

# Erforschung von Strömungsproblemen der Umweltverschmutzung

- Wasser / Luft / Abwasser / Kühlwasser / Abgase / Gewässer / Flüsse / turbulente Strömung / Grundwasser / Wirbelringe / Luftblasenschleier / Polymerzusatz / Sonderforschungsbereich 80

Die Reinhaltung von Wasser und Luft stellt uns heute vor eine zweifache Aufgabe: Einerseits müssen die in Gewässer und Atmosphäre eingeleiteten Schmutzmengen möglichst weitgehend reduziert werden; andererseits muß dafür Sorge getragen werden, daß die noch verbleibenden Schmutzstoffe so in den Gewässern bzw. in der Atmosphäre verteilt werden, daß umweltschädliche Auswirkungen vermieden werden (vgl. auch das UMSCHAU-Buch „Umwelt-Report“). Eine vollständige Vermeidung von Emissionen läßt sich mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nie erreichen, so daß die mit der Verteilung zusammenhängende absolute Schadstoffkonzentration stets Probleme mit sich bringen wird. Besonders eindringlich wird dies beispielsweise durch die Smogbildung bei Inversions-Wetterlagen demonstriert. Die Lösung solcher Probleme erfordert Kenntnisse der strömungsmechanischen Grundlagen von Ausbreitungs- und Transportvorgängen, die bis heute zum großen Teil nicht vorliegen. Um einen gezielten Beitrag zur Erarbeitung der notwendigen Grundlagen zu leisten, haben sich an der Universität Karlsruhe rund vierzig Ingenieur- und Naturwissenschaftler zusammengeschlossen und einen Sonderforschungsbereich gegründet, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft seit April 1970 finanziell gefördert wird.

Der heutige Wissensstand über die Gesetzmäßigkeiten etwa der Ausbreitung von Abwasser oder Kühlwasser in Gewässern oder der Ausbreitung von Abgasen in der Atmosphäre oder über den Transport von Fremdstoffen oder Wärme in Strömungen ist noch so lückenhaft, daß selbst einfache Zusammenhänge nicht allgemeingültig beschrieben werden können. Das Programm des Sonderforschungsbereichs 80 „Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Strömungen“ hat zum Ziel, in interdisziplinärer Zusammenarbeit der Angehörigen von fünf aktiv beteiligten Hochschulinstituten – Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft mit Theodor-Rehbock-Flußbaulaborato-

rium, Institut für Hydromechanik, Institut Wasserbau III, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Institut für Ingenieurbio-logie – und der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, einen Beitrag zur Lösung folgender, besonders für die hochindustrialisierte Bundesrepublik wichtiger Zukunftsaufgaben zu leisten:

1. Vorhersage von Ausbreitungs- und Transportvorgängen bei Einleitungen in Gewässer und in die Atmosphäre.
2. Beherrschung der Vorgänge bei ökologischen und morphologischen Veränderungen von Gewässern.
3. Entwicklung neuer Techniken zur gezielten Beeinflussung von Ausbreitungs- und Transportvorgängen in Strömungen.

Was in der Praxis der Wassernutzung und Wasserqualitätskontrolle besonders dringend benötigt wird, sind wissenschaftliche Grundlagen über die Einwirkung von Temperatur- und Dichteunterschieden sowie von chemischen und biologischen Verunreinigungen auf turbulente Ausbreitungs- und Transportvorgänge einerseits und über den Einfluß turbulenter Strömungsvorgänge auf chemisch-biologische Prozesse andererseits. Gerade auf diesen Grenzgebieten besteht eine große Lücke zwischen den Bedürfnissen der Praxis und dem heutigen Erkenntnisstand.

Bei der Bearbeitung dieser Aufgaben in mehreren sich gegenseitig ergänzenden Teilprojekten ist vorgesehen, die Analogie zwischen unterkritischen Wasser- und Luftströmungen mit Vorteil zu nutzen. So werden beispielsweise Probleme der Luftverschmutzung experimentell in einem Wasser-Gerinne oder Abwassereinleitungen im Windkanal untersucht, wenn sich auf diese Weise versuchs- und meßtechnische Vorteile erzielen lassen. Die Ergebnisse können unter Nutzung der genannten Analogie gleichermaßen auf Probleme der Wasser- und der Luftverschmutzung angewendet werden.

## Vorhersage von Ausbreitungsvorgängen in Strömungen

### Turbulente Durchmischung

Von der Art der Ausbreitung von Abwasser oder Kühlwasser in einem Gewässer oder von Abgas in der Atmosphäre hängt es ab, welche Zone von der Abwasser- oder Abgaseinleitung beeinflusst wird und wie sich die Schadstoffkonzentration oder die Temperatur innerhalb dieser Zone verteilt. Die Vorhersage von Ausbreitungsvorgängen ist deshalb Voraussetzung sowohl für die Abschätzung der Folgen von Schadstoffeintritten bezüglich Wasser- und Luftqualität, als auch für den Entwurf von Einleitungsbauwerken, die bestimmte Qualitätskriterien erfüllen. So sind etwa die Fragen, wie viele Kläranlagen oder Wärmekraftwerke von welcher Größe wo gebaut werden können, ohne eine solche Berechnung nicht befriedigend zu beantworten.

Bei Problemen der Fremdstoff- und Wärmeausbreitung unterscheidet man lamina-re und turbulente Strömungsvorgänge. In laminaren Strömungen bewegt sich das Fluid in geordneten Bahnen, und eine Durchmischung erfolgt allein auf Grund molekularer Mischbewegungen. Man spricht von molekularer Diffusion, deren Berechnung mittels vorgegebener Diffusionskoeffizienten relativ einfach ist. Bei turbulenten Strömungsvorgängen dagegen bewegt sich das Fluid unregelmäßig auch quer zur Hauptströmungsrichtung.

Prof. Dr.-Ing. E. Naudascher und Dr. H. Kobus, Institutsleiter bzw. Oberingenieur am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe.

Geb. 1929; Sprecher des Sonderforschungsbereichs 80 „Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Strömungen“ an der Universität Karlsruhe; Hauptarbeitsgebiete: Strömungsmechanik und technische Hydraulik, turbulente Ausbreitungsvorgänge, Ingenieurerziehung.

Geb. 1937; Hauptarbeitsgebiete: Strömungsmechanik im Bauwesen, Wasserbauliches Versuchswesen, Wasserluftgemische, Feststofftransport.



Bild 1: Abwassereinleitung (dunkel gefärbt) durch sohlverlegte Rohre in den Rhein. Die spiralförmige Sekundärströmung in Flußkrümmungen lenkt die Abwasserfahne gegen das Innen- und Außenufer ab, je nachdem, ob sie sich wegen Dichteunterschieden mehr entlang der Sohle oder der Wasseroberfläche bewegt. Fließrichtung von links nach rechts. (Photo: Hansa-Luftbild GmbH, Münster, Westfalen.)

