

4. FLUSSMODELLE FÜR AUSBREITUNGSVORGÄNGE VON WASSERINHALTSSTOFFEN UND WÄRME

4.1 Allgemeines

Wegen unzureichender Qualität kann das Wasserangebot besonders in hochindustrialisierten Regionen zum wachstumslimitierenden Faktor werden. Qualitätsbeeinträchtigungen entstehen neben natürlichen Ursachen durch übermäßige Belastung der Gewässer durch Einleitung von kommunalen und industriellen Abwässern oder Kühlwassereinleitungen. Zur Beurteilung der Auswirkungen solcher Einleitungen ist es erforderlich, die Ausbreitung und den Transport der eingeleiteten Fremdstoffen zu kennen. Diese Vorgänge werden in wasserbaulichen Modellen untersucht. Modelle für Ausbreitungsvorgänge unterscheiden sich von den herkömmlichen Modellen dadurch wesentlich, daß hier turbulente Transportvorgänge modellgerecht abgebildet werden müssen, was eine korrekte Nachbildung der örtlichen Geschwindigkeitsverteilungen im Modell erforderlich macht. Hieraus ergeben sich höhere, differenziertere Anforderungen an die Ähnlichkeit als beim herkömmlichen hydraulischen Modell.

Die Ermittlung des Konzentrations- oder Temperaturfeldes, das sich in Gewässern aufgrund von Einleitungen einstellt, ist in der Regel die Hauptaufgabe von Modellversuchen zur hydraulischen Gestaltung von Entnahme- und Einleitbauwerken. Damit wird eine Voraussetzung für die Beurteilung des Einflusses auf die Ökologie des Gewässers und auf andere, stromab gelegene Wassernutzungen geschaffen. Im Modellversuch kann geklärt werden, wie sich die Vermischung durch die Gestaltung des Einleitbauwerkes beeinflussen und verändern läßt. Solche Fragen sind besonders wichtig bei großen Einleitungen an breiten Flüssen oder in Stauhaltungen, wo unvollständige Durchmischung und Dichteschichtung auftreten können. Hingegen ist bei Einleitungen in Bäche oder kleine Flüsse hauptsächlich die Längsvermischung von Bedeutung, da hier wegen des großen Verhältnisses von Einleiter- zu Flußwassermenge rasch eine vollständige Durchmischung über den Querschnitt erreicht wird. Ebenso sind kleine Einleiter solange einfach zu erfassen, wie die Einleitung nur unwesentliche Veränderungen der Flußströmung bewirkt. Weitere typische Aufgaben wasserbaulicher Modellversuche für Ausbreitungsvorgänge betreffen z.B.

- Quergeschwindigkeiten, die durch die Einleitung oder Entnahme im Gewässer erzeugt werden und die im Hinblick auf die Sicherheit der Schifffahrt und des Sportbootverkehrs niedrig gehalten werden müssen (heute übliche Praxis in Deutschland: maximal 0,3 m/s in der Uferstreichlinie). Diese Forderung hat erheblichen Einfluß auf die Gestaltung der Entnahme- und Rückgabebauwerke.
- Rezirkulation ("Kurzschlußströmungen") und Warmwasserkeile zwischen Einleit- und Entnahmbauwerk. Diese Frage ist besonders wichtig in Stauhaltungen und schwach durchflossenen Gewässern, weil es dort leicht zur Ausbildung von Dichteströmungen kommt. Hier liefert das Modell Angaben darüber, welcher Mindestabstand und welche Anordnung von Entnahme-

und Rückgabebauwerk zur Vermeidung dieser Störungen, die die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke erheblich reduzieren können, notwendig sind.

- Entnahme möglichst feststofffreien Wassers und Vermeidung von Ablagerungen im Fluß nach der Ableitung größerer Wassermengen. Besonders an Flüssen mit starkem Geschiebetrieb muß das Entnahgebauwerk hydraulisch so gestaltet werden, daß möglichst wenig Geschiebe eingetragen wird. Diese Forderung bedingt z.B. hoch liegende Einläufe, während zur Vermeidung von Rezirkulationsströmungen tief liegende Einläufe vorteilhafter sind. Nach relativ großen Entnahmen kann sich außerdem die Transportkapazität des Flusses stark verändern. Dies kann Änderungen des Geschiebetransports mit verstärkter Ablagerungstendenz im Zwischenbereich hervorrufen. Andererseits führen strahlförmige Einleitungen häufig zu lokalen Erosionserscheinungen.
- Festlegung repräsentativer Meßpunkte zur Wassergüteüberwachung. Wegen der hohen Kosten für kontinuierlich betriebene Stationen ist es nur in Ausnahmefällen möglich, die Wassergüteparameter in mehreren Punkten eines Fließquerschnitts zu messen. Es muß darum aus Messungen an einem Punkt auf die Mittelwerte des betrachteten Querschnitts geschlossen werden, was z.B. stromab von Einleitungen oder des Zusammenflusses zweier unterschiedlich stark verschmutzter Gewässer oft nur mit Hilfe von Information aus Modellversuchen möglich sein wird.

Die größten Einleitungen an Fließgewässern resultieren aus dem Kühlwasserbedarf von Kraftwerken und Industrie. Bei Kühlwassereinleitungen treten Dichteunterschiede zum Flußwasser und damit Auftriebseffekte auf, welche den Ausbreitungsvorgang zusätzlich beeinflussen. Im folgenden wird deshalb die modellmäßige Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen am Beispiel von Warmwassereinleitungen dargestellt. Eine analoge Methodik ist bei der Modellierung der Ausbreitung anderer Substanzen anzuwenden, wobei dort gegebenenfalls chemische oder biologische Abbauprozesse und Reaktionen berücksichtigt werden müssen, deren Gesetzmäßigkeiten von der "Abbaufunktion" des Wärmeübergangs zur Atmosphäre abweichen können. Solche biologischen oder chemischen Prozesse lassen sich nur selten im Modell maßstäblich nachbilden.

Wassergütefragen in großräumigen Flußsystemen können nicht im hydraulischen Modell untersucht werden, da eine modellähnliche Nachbildung wegen der unrealistischen räumlichen Modellausdehnung nicht möglich ist. Da jedoch für großräumige Betrachtungen im allgemeinen vollständige Durchmischung über den Querschnitt angenommen werden kann, lassen sich solche Fragen vorzugsweise mit Hilfe numerischer Modelle behandeln.

4.2 Grundlagen

4.2.1 Beschreibung und Einflußgrößen

Bei den verschiedenen oben aufgezählten Fragestellungen müssen unterschiedliche Einflußgrößen berücksichtigt und jeweils andere Prozesse modelliert werden. Zum Beispiel spielen bei der Untersuchung von Entnahmebauwerken zur Vermeidung des Feststoffeintrags oder von Ablagerungserscheinungen im Flußabschnitt zwischen Entnahme- und Rückgabebauwerk neben dem Strömungsfeld, das durch die natürlichen Gegebenheiten des Gewässers und Art, Menge und Ort der Entnahme bestimmt wird, die Eigenschaften der transportierten Feststoffe eine wesentliche Rolle. Diese Prozesse werden nach den in den Kapiteln 3, 7 und 10 besprochenen Gesetzmäßigkeiten modelliert.

Bei der Untersuchung der Rezirkulation sind andere Einflußgrößen zu berücksichtigen. Sogenannte "Warmwasserkeile" entstehen vor allem bei der Einleitung von Kühlwasser in langsam fließende Gewässer. Wenn der Dichteunterschied zwischen erwärmtem und Flußwasser genügend groß ist, schiebt sich das Kühlwasser an der Wasseroberfläche den Fluß hinauf. Im Gleichgewichtszustand wird die obere leichtere Schicht gerade durch die Strömung des Flusses in ihrer Position fixiert. Außer der Geometrie sind hier der relative Dichteunterschied, die Flußströmung, die Gewässertiefe, die Reibung an der Flußsohle und in der Zwischenschicht und eine mögliche turbulente Einmischung maßgebend. Im zweidimensionalen Fall entsteht ein Warmwasserkeil nur für densimetrische Froudezahlen

$$Fr_d \leq 0,8 \quad (4.1)$$

während z.B. für ($Fr_d = 0,2$) die Länge des Keiles schon etwa das Tausendfache der Gewässertiefe erreicht. Die zweidimensionale Betrachtung setzt eine vollständige Vermischung über die gesamte Flußbreite an der Einleitungsstelle voraus. Das ist nur selten der Fall. Die Untersuchung eines dreidimensionalen Warmwasserkeiles im hydraulischen Modell erfordert die korrekte Nachbildung der Einleitungsbedingungen sowie gleiche Froudezahlen, densimetrische Froudezahlen und Reibungsbeiwerte wie in der Natur.

Zur Ermittlung des Temperatur- bzw. Konzentrationsfeldes stromab einer Einleitung müssen einerseits die Gegebenheiten des Gewässers und andererseits die der Einleitung berücksichtigt werden. Die wichtigsten Einflußgrößen sind in Bild 4.1 aufgezählt. Solche Einleitungen erfolgen häufig als Strahlen. Aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Grundströmung und Einleitung treten am Strahlrand hohe Scherspannungen auf, die turbulente Wirbel erzeugen und somit eine rasche Durchmischung zwischen Einleitung und Empfängerfluid bewirken. Die Strahlströmung bewirkt also einen raschen anfänglichen Konzentrations- bzw. Temperaturabbau. Auch bei seitlichen Einleitungen, bei denen die Einleitungsgeschwindigkeit kleiner als die Strömungsgeschwindigkeit im Fluß ist, findet aufgrund der turbulenten Scherspannungen eine rasche anfängliche Durchmischung statt. Weist das Einleitungsfluid Dichteunterschiede zum Empfänger-

