

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 95 (2003)
Heft: 5-6

Artikel: Beherrschung von Trübeströmen in Stauseen mit Hindernissen, Gitter, Wasserstrahl- und Luftblasenschleier
Autor: Oehy, Christoph / Schleiss, Anton
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939455>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Beherrschung von Trübeströmen in Stauseen mit Hindernissen, Gitter, Wasserstrahl- und Luftblasenschleier

■ Christoph Oehy, Anton Schleiss

Zusammenfassung

Nach 40 bis 60 Jahren Betrieb der Stauseen in den Alpen ist die Verlandung in vielen Speichern zu einem bedeutenden Problem geworden. Für den Transport und die Ablagerung der Sedimente in den Stauräumen sind oft die Trübeströme verantwortlich. Diese Dichteströmungen mit hohen Schwebstoffkonzentrationen bewegen sich wie Unterwasserlawinen entlang dem Talweg des Stausees bis in die Nähe der Staumauer, wo die Sedimentablagerungen den Betrieb des Grundablasses oder der Triebwasserfassung beeinträchtigen können. Um diesen Verlandungsprozess innerhalb des Stausees zu beherrschen, wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes die Wirkungen von Hindernissen, Gitter, Wasserstrahl- und Luftblasenschleier auf den Trübestrom mit hydraulischen Versuchen und numerischen Simulationen untersucht. In den hydraulischen Modellversuchen wurden jeweils die zeitliche und räumliche Entwicklung der Sedimentablagerungen, vertikale Geschwindigkeitsprofile und die Frontgeschwindigkeit der Trübeströme gemessen. Die Massnahmen wurden weiter mit einem dreidimensionalen, numerischen Modell, basierend auf dem Strömungsrechnungsprogramm CFX-4.4, simuliert. Die Untersuchungen zeigten, dass die Trübeströme bei entsprechender Auslegung der konstruktiven Massnahmen wirkungsvoll beeinflusst werden können. Basierend auf den Resultaten der hydraulischen Versuche und der numerischen Simulationen werden für die Anwendung der verschiedenen Massnahmen überschlägige Bemessungsregeln angegeben.

Résumé: Maîtrise des courants de turbidité dans des retenues par des obstacles, grilles, jets d'eau et écrans d'air

Après 40 à 60 ans d'exploitation, l'alluvionnement est devenu un problème sérieux dans nombreuses retenues alpines. Pour le transport et la déposition des sédiments, les courants de turbidité sont très souvent le processus déterminant. Ces avalanches sous l'eau à hautes concentrations de sédiments en suspension se déplacent le long du talweg du lac jusqu'au barrage, où les dépôts de sédiments perturbent l'exploitation de la vidange de fond et de la prise d'eau usinière. Afin de contrôler l'alluvionnement à l'intérieur d'une retenue, les effets des obstacles, grilles, jets d'eau et écrans d'air ont été étudiés par essais physiques et simulations numériques dans le cadre d'un projet de recherche. Dans les essais physiques, des mesures de l'évolution temporelle et spatiale des dépôts, des profils verticaux de vitesse et de la propagation du front du courant de turbidité ont été réalisées. Les mesures constructives ont ensuite été simulées avec un modèle numérique tridimensionnel basé sur le logiciel CFX-4.4. Les études ont montré que les courants de turbidité peuvent être influencés effectivement par des mesures conçues en conséquence. Sur la base des résultats des essais physiques et des simulations numériques, des règles approximatives de conception sont données pour l'application des diverses mesures constructives.

Summary: Management of turbidity currents in reservoirs by obstacles, screens, water jets and bubble curtains

After 40 to 60 years of operation, sedimentation has become a serious problem in many Alpine reservoirs. Turbidity currents are often the determining process for the transport and deposition of the sediments in such reservoirs. These underwater avalanches with a high suspended-sediment concentration follow the thalweg of the lake to the deepest area near the dam, where the sediments can affect the operation of the bottom outlet and the power intake. To control the sedimentation within the reservoir, the effects of obstacles, screens, water jets and bubble curtains on the turbidity current were investigated with physical experiments and numerical simulations. In the physical experiments, measurements of the spatial and temporal evolution of the deposits, of vertical velocity profiles and of the front velocities were recorded. The investigated measures were simulated using a three-dimensional numerical model, based on the flow solver CFX-4.4. The investigations showed that turbidity currents could be influenced effectively by properly designed constructive measures. Based on the results of the physical experiments and numerical simulations, some design recommendations are given as rules of thumb for the application of the investigated measures.

1. Einleitung

Die Stauraumverlandung ist auch bei alpinen Stauseen zu einem wichtigen Problem geworden. Hauptursache für den Transport und die Ablagerung der Sedimente ist oft das Phänomen der Trübeströme [1, 2]. Diese Dichteströmungen mit hohen Schwebstoffkonzentrationen entstehen hauptsächlich während

Hochwasserereignissen und folgen dem Talweg bis in die tiefsten Zonen des Stausees, normalerweise in der Nähe der Staumauer, wo sich die Sedimente ablagern (Bild 1).

Je nach Gefälle des Talweges können Trübeströme hohe Geschwindigkeiten erreichen. Dadurch können bereits abgelagerte Sedimente wieder aufgewirbelt und in Rich-

tung Talsperre transportiert werden. Der Eintrag von zusätzlichen Feinmaterialien in Suspension erhöht die Dichte des Trübestromes, was ihn zusätzlich beschleunigt. Andererseits verlangsamt er sich in Flachstrecken, was zur Absetzung der Schwebstoffe und schlussendlich zum Absterben des Trübestroms führt [3].



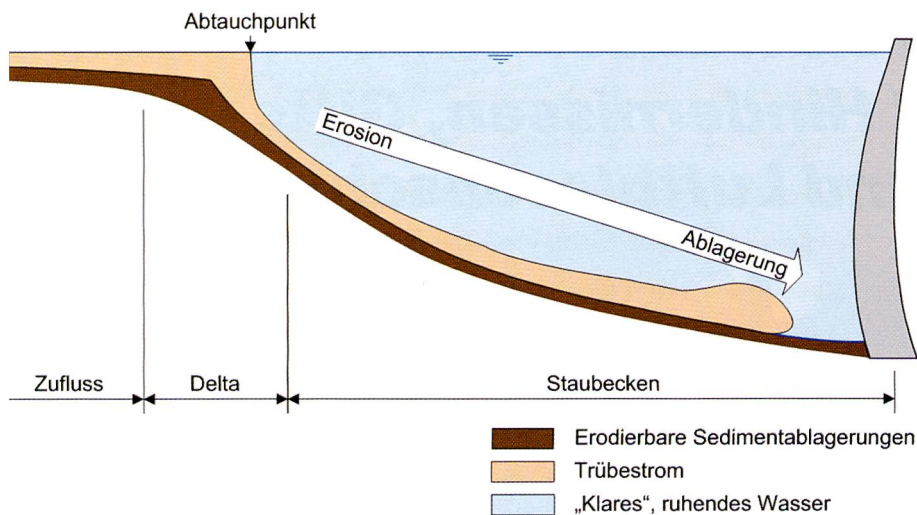


Bild 1. Schematische Darstellung eines Trübestroms in einem Stausee.

Wenn auch die Feststofffracht im Vergleich zum Stauseevolumen gering ist, können doch die in der Nähe der Talsperre konzentrierten Ablagerungen den Betrieb der Ausflussorgane, wie Grundablass und Triebwasserfassung, nach einigen Betriebsjahren erheblich beeinträchtigen. Dies kann bereits bei vielen Stauseen in der Schweiz nach 40 bis 60 Jahren Betrieb beobachtet werden [4, 5].

Falls die Trübestrome in einem Stausee gänzlich unterbunden oder so beeinflusst werden können, dass sie die Sedimente nicht an kritische Stellen transportieren, kann die Nachhaltigkeit der Nutzung des Stausees erheblich verbessert werden. Deshalb wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes technische Massnahmen identifiziert und untersucht, mit welchen die Verlandung durch Trübestrome beherrscht werden kann. Diese Massnahmen zielen grundsätzlich darauf ab, die Trübestrome zu stoppen, zu verdünnen oder umzulenken. Als Massnahmen selbst sind Hindernisse und Dissipationselemente wie Gitter und Geotextilvorhänge im Stausee sowie die Zuführung von Fremdenergie in Form von Wasserstrahl- oder Luftblasenschleier denkbar (siehe auch [1]).

Im Talweg des Stausees angeordnete Hindernisse können, wenn sie eine minimale

Höhe aufweisen, die Trübestrome stoppen und die Schwebestoffe zur Absetzung bringen. Denkbar sind kleinere Schüttdämme und Mauern, welche eine kleine Durchflussöffnung aufweisen müssen, damit sie bei tiefem Stauspiegel im Stausee nicht Wasser zurückhalten (Bild 2a).

Trübestrome können auch durch Dissipationselemente, wie zum Beispiel einen Geotextilvorhang, gestoppt werden. Dieser ist entweder über den untersten Teil des Talquerschnitts gespannt oder an Schwimmern an der Seeoberfläche aufgehängt, um so Stauspiegelschwankungen flexibel folgen zu können. Zum Stoppen des Trübestromes muss der Textilverhang zudem nicht absolut dicht sein, sondern kann auch maschenförmig ausgebildet sein. Der Trübestrom wird dabei nicht unmittelbar gestoppt, sondern so gebremst und verdünnt, dass er anschliessend abstirbt (Bild 2b). Mit Hindernissen oder Geotextilvorhängen kann der Trübestrom auch umgelenkt werden, damit er sich an einer unproblematischen Stelle im Stausee, zum Beispiel in einer Bucht, absetzen kann.

