Untersuchungen am Luftmodell zur strömungstechnisch günstigen Gestaltung von Entnahmebauwerken an Flüssen

B. WESTRICH und H. KOBUS*)

1. Einleitung

Der Bedarf der Industrie an Brauch- und Kühlwasser muß in hochindustrialisierten und dichtbesiedelten Ländern wie der Bundesrepublik Deutschland zu einem großen Teil aus Oberflächenwasser gedeckt werden. Bei der Entnahme von Rohwasser aus fließenden Gewässern läßt sich kaum vermeiden, daß gleichzeitig auch mitgeführte Feststoffe entnommen werden, die durch entsprechende Aufbereitungsmaßnahmen dem Rohwasser entzogen werden müssen. Um Investitionen und Betriebskosten der Reinigungsanlagen auf ein wirtschaftliches Maß zu beschränken, ist es erforderlich, die in den Entnahmestrom gelangenden Feststoffe durch eine hydraulisch günstige Gestaltung des Entnahmebauwerks auf ein Minimum zu reduzieren. Die von einem Fluß mitgeführten organischen und anorganischen absetzbaren Stoffe vermindern nicht nur unmittelbar die Qualität des Brauchwassers, sondern können auch zur Erhöhung der Druckverluste im Verteilersystem und zur Verminderung des Wärmeübergangs in Wärmetauschern führen. Besonders unerwünscht sind Ablagerungserscheinungen vor und im Entnahmebauwerk, die in extremen Fällen den Totalausfall der Anlage zur Folge haben können. Während eine kontinuierliche Zufuhr von Schmutzstoffen durch entsprechende Dimensionierung der Reinigungsanlagen aufgefangen werden kann, können örtliche Verlandungserscheinungen bei starker Erhöhung der Wasserentnahme zu einer kurzzeitigen Überlastung der Reinigungsanlagen und zu deren Ausfall führen. Totale oder teilweise Verlandungserscheinungen machen meist aufwendige Baggerarbeiten erforderlich, die mit einer zeitweiligen Stilllegung des Entnahmebauwerks verbunden sind, während aus betriebstechnischen Gründen eine kontinuierliche Funktionsfähigkeit der Entnahmeanlage erstrebenswert ist.

Die Feststofffracht eines Flusses hängt von den hydro- und geologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet sowie von stromauf gelegenen Schmutzwasser- und Abwassereinleitungen ab. Bei einer seitlichen Entnahme wird die Strömung in Ufernähe umgelenkt, wobei sich am Boden eine verstärkt umgelenkte Sohlströmung einstellt, die bei geschiebeführenden Flüssen einen unverhältnismäßig hohen Geschiebeanteil unmittelbar in die Entnahme transportiert [1]. In solchen Fällen bietet sich bei gekrümmten Flußstrecken als günstigster Entnahmeort das Außenufer an, da dort die Sekundärströmung dem Geschiebeeintrieb entgegenwirkt. Bei Flüssen mit überwiegendem Schwebstofftransport dagegen ist die Schwebstoffkonzentration relativ gleichmäßig über die gesamte Wassertiefe verteilt. Während Geschiebeablagerungen mit strömungsabweisenden Grundschwellen, Spülkanälen oder Geschiebefängen merklich reduziert werden können, sind Schwebstoffablagerungen fast ausschließlich durch verzögerungs- und ablösungsfreie Einströmungsverhältnisse zu vermeiden [10]. Die Frage nach einer strömungsgünstigen Einlaufform zur Vermeidung von Schwebstoffablagerungen soll hier vorrangig behandelt werden. Die Aufgabe besteht vor allem darin, die Brauchwasser-Entnahmebauwerke so zu gestalten, daß in den Entnahmebereich gelangende Feststoffe direkt und kontinuierlich durch das Entnahmebauwerk in die Reinigungsanlagen transportiert werden und somit Verlandungserscheinungen im Einlaufbereich vermieden werden können.

In den vergangenen vier Jahrzehnten wurden anhand zahlreicher Modelluntersuchungen Vorschläge erarbeitet, wie durch konstruktive Maßnahmen der Feststoffeintrieb in eine Entnahme verringert werden kann [1; 3; 7; 10]. Während aufwendige Maßnahmen gegen die Verlandungsgefahr beim Bau von Flußkraftwerken und ähnlichen Stauanlagen durchaus sinnvoll sind, lassen sie sich für die Mehrzahl industrieller Brauchwasserentnahmen an schiffbaren Flüssen schon deshalb nicht realisieren, weil eine Verbauung des Flußquerschnitts in der Regel nicht zulässig ist. Hieraus ergibt sich die praktische Forderung, Entnahmebauwerke für industrielles Kühl- oder Brauchwasser dem Uferprofil anzupassen und so zu gestalten, daß Verlandungstendenzen bei Entnahme der Ausbauwassermenge auf ein Minimum reduziert werden. An schiffbaren Flüssen dürfen zudem bestimmte Quergeschwindigkeiten (im allgemeinen $v = 0{,}3$ m/s) im unmittelbaren Entnahmebereich nicht überschritten werden, um eine Gefährdung der Schiffahrt durch Querströmung zu vermeiden.

Eine umfassende Zusammenstellung bestehender Entnahmebauwerke an deutschen Gewässern von *Sauer* [6] zeigt, daß eine Großzahl ausgeführter Bauwerke an Flüssen hinsichtlich der Verlandungsgefahr und damit der Störanfälligkeit und Betriebssicherheit nur unzureichend ausgestaltet wurden. Allgemeingültige Kriterien zur Gestaltung von Entnahmebauwerken vom betrachteten Typ können aus den rein qualitativen Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Strömung und Feststoffeintrag allerdings nicht abgeleitet werden.

Anlaß zu der vorliegenden Untersuchung war eine im Auftrag der BASF Ludwigshafen durchgeführte Studie zur Ermittlung der hydraulisch günstigen Gestaltung eines Einlauf-

*) Dr.-Ing. *B. Westrich* und Prof. Dr. *H. Kobus*, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, 75 Karlsruhe.

bauwerkes zur Entnahme von Brauchwasser am linksrheinischen Ufer. Über die spezifische Aufgabenstellung hinaus wurden weiterführende systematische Modellversuche durchgeführt mit dem Ziel, allgemeingültige Entwurfskriterien für die Gestaltung des Einlaufs und die Anordnung von Entnahmebauwerken gleichen Typs unter verschiedenen Abflußbedingungen im Fluß und unterschiedlichen Entnahmemengen zu gewinnen. Der Untersuchung wurde als einfachster Fall stets eine gerade Flußstrecke zugrundegelegt, obwohl der Einfluß krümmungsbedingter Sekundärströmungen wichtig sein kann. Es wurde ein für weite Strecken des Rheins zutreffendes Fluß- und Uferprofil gewählt, das gleichzeitig auch typisch ist für die Verhältnisse an anderen schiffbaren Flüssen.