	Nahfeld		Fernfeld	
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
(I) Einflußgrößen				
(A) Einleitungsparameter:				
Geometrie der Auslaßöffnung	+			
Geometrie des unmittelbaren Einleitungsbereichs	+	+		
Impulsfluß F_I (Größe und Richtung)	+	+	+	
Auftrieb F_A zufolge Dichtedifferenz zwischen eingeleitetem und Flußwasser	+	+	+	
Massenfluß Q_e	+	+	+	+
Einleitungskonzentration c_e	+	+	+	+
(B) Gewässerparameter:				
Gewässertiefe h		+	+	+
Abfluß Q oder Fließgeschwindigkeit v_0		+	+	+
Vertikale Dichteschichtung oder horizontale Dichtegradienten im Gewässer		+	+	
Turbulenz durch Bodenreibung		+	+	+
Seitliche Begrenzung und Linienführung des Gewässers (Buhnen, Krümmungen)			+	+
Schiffsverkehr, Schleusungen			+	
Windeinwirkung				+
Abbauvorgänge (z.B. chemische Reaktionen, Wärmeaustausch des Gewässers)			(+)	+
(II) Ausbreitungsmechanismen				
Strahlausbreitung	←————→			
Dichteinduzierte Strömung	←————→			
Konvektion durch die Flußströmung	←————→			
Turbulente Diffusion/Dispersion	←————→			
Windverfrachtung	←————→			
Abbauvorgänge	←————→			
Typische Längenausdehnung (L: Charakteristische Hauptabmessung des Einleitungsbauwerks)				
	~10 L	~300 L	~1000 L	

Bild 4.1: Einflußgrößen und physikalische Prozesse bei Ausbreitungsvorgängen in Fließgewässern

medium auf, so können die Auftriebskräfte zu Schichtenbildung im Gewässer führen. Ob sich eine stabile Schichtung einstellen kann, hängt davon ab, ob die durch Dichteunterschiede bewirkten Auftriebskräfte die durch die Strömung an der Gewässersohle erzeugte Turbulenz dämpfen können oder ob die letzteren Einflüsse zur Instabilität und Zerstörung der Schichtung führen.

Schichtungen sind dann zu erwarten, wenn die Auftriebskräfte groß, die Strömungsgeschwindigkeit klein und die Wassertiefe groß (die Störeffekte also klein) sind. Dies findet man beispielsweise häufig in Stauhaltungen.

Bei seitlichen Einleitungen in ein rasch fließendes Gewässer wird der Strahl umgelenkt und legt sich dann häufig wieder am Einleitungsufer an. Die Ursache dafür kann sowohl ein Unterdruck sein, der bei Einleitungen über die gesamte Gewässertiefe (wenn der Strahl sich nicht zufolge Auftriebs von der Sohle abhebt) dadurch entsteht, daß das Flußwasser nicht ungehindert auf die stromab gelegene Seite gelangen kann, als auch die Behinderung der Einmischung durch das Ufer. Zwischen der Einleitung und dem Punkt, an dem sich die Strömung wieder an das Ufer anlegt, bildet sich eine Rückströmzone aus, sofern die Einleitungsgeschwindigkeit v_e das 1,3-fache der Fließgeschwindigkeit v_0 im Gewässer übersteigt. Die Länge L der Rückströmzone, bezogen auf die Breite b_e der über die gesamte Gewässertiefe reichenden Auslaßöffnung, beträgt (Gehrig, Jurisch und Lemmin, 1976)

$$L/b_e = (12 \dots 125) \quad \text{für} \quad v_e/v_0 = (1.3 \dots 3) \quad (4.2)$$

Daraus folgt, daß bei den in Deutschland üblichen kleinen Einleitgeschwindigkeiten die Rückströmzone nur an sehr langsam fließenden Gewässern eine größere Ausdehnung haben wird. Das durch die Einleitung hervorgerufene Geschwindigkeitsdefizit ist allerdings über wesentlich längere Strecken bemerkbar.

Die am Ufer anliegenden Warmwasserfahnen ziehen sich oft kilometerweit am Flußufer entlang, wobei nur eine allmähliche Durchmischung mit dem Flußwasser erfolgt. Im Gegensatz zur "aktiven" Ausbreitung im Strahlbereich aufgrund der dort vorhandenen Geschwindigkeitsunterschiede und infolge der dichtinduzierten Sekundärströmungen erfolgt in größeren Entfernungen lediglich eine "passive" Durchmischung. Neben dem konvektiven Transport erfolgt hier die Ausbreitung der Inhaltsstoffe oder des Wassers zufolge der turbulenten Diffusion (so genannt in Analogie zur molekularen Diffusion, da die Ausbreitung durch turbulente Geschwindigkeits- und Konzentrationsschwankungen ebenfalls mit einem Gradientengesetz beschrieben wird) und aufgrund von Sekundärströmung und Effekten der räumlichen Verteilung der mittleren Geschwindigkeiten, die man als Dispersion bezeichnet. Man beobachtet in diesem Bereich großräumige Wirbel, die das Warmwasser ballenförmig abtransportieren. Die Temperaturgrenze zwischen eingeleitetem und Empfängerfluid bleibt hierbei lange Zeit scharf ausgeprägt, ist jedoch starken zeitlichen Schwankungen unterworfen.

Aus der Beschreibung des Durchmischungs- und Ausbreitungsprozesses wird bereits deutlich, daß nicht alle in Bild 4.1 aufgezählten Parameter in jedem Punkt des Strömungsfeldes von gleicher Bedeutung sind. Es lassen sich verschiedene Zonen unterscheiden, in denen jeweils bestimmte Parametergruppen dominieren. In der Umgebung des Bauwerks (Nahfeld) wird das Strömungs- und Konzentrationsfeld von den Einleitungsparametern bestimmt. Die Verhältnisse in dieser Zone können demnach durch die Gestaltung der Einleitung beeinflusst

werden. Andererseits hat die Einleitung in sehr großer Entfernung (Fernfeld) keine dynamischen Auswirkungen mehr auf das Strömungsfeld. Die Strömung wird hier durch die Gewässerparameter bestimmt, es findet passive, vergleichsweise schwache Durchmischung statt. Der Nahfeldeinfluß beschränkt sich auf die Konzentrations- oder Temperaturverteilung am Übergang. Die in Bild 4.1 genannten Parameter sind etwa in der Reihenfolge aufgezählt, in der sie mit zunehmendem Abstand von der Einleitungsstelle (oder mit zunehmendem Betrachtungsmaßstab) an Bedeutung verlieren. Es werden insgesamt vier Bereiche unterschieden:

- Zone 1 (Einleitungsbereich, Ausdehnung bis etwa $10L$, wobei L eine charakteristische Hauptabmessung des Einleitungsquerschnitts ist): Hier bestimmen die Einleitungsparameter und die Geometrie des unmittelbaren Einleitungsbereiches die Strömung.
- Zone 2 (Nahfeld, Ausdehnung in der Größenordnung von $10 L$ bis $300 L$): Neben dem Impulsfluß und dem Auftrieb (und eventuell dem Durchfluß) der Einleitung sind hier die Gewässertiefe, die Flußströmung sowie eventuell vorhandene natürliche Dichtegradienten von Bedeutung. Hier können sich Rückströmgebiete und vertikale Schichtungen ausbilden.
- Zone 3 (Fernfeld): In diesem Bereich ist der Einfluß von Fernfeldparametern wie Bodenreibung und den seitlichen Begrenzungen des Gewässers dominierend, während die Einleitungsparameter hier nur noch die Anfangsverteilung bestimmen. Es existieren in der Regel nur noch laterale, nicht aber vertikale Konzentrationsgradienten im Fluß
- Zone 4: Großräumiger Bereich fernab von der Einleitung, in dem die Gewässerparameter sowie Abbaureaktionen, ggf. Wärmeaustausch mit der Atmosphäre, oder auch die Windschubspannung maßgebend sind. Konzentrationsunterschiede existieren nur noch in der Flußlängsrichtung.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Bereichen sind fließend und nicht scharf abzugrenzen, und aus diesem Grund gibt es auch keine eindeutigen Kriterien für die Ausdehnung der jeweiligen Bereiche. Allgemein kann aber gesagt werden, daß bei den in der Bundesrepublik Deutschland üblichen kleinen Einleitgeschwindigkeiten bei rasch fließenden Flüssen das Nahfeld auf einen relativ kleinen Bereich begrenzt ist.

4.2.2 Modellähnlichkeit der Turbulenz

Die Ausbreitung von Wasserinhaltsstoffen in Flüssen wird vom konvektiven Transport und von der Turbulenz bestimmt. Die Turbulenz ergibt sich aus dem Wechselspiel zwischen Trägheitsreaktionen und Zähigkeitswirkungen und wird deshalb durch die Reynoldszahl charakterisiert. In Modellen, in denen die Reynoldszahl gleich der im Prototyp gehalten wird, ist demnach eine echt modellähnliche Darstellung auch der turbulenten Schwankungen automatisch gewährleistet. Da bei Froudemodellen jedoch die Reynoldszahl im Modell

kleiner ist als in der Natur, muß geklärt werden, wie sich die Änderung der Reynoldszahl auf die Vermischung in einer turbulenten Strömung auswirkt und welche Konsequenzen sich hieraus für das wasserbauliche Flußmodell de facto ergeben.

Hierzu muß man sich zunächst vor Augen halten, daß die "Turbulenz" der Strömung sich als ein System von Wirbeln verschiedener Größen verstehen läßt. Durch die Hauptströmung werden große Wirbel erzeugt, deren Abmessungen den Abmessungen des Strömungsfeldes (bei Gerinneströmungen beispielsweise der Wassertiefe) entsprechen. Diese Großwirbel sind im allgemeinen Trägheitswirbel, in denen Zähigkeitseinflüsse vernachlässigbar sind. Die Energiezufuhr von der Hauptströmung in die turbulente Strömung erfolgt über diese größten Wirbel des Systems, die demzufolge sehr energiereich sind. Man kann sich den Energieumwandlungsprozeß so vorstellen, daß Energie von der Hauptströmung ständig den größten Wirbeln (Makrowirbel) zugeführt wird. Diese zerfallen in ständig kleiner und kleiner werdende Wirbel, auf die sich die Energie fortlaufend überträgt, bis schließlich die Größe der Wirbel soweit abgenommen hat, daß Energiedissipation durch Zähigkeitswirkungen eintritt.

Zur Beschreibung der Turbulenz kann man folgende Maßstäbe definieren:

- einen Makromaßstab Λ_M ,
- einen Mikromaßstab Λ_T nach Taylor, der charakteristisch ist für die Größe der Wirbel, bei denen die Zähigkeit gerade anfängt, eine Rolle zu spielen,
- einen Mikromaßstab Λ_K nach Kolmogorov, der charakteristisch ist für die Größe der Wirbel, deren Energie vollständig durch Zähigkeitswirkung dissipiert wird.