Als dritte grundsätzliche Massnahme kann der Trübestrom durch Zuführen von Fremdenergie gestoppt, verdünnt oder umgelenkt werden. Weisen aufwärts gerichtete Wasserstrahlschleier einen gewissen Impuls-

widerstand auf, wird der Trübestrom vollständig angehalten. Ansonsten ist zumindest ein starker Rückhalt- und Verdünnungseffekt zu erwarten, welcher den Trübestrom bremst und zum Absterben bringt. Für diese lokalen Wasserstrahlinjektionen könnte beispielsweise die Energie des Wassers aus Überleitstellen verwendet werden, welches in einer bestimmten Höhe über dem Stauziel eingeleitet wird (Bild 2c).

Die Idee eines Luftblasenschleiers ist es, einen ankommenden Trübestrom zu verwirbeln und anschliessend die Feinstoffe im Stausee in Schwebe zu halten, sodass sie mit dem Turbinierwasser evakuiert werden können (Bild 2d). Selbstverständlich muss dabei die Schwebstoffkonzentration begrenzt werden, um Abrasionsprobleme an den hydraulischen Maschinen und ökologische Probleme im Unterwasser zu verhindern. Trübestrome erreichen Sedimentkonzentrationen von einigen Volumenprozenten. Durch eine Verdünnung infolge der Verwirbelung mit einer grösseren Wassermenge können schlussendlich die Konzentrationen so begrenzt werden, dass die erwähnten Probleme nicht auftreten. Zudem halten heute die mit neuartigen Materialien beschichteten Laufräder der Hochdruckturbinen Sedimentkonzentrationen von 2 bis 5 g/l über normale Revisionszyklen (3–5 Jahre) stand.

2. Numerische und physikalische Simulation von Trübestromen

Die Wirkungen der technischen Massnahmen zur Beherrschung von Trübestromen in einem Stausee, wie sie in Bild 2 dargestellt sind, wurden mit Hilfe vereinfachter Flachwasseranalysen, hydraulischer Modellversuche und numerischer Simulationen untersucht.

Die hydraulischen Modellversuche wurden in einem Rechteckskanal von 7,1 m Länge, 27 cm Breite und 90 cm Höhe durchgeführt. Dabei wurden sowohl Versuche mit horizontaler wie auch mit geneigter Sohle (Kanalneigung = 4,64%) gemacht. Um die Ablagerungshöhen zu messen, wurde ein neues Gerät entwickelt, das auf dem Prinzip der elektrischen Widerstandsmessung der abgelagerten Sedimentschicht beruht [6]. Diese Messmethode erlaubte es, die zeitliche und räumliche Entwicklung der Ablagerungshöhen mit einer Genauigkeit von rund 0,15 mm zu erfassen.

Zusätzlich wurden vertikale Geschwindigkeitsprofile mit einer Ultraschallsonde (UVP) und die Frontgeschwindigkeiten mit Videoaufnahmen ermittelt.

Die folgenden sechs Versuchsserien wurden realisiert:

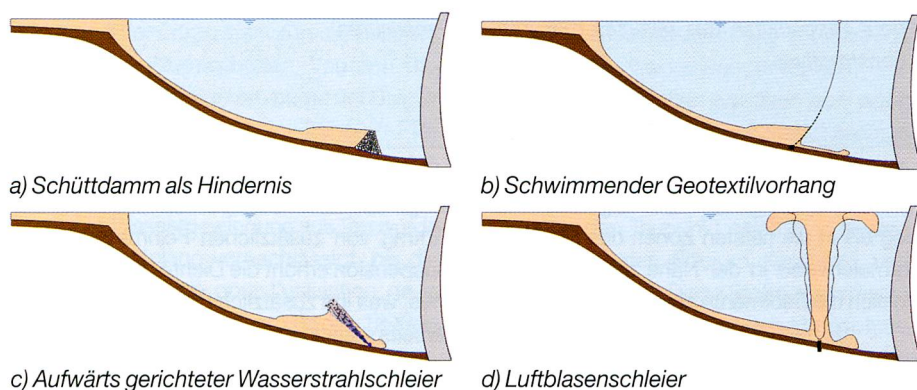


Bild 2. Technische Massnahmen zur Beherrschung von Trübestromen in einem Stausee.

- Serie A: Verhalten von unbeeinflussten Trübestromen auf horizontaler und geneigter Sohle (10 Versuche).
- Serie B: Wirkung eines Hindernisses von 24 cm Höhe (5 Versuche).
- Serie C: Wirkung eines durchlässigen, vertikalen Geotextilvorhanges (5 Versuche mit 2 Durchlässigkeiten).
- Serie D: Wirkung eines vertikalen Wasserstrahlschleiers (4 Versuche).
- Serie E: Wirkung eines 45° stromaufwärts gerichteten Wasserstrahlschleiers (4 Versuche).
- Serie F: Wirkung eines Luftblasenschleiers (2 Versuche).

Die verschiedenen Charakteristiken der entsprechenden Versuchsanordnungen werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer erläutert. Bei den Versuchen ist grundsätzlich zwischen strömenden und schiesenden Trübestromen zu unterscheiden, je nachdem, ob die densimetrische Froudezahl Fr_d kleiner oder grösser als 1 ist. Diese charakteristische Zahl ist wie folgt definiert

$$Fr_d^2 = \frac{U^2}{g'h} \quad (1)$$

wobei U der mittleren Geschwindigkeit und h der Höhe des Trübestroms entspricht. g' ist die reduzierte Erdbeschleunigung, die bei einer Sedimentkonzentration von 1 g/l rund 1000-mal kleiner als die normale Erdbeschleunigung g ist und definiert wird als

$$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho_a} g = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a} g \quad (2)$$

wobei ρ_t der Dichte des Trübestroms und ρ_a der Dichte des klaren Wassers entspricht.

Die numerischen Simulationen dienen dazu, die Wirkungen von Hindernissen, Geotextilvorhängen und Wasserstrahlschleier weiter zu quantifizieren und die berechneten Resultate mit den hydraulischen Modellversuchen zu vergleichen. Für die numerische Simulation wurde das dreidimensionale Strömungsberechnungsprogramm CFX-4.4 verwendet [7]. Es basiert auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen mit variabler Dichte (RANS). Der Transport der Schwebestoffe wird mit einer Konvektions-Diffusionsgleichung für die Sedimentkonzentration ermittelt, wobei die Sinkgeschwindigkeit im konvektiven Term berücksichtigt wird:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (U_i - w_i) \frac{\partial c}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) = (S_E - S_D)_b \quad (3)$$

mit c der Sedimentkonzentration, U_i den Geschwindigkeitskomponenten und w_i der Sinkgeschwindigkeit der Sedimente. S_E und S_D entsprechen den am Boden erodierten oder abgesetzten Sedimenten und Γ_T der Wirbeldiffusivität (eddy diffusivity), die mit dem k - ϵ -Turbulenzmodell bestimmt wird. Um die Erosions- oder Absetzungsterme zu mo-

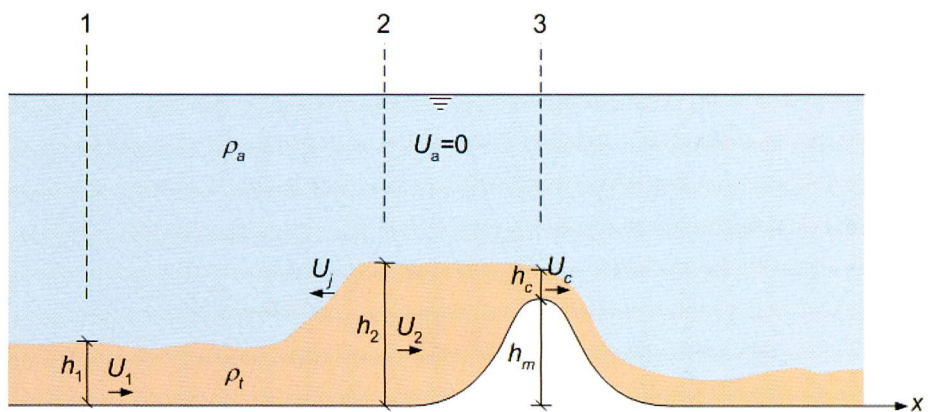


Bild 3. Durch Hindernis teilweise gebremster Trübestrom.

dellieren, wurde der Ansatz von Garcia und Parker verwendet [8]. Im Weiteren wurde das Programm mit zusätzlichen Routinen ergänzt, die erlauben, den fraktionellen Sedimenttransport und den Effekt der Dichteschichtung im Turbulenzmodell zu berücksichtigen [9].

Für die Simulation von Hindernissen, Gitter und Wasserstrahlschleier wurden zudem individuelle Programmanpassungen vorgenommen, die in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

3. Wirkung von Hindernissen

3.1 Flachwasseranalyse

Bei grossen Wassertiefen kann der Einfluss der oberen, klaren Wasserschicht auf das Fliessverhalten des Trübestroms vernachlässigt werden. Wenn ausserdem die Mischung der beiden Schichten, die Reibung am Boden sowie die Ablagerung und Erosion der Schwebestoffe vernachlässigt wird, kann der Trübestrom analog zu einer Strömung mit freier Oberfläche mit einer Flachwasseranalyse untersucht werden. Der entscheidende Unterschied von internen Strömungen (Trübestromen) zu Strömungen mit freier Oberfläche ist die mit den Auftriebskräften reduzierte Erdbeschleunigung.