2. Modelldarstellung und Untersuchungsprogramm

Die Möglichkeiten, Strömungs- und Absetzvorgänge mit feinkörnigen Suspensionen modellgerecht darzustellen, sind sehr begrenzt. Bei voller Modellähnlichkeit muß die Flußströmung sowohl nach dem *Froude*schen als auch nach dem *Reynolds*schen Ähnlichkeitsgesetz nachgebildet werden, und zudem müssen die Eigenschaften des suspendierten Feststoffs modellgerecht simuliert werden. Die strenge Einhaltung all dieser Forderungen ist modelltechnisch kaum realisierbar. Nur Untersuchungen an relativ großen und anhand von aufwendigen Naturmessungen geeichten Wassermodellen liefern zufriedenstellende Aussagen über Verlandungstendenzen aufgrund vergleichender Betrachtungen der verschiedenen Modellversuchsergebnisse untereinander und mit den Naturmeßdaten.

Die Ablagerungs- bzw. Erosionserscheinungen stehen mit den örtlichen Strömungsverhältnissen in direkter Wechselwirkung. Da das Vorhandensein von Verzögerungs- und Rückströmgebieten eine notwendige Voraussetzung für Ablagerungen ist, liefert die Größe von Ablösezonen direkte Hinweise auf die Ausdehnung zu erwartender Verlandungsbereiche. Es liegt daher nahe, in Modellversuchen ausschließlich die Strömungsverhältnisse im Einlaufbereich zu untersuchen und hieraus qualitative Rückschlüsse auf Anlandungstendenzen zu ziehen. Eine strömungstechnische Optimierung der Einlaufgeometrie muß daher eine schrittweise Reduzierung der formbedingten Verzögerungs- und Ablösegebiete zum Ziel haben.

Für ein wasserbauliches Modell gilt die Ähnlichkeitsforderung, daß im Modell gleichzeitig die *Froude-Zahl* (Verhältnis von Schwerkrafteinfluß zu Trägheitsreaktion) und die *Reynolds-Zahl* (Verhältnis von Zähigkeitskraft zu Trägheitsreaktion) denselben Wert wie in der Natur aufweisen muß. Allerdings sind unter üblichen Entnahmebedingungen die zufolge der Schwerkraft auftretenden Verformungen des Wasserspiegels im allgemeinen vernachlässigbar klein (d. h. *kleine Froude-Zahlen*) und können daher nur unwesentlichen Einfluß auf das Strömungsbild haben. Für die Ausbildung von Ablösegebieten ist vielmehr das Verhältnis von Zähigkeitskräften und Trägheitsreaktionen (d. h. *Reynolds-Zahl*) entscheidend: Eine modellgerechte Darstellung dieser Erscheinungen wird somit durch Einhalten des *Reynolds*schen Ähnlichkeitsgesetzes gewährleistet. Bei Wasserentnahmen an Flüssen herrschen in der Regel vollturbulente Verhältnisse vor. Eine naturgetreue Nachbildung der Strömungsverhältnisse im Modell läßt sich somit gewährleisten, wenn auch im kleinmaßstäblichen Modell vollturbulente Verhältnisse erreicht werden. Im Gegensatz zum Wassermodell mit freier Oberfläche kann in einem weit weniger aufwendigen Luftmodell die *Reynoldszahl* durch Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit erhöht und damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Naturverhältnisse gewährleistet werden [5; 8].

Der Untersuchung wurde ein Entnahmebauwerk mit standardisierten Einzelelementen zugrundegelegt, die im Baukastensystem je nach den spezifischen Bedürfnissen zusammengefügt werden können. Als Grundelement wurde nach baulichen und betriebstechnischen Gesichtspunkten ein Entnahmekanal gewählt, der 5 m lichte Breite aufweist und auf eine Entnahmekapazität von 10000 bis 15000 m^3/h ausgelegt ist. Untersucht wurden Bauwerke, die sich aus zwei, drei oder vier solchen Kanälen zusammensetzen.

Es wurden stets einfache geometrische Konfigurationen des Einlaufs gewählt, um eine bautechnisch einfache und kostensparende Ausführung zu ermöglichen. Sämtliche Anschnitte der Uferböschung wurden senkrecht ausgebildet, so daß sie in der Natur als einfache Spundwände ausgebildet werden können. Über die Uferlinie hinausragende Verbauungen des Flußquerschnitts wurden im Hinblick auf die Anforderungen der Schiffahrt stets vermieden. Ferner wurde berücksichtigt, daß bei Abweichungen des Entnahmewinkels φ_E von 90^0 der zu erwartenden Verringerung des Ablösegebiets im Einlaufbereich stets eine Zunahme der beanspruchten Uferlänge und der Bauwerksabmessungen und damit auch der Baukosten entgegensteht.

Die Experimente am Luftmodell wurden in zwei aufeinanderfolgenden Teilen durchgeführt. Im ersten Teil wurde an einem zweidimensionalen Luftmodell ein qualitativer Überblick über die Strömungsverhältnisse in horizontalen Ebenen gewonnen und eine erste Auswahl strömungsgünstiger Grundrißanordnungen des Einlaufbauwerks getroffen. Die aufgrund dieser Voruntersuchungen als optimal erachtete Bauwerksanordnung wurde dann in ein dreidimensionales Modell eingebaut, in dem sowohl der Einfluß der Geschwindigkeitsverteilung im Fluß als auch der Einfluß der Form des Übergangs von der Böschung zu den Einlaufkanälen näher untersucht wurden. Der Modellmaßstab wurde mit 1:50 für das zweidimensionale und 1:75 für das dreidimensionale Modell so gewählt, daß der gesamte von der Entnahme direkt beeinflußte Strömungsbereich im Modell nachgebildet werden konnte.

Die für die Beurteilung der strömungstechnisch günstigen Gestaltung der Entnahme entscheidenden Kriterien sind die Längs- und Querausdehnungen (l und b) des Rückströmungsgebietes an der Wasseroberfläche, sowie der hierdurch beeinflußte Grad der Ungleichförmigkeit der Anströmung der einzelnen Entnahmekanäle ($V_{max} - V_{min}$). Diese Größen sind bei Entnahme an größeren, breiten Flüssen eine Funktion der Entnahmegeschwindigkeit V_E, der Flußgeschwindigkeit V_F, der Flußwassertiefe y_F, der Einlaufhöhe s, der Entnahmelänge L, der Einlauf- und Ufergeometrie sowie des Uferabstandes B und des Entnahmewinkels φ_E (*Bild 1*). In dimensionsloser Form läßt sich dieser Zusammenhang angeben zu

$$\left.\begin{matrix} l/L \\ b/L \\ (V_{max}\ V_{min})/V_E \end{matrix}\right\} = f\left(\frac{V_E}{V_F}, \frac{y_F}{s}, \frac{s}{L}, \frac{B}{L}, \varphi_E, \text{Form}\right)$$