Der Hauptströmung sind Wirbelbewegungen überlagert, zufolge derer eine zusätzliche Durchmischung des mitgeführten Fremdstoffs und der Wärme zustande kommt, deren Intensität diejenige der molekularen Durchmischung in der Regel um ein Vielfaches übertrifft. Zur Berechnung des turbulenten Austausches werden Austauschkoefizienten verwendet, über deren Abhängigkeit von einer Reihe von Einflüssen man nur unvollständige Angaben findet. Eine weitere Erforschung turbulenter Ausbreitungsvorgänge ist dringend erforderlich und Hauptgegenstand mehrerer Teilprojekte des Karlsruher Forschungsprogramms.

#### Einflußgrößen bei Ausbreitungsvorgängen

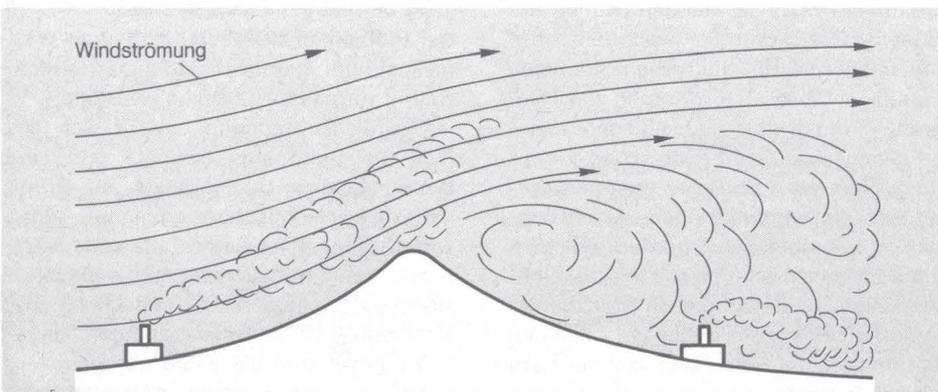
Die Aufgabe bei Ausbreitungsvorgängen kann entweder darin bestehen, die Fremd-

stoff- oder Wärmeverteilung für vorgegebene Verhältnisse zu bestimmen oder die Einleitungsverhältnisse so zu gestalten, daß diese Verteilung vorgegebene Kriterien erfüllt. In jedem Fall gilt es folgende Einflüsse zu beachten:

- Geschwindigkeitsverteilung der Hauptströmung. Durch ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilungen, so wie sie zum Beispiel in Flüssen oder entlang der Meeresküste vorkommen, wird die Dispersion in Hauptströmungsrichtung um ein Vielfaches vergrößert; auch zeitabhängige Geschwindigkeitsvariationen infolge Gezeiten und Wind sowie Sekundärströmungen sind von Bedeutung (Bild 1).

- Intensität und Struktur der Turbulenz. Ob Turbulenz mechanisch durch „Reibung“ oder konvektiv durch instabile Dichte-

Bild 2: Einfluß eines Bergrückens auf die Rauchgasausbreitung. Eine ähnliche Wirkung kann ein Nachbargebäude ausüben (Nach G. H. Strom.)



schichtung erzeugt ist – in jedem Fall bewirkt sie eine Vergrößerung der Austauschkoefizienten. Diese sind nicht nur der Intensität, sondern im allgemeinen auch der Größe der turbulenten Wirbel proportional.

- Randbedingungen des Strömungsfeldes. Die Linienführung und Beschaffenheit von Strömungsberandungen sowie die Lage und Geometrie von Strömungshindernissen können einen Ausbreitungsvorgang drastisch verändern (Bild 2).

- Dichteverhältnisse. Dichteschichtungen auf Grund von Unterschieden in Temperatur, Salzgehalt oder Schwebstoffführung können zur Folge haben, daß eingeleitetes Fluid nicht jenseits einer bestimmten Schicht transportiert werden kann (Bild 3).

- Charakteristiken des Einleitungsbauwerks. Einleitungsgeschwindigkeit, Orientierung zur Hauptströmung, Lage und Form des Bauwerks haben auf die anfängliche Verteilung des eingeleiteten Fluids und damit meist auch auf den weiteren Verlauf der Ausbreitung großen Einfluß (Bild 4).

- Charakteristiken des eingeleiteten Fluids. Dichteunterschiede relativ zum Trägerfluid rufen zusätzliche Auftriebskräfte hervor; werden Feststoffe mitgeführt, so werden diese je nach Korngröße früher oder später aus der Diffusionszone des Fluids ausgefällt.

- Einleitungsart. Bei drallbehafteter Einleitung wird die Ausbreitungstendenz verstärkt; durch pulsierende Einleitung können Wirbelringe erzeugt werden, die das eingeleitete Fluid relativ weit von der Einleitungsstelle weg transportieren (s. u.).

#### Abhängigkeit der Ausbreitung von Einleitungs- und Grundströmungsverhältnissen

Ein wichtiger Faktor bei der Bestimmung turbulenter Ausbreitungsvorgänge ist der Einfluß der Einleitungsverhältnisse auf die Strömung. Befriedigende Theorien und experimentelle Ergebnisse über diesen Einfluß liegen bisher nur für einfache Strahl- oder Nachlaufströmungen vor (unter Nachlauf versteht man die Zone verminderter Strömungsgeschwindigkeit hinter einem umströmten Körper). Auf Probleme der Praxis – etwa eine Abwasser- oder Kühlwassereinleitung in einem strömenden Gewässer oder eine Abgasemission bei Wind – sind diese deshalb nicht anwendbar, weil durch die gleichzeitige Wirkung des nachlauf erzeugenden Einleitungsbauwerks und des Einleitungsstrahles in der Regel eine Strahl-Nachlaufkombination entsteht.

In mehreren Teilprojekten des SFB 80 wird deshalb daran gearbeitet, derartige realistische Strömungskonfigurationen einer analytischen Behandlung zugänglich zu machen und die Ergebnisse der Berechnung experimentell zu überprüfen. So wird in einem Teilprojekt das Strömungsfeld hinter einem Einleitungsbauwerk in einer gleichförmigen Grundströmung für unterschied-

