**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
**Band:** 94 (2002)
**Heft:** 7-8

**Artikel:** Verladung von Stauseen und Nachhaltigkeit
**Autor:** Schleiss, Anton / Oehy, Christoph
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-939647

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 02.02.2026

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

# Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit

Anton Schleiss, Christoph Oehy

**Zusammenfassung**

*Der weltweit jährliche mittlere Verlust an Speichervolumen durch Verlandung übertrifft bereits heute die jährliche Volumenzunahme durch den Bau von neuen Stauseen für die Bewässerung, Trinkwasserversorgung und Wasserkraftnutzung. Die nachhaltige Nutzung der Stauseen ist also langfristig nicht gewährleistet. Für alpine Speicher liegt die Verlandungsrate allerdings weit unter dem weltweiten Durchschnitt. Dennoch ist auch für diese Stauseen die Verlandung eine ernsthafte Bedrohung, da Trübeströme sporadisch grosse Sedimentvolumen lawinenartig bis zur Talsperre transportieren. Dort beeinträchtigen die konzentrierten Ablagerungen den sicheren Betrieb der Auslassorgane wie Triebwasserfassungen und Grundablässe. Nach einer Darstellung der Oberflächenerosion und anderen Ursachen der Verlandung werden im Beitrag die möglichen Gegenmassnahmen vorgestellt. Dabei wird im Besonderen auf die denkbaren technischen Massnahmen zur Beherrschung der Trübeströme eingegangen. Die Wirkung einer solchen Massnahme wird am Beispiel des Stausees Grimsel in den Schweizer Alpen verdeutlicht.*

**Résumé: Alluvionnement des retenues et développement durable**

*La perte moyenne annuelle mondiale du volume de retenue due à l'alluvionnement dépasse aujourd'hui déjà la valeur de la croissance annuelle du volume total obtenue grâce à la construction de nouvelles retenues pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et l'hydroélectricité. Par conséquent, l'utilisation durable des retenues n'est pas garantie à long terme. Pour les retenues alpines, le taux d'alluvionnement est nettement inférieur à la moyenne mondiale. Néanmoins, l'alluvionnement affecte également ces retenues. En effet, les courants de turbidité transportent sporadiquement de manière similaire à une avalanche des quantités importantes de sédiments jusqu'aux barrages. Ainsi ces dépôts, concentrés localement, perturbent l'exploitation des organes d'évacuation tels que les prises d'eau ou les vidanges de fond.*
*Après la discussion de l'érosion de surface ainsi que d'autres phénomènes provoquant l'alluvionnement, des mesures de prévention sont présentées. L'accent est mis sur les mesures techniquement réalisables visant à maîtriser les courants de turbidité. L'effet d'une telle mesure est illustré par l'exemple de la retenue de Grimsel en Suisse.*

**Summary: Reservoir sedimentation and sustainable development**

*The today's world-wide annual mean loss of storage capacity due to sedimentation is already higher than the increase of capacity by the construction of new reservoirs for irrigation, drinking water and hydropower. Thus the sustainable use of the reservoirs is not guaranteed in long term. In the case of alpine reservoirs the sedimentation rate is much lower than the world mean value. Nevertheless the sedimentation threatens also these reservoirs, since turbidity currents are sporadically transporting large volumes of sediments like an underwater avelange down to the dam. There the concentrated deposits harm the safe operation of the outlet structures as intakes and bottom outlets.*
*After the discussion of surface erosion and other reasons of the reservoir sedimentation, the contribution presents the possible measures against sedimentation. Special attention is given to technical measures which can govern turbidity currents in reservoirs. The effect of such a measure is illustrated with the example of reservoir Grimsel in the Swiss Alps.*

## 1. Bedeutung und Ursache der Verlandung

Als Verlandung wird der Prozess bezeichnet, welcher Seen mit Sedimenten auffüllt und im Endzustand die Wasserflächen wieder zu Land werden lässt. Diesem Prozess sind grundsätzlich alle stehenden Süsswassergewässer und viele Meeresbuchten unterworfen. Insbesondere der Sedimenttransport durch die Fliessgewässer, welche die Seen speisen, beschleunigt den Verlandungsprozess.

Auch künstliche Seen, welche zum Rückhalt von Wasser für die Trinkwasserversorgung, die Bewässerung, die Produktion von Wasserkraft oder auch für den Hochwasserschutz geschaffen wurden, unterliegen diesem Umwandlungsprozess. Da die Verlandung sukzessive das Nutzvolumen dieser Stauseen reduziert, stellt sich die Frage nach deren Nachhaltigkeit.

Stauseen weisen die morphologische Besonderheit auf, dass der tiefste Punkt sich nahezu immer bei der Talsperre und damit bei den Ausflussorganen befindet. Zudem kann der Ausfluss aus einem Stausee innerhalb gewisser Grenzen reguliert und somit die Wasserspiegellage beeinflusst werden. Die Ausflussorgane erlauben bei vielen Stauseen eine nahezu vollständige Absenkung und Entleerung. Diese morphologischen und hydrologischen Besonderheiten von Stauseen gegenüber natürlichen Seen ermöglichen bei letzteren mehr und wirksamere Massnahmen gegen die Verlandung [1].

Die Ursache der Verlandung von Stauseen ist vor allem im Eintrag von Geschiebe und Schwebestoffen durch die Fliessgewässer zu suchen, also den zuflussbedingten Ablagerungen. Bei seichten Stauseen können sich etwa auch durch biologische Prozesse Sedimente bilden. Im Weiteren ist ein Zuwachsen durch die Vegetation möglich (Moorbildung).

Geschiebe und Schwebestoffe sind Erosionsprodukte aus dem Abtrag des Einzugsgebietes des Stausees. Geschiebe besteht aus gröberen Komponenten, welche in Sohlennähe der Fliessgewässer transportiert werden und sich beim Eintritt in den Stausee in einem Delta ablagern. Schwebestoffe stammen aus der Oberflächenerosion sowie der Zertrümmerung und dem Abrieb von Grobkomponenten. Sie lagern sich ausser dem Delta entsprechend ihrem Gewicht über den ganzen Stausee verteilt ab. Zudem können die Feinsedimente auch sporadisch wäh-

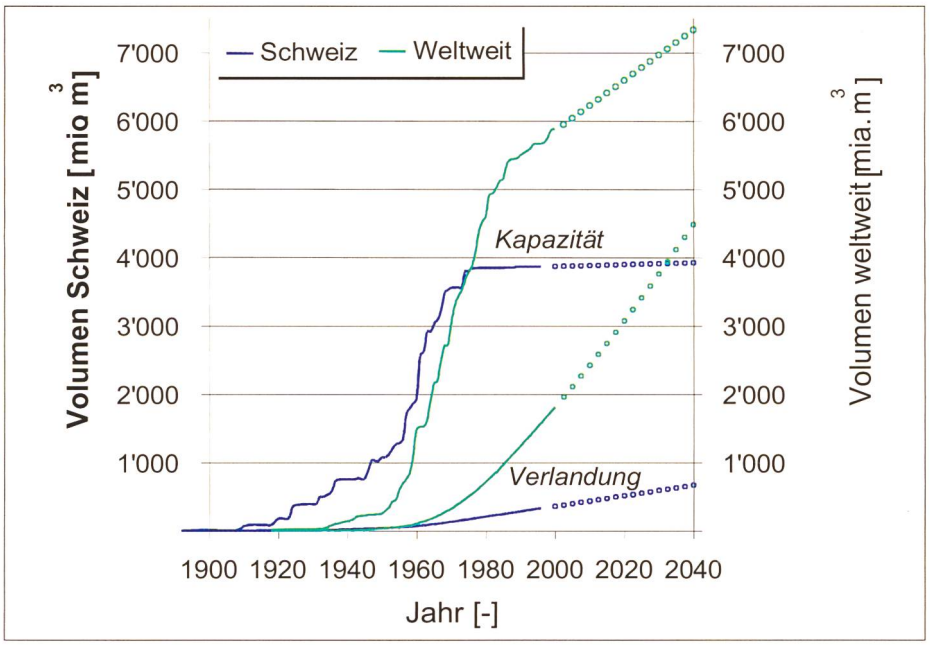


***Bild 1. Zunahme der Kapazität der Stauseen durch Bautätigkeit und Abnahme durch Verlandung in der Schweiz und weltweit.***

rend Hochwasser als Trübeströme innerhalb des Stausees bis zur Talsperre transportiert werden.