Für die modellgerechte Darstellung der turbulenten Wirbel im wasserbaulichen Modell müssen gerade die energiereichen großen Wirbel korrekt nachgebildet werden, weil durch sie die Energiezufuhr von der Hauptströmung erfolgt. Auch für Transportprozesse läßt sich zeigen, daß die großen Wirbel für die turbulente Diffusion maßgeblich sind und nicht die kleinen. Unerheblich ist es hingegen, wie im einzelnen der Kaskadenprozeß von den großen zu den kleinen Wirbeln verläuft, und ob die kleinen Zähigkeitswirbel, welche die Energie dissipieren, im wasserbaulichen Modell maßstabsgerecht dargestellt werden, da sie ohnehin auf die Hauptströmung keinen Einfluß haben.

Da die Makrowirbel einer turbulenten Strömung den Hauptabmessungen des Strömungsfeldes proportional sind ($\Lambda_{M,r} = L_r$), ist in einem geometrisch ähnlichen Modell stets gewährleistet, daß sie modellgerecht simuliert werden (Abraham, 1975). Sicherzustellen ist lediglich, daß der Mikromaßstab der Turbulenz, bei dem die Zähigkeitseinflüsse maßgeblich werden, auch im Modell stets kleiner bleibt als der Makromaßstab, damit nicht das Verhalten der Makrowirbel durch die Viskosität beeinflusst wird.

Mit Hilfe einer Dimensionsanalyse kann gezeigt werden (Abraham, 1975), daß

in einem Froudeschen Modell die Mikromaßstäbe der Turbulenz wie folgt anwachsen:

$$\Lambda_{T,r} = L_r^{-1/4} ; \quad \Lambda_{K,r} = L_r^{-1/8} \quad (4.3)$$

Für das Verhältnis von Mikromaßstab zu Makromaßstab folgt daraus:

$$\begin{aligned} (\Lambda_T / \Lambda_M)_r &= L_r^{-5/4} \\ (\Lambda_K / \Lambda_M)_r &= L_r^{-9/8} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Diese Betrachtungen zeigen, daß sich im kleinmaßstäblichen Froude-Modell die Feinstruktur der energiedissipierenden Zähigkeitswirbel so verändert, daß die charakteristische Abmessung der kleinsten Wirbel im kleinmaßstäblichen Modell größer ist als in der Natur. Dies illustriert Bild 4.2, das nach Strömungsaufnahmen an turbulenten Strahlströmungen entstanden ist.

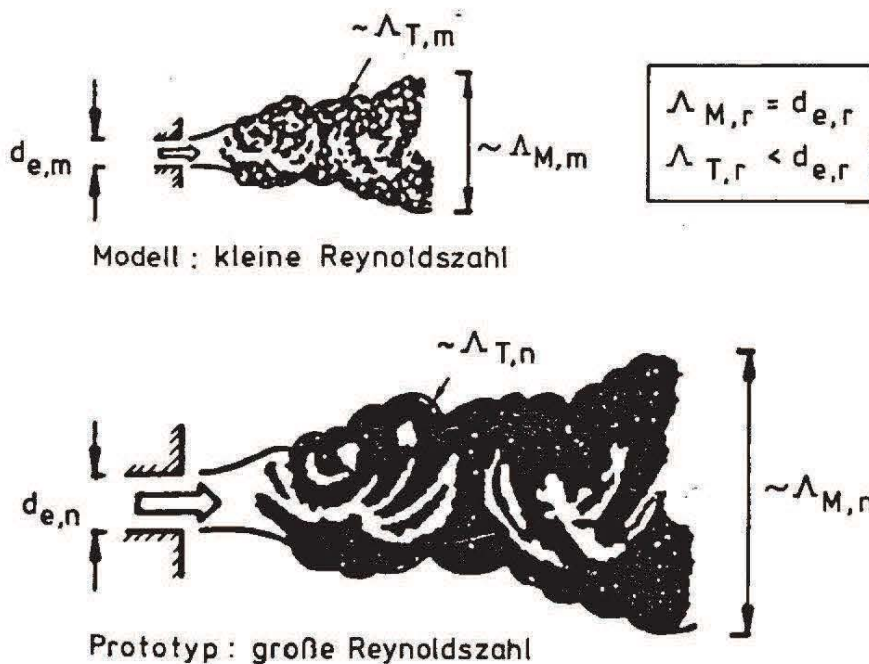


Bild 4.2: Turbulenzstruktur eines Strahles im Modell und im Prototyp (Abraham, 1975)

Das Nichteinhalten der Reynoldszahl macht sich also in einer Änderung in der Feinstruktur der Turbulenz bemerkbar, was sich jedoch nicht auf die Grobstruktur und damit das Verhalten der Hauptströmung auswirkt. Man kann also sagen, daß in wasserbaulichen Froude-Modellen turbulente Strömungs- und Transportvorgänge solange korrekt simuliert werden, wie ein kritischer Wert der Reynoldszahl nicht unterschritten wird: d.h. solange die Hauptströmung

turbulent ist. Dieser kritische Wert der Reynoldszahl beträgt näherungsweise

$$Re_{kr} = \begin{cases} \frac{v_e \cdot d_e}{\nu_w} \approx 2000 & \text{für Strahlen} \\ \frac{v_o \cdot 4r_{hy}}{\nu_w} \approx 3000 & \text{für Gerinneströmungen} \end{cases} \quad (4.5)$$

Wie in den Kapiteln 1 und 2 ausgeführt wurde, erfordert die statt der Reynoldsähnlichkeit geforderte korrekte Nachbildung der Bodenreibung in nicht überhöhten Modellen stets kleinere relative Rauheiten als in der Natur. Wegen der technischen Schwierigkeiten bei der Herstellung entsprechend glatter Betonflächen und der Begrenzung des so maximal möglichen Längenmaßstabs kann die korrekte Modellierung häufig nur durch Wahl einer Modellüberhöhung mit dazu notwendigen größeren relativen Rauheiten erreicht werden (siehe Kapitel 2).

Ein übliches Verfahren zur Einhaltung der geforderten Rauheitsbeiwerte ist die Verwendung scharfkantiger künstlicher Rauheiten. Webel (1982) sowie Webel und Schatzmann (1983) haben für diesen Fall gezeigt, daß die Ähnlichkeit des Ausbreitungsvorganges bei gleichem dimensionslosen Querdiskoeffizienten $E_{horizontal}/(v_o h)$ gegeben ist und daß der gleiche Querdiskoeffizient bei $\lambda_r = 1$ erreicht wird. Es ist dabei unerheblich, durch welche Art und Anordnung von Rauheitselementen der Rauheitsbeiwert erreicht wird.

Zur Frage, ob turbulente Ausbreitungsvorgänge auch in überhöhten Flußmodellen modellähnlich nachgebildet werden können, läßt sich zeigen (Kobus, 1974),

- daß das impulsfluß- und auftriebsbeeinflusste Nahfeld nur im unverzerrten Modell ähnlich abgebildet werden kann (siehe auch Kap. 1),
- daß bei einer Modellüberhöhung die Querausbreitung im Modell unmaßstäblich vergrößert, die Vertikalausbreitung hingegen unmaßstäblich verkleinert wird. Setzt man die turbulenten Diffusionskoeffizienten E proportional der Wassertiefe h und der Schubspannungsgeschwindigkeit v_* , dann gilt in überhöhten Modellen:

$$\frac{\text{tatsächlich im Modell auftretendes } E_{horizontal}}{\text{für Ähnlichkeit gefordertes } E_{horizontal}} = n^{3/2} \quad (4.6)$$

$$\frac{\text{tatsächlich im Modell auftretendes } E_{vertikal}}{\text{für Ähnlichkeit gefordertes } E_{vertikal}} = n^{-1/2}$$

In sehr breiten, flachen Gewässern (für Breiten-Tiefenverhältnisse im Modell von $(b_{wsp}/h)_m > 40$ erhält man auch bei überhöhten Modellen näherungsweise Werte für die turbulenten Diffusionskoeffizienten, die den Ähnlichkeitsforderungen entspre-

chen (siehe Kap. 8). Für Flußmodelle ist jedoch die Voraussetzung ($b_{wsp} \geq 40h$)_m in der Regel nicht erfüllt, wie beispielsweise auch bei den Modell-Prototyp-Vergleichen von Holley und Karelse (1973). Deshalb sind für Flußmodelle vor allem bei der Untersuchung dreidimensionaler Vermischungsvorgänge unverzerrte Modelle erforderlich.

4.2.3 Modellgesetze und Einsatzbereiche des hydraulischen Modells

Zur modellgerechten Nachbildung der Flußströmung müssen die schon in den Kapiteln 1 und 2 diskutierten Ähnlichkeitsforderungen erfüllt werden. Wie dort gezeigt wurde, bestimmen die geometrischen Gegebenheiten sowie die Begrenzung bezüglich Oberflächenspannung und Zähigkeitseinfluß die größtmögliche Längenmaßstabszahl (im allgemeinen bestenfalls einige Hundert für unverzerrte und circa 1 000 für überhöhte Modelle). Zur maßstabgerechten Erfassung des Schwerkräfteinflusses muß das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz eingehalten werden: Hierdurch ist der Geschwindigkeitsmaßstab für das Modell fixiert. Damit kann gewährleistet werden, daß die Verteilung der mittleren Geschwindigkeiten im Modell den Naturgegebenheiten entspricht.

Da Ausbreitungsvorgänge neben dem konvektiven Transport durch die mittlere Strömung im wesentlichen vom turbulenten Transport beeinflußt werden, müssen Flußmodelle für Transportvorgänge nach den obigen Ausführungen in aller Regel als unverzerrte, also geometrisch ähnliche Modelle ausgebildet werden.

Bei der Behandlung von Ausbreitungsvorgängen müssen noch eine Reihe weiterer Ähnlichkeitsforderungen beachtet werden, die in Bild 4.3 zusammengestellt sind. Wenn Auftriebskräfte modelliert werden sollen, muß die densimetrische Froudezahl in Modell und Natur gleich groß gehalten werden. Dies erfordert in einem Froudemodell identische Dichteunterschiede in Modell und Prototyp. In stehenden oder sehr langsam fließenden Gewässern, wo Schwerkräfteinflüsse bei ruhender Oberfläche vernachlässigt werden können ($Fr \approx 0$), kann von dieser Forderung abgewichen werden, wobei der Geschwindigkeitsmaßstab dann durch die densimetrische Froudezahl bestimmt wird.

