zu einer quantitativ richtigen Beurteilung des Widerstandsverhaltens von Regelungsbauwerken führt.

6.3.5 Verknüpfung der Reibungszahl  $\lambda_{\text{rege.}}$  mit dem Koeffizienten  $\kappa$ 

Für die Auflösung eines Strahlrandes in einen ruhenden Raum hat Prandtl (1942) ein einfaches Modell erstellt. Vorausgesetzt wurde eine Auflösung in Form einer parabolischen Geschwindigkeitsverteilung, deren Höchstgeschwindigkeit und Strömungsmenge mit der der wirklichen Strömung übereinstimmen (vgl. Abbildung 6-10). Damit kann die Geschwindigkeit  $v(y)$  als quadratisch proportional zum Wandabstand  $y$  angesehen werden :

$$v(y) = c y^2 \quad \text{Gleichung 6-12}$$

mit  $c$  = Proportionalitätskonstante



**Abbildung 6-10:** Herleitung von Prandtl's Schubspannungsansatz für die freie Turbulenz, angewendet auf das Beispiel von nichtüberströmten Bühnen

Die Grenzschichtdicke  $\delta$  ist als der Bereich in dem die Geschwindigkeitsänderungen zwischen 1-99 % betragen (99%-Regel, vgl. S. 27 Launder, Spalding, 1972), definiert. Zweima-

liges Ableiten von Gleichung 6-12 und Einsetzen der Randbedingung  $\delta/2$ ;  $V = \Delta V/2$  ergibt:

$$\frac{d^2 v}{dy^2} = \frac{4\Delta V}{\delta^2} \quad \text{Gleichung 6-13}$$

mit  $\delta$  = Grenzschichtdicke [m]

Der Geschwindigkeitsgradient  $dv/dy$  ist proportional zur Schubspannung, mit der Wirbelzähigkeit  $\nu_t$  als Proportionalitätskonstante:

$$\tau(y) = \nu_t \rho \frac{dv}{dy} \quad \text{Gleichung 6-14}$$

mit  $\tau$  = Schubspannung [N/m<sup>2</sup>]

$\nu_t$  = Wirbelzähigkeit [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$  = Dichte [kg/m<sup>3</sup>]

Für  $\nu_t$  ergibt sich ein linearer Zusammenhang mit  $\Delta V$  in Abhängigkeit von der Form der Einströmgeometrie (Böschungsneigungen der Buhnen) und der Grenzschichtdicke  $\delta$  (Rodi, 1980):

$$\nu_t = \kappa \delta \Delta V \quad \text{Gleichung 6-15}$$

mit  $\kappa$  = Proportionalitätskonstante

$\kappa$  ist hierbei eine im Experiment zu bestimmende Konstante. Die Schubspannung ist nach o.a. Voraussetzungen maximal in Grenzschichtmitte  $\delta/2$  und steigt linear von Null in Strömungsmitte auf ihren Maximalwert an. Ableiten von Gleichung 6-14 und Einsetzen von Gleichung 6-15 liefert:

$$\frac{d\tau}{dy} \cong \frac{\Delta\tau}{\Delta y} \cong \frac{2 \tau_{\text{int}}}{\delta} = \kappa \delta \Delta V \rho \frac{d^2 v}{dy^2} \quad \text{Gleichung 6-16}$$



Einsetzen von Gleichung 6-13 in Gleichung 6-16 liefert eine Beziehung zur Berechnung der Interaktionsschubspannung  $\tau_{\text{int}}$  :

$$\tau_{\text{int}} = 2 \kappa \rho \Delta V^2 \quad \text{Gleichung 6-17}$$

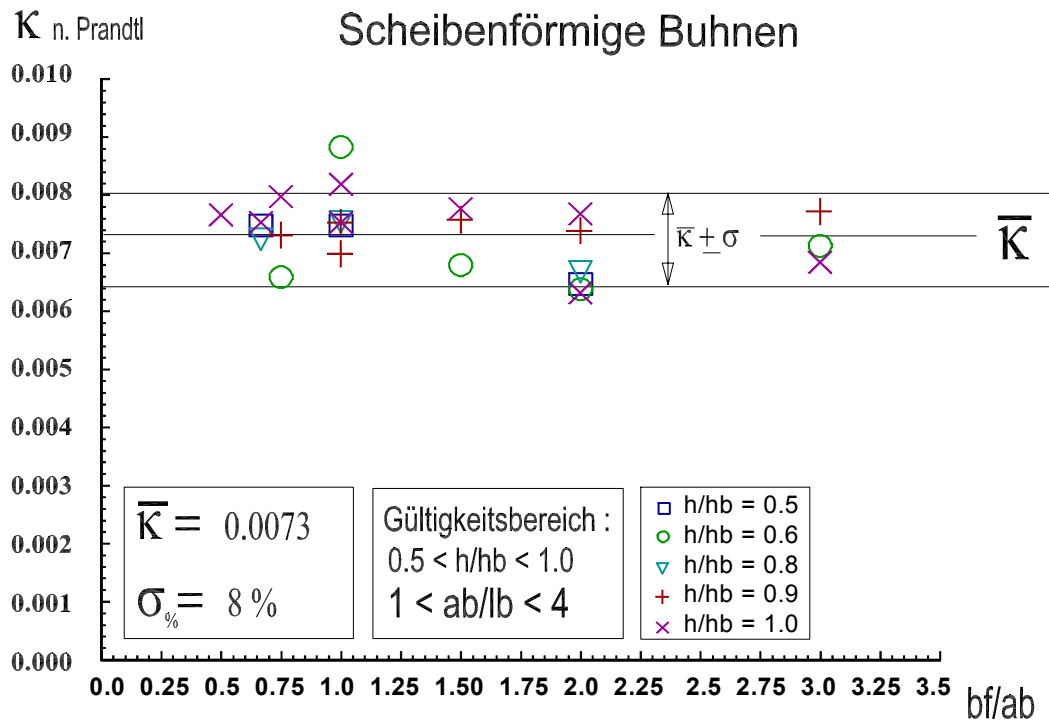
die als Maß für die Widerstandswirkung der Buhnen anzusehen ist.

### 6.3.6 Experimentelle Bestimmung $\kappa$ (Kappa)

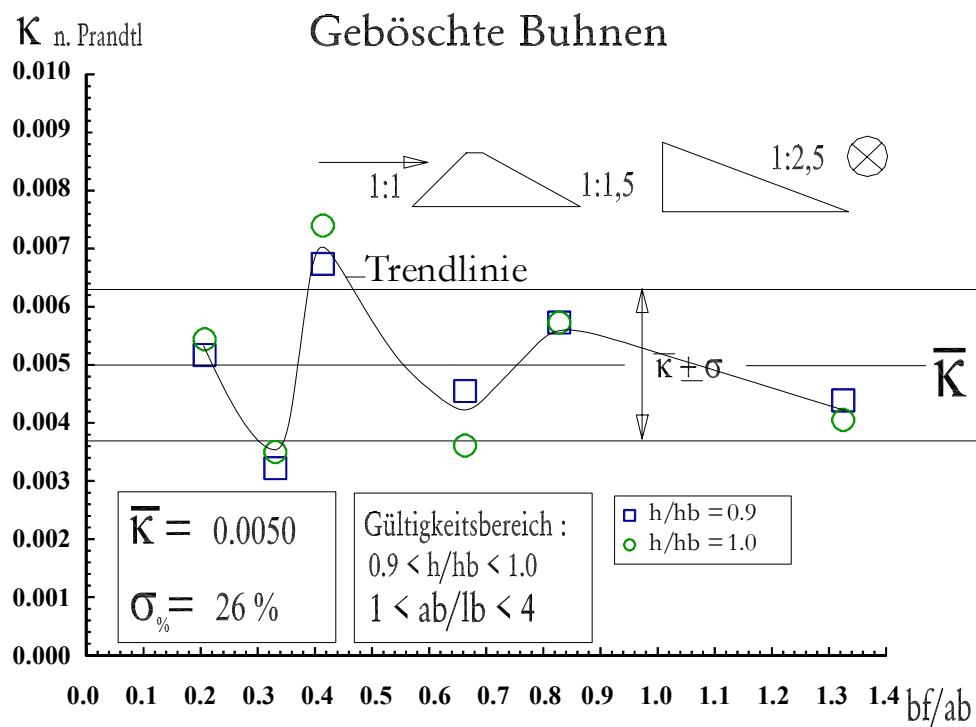
Der Koeffizient  $\kappa$  in Gleichung 6-17 muß aus experimentellen Versuchsdaten bestimmt werden. Aus Gleichung 4-5 und Gleichung 4-7 folgt für  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{\lambda_{\text{buhne}}}{16} \quad \text{Gleichung 6-18}$$

Für nichtüberströmte Buhnen wurden  $\kappa$ -Werte aus den BAW-Versuchen berechnet (vgl. Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12). Hierbei wurden die Werte unabhängig von der Versuchsanordnung über weite Bereiche gemittelt und die Standardabweichung angegeben (Ritzert et. al., 1996). Die Abweichungen von den Mittelwerten wurden bei der Prognose von Wasserspiegellagen mit dem RÜ-Ansatz zur Fehlerabschätzung als Maß für die Güte der Prognose eingesetzt. Deutlich zu erkennen ist, daß bei den Versuchen mit scheibenförmigen Buhnen sehr viel kleinere Abweichungen auftreten, als bei den Versuchen mit geböschten Buhnen, d.h. ähnlich den in der Natur vorkommenden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei den scheibenförmigen Buhnen abruptere Strömungsabriss im Vergleich zu den geböschten Buhnen auftreten. Dieses von Felkel (1976) als "stärkere Auswirkung auf die Hauptströmung" bezeichnete Verhalten führt auch zu größeren Widerstandsbeiwerten bei scheibenförmigen gegenüber geböschten Buhnen.



**Abbildung 6-11:**  $\kappa$ -Werte aus den Versuchsreihen der BAW-Modellversuche mit scheibenförmigen Buhnen (Ritzert et. al., 1996)

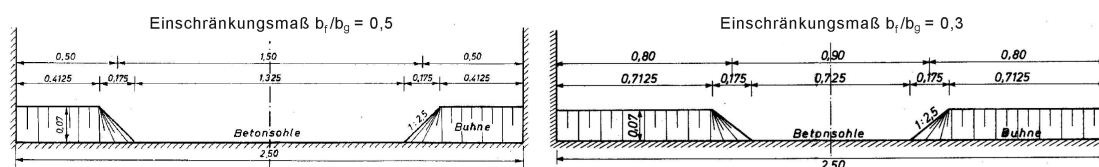


**Abbildung 6-12:**  $\kappa$ -Werte aus den Versuchsreihen der BAW-Modellversuche mit geböschten Buhnen (Ritzert et. al., 1996)

Deutlich ist, daß sich der Widerstandsbeiwert  $\kappa$  bei den geböschten Buhnen auf einen Wert von  $5 \cdot 10^{-3}$  einpendelt. Prognosen zur spiegelhebenden Wirkung von Buhnenbauwerken (vgl. Kapitel 7) wurden mit diesem Wert durchgeführt. Um jedoch die in der Dimensionsanalyse gefundene Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes vom Abstands- zu Längenverhältnis  $a_b/l_b$  sowie vom Einschränkungmaß  $b_f/b_g$  genauer beurteilen zu können, wurde im folgenden Kapitel der Widerstandsbeiwert  $\kappa$  nach diesen beiden geometrischen Einflußgrößen aufgeschlüsselt. Darüberhinaus wurde auch die Sensitivität von  $\kappa$  bezüglich der Größe der vorgegebenen Abflußfläche überprüft (Kapitel 6.3.5.3)

### 6.3.6.1 Abhängigkeit von $\kappa$ vom Einschränkungmaß $b_f/b_g$ sowie vom Abstands- zu Längenverhältnis $a_b/l_b$ der Buhnen

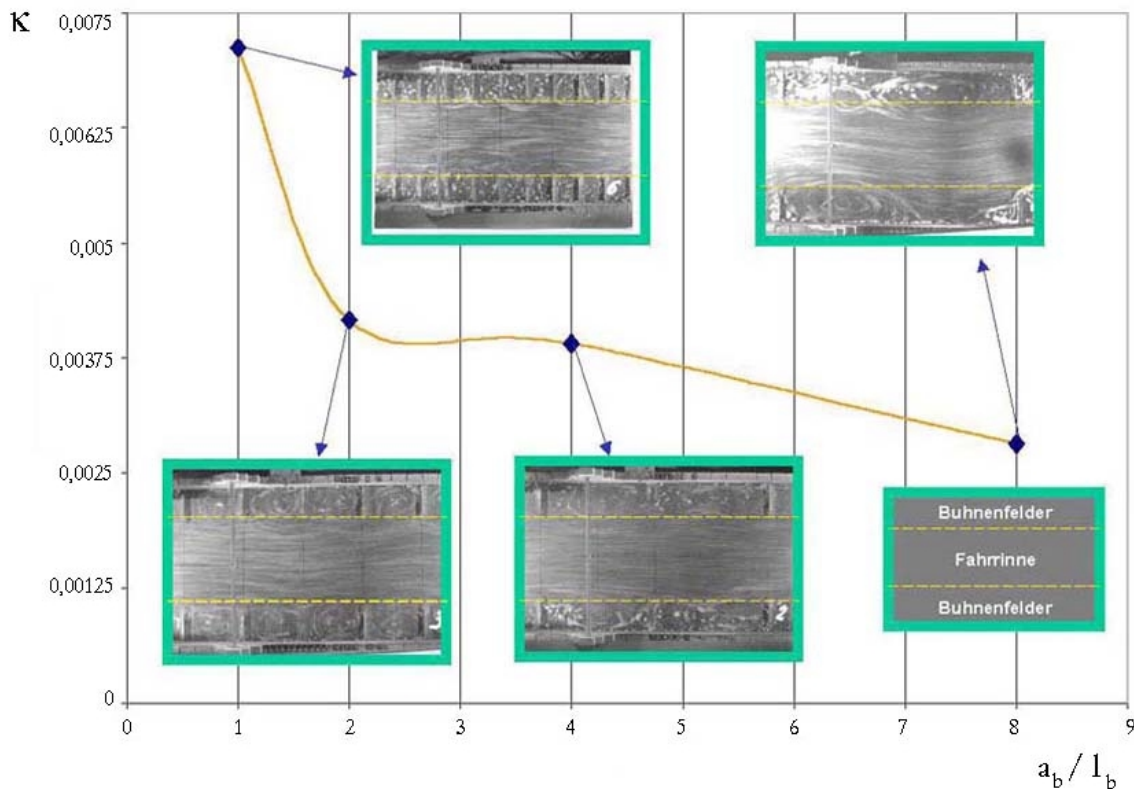
Die zwei Modellversuche der BAW mit geböschten Buhnen sind mit stark unterschiedlichen Buhnenlängen durchgeführt worden. Da die Versuchsrinne eine konstante Breite  $b_g$  von 2,5 Metern aufwies, ergaben sich dadurch zwei unterschiedliche Werte für das Einschränkungmaß  $b_f/b_g$  (vgl. Abbildung 6-13). Wie man sich leicht vorstellen kann, übt die starke Einschränkung ( $b_f/b_g = 0,3$ ) wesentlich stärkere Effekte auf die Strömung aus, als die in der Natur oft zu findenden, Regelungsverhältnissen näher kommende, kleinere Einschränkung ( $b_f/b_g = 0,5$ ).



**Abbildung 6-13:** Zwei unterschiedliche Einschränkungsverhältnisse bei den Modellversuchen der BAW mit geböschten Buhnen; links in der Natur häufig zu findendes Einschränkungmaß, rechts eine extreme Einschränkung als Sonderfall

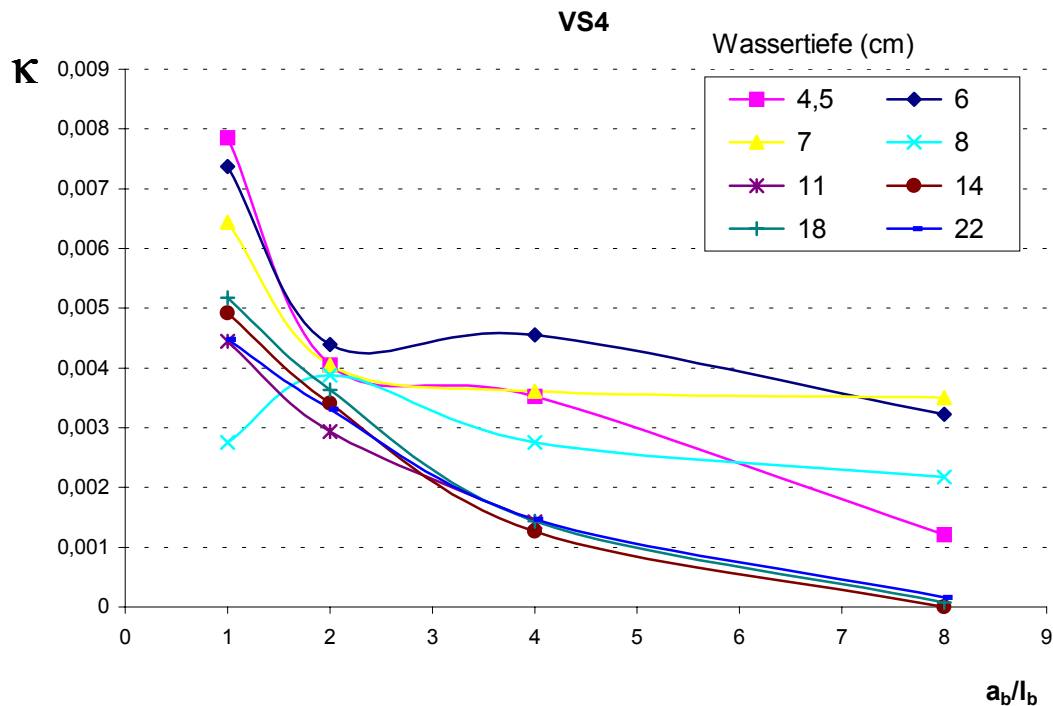
Die Abbildung 6-14 zeigt den Verlauf des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  bei nichtüberströmten Buhnen in Abhängigkeit des Buhnenabstands- zu Längenverhältnisses bei dem konstanten Einschränkungmaß von 0,5. Die Werte für  $\kappa$  wurden über die Tiefe gemittelt. Hierbei ist zu erkennen, daß der Widerstandsbeiwert bei sehr dicht aufeinanderfolgenden Buhnen ( $a_b/l_b = 1$ ) bis zu ca. 40% über dem Wert von  $5 \cdot 10^{-3}$  liegt. Bei einem Wert von  $a_b/l_b = 2$  liegt  $\kappa$  hingegen um ca. 20 % unter dem Vorgabewert von  $5 \cdot 10^{-3}$ . Interessant ist, daß sich

der Widerstandsbeiwert im Bereich von  $2 \leq a_b/l_b \leq 4$  kaum verändert. Den jeweiligen Meßpunkten wurden in der Abbildung 6-14 Photoaufnahmen zugeordnet, die Visualisierungen des Strömungszustandes zeigen. Gelb gestrichelt dargestellt ist der Verlauf der für die Berechnung zugrundegelegten vertikalen Trennfläche. Auch hier wird, wie schon in Kapitel 3 gezeigt, aufgrund der bei  $a_b/l_b > 3$  gut zu erkennenden über die Scheidefläche hinausgehenden Wirbelbildungen deutlich, daß in diesem Fall eine Bestimmung des Widerstandsbeiwertes mit den in dieser Arbeit festgelegten Definitionen für die benetzten Umfänge (vgl. Abbildung 6-9) nur mit eingeschränkter Genauigkeit möglich ist.