Die durchschnittlichen Verlandungsraten aller Stauseen werden weltweit auf 1–2% geschätzt, das heisst, dass jährlich 1–2% der weltweiten Speicherkapazität verloren geht [2, 3]. Wenn man bedenkt, dass der jährliche Zuwachs des weltweiten Speichervolumens durch die Erstellung von neuen Stauseen eher bei 1% als bei 2% liegt, so zeigt sich in aller Deutlichkeit das Problem der Nachhaltigkeit (Bild 1). Wenn keine wirksamen Massnahmen gegen die Verlandung der Stauseen unternommen werden, wird weltweit gesehen gegen Ende des 21. Jahrhunderts der grösste Teil ihres Nutzvolumens verloren gegangen sein. Die Verlandungsraten bei den einzelnen Stauseen sind natürlich sehr unterschiedlich und hängen stark von der klimatischen Lage und der Konzeption des Stausees mit seinen Auslassorganen ab. So ist die durchschnittliche Verlandungsrate der Stauseen in der Schweiz mit 0,2% jährlich bedeutend tiefer. Hinsichtlich des Nutzvolumens sind also die alpinen Stauseen weit nachhaltiger (Bild 1). Dennoch ist auch die Verlandung für die Stauseen in der Schweiz oder im Alpenraum von grosser Bedeutung, da sie den Betrieb der Ausflussorgane wie Grundablass und Triebwasserfassung behindern kann.

## 2. Bodenerosion in alpinen Einzugsgebieten

Der Sedimenteintrag in Stauseen hängt im Wesentlichen von den Erosionseigenschaften der Einzugsgebiete ab. Im Rahmen einer Studie konnten 19 Stauseen in der Schweiz analysiert werden (Bild 2), für die der jährliche Sedimenteintrag entweder aus Seegrundvermessungen oder Feststoffmengen während Spülvorgängen bestimmt werden konnte [4, 5].

Der Datensatz der 19 Stauseen erlaubte eine statistische Analyse des Zusammenhanges zwischen Bodenabtrag und charakteristischen Eigenschaften der Einzugsgebiete. Dabei konnte ein empirisches Erosionsmodell gefunden werden, welches von folgenden Parametern abhängt:

$H_{Sommer}$: mittlere Regenhöhe im Sommer (Juni–September) (mm)

OV: Anteil der vegetationslosen Flächen (%)

EB: Anteil der mit erodierbarem Boden bedeckten Flächen (%)

ΔGL: mittlere jährliche relative Längenänderung der Gletscher (%)

Das mit einem genetischen Algorithmus gefundene Erosionsmodell, welches die Felderhebungen am besten wiedergibt, ist durch folgende empirische Gleichung für den jährlichen Volumenabtrag pro Fläche VA in $m^3/km$ definiert [6]:

$$V_A = 0{,}2112 \cdot 1{,}10683^{OV} - 5{,}684 \cdot OV + 0{,}2112 \, (H_{Sommer} \cdot \Delta GL + OV \cdot EB) + 11$$

Diese auf dem erwähnten genetischen Algorithmus basierende Gleichung beschreibt mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,925 die 19 beobachteten Einzugsgebiete wesentlich besser als eine auf einem traditionellen Potenzialregressionsansatz basierende Gleichung [5].

## 3. Trübeströme als Hauptursache für den Sedimenttransport in Stauseen

Der grösste Anteil der in einen Stausee gelangenden Feststofffracht besteht normalerweise aus Schwebstoffen (80–90% bei kleineren und mittleren, 90 bis nahezu 100% bei grösseren Stauseen). Das Geschiebe ist eher von untergeordneter Bedeutung. Grosse Schwebstofffrachten werden vorwiegend während Hochwasserabflüssen in Fliessgewässern transportiert. Der stark mit Feinsedimenten beladene Zufluss aus dem Einzugsgebiet in den Stausee hat ein grösseres Raumgewicht als das stehende Wasser im Stausee. Die in den Stausee fliessende, trübe Wassermasse stösst vorerst das klare See-

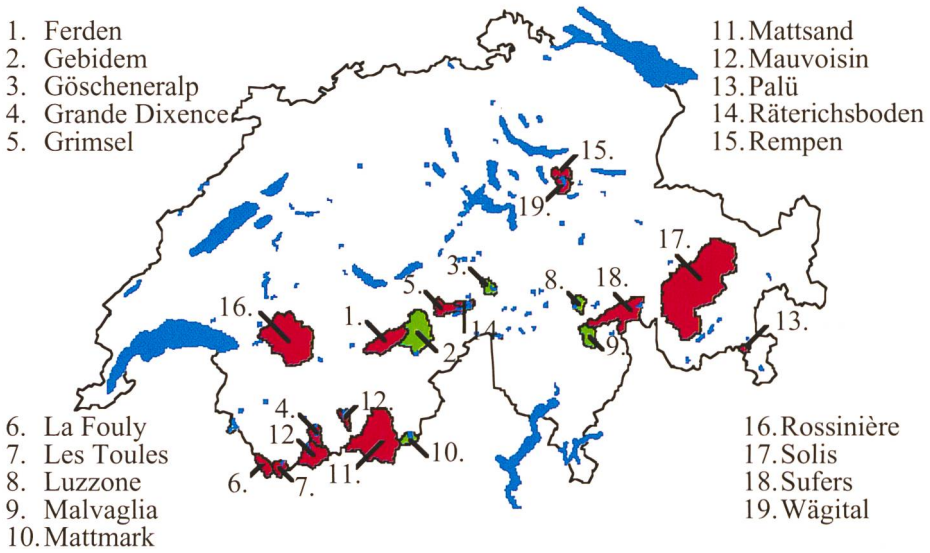


***Bild 2. Geografische Situation der 19 bezüglich Bodenabtrag untersuchten Einzugsgebiete in der Schweiz.***

wasser von der Mündung weg vor sich hin, bis ein Impulsgleichgewicht entsteht. Dann beginnt das dichtere, schwebstoffbeladene Wasser in das leichtere Seewasser abzutauchen. Es entsteht dadurch ein Unterwasserstrom, Trübestrom genannt, welcher aus einem Gemisch von Wasser und Feinsedimenten in Suspension besteht. Physikalisch kann dieser Trübestrom mit einer Schneestaublawine an einer Talflanke verglichen werden. Der Trübestrom bewegt sich auf dem geneigten Seeboden mit beachtlicher Geschwindigkeit in Richtung tiefstem Punkt bei der Talsperre (Bild 3).

Je nach Gefälle des Talweges können Trübeströme hohe Geschwindigkeiten erreichen. Dadurch können bereits abgelagerte Sedimente wieder aufgewirbelt und in Richtung Talsperre transportiert werden. Der Eintrag von zusätzlichen Feinmaterialien durch Erosion am Seegrund erhöht die Dichte des Trübestromes, was ihn zusätzlich beschleunigt. Andererseits verlangsamt er sich in Flachstrecken, was zur Absetzung der Schwebestoffe und schlussendlich zum Absterben des Trübestromes führt.