In dichtegeschichteten Strömungen muß auch die Reibungskraft in der Zwischenschicht korrekt nachgebildet werden. Das scheint für einen weiten Bereich von Reynoldszahlen dann mit ausreichender Näherung gewährleistet zu sein, wenn auch die Sohlreibung richtig modelliert wird, da das Verhältnis der beiden Reibungsbeiwerte von $Re = 10^3$ bis 10^5 nur von 0,32 bis 0,42 variiert (Abraham und Eysink, 1971). Bei kleineren Reynoldszahlen kann eine Überhöhung notwendig werden.

Die modellähnliche Nachbildung von physikalischen, chemischen oder biologischen Abbauvorgängen erfordert die Übereinstimmung der Zeitmaßstäbe für die Strömung und die Abbaureaktionen. Für eine einfache Reaktion erster Ordnung

Darzustellender physikalischer Vorgang	Charakteristische Größe	Ähnlichkeitsforderungen	Modellgesetze für Froude-Modelle	Resultierende Modellregeln
Freispiegelabfluß unter Schwerkraft	Geometrie, $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	$Fr_r = 1$	$v_r = h_r^{1/2}$	Diktiert Geschwindigkeitsmaßstab (siehe Kap. 1 und 2)
Sohlrreibung	Reibungsbeiwert $\lambda = f(Re, k/4h)$	$(\lambda \frac{L}{h})_r = 1$	$\lambda_r = h_r / L_r$	Diktiert Modellrauheit bzw. einen Überhöhungsfaktor (1) (siehe Kap. 1 und 2)
Turbulente Diffusion	Diffusionsbeiwerte E_x, E_y, E_z	Horizontal $(E_{x,y} L / L^2 v)_r = 1$ Vertikal $(E_z L / h^2 v)_r = 1$	$(E_{x,y})_r = L_r h_r^{1/2}$ $(E_z)_r = h_r^{5/2} / L_r$	Verbietet Modellüberhöhung, wenn beide Richtungen maßgebend sind $(L_r = h_r)$
Auftrieb	Densimetrische Froudezahl $Fr_d = \frac{v}{\sqrt{(\Delta\rho_w/\rho_w)gh}}$	$(Fr_d)_r = 1$	$(\Delta\rho/\rho)_r = 1$	Diktiert Dichtemaßstab
Dichteschichtung	Reibungsbeiwert der Zwischenschicht λ_i	$(\lambda_i \frac{L}{h})_r = 1$	$(\lambda_i / \lambda)_r = 1$	Etwas erfüllt für $103 \leq Re \leq 10^5$ (Abraham und Eysink, 1971)
Abbauvorgänge, Wärmeabgabe	Exponent der Abbaureaktion 1. Ordnung, z.B. Wärmeabgabe: $\kappa L / (\rho_w c_p h v)$	$(\frac{\kappa L}{h v})_r = 1$ mit $(\rho_w c_p)_r = 1$	$\kappa_r = h_r^{3/2} L_r^{-1}$	Diktiert einen Überhöhungsfaktor (2). Erfahrungswert: Ohne Nachbildung der atmosphärischen Bedingungen $\kappa_r \approx 4/3$

Bild 4.3: Modellgesetze für Ausbreitungsvorgänge in Froude-Modellen

mit exponentiellem Abklinggesetz, wie dies beispielsweise für die Wärmeabgabe an die Atmosphäre üblicherweise angesetzt wird, ist die Ähnlichkeitsforderung

$$\left(\frac{\kappa \cdot L}{\rho_w c_p h v} \right)_r = 1 \quad (4.7)$$

Diese Forderung kann in aller Regel nur durch eine Überhöhung des Modells erfüllt werden. Der aus Gl. (4.7) resultierende Überhöhungsfaktor wird jedoch im allgemeinen nicht mit dem Überhöhungsfaktor zufolge der Reibungseinflüsse übereinstimmen. Dies macht deutlich, daß eine gleichzeitige modellgerechte Nachbildung aller genannten Einflüsse in einem einzigen Modell kaum möglich ist. Deshalb muß häufig der Ausweg gewählt werden, den Ausbreitungsvorgang mit Hilfe mehrerer Teilmodelle zu untersuchen.

Wasserbauliche Modelle sind vor allem für die Untersuchung der meist komplexen Strömungsverhältnisse im Nahfeld geeignet. Bei Wahl eines nicht überhöhten Modells lassen sich die Ausbreitungsvorgänge zufolge des Impulsflusses und des Auftriebs der Einleitung maßstabgerecht nachbilden, solange die Einflüsse der Sohlreibung und der Abbaureaktionen (bzw. Wärmeabgabe) im Modellbereich von untergeordneter Bedeutung bleiben. Typische Nahfeldmodelle für Ausbreitungsvorgänge werden im Abschnitt 4.3 vorgestellt.

Die Ausdehnung von Nahfeldmodellen muß mindestens den Bereich der aktiven Durchmischung zufolge Impulsfluß und Auftrieb erfassen. Das Modell muß sich stromab nicht bis zum Ende des Übergangsbereichs erstrecken, wo eine vollständige Durchmischung über den Flußquerschnitt erreicht ist: dies ist in der Regel auch nicht möglich. Im Normalfall sollte angestrebt werden, daß das Modell die gesamte Ausdehnung von Dichteschichtungen erfaßt, so daß im Austrittsquerschnitt eine vollständige Durchmischung in der Vertikalen gegeben ist. Diese Festlegung der Modellgrenzen vor dem Bau ist schwierig, wird bei frei fließenden Flüssen aber immerhin dadurch erleichtert, daß es keine Rückkopplung zwischen Nah- und Fernfeld gibt. Auf jeden Fall muß abgeschätzt werden, wo im Fluß wieder ungestörte Strömungsverhältnisse zu erwarten sind.

Die Ausbreitung im Fluß außerhalb des Nahfeldes kann in überhöhten Modellen untersucht werden, wenn die Wasserinhaltsstoffe oder die Wärme bereits gleichmäßig über die Tiefe verteilt sind (was bei den für die Bundesrepublik Deutschland typischen Einleitungen relativ schnell erreicht ist) und die Ausbreitung hauptsächlich durch horizontale Geschwindigkeiten dominiert wird. Dann ist es unwesentlich, daß die Vertikalausbreitung im Modell weniger intensiv ist als in der Natur. Auch die Nahfeldausbreitung kann unter bestimmten Voraussetzungen näherungsweise in überhöhten Modellen untersucht werden, wenn es sich (wie z.B. bei Einleitungen über die gesamte Wassertiefe oder bei einer langen Reihe von Diffusoren an der Gewässersohle) um einen im wesentlichen zweidimensionalen Strömungsvorgang handelt (Abraham, 1975).

Wegen der erheblichen ökonomischen Vorteile von überhöhten Modellen entwickelte Liang (1977) ein Korrekturverfahren, mit dem die Strahlausbreitung

auch im Nahfeld in Modellen mit bis zu vierfacher Überhöhung näherungsweise dargestellt werden kann. Es beruht auf einer Anpassung der Geometrie des Auslaßbauwerks an die durch die Überhöhung veränderte Strahlausbreitung, was unter gewissen Voraussetzungen (hohe Einleitgeschwindigkeiten) mit Hilfe seiner Versuchsergebnisse möglich ist.

Bei einfachen geometrischen und hydraulischen Verhältnissen im Fluß kann die Ausbreitung im Fernfeld auch mit numerischen Modellen berechnet werden. Für Einleitungsprobleme in Flüssen bietet die Kombination von unverzerrtem Nahfeldmodell mit einem numerischen Fernfeld eine bewährte und zuverlässige Behandlungsmethode, zumal sehr einfache Fernfeldmodelle bereits relativ genaue Vorhersagen ermöglichen, und weil aufgrund der Gegebenheiten in einem Fluß an den Nahtstellen zwischen Nah- und Fernfeld (also am Modellzu- und -ablauf) stets eindeutige Verhältnisse ohne Rückkoppelung herrschen. Andererseits gibt es für das Nahfeld trotz intensiver Forschungsbemühungen bis heute noch keine allgemein gültigen numerischen Modelle, die den Laborversuch ersetzen könnten. Einfache numerische Modelle sind ebenfalls dann vorteilhaft, wenn nur die Wärmeabgabe im Fernfeld interessiert. Dafür sind nämlich Temperaturgradienten quer zur Fließrichtung dann belanglos, wenn eine vollständige Durchmischung in der Vertikalen vorliegt (Kobus, 1975).

Gerade weil die Übertragungsgesetze für Ausbreitungsmodelle nicht problemlos sind, sollte die abschließende Überprüfung von Modellergebnissen am Prototyp mehr als bisher beachtet werden. Zwar gibt es bereits einige vergleichende Untersuchungen (siehe z.B. Stolzenbach, 1976), durch die die Vertrauenswürdigkeit von Modellaussagen nachgewiesen wurde, doch fehlen noch systematische und allgemeingültige Vergleiche in größerem Umfang.

4.2.4 Versuchstechnik

Die Maßstabwahl für Ausbreitungsmodelle erfolgt nach den im Kapitel 2 dargestellten Gesichtspunkten für Flußmodelle. Für die zu modellierende Einleitung sind Konzentrationen bzw. Dichteunterschiede vorzusehen, die denjenigen in der Natur gleich sind (gleiche Fr_d).

Das Einleitungsfluid muß markiert werden. Die dafür verwendeten Tracerstoffe sollten meßtechnisch leicht nachweisbar, inert, billig und unschädlich sein. Für Einleitungen ohne Auftrieb können als "neutrale" Tracer Chemikalien in geringen Mengen verwendet werden (Smart und Laidlaw, 1977). Farbstoffe wie Kaliumpermanganat, Uranin oder Rhodamin dienen der Sichtbarmachung des Einleitungsfluids. Zur quantitativen Erfassung des Konzentrationsfeldes bieten optische Meßmethoden (Fluoreszenzmessungen, Absorptionsmessungen) die besten Möglichkeiten (Barczewski, 1975).