liche Einflüsse von Bauwerk und Einleitungsstrahl untersucht (Bild 4). Als Endergebnis soll diese Untersuchung Entwurfskriterien liefern, nach denen zum Beispiel durch entsprechende Bauwerksgestaltung eine maximale oder minimale Vermischung des eingeleiteten Schmutz- oder Kühlwassers mit dem Flußwasser erzielt werden kann. In Ergänzung zu dieser Arbeit wird in einer Windkanalstudie das Ausbreitungsverhalten eines runden Strahls untersucht, der mit unterschiedlicher Neigung in eine Grundströmung eingeleitet wird. In einem weiteren Teilprojekt werden mit Hilfe eines idealisierten wasserbaulichen Modells seitliche Einleitungen in eine Gerinneströmung untersucht, so wie sie bei zahlreichen Uferinleitungen an Flüssen vorkommen, und zwar unter Berücksichtigung sowohl unterschiedlicher Geschwindigkeitsverhältnisse als auch verschiedener Dichteunterschiede zwischen eingeleitetem und Trägerfluid. Unterstützt durch ein universal anwendbares mathematisches Modell sollen diese Untersuchungen unter anderem Bemessungsgrundlagen für eine optimale Gestaltung von Kühlwasser-Einleitungsbauwerken liefern. In nahezu allen praktischen Fällen von Einleitungen in eine Grundströmung weist jene eine über den Fließquerschnitt veränderliche Geschwindigkeitsverteilung auf. Derartige Ungleichförmigkeiten haben einen starken Einfluß auf Ausbreitungsvorgänge, die bis heute noch weitgehend unerforscht sind. Ziel eines weiteren Teilprojekts ist es daher, die erforderlichen Grundlagen für eine Erfassung auch dieses Strömungseffekts zu schaffen.

### Beherrschung der Vorgänge bei ökologischen und morphologischen Veränderungen von Gewässern

#### Strömungseinflüsse auf chemische und biologische Prozesse

Die Eigenschaften natürlicher Gewässer und damit die Wassergüte hängen direkt von der Zusammensetzung der gelösten und in Schwebelage gehaltenen Stoffe im Gewässer ab. Eine Beschreibung von Veränderungen in der Wasserqualität setzt das Verständnis der verschiedenen strömungsmechanischen, physikochemischen und biologischen Prozesse voraus, deren Einfluß gelöste und suspendierte Substanzen unterliegen. Mit der Erforschung des Einflusses von Strömungsvorgängen, wie sie in natürlichen Gewässern vorkommen, auf chemische und biologische Prozesse soll hier ein Beitrag zur Lösung der immer dringlicher werdenden Probleme in der Wasserversorgung und der Wassergütwirtschaft geleistet werden.

So wird in einem Teilprojekt die Stabilität natürlicher Kolloide untersucht, von der die Flockungs- und Sedimentationsprozesse maßgebend abhängen. Im Verlauf der Un-

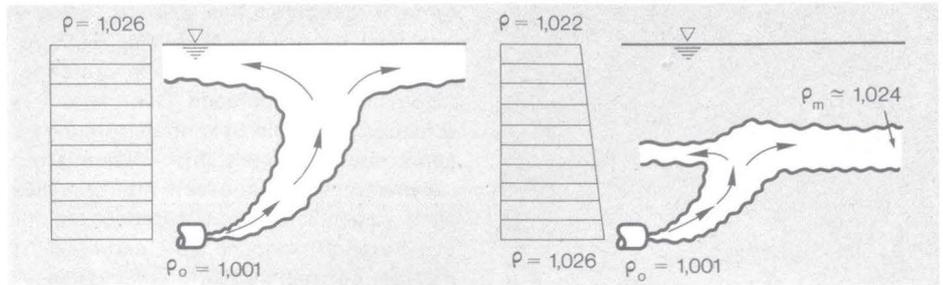


Bild 3: Abwasserausbreitung im Meer ohne und mit Dichteschichtung. Die Abwasser-einleitung in Küstennähe soll die oberflächennahen Schichten nicht verschmutzen. Das spezifisch leichtere Abwasser erreicht in einem homogenen Trägerfluid die Wasseroberfläche (links), während es sich in einem stabil dichtegeschichteten Gewässer in Höhe der „neutralen“ Schicht ausbreitet (rechts). Eine ähnliche, in diesem Falle jedoch nachteilige Wirkung haben Inversionsschichten in der Atmosphäre auf Abgase. (Nach N. H. Brooks.)

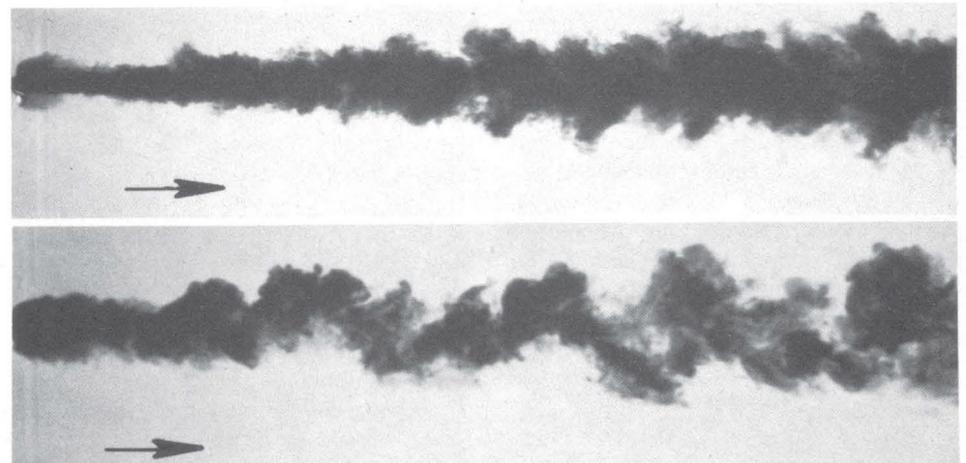
tersuchung soll die Kolloidstabilität in bewegten künstlich zubereiteten Wässern im Labor sowie in natürlichen Gewässern bestimmt werden, um hieraus quantitative Angaben über den Einfluß der Strömung auf Flockungs- und Sedimentationsprozesse herleiten zu können. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist erforderlich, um beispielsweise die Bewegung von an Tone adsorbierten radioaktiven Verunreinigungen oder die Klärung natürlicher Gewässer von anorganischen oder organischen Trübungen zu beschreiben.

In einem gesonderten Teilprojekt werden Strömungseinflüsse auf die Geschwindigkeit des Ab- bzw. Umbaus von organischen Substanzen durch Mikroorganismen untersucht. Diese Reaktionsgeschwindigkeit ist in erster Linie abhängig von der Konzentration der Reagenten und der Relativbewegung zwischen Organismen und Nährstoffmolekülen, welche hauptsächlich von turbulenten Mischungsvorgängen bestimmt wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind von direktem Interesse sowohl für die Optimierung von Fermenteranlagen in der pharmazeutischen und Genußmittel-

industrie als auch für die optimale Gestaltung von Belebtschlammmanlagen in der Abwasserreinigung. Eine weitere Untersuchung aus dem Bereich der Klärtechnik befaßt sich mit der Leistungsfähigkeit biologischen Bewuchses in Kunststoff-Tropfkörpern. Hierbei wird der Aufbau, die Leistungsfähigkeit und die Haftfähigkeit dieses Bewuchses in Abhängigkeit von den jeweiligen Strömungsverhältnissen untersucht.