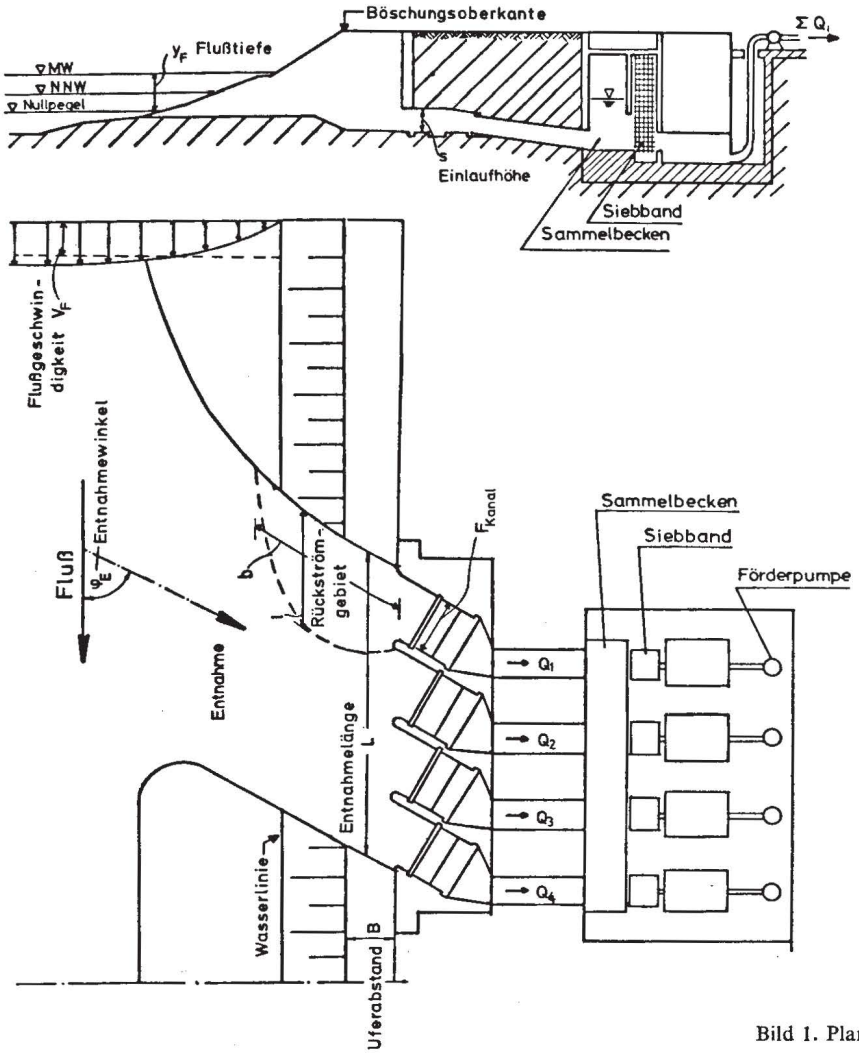

Bild 1. Planskizze eines Entnahmebauwerks mit 4 Einzelkanälen.

Hieraus ist ersichtlich, daß die Einströmverhältnisse sowohl von der Anordnung und Ausbildung der Einlaufgeometrie (s/L; B/L; φ_E; Form) abhängig sind als auch von den Betriebszuständen und Flußwasserständen. Bei vorgegebener Bauwerksgeometrie ändern sich die Strömungsverhältnisse sowohl mit dem Verhältnis von Entnahme- zu Flußgeschwindigkeit (V_E/V_F) als auch mit dem relativen Flußwasserstand (y_F/s). Hierbei ist zu beachten, daß bei gegebener Wasserführung eines Flusses die Geschwindigkeit V_F und die Wassertiefe y_F gemäß der spezifischen Pegelkurve miteinander gekoppelt sind.

3. Zweidimensionales Modell

Im zweidimensionalen Luftmodell wurde der Einfluß des Winkels φ_E zwischen Bauwerksachse und Strömungsrichtung, der Geometrie der oberstromseitigen Einlaufberandung der Zahl der Entnahmekanäle sowie des Geschwindigkeitsverhältnisses V_E/V_F auf das Strömungsbild, insbesondere im Hinblick auf Ablöse- und Rückströmgebiete qualitativ untersucht. Die Möglichkeit einer Verschwenkung der einzelnen Entnahmekanäle auf $\varphi_E = 90^0$, 60^0 und 45^0 wurde untersucht.

Das Modell im Maßstab 1:50 (*Bild 2*) bestand aus zwei horizontalen parallelen Glasplatten mit einem Zwischenabstand von 5 mm, in dem mit Hilfe eines Gebläses eine ebene Luftströmung erzeugt wurde. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden so gewählt, daß stets vollturbulente Strömungsverhältnisse vorlagen. Die Stromlinien wurden mit Hilfe eines Sohlanstrichs (Mischung aus Talkpuder und Petroleum) sichtbar gemacht. Die Ausbildung der Einlaufquerschnitte (*Bild 1*) wurde stets so gewählt, daß im Mittel eine Beschleunigung der Strömung zum Einlauf hin auftrat.

Die Untersuchungen an 4 Entnahmekanälen bei einem Entnahmewinkel von 90^0 zeigen deutlich, daß besonders bei kleinen Geschwindigkeitsverhältnissen ($V_E/V_F = 0{,}25$) sehr ungünstige Anströmungsverhältnisse herrschen. Es bildet sich oberstromseitig eine große Ablösezone aus, die mit wachsendem Uferabstand B zunimmt und eine stark verminderte Beaufschlagung der stromauf gelegenen Entnahmekanäle zur Folge hat. Bei zunehmendem Geschwindigkeitsverhältnis V_E/V_F ist eine Verringerung der Ablösezone zu erkennen. Der Anströmwinkel der Kammertrennwände ist besonders bei kleinen Uferabständen ($B = 5$ bis 10 m) ungünstig, so daß auch an einzelnen Trennwänden Ablösungserscheinungen auftreten, während die oberstromseitige Ablösezone in Länge und Breite mit abnehmendem Uferabstand kleiner wird.

Durch Drehung der einzelnen Entnahmekanäle auf einen Entnahmewinkel von 60^0 wurde eine Verbesserung der Anströmungsverhältnisse erzielt, da die schwächere Umlenkung der Flußströmung eine geringere Ablösungstendenz zur Folge hat. Es zeigte sich, daß die Zone der Strömungsablösung bei Verschwenkung des gesamten Bauwerks um den am weite-