Bei Einleitungen mit Auftrieb wird der erforderliche Dichteunterschied entweder durch Salz in entsprechender Konzentration oder aber durch eine Tempe-

raturerhöhung erzeugt. Salzkonzentrationen lassen sich mit ausreichender Genauigkeit mit Hilfe von Leitfähigkeitsmessungen erfassen, und für Temperaturfelder werden Thermoelemente oder Thermistoren verwendet.

In jedem Fall muß für eine einwandfreie Zugabe der Tracermaterialien gesorgt werden, die keine Verfälschungen der Strömungsverhältnisse mit sich bringt. In der Regel ist es vorteilhaft, das Zugabefluid in einem Mischbehälter außerhalb des Modells auf die geforderte Konzentration zu bringen; in manchen Fällen kann man jedoch auch eine vollständige Durchmischung in den Zuleitungen zum Modell erreichen.

Wasserbauliche Modelle werden stets im geschlossenen Kreislauf gefahren. Bei Versuchen mit kontinuierlicher Tracer- oder Wärmezufuhr ist deshalb dafür Sorge zu tragen, daß die Grundkonzentration bzw. Temperatur des Kreislaufs während eines Versuchs nicht erhöht wird. Hieraus ergibt sich eine maximale Versuchsdauer, die durch den Durchfluß und das Speichervolumen des Rinnensystems bestimmt wird:

$$\text{max. Versuchsdauer} \approx \frac{\text{Gesamtvolumen des Systems}}{\text{Durchfluß}} \quad (4.8)$$

Die maximale Versuchsdauer kann offensichtlich durch Vergrößerung des Wasservolumens für das Rückführungssystem (Tiefbehälter) erhöht werden, doch muß spätestens nach dieser Zeit mit einer Erhöhung der Grundkonzentration bzw. Temperatur im Kreislauf gerechnet werden, die durch entsprechende versuchstechnische Maßnahmen kompensiert werden kann. In jedem Fall ist eine ständige Kontrollmessung des Kreislaufwassers am Modelleinlauf erforderlich.

Besondere Aufmerksamkeit verlangt die Nachbildung von Abbauprozessen im Modell. Dies kann in manchen Fällen näherungsweise erreicht werden, ist jedoch meist mit sehr großem Aufwand verbunden. So erfordert beispielsweise eine modellähnliche Nachbildung der Wärmeabgabe an die Atmosphäre, daß das Modell entsprechend überhöht ausgebildet wird (siehe Bild 4.3) und daß zudem die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windverhältnisse im Modell wenigstens im Mittel nachgebildet werden: eine Forderung, die einen großen Aufwand verursacht und im allgemeinen nicht erfüllt werden kann.

Deshalb muß man sich bei der Umrechnung von Modell- auf Naturverhältnisse meist mit einer näherungsweise Berücksichtigung der Abbauprozesse begnügen. In der Regel werden die gemessenen Temperaturprofile dahingehend korrigiert, daß der Wärmestrom in allen Querschnitten gleich groß bleibt: dies entspräche dem Fall eines konservativen Tracers bzw. der Situation, daß die Wärmeabgabe im Modellbereich gleich Null ist. Wenn man nun die Zeitabhängigkeit des Abbauprozesses in der Natur kennt, dann lassen sich die im Modell gemessenen Konzentrations- bzw. Temperaturprofile nach dem jeweiligen Abbaugesetz rechnerisch abmindern. Die Zeitabhängigkeit wird hierbei mit Hilfe der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in eine Funktion des Abstands von der Einleitung umgerechnet.

4.3 Fallstudien

4.3.1 Kühlwassereinleitung in einen ungestauten Fluß

Eine der ersten modelltechnischen Untersuchungen von Ausbreitungsvorgängen in Deutschland befaßte sich mit den Auswirkungen eines Kernkraftwerks der BASF auf den Rhein bei Ludwigshafen (Naudascher und Zimmermann, 1972). Dieses Kraftwerk war mit einem Kühlwasserbedarf von $40 \text{ m}^3/\text{s}$ geplant, der bei Rheinkilometer 428,49 entnommen und um 9 K aufgewärmt 270 m weiter stromab wieder zurückgeführt werden sollte. Es war zu untersuchen, wie sich das erwärmte Wasser bei verschiedenen Rheinabflüssen mit dem Flußwasser vermischt und welchen Einfluß dabei verschiedene Bauwerksformen, Einleitwinkel und die Aufwärmspanne haben. Gleichzeitig sollte geklärt werden, ob ein hydraulischer Kurzschluß (die Rückströmung des erwärmten Kühlwassers in das Entnahmebauwerk) auftritt. Weiterhin interessierte die Größe und Verteilung der durch die Einleitung hervorgerufenen Quergeschwindigkeiten. Ziel der Untersuchung war, das Einleitbauwerk so zu gestalten, daß die Kühlwasserfahne auf eine ufernahe Zone im Rhein beschränkt bleibt und die induzierten Quergeschwindigkeiten einen Grenzwert von $0,30 \text{ m/s}$ nicht überschreiten.

Im Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratorium der Universität Karlsruhe wurde ein unverzerrtes Modell mit fester Sohle im Maßstab $1:70$ von Rheinkilometer

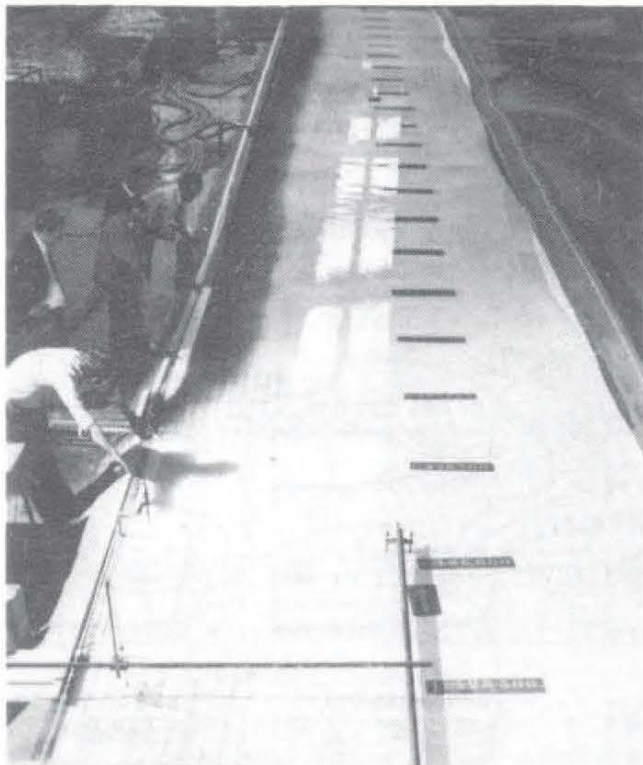


Bild 4.4: Sichtbarmachung einer Warmwasserfahne im Modell (Rhein bei Ludwigshafen)

428,0 bis 431,0 hergestellt (Bild 4.4). Damit befand sich auch die rechtsseitig gelegene Einmündung des Neckars innerhalb der Modellgrenzen. Das Modell wurde nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz betrieben. Zur Modellierung der Auftriebseffekte wurde auch die densimetrische Froudezahl im Modell gleich derjenigen des Prototyps gewählt, d.h. es wurde die gleiche Aufwärmspanne verwendet. Auf die Modellierung meteorologischer Bedingungen wurde verzichtet, da vor allem die Ausbreitung im Nahbereich interessierte. Während des Einspiels des Modells mit verschie-

denen Abflußmengen wurden Geschwindigkeitsmessungen im Modell und im Rhein verglichen. Danach erwies sich die Aufbringung zusätzlicher Rauheit als überflüssig. Möglicherweise sind die im Modell beobachteten Schichtungsercheinungen aber doch durch eine zu glatte Sohle begünstigt worden. Das unterstreicht die große Bedeutung der exakten Modellierung der Bodenrauheit (siehe Bild 4.10). Die Modellierung der zahlreichen Einleitungen und Wasserentnahmen durch die BASF auf dem linken Ufer erforderte eine Verteilungsstation mit Mengenmeßeinrichtungen, die durch die Festlegung der gleichen Aufwärmspanne für alle Einleitungen wesentlich vereinfacht wurde. Die Geschwindigkeits- und Temperaturmeßanlage war auf einer fahrbaren Meßbrücke montiert. Geschwindigkeiten wurden mit Laborflügeln und Temperaturen mit Thermoelementen aus Kupfer-Konstantan (Durchmesser: 0,25 mm, Thermospannung: 0,043 mV/K) gemessen.