Ziel eines ausschließlich analytischen Teilprojekts ist es, ein Berechnungsverfahren für Ausbreitungsvorgänge mit chemisch-biologischen Reaktionen aufzustellen, das die Ermittlung von Schranken für die Temperatur sowie für die Konzentrationen gelöster Fremdstoffe in einem strömenden Fluid erlaubt. Die Kenntnis solcher Schranken wäre eine entscheidende Hilfe bei der Gestaltung und Bemessung beispielsweise von längsdurchströmten Fermenterbecken in Abwasserreinigungsanlagen, bei der Aufstellung von Abwasser- oder Wärmelastplänen für natürliche Wasserläufe, oder bei der Abschätzung der Auswirkungen von Abwassereinleitungen im Meer (Bild 5).

Bild 4: Beeinflussung von Ausbreitungsvorgängen durch Gestaltung des Einleitungsbauwerks. Das Bauwerk ist idealisiert durch eine runde Scheibe quer zur Strömungsrichtung dargestellt, in deren Mittelpunkt ein angefärbter Wasserstrahl eingeleitet wird. Oben: Ausbreitung mit Strahlcharakter; der Einfluß des Einleitungsstrahls überwiegt. Unten: Ausbreitung mit Nachlaufcharakter; der Einfluß des Einleitungsbauwerks überwiegt.





*Bild 5: Die Ausbreitung häuslichen Abwassers bei Bülk an der Kieler Bucht, sichtbar gemacht durch Zugabe von Rhodamin B (helle Farbe). Das Luftbild, Freigabe Nr. SH 36112, wurde freundlicherweise von Dr. Horstmann vom Institut für Meereskunde an der Universität Kiel zur Verfügung gestellt.*

#### *Wechselwirkungen zwischen Strömung und Feststofftransport*

Maßnahmen zur Beeinflussung von Ausbreitungsvorgängen in Gewässern dürfen nur selten losgelöst von ihrer Wirkung auf lokale Feststofftransportverhältnisse, das heißt auf Erosion und Verlandung der Gewässersohle, betrachtet werden. Maßgebend für die Veränderung der Transportfähigkeit durch Abwasser- oder Kühlwassereinleitungen ist die Verteilung der Geschwindigkeiten und der turbulenten Schwankungen sowie die Temperaturverteilung im Bereich der Einleitung. Ziel einer Reihe von Untersuchungen soll es daher sein, die Zusammenhänge zwischen örtlichen Strömungs- und Feststofftransportverhältnissen näher zu klären.

Der wissenschaftliche Fortschritt auf dem Gebiet des Feststofftransports in natürlichen Gewässern hängt zur Zeit hauptsächlich davon ab, inwieweit es gelingt, die Einflüsse von Sekundärströmungen und Turbulenz quantitativ zu beschreiben. So gelten beispielsweise die gebräuchlichen Geschiebetriebformeln nur für gleichförmige Strömung in geradlinigen Gerinnen. Bei Überlagerung einer spiralförmigen Bewegung, die etwa in mäandrierenden Flüssen oder bei Strahleinleitungen entsteht, treten Veränderungen des Geschiebetransports ein, die sich bis heute nicht einmal grob abschätzen lassen. Aus neueren Laborversuchen geht hervor, daß sich die transpor-

tierte Feststoffmenge in einem mäandrierenden Gerinne bei sonst identischen Strömungsbedingungen wesentlich von derjenigen in einem geraden Gerinne unterscheiden kann: Die Sekundärströmung ist somit sowohl wegen ihrer Wirkung auf Ausbreitungsvorgänge von Interesse, als auch wegen ihrer großen Bedeutung für den Feststofftransport. Ein Teilprojekt ist deshalb der näheren Erforschung dieses Einflusses gewidmet.

Der Bewegungsbeginn und Transport von Feststoffen hängt nicht nur von den zeitlichen Mittelwerten der Strömung ab, sondern wird auch entscheidend durch die in der Praxis stets vorhandenen Schwankungen um diese Mittelwerte beeinflusst. In einem weiteren Teilprojekt wird daher der Einfluß einer pulsierenden Strömung auf die Erosion eines Sedimentbetts am Beispiel eines vertikalen, turbulenten pulsierenden Strahls untersucht. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sind von unmittelbarer Bedeutung für die Sohlenerosion durch Schiffspropeller, die Bodenbeschädigung durch Hovercrafts oder das wirkungsvolle Saugbaggern festgepackter Sandböden. Außerdem wäre es denkbar, daß pulsierende Strahlen zur mechanischen Beseitigung von Sohlenverfestigungen in natürlichen Gewässern Verwendung finden könnten (vgl. den nächsten Abschnitt).

Der Mechanismus der Entstehung von Geschiebewellen in einer turbulenten Strömung mit beweglicher Sohle ist bis heute recht unvollständig erforscht. Eine experimentelle Untersuchung über die Anfachung von Störschwingungen in einer turbulenten Grundströmung und deren Wechselwirkung mit einer Geschiebesohle hat zum Ziel, einen Beitrag zur Klärung dieses Mechanismus zu liefern. Darüber hinaus wird mit diesem Teilprojekt angestrebt, Anhaltspunkte über den Zusammenhang zwischen Grundströmung und Turbulenz zu erhalten, die bei der Bestimmung von turbulenten Austauschkoefizienten für bestimmte Grundströmungen von Nutzen sein könnten.

#### *Wechselwirkungen zwischen Gewässer und Grundwasser*

Im Zuge der zunehmenden Trinkwasserversorgung aus Uferfiltrat gewinnen die Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser stetig an Bedeutung. In einem Teilprojekt wird daher systematisch die physikalisch, chemisch und biologisch bedingte Sohlenverdichtung bei Versickerungen erforscht. An Kanälen und Speicheranlagen ist die Selbstdichtung durch Bildung einer oberflächlichen oder inneren Dichtungsschicht wegen der Verringerung der Wasserverluste erwünscht, bei Trinkwasserversorgungen aus Uferfiltrat, künstlicher Grundwasseranreicherung

und Brunnenfassungen hingegen versucht man sie zu vermindern oder zu verzögern. Darüber hinaus hat die Selbstdichtung bei der Uferfiltration auch beträchtlichen Einfluß auf die hygienische Qualität des Entnahmewassers: Die Reinigungswirkung spielt sich im überwiegenden Maße in der Flußsohlschicht bzw. in der abgelagerten Schlammschicht – der Filterhaut – ab. Obwohl die Bildung einer Selbstdichtungsschicht wegen der Reduktion der Sickermenge unerwünscht ist, ist andererseits eine wirksame Filterhaut zur Aufrechterhaltung der Wasserqualität erforderlich (Bild 6).