Im Rahmen einer Feldmesskampagne konnten Trübeströme im Stausee Luzzone in der Südschweiz beobachtet werden [7, 8]. Mittels dreier Messketten, ausgerüstet mit je zwei Strömungsmessern, konnte die Richtung und Geschwindigkeit der Trübeströme 2 bzw. 4 m über Seegrund gemessen werden (Bilder 4 und 5). Diese fanden schubweise während relativ kurzer Dauer anlässlich einzelner Hochwasser statt. An den Standorten A und B (vgl. Bild 4) waren die Strömungen jeweils gegen die Staumauer gerichtet. Im Messpunkt C wurden hauptsächlich Strömungen aus den nördlich und östlich gelegenen Einzugsgebieten verzeichnet (Bild 5). Die gemessenen Maximalgeschwindigkeiten betrugen 80 cm/s (2 m über Seegrund) und 55 cm/s (4 m über Seegrund).

Ein mit Laborversuchen und Naturmessungen geeichtes numerisches Modell erlaubt es heute, Trübeströme in beliebigen Stauseegeometrien verlässlich genau zu simulieren [9]. Eine Berechnung im Stausee Luzzone für ein hypothetisches Hochwasserereignis (Abflussspitze 137 $m^3/s$) zeigte, dass der Trübestrom in der Lage ist, gewaltige Sedimentmengen im Stausee umzuwälzen. So wurden beispielsweise über das Hochwasserhydrogramm 9000 $m^3$ Feinsedimente in den Stausee eingetragen, aber durch den Trübestrom infolge dessen Erosionswirkung 35 000 $m^3$ Feststoffe entlang dem Talweg in Richtung Staumauer transportiert. Dadurch entstehen Ablagerungen von maximal 53 cm Stärke in einem Nahbereich von rund 300 m oberhalb der Bogenmauer (Bild 6).

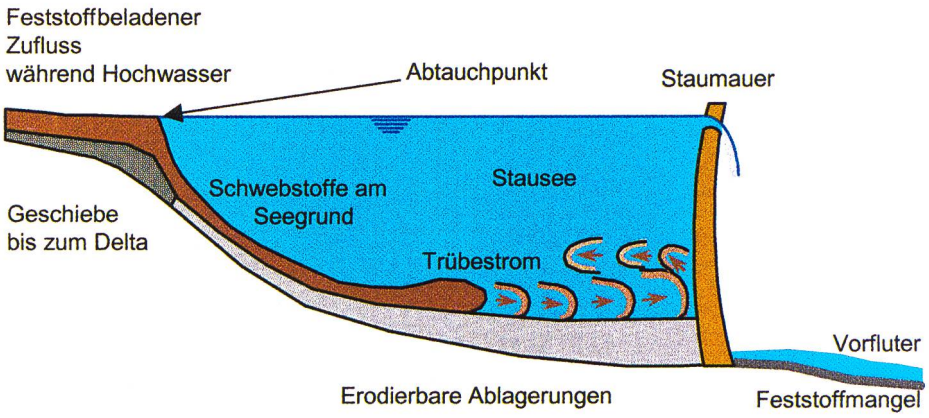


***Bild 3. Schematische Darstellung eines Trübestroms in einem Stausee (gemäss [7]).***

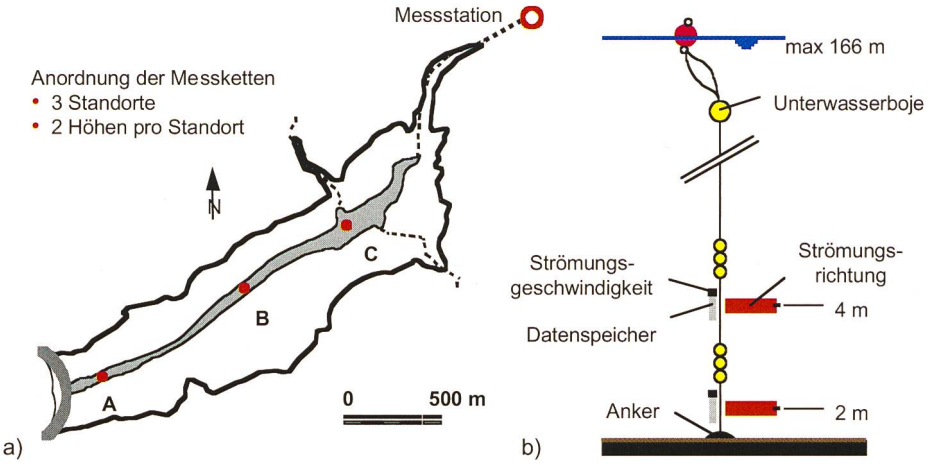


***Bild 4. Anordnung der Messketten an drei Standorten im Stausee Luzzone (links) und deren Elemente mit zwei Strömungsmessern (rechts) (gemäss [7]).***

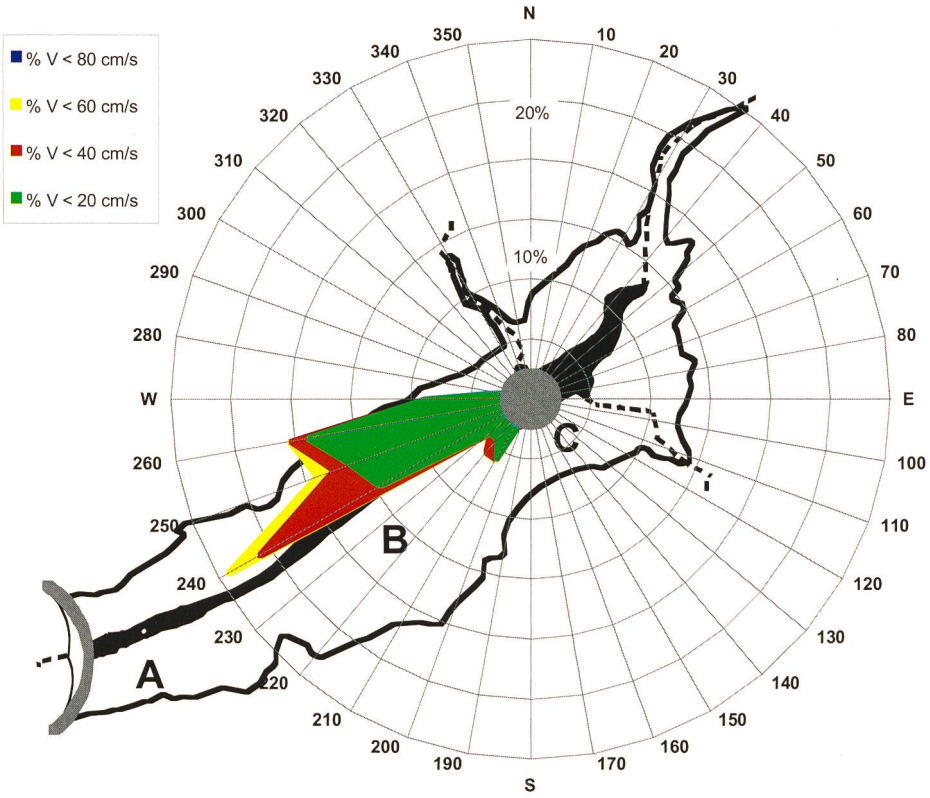


***Bild 5. Gemessene Richtung und Geschwindigkeit der Trübeströme im Stausee Luzzone am Standort C (gemäss Bild 4) 4 m über Seegrund: Die Richtung ist in Geschwindigkeitsintervalle aufgeteilt. Die Strömung folgt gut sichtbar dem Talweg (gemäss [7]).***

Trübeströme treten normalerweise bereits bei jährlichen Hochwassern auf. Sie sind deshalb bei alpinen Stauseen die Hauptursache für den Transport der Feinsedimente entlang dem Talweg des Stausees bis zur Staumauer, wo sie sich ablagern. 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.