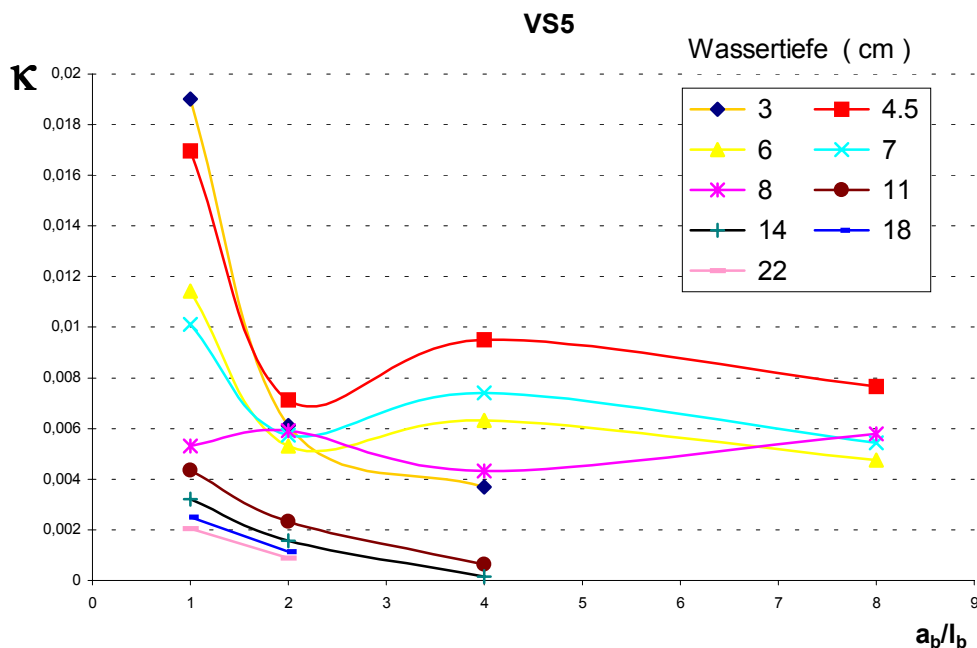


**Abbildung 6-14:** Abhängigkeit des Bühnenwiderstandsbeiwertes  $\kappa$  vom Abstands- zu Längenverhältnis; grün umrandet dargestellt sind Strömungsvisualisierungen der jeweiligen Versuchskonstellation

Das Verhalten des mit dem RÜ-Ansatz berechneten Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  wurde außerdem in Abhängigkeit von den in den BAW-Versuchen eingestellten Wassertiefen  $h$  aufgeschlüsselt. Hier wurden auch Versuche miteinbezogen, denen eine Überströmung der Bühnen bis zur dreifachen Überströmhöhe zugrundelagen (vgl. Abbildung 6-15).



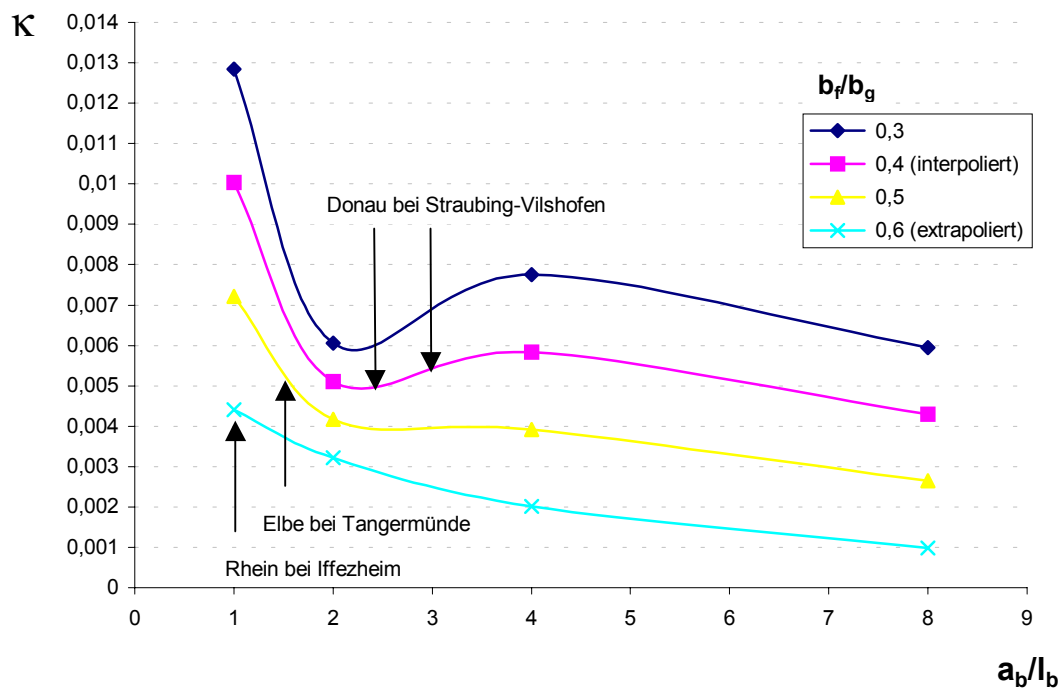
**Abbildung 6-15:** Abhängigkeit des Buhnenwiderstandsbeiwertes  $\kappa$  vom Abstands- zu Längenverhältnis sowie von der Anström- bzw. Überströmhöhe (Buhnenhöhe = 7 cm) bei einem konstanten Einschränkungmaß von 0,5 (Versuchsreihe 4)



**Abbildung 6-16:** Abhängigkeit des Buhnenwiderstandsbeiwertes  $\kappa$  vom Abstands- zu Längenverhältnis sowie von der Anström- bzw. Überströmhöhe (Buhnenhöhe = 7 cm) bei einem konstanten Einschränkungmaß von 0,3 (Versuchsreihe 5)

Deutlich zu erkennen ist das Absinken des Widerstandsbeiwertes bei überströmten Buhnen. Dies wurde hier gezeigt, um das Berechnungsverfahren daraufhin zu überprüfen, ob es auch für überströmte Buhnen qualitativ richtige Ergebnisse erbringt. Eine Plausibilisierung durch Vergleich mit Naturwerten bzw. anderen Modellversuchen konnte für den Fall überströmter Buhnen jedoch nicht durchgeführt werden.

Die Abbildung 6-17 zeigt Funktionen des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  für den Fall nichtüberströmter Buhnen die tiefengemittelt und in Abhängigkeit verschiedener Einschränkungsmaße ermittelt wurden. Dieses Diagramm wurde erstellt, um den Widerstandsbeiwert  $\kappa$  für verschiedene in der Natur vorkommende Ausbauzustände bestimmen zu können. So wird beispielsweise für einen Ausbauzustand des Rheines unterstrom der Staustufe Iffezheim ein Wert für  $\kappa$  von 0,0044 aus diesem Diagramm abgelesen. Für die Elbe bei Tangermünde ergibt sich ein Wert für  $\kappa$  von 0,0051 und für die Donau bei Straubing-Vilshofen (unterhalb der Isarmündung, Planungsvariante mit einer Fahrrinnenbreite von 70 Metern und Buhnenabstand von 100 Metern) liegt der Wert für  $\kappa$  bei 0,0051.



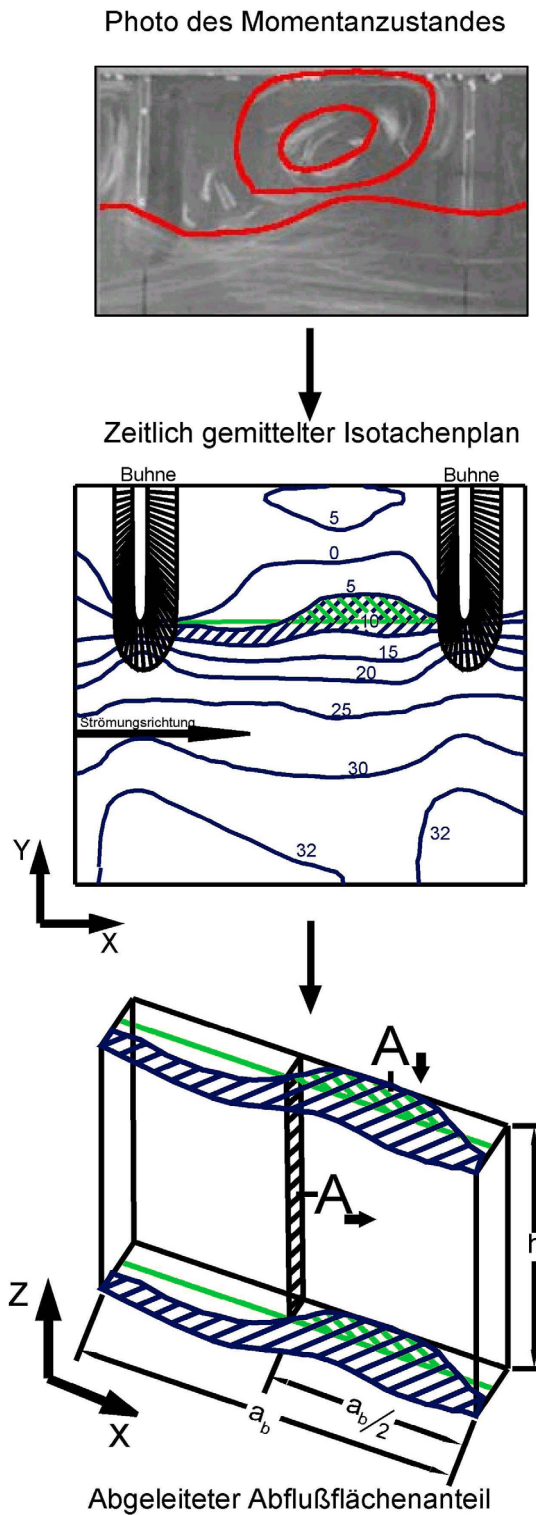
**Abbildung 6-17:** Der Widerstandsbeiwert  $\kappa$  in Abhängigkeit des Abstands- zu Längenverhältnisses  $a_b/l_b$  und des Einschränkungsmaßes  $b_f/b_g$  für den Fall nichtüberströmter Buhnen

Für praxisrelevante Verhältnisse sind demnach keine allzu großen Abweichungen für den verallgemeinerten Wert von  $\kappa = 0,005$  (vgl. Abbildung 6-12) zu erwarten. Allerdings sollte für zukünftige Berechnungen immer das Diagramm nach Abbildung 6-17 eingesetzt werden, um speziell Spiegelhebungswerte genau bestimmen zu können. Denn besonders bei sehr starken Einschränkungsmaßen ( $b_f/b_g < 0,5$ ) wird bei  $a_b/l_b = 2$  ein Minimum des Widerstandsbeiwertes erreicht, was unerwünscht sein kann, weil eine Anhebung des Wasserstandes zur Gewinnung einer größeren Fahrwassertiefe mit Buhnen erzielt werden soll. In diesen Fällen kann sogar ein großer Buhnenabstand (verkleinerter Bauaufwand !) zu großen Spiegelhebungen führen.

### 6.3.6.2 Abhängigkeit von $\kappa$ von der Größe der vorgegebenen Abflußfläche

Zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  muß die Größe der Abflußfläche vorgegeben werden. Diese ist jedoch aufgrund der Instabilität der sich an Regelungsbauwerken ausbildenden Wirbel nicht ganz genau festzulegen. So wird z.B. bei nichtüberströmten Buhnen die Größe der Abflußfläche so angenommen, als läge sie genau zwischen den Buhnenköpfen und wäre konstant im Streichlinienverlauf, was dem Verlauf der Scheidefläche entspräche, die Haupt- und Nebenströmung trennt. Tatsächlich aber sind die Buhnenfelder zum Teil am Abflußgeschehen mitbeteiligt, zum Teil reichen auch Wirbel leicht in die Fahrrinne hinein und verengen diese. Meistens findet hier aufgrund der auch bei kleinen Buhnenabständen vorhandenen leichten Oszillation des Stromstrichs im Mittel ein Ausgleich statt, so daß die o.a. Annahme eine sehr gute Näherung darstellt. Für die hier erfolgende Abschätzung wurde jedoch ein Extremfall einer Abflußflächenaufweitung in ein Buhnenfeld hinein ausgewählt. Hierbei waren die Buhnen beidseitig angeordnet und auf einer Seite war aufgrund der Inaugenscheinnahme von Strömungsvisualisierungen deutlich zu erkennen, daß das Buhnenfeld am Abfluß beteiligt ist, während auf der anderen Seite die Streichlinienbedingung (s.o.) gut erfüllt war.

Der hier bei der Berechnung unberücksichtigt bleibende Abflußanteil in einem Buhnenfeld hängt vom Zustand der sich ausbildenden Wirbelstrukturen ab. Diese Wirbelstrukturen sind auch bei Längen- zu Abstandsverhältnissen von 1-3 kleinräumig noch von der Zeit (vgl. Kapitel 3) sowie von den geometrischen Einbauverhältnissen der Buhnen (vgl. Kapitel 6.1) abhängig. Für eine Abschätzung des Fehlers, der aufgrund der Annahme in Bezug auf den zu berechnenden Formwiderstandsbeiwert  $\kappa$  entsteht, wurden horizontale Isotachenauswertungen des Modellversuchs (Felkel, 1975) herangezogen.



**Abbildung 6-18:** Auswertung von horizontalen Isotachenaufzeichnungen zur Bestimmung des maximalen Fehlers bei der Bestimmung eines Formwiderstandsbeiwertes für nichtüberströmte Buhnen; Trennzone (blau), Fehlerfläche (grün), Isotachenschreibungen sind Geschwindigkeiten in [cm/s]



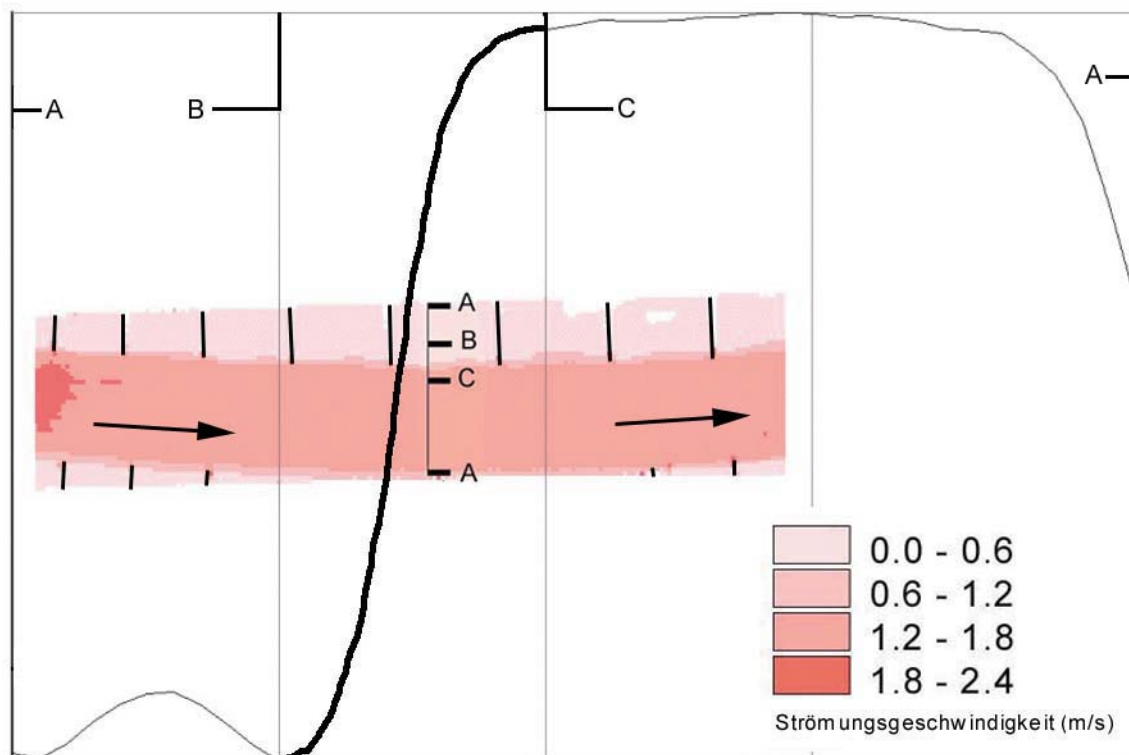
Die Abbildung 6-18 zeigt ein Auswertungsschema zur Bestimmung des Abflußflächenanteils, der einem Bühnenfeld zugeordnet werden muß. Ausgehend von einem Photo, das eine Visualisierung des Strömungszustandes in dem Bühnenfeld zeigt (Rot hervorgehoben sind wesentliche Details der Strömung) kann der Verlauf der Trennzone, die zwischen Hauptströmung und Bühnenfeldströmung liegt, abgeschätzt werden. Die Lage dieser Trennfläche wurde aufgrund dieser Abschätzung im Isotachenplan eingetragen (Blau schraffiert). Die im Streichlinienverlauf liegend angenommene Abflußfläche (grün durchgezogene Linie von Bühnenkopf zu Bühnenkopf) wird somit hier um den in Grün schraffiert dargestellten, vertikal projizierten Anteil unterschätzt. Nimmt man an, daß dieser Anteil über die Fließtiefe in etwa konstant bleibt, so kann man diesen in einen horizontal projizierten Anteil umrechnen (vgl. Gleichung 6-19).

$$A_{\rightarrow} = A_{\downarrow} \frac{2 h}{a_b} \quad \text{Gleichung 6-19}$$

Es ergibt sich damit aufgrund der o.a. Betrachtung im Mittel eine um ca. 4 % vergrößerte Abflußfläche, die eine Abweichung von ca. 20 % des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  hervorruft. Diese Abweichung muß, wenn die Abflußfläche im zeitlichen Mittel nicht ganz genau bestimmt werden kann, auch in die Prognose von Wasserspiegellagen bzw. anderen hydraulischen Größen einbezogen werden. So wird bei der Berechnung von Spiegelhebungen, die alleine durch Wirbelverluste in den Bühnenfeldern entstehen, diese Schwankungsgröße angegeben werden müssen. Die hier berechnete Schwankungsgröße von 20% liegt im übrigen auch in derselben Größenordnung wie die Standardabweichung, die bei der Bestimmung eines konstanten und vom Längen- zu Abstandsverhältnis unabhängigen Widerstandsbeiwertes für beidseitig angeordnete nichtüberströmte Bühnen angegeben wird (vgl. Abbildung 6-12). Die prognostizierten Spiegelhebungen weichen aufgrund dieser Schwankung des Widerstandsbeiwertes ebenfalls entsprechend ab. So ergibt sich zum Beispiel für die Berechnung von Spiegelhebungen aufgrund der Bühnenwirkung für den derzeitigen Ausbauzustand der Donau (Ritzert, 1996) aufgrund der o.a. Schwankung eine prozentuale Abweichung von ca. 26 %, was genau der Standardabweichung des Widerstandsbeiwertes entspricht.

