

### 3.6 Kurzbericht zu Teilprojekt A 19

#### MASSENAUSTAUSCH IN STRÖMUNGEN MIT 'TOTWASSERZONEN'

##### 1. Übersicht

Förderungszeitraum: ab Mitte 1975

Berichtszeitraum: 1.7.75 - 31.12.76

Projektleiter: Prof. Dr. H. Kobus/Dr.-Ing. B. Westrich

Wiss. Mitarbeiter: Dr.-Ing. B. Westrich, wiss. Angest. (seit 1975)

Techn. Mitarbeiter: H. Beran, Techniker (seit 1975)

##### Finanzielle Förderung:

Jahr	Personal- mittel	Sachmittel	Investitionen	Gesamt
1975	37.324,20	37.071,49	-	74.395,69
1976 <sup>+</sup>	105.632,70	15.653,58	-	121.286,28
Summe	178.956,90	52.725,07	-	195.681,97

<sup>+</sup>) Ausgabereist 1976 noch nicht erfaßt

SFB-Berichte (siehe Kap. 4.1):

43, 80, 95

Veröffentlichungen 1975/76 (siehe Kap. 4.2):

41, 43, 45, 82, 83, 84, 86

Vorträge 1975/76 (siehe Kap. 4.9):

80, 81, 83, 124

Dissertationen, Diplom- und Studienarbeiten (siehe Kap. 4.4):

16, 17, 18, 19, 20

## 2. Problemstellung und Ziel

Im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Nutzung der Oberflächengewässer gewinnt die Frage nach der Wechselwirkung zwischen fließenden und angrenzenden stehenden Gewässern im Hinblick auf die Kontrolle und Erhaltung der Wasserqualität zunehmend an Bedeutung. Der wechselseitige Austausch von Wasserinhaltsstoffen (Suspensionen, Sauerstoff, toxische Stoffe und dgl.) zwischen beiden Wasserkörpern hängt entscheidend davon ab, ob der Strömungszustand stationär oder instationär ist. Die Kenntnis der Austauschvorgänge in natürlichen Gewässern liefert Ansätze zu strömungsmechanischen Verbesserungen von Gewässergütemodellen. Das Ziel der Untersuchungen ist die experimentelle Bestimmung des Massenaustauschs unter stationären und instationären Strömungsbedingungen für Totwassergebiete unterschiedlicher Größe und Form. Hierbei werden Effekte zufolge von Dichteunterschieden, Windschub und Wellen ausgeschlossen und zunächst nur der Austausch konservativer und hydrodynamisch neutraler wasserlöslicher Stoffe (Farbtracer) bestimmt. Der Austauschprozeß selbst sowie dessen Auswirkung auf das Fließgewässer soll in einem eindimensionalen mathematischen Transportmodell aus Ausgangspunkt für ein Gewässergütemodell näherungsweise simuliert werden.

## 3. Methoden und Arbeitsprogramm

### 3.1 Allgemeines

Zur Bestimmung des Massenaustauschs wurde im Totwasser zu Versuchsbeginn eine gleichmäßige Tracerkonzentration  $c_0$  hergestellt und deren zeitliche Abnahme gemessen (Bild 4). Unter stationären Abflußbedingungen wird der ausschließlich durch Turbulenz verursachte Austausch untersucht. Bei instationären Abflußbedingungen wird einerseits der Austausch aufgrund des Zusammenwirkens von Turbulenz und lateraler Ein- und Ausströmung (periodische Hauptströmung mit Mittelwert  $>$  Null) und andererseits der Austausch aufgrund periodischer Ein- und Ausströmung allein (Mittelwert = Null) untersucht.

### 3.2 Stationäre Strömungsbedingungen

Becken mit Außenströmung, Fall 1 und 2:

Zur Durchführung der experimentellen Arbeiten wurde in einer geraden Rinne

eine Hauptströmung mit einer einseitigen beckenförmigen Querschnittserweiterung erzeugt (siehe Bild 1). Es wurden stilisierte rechteckige Beckenformen mit unterschiedlichen Längen-Breiten-Verhältnissen bei unterschiedlicher Größe und Position der Austauschfläche (stromauf bzw. stromab) untersucht. Das Hauptziel der Untersuchungen war die Bestimmung des turbulenten Massenaustauschs in Abhängigkeit von Beckenform und -größe, Austauschfläche, Wassertiefe und Wassergeschwindigkeit bei unterschiedlicher Sohlrauigkeit.

