

# Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft

■ Anton Schleiss, Giovanni De Cesare, Jolanda Jenzer Althaus

## Zusammenfassung

Obwohl die Ursachen der Verlandung und die damit verbundenen Prozesse seit langem bekannt sind, werden auch heute nur in seltenen Fällen bei der Konzeption von neuen Speichern entsprechende proaktive und nachhaltige Massnahmen getroffen. Bei den bestehenden Stauseen wird die Verlandungsproblematik oftmals mit nur relativ befristet wirkenden Massnahmen angegangen, um Betriebseinschränkungen zu vermeiden. Viele der Massnahmen werden aber mittelfristig ihre Wirksamkeit verlieren, so dass der nachhaltige Betrieb des Speicherraumes gefährdet ist. Da dieser für die Spitzenenergieproduktion unabdingbar ist, gefährdet die Verlandung die nachhaltige Bereitstellung dieser wertvollen Energie. 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. In Asien beispielsweise wird bis 2035 rund 80% verlandet sein.

Im Alpenraum liegt die Verlandungsrate der Stauseen deutlich unter dem weltweiten Durchschnitt. Der massgebende Prozess ist aber die Entstehung der Trübströme, welche die Feinsedimente regelmässig bis zur Staumauer transportieren und dort jährliche Sedimentzuwachs-raten von bis zu einem Meter erzeugen können. Deshalb sind nach 40 bis 50 Jahren Betrieb die Auslassorgane wie Triebwasserfassungen und Grundablässe bei vielen Stauanlagen schon beeinträchtigt. Die Auswirkungen der Klimaänderung wird zukünftig die Sedimentzufuhr zu den Stauseen noch erhöhen. Trübströme können durch Hindernisse im rückwärtigen Stauraumbereich gestoppt und zur Ablagerung gezwungen werden, sodass die Auslassorgane nicht beeinträchtigt werden. Sie können aber auch durch Verwirbelung in der Nähe der Talsperre und der Triebwasserfassung dauernd in Schwebelage gehalten werden, was eine kontinuierliche Abführung der Feinsedimente durch das Triebwassersystem erlaubt. In gewissen Fällen ist auch die Durchleitung der Trübströme möglich.

Der vorliegende Beitrag diskutiert die Verlandungsproblematik im Hinblick auf die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. Die Besonderheiten der Feinsedimente in alpinen Stauseen werden aufgezeigt. Die Massnahmen zur Beherrschung von Trübströmen werden vorgestellt und mit Fallstudien illustriert.

## Résumé: l'alluvionnement des retenues menace l'exploitation durable de la force hydraulique

Même si l'origine de l'alluvionnement et les processus associés sont connus depuis longtemps, ils sont rarement pris en compte dans la conception des nouvelles retenues en planifiant des mesures proactives et durables. Pour les retenues existantes, l'efficacité des mesures visant à éviter des perturbations d'exploitation est souvent limitée dans le temps.

Beaucoup de ces mesures perdront à mi-terme leur effet et l'exploitation durable de la retenue est ainsi menacée. La persistance de la retenue étant indispensable pour la production de l'énergie de pointe, l'alluvionnement menace l'approvisionnement durable de cette énergie précieuse. La perte moyenne annuelle mondiale du volume de retenue due à l'alluvionnement dépasse aujourd'hui déjà l'augmentation annuelle du volume total obtenu par la construction de nouvelles retenues pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et l'hydroélectricité. En Asie par exemple, 80% du volume actuel des retenues seront perdus en 2035 déjà.

Dans les Alpes, le taux d'alluvionnement est sensiblement plus faible que la moyenne mondiale. Le processus déterminant est souvent la formation des courants de turbidité qui transportent régulièrement, lors des crues annuelles, les sédiments fins le long de la retenue jusqu'au barrage et provoquent une croissance des couches de sédiments jusqu'à 1 m par évènement. Pour cette raison, les ouvrages de vidange ainsi que les prises d'eau de nombreux aménagements d'accumulation sont déjà affectés par l'alluvionnement après 40 à 50 ans d'exploitation seulement. Les effets de changement climatiques augmenteront sensiblement l'apport des sédiments dans les retenues. Les courants de turbidité peuvent être arrêtés dans l'arrière partie d'une retenue par des obstacles pour éviter que les ouvrages de sortie soient touchés par les dépôts sédimentaires. Par des mesures introduisant une turbulence importante proche de ces ouvrages, les sédiments fins peuvent être maintenus en continu en suspension et ainsi être évacués par la prise d'eau avec l'eau turbinée. Dans certains cas, la transition des courants de turbidité par les ouvrages de vidange lors des crues est possible.