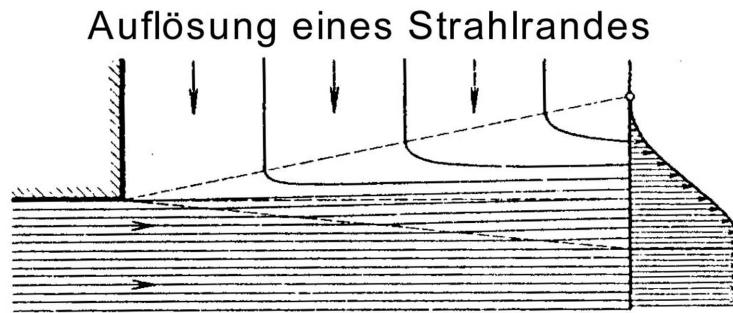
## 6.4 Auswertung nach der Prandtl'schen Freistrahlttheorie

Die Abbildung 6-19 zeigt eine mit dem nach Pegelmessungen kalibrierten 2D-HN-Modell hydro2de (Beffa, 1997) berechnete horizontale Geschwindigkeitsverteilung für die Rhein-strecke unterstrom der Staustufe Iffezheim. Der sehr steile Geschwindigkeitsabfall in das Bühnenfeld hinein (vgl. Abbildung 6-19) ist ein qualitatives Merkmal für das Vorhandensein der Scheidefläche (vgl. Kapitel 6.3).



**Abbildung 6-19:** Geschwindigkeitsabfall in ein Bühnenfeld, berechnet mit einem nach Pegelmessungen kalibrierten 2D-HN-Modell unterstrom der Staustufe Iffezheim

Dieser Geschwindigkeitsabfall kann als die Auflösung eines Strahlrandes in einen ruhenden Raum angesehen werden, wobei allerdings der Spezialfall einer gekoppelten Überströmung einer rauhen Sohle, an der Zähigkeitskräfte eine Rolle spielen, vorliegt. Zu dieser Problemstellung hat Prandtl (1942) die theoretischen Grundlagen hergeleitet und darüberhinaus existieren hierzu mannigfaltige experimentelle Untersuchungen (vgl. Kapitel 5).

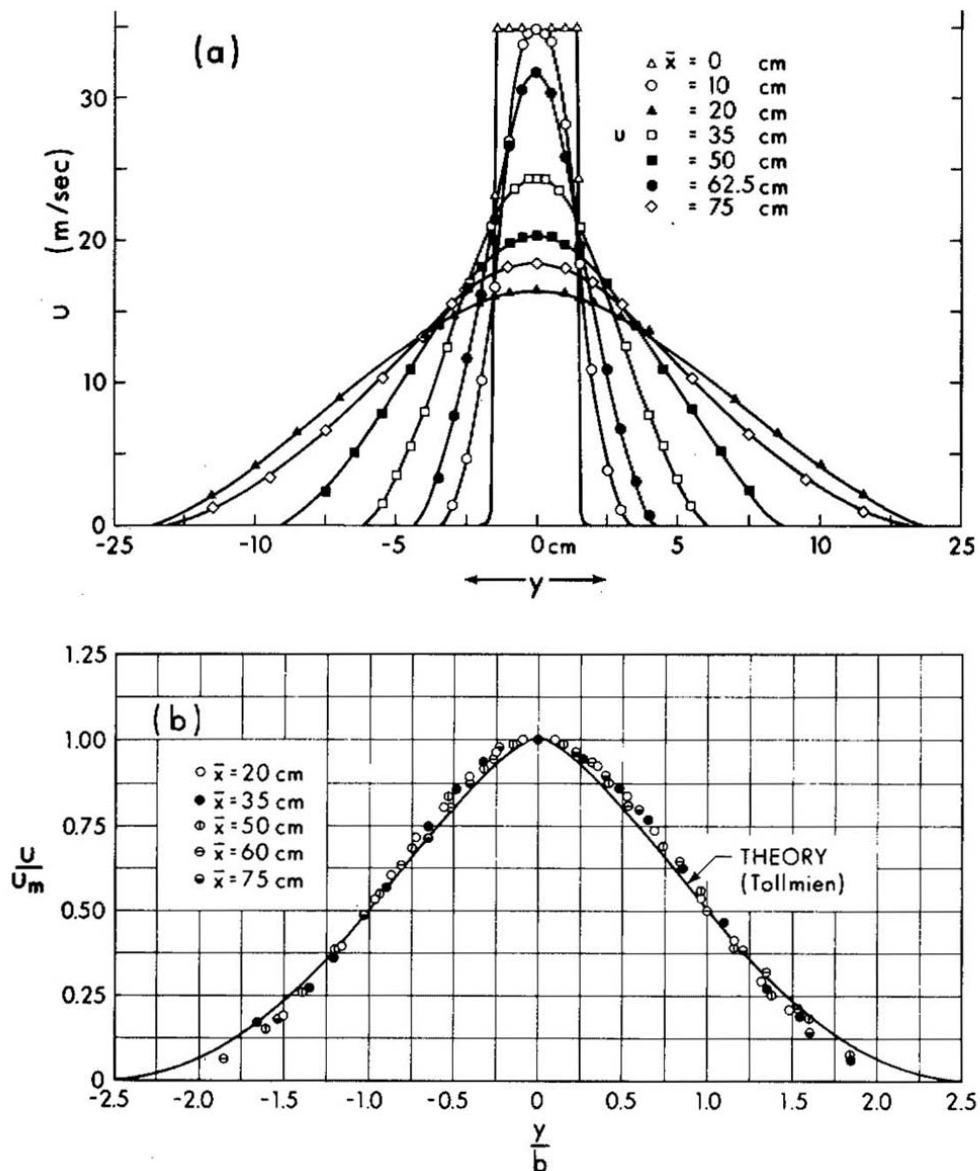


**Abbildung 6-20:** Auflösung eines Strahlrandes in einen ruhenden Raum (Prandtl, 1942)

Vergleicht man die Abbildung 6-20 mit der Abbildung 6-19, so wird der sehr ähnliche Verlauf deutlich. Insbesondere der in beiden Abbildungen vorhandene hyperbolische Verlauf der Geschwindigkeit fällt hierbei sofort ins Auge. Die Art dieses Verlaufs kann als Maß für die Widerstandswirkung von Regelungsbauwerken herangezogen werden. Im folgenden wird diese Möglichkeit der Bestimmung eines Widerstandsbeiwertes eingesetzt, um die so erzielten Ergebnisse mit den Widerstandsbeiwerten, die auf der Grundlage des Einstein'schen RÜ-Ansatzes berechnet wurden, zu vergleichen. Dieser Vergleich dient in erster Linie der Validierung der auf die Problemstellung Regelungsbauwerke angewendeten RÜ nach Einstein.

#### 6.4.1 Berechnungsmethode nach der Prandtl'schen Freistrahtheorie

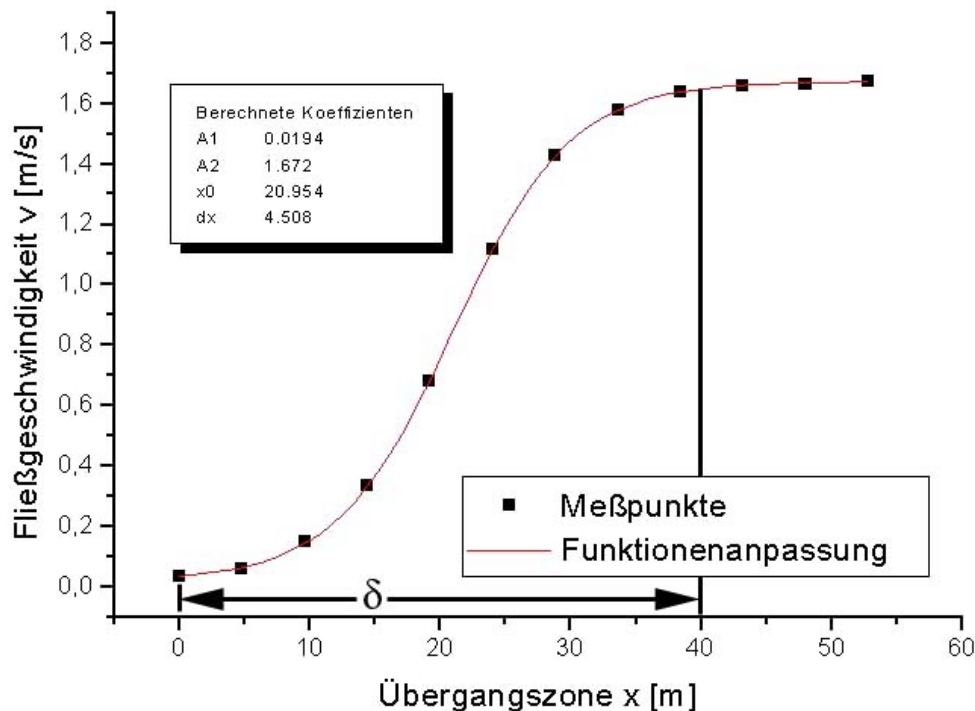
Das Maß des Abfalls der Geschwindigkeit in einen ruhenden Raum (z.B. Bühnenfeld, andere Kammern) kann zur Bestimmung eines Widerstandsbeiwertes herangezogen werden. Allerdings muß hierbei über die Länge und Tiefe einer von der Hauptströmung abgekoppelten aber dennoch mit ihr interagierenden Kammer integriert werden. Eine ähnliche Problemstellung sind ebene turbulente Freistrahlen, wobei der ruhende Raum als die Umgebung, in die der Strahl eintritt, angesehen werden kann.



**Abbildung 6-21:** Geschwindigkeitsverteilungen für den ebenen turbulenten Freistrah (aus Rajaratnam, 1976)

Die Abbildung 6-21a zeigt Geschwindigkeitsverteilungen, die für ebene turbulente Freistrahlen von Förthmann (1934) gemessen wurden. Hierbei wird deutlich, daß mit zunehmender Entfernung vom Ausströmrand sich die Geschwindigkeitsverteilung verbreitert. Normiert man den Abstand  $y$  auf die Breite  $b$  und die lokale Geschwindigkeit  $u$  auf die mittlere Geschwindigkeit, so erhält man eine von der Entfernung unabhängige Verteilung (vgl. Abbildung 6-21b), die in Tollmiens Experimenten (1926) untersucht wurde. Die in dieser Arbeit zur Validierung des Einstein'schen RÜ-Modells abgeleiteten Widerstandsbeiwerte nach der Prandtl'schen Freistrahblbedingung sowie der Prandtl'schen Mischungsweglängenhypothese wurden auf der Grundlage einzelner, z.B. in Bühnenfeldern mittig gemessener horizontaler Geschwindigkeitsverteilungen abgeleitet. Diesem mittigen Geschwin-

digkeitsprofil wird in einer ersten Näherung auch aufgrund des linearen Verlaufs des Ablösestrahls (vgl. Kapitel 5) eine Mittelungsfunktion zugesprochen. Schematisch wird die Vorgehensweise anhand der in Abbildung 6-19 gezeigten horizontalen Geschwindigkeitsverteilung gezeigt. Die Übergangszone  $\delta$  ist definiert als der Bereich in dem die Geschwindigkeitsänderungen zwischen 1-99% betragen.



**Abbildung 6-22:** Funktionell angepaßter Geschwindigkeitsabfall in ein Bühnenfeld (Origin, 1997)

Die Daten der in Abbildung 6-19 dargestellten horizontalen Geschwindigkeitsverteilung wurden mit einer Boltzmannfunktion (vgl. Gleichung 6-20) angepaßt und in Abbildung 6-22 dargestellt. Die Koeffizienten wurden hierbei iterativ mit der Software „Origin“ (Microcal Inc., 1997) ermittelt

$$v = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp \frac{x-x_0}{dx}} + A_2 \quad \text{Gleichung 6-20}$$

mit  $x$  = Abstand in der Übergangszone [m]

$v$  = lokale Geschwindigkeit abhängig von  $x$  [m/s]  
 $A_1, A_2, x_0, dx$  = Anpassungskoeffizienten

Die scheinbar turbulenten Schubspannungen wurden mit Prandtl's „free-shear-layer-model“ (Rodi, 1980) aus dieser Geschwindigkeitsverteilung berechnet.

$$\tau_{\text{int}}(x) = \rho C \delta |v_{\text{max}} - v_{\text{min}}| \frac{dv}{dx} \quad \text{Gleichung 6-21}$$

mit  $v_{\text{max}}$  = maximale Fließgeschwindigkeit in der Übergangszone [m/s]  
 $v_{\text{min}}$  = minimale Fließgeschwindigkeit in der Übergangszone [m/s]  
 $C$  = „free-shear-layer“ Koeffizient

Für die Variable  $C$  existieren Werte aus Modellversuchen (vgl. Tabelle 6-7):

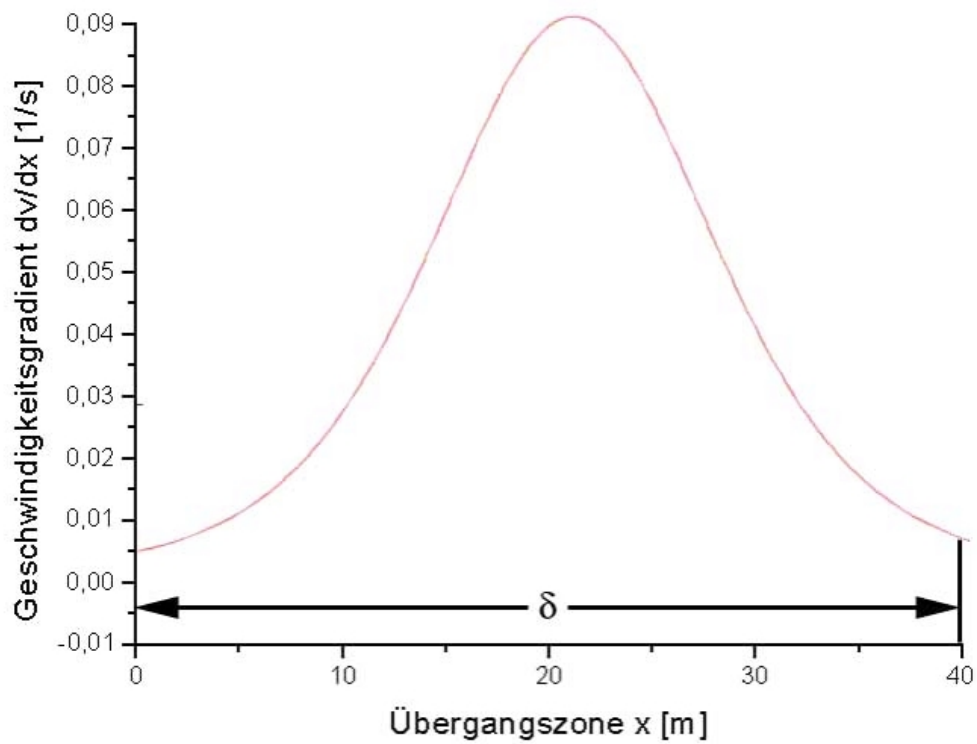
Flow	Plane mixing layers	Plane Jet	Round Jet	Radial (or Fan) Jet	Plane Wake
<b>C</b>	0.01	0.014	0.011	0.019	0.026

**Tabelle 6-7:** Werte für die empirische Konstante  $C$  in Prandtl's „free-shear-layer-model“

Für den Fall einer Bühnenfeldströmung wurde hier der einem „plane mixing layer“ entsprechende Koeffizient eingesetzt. Dies deshalb, weil zum einen die Durchströmung des Rechteckquerschnitts in den Modellversuchen zu einer ebenen Scherströmung führt und weiterhin eine feste Berandung in Form von begrenzenden Wänden in den Modellversuchen vorliegt. Ableiten von Gleichung Gleichung 6-20 nach der Variablen  $x$  ergibt:

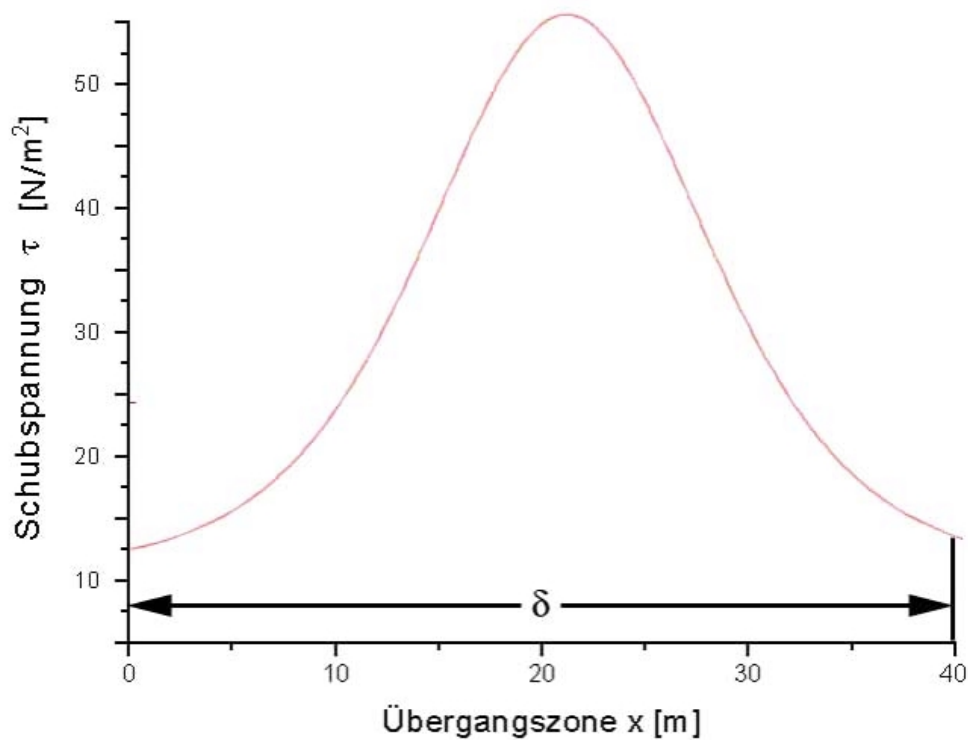
$$\frac{dv}{dx} = \frac{(A_2 - A_1) \left( dx^{-1} \exp^{\frac{x-x_0}{dx}} \right)}{\left( 1 + \exp^{\frac{x-x_0}{dx}} \right)^2} \quad \text{Gleichung 6-22}$$

Damit ergibt sich die Funktion gemäß Abbildung 6-23, die ähnlich einer Gauß'schen Normalverteilung verläuft. Sie ist als Maß für den Geschwindigkeitsanstieg bzw. -abfall zu interpretieren.