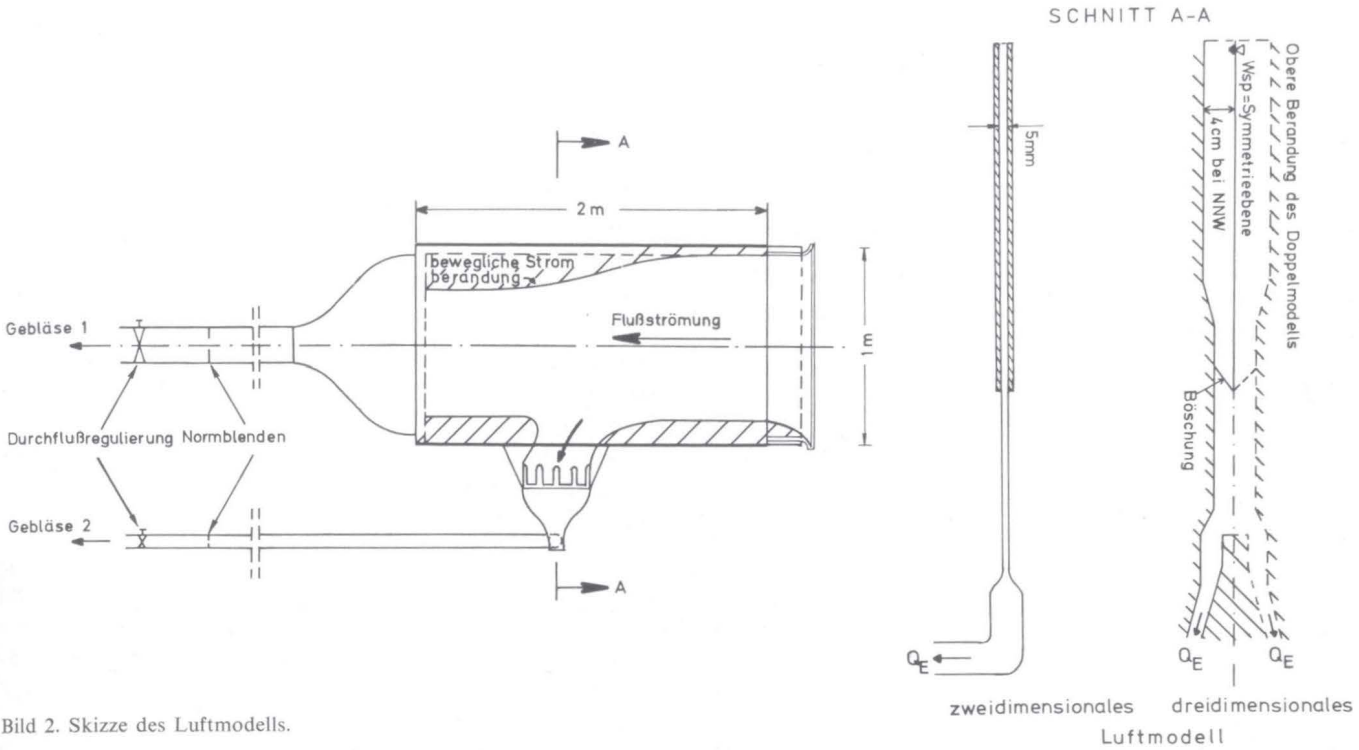

Bild 2. Skizze des Luftmodells.

sten stromab gelegenen Punkt des Einlaufquerschnitts größer ist als bei Drehung der einzelnen Kanäle. Durch ein Vorziehen der Kammerwände wurde die Größe der Strömungsablösung weiter reduziert (*Bild 3*). Eine weitere Verschwenkung des Bauwerks bzw. der einzelnen Kammern auf einen Entnahmewinkel von 45° konnte nur noch sehr geringfügige Verbesserungen bezüglich der Strömungsablösung bringen, die jedoch in keinem Verhältnis zu der damit verbundenen starken Zunahme der erforderlichen Uferlänge stehen.

Bei der Festlegung der im dreidimensionalen Modell zu untersuchenden Variante wurde davon ausgegangen, daß die Messungen an 4 Entnahmekanälen die allgemeinsten Aussagen liefern, da hier das relativ größte Ablösegebiet auftritt und die ungleiche Verteilung der Entnahmemengen auf die Einzelkammern am deutlichsten in Erscheinung tritt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich zuverlässig auch auf Anordnungen mit 3 oder 2 Entnahmekanälen anwenden.

4. Dreidimensionales Modell

In den Untersuchungen der naturähnlichen Zuströmung zum Entnahmebauwerk wurde der Einfluß des Entnahmewinkels,

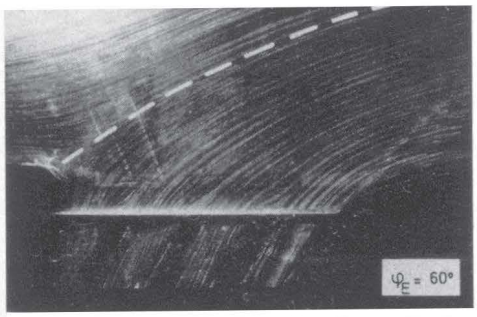

Bild 3. Günstige Anströmverhältnisse bei Entnahmewinkel $\varphi_E = 60^0$ und kleinem Uferabstand ($B/L = 0{,}2$) und großem Geschwindigkeitsverhältnis ($V_E/V_F = 1{,}3$).

der Wassertiefe und einer Ausrundung der stromauf gelegenen Böschung auf die Geschwindigkeitsverteilung im Bereich des Einlaufs quantitativ ermittelt. Es wurde ein Bauwerk mit 4 Entnahmekanälen bei Entnahmewinkeln von $\varphi_E = 90^0$ und 60^0 untersucht, wobei jeweils zwei Flußwasserstände (niedriger und mittlerer Wasserstand) bei unterschiedlichen Entnahmemengen betrachtet wurden.

Im dreidimensionalen Modell (Maßstab 1:75) wurde auf die naturgetreue Nachbildung der Ufergeometrie und der Geschwindigkeitsverteilung im Fluß geachtet. Hierfür wurden als typische Verhältnisse für einen großen schiffbaren Fluß die Ufergeometrie und die Geschwindigkeitsverteilung des Rheins bei Ludwigshafen zugrundegelegt. Zur einwandfreien Nachbildung der Strömungsverhältnisse wurde eine symmetrische Doppelausführung des Modells gewählt, wobei die Symmetrieebene im Luftmodell der freien Wasserspiegelebene in der Natur entspricht (*Bild 2*). Diese Spiegelungstechnik ermöglicht eine sehr gute Nachbildung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung in Oberflächennähe. Durch eine gitterartige Verbauung des Ansaugquerschnittes konnte die in Natur gemessene horizontale Geschwindigkeitsverteilung der Flußströmung ebenfalls gut nachgebildet werden. Das Strömungsfeld im Bereich des Einlaufs wurde nach Geschwindigkeitsrichtung und Betrag mittels einer Richtungssonde und eines *Prandtl-Rohres* ausgemessen. Die Strömungsverhältnisse im dreidimensionalen Modell sind in verschiedenen Horizontalebenen stark unterschiedlich und weichen beachtlich von den zweidimensionalen Verhältnissen ab. Es bilden sich räumliche Rückströmgebiete aus, deren max. horizontale Ausdehnung an der Wasseroberfläche vorliegt. Die Ausdehnung des Rückströmgebiets an der Wasseroberfläche ist in den *Bildern 4* und *5* dargestellt.