#### Becken mit Durchströmung, Fall 3:

Um einen direkten Anschluß an die Untersuchungen in der Rinne zu gewährleisten, wurde mit einem großmaßstäblichen Becken begonnen, bei dem Zulauf und Ablauf in der Einströmrichtung lagen (Bild 2). Es wurden Konzentrationsmessungen im Zulauf und Ablauf sowie im Beckenraum selbst vorgenommen. Hauptziel der Untersuchungen war die quantitative Bestimmung signifikanter Durchströmungsgrößen (Aufenthaltszeit, Austauschzeit, Vermischungstendenz) in Abhängigkeit von Einströmgeschwindigkeit, Form und Größe der Einströmfläche und Wassertiefe.

#### Mathematisches Modell:

Zur Verifizierung des Austauschvorganges mit einer Hauptströmung wurde ein eindimensionales mathematisches Modell entwickelt, das den Konzentrationsverlauf in rechteckigen Becken sowie die über die Breite des Hauptstromes gemittelte Konzentration in Abhängigkeit von den stationären Strömungsbedingungen beschreibt. Die Wirkung von Ablösungs- und Rückströmungszonen auf den Ausbreitungs- und Transportvorgang in der Hauptströmung kann somit näherungsweise vorausgesagt werden. Der Einfluß der Wassertiefe, Sohlrauigkeit und Position der Austauschfläche wird in dem aus den Versuchen ermittelten Austauschkoefizienten berücksichtigt.

Die Durchströmungscharakteristik von Becken (Fall 3) wurde zunächst durch die Zufluß-Abfluß-Relation bestimmt. Die empirisch bestimmte Systemfunktion wird benutzt zur Beschreibung der integralen strömungsmechanischen Eigenschaften des Systems (Verweilzeit, Austauschzeit, Austauschgrad).

### 3.3 Institutionäre Strömungsbedingungen

#### Becken mit Außenströmung, Fall 1 und 2:

Bei den instationären Versuchen mit permanenter Grundströmung wurde durch Streuerung des Abflusses eine harmonische Wasserspiegel- und Geschwindigkeits-

oszillation einem vorgegebenen Mittelwert überlagert. Hierbei konnten der mittlere Strömungszustand sowie die Amplitude und Frequenz der instationären Schwankung unabhängig voneinander variiert werden. Hauptziel der Untersuchung war die Bestimmung des Einflusses von Dauer und Intensität der lateralen Ein- und Ausströmung auf den Massenaustausch im Vergleich zum turbulenten Austausch unter stationären Abflußbedingungen.

#### Becken mit periodischer Ein- und Ausströmung, Fall 3:

Zur Untersuchung des Massenaustauschs in Totwassergebieten mit rein instationär-periodischem Charakter wurde ein Modell konstruiert (Bild 3), in dem unter stark vereinfachten Bedingungen tideähnliche Austauschverhältnisse in einem Flachbecken simuliert werden können. An diesem Grundmodell wurden typische Merkmale des rein konvektiven Massenaustauschs mit ausgeprägter Einströmphase (Strahlcharakter) und Ausströmphase (Senkenströmung) für verschiedene Beckenformen, Frequenzen und Amplituden der Tidebewegung qualitativ und quantitativ studiert.

#### Mathematisches Modell:

Durch den Einbau konvektiver, zeitabhängiger Transportglieder in das stationäre Austauschmodell kann der Einfluß der periodischen lateralen Ein- und Ausströmung für Becken mit instationärer Außenströmung simuliert werden. Zur Berücksichtigung instationärer Transportvorgänge in einem eindimensionalen Flußmodell wird die hydrodynamische Grundgleichung mit der Transportgleichung gekoppelt zur Beschreibung instationärer Austauschvorgänge und deren Berücksichtigung in Wassergütemodellen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Stationärer Massenaustausch

#### 4.1.1 Allgemeine Charakteristiken

Die Untersuchungen zeigen, daß bei bestimmten geometrischen und Strömungskonfigurationen im Bereich einer Rückströmungszone Wirbelgebiete erster und höherer Ordnung auftreten können. Die turbulente Vermischung innerhalb eines solchen Makrowirbels ist so intensiv, daß eine nahezu homogene Konzentrationsverteilung innerhalb eines Wirbels vorliegt. Entsprechend der Diffusivität stellt sich ein Konzentrationsgefälle zwischen den einzelnen Makrowirbeln während des Austauschvorganges ein. Der Konzentrationsabbau erfolgt nach einem expo-

nentiellen Zeitgesetz (Bild 5).