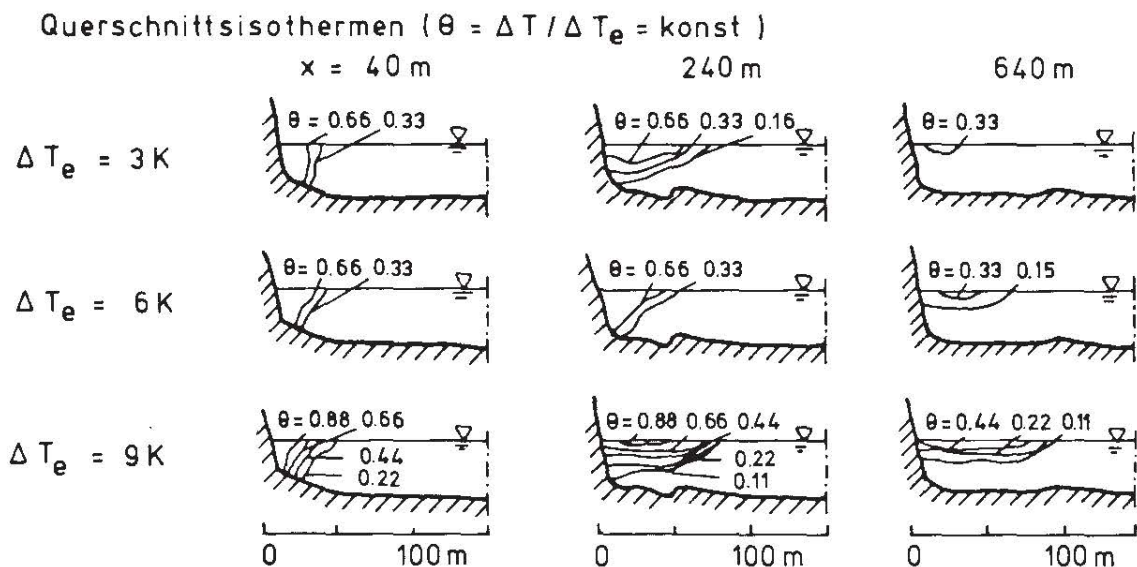
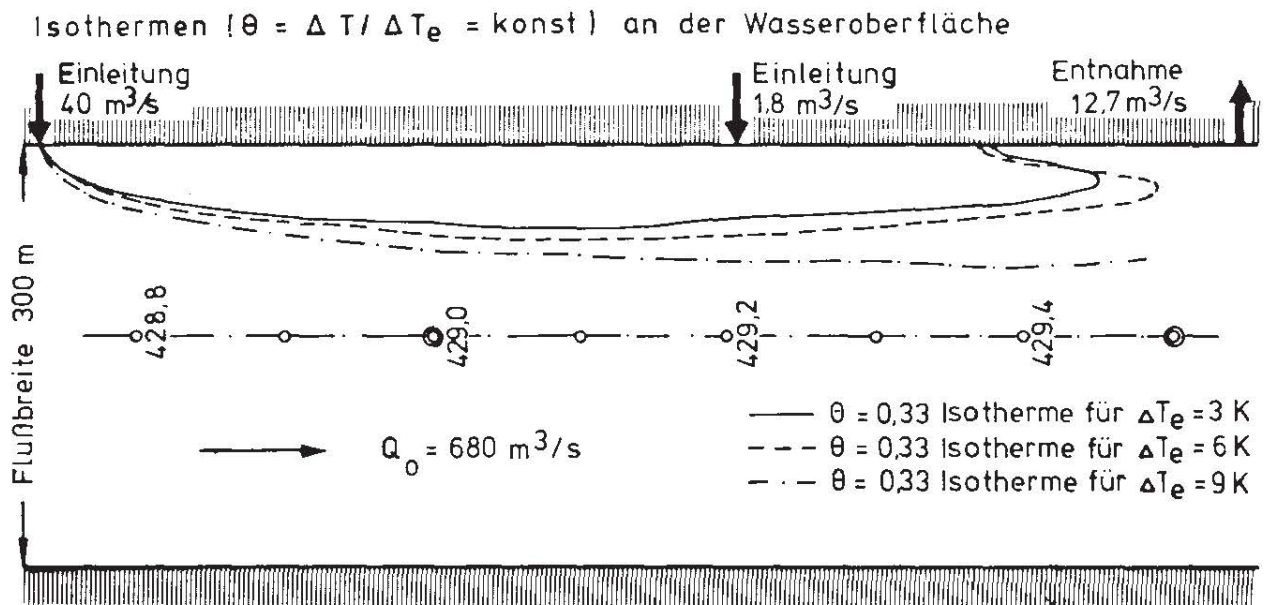


Bild 4.5: Einfluß der Aufwärmspanne ΔT_e auf die Ausbreitung im Fluß (nach Naudascher und Zimmermann, 1972)

Die Temperaturmessungen im Modell ergaben als typisches Verhalten eine relativ geringe Vermischung im unmittelbaren Bauwerksbereich. Die anfänglich recht gleichmäßige Verteilung über die Tiefe wurde unter der Wirkung der durch die Dichtedifferenz hervorgerufenen Auftriebskräfte verändert, und etwa 200 m stromab der Einleitung wurden teilweise starke Schichtungen beobachtet. Die an der Flußsohle erzeugte Turbulenz bewirkte danach auf dem weiteren Fließweg wieder einen allmählichen Ausgleich in der Vertikalrichtung. Die Fahne blieb im allgemeinen nahe am Einleitungsufer und vermischte sich nur langsam mit der Hauptströmung; die Maximaltemperatur im Querschnitt trat selten in mehr als 50 m Entfernung vom Ufer auf.

Durch die Gestaltung des Rückgabebauwerks und die Variation der Einleitwinkel konnten die Vermischungsverhältnisse nur bei niedrigen Rheinabflüssen wesentlich beeinflusst werden. Den größten Einfluß auf den Verlauf der Isothermen hatte das Verhältnis zwischen Kühlwasserstrom und Flußwasserführung, während eine Verdoppelung der Einleitgeschwindigkeit nur zu einer 1,2-fachen Verbreiterung der Warmwasserfahne führte. Andererseits ergab die Veränderung der Aufwärmspanne ein wesentlich anderes Verhalten des eingeleiteten Kühlwassers (Bild 4.5). Während sich bei $\Delta T_e = 3 \text{ K}$ geringfügige Schichtungen ausbildeten und die Warmwasserfahne nahe am Ufer verlief, traten bei $\Delta T_e = 9 \text{ K}$ sehr deutliche Schichtungserscheinungen auf, die nur langsam abgebaut wurden.

Auch die Verteilung der Quergeschwindigkeiten vor dem Bauwerk läßt sich in einem hydraulischen Modell schnell und einfach bestimmen. Die in Bild 4.6 dargestellten Modellergebnisse zeigen beispielhaft die Abhängigkeit des maximalen Uferabstands, in dem die noch zulässigen Quergeschwindigkeiten von $0,30 \text{ m/s}$ auftreten, vom Einleitwinkel α . Die Beobachtungen am Modell er-

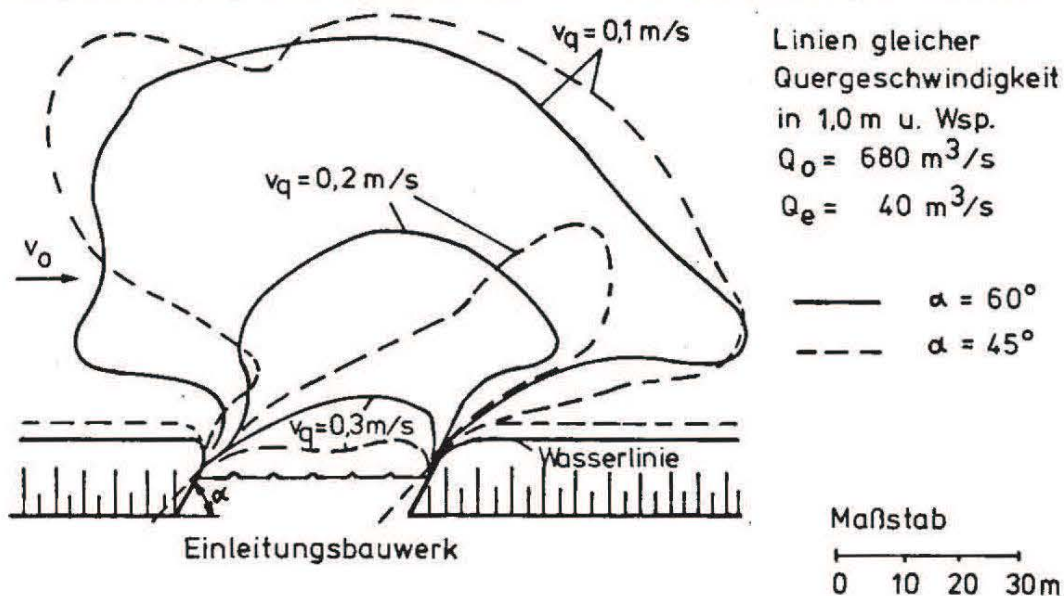


Bild 4.6: Verteilung der Quergeschwindigkeiten im Einleitungsbereich bei MNW (nach Mosonyi ¹⁾)

¹⁾ Mosonyi, E.: "Die wasserbaulichen Auswirkungen eines Kernkraftwerkes der BASF auf den Rhein bei Ludwigshafen". Teil II, Gutachten der Wasserbauinstitute I und II der Universität Karlsruhe, 1971 (unveröffentlicht)

gaben einen Einfluß der Bauwerksgestaltung nur in einem eng begrenzten Bereich in unmittelbarer Bauwerksnähe. Die Wirkung der Auftriebskräfte konnte dagegen noch in mehreren hundert Metern Entfernung von der Einleitungsstelle nachgewiesen werden. Den bedeutendsten Einfluß auf die Ausbildung der Warmwasserfahne hatte das Verhältnis des Kühlwasserstroms zur Flußwasserführung. Die relativ problemlose Anwendbarkeit eines hydraulischen Modells auch bei komplizierten Randbedingungen (zahlreiche zusätzliche Entnahmen und Einleitungen) wird durch dieses Beispiel demonstriert.

4.3.2 Kühlwassereinleitung in einen gestauten Fluß

Im Jahr 1976 wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Modellversuche für das geplante Kernkraftwerk Wyhl durchgeführt. Da das Kraftwerk im Bereich einer Staustufe liegt, erfolgt die Entnahme und Rückgabe in ein Gewässer mit geringen Fließgeschwindigkeiten. Dadurch können sowohl Probleme für die Schifffahrt durch hohe Quergeschwindigkeiten auftreten als auch die Ausbildung von Schichtungen gefördert werden. Zusätzlich ist die nur 1,5 km stromab beginnende Weisweiler Bucht als ökologisch empfindliches Gebiet durch mögliche Auswirkungen der Warmwassereinleitung besonders gefährdet.