Die Selbstdichtung kann vielerlei Ursachen haben. Allen ist gemeinsam der Vorgang des Eindringens und des Absetzens von Gasbläschen oder suspendierten Feststoffteilchen im Grundwasserleiter, wobei der Vorgang der Selbstdichtung stark von den Strömungsverhältnissen im Porenraum beeinflusst wird.

Ein weiterer Effekt, der untersucht wird, ist der Einfluß einer Sickerströmung im Sedimentbett auf den Feststofftransport und dessen Beginn. Bei der Planung von Staustufen und bei der Bemessung von Uferfassungen durch Spundwände und Stützmauern ist die Frage nach dem Beginn der Sedimentbewegung von großer Bedeutung. Dabei kann eine Sickerströmung, die bei Staustufen durch die Differenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel und bei Uferfassungen durch die Differenz zwischen Grund- und Flußwasserspiegel hervorgerufen wird, einen wesentlichen Einfluß ausüben und zu örtlichen Erosionserscheinungen führen. Ziel der Untersuchung ist es, diese Sickerströmungseffekte quantitativ zu ermitteln.

#### **Entwicklung neuer Verfahren und Techniken für den Umweltschutz**

##### *Systemanalytische Verarbeitung der Forschungsergebnisse*

Um eine möglichst rasche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in Planungshilfen für die Praxis zu gewährleisten, sollen in Zukunft in einem weiteren Projekt die Forschungsergebnisse aus den übrigen Projekten systemanalytisch verarbeitet werden mit dem Ziel, Wassergüte- und Feststofftransportverhältnisse optimal zu beeinflussen. Anhand einer mathematischen Simulation können die Folgen menschlicher Eingriffe in ein natürliches Gewässer unter Eingabe der vorgegebenen Randbedingungen mit Hilfe von elektronischen Rechenanlagen ermittelt werden – so beispielsweise die Folgen der Einleitung von Wasser höherer Temperatur oder von Abwasser für beliebige hydrologische Verhältnisse und für beliebige Anordnungen von Einleitungen.

Wenn auch die eigentliche Anwendung dieser Modellformulierung und Simulation im

wesentlichen außerhalb des Sonderforschungsbereichs erfolgen wird, so wird sie dennoch einen Einfluß auf das Forschungsprogramm haben. Es ist beabsichtigt, die Dringlichkeit, mit der grundlegende Zusammenhänge für die zu schaffenden Planungsunterlagen benötigt werden, als ein Kriterium bei der Aufstellung von Prioritäten für die Forschungsprojekte zu verwenden.

#### Wirbelringkanonen zur Abgasbeseitigung

Ein vielversprechendes neues Verfahren der Abgasbeseitigung besteht darin, daß Abgase nicht mehr wie bisher üblich kontinuierlich durch hohe Kamine, sondern stoßweise durch Wirbelringe etwa der Art, wie sie mancher Raucher aus Zigarettenrauch blasen kann, in die Atmosphäre geleitet werden (Bild 7). Während die bekannten Rauchfahnen der Schornsteine wegen des Auftriebs der heißen und damit spezifisch leichteren Abgase aufsteigen, pflanzen sich Wirbelringe auf Grund der Eigenbewegung fort, die ihnen bei der Erzeugung mitgegeben wird. Bei dieser wenig Energie erfordern Fortbewegungsart kann der Rauch wesentlich höher als bisher befördert werden; vor allem lassen sich möglicherweise Inversionsschichten mit Wirbelringen durchdringen, so daß hohe Abgaskonzentrationen in Bodennähe oder gefährliche Smog-Verhältnisse verhindert werden können. Gegenüber den das Landschaftsbild störenden Schornsteinen hätte das neue Emissionsverfahren den Vorteil der regulierbaren Emissionshöhe.

Voraussetzung für die Brauchbarkeit dieser Methode ist, daß die Wirbelringe selbst bei stärkerer Luftbewegung relativ unbeschadet zu großen Höhen aufsteigen. Diese Frage der Stabilität von Wirbelringen gegen Zerfall in einer turbulenten Umgebung, in diesem Fall der Atmosphäre, ist Gegenstand der Untersuchung eines Teilprojekts. Die Versuche mit Wirbelringen werden unter Benutzung der Analogie zwischen unterkritischen Wasser- und Luftströmungen in einem hydraulischen Gerinne durchgeführt. Nach entsprechender Umrechnung

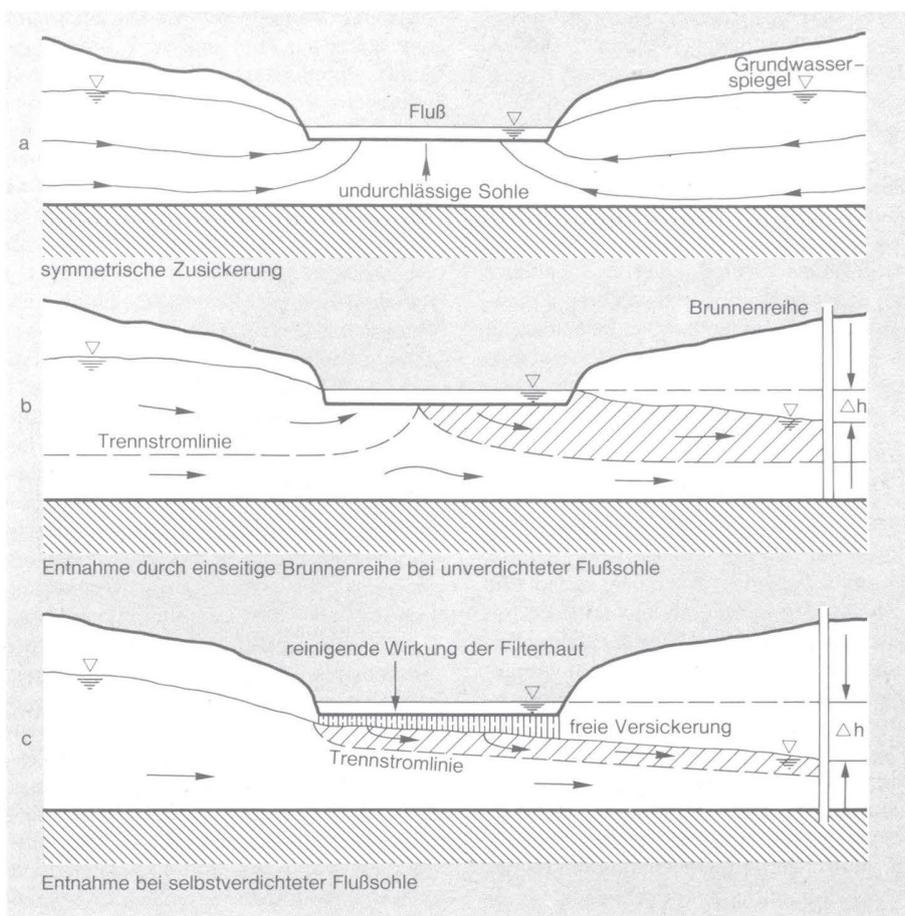
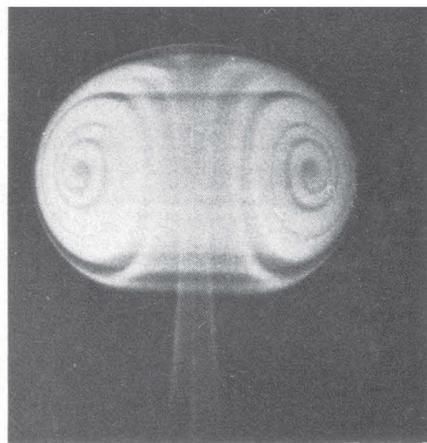
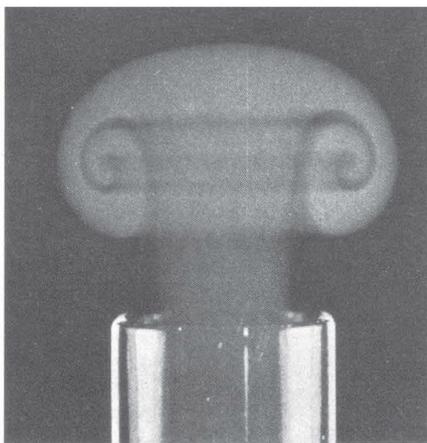
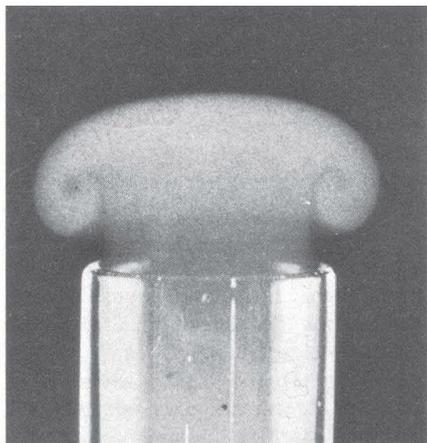