#### 4.12 Austausch durch Turbulenz

##### Becken mit Außenströmung:

Der Austauschkoefizient  $\epsilon$  ist für vollgeöffnete Becken ( $L_A = L$ ) mit einem Einwirbelsystem (ca.  $0,4 \leq L/B \leq$  ca. 4) praktisch eine konstante Größe. Dies läßt darauf schließen, daß die Massenstromdichte des ausgetauschten Tracers ähnlich wie die Impulsstromdichte entlang der Austauschlänge praktisch konstant ist. Bei teilgeöffneten Totwassergebieten ist die Position und Größe der Austauschfläche von entscheidender Bedeutung (Bild 6). Liegt die Austauschfläche stromab, so bildet sich ein Einwirbelsystem aus; liegt sie stromauf, so entsteht ein Doppelwirbelsystem. Die jeweilige Austauschzeit steigt etwa linear mit dem Verhältnis der Austauschlänge zur Beckenlänge ( $L_A/L$ ). Der globale Austauschkoefizient für Doppelwirbelsysteme ist stets niedriger als der für Einwirbelsysteme. Flache Wasserkörper (kleine Werte von  $H/B$ ) weisen bei gleichem Rauigkeitsparameter  $H/k$  einen geringeren Austauschkoefizienten auf als relativ tiefe Wasserkörper: mit abnehmendem Verhältnis von Austauschfläche zu Grundrißfläche ( $H/B$ ) geht die Vermischung des Beckeninhaltes relativ zurück, so daß sich der Austauschkoefizient verringert.

Eine Erhöhung der Sohlrauigkeit wirkt zunächst beschleunigend und bei weiterer Steigerung verzögernd auf den Austausch. Der Einfluß des Reibungs- und Tiefen-Breiten-Parameters auf den Mischungs- und Austauschprozeß ist bei der Übertragung von Ergebnissen aus höhenverzerrten Wassermodellen auf die Natur zu beachten (SFB-Bericht ET80).

Aufgrund der relativ homogenen Durchmischung innerhalb eines Makrowirbels läßt sich der Austauschvorgang in einem eindimensionalen mathematischen Modell näherungsweise beschreiben. Das Modell reproduziert das exponentielle Zeitgesetz des stationären Massenaustauschs ausgezeichnet und ist in der Lage, die über das Volumen gemittelte Tracerkonzentration für Einwirbelsysteme in guter Übereinstimmung mit dem Experiment wiederzugeben (siehe Bild 5 und [4]).

##### Becken mit Durchströmung:

Die experimentelle Untersuchung der Beckendurchströmung zeigt, daß die Zulaufbreite  $b$ , Einlaufgeschwindigkeit  $U$  und Wassertiefe  $H$  einen entscheidenden Einfluß auf die Durchmischungscharakteristik haben. Bei größeren Einlaufgeschwindigkeiten stellt sich eine stationäre Zweiwirbelkonfiguration mit

konstantem Austauschgrad ein (Bild 2 und 4). Eine Erhöhung der Sohlreibung sowie der Wassertiefe bewirkt eine Erhöhung der Beckendurchmischung und eine Verminderung der Austauschzeit.

#### 4.2 Instationärer Massenaustausch

##### 4.21 Allgemeine Charakteristiken

Der instationäre Austausch des Beckeninhalts ist gekennzeichnet durch eine verstärkte Vermischung infolge der lateralen Einströmung (vorwiegend Verdünnungseffekt) und durch eine verstärkte Ausspülung des Beckenwassers infolge der lateralen Ausströmung aus dem Becken. Je kleiner die longitudinale Geschwindigkeit der Außenströmung im Vergleich zur lateralen Ein-/Ausströmgeschwindigkeit ist, desto stärker überwiegt der konvektionsbedingte Austauschanteil den turbulenzbedingten.

##### 4.22 Austausch durch Turbulenz und laterale Ein- und Ausströmung (Becken mit Außenströmung):

Die beiden Extremfälle mit sehr langer bzw. sehr kurzer Schwingungsdauer im Vergleich zur Austauschzeit können als quasi-stationäre Grenzfälle behandelt werden. Der Einfluß instationärer Abflußbedingungen ist besonders stark ausgeprägt bei großen Totwassergebieten mit vergleichsweise kleiner stromauf gelegener Austauschfläche (Doppelwirbelsystem). Bei derartigen Totwassergebieten dominiert der laterale konvektive Austausch über den turbulenten. Die Einströmphase ist durch eine mischungsintensive Strahlströmung und die Ausströmphase durch eine weniger mischungsintensive Senkenströmung gekennzeichnet. Der Austauschvorgang wird mit steigender Amplitude der Eingangswelle verstärkt. In Abhängigkeit von der Beckengröße und -form läßt sich eine Grenzperiode  $T$  angeben, oberhalb derer periodische Abflußänderungen (vergleichbar mit Tidebewegungen) keine weitere Beschleunigung des Massenaustauschs im Vergleich zum stationären Austausch mit gleichen mittleren Strömungsgrößen bewirken. Dies ist in Bild 7 durch die Darstellung des Verhältnisses von instationärem zu stationärem Austauschkoeffizienten ausgedrückt.