**Abbildung 6-23:** Der Geschwindigkeitsgradient  $dv/dx$  als Maß für die Größe der Interaktionsschubspannung  $\tau_{\text{int}}(x)$

Einsetzen der Gleichung 6-22 in die Gleichung 6-21 liefert den quantitativen Verlauf der Interaktionsschubspannung, die in der Übergangszone wirkt (vgl. Abbildung 6-24).



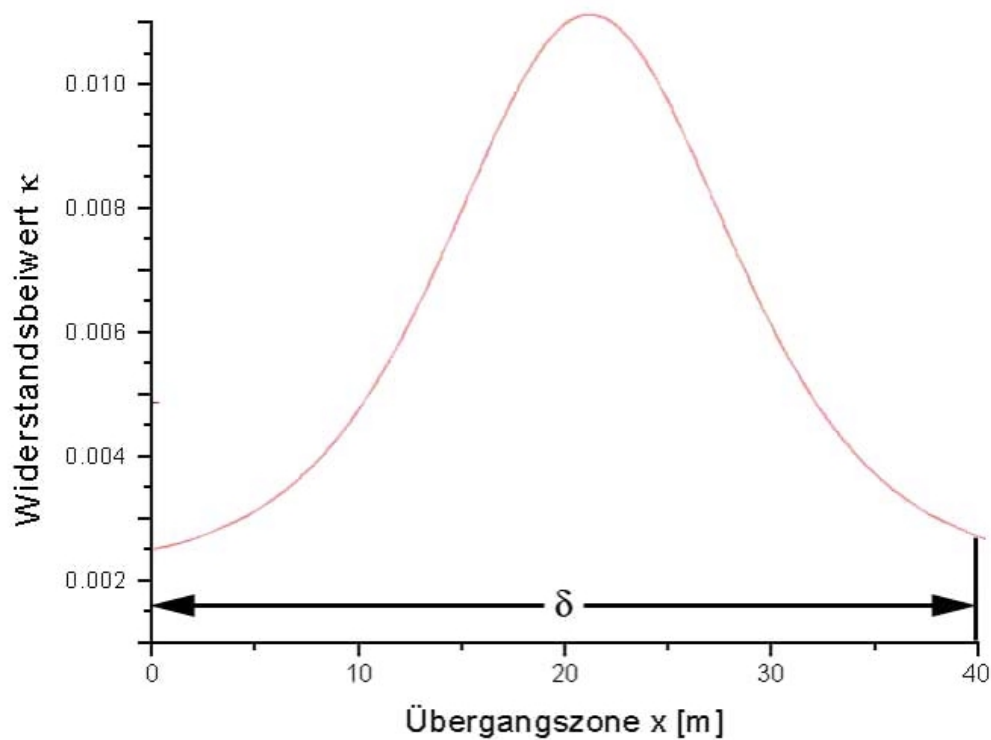
**Abbildung 6-24:** Das Maß der Interaktionsschubspannung  $\tau_{\text{int}}$  in der Übergangszone  $\delta$

Setzt man in Gleichung 6-17 die Gleichung 6-21 und die Gleichung 6-22 ein und löst nach  $\kappa$  auf so ergibt sich der folgende funktionelle Zusammenhang für den Widerstandsbeiwert  $\kappa$ :

$$\kappa(x) = \frac{(A_2 - A_1) \left( dx^{-1} \exp \frac{x-x_0}{dx} \right) C \delta}{2 |v_{\text{max}} - v_{\text{min}}| \left( 1 + \exp \frac{x-x_0}{dx} \right)^2} \quad \text{Gleichung 6-23}$$

Grafisch dargestellt ergibt sich der folgende Verlauf für  $\kappa(x)$  (vgl. Abbildung 6-25).





**Abbildung 6-25:** Der Verlauf von  $\kappa$  in der Übergangszone  $\delta$

Der Mittelwert aus der obigen Funktion ergibt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Widerstandsbeiwert, der für geböschte Buhnen aus den Modellversuchen nach der RÜ-Methode abgeleitet wurde (vgl. Gleichung 6-24).

$$\bar{\kappa} = \frac{\int_0^{\delta} \kappa(x) dx}{\delta} = 5.1 \cdot 10^{-3}$$

**Gleichung 6-24**

Das mit „MathCad“ (MathSoft, 1997) erstellte Arbeitsblatt (vgl. Abbildung 6-26) kann im folgenden zur interaktiven Bearbeitung verwendet werden.

Boltzmannkoeffizienten:

$$A1 := 0.01943 \quad A2 := 1.67246 \quad x0 := 20.95497 \quad dx := 4.5087$$

$$v(x) := A2 + \frac{A1 - A2}{1 + \exp\left(\frac{x - x0}{dx}\right)}$$

$$dv(x) := \frac{(A2 - A1) \cdot \left(dx^{-1} \cdot \exp\left(\frac{x - x0}{dx}\right)\right)}{\left(1 + \exp\left(\frac{x - x0}{dx}\right)\right)^2}$$

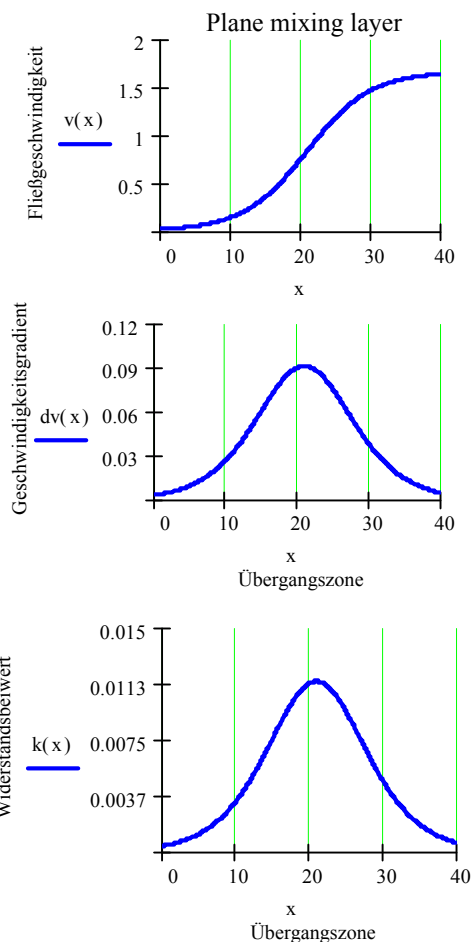
Prandtl's "free shear layer model" Koeffizienten:

$$\rho := 1000 \quad C := 0.01 \quad \delta := 40 \quad v_{\max} := 1.6$$

$$\tau(x) := \rho \cdot C \cdot \delta \cdot v_{\max} \cdot dv(x)$$

$$k(x) := \frac{\tau(x)}{2 \cdot \rho \cdot v_{\max}^2}$$

$$\frac{\int_0^{\delta} k(x) dx}{\delta} = 5.042 \cdot 10^{-3}$$



**Abbildung 6-26:** Ein mit der Mathematiksoftware Mathcad (1997) erstelltes Arbeitsblatt zur Analyse von Geschwindigkeitsübergängen nach dem Prandtl'schen Freistrahlmmodell

## 6.5 Auswertungen nach dem Prandtl'schen Mischungsweglängenmodell

Spanning (1999) fand, daß im Zusammenhang mit den Regelungsbauwerken Bühnen für eine realitätsnahe Wiedergabe der Zustandsgrößen der Strömung das Prandtl'sche Mischungsweglängenmodell geeignet ist. Daher wird dieses Turbulenzmodell zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  aus dem Geschwindigkeitsverlauf nach Abbildung 6-19 für einen Vergleich mit dem RÜ-Ansatz nach Einstein herangezogen.

Ausführlich beschrieben haben die Prandtl'sche Mischungsweglängenhypothese Launder und Spalding 1972. Hier wurden auch die unterschiedlichen Ansätze anderer Autoren zur Bestimmung der Mischungsweglänge  $l_m$  aufgelistet. Der diesem Turbulenzmodell zugrundeliegende physikalische Zusammenhang wird nach Zierep (1982) folgendermaßen beschrieben:

Der Mischungsweg  $l_m$  wird als diejenige Länge verstanden, die ein Turbulenzelement im Mittel zurücklegt, bevor es sich mit der Umgebung vermischt und damit seine Individualität aufgibt.

Die Wirbelviskosität  $\nu_t$  wird demnach folgendermaßen definiert:

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{dv}{dx} \right| \quad \text{Gleichung 6-25}$$

Für die Reynolds'sche scheinbare Schubspannung  $\tau_{int}$ , die im Bereich des Geschwindigkeitsübergangs von Bühnenfeld zu Hauptgerinne wirkt, ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

$$\tau_{int}(x) = \rho l_m^2 \left| \frac{dv}{dx} \right|^2 \quad \text{Gleichung 6-26}$$

Für die Mischungsweglänge  $l_m$  wurden auf der Grundlage von experimentellen Versuchen folgende Werte abgeleitet (vgl. Tabelle 6-8):

Flow	Plane mixing layer	Plane Jet	Round Jet	Radial (or Fan) Jet	Plane Wake
$l_m/\delta$	0.07	0.09	0.075	0.125	0.16

**Tabelle 6-8:** Koeffizienten für die Mischungsweglänge bei freien Scherströmungen (aus Launder, Spalding, 1972)

Für eine Bühnenfeldströmung wird, wie auch beim Prandtl'schen Freistrahlmmodell (vgl. Kapitel 6.4.1, Tabelle 6-7) der dem Strömungszustand „plane mixing layer“ zugeordnete Koeffizient eingesetzt. Damit leitet sich aus dem Geschwindigkeitsabfall in ein Bühnenfeld am Beispiel des Rheins unterstrom der Staustufe Iffezheim folgender Widerstandsbeiwert  $\kappa$  ab (vgl. Abbildung 6-27 und Gleichung 6-27).

$$\bar{\kappa} = \frac{\int_0^\delta \kappa(x) dx}{\delta} = 3.9 \cdot 10^{-3} \quad \text{Gleichung 6-27}$$

Boltzmannkoeffizienten:

$$A1 := 0.01943 \quad A2 := 1.67246 \quad x0 := 20.95497 \quad dx := 4.5087$$

$$v(x) := A2 + \frac{A1 - A2}{1 + \exp\left(\frac{x - x0}{dx}\right)}$$

$$dv(x) := \frac{(A2 - A1) \cdot dx^{-1} \cdot \exp\left(\frac{x - x0}{dx}\right)}{\left(1 + \exp\left(\frac{x - x0}{dx}\right)\right)^2}$$

Prandtl'scher Mischungsweglängenansatz:

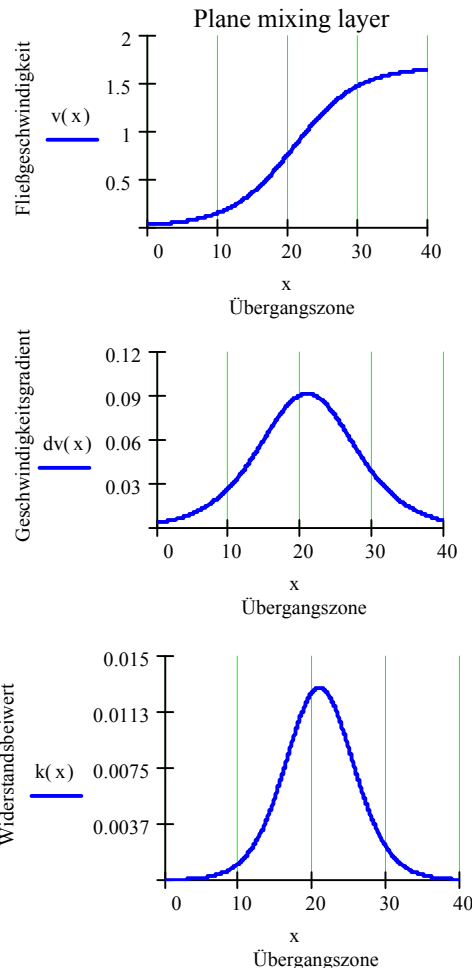
$$Cm := 0.07 \quad \rho := 1000 \quad v_{max} := 1.6 \quad \text{deltag} := 40$$

$$\ln(x) := Cm \cdot \text{deltag}$$

$$\tau(x) := \rho \cdot \ln(x)^2 \cdot dv(x)^2$$

$$k(x) := \frac{\tau(x)}{2 \cdot \rho \cdot v_{max}^2}$$

$$\frac{\int_0^{\text{deltag}} k(x) dx}{\text{deltag}} = 3.863 \cdot 10^{-3}$$

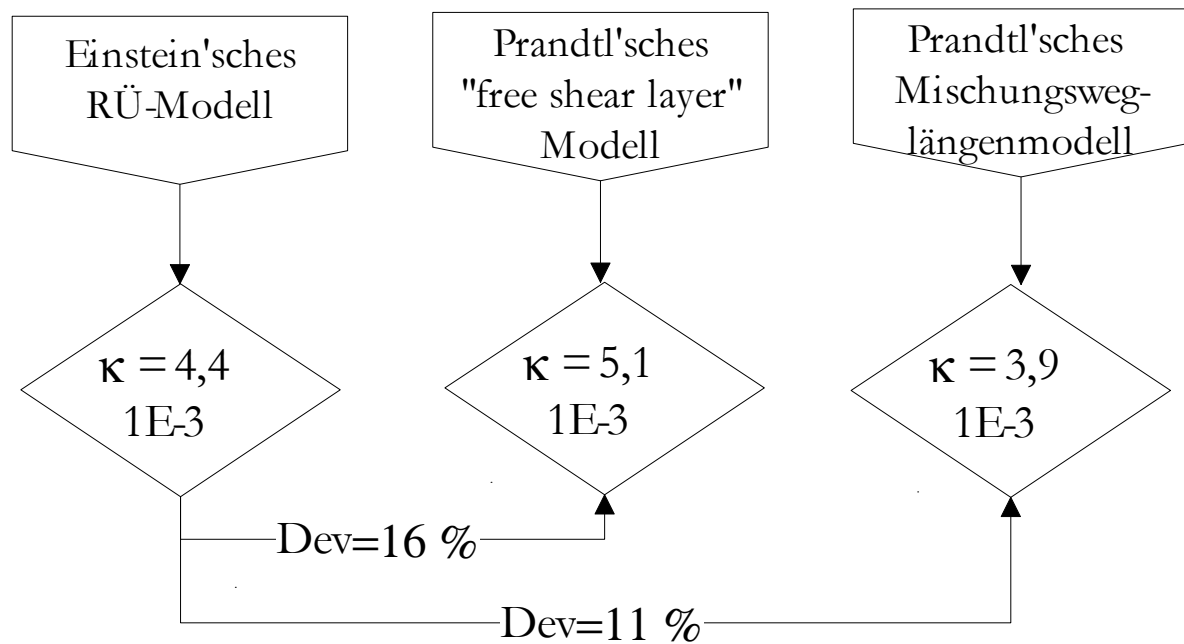


**Abbildung 6-27:** Ein mit der Mathematiksoftware Mathcad (1997) erstelltes Arbeitsblatt zur Analyse von Geschwindigkeitsübergängen nach dem Prandtl'schen Mischungsweglängenmodell

## 6.6 Schlußfolgerungen

Für den Widerstandsbeiwert  $\kappa$  ergibt sich für beidseitig angeordnete nichtüberströmte Buhnen ein mittlerer Wert von  $\kappa = 5 \cdot 10^{-3}$  (vgl. Abbildung 6-27). Differenziert man nach den in der Dimensionsanalyse (vgl. Kapitel 6.1) hergeleiteten dimensionslosen geometrischen Verhältnissen Einschränkungmaß  $b_f/b_g$  und Abstands- zu Längenverhältnis  $a_b/l_b$ , dann kann für eine Bestimmung von  $\kappa$  das Diagramm nach Abbildung 6-17 herangezogen

werden. So folgt aus diesem Diagramm für Einbauverhältnisse von Bühnen im Rhein unterstrom der Staustufe Iffezheim ein  $\kappa$ -Wert von  $4,4 \cdot 10^{-3}$ . Zur Validierung der RÜ-Methode wurde ein Geschwindigkeitsabfall in ein Bühnenfeld in dieser Rheinstrecke herangezogen und nach dem Prandtl'schen Freistrahlmmodell sowie nach dem Prandtl'schen Mischungsweglängenmodell ausgewertet (vgl. Abbildung 6-28).



**Abbildung 6-28:** Vergleich der  $\kappa$ -Werte nach dem RÜ-Ansatz nach Einstein sowie dem Prandtl'schen Freistrahlmmodell und dem Prandtl'schen Mischungsweglängenansatz

Die geringen Abweichungen (Dev) von maximal 16 % bestätigen die Richtigkeit der Anwendung der RÜ-Methode auf Regelungsbauwerke. Im nachfolgenden Kapitel 7 wird gezeigt, wie die nach der RÜ-Methode bestimmten Widerstandsbeiwerte für Prognoserechnungen eingesetzt werden können.