Aus *Bild 4* wird deutlich, daß bei vorgegebenem Entnahmewinkel φ_E die relative Längenausdehnung l/L mit zunehmendem Entnahmegeschwindigkeitsverhältnis V_E/V_F rasch abnimmt und daß das Rückströmgebiet bei einer Entnahme

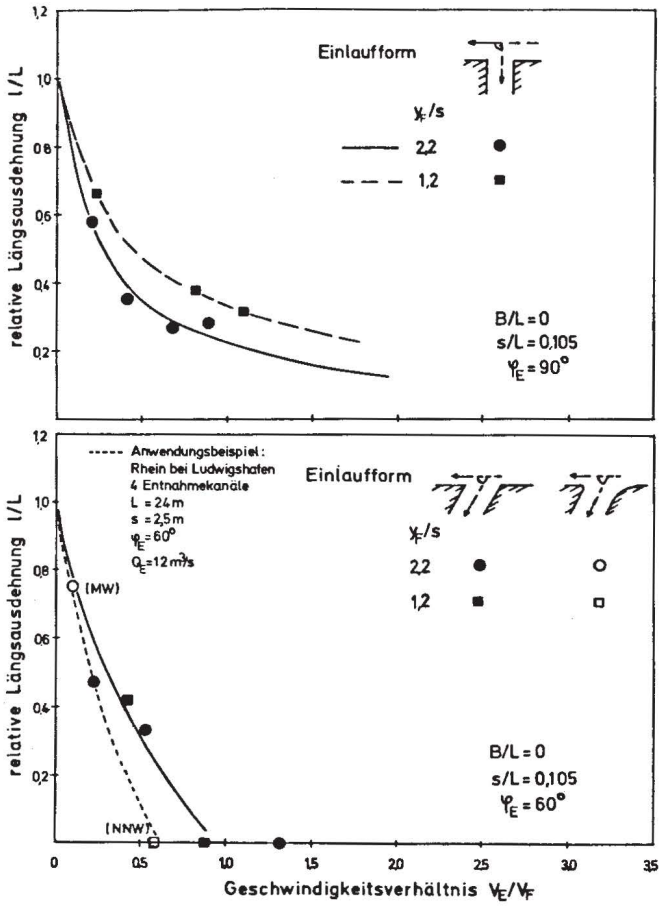

Bild 4. Längsausdehnung des Rückströmgebiets bei Entnahmewinkeln von 90° und 60°.

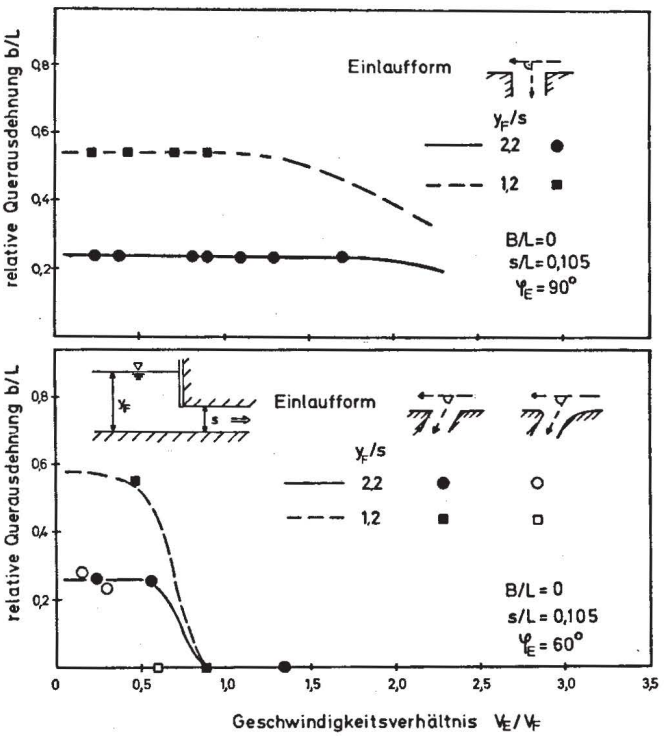

Bild 5. Querausdehnung des Rückströmgebiets bei Entnahmewinkeln von 90° und 60°.

unter 60° bei größeren Entnahmegeschwindigkeitsverhältnissen (V_E/V_F > ca. 1) gänzlich verschwindet. Der Einfluß der relativen Wassertiefe y_F/s ist hierbei vergleichsweise unbedeutend: Bei einer Entnahme unter 90° wird die Rückströmzone bei größeren Wassertiefen etwas kleiner. Dies hat zweierlei Gründe: Zum einen wird das Kontraktionsverhältnis y_F/s größer und damit günstiger, und zum anderen rückt wegen der Böschungsneigung die Wasserlinie und somit der Ablösepunkt der Strömung mit steigendem Wasserstand näher an das Bauwerk heran.

Ergänzend hierzu zeigt *Bild 5*, daß die relative Breitenausdehnung b/L des Rückströmgebiets vorwiegend geometriebedingt ist. Während b/L bei Entnahme unter 90° für einen weiten Bereich von Geschwindigkeitsverhältnissen unverändert bleibt, zeigt sich bei einem Entnahmewinkel von 60° eine rasche Abnahme von b/L mit zunehmendem Entnahmegeschwindigkeitsverhältnis. Auch hier ergeben sich geringere Werte für die Ausdehnung des Rückströmgebiets bei größeren relativen Wassertiefen y_F/s.

Für einen Fluß besteht jeweils eine eindeutige Beziehung zwischen Durchfluß und Wasserstand – also zwischen mittlerer Flußgeschwindigkeit V_F und Wassertiefe y_F – anhand der spezifischen Pegelkurve. In *Bild 4* ist als Anwendungsbeispiel ein Entnahmebauwerk am Rhein bei Ludwigshafen eingezeichnet, für das sich bei Niedrigwasser- (NNW) bzw. Mittelwasserverhältnissen (MW) aus der entsprechenden Pegelkurve die im Diagramm angedeuteten Beziehungen für die Größe des auftretenden Rückströmgebiets ergeben. Die Verhältnisse bei Flußströmungen mit abweichender Pegelkurve V_F (y_F) können in gleicher Weise aus den angegebenen Daten (*Bild 4* und *5*) bestimmt werden. Obwohl die funktionale Abhängigkeit von y_F/s durch die Experimente nur schwach belegt ist, dürfte dies wegen der sekundären Bedeutung dieses Parameters für praktische Zwecke ausreichen.

Selbst bei sehr ungünstigen Entnahmebedingungen (V_E/V_F = 0,12) kann in den bodennahen Strömungsschichten (bis etwa 1 m über der Sohle) im gesamten Einlaufbereich mit einer zum Einlauf hin gerichteten Geschwindigkeit gerechnet werden, wie die in *Bild 6* dargestellten Geschwindigkeitsmessungen zeigen. Hieraus folgt die für die Praxis wesentliche Erkenntnis, daß selbst bei extremen Abflußverhältnissen in Sohlennähe eine ablösungsfreie Strömung vorliegt, obwohl an der Oberfläche eine starke Ablösezone sichtbar werden kann. Zufolge der raschen Geschwindigkeitsabnahme gegen die Flußsohle hin erfahren die sohlnahen Schichten aufgrund des vorhandenen Druckgradienten senkrecht zur Strömungsrichtung auf gleicher Weglänge eine stärkere Richtungsänderung als die oberflächennahen Schichten und weisen somit stets weniger Tendenz zur Ablösung auf.