Bild 6: Einfluß der Selbstdichtung einer Fluß-Sohle auf die Grundwasserströmung.  
 a: Symmetrische Zusickerung aus dem Grundwasser bei relativ hohem Grundwasser-spiegel.  
 b: Entnahme durch einseitige Brunnenreihe bei unverdichteter Flußsohle.  
 c: Entnahme bei selbstverdichteter Flußsohle.  
 Schräg schraffierte Flächen: Zusickerung von uferfiltriertem Flußwasser zum Brunnen.

Bild 7: Abgastransport in einem Wirbelring. Man erkennt die Entstehung eines Wirbelrings durch stoßweise Rauchabgase aus einem Rohr. Die ausgestoßene Rauchmenge bleibt im Wirbelring konzentriert und wird auf Grund der Eigenbewegung des Wirbelrings mit extrem geringem Energieaufwand transportiert. (Nach Inone und Okabe.)



lassen sich die Ergebnisse auf das Verhalten von Wirbelringen sowohl in Wasser als auch in der Atmosphäre anwenden. Soweit es sich bisher beurteilen läßt, können Wirbelringe auch auf anderen Gebieten nutzbringend angewendet werden. Beispielsweise ließe sich die unerwünschte, temperaturbedingte Dichteschichtung in einem See stören, indem man große Wirbelringe in die Tiefe schießt. Bei diesem gegenüber den üblichen Methoden flexibleren Verfahren würde einerseits die Dichteschichtung im See „durchlöchert“ und andererseits sauerstoffreiches Wasser in vergleichsweise sauerstoffarme Zonen transportiert.

#### Luftblasenschleier im Gewässerschutz

Eine Luftschleieranlage (vgl. UMSCHAU 1972, Heft 17, S. 563) besteht aus einer mit Düsen versehenen Druckluft-Rohrleitung, die am Boden eines Gewässers verlegt und von einer Kompressoranlage mit Druckluft gespeist wird (Bild 8). Die aufsteigenden Luftblasen erzeugen eine aufwärts gerichtete Wasserströmung, die der Auftriebsströmung über einer Temperaturquelle (Flamme) vergleichbar ist. An der Wasseroberfläche tritt die aufsteigende Luft aus, während der induzierte Wasserstrahl seitlich umgelenkt wird. Aus Kontinuitätsgründen muß gleichzeitig in den unteren Regionen Zuströmung zum Luftschleier hin herrschen, die wiederum in die Auftriebsströmung einmündet.

Luftschleier werden im Gewässerschutz zu vielerlei Zwecken eingesetzt. Am bekanntesten ist ihre Verwendung als Preßluft-Ölsperren in Hafenanlagen. Anstelle der sonst üblichen mechanischen Sperren aus Schwimmkörpern wird hierbei die Sperrwirkung durch die an der Oberfläche induzierte Wasserströmung hervorgerufen: Die dem auslaufenden Öl entgegengerichtete

Wasserströmung staut die Ölschicht auf (vgl. hierzu das Photo auf der 2. Umschlagseite). Pneumatische Ölsperren besitzen erhebliche Vorteile gegenüber konventionellen Anlagen. Sie bestehen aus fest installierten Rohren an der Gewässersohle und stellen somit selbst im Betrieb keine Behinderung der Schifffahrt dar, sie sind einfach und rasch zu bedienen und sofort einsatzbereit.

Hafenanlagen in Mündungsgebieten von Flüssen weisen oft starke Verlandungsercheinungen auf, die auf Schlick- und Sandeintrieb infolge Dichteströmungen zurückzuführen sind. Als Alternative zu ständigen Baggerungen zur Erhaltung der Fahrwassertiefe können Luftschleieranlagen an der Hafenumündung zur Reduzierung des Schlickeintriebs verwendet werden, solange es sich (wie im Tidegebiet) um feinkörnige Feststoffe in Suspension handelt und nicht um grobkörniges Material, das sich als Geschiebe entlang der Gewässersohle bewegt. Da Baggerungen stets erhebliche Verkehrsbehinderungen verursachen, ist diese Möglichkeit besonders interessant für Häfen mit starkem Verkehr. An Mündungsschleusen von Süßwasserkanälen dienen Luftschleier dazu, während des Schleusenvorgangs das Eindringen von Salzwasser in die Kammern und damit in die Kanäle zu verhindern. Auch zur künstlichen Belüftung von Flüssen und Fischgewässern sowie zur Verbesserung der Wasserqualität in Seen durch Beseitigung der temperaturbedingten natürlichen Dichteschichtung werden Luftschleieranlagen eingesetzt. Im Winter können sie zur Eisfreiheit von Bauwerken verwendet werden. Schließlich kann bei Kraftwerken an stehenden oder langsam fließenden Gewässern die temperaturbedingte „Kurzschlußströmung“ zwischen Entnahme- und

Rückgabebauwerk durch Luftschleieranlagen wirkungsvoll bekämpft werden, so daß das aufgewärmte Kühlwasser nicht wieder in die Entnahme gelangt und zu unerwünschten Rückkoppelungseffekten führt. Trotz der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten für Luftschleieranlagen im Gewässerschutz sind die Kenntnisse über das Strömungsfeld solcher Anlagen noch lückenhaft und als Bemessungsgrundlagen unzureichend. Es ist daher Ziel einer analytischen und experimentellen Untersuchung, diese Lücke zu schließen und zuverlässige Bemessungsgrundlagen für Luftblasenschleier zu erarbeiten. Das Hauptaugenmerk ist hierbei auf das Verhalten eines Blasenschleiers in einer Querströmung gerichtet, da Strömungen auf den Luftschleier einen starken Einfluß ausüben, der bisher noch nicht erfaßt werden kann.