## 7 Einsatz der Widerstandsbeiwerte für Prognoserechnungen

Sind die Widerstandsbeiwerte bekannt, so kann der RÜ-Ansatz zur Prognose von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in einem mit Regelungsbauwerken ausgebauten Fluß eingesetzt werden. Zunächst wird die mit Buhnen ausgebaute Rheinstrecke unterstrom der Staustufe Iffezheim für ein Prognose von Wasserspiegellagen mit dem RÜ-Ansatz herangezogen. Hierbei werden dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programm BuSim (Ritzert, 1999) in der Natur vermessene Geometrien für eine schrittweise Berechnung nach der „Standard Step Methode“ (Ven Te Chow, 1959) vorgegeben.

Weiterhin wird das Programm BuSim eingesetzt, um in Modellversuchen ermittelte Spiegelhebungen (Ogris, 1994) bei nichtüberströmten Buhnen für die Donauverhältnisse bei Straubing-Vilshofen unter der Vorgabe der aus den Modellversuchen der BAW (Felkel, 1976) ermittelten Widerstandsbeiwerte nachzurechnen. Hierbei wird als Grundgeometrie die Trapezform eingesetzt, die auch in den Berechnungen von Ogris (1994) vorgegeben wurde.

Im Folgenden werden zunächst die Ansätze für eine Berechnung von nichtüberströmten Buhnen nach der RÜ-Methode hergeleitet.

### 7.1 Herleitung der Berechnungsansätze

Im Rahmen des festgelegten Gültigkeitsbereiches sind Prognosen von Wasserspiegellagen unter Vorgabe der natürlichen Sohlrauheitshöhe eines Fließgewässers möglich. Die Buhnenwirkung wird durch den im Experiment bestimmten Koeffizienten  $\kappa$  in die Berechnungsansätze eingebracht (vgl. Kapitel 6). Die Auflösung des RÜ-Ansatzes (vgl. Gleichung 4-8) nach der Wassertiefe  $h$  (vgl. Abbildung 6-9, benetzter Umfang der Trennflächenrauheit  $U_{\text{rege}} = 2h$ ) ergibt:

$$h = \frac{\lambda_{\text{sohle}}(h) b_f}{\left( \frac{8 g i_s b_f}{v_m^2(h)} - 32 \kappa \right)} \quad \text{Gleichung 7-1}$$

Die Auswertung von Isotachenverläufen für geböschte Buhnen (vgl. Abbildung 5-4) ergibt für die Geschwindigkeiten über der Böschung mittlere Geschwindigkeiten in Höhe der hal-

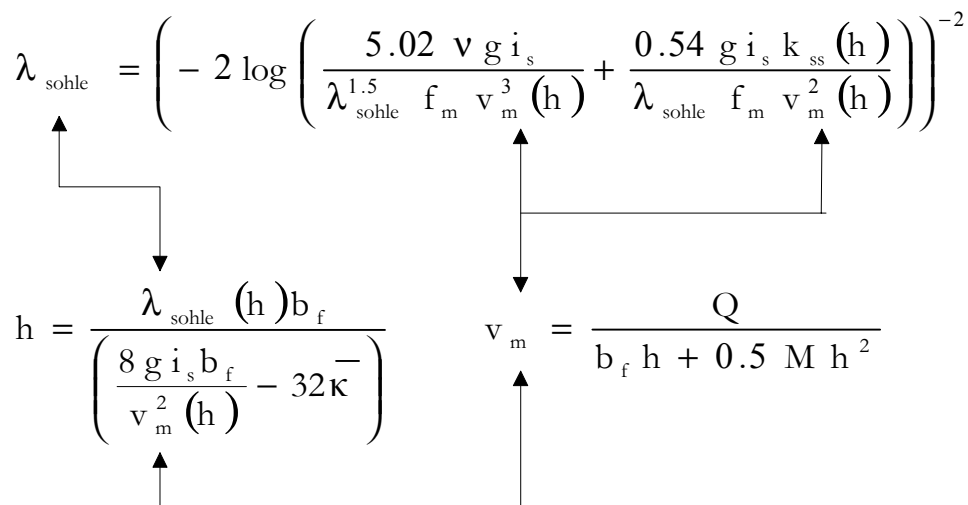
ben Fahrrinnengeschwindigkeit. Damit ergibt sich für geböschte Buhnen eine mittlere Gesamtgeschwindigkeit von:

$$v_m = \frac{Q}{b_f h + 0.5 M h^2} \quad \text{Gleichung 7-2}$$

Sowohl  $\lambda_{\text{sohle}}$  als auch  $v_m$  sind abhängig von  $h$ . Für  $\lambda_{\text{sohle}}$  ergibt sich mit **Gleichung 6-6** und **Gleichung 6-9**:

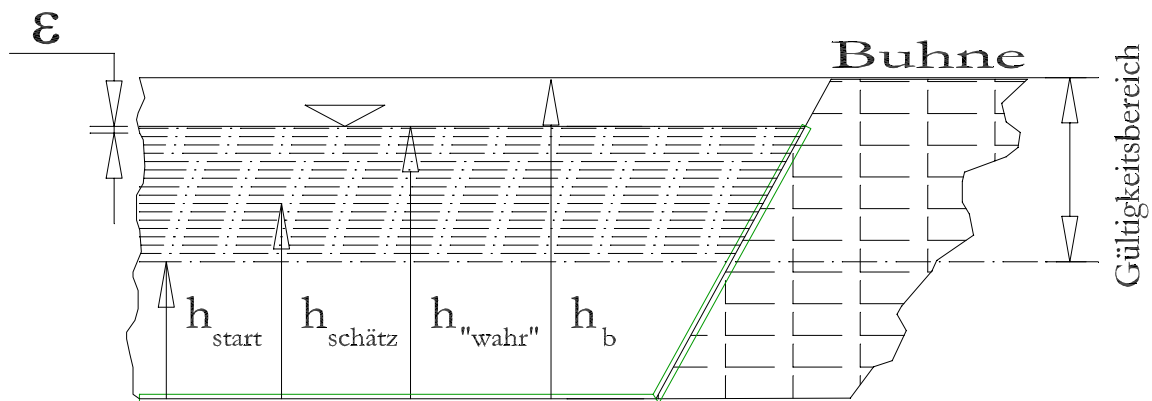
$$\lambda_{\text{sohle}} = \left( -2 \log \left( \frac{5.02 v g i_s}{\lambda_{\text{sohle}}^{1.5} f_m v_m^3(h)} + \frac{0.54 g i_s k_{ss}(h)}{\lambda_{\text{sohle}} f_m v_m^2(h)} \right) \right)^{-2} \quad \text{Gleichung 7-3}$$

Die Berechnung von  $h$  erfordert eine iterative Lösung von  $\lambda_{\text{sohle}}$  (vgl. Tabelle 6-6) in Gleichung 7-3 sowie die nachgeschaltete Iteration von  $h$  in Gleichung 7-1 (vgl. Abbildung 7-1).



**Abbildung 7-1:** Transzendenten Formelapparat, der beim Verknüpfen der Gleichungen 7-1, 7-2 und 7-3 zur Berechnung der mittleren Wassertiefe  $h$  entsteht

Die Startwerte für  $h$  sind abhängig vom Wert des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  (vgl. Abbildung 7-2), d.h. für eine Berechnung werden Schätzwerte für die Wasserspiegellage in Bezug zur Bauwerkshöhe vorgegeben, die aus Modellversuchen ermittelt wurden.

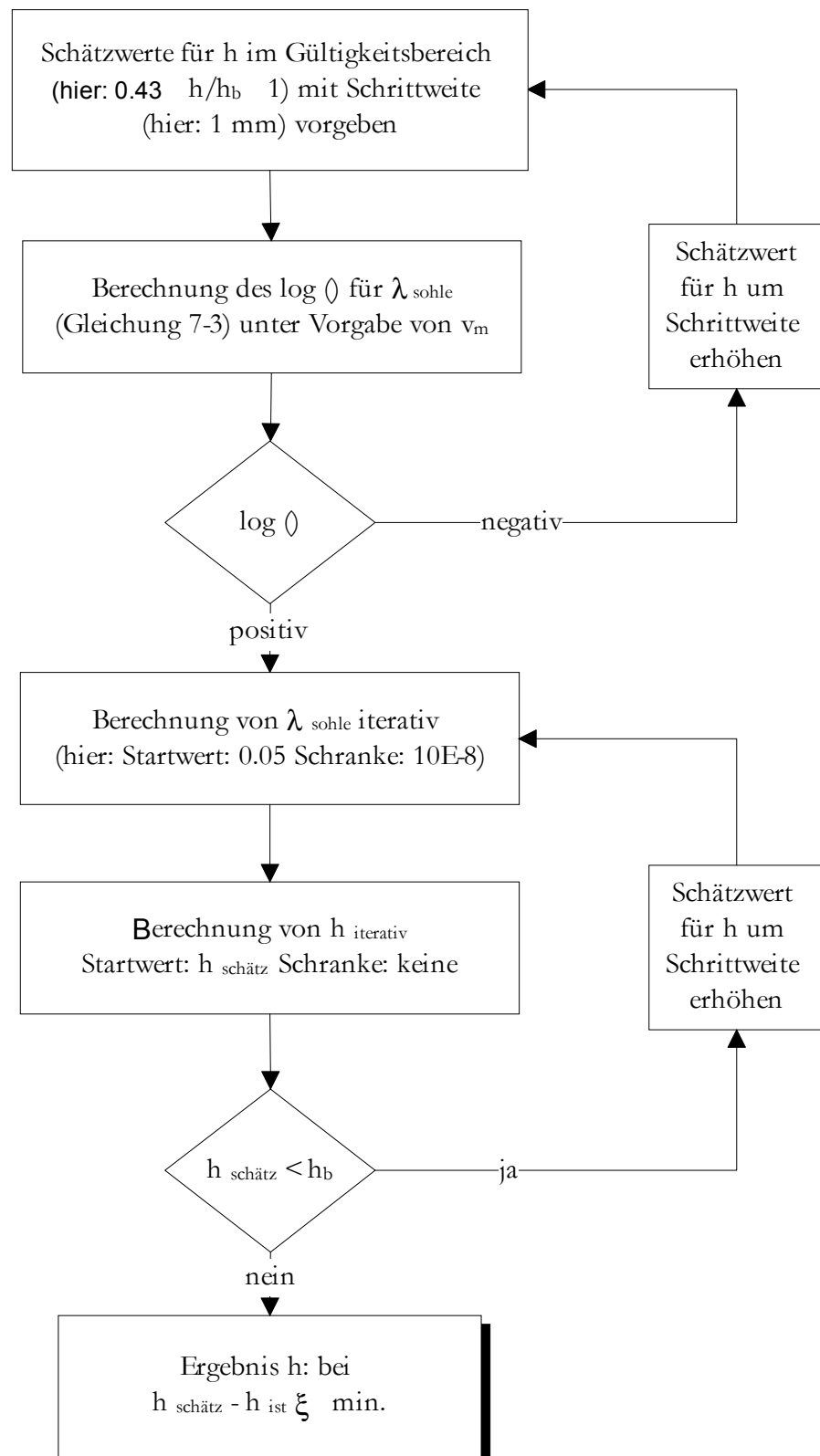


**Abbildung 7-2:** Schemaskizze zur Vorgabe von Schätzwerten und iterativen Berechnung der Wasserspiegellage bei nichtüberströmten Buhnen mit der RÜ-Methode

Die Konvergenz von  $h$  ist auf den Bereich beschränkt, in dem sich die Schätzwerte der "wahren" Wasserspiegellage nähern. Dort erreicht die Abweichung des geschätzten vom wahren Wert ein Minimum ( $\varepsilon$ -Abweichung), das als Abbruchkriterium für die Iteration dienen muß. Eine Steigerung der Iterationsschrittzahl führt zur Erhöhung der Genauigkeit. Für die hier vorliegenden Berechnungen wurde die Schrittweite auf 1/10 Millimeter gesetzt. Dieses Maß wurde gewählt, um sowohl für Berechnungen im Modell wie auch für Naturverhältnisse eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen.

Die Abbildung 7-3 zeigt das Ablaufschema zur Berechnung von Wasserspiegellagen mit der RÜ-Methode auf der Basis der gemäß Abbildung 7-1 verknüpften Gleichungen. Zur Validierung der Ansätze für die Prognoserechnung werden zunächst die Wassertiefen  $h$ , die in den Modellversuchen gemessen wurden mit den berechneten Werten verglichen.





**Abbildung 7-3:** Ablaufschema zur Prognose von Wasserspiegellagen bei nichtüberströmten Buhnen mit der RÜ-Methode

## 7.1.1 Validierung der Berechnung für nichtüberströmte Buhnen

Die prognostizierten Wasserspiegellagen mit den in Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 angegebenen  $\kappa$ -Werten sind in Tabelle 7-1 aufgeführt. Hier werden die aus den Versuchsdaten gemessenen und die bei maximaler Abweichung von  $\kappa$  prognostizierten Wasserspiegellagen gegenübergestellt. Die Spiegelhebung  $z$  wird aus der Differenz der mit zu Null gesetztem Interaktionsparameter  $\kappa$  berechneten Wasserspiegellage und der mit mittlerem  $\kappa$  berechneten, ermittelt. Als Maß für die Güte der Prognose wird die mit der prozentualen Standardabweichung von  $\kappa$  berechnete Varianz der Wasserspiegellage ( $\pm$  Werte) angegeben.

Prognose von Wasserspiegellagen								
Berechnung mit maximalen Abweichungen	$h_b$ [m]	$b_f$ [m]	$i_s$ [‰]	$Q$ [l/s]	$k_{ss}$ [mm]	$h$ gemessen [m]	$h$ prognose [m]	
Berechnung mit maximaler Abweichung aus VS1-3 (vgl. Abbildung 6-11)								
$\kappa=0.0$	0,000001	0,07	1,250	0,595	13,33	0,0399	--	0,0400
$\kappa$ max	0,007880	0,07	1,250	0,595	13,33	0,0399	0,045	0,0444
$\kappa$ mittel	0,007300	0,07	1,250	0,595	13,33	0,0399	0,045	0,0441
$\kappa$ min	0,006720	0,07	1,250	0,595	13,33	0,0399	0,045	0,0437
Spiegelhebung $z = 0,41 \pm 0,035$ [cm]								
Berechnung mit maximaler Abweichung aus VS4-5 (vgl. Abbildung 6-12)								
$\kappa=0.0$	0,000001	0,07	0,725	0,595	12,10	0,0520	--	0,0491
$\kappa$ max	0,006320	0,07	0,725	0,595	12,10	0,0520	0,060	0,0594
$\kappa$ mittel	0,005000	0,07	0,725	0,595	12,10	0,0520	0,060	0,0573
$\kappa$ min	0,003680	0,07	0,725	0,595	12,10	0,0520	0,060	0,0553
Spiegelhebung $z = 0,82 \pm 0,21$ [cm]								

**Tabelle 7-1:** Gegenüberstellung von im Modellversuch der BAW gemessenen und mit der RÜ-Methode prognostizierten Wasserspiegellagen

Die Übereinstimmung (Abweichung maximal 8%) der gemessenen und prognostizierten Werte bestätigt die Berechnungsansätze, sowie das hier zu ihrer Lösung entwickelte iterative Vorgehen (vgl. Abbildung 7-3).

## 7.2 Anwendung der Berechnungsansätze auf natürliche Verhältnisse

Die vorgenannten Algorithmen wurden für allgemeine, unregelmäßige Querschnittsformen zur Anwendung im 1D-Modellsystem CARIMA (Belleudy, Cunge, Rahuel, 1986) in Zusammenarbeit mit der BAW aufbereitet. Die mit dem RÜ-Verfahren abgeleiteten Widerstandsbeiwerte wurden hierbei für einen Einsatz in CARIMA unter Verwendung der Gleichung 7-4 vorbereitet.

$$k_{\text{str}} = \frac{5.87 \sqrt{2g}}{\left(\frac{k_{\text{ss}}}{f_m}\right)^{1/6}} \quad \text{Gleichung 7-4}$$

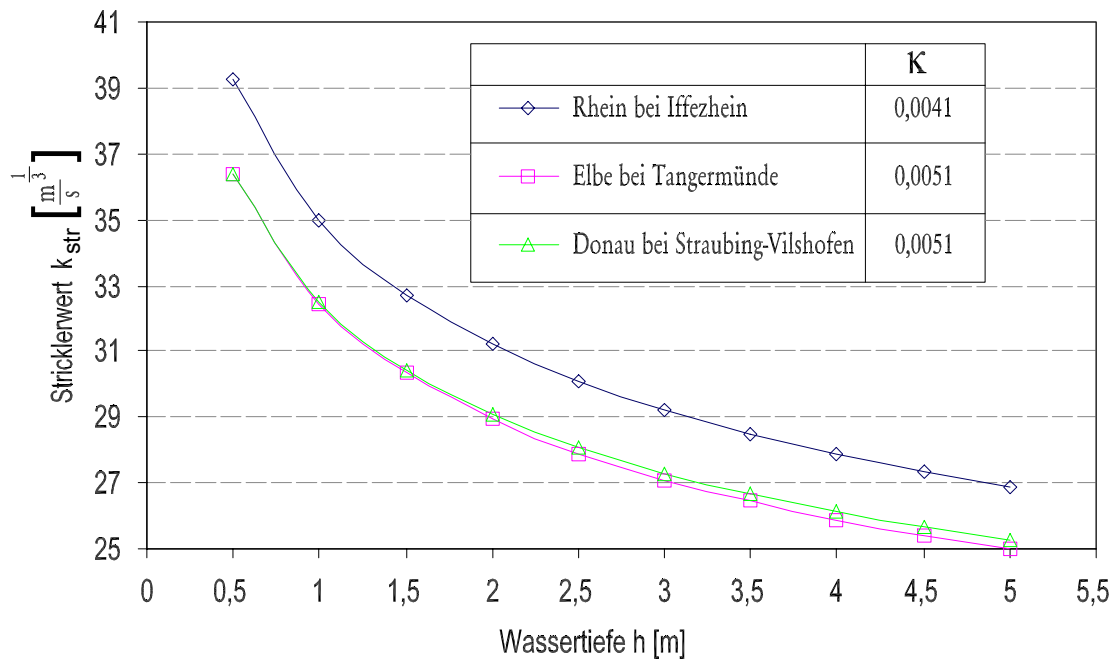
Die äquivalente Sandrauheitshöhe ist unter der Voraussetzung eines vollturbulenten Strömungsverhaltens wie folgt definiert:

$$k_{\text{ss}} = 3.71 D f_m 10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} \quad \text{Gleichung 7-5}$$