Bild 7 zeigt die entsprechenden Geschwindigkeits- und Durchflußverhältnisse im Einlaufbereich bei Niedrigwasserführung des Rheins. Zufolge der verminderten Strömungsgeschwindigkeit V_F im Fluß liegt hier ein wesentlich höheres Entnahmegeschwindigkeitsverhältnis V_E/V_F vor, bei dem keine Rückströmungszone mehr auftritt. Trotzdem werden die einzelnen Kanäle auch hier unterschiedlich beaufschlagt, wenngleich auch nicht in dem starken Maß wie dies bei Anströmung mit Ablösezonen (*Bild 6*) der Fall ist.

Die ungleiche Verteilung der Durchflüsse durch die Entnahmekanäle ist ein Maß für die Belastung bzw. Auslastung der Einzelkanäle. Bezeichnet man die mittlere Geschwindig-

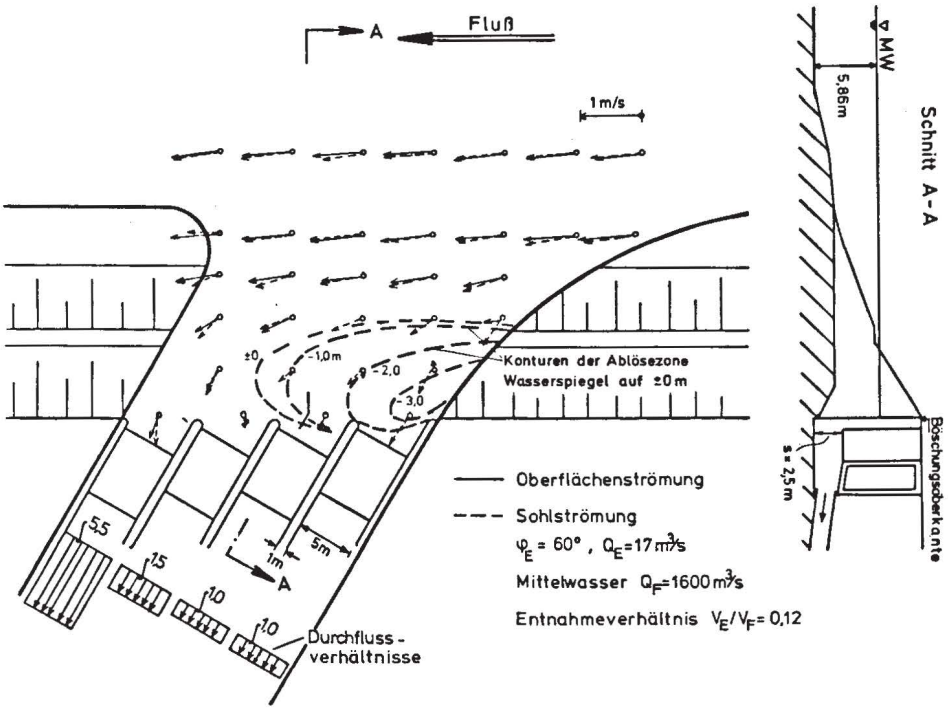

Bild 6. Geschwindigkeitsverhältnisse im Einlaufbereich eines Entnahmebauwerks am Rhein bei Mittelwasser (1600 m³/s).

keit im Kanal mit der stärksten Beaufschlagung mit V_{max} und entsprechend die mittlere Geschwindigkeit im Kanal mit dem kleinsten Durchsatz mit V_{min}, dann läßt sich ein *Ungleichförmigkeitsgrad* als Maß für die Abweichung von gleichmäßiger Durchströmung aller Einzelkanäle definieren zu $(V_{max} - V_{min})/V_E$. Dieser Ungleichförmigkeitsgrad ist in *Bild 8* für ein System von 4 Entnahmekanälen als Funktion des Entnahmegeschwindigkeitsverhältnisses V_E/V_F und der relativen Wassertiefe y_F/s für Entnahmewinkel von 90° und 60° aufgetragen. Eine Entnahme unter 60° ist demnach stets günstiger als eine rechtwinklige Entnahme. Des weiteren wird hieraus ersichtlich, daß nur bei sehr kleinen Flußgeschwindigkeiten eine gleichmäßige Auslastung der Kanäle erwartet werden kann. Mit zunehmender Flußgeschwindigkeit (abnehmendes V_E/V_F) wird der Ungleichförmigkeitsgrad ständig größer. Die Beaufschlagung der Entnahmekanäle ist außerdem bei niedrigen Flußwasserständen etwas gleichmäßiger als bei hohen. Dies wird besonders eindrucksvoll durch die in den *Bildern 6* und *7* dargestellten Geschwindigkeits- und Durchflußverhältnisse bei Niedrigwasser (NNW) und Mittelwasser (MW) des Rheins für das dort dargestellte Anwendungsbeispiel demonstriert. Bei relativ hoher Flußgeschwindigkeit ist die Beaufschlagung der Kanäle stark ungleichförmig und wird nur unwesentlich durch den Flußwasserstand oder den Entnahmewinkel beeinflußt.

Der oben definierte Ungleichförmigkeitsgrad ist von der Zahl der Einzelkanäle im Entnahmebauwerk abhängig. Die in *Bild 8* dargestellten Ergebnisse für 4 Kanäle können für Bemessungszwecke auch als Obergrenze für Systeme mit drei oder zwei Entnahmekanälen mit entsprechend größeren

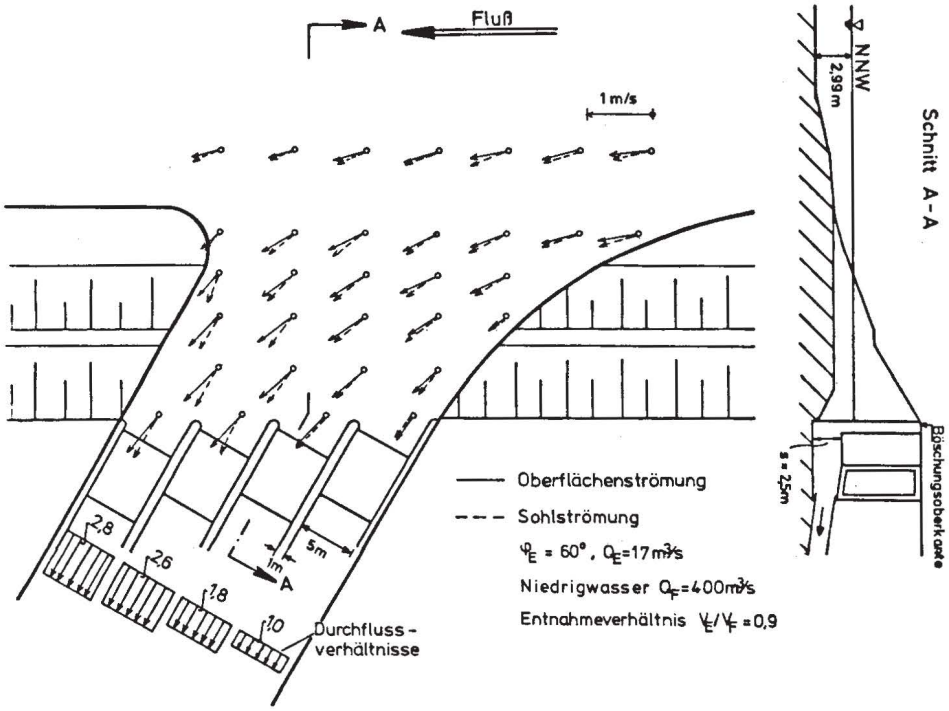

Bild 7. Geschwindigkeitsverhältnisse im Einlaufbereich eines Entnahmebauwerks am Rhein bei Niedrigwasser (400 m³/s).