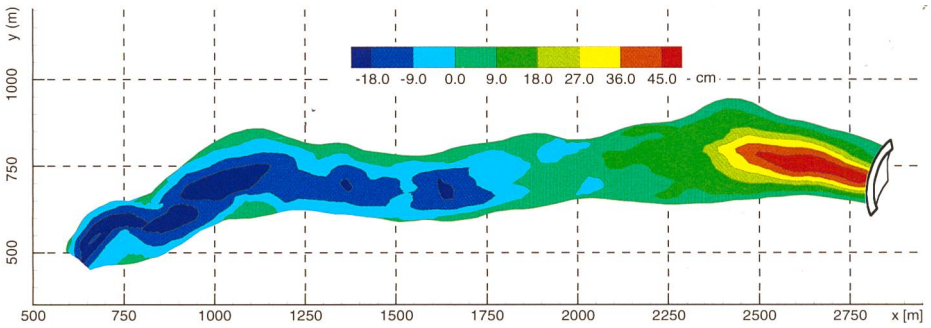


***Bild 6. Gerechnete Erosionen und Ablagerungen infolge eines Trübestromes im Stausee Luzzone nach vollständiger Absetzung der Feinsedimente. Die Sedimente werden massiv vom oberen in den unteren Teil des Beckens umgelagert (maximale Erosion 27 cm, maximale Ablagerung 53 cm) [7].***

## 4. Massnahmen gegen die Verlandung

Die denkbaren Massnahmen gegen die Verlandung von Stauseen können grundsätzlich in präventive und retroaktive Massnahmen eingeteilt werden. Mit den ersteren soll die Entstehung der Verlandung bekämpft werden, mit letzteren diese zumindest teilweise beseitigt werden. Ferner kann zwischen Massnahmen im Einzugsgebiet, im Stausee sowie an der Talsperre unterschieden werden (Bild 7).

### 4.1 Massnahmen im Einzugsgebiet

Die wirksamste und einzige präventive Massnahme ist der Erosionsschutz im Einzugsgebiet. Wo die klimatischen Bedingungen es erlauben, geht es darum, die Oberflächen durch Bepflanzungen vor Erosionen zu schützen. Aufforstungen in den Einzugsgebieten der vielen durch Verlandung gefährdeten Stauseen, insbesondere in Asien, wird eine Hauptaufgabe in diesem Jahrhundert sein. Leider zeigen Aufforstungen ihre Wirkung gegen die Verlandung erst langfristig. Sie sind aber auch notwendig, um wertvolle Kulturböden für die Landwirtschaft zu erhalten sowie um Schutz vor Hochwasser, Murgängen und Hangrutschungen zu gewährleisten. In vegetationslosen Einzugsgebieten, wie es beispielsweise für hoch gelegene alpine Einzugsgebiete der Fall ist, kann eine Erosionsbegrenzung nur mit technischen Massnahmen wie Hangverbauungen und Stabilisierung der Sohlen und Ufer von Gewässern erreicht werden.

Geschieberückhaltebecken und Kiesfänge werden an Wildbächen und Gebirgsflüssen eingesetzt, um unerwünschte Ablagerungen in flussabwärts liegenden Strecken zu vermeiden. Diese Becken fangen praktisch alles anfallende Geschiebe ab dem Einstauhochwasser auf und müssen geräumt werden. Geschieberückhalte beeinflussen das Transportvermögen eines Gewässers nur lokal und vermögen im Allgemeinen nur geringe Schwebstoffmengen zurückzuhalten. Sie sind zudem zu klein, um die Verlandung eines Stausees merklich zu beeinflussen. Dazu sind grössere Vorbecken nötig, welche durch eine Vorsperre im Deltabereich des Hauptzuflusses zu einem Stausee angeordnet werden. Diese halten praktisch alles Geschiebe zurück und wirken auch als Sandfang. Ein hoher Auffangwirkungsgrad für Feinsedimente bzw. Schwebestoffe wird nur bei relativ grossen Vorbecken erhalten. Ein Auffangwirkungsgrad von 90% wird beispielsweise erst erreicht, wenn das Verhältnis zwischen Seeinhalt und Jahreszufluss 1:10 beträgt. Damit ein Vorbecken selbst nicht verlandet, muss es laufend geräumt oder gespült werden. Das über einen Grundablass gespülte Material kann beispielsweise über einen Spülstollen am Stausee vorbeigeleitet und unterhalb der Hauptsperre wieder in den Fluss zurückgegeben werden.

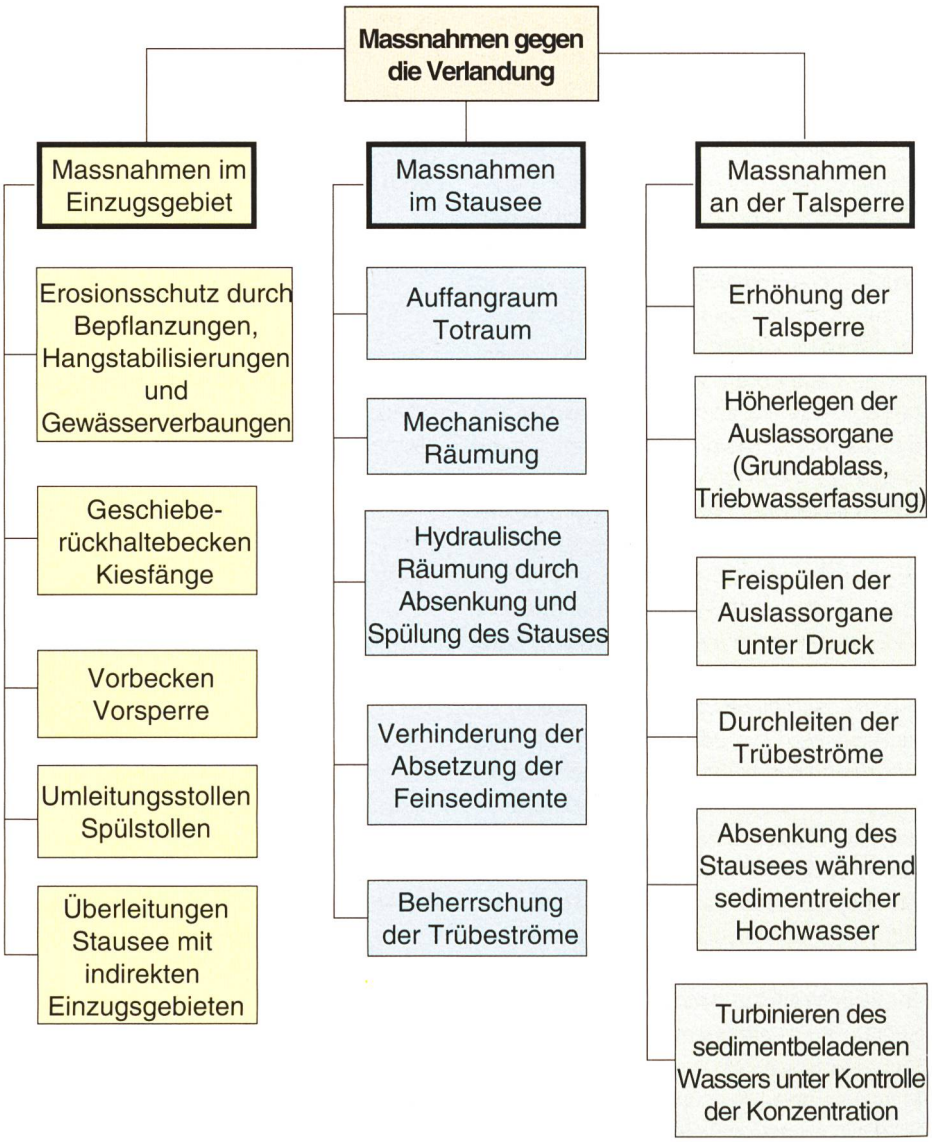


***Bild 7. Übersicht über präventive und retroaktive Massnahmen gegen die Verlandung.***

Die Verlandungsanfälligkeit eines Stausees hängt unmittelbar von der Grösse seines direkten Einzugsgebietes ab. Stauseen, welche selbst nur ein kleines Einzugsgebiet aufweisen und durch Überleitungen von benachbarten Einzugsgebieten gespiesen werden, verlanden wesentlich langsamer. Bedingung ist allerdings, dass die Fassungen der Beileitungen nur sedimentarmes Wasser fassen und überleiten.