Das eindimensionale instationäre Austauschmodell gibt diesen komplizierten Diffusions- und Transportvorgang in erster Näherung überraschend gut wieder, wie das Beispiel in Bild 5 zeigt.

#### 4.23 Austausch durch periodische Ein- und Ausströmung

Die Untersuchungen der rein periodischen konvektiven Austauschvorgänge im sogenannten "Tidemodell" zeigen eine starke Abhängigkeit des Austauschgrades von der Tidecharakteristik und der Form des Beckens. Die Abnahme der Konzentration erfolgt oszillierend, wobei der Mittelwert durch eine Exponentialfunktion gut beschrieben werden kann. Es zeigt sich deutlich, daß die Einströmphase sehr mischungsintensiv ist, während die Ausströmphase vorwiegend durch den konvektiven Transport des Tracergemisches charakterisiert ist.

#### 5. Weiterführung

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen durch weitere Messungen ergänzt und vertieft werden, wobei folgende Aspekte im Vordergrund stehen:

- Bestimmung des longitudinalen Dispersionseffektes eines und mehrerer hintereinander geschalteter offener Becken (Fall 1a; Bühnenfeldreihe)
- Stationäre/instationäre Austauschcharakteristik eines Rechteckbeckens bei anderen Zulauf-Ablaufkonfigurationen (Fall 3a, b, c)
- Untersuchungen am "Tidemodell" über den Einfluß der Sohlreibung, Beckenform und Austauschfläche (Fall 3 d)
- Ausbau der stationären/instationären Modelle für größere Flußabschnitte

#### 6. Literaturhinweise

- [1] Spartaru, A., Maraculescu, I.: "Etude du Tourbillon de l'Entrée dans les Bassins Portuaires Fluviaux", Intern. Congr. Hydr. Res., Fort Collins, 1967.
- [2] Thackston, E.L., Schnelle, K.B.: "Predicting Effects of Dead Zones on Stream Mixing", ASCE, San. Div., April 1970.
- [3] Dursthoff, W.: "Über den quantitativen Wasseraustausch zwischen Fluß und Hafen". Dissertation an der Universität Hannover, 1970.
- [4] Westrich, B.: "Simulation of Mass Exchange in Dead Zones for Steady and Unsteady Flow Conditions", Int. Symp. on Unsteady Flow in Open Channels, Newcastle, England, April 1976.