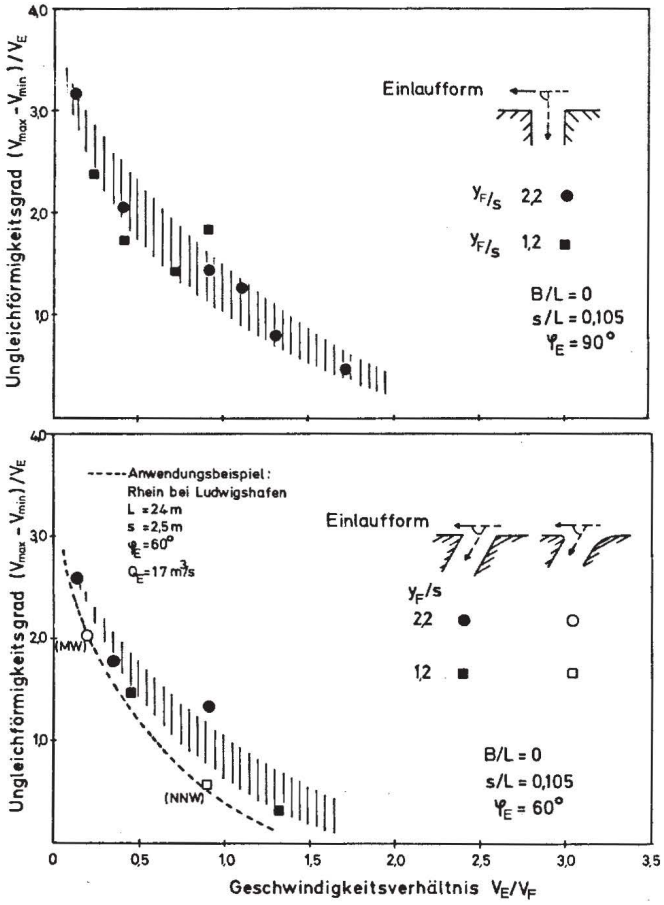

Bild 8. Ungleichförmige Belastung der Einzelkanäle bei vierkanaligen Entnahmebauwerken und Entnahmewinkeln von 90° und 60°.

Abmessungen betrachtet werden, da für solche Konfigurationen der Ungleichförmigkeitsgrad abnehmen muß.

Je nach Art und Anordnung der Reinigungsanlage muß mit einer Veränderung des Geschwindigkeitsfeldes im Einlaufbereich gerechnet werden. In den Modelluntersuchungen wurde der Einfluß der Strömungswiderstände in den Rechen- und Siebanlagen nicht berücksichtigt (ungünstige Bedingung). Da der Strömungswiderstand der Rechen- und Siebanlage etwa proportional dem Quadrat der Durchströmgeschwindigkeit zunimmt, erfährt der stromab gelegene Kanal mit dem größten Durchfluß die prozentual stärkste Durchflußminderung bei konstanter Gesamtentnahme, während der stromauf gelegene Kanal die prozentual stärkste Durchflußsteigerung erfährt. Dies hat in jedem Fall eine Vergleichmäßigung der Entnahmeleistungen der Einzelkanäle und eine merkliche Verkleinerung der absetzgefährdeten Zone zur Folge, wie im Modellversuch nachgewiesen werden konnte.

5. Beurteilung der Verlandungsgefahr

Aus der Kenntnis der mittleren Geschwindigkeiten im Bereich des Einlaufs kann eine qualitative Aussage über das Verhalten der mitgeführten Feststoffe gemacht werden. Bei niedrigen Wasserständen tritt im Mittel eine leichte Beschleunigung der Strömung im Einlauf auf, so daß in diesen Fällen keine lokalen Ablagerungen zu erwarten sind. Im Gegensatz hierzu ist bei höheren Wasserständen teilweise eine von Ablösezonen begleitete Verzögerung der Strömung im Einlaufbereich unvermeidbar, was eine erhöhte Verlandungstendenz bedeutet.

Eine Aussage über den Bewegungszustand von Feststoffen am Boden macht die örtliche *Sohlschubspannung* τ_0. Unter Anwendung des *Shields'schen Kriteriums* [2] für den Bewegungsbeginn einer beweglichen Sandsohle läßt sich aufgrund der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung in Sohlennähe größenordnungsmäßig abschätzen, welche Korngrößen absetzgefährdet sind. Da im Einlaufbereich bei konstanter Entnahme mit abnehmenden Flußwasserständen eine Erhöhung der Sohlschubspannung bei gleichmäßigerer Verteilung auftritt, können Ablagerungen, die bei vorausgegangenen höheren Wasserständen möglicherweise gebildet wurden, teilweise oder ganz wieder abgetragen werden. Auf den Schwebstofftransport wirkt sich die an der Gewässersohle stets zum Einlauf hin gerichtete Strömung günstig aus: Diese Sohlströmung ist geeignet, Feststoffteilchen geringer Sinkgeschwindigkeit, die sich im Ablösungsbereich in den oberen Strömungsschichten abzusetzen beginnen, an der Sedimentation zumindest teilweise zu hindern und in die Reinigungsanlagen zu transportieren. Die bei extremen Wasserführungen des Flusses unvermeidlichen Ablagerungen kommen dann zum Stillstand, wenn die örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten durch die Ablagerungen so weit erhöht werden, daß sich schließlich ein Gleichgewichtszustand zwischen Abtrag und Anlandung einstellt.