Wenn ein Trübestrom auf ein Hindernis trifft, kann je nach Hindernishöhe ein Teil der Strömung über das Hindernis weiterfliessen und der andere Teil mit einer Bore, das heisst einem sich bewegenden internen Wassersprung ähnlich einer Schwallwelle stromaufwärts zurückfliessen. Weist das Hindernis eine bestimmte Mindesthöhe auf, wird der Trübestrom vollständig gebremst und reflektiert [10, 11].

Zur Herleitung einer Beziehung zwischen der ankommenden Strömung bzw. dem unbeeinflussten Trübestrom, der Hindernishöhe und dem weiterfliessenden Anteil, wird ein durch ein Hindernis mit maximaler Höhe h_m teilweise gebremster Trübestrom betrachtet (Bild 3).

Zwischen Querschnitt 1 und 2 können Kontinuitäts- und Impulsgleichung in einem sich mit dem internen Sprung (Bore) mit Geschwindigkeit U_j bewegenden Kontrollvolumen wie folgt aufgestellt werden [12]:

$$(U_1 - U_j)h_1 = (U_2 - U_j)h_2 \quad (4)$$

$$(U_1 - U_j)^2 = \frac{1}{2}(g'h_1) \frac{h_2}{h_1} \left(1 + \frac{h_2}{h_1} \right) \quad (5)$$

Wird auf der Überfallkante eine kritische Strömung ($Fr_{d3} = 1$) angenommen, folgt:

$$U_c = \sqrt{g'h_c} = \sqrt{g'(h_2 - h_m)} \quad (6)$$

Zwischen Querschnitt 2 und 3 gilt die Kontinuitätsgleichung mit fixem Kontrollvolumen, womit U_2 in Gleichung (4) durch eine Kontinuitätsbeziehung mit Gleichung (6) ersetzt werden kann. Werden das Wassertiefenverhältnis h_2/h_1 als dimensionslose Sprunghöhe $H_j = h_2/h_1$ und die Hindernishöhe $H_m = h_m/h_1$ als dimensionslose Grössen geschrieben, folgt aus den Beziehungen der Gleichungen (4), (5) und (6):

$$U_1 - (1 - H_j)U_j = U_2 H_j = (g'h_1)^{1/2} H_j^{3/2} (1 - H_m/H_j)^{3/2} \quad (7)$$

$$U_1 - U_j)^2 = \frac{1}{2}(g'h_1) H_j (1 + H_j) \quad (8)$$

Benutzt man nun zur Charakterisierung der Strömung die Froudezahl des unbeeinflussten Trübestroms Fr_{d1} , kann dieses Gleichungssystem aufgelöst und der Anteil der weiterfliessenden Strömung ermittelt werden. Das Verhältnis der weiterfliessenden zur ankommenden Strömung η ist ein Mass der Sedimentdurchgängigkeit des Hindernisses und wird wie folgt definiert:

$$\eta = \frac{q_c}{q_1} = \frac{U_c h_c}{U_1 h_1} \quad (9)$$

Die Sedimentdurchgängigkeit als Funktion der dimensionslosen Hindernishöhe und der Froudezahl der ankommenden Strömung ist in Bild 4 dargestellt. Im schraffierten Gebiet rechts der ausgezogenen Linie ($\eta = 0,0$) wird der Trübestrom durch das Hindernis vollständig gebremst. Bei strömenden Anströmungsbedingungen ($Fr_{d1} < 1$) muss die erforderliche Hindernishöhe ungefähr doppelt so hoch

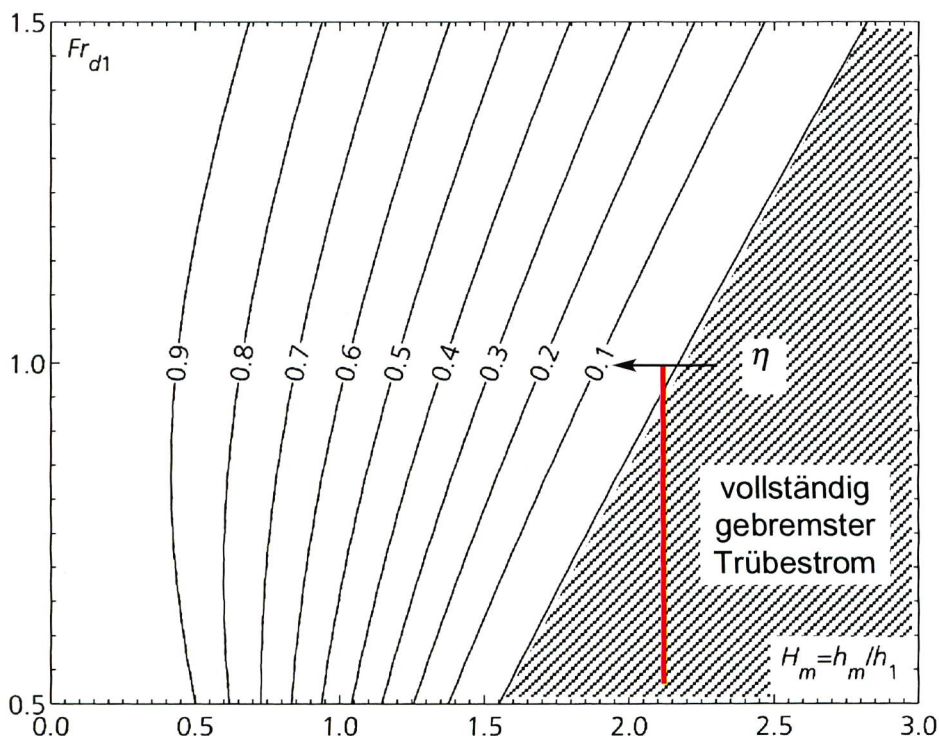


Bild 4. Sedimentdurchgängigkeit η eines Hindernisses in Abhängigkeit der dimensionslosen Hindernishöhe $H_m = h_m/h_1$, und der Froudezahl des ankommenden Trübestroms Fr_{d1} .

sein wie der ankommende Trübestrom (rote Linie in Bild 4).

Obwohl diese vereinfachte Analyse nur für die oben erwähnten Annahmen und eine horizontale Sohle gültig ist, gibt sie doch wertvolle Hinweise über die Abhängigkeit der Sedimentdurchgängigkeit von der Froudezahl des ankommenden Trübestroms und der Hindernishöhe.

3.2 Hydraulische Modellversuche

Das Verhalten eines Trübestroms beim Auftreffen auf ein Hindernis wurde mit fünf Versuchen untersucht. Um die numerische Simulation zu erleichtern, wurde für das 24 cm hohe Hindernis die Gauss'sche Glockenform gewählt, welche nicht weit von der Geometrie eines Schüttdammes entfernt ist.

Vor dem Auftreffen auf das Hindernis hat der Trübestrom die bekannte Form, bestehend aus einem Kopf, gefolgt vom quasistationären Körper. Beim Hindernis angelangt, steigt der Kopf des Trübestroms an diesem hoch, wobei er nur leicht verlangsamt wird, wie die Fotosequenz in Bild 5 illustriert ($t = 0-15$ s). Anschliessend fliesst der Kopf des Trübestroms über das Hindernis. Dahinter erfolgt jedoch ein Einschnitt, sodass nur ein relativ geringer Teil über das Hindernis abfliesst ($t = 40-45$ s). Der grössere Anteil des Trübestroms wird reflektiert, sodass stromabwärts des Hindernisses nur noch ein schwacher Trübestrom vorhanden ist. Da sich die Fließgeschwindigkeiten im zurückgestauten Bereich reduzieren, erhöht sich die Absetzrate der

Feinsedimente. Der dünne Trübestrom, der nach dem Hindernis weiterfliesst, ist deshalb bedeutend kleiner und schwächer im Vergleich zum ankommenden Trübestrom.

Während aller hydraulischen Modell-

versuche wurde die zeitliche und räumliche Entwicklung der Ablagerungen gemessen. Der Vergleich zwischen strömenden und schiessenden Trübestömen mit horizontaler und geneigter Sohle zeigt deutlich, dass bei strömenden Trübestömen die Wirkung des Hindernisses wesentlich ausgeprägter ist und die Sedimentablagerungen stromabwärts des Hindernisses deutlich reduziert werden können. Im schiessenden Fall (geneigter Kanal) ist geometriebedingt das Rückhaltevolumen oberhalb des Hindernisses viel kleiner, und der Trübestrom schiesst ungebremst durch diesen Bereich hindurch.

In Bild 6 ist der quasistationäre Endzustand eines strömenden Versuchs dargestellt. Das Volumen oberhalb des Hindernisses wird aufgefüllt, und nur ein dünner Trübestrom passiert das Hindernis ähnlich einem Wehrüberfall.

3.3 Numerische Simulationen

Für die numerische Simulation der Versuche wurde der Kanal mit einem Berechnungsgitter diskretisiert, welches aus 6772 Zellen bestand und in Bodennähe sowie im Bereich des Hindernisses verfeinert wurde (Bild 7). Da der Einfluss der seitlichen Wandreibung vernachlässigbar ist, war nur eine zweidimensionale Berechnung nötig.