Bild 1: Versuchsrinne mit Aussenströmung und seitlichem Totwasser

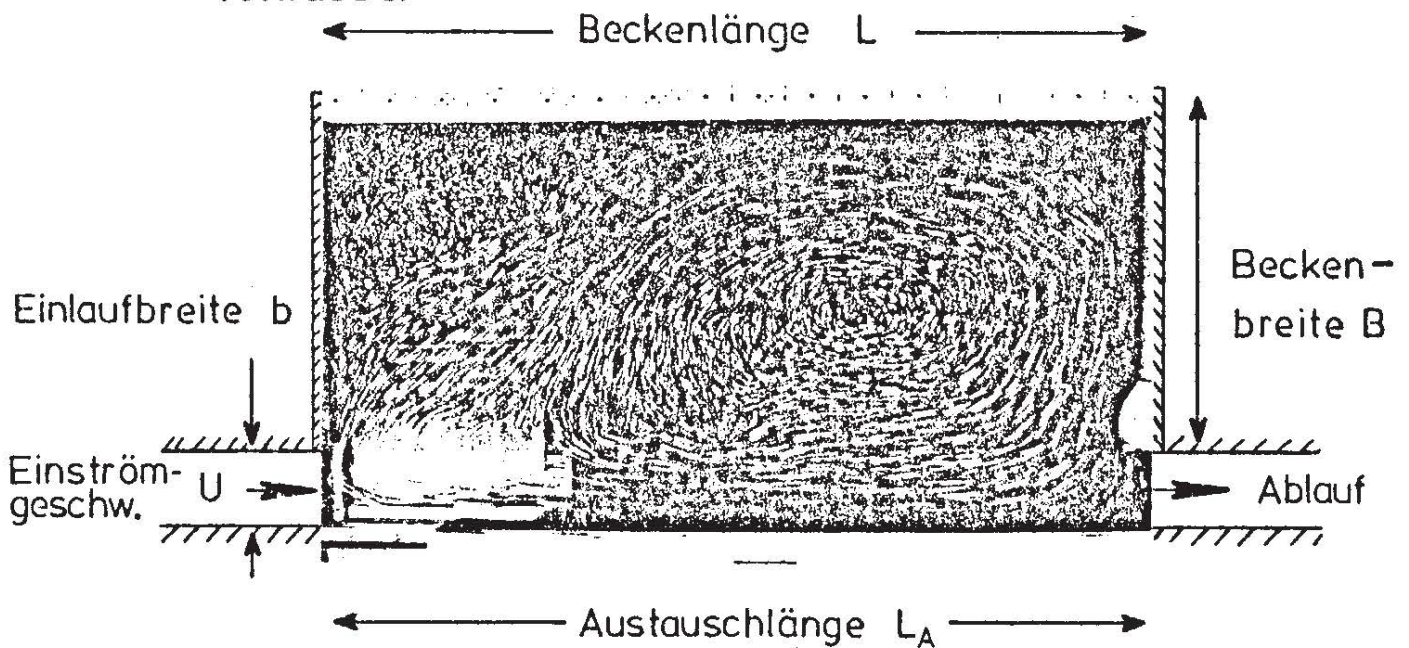


Bild 2: Beckenmodell für Durchströmungsversuche