Die mit der Kühlwassernutzung im Zusammenhang stehenden hydraulischen Verhältnisse im Rhein wurden in einem unverzerrten Modell mit fester Sohle im Maßstab 1:75 untersucht (Bild 4.7). Das Modell wurde nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz bei gleichzeitiger Übereinstimmung der densimetrischen

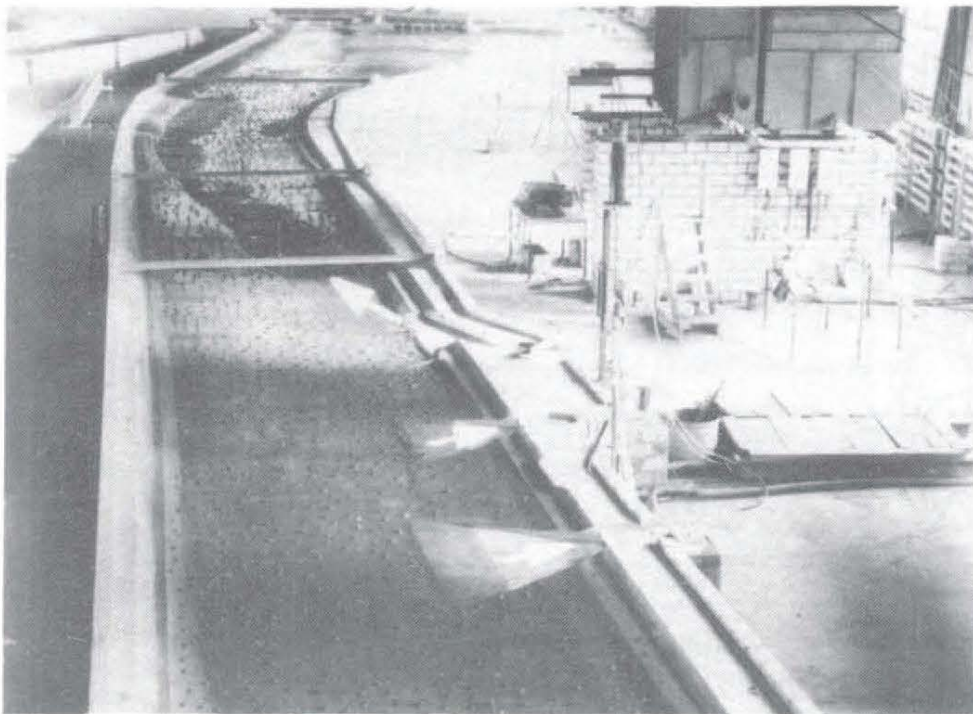
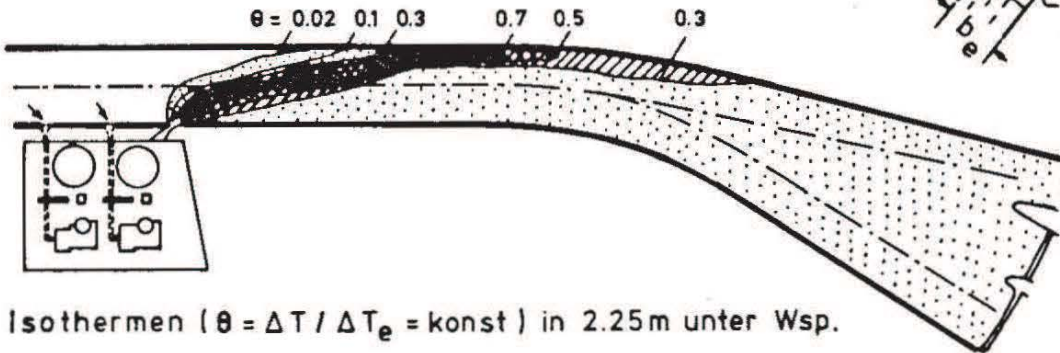


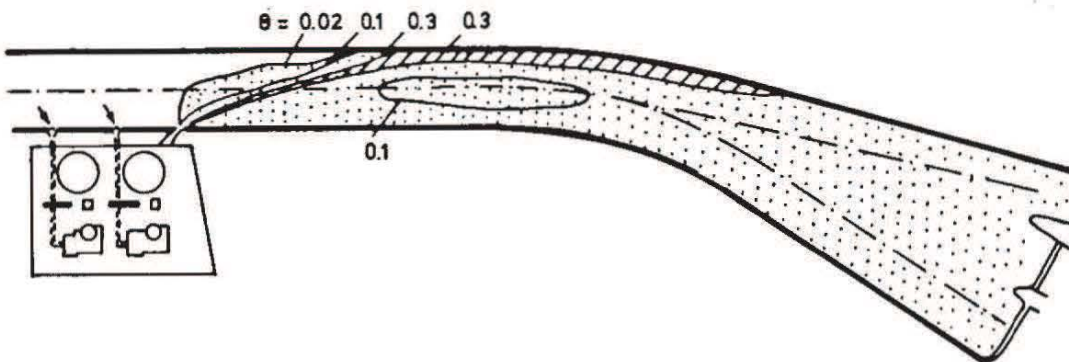
Bild 4.7: Entnahme- und Rückgabebauwerke an einem Flußmodell (Rhein bei Wyhl-Weisweil)

Einleitungsbauwerk mit Schlitzwand:

Isothermen ($\theta = \Delta T / \Delta T_e = \text{konst}$) in 0.75 m unter Wsp.

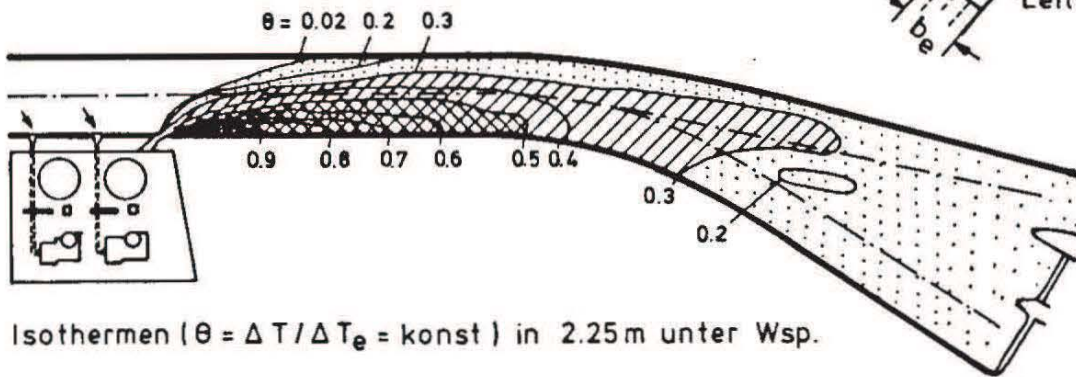


Isothermen ($\theta = \Delta T / \Delta T_e = \text{konst}$) in 2.25 m unter Wsp.



Einleitungsbauwerk mit Leitwand:

Isothermen ($\theta = \Delta T / \Delta T_e = \text{konst}$) in 0.75 m unter Wsp.



Isothermen ($\theta = \Delta T / \Delta T_e = \text{konst}$) in 2.25 m unter Wsp.

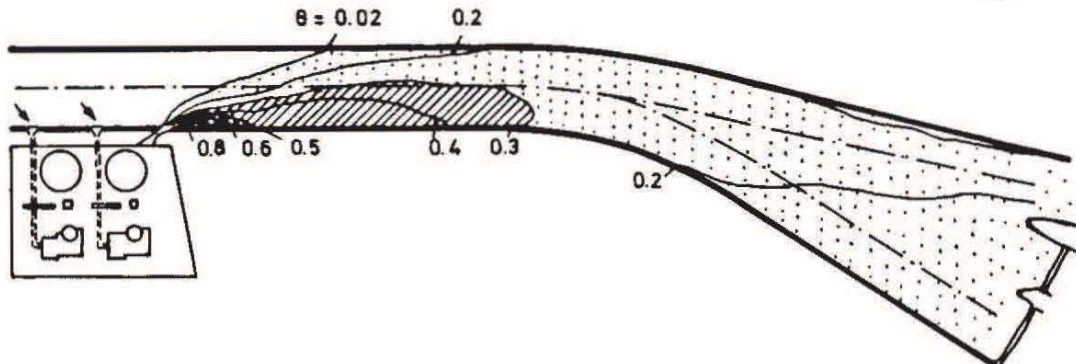


Bild 4.8: Einfluß der baulichen Gestaltung des Einleitungsbauwerks auf die Ausbreitung unter sonst identischen Versuchsbedingungen (geplantes Kernkraftwerk Wyhl, $Q_o = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_e = 130 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta T_e = 10\text{K}$)

Froudezahl (und damit der Aufwärmspanne) betrieben. Auch hier wurden meteorologische Verhältnisse nicht simuliert. Die Modellierung der Bodenreibung erforderte zusätzliche Rauheitselemente im Fluß (siehe Bild 4.7). Nachgebildet wurde ein etwa 3 km langer Flußabschnitt bis zum unterstrom liegenden Wehr. Die Versuchseinrichtung entsprach im Prinzip der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen.

Die Messungen zeigten eine Vermischung des eingeleiteten Kühlwassers mit dem Flußwasser, die mit zunehmendem Abfluß im Rhein stark intensiviert wurde. In der vorgegebenen Situation war es möglich, die Ausbreitung in einem größeren Bereich durch die bauliche Ausbildung des Rückgabebauwerks zu beeinflussen. Während sich bei der ursprünglich vorgeschlagenen Form des Einleitungsbauwerks ein scharf begrenzter Strahl mit erheblichen vertikalen und lateralen Temperaturunterschieden ausbildete, der sich am gegenüberliegenden Ufer anlegte, bewirkte die zur Verringerung der Quergeschwindigkeiten entwickelte Variante II, daß der Strahl der Einleitung nunmehr am rechten Ufer anlag (Bild 4.8). Andererseits führte diese Gestaltung auch zu verminderter Durchmischung, und die Tendenz zur Ausbildung von Schichtungen (vertikale Temperaturgradienten bis zu 3 K/m) wurde verstärkt. Außerdem wurde die ökologisch wichtige Uferzone besonders betroffen. Die langsamere Durchmischung führte auch dazu, daß in der vor dem Wehr liegenden Bucht höhere Temperaturen und vertikale Temperaturgradienten auftraten. In diesem Fall wurden also auch noch die Temperaturverhältnisse in 3 km Entfernung von der Einleitung wesentlich von Veränderungen am Bauwerk beeinflusst.