Die Resultate stimmten gut mit den gemessenen Geschwindigkeiten und Ablä-

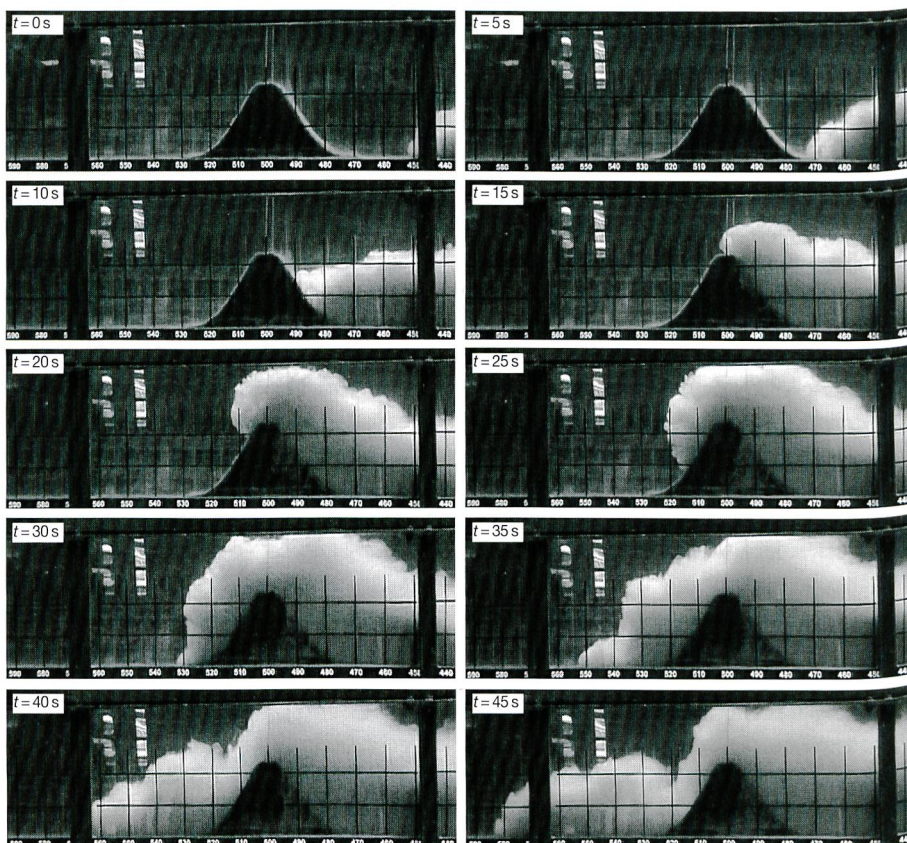


Bild 5. Bildsequenz mit einem Zeitintervall von 5 s eines strömenden Trübestroms, der von rechts nach links über ein Hindernis fliesst (Versuch B01).

gerungshöhen überein [13]. Um die instationäre Strömung zu veranschaulichen, wurde in Bild 8 die Sedimentkonzentrationsverteilung in Zeitschritten von 20 s dargestellt, wobei die einzelnen Linien gleicher Konzentration einem Dichteunterschied von 0,1 g/l entsprechen. Für die Begrenzung des Trübestroms wurde eine minimale Konzentration von 0,1 g/l angenommen.

Auch die numerische Simulation zeigt, dass nur ein geringer Teil des Trübestroms über das Hindernis weiterfliesst und der grösste Teil wellenartig zurückreflektiert wird. Nachdem die Wellen die obere Rückwand des Kanals erreicht haben, werden sie ein zweites Mal reflektiert, bis sich nach einigen Minuten eine quasistationäre Strömung mit einem vollständigen Einstau oberhalb des Hindernisses einstellt.

Zusätzlich zum Vergleich mit den gemessenen Werten ermöglicht das numerische Modell genauere Aussagen über die Rückhalteeffizienz beziehungsweise die Sedimentdurchgängigkeit des Hindernisses. So wurde der Anteil des über das Hindernis weiterfliessenden Trübestroms mit dem Abfluss eines unbeeinflussten Trübestroms in Abhängigkeit der Zeit verglichen. Dabei ergab sich, dass bei strömender Anströmung nur rund 10% des ankommenden Trübestroms weiterfliessen. Hingegen können im Falle eines schiessenden Trübestroms 50–80% der Sedimente nicht zurückgehalten werden. Diese Resultate stimmen gut mit denjenigen der vereinfachten Flachwasseranalyse sowie den in den hydraulischen Modellversuchen gemessenen Werten überein.

3.4 Überschlägige Bemessungsregel und praktische Hinweise für Hindernisse

Die Versuche und Simulationen zeigten, dass Hindernisse nur bei strömenden Anströmungsverhältnissen den Trübestrom wirkungsvoll zurückhalten können. In diesem Fall sollte die Hindernishöhe mindestens der doppelten Höhe des Trübestroms entsprechen.

In alpinen Stauseen führt dies für typische Trübestrome von etwa 10 m Höhe zu einer Hindernishöhe von ungefähr 20 m. Das Rückhaltevolumen oberhalb des Hindernisses sollte so gross wie möglich sein, damit der Trübestrom zurückgehalten werden kann. Deshalb befindet sich das Hindernis idealerweise an einer flachen Stelle des Stausees oder wenn möglich sogar in einer Gegensteigung (vgl. Anwendungsbeispiel im Grimselstausee in [1]).

Die Hindernisse können als Schüttdämme ausgebildet werden, welche aber eine Bresche aufweisen müssen, damit das

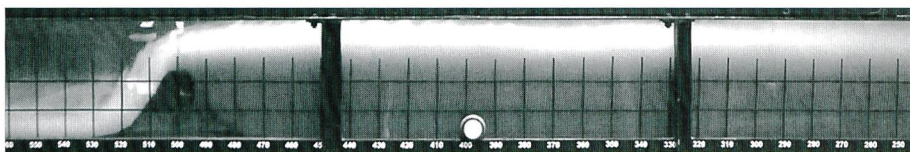


Bild 6. Quasistationärer Endzustand eines Experiments mit Hindernis und horizontaler Sohle (Versuch B01).

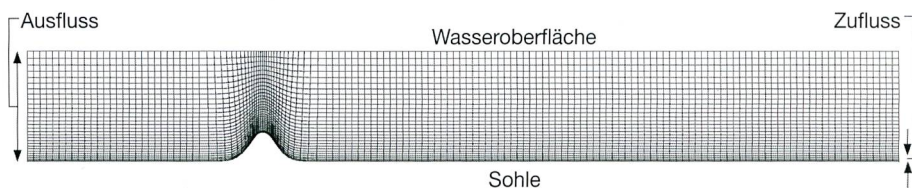


Bild 7. Berechnungsgitter zur Simulation der Strömung eines Trübestroms über ein Hindernis (6772 Zellen).

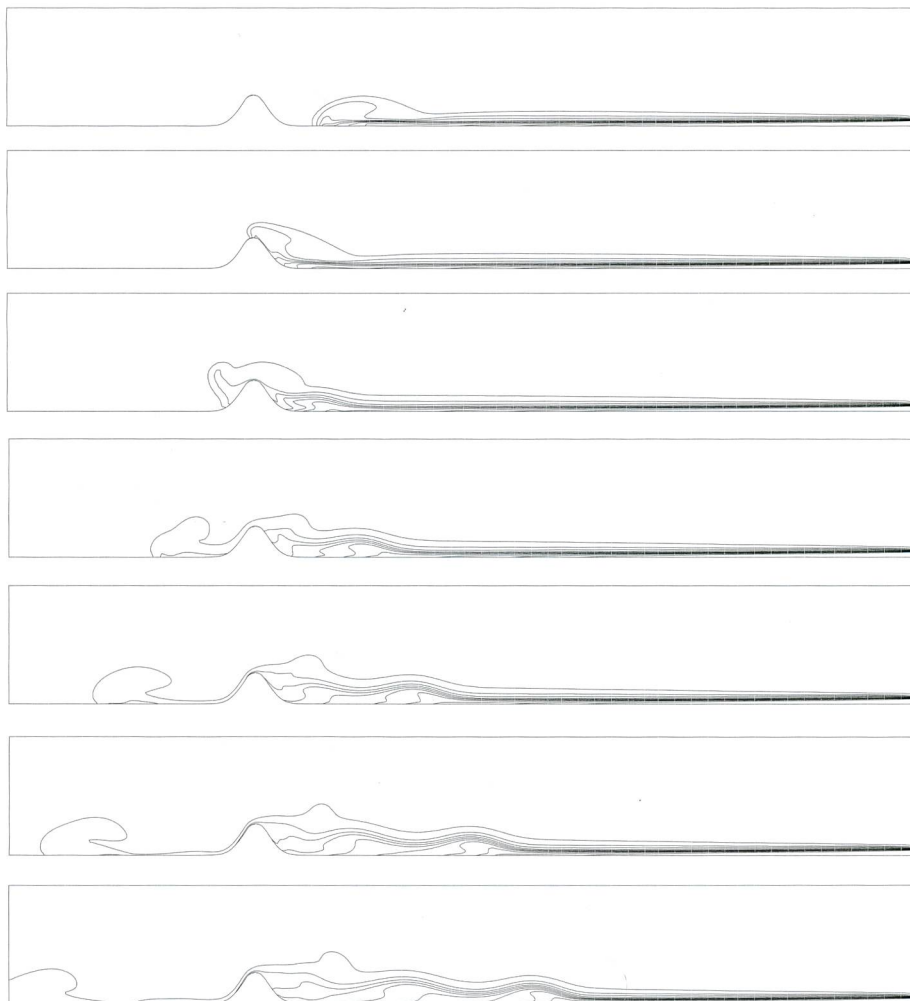


Bild 8. Simulation eines über ein Hindernis fließenden Trübestroms in Zeitintervallen von 20 s. Die Linien gleicher Sedimentkonzentration sind mit einem Intervall von $\Delta\rho = 0,1$ g/l dargestellt, wobei die oberste Linie einer minimalen Konzentration von 0,1 g/l entspricht (Versuch B03).

ungehindert abfließen des Wassers bei tiefen Stauseespiegeln gewährleistet bleibt.