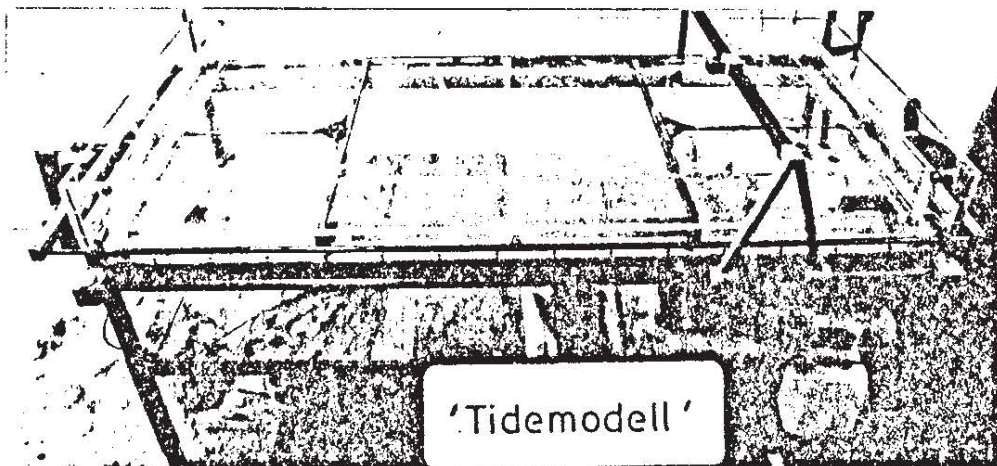
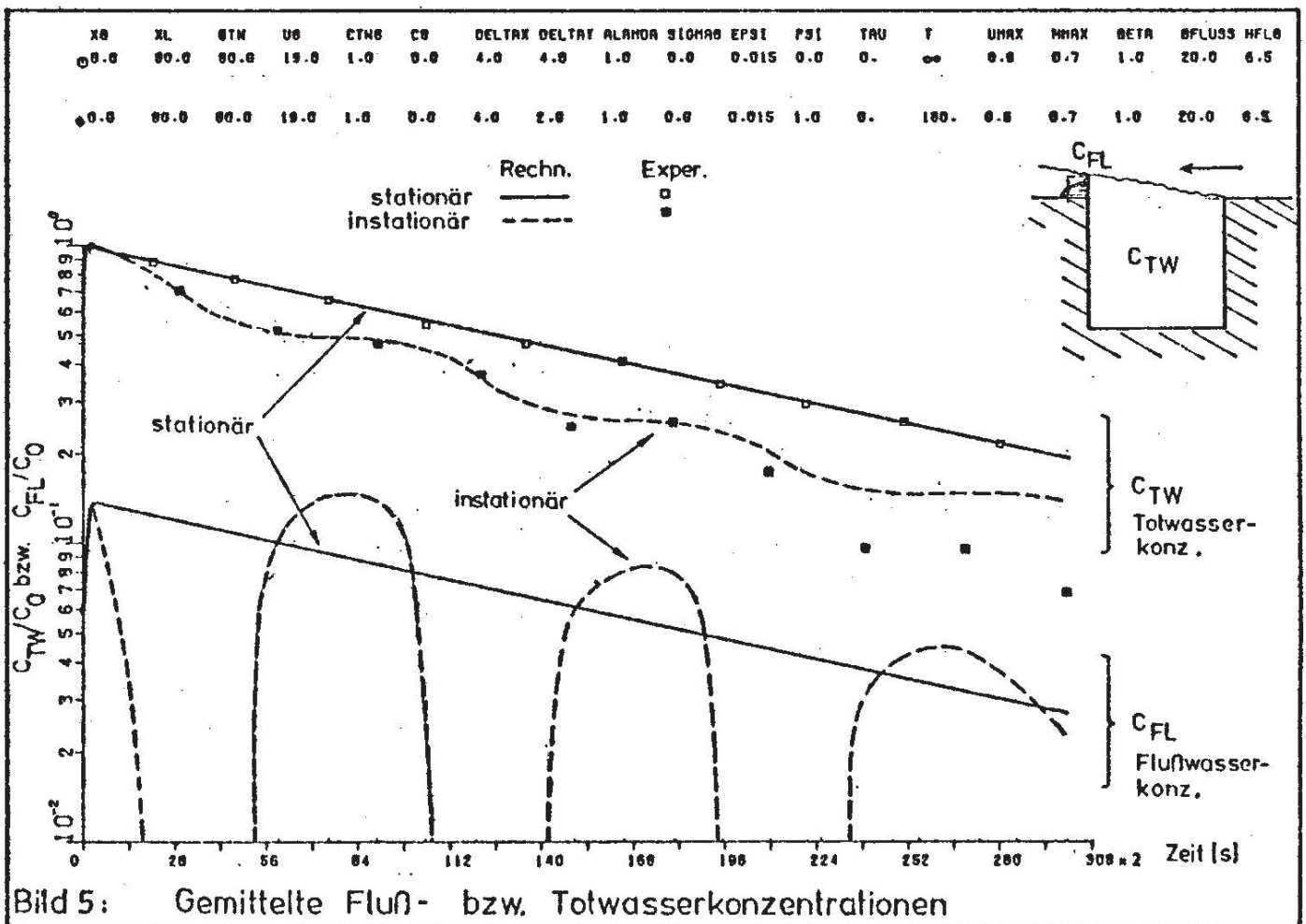
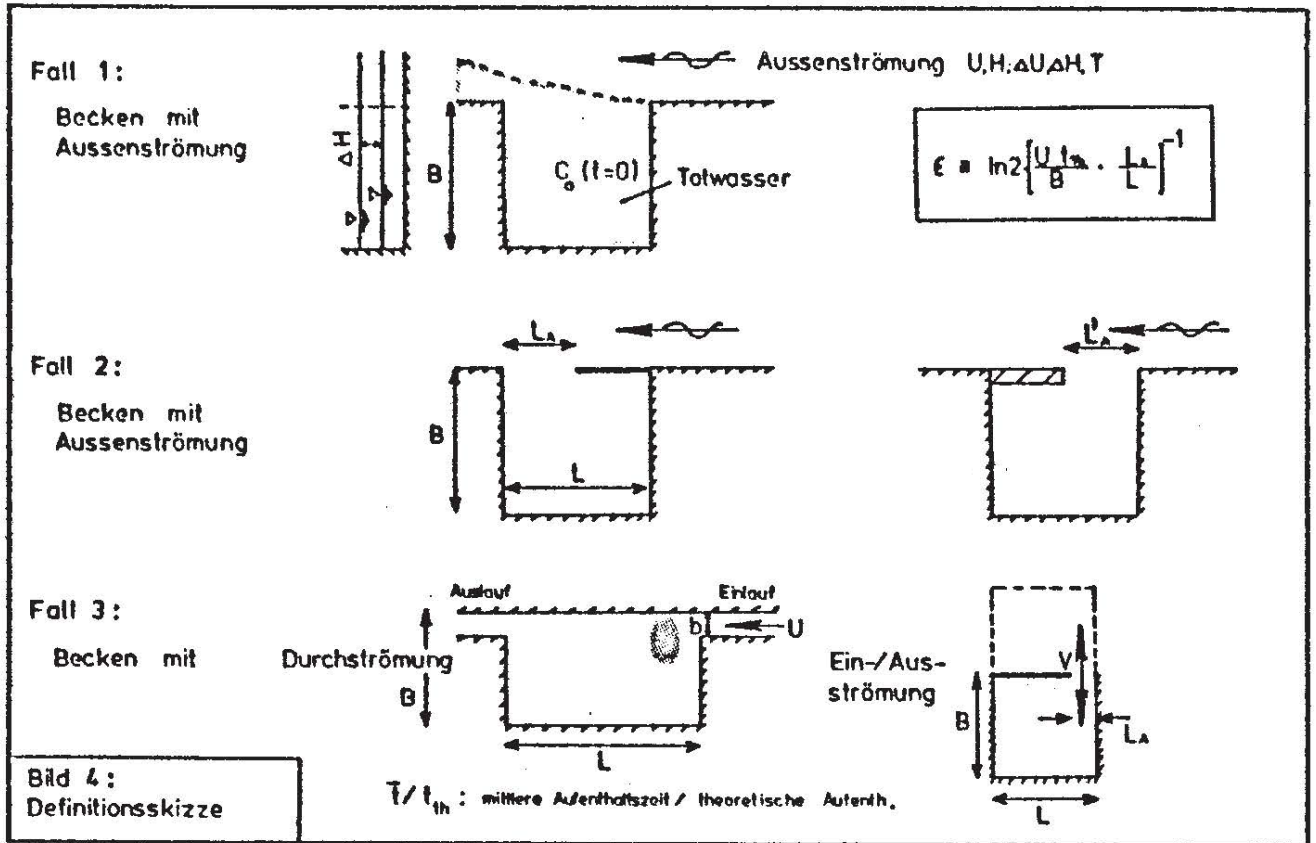