### 4.2 Massnahmen im Stausee

Sind die Sedimente einmal in den Stausee gelangt, sind nur noch retroaktive oder passive Massnahmen möglich, welche die Verlandungen zumindest beseitigen oder deren negative Auswirkungen begrenzen.

Eine weltweit häufig angewandte Methode zur Erhaltung des Nutzraumes eines Stausees ist die Überbemessung dessen Volumens. Dabei wird für eine bestimmte Zeit, typischerweise etwa 50 Jahre, ein Auffangraum gewährleistet, wo sich die Sedimente ablagern. Ist dieser Auffangraum einer Nutzung nicht zugänglich, spricht man von einem Totraum.

Die Verlandung kann hinausgezögert oder verhindert werden, falls man die Ablagerungen regelmässig räumt. Dies kann mit Baggerungen bei vollem oder abgesenktem Stausee vom Ufer oder von Schiffen aus geschehen. Je nach der zu entfernenden Sedimentgranulometrie und der Baggertiefe kommen Saugbagger oder konventionelle, rein mechanische Bagger in Frage.

Eine besondere Anwendung der hydraulischen Räumung ist das Absaugen der Sedimente über am Seegrund verlegte Leitungen. Diese sind an der Unterseite mit speziellen Öffnungen versehen, durch welche die Sedimente nach Öffnen eines Schiebers am Ende der Leitung eingezogen werden (SPSS – Slotted Pipe Sediment Sluicer) [15].

Eine äusserst effiziente Massnahme ist die hydraulische Räumung des Stausees mit einer Spülung, wobei dieser – sofern möglich – vollständig entleert wird. Dabei können sich ökologische Probleme und Auflandungen flussabwärts der Talsperre ergeben. Entscheidend dafür ist die Höhe der Feststoffbelastung während des relativ kurzen Spülvorganges [19, 20].

Schwebstoffe tragen im Wesentlichen zur Verlandung eines Stausees bei. Falls es gelingt, diese am Absetzen zu hindern, können sie kontinuierlich über die Auslassorgane entfernt werden. Dabei sind begrenzte Feststoffkonzentrationen im Turbinierwasser durchwegs akzeptierbar. Dank neuartigen Materialien werden zudem die Turbinen immer abrasionsresistenter [17]. Um die Feinmaterialien in einem Stausee immer in Schwebe zu halten, müsste diesem eine genügend grosse Turbulenz zugeführt werden. Diese könnte beispielsweise in alpinen Stauseen unter Ausnützung der Energie der Beileitungen erfolgen. Denkbar wäre auch eine rein mechanische Verwirbelung mit einem im Staubereich verschiebbaren «Grossmixer».

Schlussendlich können die negativen Auswirkungen der Verlandungen durch eine Beherrschung der Trübeströme entscheidend begrenzt werden, falls diese den massgebenden Prozess darstellen, wie dies oft in alpinen Stauseen der Fall ist (vgl. Abschnitt 5).

### 4.3 Massnahmen an der Talsperre

Ist bereits ein grosser Anteil des Nutzvolumens verloren gegangen, kann dieses, sofern konstruktiv möglich, mit einer Talsperrenerhöhung wieder kompensiert werden. Dies erfolgte beispielsweise bei mehreren Talsperren in Nordafrika [10].

Sind vorerst nur die Auslassorgane bei der Talsperre von der Verlandung betroffen und ist eine wirksame Spülung nicht durchführbar, müssen diese höher gelegt werden, um den weiteren Betrieb zu gewährleisten. Ein neueres Projekt dieser Art ist der Umbau des Grundablasses und der Wasserfassung bei der Staumauer Mauvoisin [11, 12].

Beim Freispülen der Auslassorgane unter Druck kann normalerweise nur ein Trichter vor der Einlauföffnung evakuiert werden, dessen Neigung dem Reibungswinkel der abgelagerten Sedimente entspricht. Bei Feinsedimenten kann bestenfalls ein Trichterwinkel von etwa 30° erreicht werden [13]. Falls ein Auslassorgan bereits mit Sedimenten vollständig überdeckt ist, besteht beim Öffnen der Schützen die Gefahr, dass die Ablagerungen konsolidieren und die Erosion des Trichters blockiert wird. Dem kann mit dem Einbau eines Injektorschachts entgegnet werden, welcher in der Anfangsphase genügend Spülwasser zuführt [14]. Um vor Triebwasserfassungen sporadisch einen Trichter freispülen zu können, müssen diese mit einem Spülauslass kombiniert werden, welcher unmittelbar unter dem Fassungseinlauf angeordnet ist [11, 12].

Bei entsprechend grosser Kapazität des Grundablasses können theoretisch die Dichteströme während Hochwasser angesaugt und direkt durchgeleitet werden. Bei alpinen Speichern ist dies kaum möglich, da die Grundablasskapazität hierzu normalerweise zu gering ist. Zudem ist der häufige Betrieb der unter sehr hohem Druck stehenden Grundablässe mit gewissen Risiken wie Vibrationen und Verklemmen der Schützen verbunden. Nicht zuletzt dienen die alpinen Stauseen oft auch dem Hochwasserschutz, sodass ein Öffnen der Grundablässe während Hochwasser unerwünscht ist.

Wird ein Stausee während Hochwasserperioden mit sedimentreichen Abflüssen abgesenkt und werden die Abflüsse im nahezu ungestauten Flussregime durchgeleitet, kann die Verlandung nachhaltig verhindert werden. Ein solches Vorgehen drängt sich bei Stauseen mit einem relativ geringen Inhalt im Vergleich zum Jahreszufluss gerade auf. Beim Dreischluchtenstausee in China wird diese Betriebsweise eine nachhaltige Nutzung des Speichers erlauben. Die Nutzungsweise der alpinen Jahresspeicher schliesst natürlich aus praktischen und betrieblichen Gründen eine solche Absenkung während Hochwasser aus.

Nicht zuletzt können im Stauraum mobilisierte Sedimente, beispielsweise durch Saugbaggerung, dem Triebwasser mit kontrollierter Konzentration beigegeben werden [18]. Die maximale Konzentration wird einerseits durch die Absetzgefahr im Triebwassersystem, andererseits durch den Materialverschleiss durch Abrasion an den Turbinen bestimmt.

## 5. Beherrschung von Trübeströmen

Trübeströme sind, wie im Kapitel 3 beschrieben, oftmals der massgebende Prozess für die Umlagerung der Sedimente innerhalb eines Stausees. Folgende Bedingungen führen zur Entstehung eines Trübestromes [2]:

- Hohe Schwebstoffkonzentration im Zufluss
- Grosse Wassertiefen bei der Mündung der Zuflüsse
- Nahezu ruhendes Wasser im Stausee
- Steile Neigung der Sohle des Stausees
- Schlauchartige gerade Stauseegeometrie

Diese Bedingungen sind in alpinen Stauseen nahezu immer gegeben, sodass bereits kleinere, jährlich auftretende Hochwasser Trübeströme auslösen können.