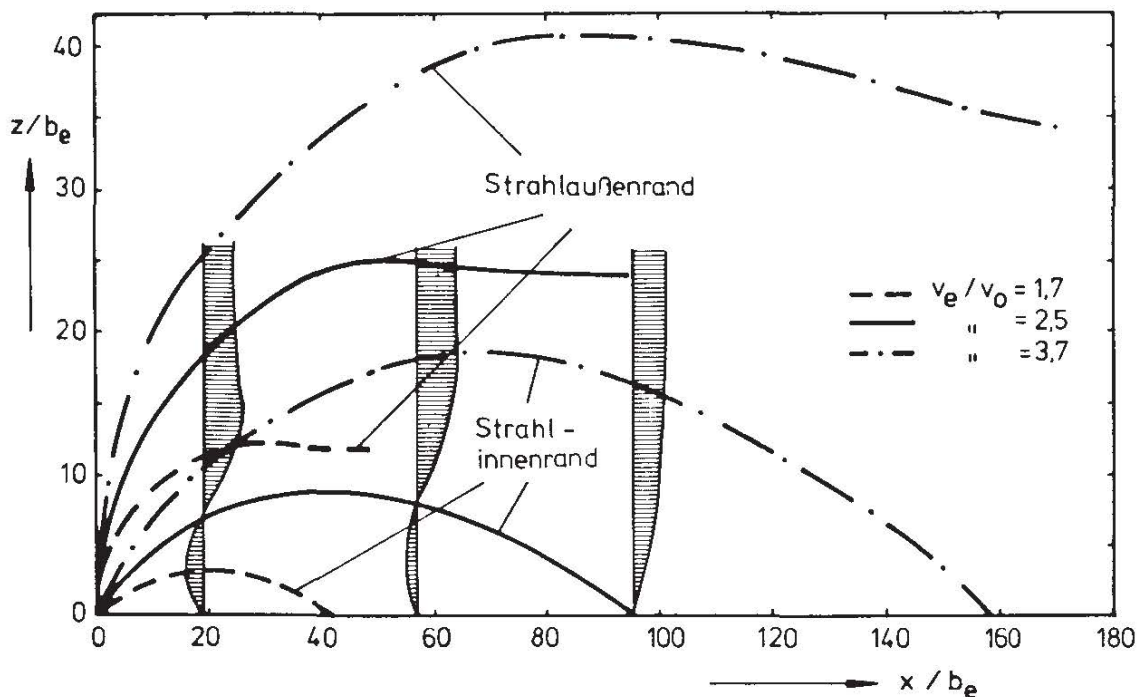


Bild 4.9: Einfluß des Geschwindigkeitsverhältnisses v_e/v_0 auf die Strahlform (Gehrig, Jurisch und Lemmin, 1976)

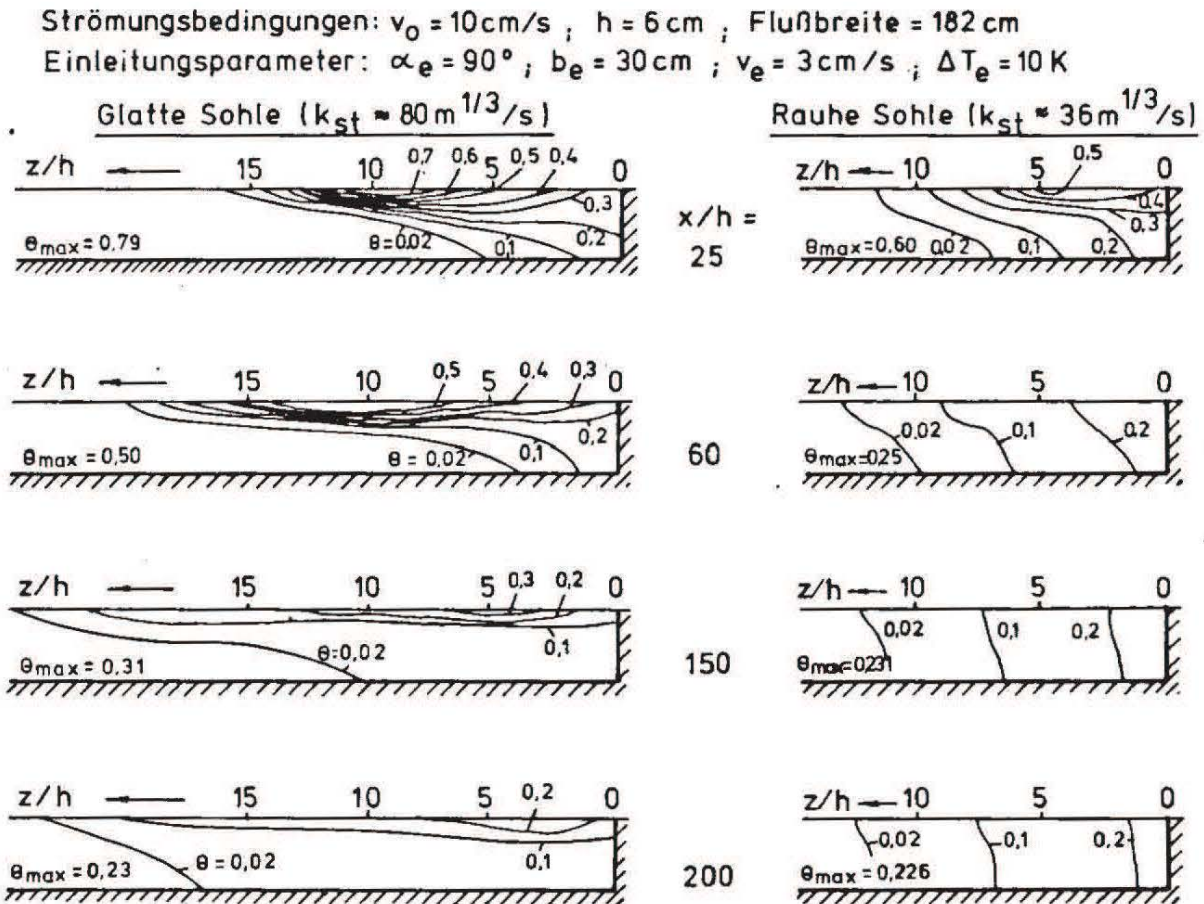


Bild 4.10: Querschnittisothermen stromab einer seitlichen Einleitung über die gesamte Wassertiefe bei glatter und rauher Sohle unter sonst identischen Versuchsbedingungen (nach Schatzmann et al., 1978)

4.3.3 Systematische Untersuchungen an seitlichen Einleitungen in Flüsse

Die bisher in der Bundesrepublik Deutschland ausgeführten Einleitungsbauwerke lassen sich nach ihrer baulichen Gestaltung klassifizieren (Geldner und Zimmermann, 1976). Das läßt die systematische Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen in hydraulischen Modellen mit vereinfachter Geometrie zumindest für den Bereich sinnvoll erscheinen, in dem die durch die großflächige Topographie des Gewässers bedingten Strömungsverhältnisse noch keine Rolle spielen. Durch gezielte Parametervariationen kann man die relative Bedeutung verschiedener Einflußgrößen für das Verhalten der Warmwasserfahne abschätzen. Solche Untersuchungen werden bereits seit längerer Zeit im Sonderforschungsbereich 80 an der Universität Karlsruhe durchgeführt. Sie sind nicht als modellmäßige Nachbildungen eines bestimmten Naturfalles aufzufassen, sondern als Prototyp, an dem mathematische Modelle entwickelt und erprobt werden können.

In Bild 4.9 ist beispielsweise der Einfluß des Geschwindigkeitsverhältnisses v_e/v_0 auf die Strahlform in Nahbereich dargestellt (nach Gehrig, Jurisch und Lemmin, 1976). Bemerkenswert ist die Ausbildung eines Rückströmgebietes bei Einleitungen über die gesamte Gerinnetiefe und $v_e/v_0 \geq 1,3$. Bei zunehmendem Geschwindigkeitsverhältnis vergrößert sich sowohl die Eindringtiefe des Strahls in die Hauptströmung als auch die Länge des Rückströmgebietes. In Bild 4.10 sind Isothermenpläne bei glatter und rauher Sohle einander gegenübergestellt. Die bei rauher Sohle erzeugte Turbulenz verhindert danach die Entwicklung von Schichtungen. Andererseits führt bei glatter Sohle der durch den Dichteunterschied hervorgerufene Quertransport zu einer raschen seitlichen Ausbreitung des Kühlwassers. Bei bestimmten hydraulischen Verhältnissen kann der dadurch bedingte "Vorsprung" zu einem verstärkten Temperaturabbau über kürzere Entfernungen führen.

Schatzmann und Naudascher (1980) haben den Einfluß der Einleitungsparameter auf die Ausbreitung im Fernfeld summarisch beschrieben durch einen virtuellen Quellenabstand x_v , um den eine Punktquelle gleicher Ergiebigkeit wie die tatsächliche Einleitung nach oberstrom verschoben werden müßte, um im Fernfeld dieselbe Varianz zu erzeugen. Sie geben ein Bemessungsdiagramm an, aus dem x_v in Abhängigkeit von einer Stabilitätskennzahl und einer virtuellen Mischwassermenge entnommen werden kann.

4.4 Zusammenfassung und Bewertung

Ausbreitungs- und Transportvorgänge von Wasserinhaltsstoffen im Nahbereich von Einleitungen lassen sich in unverzerrten Flußmodellen mit ausreichender Genauigkeit modellieren. Dies gilt für neutrale Wasserinhaltsstoffe und auftriebsbehaftete Einleitungen (Dichteunterschiede zufolge Salzgehalt- oder Temperaturunterschied) gleichermaßen.

Die korrekte Modellierung der Ausbreitungsvorgänge beschränkt sich auf den Nahbereich der Einleitung, in dem die Bodenreibung sowie Abbaureaktionen oder Wärmeabgabe des Gewässers von untergeordneter Bedeutung sind. Eine Modellierung dieser Einflußgrößen macht eine Modellüberhöhung erforderlich, was wiederum eine Verzerrung der Ausbreitungsvorgänge zur Folge hat. Dies ist für Flußmodelle wegen der Querschnittsverzerrungen in der Regel nicht ohne Einschränkungen der Modellähnlichkeit möglich. Unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. große Breiten-Tiefenverhältnisse) sind Überhöhungen aber auch für Ausbreitungsmodelle unter Umständen akzeptabel.

Für Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Flüssen bietet sich aufgrund der eindeutig vorgegebenen Strömungsrichtung und der relativ einfachen Verhältnisse im Fernfeld eine Kombination von unverzerrten Labormodellen für das Nahfeld mit einfachen mathematisch-numerischen Fernfeldmodellen an.

Darüber hinaus eignen sich hydraulische Ausbreitungsmodelle vor allem zur Untersuchung von Teilbereichen, für die jeweils andere Ähnlichkeitsgesetze maßgebend und damit auch unterschiedliche Überhöhungen erforderlich sein können.