Bild 3: Beckenmodell zur Untersuchung instationärer Austauschvorgänge





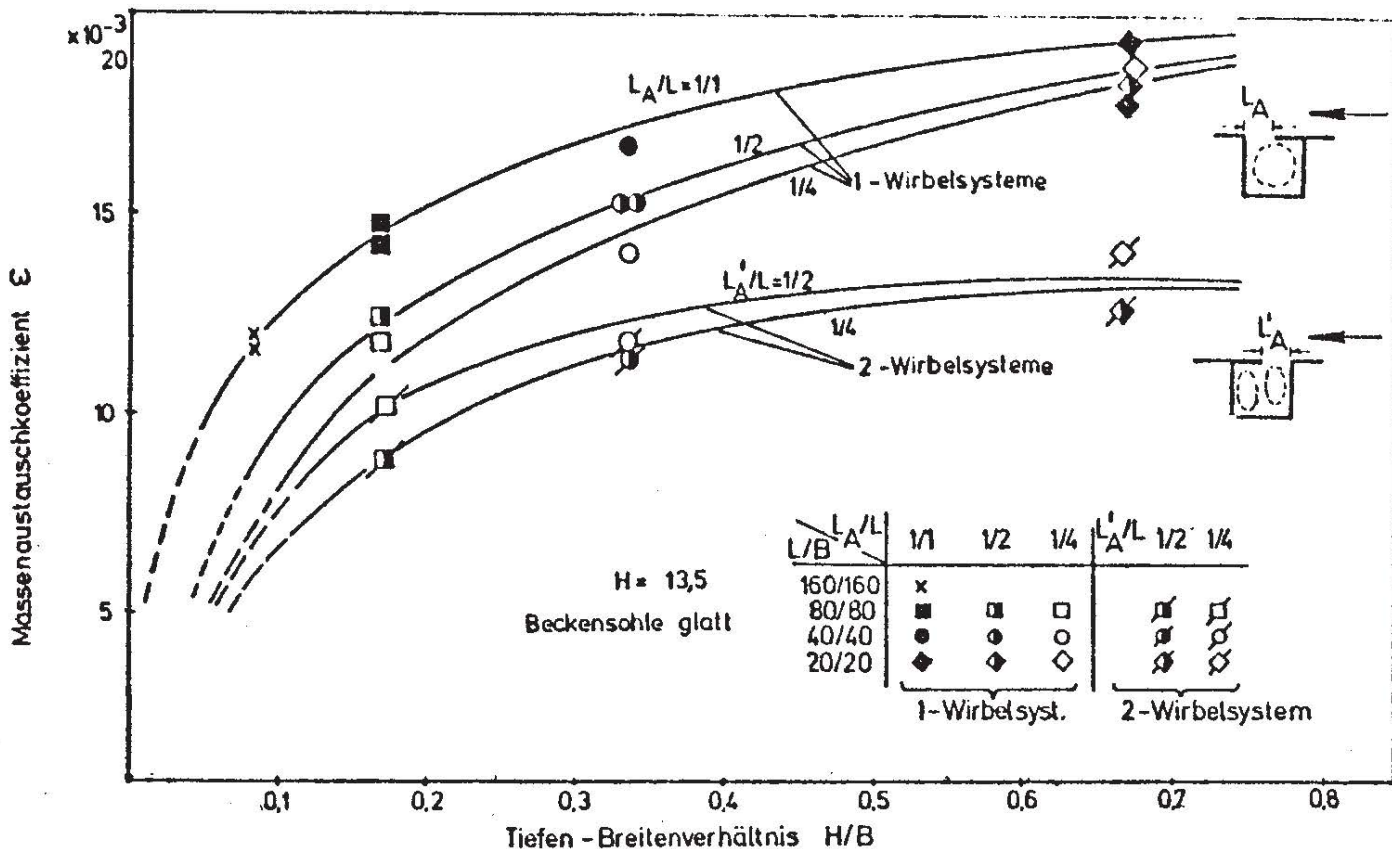


Bild 6: Massenaustauschkoeffizient in Abhängigkeit von der