Eine Parameterstudie im Stausee Luzzone hat gezeigt, dass die Geschwindigkeit und die Transportkapazität eines Trübestromes nahezu unabhängig von den Zuflussbedingungen sind [2]. Ist anders ausgedrückt das Phänomen der «Unterwasserlawine» einmal durch den Zufluss ausgelöst, so entwickelt diese eine Eigendynamik unabhängig von den Zuflussbedingungen. Hingegen beeinflusst der charakteristische Korndurchmesser des sich in Suspension befindenden Materials im Zufluss die Fliesskapazität des Trübestromes entscheidend. Berechnungen beispielsweise mit einem Korndurchmesser von 0,1 mm ergaben, dass der Trübestrom unabhängig der Zuflussbedingungen gar nicht entsteht oder schnell ab-

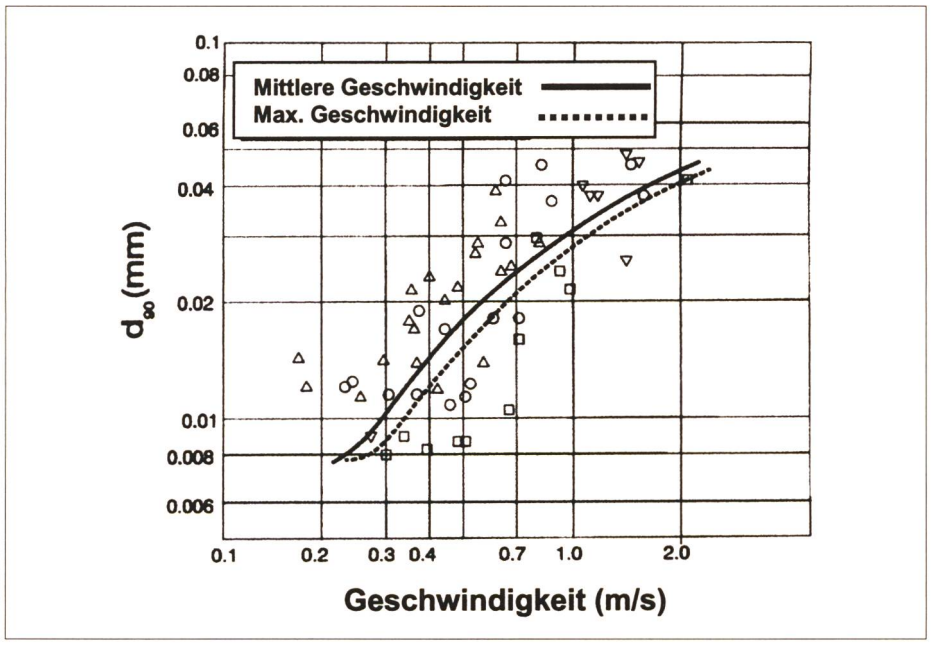


***Bild 8. Maximal transportierbarer Korndurchmesser in Abhängigkeit der Fliessgeschwindigkeit des Trübestroms gemäss [16].***

| Massnahme / Wirkung | Hindernisse | Rauigkeitselemente | Zuführung von Fremdenergie |
|---|---|---|---|
| **Stoppen** | • Damm oder Mauer<br>• Schwimmender oder fixer Geotextilvorhang | • Gitter, Rechen<br>• Buhnen<br>• Schwellen | • Luftschleier<br>• Wasserschleier |
| **Verdünnen** | • Aufgelöste Gitterwände | • Gitter, Rechen | • Luftschleier<br>• Wasserschleier<br>• Mechanischer Mixer<br>• Düsenmixer |
| **Umleiten** | • Leitdamm oder Leitmauer<br>• Geotextilleitung<br>• Schwimmender Geotextilvorhang | • Geotextilleitung<br>• Schwimmender Geotextilvorhang<br>• Gitter, Rechen | • Lokale Wasserinjektion |

***Bild 9. Morphologischer Kasten der technischen Massnahmen zur Beherrschung der Trübeströme und ihre Wirkungen.***

stirbt. Dies wurde auch dadurch bestätigt, dass keine Korndurchmesser grösser als 0,1 mm auf dem Seegrund im Bereich der Talsperre Luzzone gefunden wurden [13]. Typische Trübeströme können Fliessgeschwindigkeiten von 0,5 bis 0,8 m/s erreichen, welche es ihnen erlaubt, maximale Korndurchmesser von 0,015 mm bis 0,025 mm zu transportieren (Bild 8).

Falls die Trübeströme in einem Stausee 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. Wegen der Bedeutung der Trübeströme für den nachhaltigen Betrieb der Speicherbecken im Alpenraum werden im Rahmen eines Forschungsprojektes technische Massnahmen identifiziert und untersucht, mit welchen Verlandung durch Trübeströme beherrscht werden kann.

Die technischen Massnahmen zielen grundsätzlich darauf ab, die Trübeströme zu stoppen, zu verdünnen oder umzulenken (Bild 9). Als Massnahmen selbst sind Hindernisse und Rauigkeitselemente im Stausee sowie die Zuführung von Fremdenergie denkbar.

Hindernisse im Talweg des Stauseegrundes können, wenn sie eine minimale Höhe aufweisen, die Trübeströme stoppen und die Schwebstoffe zur Absetzung bringen. Denkbar sind kleinere Dämme und Mauern, welche eine kleine Durchflussöffnung aufweisen müssen, damit sie bei tiefem Stauspiegel im Stausee nicht Wasser zurückhalten. Trübeströme könnten auch durch einen Geotextilvorhang angehalten werden, welcher entweder fix unter Wasser über den untersten Talquerschnitt gespannt ist oder an Schwimmern an der Seeoberfläche aufgehängt ist. Diese Vorhänge müssen ebenfalls am Boden eine Durchflussöffnung aufweisen und zudem Stauspiegelschwankungen flexibel folgen können. Zum Stoppen des Trübestromes muss der Textilvorhang zudem nicht absolut dicht, sondern kann maschenförmig ausgebildet sein.

Sind Hindernisse stark durchlässig, beispielsweise in Form einer Gitterwand ausgebildet, werden sie den Trübestrom nicht unmittelbar stoppen, können ihn aber so stark verwirbeln und verdünnen, dass er anschliessend abstirbt.

Mit Hindernissen wie Leitdämmen und -mauern kann der Trübestrom auch umgelenkt werden, mit dem Ziel, ihn an einer unproblematischen Stelle im Stausee, zum Beispiel in einer Bucht, absetzen zu lassen. Er kann auch auf seinem Weg mit einer leichten am Boden fixierten Geotextilleitung aufgefangen und an einen gewünschten Ort umgeleitet werden. Grundsätzlich möglich zur lokalen Umleitung sind auch Geotextilvorhänge.

Zweck von Rauigkeitselementen ist es ebenfalls, den Trübestrom in einer bestimmten Zone entlang dem Talweg zu stoppen. Dies kann mit buhnenförmig angeordneten, kleinen Schüttdämmen oder auch mit Gittern und Rechen, welche in den Talweg hineinragen, geschehen. Letztere verwirbeln und verdünnen zusätzlich den Trübestrom. Schliesslich können diese Rauigkeitselemente auch zur Umleitung dienen.

Als dritte grundsätzliche Massnahme kann der Trübestrom durch Zuführen von Fremdenergie gestoppt, verdünnt oder umgeleitet werden. Weisen Luftschleier und Wasserschleier einen entsprechenden Widerstand auf, wird der Trübestrom vollständig angehalten. Ansonsten ist zumindest eine starke Verdünnung zu erwarten, welche den Trübestrom bremst und zum Absterben bringt. Die Idee von mechanischen oder Düsenmixern ist es, einen ankommenden Trübestrom zu verwirbeln und anschliessend die Feinstoffe dauernd im Stausee in Schwebe zu halten, sodass sie mit dem Turbinierwasser evakuiert werden. Selbstverständlich muss dabei die Schwebstoffkonzentration begrenzt werden, um Abrasionsprobleme an

den hydraulischen Maschinen und ökologische Probleme im Unterwasser zu verhindern. Trübeströme erreichen Sedimentkonzentrationen von einigen Volumenprozenten. Durch eine Verdünnung infolge der Verwirbelung mit einem Mixer mit einer grösseren Wassermenge kann schlussendlich die Konzentration so begrenzt werden, dass die zu Beginn erwähnten Probleme nicht auftreten. Zudem halten die mit neuartigen Materialien beschichteten Laufräder der Hochdruckturbinen heute Sedimentkonzentrationen von 2 bis 5 g/l und mehr über normale Revisionszyklen (3 bis 5 Jahre) stand [17]. Mechanische Mixer oder Düsenmixer könnten auch bereits abgesetzte Feinsedimente an neuralgischen Stellen, beispielsweise in der Nähe der Auslassorgane, wieder aufwirbeln und so dem Turbinenwasser zugeführt werden.