Einsetzen von Gleichung 7-5 und Gleichung 6-18 in Gleichung 7-4 ergibt:

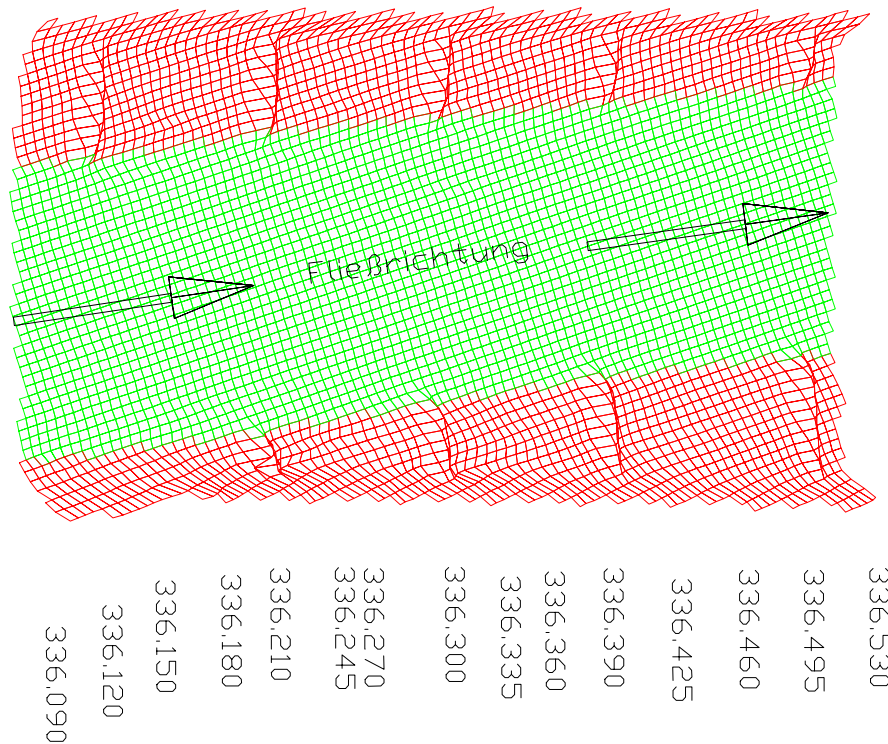
$$k_{\text{str}} = \frac{4.71 \cdot 1.049^{\frac{1}{\sqrt{\kappa}}} \sqrt{2g}}{D^{1/6}} \quad \text{Gleichung 7-6}$$

Unter der Verwendung von Gleichung 7-6 kann ein wassertiefenabhängiger Stricklerbeiwert zur Simulation von Bühnenbauwerken in CARIMA oder anderen HN-Modellen vorgegeben werden. Die Abbildung 7-4 zeigt die unter Zugrundelegung der o.a. Überlegungen abgeleiteten Funktionen des Stricklerbeiwertes für nichtüberströmte Bühnen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für drei Ausbauzustände in Donau (in Planung), Elbe und Rhein. Die  $\kappa$ -Werte wurden aus Abbildung 6-17 entnommen.



**Abbildung 7-4:** Umsetzung des Widerstandsbeiwertes  $\kappa$  in einen Stricklerbeiwert für nichtüberströmte Buhnen zum Einsatz in CARIMA bzw. anderen HN-Modellen

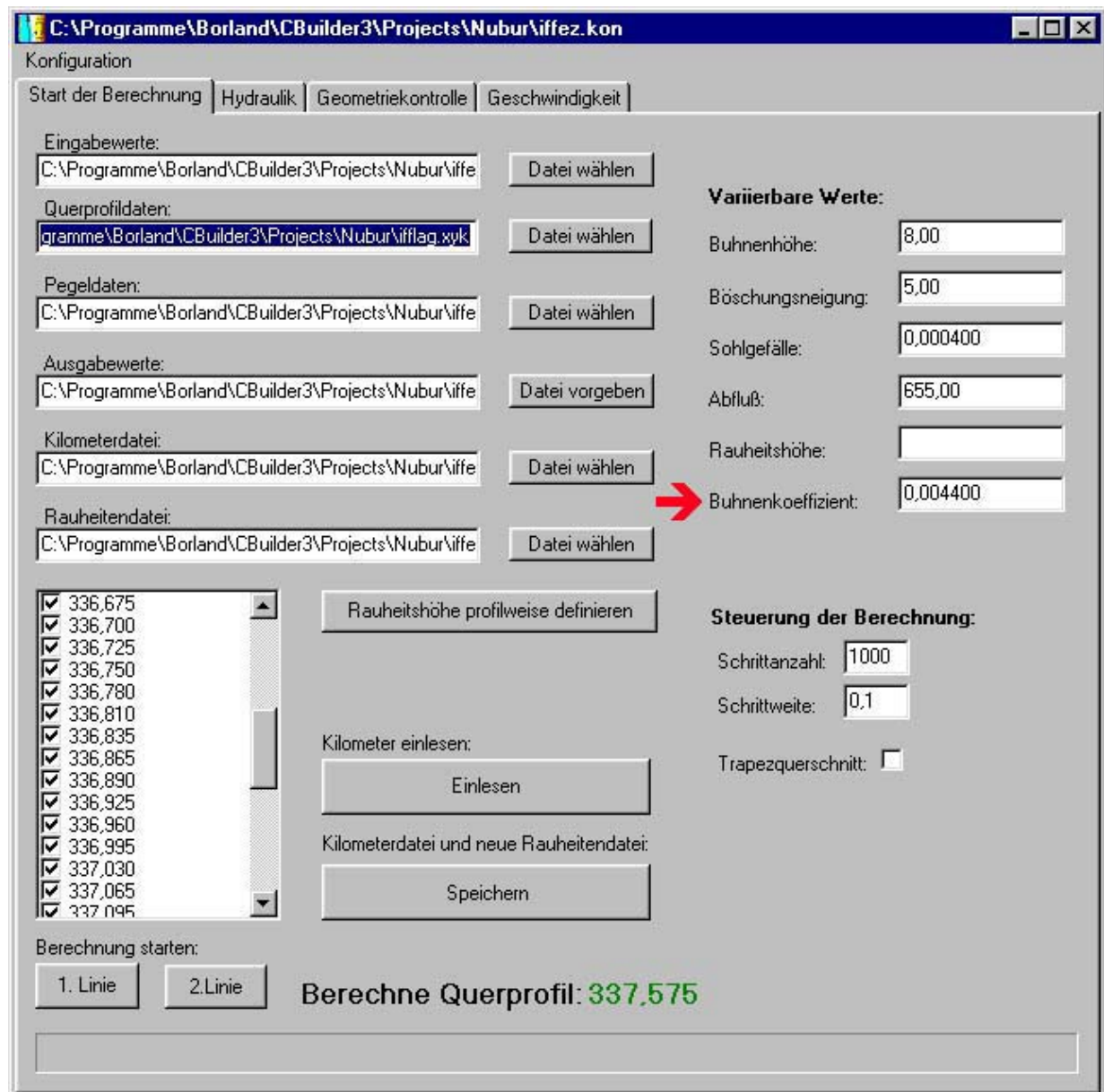
Trotz der unterschiedlichen Einschränkungsmäße verlaufen die Funktionen für Donau und Elbe fast deckungsgleich, während die Buhnenwirkung im Rhein demgegenüber geringer ausfällt. Der Einsatz dieser Widerstandsbeiwerte in 2D-HN-Modellen wie z.B. hydro2de (Beffa, 1997) ist möglich. Hier können diese, ähnlich wie bei der Berücksichtigung von Vegetation, in einer sogenannten Stricklerwertematrix vorgegeben werden. Der meist sehr große Aufwand zur Integration der Bauwerke in das Geländemodell kann damit entfallen. Die Abbildung 7-5 zeigt ein Berechnungsgitter für einen ca. 500 Meter langen Flußabschnitt des Rheins unterstrom der Staustufe Iffezheim mit rot markierten Buhnenbereichen, denen der Widerstandsbeiwert abflußabhängig zugeordnet wurde.



**Abbildung 7-5:** Zuordnung von Widerstandsbeiwerten für Buhnen (rot) und Sohle (grün) an ein Berechnungsgitter für das 2D-HN-Modell hydro2de am Beispiel eines Flußabschnitts des Rheins bei Iffezheim

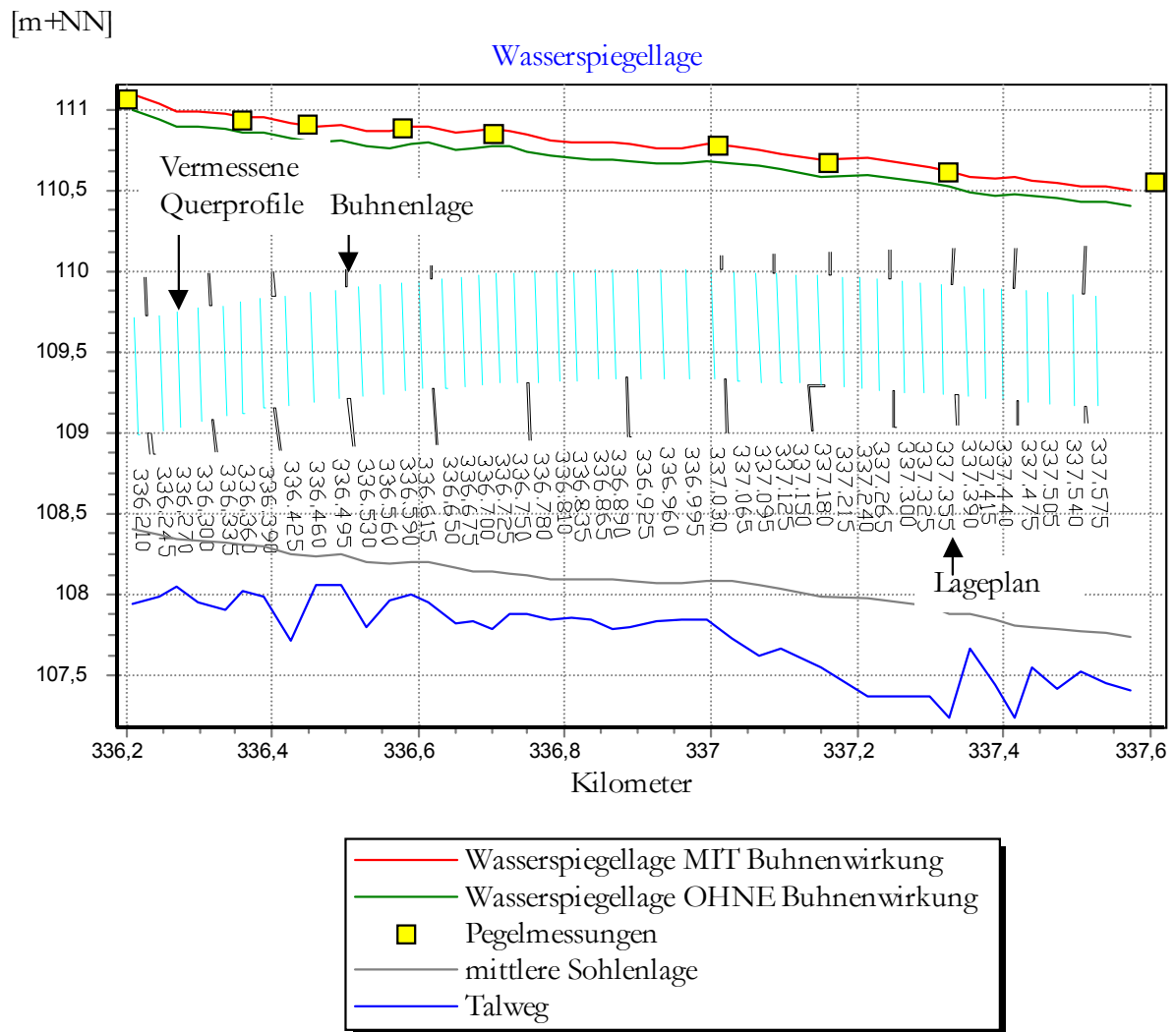
### 7.2.1 Das Programm BuSim (Berechnung des Rheins bei Iffezheim)

Für eine praxisorientierte Anwendung des RÜ-Verfahrens wurde im Rahmen dieser Arbeit das Programm BuSim (Ritzert, 1999) entwickelt. Dieses Programm basiert auf dem in Abbildung 7-3 gezeigten Ablaufschema. Zur Bestimmung der Wasserspiegellage und Fließgeschwindigkeit im „großen Fluß“ wurde in das Programm ein Berechnungsverfahren implementiert, das auf der Grundlage von Naturvermessungen beruht (Göbel, 1981). Dieses ermöglicht die Berechnung von Strömungsgrößen in Fließgewässern bei leicht ungleichförmigem Abfluß und basiert auf der Grundlage von vermessenen Querschnitten. Die Abbildung 7-6 zeigt die Benutzeroberfläche des Programms. Der rote Pfeil markiert die Eingabemaske für den Buhnenkoeffizient  $\kappa$ . Die Sohlrauheitshöhen ( $k_{ss}$ -Werte) können sowohl global, als auch für jeden Querschnitt einzeln vorgegeben werden.



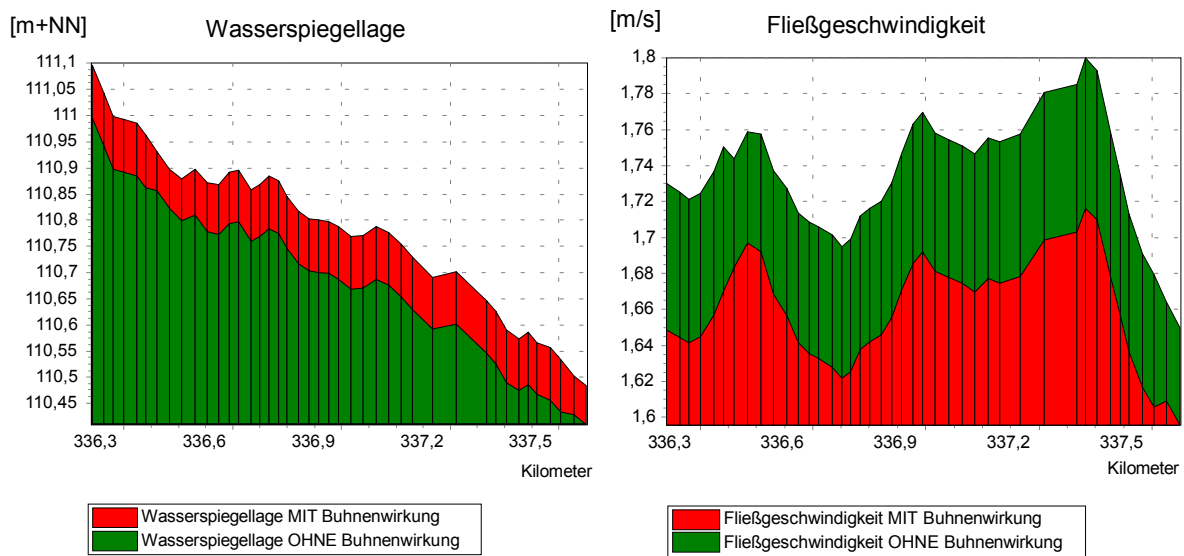
**Abbildung 7-6:** Die Eingabemaske des Programmes BuSim (Ritzert, 1999)

Die Abbildung 7-7 zeigt das Resultat einer Berechnung mit dem Programm BuSim für eine ca. 1,3 Km lange Rheinstrecke unterstrom der Staustufe Iffezheim.



**Abbildung 7-7:** Grafische Ausgabe des Programms BuSim zur Darstellung der Berechnungsergebnisse am Beispiel der Rheinstrecke bei Iffezheim

Gut zu erkennen ist die Übereinstimmung der Pegelmessungen mit der berechneten Wasserspiegellage. Das Programm BuSim ermöglicht die Bestimmung der Buhnenwirkung für Naturverhältnisse. Hierfür wird der Widerstandskoeffizient  $\kappa$  zu Null gesetzt (Parallelwerkssimulation oder vollständig verlandete Buhnenfelder) und die Berechnung neu gestartet. Die Visualisierungseinheit des Programmes ermöglicht die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse Wasserspiegellage und Fließgeschwindigkeit unter der Vorgabe unterschiedlicher Widerstandskoeffizienten (vgl. Abbildung 7-8).



**Abbildung 7-8:** Mit dem Programm BuSim berechnete Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in der Rheinstrecke bei Iffezheim

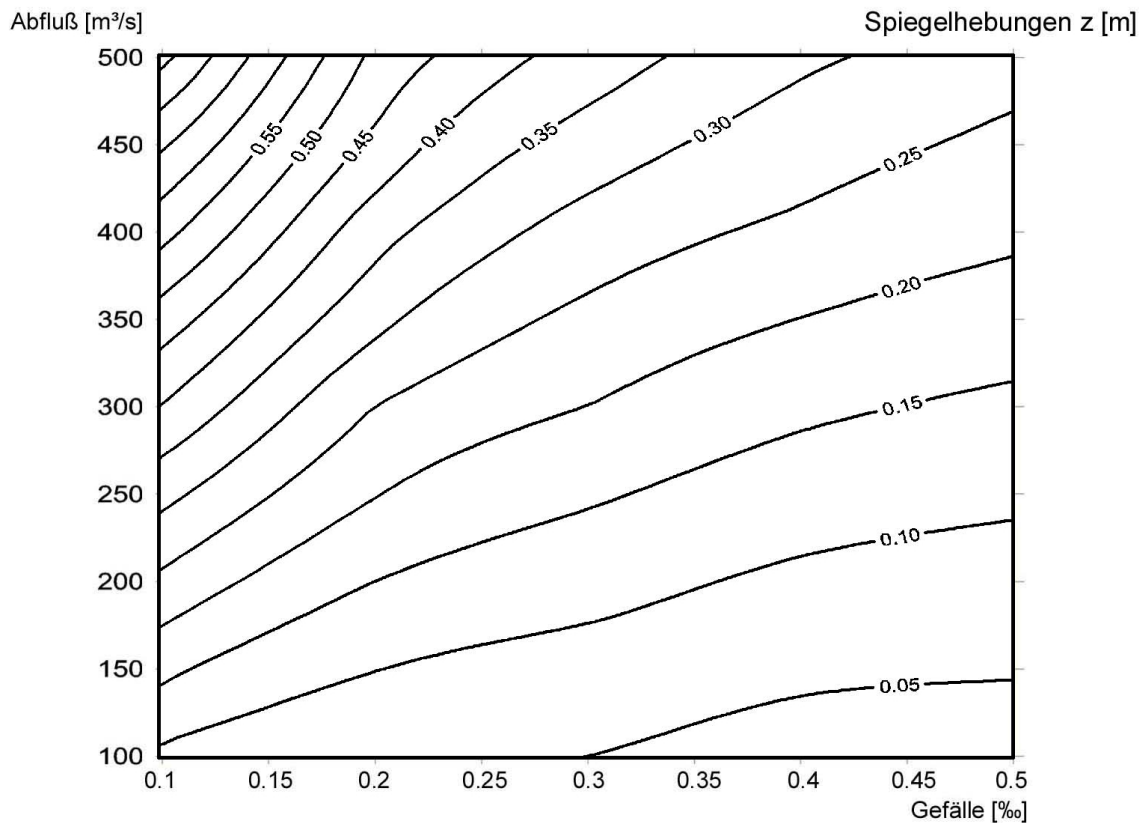
Die Differenz zwischen den beiden Berechnungsergebnissen kann als die Buhnenwirkung interpretiert werden. Der Wasserspiegel wird angehoben, die Fließgeschwindigkeit wird abgesenkt. Das Programm BuSim quantifiziert diese Veränderungen. Für den Fall der Rheinstrecke bei Iffezheim bedeutet dies ca. 10 cm Anhebung der Wasserspiegellage und ca. 0,08 m/s Verringerung der Fließgeschwindigkeit.