#### Beeinflussung von Strömungsvorgängen durch Additive

Seit der Entdeckung, daß sich in turbulenten Flüssigkeitsströmungen durch die Beimengung von nur wenigen Millionstel Gewichtsanteilen hochmolekularer Polymerverbindungen und Seifen (im folgenden Additive genannt) Widerstands- und Energieverlustminderungen bis zu 70% und mehr erzielen lassen, hat sich in jüngster Zeit eine neue Technologie entwickelt, die wirtschaftlich zunehmend an Bedeutung zu gewinnen verspricht (vgl. UMSCHAU 1970, Heft 11, S. 345). So wurde dieser widerstandsmindernde Effekt schon erprobt, um bei der industriellen Wasserversorgung, bei der Förderung von Öl sowie beim hydraulischen Transport von Kohle und anderen Feststoffen Förderleistung einzusparen. In der Kanalisationstechnik kann dieser Effekt genutzt werden, um Abwasserspitzen sicher und ökonomisch abzuführen; in der Schiffstechnik, um den Strömungswiderstand zu vermindern und somit größere Schiffsgeschwindigkeiten zu erzielen; und in der Feuerlöschtechnik, um die Strahlwurfweite zu vergrößern (vgl. UMSCHAU 1971, Heft 12, S. 434). Trotz dieser Erfolge werden jedoch die Additiveffekte noch nicht ausreichend beherrscht, um diese für beliebige Betriebsverhältnisse voraussagen zu können. Außerdem fehlt zur Zeit noch der Überblick über die möglichen Nebenwirkungen von Additiven, der für deren geplanten Einsatz in größeren Anlagen oder in Gewässersystemen unbedingt erforderlich ist. So weiß man beispielsweise noch zu wenig über den Einfluß von Additiven auf turbulente Durchmischung (Bild 9), Wärmeübertragung in Strömungen, Sedimentationsprozesse, Sickerströmungen, Kavitation, Strömungslärm und vieles mehr.

Der Karlsruher Sonderforschungsbereich 80 ist zur Erforschung des Additiveffekts insofern prädestiniert, als er durch den Zu-

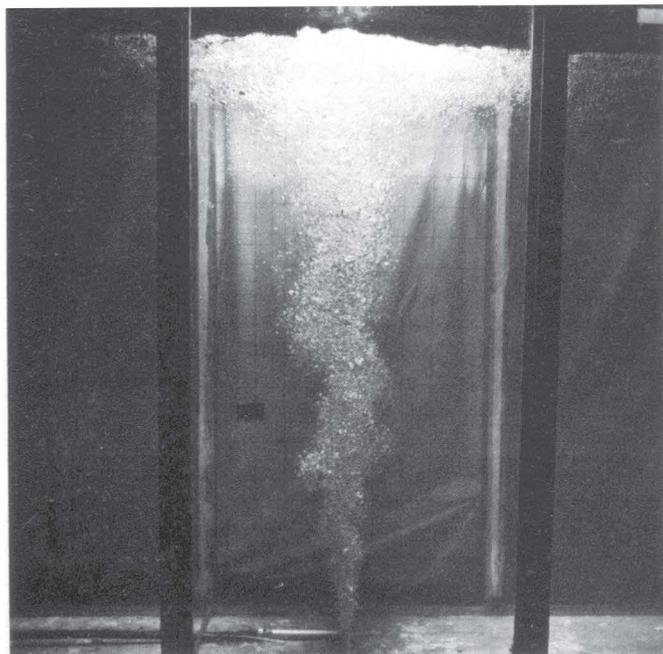


Bild 8: Einsatz eines Luftschleiers als Preßluft-Ölsperre. Durch Ausblasen von Druckluft aus einem Düsenrohr erzeugt der Luftschleier.

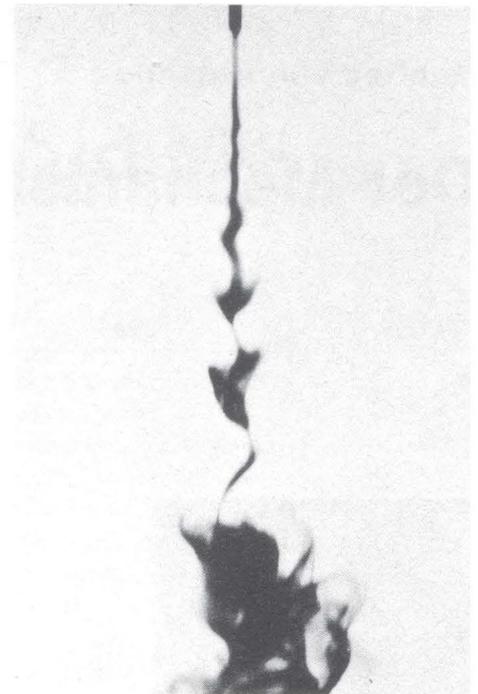
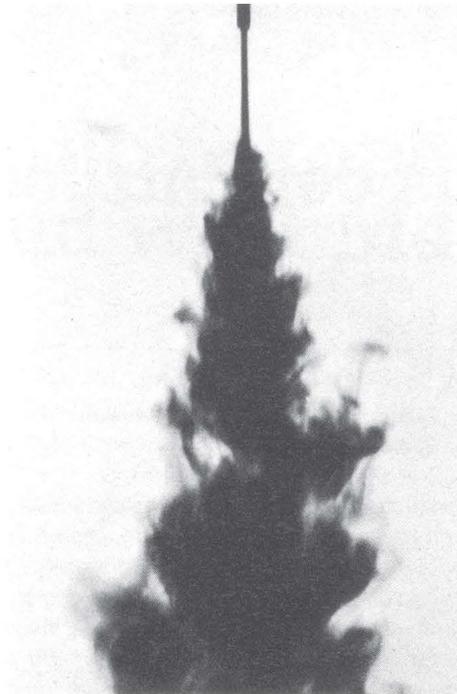
sammenschluß von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen die Voraussetzung für die hier erforderlichen, teils strömungsmechanisch, teils chemisch ausgerichteten Untersuchungen erfüllt. Zwei für die Zukunft geplante Forschungsprojekte und ihre Bedeutung für den Gewässerschutz seien an dieser Stelle kurz erwähnt.