Schlussendlich kommen auch lokale Wasserinjektionen in Frage, um den Trübestrom in seiner Richtung abzudrängen und eventuell zum Anhalten zu bringen. Für lokale Wasserinjektionen könnte beispielsweise die Energie des Wassers aus Überleitstollen verwendet werden, welche über dem Stauziel eingeleitet werden (vgl. 4.2).

## 6. Anwendungsbeispiel Stausee Grimsel

Im Rahmen des Projektes Grimsel Plus ist als dritte Etappe der ersten Phase die Erhöhung der zwei Staumauern des Grimselstausees um 23 m vorgesehen, wodurch das Nutzvolumen des Speichers von heute 95 Mio. $m^3$ auf 170 Mio. $m^3$ vergrössert wird (geografische Lage vgl. Bild 2). Für den guten Verbund des neuen mit dem alten Mauerbeton muss dabei ein Teil der bestehenden Mauern abgebrochen werden. Zusammen mit dem Fundamentaushub fallen dabei etwa 150 000 $m^3$ Material an. Da der Stausee für die Erhöhung kurzzeitig entleert werden muss, stellte sich die Frage, ob das Aushub- und Abbruchmaterial nicht sinnvollerweise zum Bau von Hindernissen im Talweg des Sees verwendet werden könnte. Damit könnten Trübeströme zukünftig gestoppt werden. Im Rahmen einer Studie wurde der Stausee in einem numerischen Modell nachgebildet und der Trübestrom des Hochwassers vom Oktober 2000 (Abflussspitze 40 $m^3/s$, angenommene Sedimentkonzentration 15 g/l) nachgerechnet. Die Rechnungen zeigten, dass der Trübestrom nach etwa 36 Stunden bis in den Bereich der Triebwasserfassungen vorgestossen ist und dort anschliessend für dieses einzelne Ereignis Ablagerungen von ungefähr 10 cm bewirkt (Bild 11 oben) hat.

Zur zukünftigen Beeinflussung der Trübeströme im Grimselstausee wurden folgende Hindernisse untersucht (Bild 10):

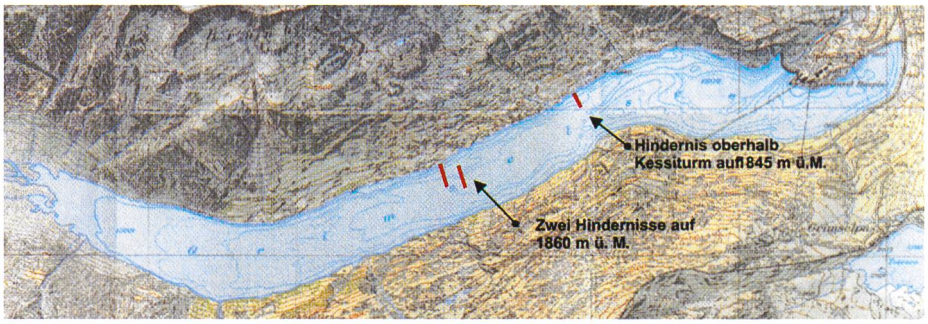


***Bild 10. Grimselstausee mit den untersuchten Hindernisstandorten zur Bremsung der Trübeströme.***

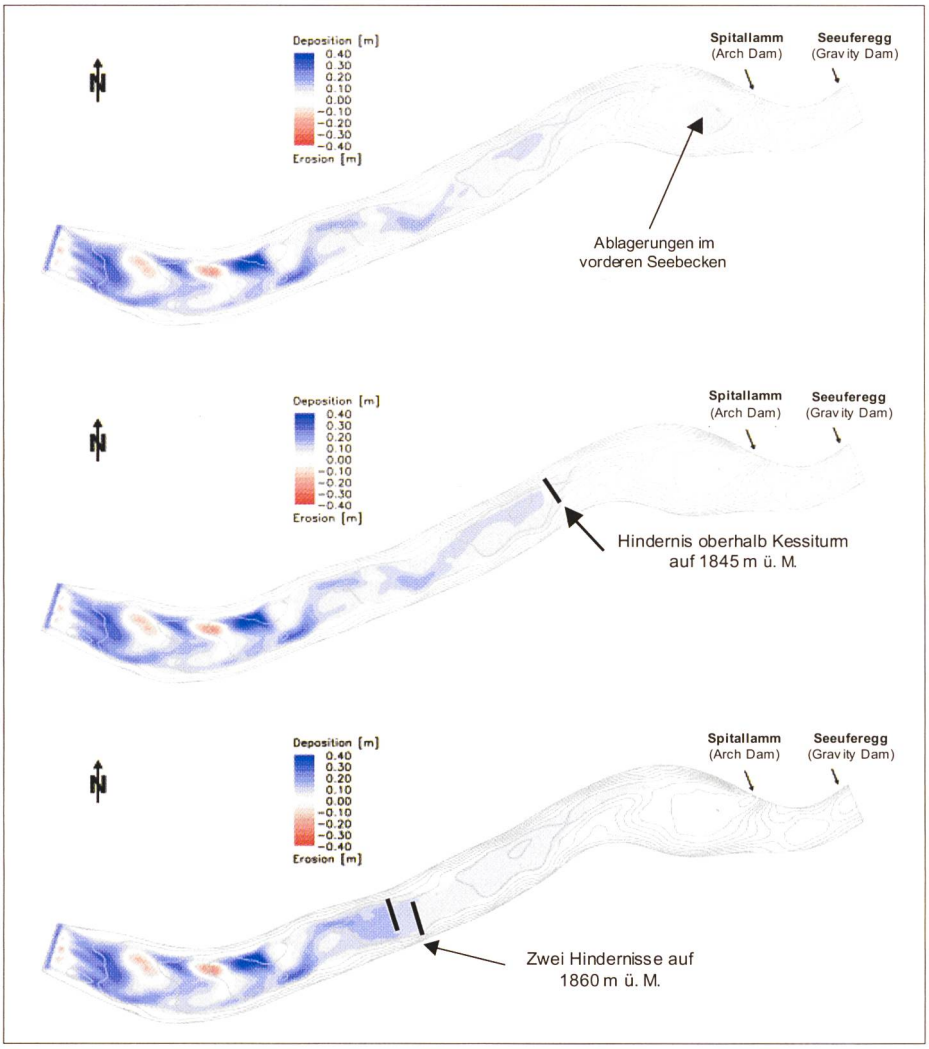


***Bild 11. Ablagerungen und Erosionen eines im Grimselstausee simulierten Trübestroms während des Hochwassers vom Oktober 2000 (Abflussspitze 40 $m^3/s$, angenommene Sedimentkonzentration 15 g/l).***
***Oben: ohne Massnahmen***
***Mitte: Hindernis oberhalb Kessiturm auf 1845 m ü.M. (Variante 1)***
***Unten: Zwei Hindernisse 1860 m ü.M. (Variante 2)***

Variante 1: Buhnenförmig angeordneter Schüttdamm von 15 m Höhe auf 1845 m ü.M.; Länge 150 m, Böschungsneigung 20°, Schüttvolumen 100 000 $m^3$

Variante 2: Zwei buhnenförmig angeordnete Schüttdämme von 10 m Höhe auf 1860 m ü.M.; Länge 210 m, Böschungsneigung 20°, Schüttvolumen 130 000 $m^3$

Die Berechnungen zeigen, dass beide Varianten den Trübestrom bremsen und eine Absetzung der Materialien grösstenteils oberhalb der Hindernisse bewirken (Bild 11). Die Variante 1 stoppt den Trübestrom nahezu vollständig; bei Variante 2 fliesst er mit reduzierter Energie weiter, um dann bei der Verengung «Kessiturm» abzusterben, also mehr als 1 km oberhalb der Triebwasserfassungen. Das Volumen hinter den Hindernis-

sen wird etwa nach 20 bis 50 Jahren aufgefüllt sein, sodass ihre Wirkung nahezu verloren geht.