Ausdehnung des Totwasserkörpers, der Position und der Größe der Austauschfläche

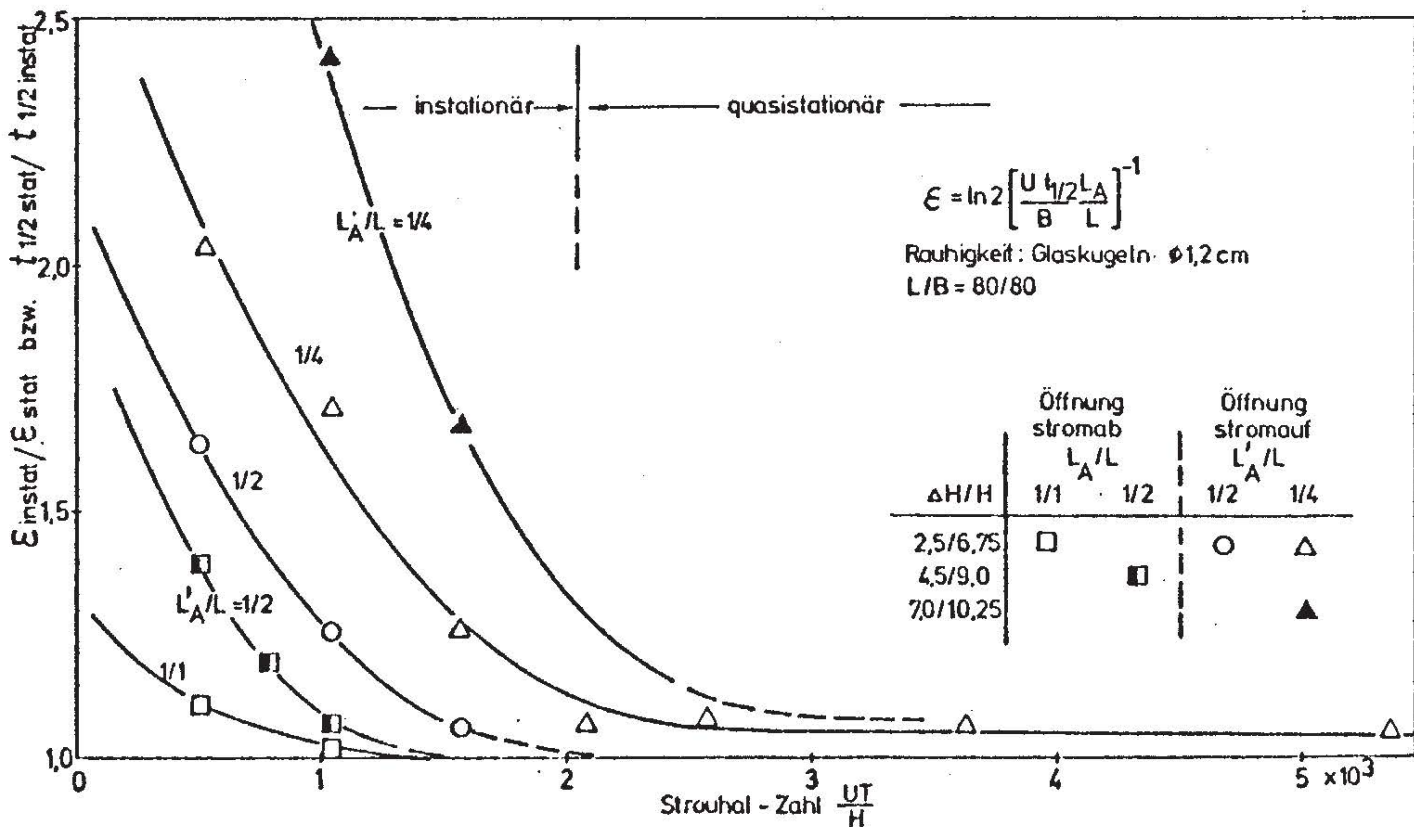


Bild 7: Vergleich stationärer und instationärer Austausch