Mit zunehmender Auffüllung des durch das Hindernis gebildeten Absetzraumes nimmt dessen Wirkung ab. Typische Hindernisse von 20 m dürften etwa nach 50 Jahren keine Wirkung mehr zeigen. Bei der Festlegung der Hindernishöhe muss deshalb ein Sicherheitszuschlag gemacht werden. Allen-

falls kann auch nach einer bestimmten Dauer dessen Erhöhung in Betracht gezogen werden. Denkbar sind auch mehrere, nacheinander angeordnete Hindernisse.

Ein Hindernis könnte grundsätzlich auch für die Umleitung eines Trübestroms eingesetzt werden, mit dem Ziel, den Trübestrom in Teile des Stausees zu leiten, wo die Ablagerungen den Betrieb der Stauanlage

nicht beeinträchtigen. Falls sich der Grundablass in einer ausreichenden Distanz von der Staumauer und der Wasserfassung befindet, könnten die Ablagerungen auch durch Umleitung des Trübestroms in dessen Nähe konzentriert und somit die Effizienz von regelmässigen Spülungen erhöht werden.

4. Wirkung von Gitter und Geotextilvorhängen

4.1 Flachwasseranalyse

Wenn ein Trübestrom auf ein Gitter trifft, fliesst er in Abhängigkeit von dessen Fließwiderstand und Porosität teilweise durch das Gitter. Der Rest wird wie beim Hindernis reflektiert und als interner, bewegter Wassersprung stromaufwärts zurückfliessen.

Zur Herleitung einer Beziehung zwischen der ankommenden Strömung, der Porosität des Gitters und dem weiterfliessenden Anteil wird ein teilweise gebremster Trübestrom durch ein Gitter mit Porosität f betrachtet (Bild 9).

Wie beim Hindernis wird nur die untere Schicht betrachtet, und es gelten die selben Annahmen bezüglich Einmischung und Reibung. Zwischen Querschnitt 1 und 2 wird der Impulssatz angewandt (Gleichungen [4] und [5]). Für die Herleitung einer Beziehung zwischen Querschnitt 2 und 3 wird eine einzelne Öffnung des Gitters betrachtet. Unter der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung ober- und unterhalb des Gitters mit einer Höhe von h_2 , respektive h_3 , kann die Impulsgleichung und die Energiegleichung über die Höhe h_2 integriert werden. Es ist zu beachten, dass hier die Porosität f einem Produkt der geometrischen Porosität und eines Kontraktionskoeffizienten entspricht. Im Weiteren wird der Impulssatz zwischen Querschnitt 2 und 3 aufgestellt, wobei die Widerstandskraft des Gitters mitberücksichtigt werden muss. Diese Gleichungen können zu folgender Beziehung zwischen der Porosität und der dimensionlosen Wassersprungshöhe vereinfacht werden:

$$U_1 - (1 - H_1) U_1 = U_2 H_1 = (g \cdot h_1)^{1/2} H_1^{3/2} \left(\frac{2 f^2 (f + 2)^2}{9 f + 1} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Diese Beziehung hat grosse Ähnlichkeit zu Gleichung (7) mit dem Hindernis. Wird Gleichung (10) zusammen mit Gleichung (8) numerisch aufgelöst, so kann wiederum eine Sedimentdurchgängigkeit η als Funktion der effektiven Porosität f und der Froudezahl des ankommenden Trübestroms ermittelt werden (Bild 10). Man kann feststellen, dass der weiterfliessende Anteil des Trübestroms bei kleinen wirksamen Porositäten (rote Linie in Bild 10: $f \leq 0,15$) beinahe unabhängig von der oberwasserseitigen Froudezahl ist. Dies ist

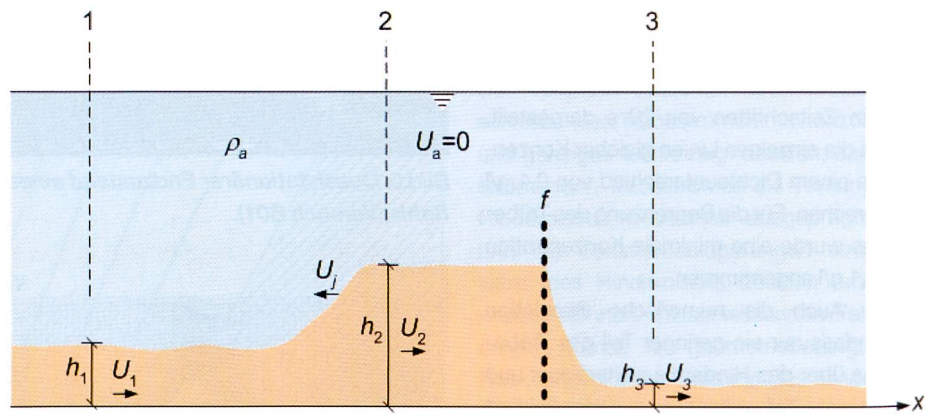


Bild 9. Durch Gitter oder Geotextil teilweise gebremster Trübestrom.

insofern interessant, als das Gitter sowohl für strömende wie auch schießende Trübestrome verwendet werden kann.

4.2 Hydraulische Modellversuche

Die Wirkung eines Gitters auf einen Trübestrom wurde mit fünf Versuchen unter Verwendung von zwei verschiedenen Geotextilien im Rechteckskanal untersucht. Das 5,05 m vom Zufluss entfernte und 50 cm hohe Geotextil wurde vertikal fixiert.

Infolge des Widerstandes wird der Trübestrom am Gitter stark gebremst und steigt entlang diesem hoch, wie die Fotosequenz in Bild 11 zeigt ($t = 0-10$ s). Der Trübestrom beginnt zuerst in Bodennähe, dann über die ganze Gitterhöhe durch das Gitter hindurchzusickern. Die antreibende Kraft der Strömung wird praktisch nur durch den Druckgradienten infolge des Dichteunter-

schieds auf beiden Seiten des Gitters verursacht. Es entsteht ein Einstau oberhalb und ein neuer, kleiner Trübestrom unterhalb des Gitters ($t = 20-25$ s).

Durch die Messung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Ablagerungen konnte wiederum ein erheblicher Rückhalt der Sedimente oberhalb des Gitters festgestellt werden, wobei der Unterschied zwischen strömendem und schießendem Trübestrom wie erwartet bedeutend geringer ausfiel als beim Hindernis.

Die Wirkung der beiden untersuchten Geotextiltypen war unterschiedlich. Obwohl das eine Geotextil über eine grössere Porosität verfügte, war es für den Trübestrom weniger durchlässig. Dies ist auf die Maschenweite zurückzuführen, die bei diesem Geotextil halb so gross war (0,5 mm) und somit aufgrund der sehr kleinen Reynoldszahlen

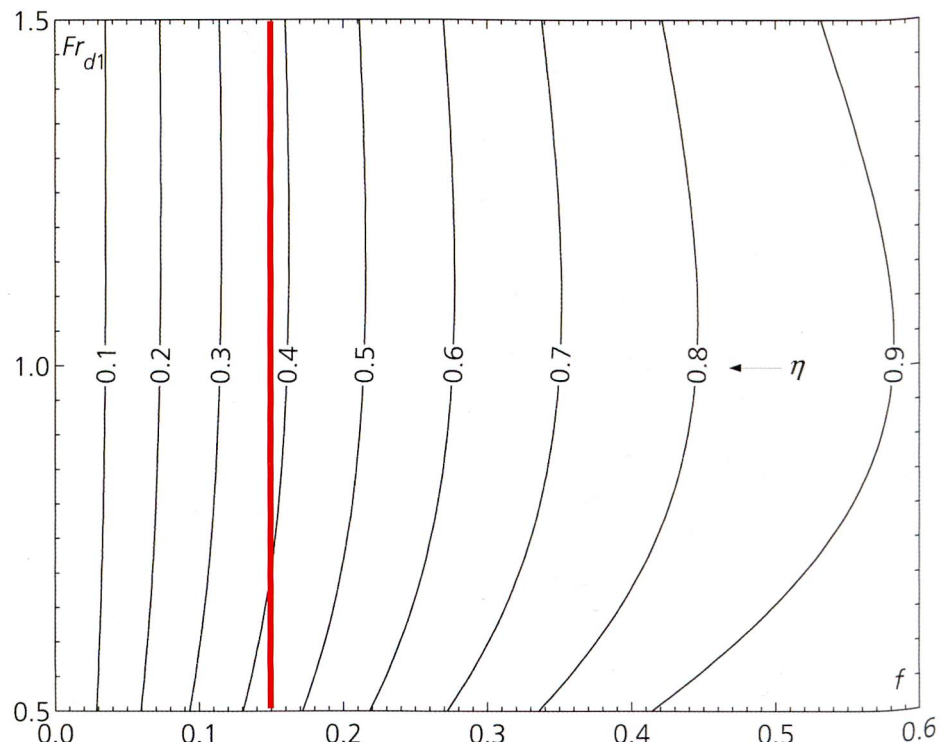


Bild 10. Sedimentdurchgängigkeit η eines Gitters in Abhängigkeit der wirksamen Porosität f und der Froudezahl des ankommenden Trübestromes Fr_{dt} .

grössere Verluste bewirkte. Bei praktischen Anwendungen in Stauseen mit Maschenweiten zwischen 5 und 10 cm dürfte jedoch der Einfluss aufgrund kleiner Reynoldszahlen weit geringer sein und der Rückhalteeffekt hauptsächlich von der Porosität des Geotextils abhängen.

4.3 Numerische Simulationen

Das Geotextil wurde als poröser Bereich modelliert (Bild 12), welcher einerseits das Volumen, das der Strömung zur Verfügung steht, reduziert und andererseits zusätzliche Widerstandskräfte vom Geotextil auf die Strömung erzeugt. Diese Kräfte wurden mit Hilfe von empirischen Beziehungen bestimmt, welche von der Reynoldszahl, der Maschenweite und der Porosität des Geotextils abhängen [14].