### 7.2.2 Parametervariation mit dem Programm BuSim und Vergleich mit den Ergebnissen von Ogris

Zur weiteren Validierung der Berechnungsergebnisse des Programmes BuSim wurden Vergleichsrechnungen auf der Grundlage von hydraulischen Randbedingungen durchgeführt, die im Rahmen der Modellversuche von Ogris (vgl. Tabelle 5-3) für Donauverhältnisse vorgegeben wurden. Die Abbildung 7-9 zeigt Isolinienverläufe der Spiegelhebungen  $z$ , die in Abhängigkeit des Gefälles sowie des Abflusses bei einem konstanten Sohlwiderstand für einen Trapezquerschnitt mit BuSim berechnet wurden. Der Widerstandskoeffizient  $\kappa$  wurde hierbei aus dem Diagramm nach Abbildung 6-17 für den Fall eines Buhnenabstandes von 100 Metern abgelesen. Für den Vergleich herangezogen wurde der Fall einer geplanten



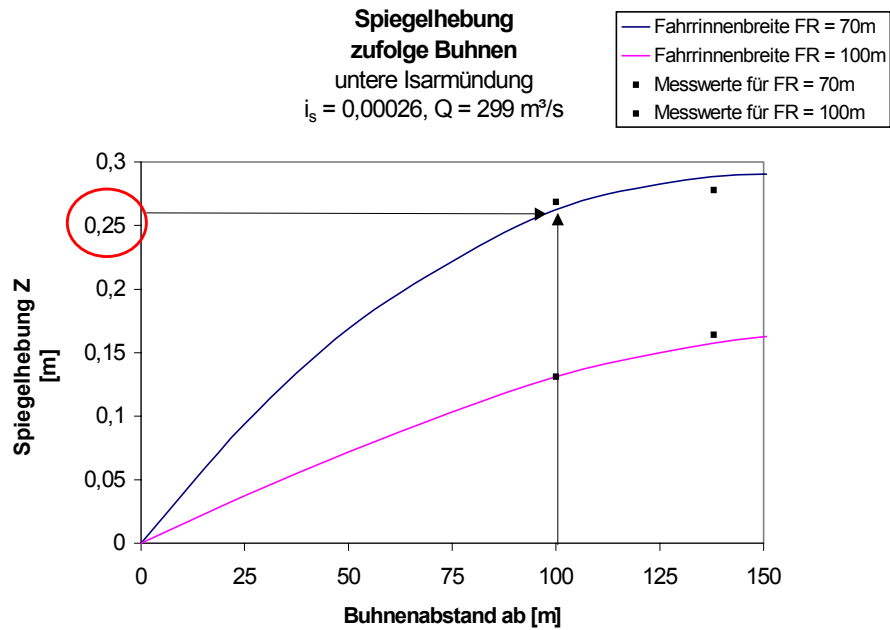
Fahrrinnenweite für die Donau von 70 Metern, entsprechend einem Einschränkungmaß von  $b_f/b_g = 0,4$ . Für diesen Fall beträgt der Koeffizient  $\kappa = 0,005$ .



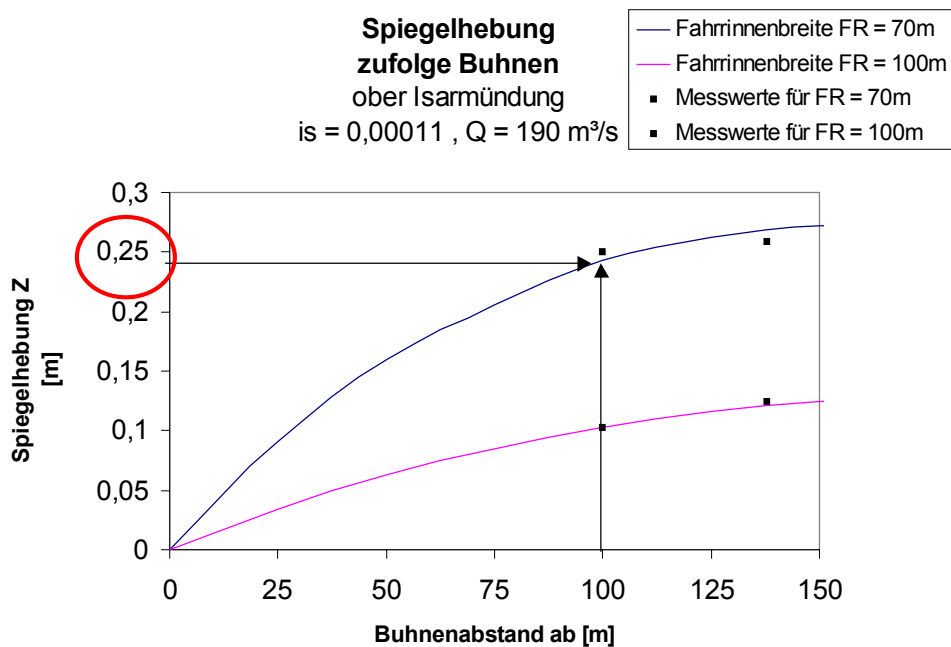
**Abbildung 7-9:** Isolinien der Spiegelhebungen  $z$  bei einem Einschränkungmaß von 0,4 (Fahrrinnenweite = 70 m) für einen geplanten Ausbauzustand der Donau mit Buhnen (Buhnenabstand = 100 m)

Das Diagramm zeigt, daß der Spiegelhebungswert  $z$  für die Donau oberstrom und unterstrom der Isar nahezu unverändert bleibt. Dieses Verhalten ist auf die Zunahme des Abflusses durch den Isarzufluß bedingt und wird durch den im Programm BuSim verwendeten RÜ-Ansatz richtig wiedergegeben.

Vergleicht man die mit dem Programm BuSim berechneten Werte ( $z = 0,23$  m) mit den Grafiken zum Spiegelhebungswert  $z$  nach Ogris (vgl. Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11) so ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Die etwas größeren Werte von Ogris ( $z = 0,25$  m) sind auf die im Modellversuch verwendeten scheibenförmigen Plexiglasbuhnen zurückzuführen, die einen höheren Widerstand erzeugen als geböschte Buhnen.



**Abbildung 7-10:** Aus Modellversuchen nach Ogris abgeleitete Spiegelhebungswerte  $z$  für zwei geplante Ausbauzustände (Fahrinnenweite 70 m und 100 m) der Donau mit Buhnen unterstrom der Isarmündung



**Abbildung 7-11:** Aus Modellversuchen nach Ogris abgeleitete Spiegelhebungswerte  $z$  für zwei geplante Ausbauzustände (Fahrinnenweite 70 m und 100 m) der Donau mit Buhnen oberstrom der Isarmündung

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde ein Computerprogramm entwickelt, das auf der Basis des Einstein'schen Rauheitenüberlagerungsverfahrens für eine Quantifizierung der hydraulischen Wirkung von den in ein Fließgewässer eingebauten Buhnen eingesetzt werden kann. Die diesem Programm vorzugebenden Eichparameter wurden zum einen durch eine Literaturrecherche und zum anderen aus Modellversuchen ermittelt.

Die Literaturrecherche führte zu verwertbaren Ergebnissen. Insbesondere validierte die Übertragung von Widerstandsbeiwerten, die für Rohrblenden ermittelt wurden, die Anwendung des RÜ-Verfahrens auf die Regelungsbauwerke Buhnen. Die in der Literatur oft zu findende additive Überlagerung von Widerstandsbeiwerten führte zu keinem brauchbaren Ergebnis, weil das Nebeneinanderwirken der Widerstände von Sohle und Regelungsbauwerken hierbei nicht berücksichtigt wird. In dieser Arbeit wurde durch eine Analyse der Einstein'schen Gleichungen gezeigt, warum und wie durch das RÜ-Verfahren dieses Nebeneinanderwirken der Widerstände (Parallelschaltung) berücksichtigt wird. Aus diesem Grund wurden die Ansätze nach Einstein zur Gewinnung von Widerstandsbeiwerten für Buhnen aus Modellversuchen eingesetzt. Die von Einstein verwendete Geschwindigkeitsformel nach Strickler wurde durch die Formel nach Darcy-Weisbach ersetzt, die physikalisch besser begründet ist. Diese Vorgehensweise bot den Vorteil, daß für eine Quantifizierung der Sohrrauheitswirkung die Prandtl-Colebrook-Gleichung verwendet werden konnte.

Die im Rahmen eines Modellversuchs der BAW zu nichtüberströmten Buhnen aufgezeichneten Isotachenverläufe wurden zur Validierung des „Kriteriums der Schubspannungsfreiheit“ nach Einstein eingesetzt. Die gute Übereinstimmung der mit dem RÜ-Verfahren ermittelten Teilabflußflächen mit den Meßergebnissen zeigt, daß es auch im Falle von Regelungsbauwerken physikalisch sinnvoll ist, einen Schnitt, der vertikal zu den Isotachen verläuft und damit schubspannungsfrei ist, zur Bestimmung der den einzelnen Rauheiten zuzuordnenden Abflußflächen zu führen. Es konnte gezeigt werden, daß unter dieser Bedingung die Annahme einer gleich großen mittleren Geschwindigkeit in den Teilabflußflächen richtig ist.

Zwei Modellversuche, die in der Vergangenheit zu den Regelungsbauwerken Buhnen durchgeführt worden sind, wurden im Hinblick auf den Einsatz der Berechnungsansätze

und zur Validierung des RÜ-Verfahrens ausgewertet. Zu diesem Zweck wurden Teile aus der jeweiligen Modellversuchsdokumentation zitiert und die dort verwendeten Parameter und Konventionen im Zusammenspiel mit einer Dimensionsanalyse mit den eigenen Berechnungen in Übereinstimmung gebracht. Die Dimensionsanalyse wurde zur Festlegung der wesentlichen geometrischen und hydraulischen Verhältnisgrößen für die Regelungsbauwerke Buhnen eingesetzt. Die hier gefundenen dimensionslosen Verhältniszahlen wurden interpretiert und in einen Zusammenhang mit der RÜ-Methode gebracht. Hierbei zeigte sich, daß die Trennung der Widerstandswirkungen nach der RÜ-Methode von großem Vorteil bei der Übertragung der Widerstandszahlen auf Naturverhältnisse ist. So muß die Reynolds'sche Ähnlichkeit bei Anwendung des RÜ-Verfahrens nicht berücksichtigt werden, d.h. die Naturverhältnisse müssen bezüglich der Sohlrauheitsverhältnisse in keinem Bezug zu dem für eine Berechnung zugrundeliegenden Modellversuch stehen.

Zur weiteren Absicherung der RÜ-Methode wurden das Prandtl'sche Freistrahlm- und das Prandtl'sche Mischungsweglängenmodell eingesetzt. Dies mit dem Ziel, mit beiden Modellen einen Widerstandsbeiwert aus einem horizontal vermessenen Geschwindigkeitsabfall in ein Buhnenfeld zu bestimmen und diesen mit dem nach der RÜ-Methode errechneten Wert zu vergleichen. Der Bestimmung des Widerstandsbeiwertes mit der RÜ-Methode liegt eine Abflußmessung zugrunde, während zur Auswertung mit den beiden Modellen nach Prandtl eine Geschwindigkeitsmessung eingesetzt wird. Es ergab sich trotz dieser unterschiedlichen Auswertungsverfahren eine gute Übereinstimmung der Werte und damit ein weiterer Beweis für die Richtigkeit der Anwendung der RÜ-Methode auf die Regelungsbauwerke Buhnen.

Damit ist die Grundlage für Prognosen der hydraulischen Wirkung von Regelungsbauwerken, basierend auf dem RÜ-Verfahren, geschaffen. Insbesondere ist es mit diesem Verfahren möglich, Modellversuche, die in der Vergangenheit zum Thema Regelungsbauwerke durchgeführt worden sind, zur Lösung eines heute aktuellen Problems neu auszuwerten. Das in dieser Arbeit entwickelte Computerprogramm BuSim ist in der Lage, unter Vorgabe der Randbedingungen aus dem Modellversuch, genaue Prognoserechnungen zu hydraulischen Wirkungen von Regelungsbauwerken durchzuführen. Eine Weiterentwicklung des Programms zur Berücksichtigung der Regelungsbauwerke Grundschwellen ist vorgesehen.

**Abramovich, G.N.:** *Theory of turbulent Jets*. Fizmatgiz, Moscow, 715 p., 1960.

**Beffa, C.:** *Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen*, Dissertation, ETH Zürich, Nr. 10870, 1994.

**Beffa, C.:** *Hydro 2de - Benutzerhandbuch*, <http://www.fluvial.ch/>, 1997.

**Belleudy, Ph.; Cunge, J.A. and Rahuel, J.L.:** Mathematical modelling software for river management: CARIMA and CONDOR systems. Adv. eng. Software, Vol. 8, No. 1, 1986.

**Bertram, H.-U.:** *Über den Abfluß in Trapezgerinnen mit extremer Böschungsrauhheit*. Mitteilungen des Leichtweiss-Institutes für Wasserbau, TU Braunschweig, Heft 86/1985.

**Cidarer, K.:** *Einfluß von seitlichen Profileinengungen (Brückenwiderlagern) auf den Abflußvorgang in Wasserläufen*. (Mitt. Nr. 53, Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig), 1976.

**DVWK-Merkblätter 220:** *Hydraulische Berechnung von Fließgewässern*. Parey, 1991.

**Einstein, H.A.:** *Der hydraulische oder Profil-Radius*. Schweizerische Bauzeitung, Band 103, 1934.

**Felkel, K.:** *Modellversuche mit Buhnen in einer Rinne mit fester Sohle*. BAW Karlsruhe, Januar 1975.

**Förthmann, E.:** *Turbulent jet expansion*. English translation N.A.C.A. TM-789 (Original paper in German, 1934. Ing. Archiv., 5.), 1936.

**Göbel, N.:** *Programmbeschreibung Modell Level5s*. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Uni Karlsruhe, 1981.

**Hughes, W.F., Brighton J.A.:** *Fluid Dynamics*, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, 1967.

**Idelchik, I.E.:** *Handbook of hydraulic resistance*. Second Edition, Springer, Berlin, 1986.

**Idelchik, I.E.:** *Toward calculation of labyrinth seals*. Kotloturbostroenie, no. 3, 40-45, 1953.

**Indlekofer, H.:** *Überlagerung von Rauigkeitseinflüssen beim Abfluß in offenen Gerinnen.* Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, TH Aachen Nr. 37, 1981.

**Kindsvater, C. E.; Carter, R.W.:** *Tranquil flow through open-channel constructions.* American society of civil engineers, transactions, No. 2770, 1955.

**Kollmann, W.:** *Prediction Methods for Turbulent Flows.* A von Karman Institute Book, McGraw-Hill, 1972.

**Lauder, B. E., Spalding, D. B.:** *Mathematical Models of Turbulence.* Academic Press London and New York, 1972.

**Lugt, H.J.:** *Wirbelströmung in Natur und Technik.* G. Braun Karlsruhe, 1979.

**MathSoft, Inc.:** *Mathcad7.* 101 Main Street Cambridge, MA 02142-1521, USA, 1997.

**Microcal Software Inc.:** *Origin R5.* One Roundhouse Plaza, Northampton, MA 01060, USA, 1997.

**Miller, D.S.:** *Internal Flow Systems.* BHRA Fluid Engineering, ISBN 0900983787, 1978.

**Naudascher, E.:** *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke.* 2., verb. Aufl. – Wien; New York, Springer, 1992.

**Neger, R.:** *Die Entwicklung des Bühnenbaues in den deutschen Stromgebieten.* Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1932.

**Nestmann, F., Ritzert, F.:** *Influence of silted groynefields on waterlevel development instancing the Elbe River (Elbe-Germany), XXVIII IAHR Congress, 1999.*

**Nestmann, F., Kemnitz, B. BAW:** *Regelungsmaßnahmen in der Rheinstrecke Bonn-Beuel.* Rhein-km 651-658, auf der Grundlage hydraulischer und aerodynamischer Modellversuche", BAW-Gutachten Nr.: 35110, Karlsruhe, April 1987.

**Nestmann, F.:** *Strömungsmechanische Grundlagen über Bühnenfeldströmungen unter Einbeziehung der Schiffahrt.* BAW-Nr. 8736160, unveröff., Karlsruhe, 1991.

**Nikuradse, I.:** *Laws governing turbulent flow in smooth tubes.* in Probl. Turbulentnosti, edited by M. A. Velikanov and N.G. Shveikovsky, pp. 75-150, ONTI Press, 1936.

**Ogris, H.:** *Bundeswasserstraße Donau, Ausbau Straubing-Vilsbafen, Flußbauliche Alternative.* Gutachten Teil 1, unveröff., Wien, 1994.

**Prandtl, L.:** *Führer durch die Strömungslehre,* Vieweg-Verlag, 1942.

**Rajaratnam, N.:** *Turbulent Jets (Developments in Water science).* Elsevier scientific publishing company, Amsterdam-Oxford-New York, 1976.