6. Entwurfskriterien für Entnahmebauwerke

Als Ergebnis der Modellversuche lassen sich folgende Entwurfskriterien für Entnahmebauwerke an schwebstoffführenden Flüssen ableiten:

1. Die Anströmverhältnisse und Ablösezonen im Zulauf des Entnahmebauwerkes hängen sehr wesentlich vom Verhältnis V_E/V_F der mittleren Geschwindigkeiten von Entnahme- und Flußströmung ab. Mit zunehmendem Geschwindigkeitsverhältnis zeigt sich eine Vergleichsmäßigung der Zuströmgeschwindigkeiten und eine Verringerung der möglichen Anlandungszone im Einlaufbereich.
2. Mit abnehmendem Winkel φ_E zwischen Entnahme und Flußströmung ergibt sich eine Verminderung der Ausdehnung der Ablösezonen. Eine Änderung des Entnahmewinkels von 90° auf 60° erbringt beträchtliche Verbesserungen, während darüber hinausgehende Verringerungen des Entnahmewinkels im Hinblick auf die beanspruchte Uferlänge und auf konstruktive Gesichtspunkte im allgemeinen unwirtschaftlich erscheinen. Ein Verschwenken der Einzelkanäle wirkt sich stets günstiger aus als ein Verschwenken des Bauwerks insgesamt.
3. Der Einfluß des Uferabstandes B zwischen Einlaufquerschnitt und Uferlinie macht sich vorwiegend auf die Größe der Rückströmzone bemerkbar. Zur Verringerung des Ablösegebietes sollte dieser Uferabstand möglichst klein gehalten werden, so daß ein Vorziehen des Einlaufquerschnitts bis zur Böschungsoberkante im allgemeinen als zweckmäßig erscheint.
4. Bei Anordnung mehrerer paralleler Entnahmekanäle ist die Beaufschlagung der einzelnen Kanäle ungleichmäßig, wobei stets der am weitesten stromab gelegene Einlaufkanal am stärksten und der am weitesten stromauf gelegene am schwächsten beaufschlagt wird. Die Verteilung des Durchflusses auf die einzelnen Kanäle hängt außerdem

wesentlich von den Rechen-, Sieb- und sonstigen Strömungswiderständen in den einzelnen Kanälen ab.

5. Die Gestaltung der oberstrom- und unterstromseitigen Böschungs-Übergangslinien sollte so erfolgen, daß eine allmähliche Umlenkung der Strömung in die Entnahmerichtung erfolgt und durch eine Konfusorwirkung im Zuströmbereich im Mittel eine Beschleunigung der Strömung auftritt.
6. Im Einlaufbereich von Entnahmebauwerken der hier untersuchten Bauart stellt sich stets ein Sekundärströmungseffekt derart ein, daß eine Strömungsablösung auf die oberen Wasserschichten beschränkt bleibt und in Sohlennähe stets eine zum Einlauf hin gerichtete Strömung herrscht. Diese ablösungsfreie (im gesamten Einlaufbereich zur Entnahme hin gerichtete) Strömung in Sohlnähe trägt wesentlich zur Verminderung bzw. Vermeidung lokaler Schwebstoffablagerungen bei. Durch das Vorziehen der geschwenkten Kammerwände bis zur Böschungsoberkante werden außerdem die Aufenthaltszeiten der absetzbaren Stoffe im Einlaufbereich reduziert, was ebenfalls zur Herabsetzung der Gefahr örtlicher Ablagerungen beiträgt.
7. Da die Größe der zu erwartenden Ablagerungen nicht nur vom Geschwindigkeitsfeld, sondern auch von der Größe und Verteilung der durch die Flußströmung als Geschiebe und Schwebstoff angebotenen Transportmenge bestimmt wird, lassen sie über die zu erwartende Größe der Ablagerungen keine allgemeinen Aussagen machen. Das wesentliche Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen ist, daß durch die Gestaltung der Einlaufgeometrie die Strömungsverhältnisse so optimiert werden können, daß die Ablagerungstendenz im Einlaufbereich auf ein Mindestmaß reduziert wird.

7. Schlußwort

Strömungstechnische Probleme bei wasserbaulichen Anlagen können unter bestimmten Voraussetzungen in Luftmodellen schneller und billiger untersucht werden als dies in einem Wassermodell möglich wäre. Gegenüber raumaufwendigen und teuren Wassermodellen besitzen Luftmodelle einerseits den Vorteil des geringeren Raumbedarfs, der billigeren Herstellung und des einfacheren Betriebes, und verursachen daher nur einen Bruchteil der Untersuchungskosten eines entsprechenden Wassermodells. Andererseits bieten sie die Möglichkeit, in all jenen Fällen angenäherte Modellähnlichkeit herzustellen, in denen das Strömungsfeld überwiegend von Trägheits- und Zähigkeitskräften beeinflußt wird. Im Gegensatz zu Wassermodellen mit freier Oberfläche ist bei Luftmodellen der Durchfluß oder die Bezugsgeschwindigkeit eine frei wählbare Größe, durch die die Lage des „Wasserspiegels" nicht verändert wird. Während in Wassermodellen die *Reynolds-Zahl* im Modell wesentlich kleinere Werte als in der Natur aufweisen muß, kann sie im Luftmodell den Naturverhältnissen entsprechend groß gewählt werden. Das Luftmodell ist daher in Fällen, in denen der Schwerkrafteinfluß von untergeordneter Bedeutung ist, besonders geeignet, das natürliche Geschwindigkeitsfeld abzubilden.

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Luftmodell verwendet, um eine strömungstechnisch günstige Gestaltung von Entnahmebauwerken für industrielles Brauchwasser an vorwiegend schwebstofführenden Flüssen zu entwickeln. Aufgrund der Strömungsuntersuchungen im Einlaufbereich ergaben sich grundlegende Entwurfskriterien, mit deren Hilfe solche Anlagen hydraulisch optimal ausgelegt werden können, um die Verlandungsgefahr im Einlaufbereich auf ein Minimum zu reduzieren. Als optimales Entnahmebauwerk bezüglich Ablagerungstendenz und damit Betriebssicherheit, empfiehlt sich ein Bauwerk, dessen Einzelkanäle einen Winkel von cirka 60^0 gegenüber der Flußachse aufweisen und möglichst weit zur Uferlinie vorgezogen sind.

Literatur

[1] *Bulle, H.:* Untersuchungen über die Geschiebeableitungen bei der Spaltung von Wasserläufen. Berlin: VDI-Verlag 1926. Heft 283.

[2] *Shields, A.:* Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Berlin 1936. Heft 26.

[3] *Eicke, S.:* Gestaltung eines Kühlwassereinlaufs unter Berücksichtigung von Schwebstoffzurückhaltung. Mitteilungen aus dem Institut für Wasserbau der Technischen Universität Berlin-Charlottenburg, Mitt. Nr. 37, 1950.

[4] *Mosonyi, E.:* Wasserkraftwerke I. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.

[5] *Sisesti, I.:* Ceratari Privind Prizele in Curent Liber. Teza de Doctorat, Rezumat. Bucuresti: Institue de Constructii Bucuresti 1969.

[6] *Sauer:* Industriewasser-Entnahme aus schwebstoffreichen Flüssen. Wasserbau-Mitteilungen Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Heft 5, Nov. 1969.

[7] *Rocha, F.:* Wasserableitung aus Flüssen mit Sedimentbewegung. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Heft 35, 1970.

[8] *Zdenek, T.:* Dynamic Similarity in the Flow of Incompressible Liquids in Pipes and Open Channels. Prague, Czechoslovakia: Water Research Institute 1970.

[9] *Rouvé, G., Rao, S.:* Der Einfluß einer aufgezwungenen Sekundärströmung auf die Feststoffbewegung in der Verzweigung eines Freispiegelgerinnes. Wasserwirtschaft 62 (1972), Heft 8.

[10] Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual, Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division: Sediment Control Methods, Control of Sediment in Canals. Journ. Hydr. Div., Vol. 98, Sept. 1972.