## 7. Schlussfolgerungen

Die Verlandung beeinflusst die Nachhaltigkeit von Stauseen in entscheidendem Masse. Die weltweite mittlere Verlandungsrate der von Menschenhand geschaffenen Speicher ist heute bereits in der gleichen Grössenordnung wie der Zuwachs an Speicherkapazität durch den Neubau von Talsperren. In diesem Jahrhundert wird es also eine Hauptaufgabe der Planer und Betreiber von Speichern sein, mit effizienten Massnahmen diesem schleichenden Prozess entgegenzuwirken. Als wichtigste Massnahme steht die Eindämmung der Bodenerosion durch Aufforstungen und Schutzmassnahmen bei der Landwirtschaft im Vordergrund, überall dort, wo die klimatischen Bedingungen dies zulassen. Aber auch die Auslegung und die Betriebsweise von Stauseen können die Verlandung von Stauseen zusammen mit entsprechend ausgelegten Auslass- und Spülorganen entscheidend beeinflussen. Die gewählten Lösungen müssen den örtlichen Gegebenheiten bezüglich Sedimenteintrag Rechnung tragen. Numerische Modelle zur Modellierung und Vorhersage von Verlandungen können dabei wertvolle Hilfe zur Wahl des richtigen Konzeptes eines Stausees leisten.

Im Alpenraum liegt die Verlandungsrate der Stauseen etwa eine 10er-Potenz unter dem weltweiten Durchschnitt. Obwohl der Volumenverlust noch nicht schwer ins Gewicht fällt, will dies aber nicht bedeuten, dass die Verlandung unproblematisch ist. In alpinen Speichern sind die Voraussetzungen für die Entstehung von Trübeströmen fast immer gegeben. Diese treten regelmässig bei jährlichen Hochwassern auf und verfrachten grosse, bereits abgesetzte Sedimentvolumen entlang dem Talweg bis zur Staumauer. Dort nehmen die Sedimentschichten relativ schnell zu, sodass bereits nach 40 bis 50 Betriebsjahren die Auslassorgane wie Triebwasserfassungen und Grundablässe beeinträchtigt werden. Die Herausforderung bei der nachhaltigen Nutzung der alpinen Speicher ist also in erster Linie die Beherrschung der Trübeströme durch geeignete Massnahmen. Dabei gibt es mehrere Erfolg versprechende Massnahmen in Form von Hindernissen, Rauigkeitselementen und Zuführung von Fremdenergie, welche die Trübeströme umleiten, verdünnen oder stoppen können. Im Rahmen eines Forschungsprojektes werden zurzeit die Wirkung der verschiedenen Massnahmen in Laborversuchen untersucht und an reellen Stauseegeometrien überprüft, um allgemein gültige Bemessungsgrundlagen zu erarbeiten.

Verdankung

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

Literatur

[1] *Vischer, D.:* Talsperrenhydraulik. Vorlesungsmanuskript ETH Zürich, 1984.

[2] *Oehy, Ch.; De Cesare, G.; Schleiss, A.:* Einfluss von Trübeströmen auf die Verlandung von Staubecken. Symposium Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen, 19.–21. Oktober 2000, Graz, Österreich, Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr. 34, 2000; p. 413–422.

[3] *Jacobsen, T.:* Sustainable reservoir development: the challenge of reservoir sedimentation. Hydropower into the next century – III, 1999, Gmunden, Austria, Conference Proceedings, p. 719–728.

[4] *Beyer Portner, N.:* Erosion de bassins versant alpins suisses par ruissellement de surface. Communications du laboratoire de constructions hydrauliques, LCH No 8, 1999.

[5] *Beyer Portner, N.; Schleiss, A.:* Bodenerosion in alpinen Einzugsgebieten in der Schweiz. Wasserwirtschaft 90, 2000, p. 88–92.

[6] *Rodriguez Aguilera, David:* Genetic programming with GPKernel (Software developped by V. Babovic and M. Keijzer); Users Manual Version Nov 2000; Danish Hydraulic Institute (DHI).

[7] *De Cesare, G.; Boillat, J.-L.:* Trübeströme im Stausee Luzzone. Vergleich zwischen numerischer Modellierung und Naturmessungen. Symposium Planung und Realisierung im Wasserbau, Garmisch-Partenkirchen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr. 8, TU München 1998, p. 213–224.

[8] *De Cesare, G.:* Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. Communications No 7 du laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), EPFL, 1998.

[9] *De Cesare, G.; Schleiss, A.; Hermann, F.:* Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. Journal of Hydraulic Engineering 127 (1); 2001, p. 6–16.

[10] *Cornut, R.:* Surélévation du barrage de Lalla Takerkoust (Maroc). wasser, energie, luft; Heft 7/8, 1992, p. 155–160.

[11] *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 Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr. 34, 2000; p. 367–376.

[12] *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 Nr. 142 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1996; p. 37–58.

[13] *Sinniger, R.; De Cesare, G.; Boillat, J.-L.:* Eigenschaften junger Sedimente in Speicherseen. wasser, energie, luft; Heft 1/2, 2000; p. 9–12.

[14] *Krumdieck, A.; Chamot, Ph.:* Spülung von Sedimenten in kleinen und mittleren Staubecken. Mitteilung Nr. 53 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1981; p. 257–270.

[15] *Jacobson, T.:* Khimi pressurized tunnel sand trapsediment removal during operation by use of Slotted Pipe Sediment Sluicer. Proceedings of Hydro 2000 – Making hydro more competitiv. 2–4 October, Berne, Switzerland, 2000; p. 153–159.

[16] *Fan, J.:* Turbidity currents in reservoirs. Water International, 11(3), 1986; p. 107–116.

[17] *Grein, H; Schachenmann, A.:* Solving problems of abrasion in hydroelectric machinery. Water Power & Dam Construction, 8, 1992; p. 19–24.

[18] *Heigerth, G.; Niedermühlbichler, H.; Knoblauch, H.:* Sedimenttransport zwischen Hochdruckspeichern. Proceedings Wasserbau Symposium «Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen», 19.–21. Oktober 2000, Graz, Österreich, Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr. 34, 2000; p. 347–356.

[19] *Boillat, J.-L.; Dubois, J.; De Cesare, G.; Bollaert, E.:* Sediment management examples in Swiss Alpine reservoirs. Proceedings International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management, 26–27 October, Tokyo, Japan, 2000.

[20] *Boillat, J.-L.; De Cesare, G.; Schleiss, A.; Oehy, C.:* Successful sediment flushing conditions in Alpine reservoirs. Proceedings International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management, 26–27 October, Tokyo, Japan, 2000, p. 155–167.

Adresse der Verfasser

*Anton Schleiss,* Prof. Dr. dipl. Bauing. ETH, Direktor; *Christoph Oehy,* dipl. Bauing. ETH, Wissenschaftlicher Mitarbeiter; Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), EPFL, CH-1015 Lausanne.

E-Mail: Anton.Schleiss@epfl.ch; Christoph.Oehy@epfl.ch; http://lchwww.epfl.ch/