Die Resultate der simulierten Versuche waren in guter Übereinstimmung mit den Geschwindigkeits- und Ablagerungsmessungen. Bild 13 verdeutlicht anhand der Sedimentkonzentrationsverteilung, dass der Trübestrom teilweise durch das Geotextil sickert, aber der grösste Teil wellenartig zurückreflektiert wird.

Am Ende eines Versuches ist der Bereich oberhalb des Gitters wiederum vollständig eingestaut. Der Einfluss der Kanalneigung ist in Bild 14 gut sichtbar. Aufgrund der relativ stark geneigten Sohle ist das Rückhaltewolumen im Vergleich zu einer horizontalen Sohle begrenzt.

Zusätzlich zu einem Vergleich mit den physikalischen Messwerten erlaubte das numerische Modell auch die Berechnung der Rückhaltewirkung des Geotextils. Der Anteil des durch das Geotextil sickern den Trübestroms wurde mit einem unbeeinflussten Trübestrom verglichen. Dabei zeigte sich, dass bei strömender Anströmung rund 30–50% und bei schiessender Anströmung 40–70% des ankommenden Trübestroms weiterfliessen. Natürlich könnten durch kleinere Porositäten des Geotextils noch mehr Sedimente zurückgehalten werden. Interessant ist aber, dass im Vergleich zum Hindernis der Unterschied in der Durchgängigkeit zwischen strömender und schiessender Anströmung bedeutend kleiner ist. Die Erkenntnisse aus der Flachwasseranalyse sind damit bestätigt.

4.4 Überschlägige Bemessungsregeln und praktische Hinweise für Gitter und Geotextilvorhänge

Der Rückhalteeffekt eines Gitters oder Geotextilvorhangs hängt hauptsächlich von seiner Porosität und Maschengrösse ab. Dabei wird die Effizienz des Rückhalts im Vergleich zum Hindernis weniger stark von den An-

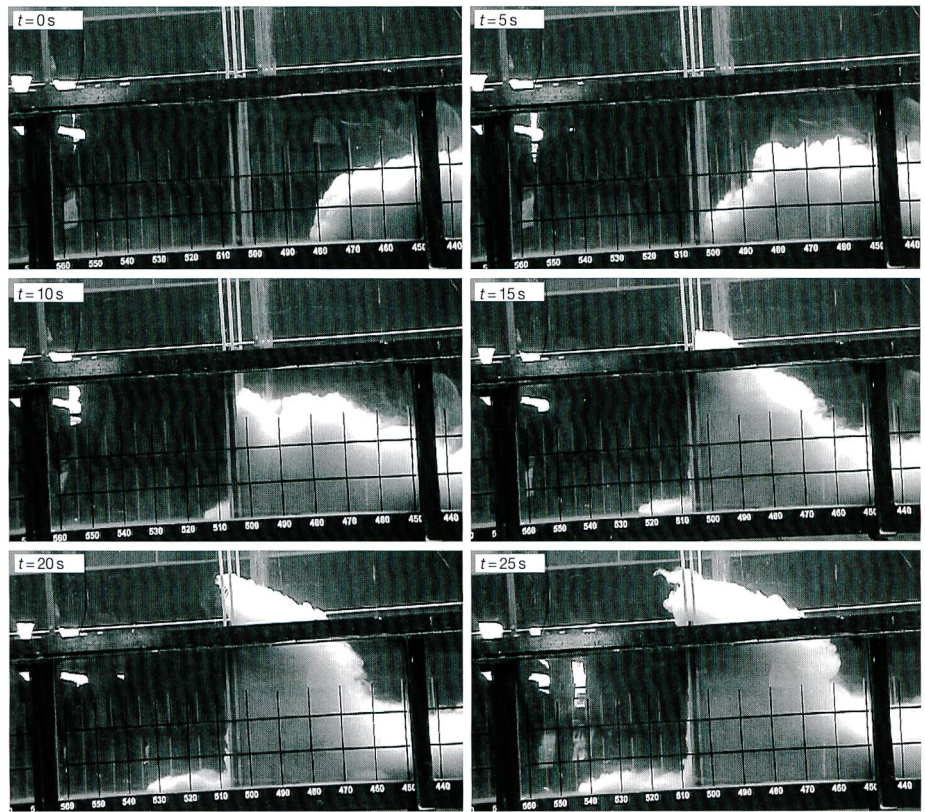


Bild 11. Bildsequenz mit einem Zeitintervall von 5 s eines schiessenden Trübestroms, der von rechts nach links durch ein Gitter fliesst (Versuch C01).

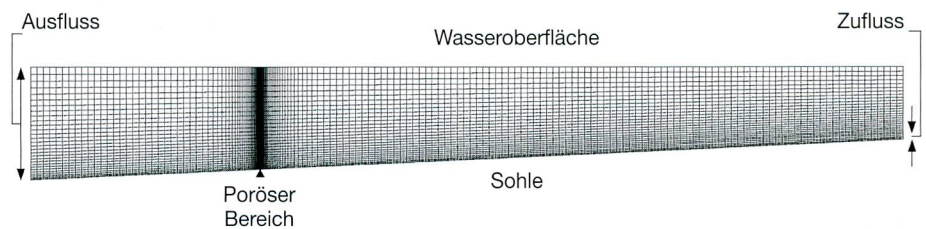


Bild 12. Berechnungsgitter zur Simulation der Strömung eines Trübestroms durch ein Geotextilgitter (8280 Zellen).

strömbedingungen beeinflusst. Um eine bedeutende Rückhaltewirkung zu erhalten, muss die Gitterhöhe mindestens dreimal so hoch wie der Trübestrom sein. Ausserdem sollte das Gitter eine Porosität von weniger als 30% aufweisen.

Für praktische Anwendungen in alpinen Stauseen würde dies Geotextilbeziehungsweise Netzvorhänge von ungefähr 30 m Höhe bedeuten. Die Maschenweite sollte eine Grössenordnung von 5 bis 10 cm aufweisen, um ein Verstopfen zu verhindern. Die grössten Drücke ergeben sich beim Aufprall des Trübestroms auf das Gitter, wobei der Einfluss der Porosität zur groben Abschätzung vernachlässigt werden kann. Der Druck setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: einem hydrostatischen sowie einem dynamischen Druck infolge der Impulskraft des aufprallenden Trübestroms. Die hydrostatischen Kräfte bleiben dabei relativ klein, da sie sich aus dem Dichteunterschied zwischen Trübestrom und dem klaren See-

wasser ergeben. Die Gesamtdrücke auf das Gitter erreichen dabei Grössenordnungen von rund 70–150 N/m², abhängig von der Geschwindigkeit des Trübestroms.

Für Gitter oder Geotextilvorhänge ergeben sich ähnliche Anwendungsmöglichkeiten wie für Hindernisse. Deren Installation dürfte aber wesentlich einfacher als die Schüttung eines Hindernisses sein und nur eine kurzzeitige Absenkung des Stausees benötigen. Zudem könnten auch mehrere Gitter hintereinander vorgesehen werden, um den Rückhalteeffekt zu verstärken. Zum Beispiel könnte das aus faserverstärkten Geotextilbändern bestehende Gitter an über den Talquerschnitt gespannten beziehungsweise gehängten Stahlseilen befestigt oder an Bojen aufgehängt werden, deren horizontale Verschiebung durch eine kettenförmige Verbindung untereinander und mit dem Ufer begrenzt wird.

Sobald die Sedimentablagerungen oberhalb des Geotextilvorhanges eine be-

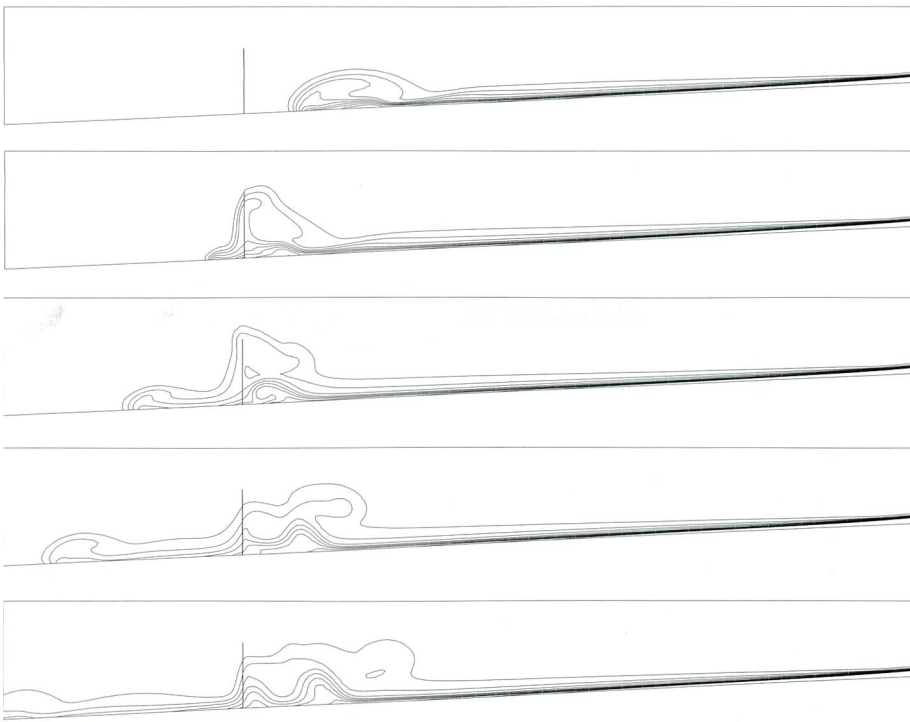


Bild 13. Simulation eines durch ein Gitter fließenden Trübestroms in Zeitintervallen von 20 s. Die Linien gleicher Sedimentkonzentration sind mit einem Intervall von $Dr = 0,1 \text{ g/l}$ dargestellt, wobei die oberste Linie einer minimalen Konzentration von $0,1 \text{ g/l}$ entspricht (Versuch C03).