**Ritzert, F., Söhngen, B., Nestmann, F.:** *Niedrigwasseraufhebende Wirkung von Buhnen bei fester Sohle.* HTG-Jahrbuch, Hamburg, 1997.

**Ritzert, F., Nestmann, F.:** *Differenzierung von Widerstandseinflüssen zur Ableitung von Koeffizienten aus experimentellen Versuchen mit Buhnen und Grundschwelen.* Versuchsbericht, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Uni Karlsruhe, 1996.

**Ritzert, F.:** *Das Programm BuSim.* Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Uni Karlsruhe, 1999.

**Rehbock, Th.:** *Betrachtungen über Abfluss, Stau und Walzenbildung bei fließenden Gewässern.* Festschrift der TH Karlsruhe zur Feier des 60.ten Geburtstags seiner königlichen Hoheit des Großherzogs Friedrichs II von Baden, Berlin 1917 bei Julius Springer.

**Rodi, W.:** *Turbulence Models and their Application in Hydraulics.* SFB80/T/127, UNI Karlsruhe, 1980.

**Rouse, H.:** *Elementary mechanics of fluids.* John Wiley and Sons, New York, 1946.

**Rouse, H.:** *Elementary Mechanics of Fluids.* John Wiley and Sons, Inc., 11<sup>th</sup> Printing, New York, 1957.

**Scheuer, L.:** *Experimentelle Untersuchung des Rauigkeitsüberlagerungsproblems unter Anwendung des Isotachenplanes.* Diplomarbeit, Institut für Wasserbau, RWTH Aachen, 1981.

**Schöberl, F.:** *Stabilisierungsmaßnahmen im Gerinnebett – Einsatz und Dimensionierung*. Universität Innsbruck, 1990.

**Schröder / Press:** *Hydromechanik im Wasserbau*. Verlag von Wilhelm Ernst + Sohn, Berlin-München, 1966.

**Söhngen, B.:** *Das Formbeiwertkonzept zur Berechnung des Fließwiderstandes in Rohren und Gerinnen*. Dissertation, TH Darmstadt, 1987.

**Spannring, M.:** *Die Wirkung von Buhnen auf Strömung und Sohle eines Fließgewässers*. Dissertation, TU München, Nr. 86, 1999.

**Ven te Chow:** *Open Channel Hydraulics*. Mc. Graw-Hill Book Company, Inc., 1959.

**Weber, M., Roth, M., Hermann, F.:** *Der Einfluss von Buhnen auf die Hydraulik, die Flussmorphologie und den Geschiebetransport*. Wasser, Energie, Luft, 92. Jahrgang, Heft 5/6, CH-5401 Baden, 2000.

**Winkel R.:** *Die Buhnenwirkung*. Die Bautechnik, 6. Jahrgang, Berlin 1927.

**Zierrep, J.:** *Grundlagen der Strömungslehre*. G. Braun, Karlsruhe, 1982.

**Zierrep, J.:** *Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln der Strömungslehre*. G. Braun, Karlsruhe, 1991.



---

1-1:	Verlauf von alten Bewässerungskanälen im Bereich des Euphrat bei Uruk, rekonstruiert nach LANDSAT-Aufnahmen	1
1-2:	Schottisches Kreuz mit Spirale als Symbol des Lebens (aus Mackenzie, 1970)	3
1-3:	Blockdiagramm zum Inhalt der Arbeit	5
2-1:	Gegenüberstellung der Versuchsquerschnitte mit eingebauten Bühnen (oben) und eingebautem Parallelwerk nach Ogris (1994)	9
2-2:	Gegenüberstellung der berechneten Wasserspiegelentwicklung im Ist-Zustand mit Bühnen und in einem fiktiven Ausbau mit Parallelwerken am Elbe-km 372,4-372,7 (Nestmann, Ritzert, 1999)	11
3-1:	Klassifizierung zur Gesamthöhe des Verlustes bei typischen Rückströmzonenbildungen (Sicht von oben), wie sie bei einer Regelung mit flußbaulichen Mitteln (z.B. Bühnen) entstehen (aus Miller, 1978)	14
3-2:	Wirbelausbildungen im Modellversuch in Abhängigkeit von der Zeit visualisiert (rot); Schwingungen des Stromstrichs um die Mittelachse bei sehr groß gewählten Bühnenabständen (Felkel, 1975)	15
3-3:	Wirbelausbildungen im Modellversuch in Abhängigkeit von der Zeit visualisiert (rot); Bei Bühnenabständen die das Dreifache der Bühnenlänge betragen ergeben sich weitgehend keine Instabilitäten des Stromstrichs mehr (Felkel, 1975)	16
3-4:	Wirbelausbildungen im Modellversuch in Abhängigkeit von der Zeit visualisiert; Bei Bühnenlängen zu Abstandsverhältnissen von 1:1 sind Wirbel und damit der Stromstrich vollkommen stabil (Felkel, 1975)	16
3-5:	Umströmung eines Einschränkungsbauwerks (aus Schöberl, 1990)	20
3-6:	Draufsicht und Seitenansicht eines Einschränkungsbauwerks, mit qualitativen Angaben über Strömungsausbildung und Parameterwahl (Cidarer, 1976)	20
3-7:	Ablaufschema zum Vergleich von $\zeta$ -Widerstandsbeiwerten aus der Literatur mit $\lambda$ -Widerstandsbeiwerten, die aus Modellversuchen ermittelt wurden; Einschränkungsbauwerk	21
3-8:	Abhängigkeit des $\zeta$ -Wertes vom Einschränkungsmaß und der Anströmgeschwindigkeit bei Blenden in Rohren (Kindsvater, 1955; abgebildet in Miller, 1978)	22
3-9:	Gegenüberstellung von recherchierten und in $\lambda$ -Werte konvertierten $\zeta$ -Werten aus der Literatur mit berechneten $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen; Einschränkungsbauwerk	23
3-10:	Fließzustand in einem Labyrinth (Idelchik, 1986); die Darstellung anhand der Zelle eines einzelnen Labyrinths (a) kann mit der Visualisierung des Strömungszustandes in einem einzelnen Bühnenfeld (b) verglichen werden	25

---

3-11:	Skizze zur Definition des Winkels $\alpha$ bei Strahlablösung in Labyrinthströmungen nach Abramovich (1960)	25
3-12:	Ablaufschema zum Vergleich von $\zeta$ -Widerstandsbeiwerten aus der Literatur mit $\lambda$ -Widerstandsbeiwerten, die aus Modellversuchen ermittelt wurden; Labyrinthdichtung	27
3-13:	Gegenüberstellung von recherchierten und in $\lambda$ -Werte konvertierten $\zeta$ -Werten aus der Literatur mit berechneten $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen; Labyrinthdichtungen	28
3-14:	Verhältnis von Reibungs- zu Formwiderstand bei unterschiedlichen Anströmbedingungen	30
3-15:	$c_w$ -Werte für ein Einschränkungsbauwerk in Abhängigkeit von verschiedenen Bauwerksformen (Cidarar, 1977; entnommen aus Schöberl, 1990)	31
3-16:	Gegenüberstellung von recherchierten und in $\lambda$ -Werte konvertierten $c_w$ -Werten aus der Literatur mit berechneten $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen	32
3-17:	Widerstandsbeiwert $C'$ für ein Einschränkungsbauwerk (aus Ven Te Chow, 1959)	34
3-18:	Korrekturkoeffizient zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der Einbaulage eines Einschränkungsbauwerks in Bezug zur Hauptströmungsrichtung (aus Ven Te Chow, 1959)	35
3-19:	Gegenüberstellung von recherchierten und in $\lambda$ -Werte konvertierten $\zeta$ -Werten aus der Literatur mit berechneten $\lambda$ -Werten aus Modellversuchen; Einschränkungsbauwerk, Beiwert $C$	36
4-1:	Charakteristische horizontale Verteilung der Fließgeschwindigkeiten bei Bühnenverbauungen (links) und Längsverbauungen (Weber et. al., 2000)	39
4-2:	Modellvorstellung zur Trennung der Rauheitswirkungen bei Bühnen; vertikale Trennfläche (rot), in der Scheinschubspannungen (blaue Pfeile) angenommen werden	43
4-3:	Schemaskizze zur Herleitung der Gleichgewichtsbedingung nach Darcy-Weisbach im Zusammenhang mit Bühnenbauwerken	45
4-4:	Trennung des abflußwirksamen Bereichs zwischen Bühnenbauwerken nach dem Kriterium der Schubspannungsfreiheit von Einstein in Flächenanteile, die den Widerstandseinflüssen von Bühnen und Sohle zugeordnet werden (10-fach überhöht dargestellt; Felkel, 1975)	48
4-5:	Schemaskizze zur Verdeutlichung der Parameterzuordnung bei einem Berechnungsfall mit zwei über einen Fließgewässerquerschnitt verteilten ungleichen Betrauheiten	49

---

4-6:	Verschiebung des Geschwindigkeitsmaximums (Aufdickung der Grenzschicht) aufgrund von unterschiedlichen Wandrauheiten im Fließquerschnitt (aus Söhngen, 1987)	50
4-7:	Geschwindigkeitsabhängige Flächenanteile für den nach Bühnen- und Sohlenteil differenzierten Abflußbereich	51
5-1:	Versuchsstand der BAW mit eingebauten Modellbühnen	53
5-2:	Grundriß der Versuchsrinne mit Bühnen und Anordnung von Spitzentastern zur Vermessung der Wasserspiegellagen	53
5-3:	Vermessene Wasserspiegellage (rote Punkte) im Modellversuch der BAW sowie Auswertungsergebnisse, die mit dem RÜ-Ansatz gewonnen wurden	55
5-4:	Linien gleicher Fließgeschwindigkeiten (Isotachen) und die örtlichen Strömungsrichtungen in Rinnenquerschnitten (Felkel, 1976)	56
5-5:	Isotachen zur Darstellung der Verteilung der Fließgeschwindigkeiten in Horizontalschnitten (Felkel, 1976)	57
5-6:	Gesamtanordnung der Versuchsanlage zur Untersuchung der spiegelhebenden Wirkung von Bühnen (Ogris, 1994)	58
5-7:	Querschnitt durch die Versuchsrinne mit den Bezeichnungen der Geometrieparameter nach Ogris (1994)	59
5-8:	Spiegelhebungswerte $z$ aufgrund der Bühnenwirkung in Abhängigkeit von der Verbauung aufgetragen (aus Ogris, 1994)	60
6-1:	Darstellung der relevanten geometrischen Parameter bei einer Regelung mit Bühnenbauwerken	62
6-2:	Mit dem Programm BuSim (Ritzert, 1999) berechnete Wasserspiegellage, Pegelmessungen und mittlere Sohlage für einen Rheinabschnitt unterstrom der Staustufe Iffezheim	66
6-3:	Vergleich der berechneten Widerstandskoeffizienten für Regelungsbauwerke mit drei unterschiedlichen Methoden	68
6-4:	Qualitative horizontale Geschwindigkeitsprofile bei nichtüberströmten Bühnen (blau) mit eingezeichneten Scheideflächen (rot)	68
6-5:	Prinzipskizze zur Darstellung von Rückströmgebieten in Bühnenfeldern in Abhängigkeit der relativen Bühnenfeldgröße $l_b/h$ (Nestmann, 1987)	70
6-6:	Schema zur Bestimmung eines Widerstandsbeiwertes für Regelungsbauwerke	71
6-7:	Ausgleichsgerade (schwarz) für die $k_{ss}$ -Werte der Versuchsreihe 1	73
6-8:	Ausgleichsgerade (schwarz) für die $k_{ss}$ -Werte der Versuchsreihen 2-5	74
6-9:	Schemaskizze zur Definition der benetzten Umfänge bei der Anwendung der RÜ auf nichtüberströmte Bühnen	76
6-10:	Herleitung von Prandtl's Schubspannungsansatz für die freie Turbulenz, angewendet auf das Beispiel von nichtüberströmten Bühnen	77

6-11:	$\kappa$ -Werte aus den Versuchsreihen der BAW-Modellversuche mit scheibenförmigen Buhnen (Ritzert et. al., 1996)	80
6-12:	$\kappa$ -Werte aus den Versuchsreihen der BAW-Modellversuche mit geböschten Buhnen (Ritzert et. al., 1996)	80
6-13:	Zwei unterschiedliche Einschränkungsverhältnisse bei den Modellversuchen der BAW mit geböschten Buhnen; links in der Natur häufig zu findendes Einschränkungmaß, rechts eine extreme Einschränkung als Sonderfall	81
6-14:	Abhängigkeit des Buhnenwiderstandsbeiwertes $\kappa$ vom Abstands- zu Längenverhältnis; grün umrandet dargestellt sind Strömungsvisualisierungen der jeweiligen Versuchskonstellation	83
6-15:	Abhängigkeit des Buhnenwiderstandsbeiwertes $\kappa$ vom Abstands- zu Längenverhältnis sowie von der Anström- bzw. Überströmhöhe bei einem konstanten Einschränkungmaß von 0,5 (Versuchsreihe 4)	83
6-16:	Abhängigkeit des Buhnenwiderstandsbeiwertes $\kappa$ vom Abstands- zu Längenverhältnis sowie von der Anström- bzw. Überströmhöhe bei einem konstanten Einschränkungmaß von 0,3 (Versuchsreihe 5)	83
6-17:	Der Widerstandsbeiwert $\kappa$ in Abhängigkeit des Abstands- zu Längenverhältnisses $a_b/l_b$ und des Einschränkungmaßes $b_f/b_g$ für den Fall nichtüberströmter Buhnen	83
6-18:	Auswertung von horizontalen Isotachenaufzeichnungen zur Bestimmung des maximalen Fehlers bei der Bestimmung eines Formwiderstandsbeiwertes für nichtüberströmte Buhnen; Trennzone (blau), Fehlerfläche (gelb), Isotachenbeschriftungen sind Geschwindigkeiten in [cm/s]	86
6-19:	Geschwindigkeitsabfall in ein Buhnenfeld, berechnet mit einem nach Pegelmessungen kalibrierten 2D-HN-Modell unterstrom der Staustufe Iffezheim	88
6-20:	Auflösung eines Strahlrandes in einen ruhenden Raum (Prandtl, 1942)	89
6-21:	Geschwindigkeitsverteilungen für den ebenen turbulenten Freistrah (aus Rajaratnam, 1976)	90
6-22:	Funktionell angepaßter Geschwindigkeitsabfall in ein Buhnenfeld (Origin, 1997)	91
6-23:	Der Geschwindigkeitsgradient $dv/dx$ als Maß für die Größe der Interaktionsschubspannung $\tau_{int}(x)$	93
6-24:	Das Maß der Interaktionsschubspannung $\tau_{int}$ in der Übergangszone $\delta$	94
6-25:	Der Verlauf von $\kappa$ in der Übergangszone $\delta$	95
6-26:	Ein mit der Mathematiksoftware Mathcad (1997) erstelltes Arbeitsblatt zur Analyse von Geschwindigkeitsübergängen nach dem Prandtl'schen Freistrahmodell	96

---

6-27:	Ein mit der Mathematiksoftware Mathcad (1997) erstelltes Arbeitsblatt zur Analyse von Geschwindigkeitsübergängen nach dem Prandtl'schen Mischungsweglängenmodell	98
6-28:	Vergleich der $\kappa$ -Werte nach dem RÜ-Ansatz nach Einstein sowie dem Prandtl'schen Freistrahlmmodell und dem Prandtl'schen Mischungsweglängenansatz	99
7-1:	Transzendenter Formelapparat, der beim Verknüpfen der Gleichungen 7-1, 7-2 und 7-3 zur Berechnung der mittleren Wassertiefe $h$ entsteht	101
7-2:	Schemaskizze zur Vorgabe von Schätzwerten und zur iterativen Berechnung der Wasserspiegellage bei nichtüberströmten Buhnen mit der RÜ-Methode	102
7-3:	Ablaufschema zur Prognose von Wasserspiegellagen bei nichtüberströmten Buhnen mit der RÜ-Methode	103
7-4:	Umsetzung des Widerstandsbeiwertes $\kappa$ in einen Stricklerbeiwert für nichtüberströmte Buhnen zum Einsatz in CARIMA bzw. anderen HN-Modellen	106
7-5:	Zuordnung von Widerstandsbeiwerten für Buhnen (rot) und Sohle (grün) an ein Berechnungsgitter für das 2D-HN-Modell hydro2de am Beispiel eines Flußabschnitts des Rheins bei Iffezheim	107
7-6:	Die Eingabemaske des Programmes BuSim (Ritzert, 1999)	108
7-7:	Grafische Ausgabe des Programms BuSim zur Darstellung der Berechnungsergebnisse am Beispiel der Rheinstrecke bei Iffezheim	109
7-8:	Mit dem Programm BuSim berechnete Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in der Rheinstrecke bei Iffezheim	110
7-9:	Isolinien der Spiegelhebungen $z$ bei einem Einschränkungmaß von 0,4 (Fahrrinnenweite = 70 m) für einen geplanten Ausbauzustand der Donau mit Buhnen (Buhnenabstand = 100 m)	111
7-10:	Aus Modellversuchen nach Ogris abgeleitete Spiegelhebungswerte $z$ für zwei geplante Ausbauzustände (Fahrrinnenweite 70 m und 100 m) der Donau mit Buhnen unterstrom der Isarmündung	112
7-11:	Aus Modellversuchen nach Ogris abgeleitete Spiegelhebungswerte $z$ für zwei geplante Ausbauzustände (Fahrrinnenweite 70 m und 100 m) der Donau mit Buhnen oberstrom der Isarmündung	112

# Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Name: Frank Karl Helmut Ritzert  
Geburtsdatum: 5. Juli 1966  
Geburtsort: Karlsruhe, Deutschland  
Familienstand: verheiratet, ein Kind

## Ausbildung:

1972 – 1976 Besuch der Grundschule in Karlsruhe  
1976 – 1985 Besuch des Gymnasiums in Karlsruhe  
Abschluß: Abitur (7/85)  
  
10/87 – 10/95 Studium des Maschinenbaus Fachrichtung Allgemeiner  
Maschinenbau, Universität Karlsruhe  
6/94 – 12/94 Diplomarbeit am Institut für Hydromechanik,  
Universität Karlsruhe

## Berufstätigkeit:

01/91 – 12/94 Wissenschaftliche Hilfskraft bei BAW Karlsruhe  
01/95 – 10/95 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Wasserbau und  
Kulturtechnik, Universität Karlsruhe  
seit 11/95 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserbau  
und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe

Frank Ritzert