Wasserstrahlen werden außer in der Feuerlöschtechnik neuerdings auch zur Bekämpfung von Wasserverunreinigungen eingesetzt. So wird beispielsweise Öl auf offener See durch Aufbringen von Detergentien zum Absinken gebracht, oder durch Öl verschmutzte Felsküsten werden durch Wasserstrahlen abgesprüht und gesäubert. In jedem Fall ist es wesentlich, daß ohne übermäßigen Energieaufwand große Strahlwurfweiten erzielt werden. Nach ersten Vorversuchen steht es außer Zweifel, daß bei geeigneter Zusammensetzung der zu versprühenden Lösung drastische Leistungssteigerungen möglich sind, und zwar vermutlich durch eine kombinierte Reduktion der Strömungsverluste und der Versprühendenz des Strahls. Es ist vorgesehen, den Einfluß von Additiven auf die Strahlversprühung zu untersuchen und hierbei auf einen weiteren aktuellen Anwendungsbereich zu achten – den Einsatz von Wasserstrahlen zu Kühlzwecken.

Bei der laminaren Durchströmung eines Sickerkörpers, sei es ein Grundwasserkörper oder ein Filter, wird der Strömungswiderstand durch Additivzugabe überraschenderweise um das Zehn- bis Vierzigfache vergrößert. Besonders interessant ist hierbei, daß dieser Effekt durch Adsorption der Additivmoleküle an den Feststoffen des Sickerkörpers auch nach Unterbrechung der Additivzugabe lang anhält, und daß er in Wasser, Benzin und Öl verschieden stark in Erscheinung tritt. Unter Umständen lassen sich Injektionen von Additivlösungen anwenden, um beispielsweise Benzin oder Öl, das durch einen Unglücksfall in den Untergrund gelangt ist, vorübergehend zu arretieren, bis kontrollierte Maßnahmen zur Schmutzstoffentfernung eingeleitet werden können, oder um die Unterströmung von Erddämmen zu reduzieren, die zur Trockenhaltung von Baustellen dienen, oder gar, um das Verfahren der Ölgewinnung durch Abpumpen aus dem Öl und Wasser enthaltenden Untergrund effizienter zu gestalten. Man hat hier ein Gebiet der Grundlagenforschung vor sich, bei dem sich wie selten eine unmittelbare Einwirkung auf die Technik schon im voraus absehen läßt.

### Zusammenfassung

Unter dem Thema „Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Strömungen“ werden im Rahmen des Karlsruher Sonderforschungsbereichs 80 die Einflüsse von Ein-



*Bild 9: Diese beiden Aufnahmen zeigen den Additiveinfluß auf die Strahlausbreitung. In beiden Fällen handelt es sich um eine turbulente Durchmischung in getauchten Strahlen, sichtbar gemacht durch Farbzugabe im Strahl. Wie aus dem rechten Bild zu erkennen ist, werden die kleinen Wirbel durch Zugabe von Polyäthylenoxid (0,003 Gew.-%) unterdrückt. (Nach Gadd.)*

leitungsverhältnissen, Grundströmungsverhältnissen, besonderen strömungstechnischen Maßnahmen und von chemischen oder biologischen Fremdstoffen auf Ausbreitungs- und Transportvorgänge in mehreren sich gegenseitig komplementierenden Teilprojekten untersucht. Hinzu kommt die Erforschung des Einflusses von Dichteunterschieden auf turbulente Strömungsvorgänge und der Einfluß von Strömungsvorgängen auf chemisch-biologische Prozesse. Ein Forschungsverbund wird durch Konzentration auf jene komplexen Zusammenhänge erreicht, die sich innerhalb von Einzelinstituten nicht erforschen lassen. Obwohl die wassertechnischen Anwendungsmöglichkeiten im Vordergrund stehen, werden viele der Forschungsergebnisse auch bei Problemen der Luftverschmutzung direkte Verwendung finden können. Für die Übertragung der wissenschaftlichen Ergebnisse in die Praxis sollen die Forschungsergebnisse systemanalytisch verarbeitet werden, um direkt verwendbare Erkenntnisse für eine systematische Gewässerbewirtschaftung und die Beherrschung von Wassergüte- und Feststofftransportverhältnissen zu erarbeiten.

Naudascher, E.; Kobus, H. (Inst. f. Hydromechanik d. Univ. Karlsruhe): Erforschung von Strömungsproblemen der Umweltverschmutzung. UMSCHAU 73 (1973) Heft 6, S 165–171.

### Summary:

At the University of Karlsruhe, about 40 scientists and engineers collaborate in a newly established Research Center on problems of diffusion, dispersion and transport phenomena in fluid flows

relevant to engineering problems of environmental pollution. The research program is aimed at providing a basis for predicting the spreading of waste or cooling water in rivers or stack emissions in the atmosphere, for controlling ecological and morphological changes in water bodies, and for developing new techniques for environmental protection. The individual current research projects are described briefly.

### Literatur:

- [1] Tätigkeitsbericht 1970/71 des Sonderforschungsbereichs 80 „Ausbreitungs- und Transportvorgänge in Strömungen“. Hrsg. E. Naudascher, Karlsruhe, Januar 1972.
  - [2] Townsend, A. A.: The Structure of Turbulent Shear Flows. Cambridge: University Press 1945.
  - [3] Lumley, J. L.; Tennekes, H.: A First Course in Turbulence. MIT Press 1972.
  - [4] Naudascher, E.: Flow in the Wake of Self-Propelled Bodies and Related Sources of Turbulence. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 22, 1965.
  - [5] Abraham, G.: Jets and Plumes Issuing into Stratified Fluid. Proc., International Symposium on Stratified Flows, Novosibirsk 1972.
  - [6] Turner, J. S.: Buoyant Plumes and Thermals. Annual Review of Fluid Mechanics, USA 1969.
  - [7] Parker, F. L.; Krenkel, P. A. (Hrsg.): Engineering Aspects of Thermal Pollution. Vanderbilt University Press 1969.
  - [8] Engineering Aspects of Heat Disposal from Power Generation, R. F. Harleman, et al., Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, MIT, Cambridge, Mass. 1971.
  - [9] Raudkivi, A. J.: Loose Boundary Hydraulics. Oxford: Pergamon, 1967.
  - [10] Graf, W. H.: Hydraulics of Sediment Transport. McGraw Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 1971.
- Weitergehende Information und ausführliche Literaturangaben finden sich in [1].