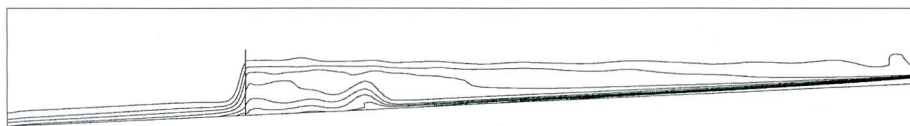


Bild 14. Eingestauter Trübestrom oberhalb des Geotextils.

stimmte Höhe erreicht haben, muss dieser durch einen neuen ersetzt werden. Der alte kann auf die Sedimente abgelegt werden und so die Ablagerungen im Sinne des Konzeptes der armierten Erde (terre armée) stabilisieren.

5. Wirkung von Wasserstrahlschleier

5.1 Hydraulische Modellversuche

Die Wirkung eines Wasserstrahlschleiers auf einen Trübestrom wurde mit je vier verschiedenen vertikalen und 45° stromaufwärts gerichteten Wasserstrahlschleiern untersucht. Der Wasserstrahlschleier wurde dabei mit einer Düsenreihe am Boden des Kanals erzeugt. Diese bestand aus 54 Düsen von

2 mm Durchmesser bei der vertikalen Anordnung und aus 27 Düsen mit 2,2 mm Durchmesser bei der geneigten Anordnung.

Die Versuche zeigten, dass eine vertikale Wasserstrahlreihe ausser einer Verdünnung keine grosse Wirkung auf den Trübestrom hat, sodass nachfolgend nur auf den 45° stromaufwärts gerichteten Wasserstrahlschleier eingegangen wird.

Versuche mit verschiedenen Strahlstärken zeigten, dass aufgrund des Wasserstrahlimpulses, der dem Trübestrom entgegenwirkt, dieser stark abgebremst wird. Der Trübestrom staut sich dann auf und überströmt schliesslich den Einflussbereich des Strahls, ähnlich einem virtuellen Hindernis. Der Einstau zusammen mit der Bore ist in



Bild 15. Hydraulischer Modellversuch mit 45° aufwärts gerichtetem Wasserstrahlschleier (Versuch E01).

Bild 15 dargestellt, wobei der Strahl mit roter Farbe sichtbar gemacht wurde.

Die untersuchten Verhältnisse zwischen dem in Längsrichtung entgegengesetzten Impuls des Wasserstrahlschleiers und demjenigen des Trübestroms lagen zwischen 1,7 und 3,3. Aus den Messungen der zeitlichen und räumlichen Ablagerungen ergab sich, dass bei einem strömenden Trübestrom ein Wasserstrahlschleier bereits eine gute Rückhaltewirkung aufweist, falls dessen entgegengesetzter Impuls 1,7-mal grösser als derjenige des Trübestroms ist.

5.2 Numerische Simulationen

Im numerischen Modell wurde der Wasserstrahlschleier durch einen Schlitz am Kanalboden simuliert, durch welchen klares Wasser injiziert wurde. Dieser Schlitz wurde mit 5 mm für die Simulationen bedeutend breiter als die Düsenreihe gewählt, um die Anzahl der erforderlichen Zellen zu beschränken. Es ist klar, dass der breitere Schlitz bei gleichem Durchfluss einen wesentlich kleineren Impuls als die Düsenreihe erzeugt. Um die hydraulischen Verhältnisse des Wasserstrahlschleiers dennoch korrekt wiederzugeben, wurde in der Zelle oberhalb des Schlitzes der fehlende Impuls mit Hilfe eines Quellenterms hinzugefügt.

Die Resultate der Berechnungen wurden wiederum mit den Geschwindigkeits- und Ablagerungsmessungen verglichen [13]. Bild 16 zeigt die numerische Simulation eines Versuchs mit geneigter Sohle. Aus den Linien gleicher Sedimentkonzentration ist ersichtlich, dass der Trübestrom teilweise durch den Wasserstrahlschleier stösst sowie teilweise wellenartig zurückreflektiert wird.

Die Sedimentdurchgängigkeit des Wasserstrahlschleiers beträgt etwa 10–20% im Falle der strömenden Trübestrome und 70–100% für schießende Trübestrome. Die Anwendung eines Wasserstrahlschleiers kann deshalb für schießende Trübestrome nicht empfohlen werden.

5.3 Überschlägige Bemessungsregel und praktische Hinweise für Wasserstrahlschleier

Die hydraulischen Modellversuche und numerischen Simulationen zeigten, dass Trübestrome mit Wasserstrahlschleier, die gegen den Trübestrom gerichtet sind, wirkungsvoll gebremst und zurückgestaut werden können. Bei einem strömenden Trübestrom muss der entgegengesetzte Impuls des Wasserstrahls mindestens 50% grösser als der Impuls des Trübestroms selbst sein.

Für typische Trübestrome mit einer Geschwindigkeit von 20 cm/s und einer Höhe von 10 m in einem Stausee würde beispiels-

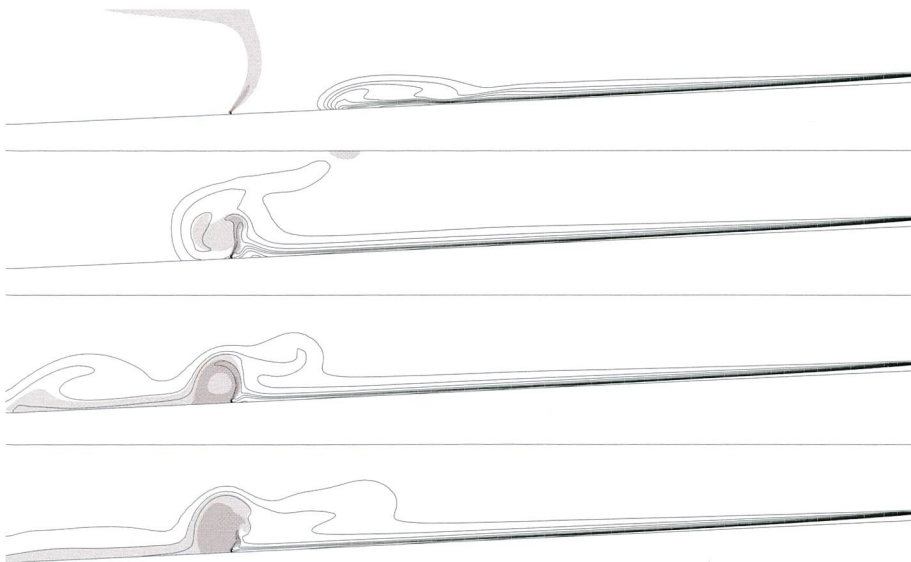


Bild 16. Simulation eines durch einen 45° aufwärts gerichteten Wasserstrahl fließenden Trübestroms in Zeitintervallen von 20 s. Die Linien gleicher Sedimentkonzentration sind mit einem Intervall von $D_r = 0,1 \text{ g/l}$ dargestellt, wobei die oberste Linie einer minimalen Konzentration von $0,1 \text{ g/l}$ entspricht (Versuch E01).

weise eine 45° talaufwärts gerichtete Düsenreihe mit einem Durchmesser der einzelnen Düsen von 0,5 m im Abstand von 5 m benötigt. Die Austrittsgeschwindigkeit der Wasserstrahlen müsste dabei mindestens 4,2 m/s betragen, was bei einer typischen Schleierbreite von 50 m einen Wasserbedarf von rund $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ bedeuten würde. Wie in der Einleitung erwähnt, kann für einen solchen Wasserstrahlschleier das Wasser aus Beileitungen zum Stausee, sofern vorhanden, verwendet werden. Das beispielsweise aus einem Überleitstollen in einer bestimmten Höhe über dem Stausee austretende Wasser müsste mit einer Leitung bis zum Talboden zu den Austrittsdüsen geführt werden. Die verfügbare Energiehöhe zwischen dem Überleitstollen und der Düsenreihe müsste grösser als die Energieverluste in der Leitung und die kinetische Austrittsenergie des Wasserstrahlschleiers sein.

6. Wirkung von Luftblasenschleier

6.1 Hydraulische Modellversuche

Die Wirkung eines Luftblasenschleiers wurde mit zwei Versuchen studiert. Dabei wurde die selbe Düsenreihe wie beim Wasserstrahl verwendet, mit dem Unterschied, dass Luft hineingepresst wurde.

Die aufsteigenden Blasen erzeugen eine vertikale Strömung, die an der Wasseroberfläche zur Seite umgelenkt wird. Beim ersten Versuch war die vom Schleier erzeugte Strömung so stark, dass der Trübestrom komplett an die Oberfläche mitgerissen wurde (Bild 17a). An der Oberfläche breitet sich das trübe Wasser zur Seite aus, bis ein

Impulsleichgewicht entsteht und die Sedimente wieder absinken. Auf diese Weise entstehen zwei Zirkulationszellen auf beiden Seiten des Blasenschleiers [15]. Die Sedimente werden so in kurzer Zeit verwirbelt und verteilen sich gleichmässig innerhalb der Zirkulationszellen.

Im zweiten Versuch war der Auftriebsfluss bedeutend kleiner und der Trübestrom wurde nur zum Teil an die Oberfläche mitgerissen (Bild 17b). Wiederum bildeten sich zwei

Zirkulationszellen, deren horizontale Ausdehnung jedoch nur etwa der Wassertiefe entsprach.

6.2 Empfehlungen für Luftblasenschleier

In der Versuchsreihe wurde nur ein repräsentativer Versuch gemacht, wobei der Auftriebsfluss des Blasenschleiers rund 22-mal grösser als der Auftriebsfluss des Trübestroms war. Grobe Abschätzungen haben aber gezeigt, dass für einen typischen Trübestrom im Stausee die benötigten Luftmengen und somit der Leistungs- und Energieaufwand für das Hinunterpressen der Luft in Tiefen von mehr als 30 m beträchtlich wird.

Es können hier somit noch keine Empfehlungen abgegeben werden, da die Anwendung von Luftblasenschleier noch genauer untersucht werden muss.

7. Schlussfolgerungen

Aufgrund der klimatischen Veränderungen und den daraus resultierenden Folgen, wie Rückzug der Gletscher, Anstieg der Nullgrad- und Permafrostgrenze und verstärkter Niederschlag in den vegetationsarmen Wintermonaten, ist in Zukunft eine Zunahme der Sedimenteinträge in alpine Stauseen zu erwarten. In diesem Jahrhundert wird es also eine Hauptaufgabe der Planer und Betreiber von Speichern sein, mit effizienten Massnahmen frühzeitig der verschärften Verlandungsproblematik entgegenzuwirken.

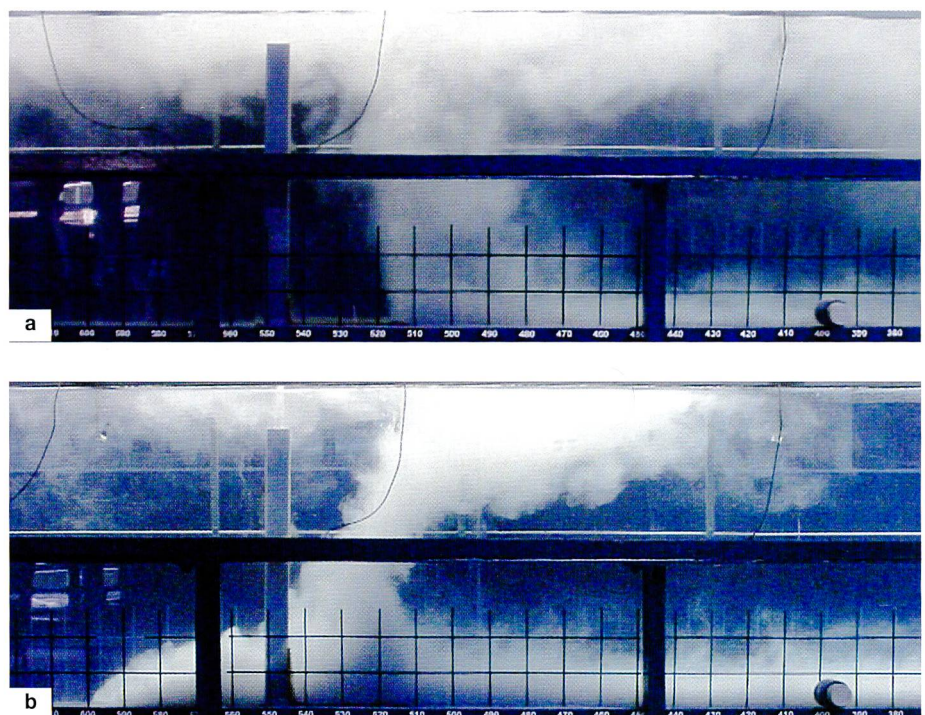


Bild 17. Hydraulische Modellversuche mit einem Luftblasenschleier.

a) Luftblasenschleier mit Auftriebsfluss rund 300-mal grösser als Auftriebsfluss des Trübestroms (Versuch F01).

b) Luftblasenschleier mit Auftriebsfluss 22-mal grösser als Auftriebsfluss des Trübestroms (Versuch F02).

In alpinen Speichern treten Trübestrome regelmässig bei Hochwasser auf und verfrachten grosse, bereits abgesetzte Sedimentvolumen entlang des Talweges bis zur Staumauer, wo sie den Betrieb der Auslassorgane wie Triebwasserfassungen und Grundablässe beeinträchtigen. Die Herausforderung für die nachhaltige Nutzung der alpinen Speicher liegt also in erster Linie in der Beherrschung der Trübestrome durch innovative, technische Massnahmen.

Die vorliegenden Forschungsergebnisse zeigen, dass Trübestrome mit Hilfe von Hindernissen, Gitter oder Geotextilvorhängen und Wasserstrahlschleiern wirkungsvoll gebremst und die Sedimente zum grossen Teil zurückgehalten werden können. Dabei können für die Bemessung dieser Massnahmen bei typischen Trübestromen in alpinen Stauseen von 10 m bis 20 m Höhe folgende Grössenordnungen angegeben werden:

- Die Hindernishöhe sollte mindestens die doppelte Höhe des Trübestroms aufweisen.
- Der Geotextil- bzw. Netzvorhang sollte mindestens dreimal so hoch wie der Trübestrom sein und eine Porosität von weniger als 30% haben.
- Der entgegengesetzte Impuls des talaufwärts gerichteten Wasserstrahlschleiers sollte rund 50% grösser als der Impuls des ankommenden Trübestroms sein.

Welche Massnahme im konkreten Fall die besten Resultate erzielt, hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab. Erste Fallstudien zeigen aber, dass mit relativ geringen Investitionen die Nachhaltigkeit eines Speicherraumes und dessen Auslassorgane erheblich gesteigert werden kann.

Wie der Vergleich mit den hydraulischen Modellversuchen gezeigt hat, liefern die entwickelten numerischen Modelle für Hindernisse, Gitter- oder Geotextilvorhänge sowie Wasserstrahlschleier verlässliche Resultate und können in Zukunft für die Projektierung von solchen technischen Massnahmen in beliebigen Stauseegeometrien von wertvollem Nutzen sein.

Verdankung

Das Forschungsprojekt «Technische Massnahmen gegen die Verlandung von Auslassorganen in alpinen Stauseen» wurde vom Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft in der Schweiz (PSEL Projekt Nr. 175) und dem Schweizerischen Talsperrenkomitee unterstützt.

Literaturverzeichnis

- [1] *Schleiss, A.; Oehy, Ch.*: Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. wasser, energie, luft – eau, énergie, air, Heft 7/8, 2002, p. 227–234.
- [2] *De Cesare, G.*: Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. Communication N° 7 du Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), EPFL, Lausanne, 1998.
- [3] *De Cesare, G.; Schleiss, A.; Hermann, F.*: Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(1), 2001, p. 6–16.
- [4] *Schleiss, A.; Feuz, B.; Aemmer, M.; Zünd, B.*: Verlandungsprobleme im Stausee Mauvoisin. Ausmass, Auswirkungen und mögliche Massnahmen. Int. Symposium «Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen», Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Nr. 141, ETH Zürich, 1996, p. 37–58.
- [5] *Hug, Ch.; Boillat, J.-L.; Schleiss, A.*: Hydraulische Modellversuche für die neue Wasserfassung der Stauanlage Mauvoisin. Proceedings Wasserbau Symposium «Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen», 19.–21. Oktober 2000, Graz, Österreich, Mitteilung des Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr. 34, 2000, p. 367–376.
- [6] *De Rooij, F.; Dalziel, S. B.; Linden, P. F.*: Electrical measurement of sediment layer thickness under suspension flows. *Experiments in Fluids* 26, 1999, p. 470–474.
- [7] *AEA Technology: CFX-4.4: Solver Manual*. AEA Technology, Oxfordshire, UK, 2001.
- [8] *Garcia, M. H.; Parker, G.*: Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. *Journal of Geophysical Research (Oceans)* 98(C3), 1993, p. 4793–4807.
- [9] *Oehy, Ch.; Schleiss, A.*: Comparative study between two buoyancy-extended and the standard $k-\epsilon$ model for simulating turbidity currents. Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics, Tempe AZ, USA, 2001.
- [10] *Rottman, J. W.; Simpson, J. E.; Hunt, J. C. R.; Britter, R. E.*: Unsteady gravity current flows over obstacle: Some observations and analysis related to phase II trials. *Journal of Hazardous Materials* 11, 1985, p. 325–340.
- [11] *Lane-Serff, G. F.; Beal, L. M.; Hadfield, T. D.*: Gravity current flow over obstacles. *Journal of Fluid Mechanics* 292, 1995, p. 39–53.
- [12] *Graf, W. H.; Altinakar, M. S.*: Fluvial hydraulics. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 1998.
- [13] *Oehy, Ch.*: Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. Communication N° 15 du Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), EPFL, Lausanne, 2003.
- [14] *Oehy, Ch.; Schleiss, A.*: Physical and numerical modelling of a turbidity current flowing through a permeable screen. Proceedings of the XXXth

IAHR Congress, 24–29 August 2003, Thessaloniki, Greece.

- [15] *Riess, I. R.; Fannlop, T. K.*: Recirculating flow generated by line-source bubble plumes. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(9), 1998, p. 932–940.

Anschrift der Verfasser

Christoph Oehy, Dr. Dipl. Bauing. ETH; Swiss Re, Naturgefahrenabteilung, Mythenquai 50/60, CH-8022 Zürich (vormals wissenschaftlicher Mitarbeiter am LCH); E-Mail: christoph_oehy@swissre.com

Anton Schleiss, Prof. Dr. Dipl. Bauing. ETH, Direktor; Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), EPFL, CH-1015 Lausanne; E-Mail: anton.schleiss@epfl.ch / <http://lchwww.epfl.ch/>