L'article discute la problématique de l'alluvionnement en vue de l'exploitation durable de la force hydraulique. La particularité des sédiments fins dans des retenues alpines est mise en évidence. Des mesures pour la maîtrise des courants de turbidité sont présentés et illustrés à l'aide des études de cas.

## 1. Bewusstsein der Verlandungsproblematik

Alle natürlichen und künstlichen Seen sind dem Verlandungsprozess durch Auffüllen mit Sedimenten unterworfen. Werden die

Stauseen zur Produktion von Wasserkraft genutzt, so reduziert die Verlandung deren Nutzvolumen sukzessive. Da die verfügbaren Stauseevolumen für die Spitzenenergieproduktion unabdingbar sind,

gefährdet die Verlandung die nachhaltige Bereitstellung dieser wertvollen Energie. Obwohl die Wasserkraft grundsätzlich als erneuerbare Energie gilt, muss deren Nachhaltigkeit zumindest bei den Spei-

cherkraftwerken hinsichtlich Spitzenenergieproduktion angezweifelt werden.

Die Ursachen der Verlandung und die damit verbundenen Prozesse sind seit langem bekannt. Eine Übersicht der wissenschaftlichen Publikationen zum Thema Stauraumverlandung von De Cesare und Lafitte (2007) zeigt, dass bis in den 60er-Jahren des letzten Jahrhunderts nur etwa 10% einer Stichprobe von 400 einschlägigen Publikationen veröffentlicht wurden (Bild 1). Rund 75% der Fachartikel wurden ab 1980 publiziert, also erst etwa 20 Jahre nach dem Höhepunkt des Talsperrenbaus in den Industriestaaten. Dies verdeutlicht auch, dass die Verlandung beim Bau dieser Talsperren in den meisten Fällen kein eigentliches Thema war, obwohl damals die Prozesse theoretisch schon bekannt waren.

Das Internationale Talsperrenkomitee (ICOLD) hat die Problematik der Stauraumverlandung erstmals am 2. Kongress von 1936 mit vier Beiträgen diskutiert. Seitdem kam die Verlandung an weiteren fünf Kongressen zur Sprache. Zudem wurden bis heute zwei Bulletins zur Verlandung publiziert (Bulletin 115: Dealing with reservoir sedimentation [2000]; Bulletin 140: Mathematical modelling of sediment transport and deposition in reservoirs [2007]). Ein neues Bulletin ist kurz vor der Veröffentlichung (Sedimentation and sustainable use of reservoirs and river systems [2009]).

Am 23. ICOLD-Kongress in Brasilia wurde die Problematik der Stauraumverlandung letztmals in einer speziellen Frage (Q89) mit dem Titel «Verlandungsmanagement in bestehenden und neuen Speichern» behandelt. Die Frage wurde unter vier Teilaspekten diskutiert:

- Bewältigung der Stauraumverlandung durch Schleusung der Sedimente durch den Speicher
- Bewältigung der Stauraumverlandung durch mechanische Baggerung, Saugbaggerung (hydro-suction) und Spülung um den Stauraum (by-passing)
- Sedimentrückhalt oberhalb des Speichers im Einzugsgebiet
- Allgemeine Betrachtungen zum nachhaltigen Sedimentmanagement

Insgesamt wurden diese Teilaspekte in 28 Beiträgen behandelt, was relativ wenig ist. Es fällt auf, dass aus den Gebieten, welche am stärksten von der Stauraumproblematik betroffen sind, sowie in Gebieten, wo die grösste Bautätigkeit von neuen Speicherseen stattfindet, nur wenige Beiträge eingereicht wurden. Dies lässt erahnen, dass die Stauraumverlandung noch nicht ausreichend ins Bewusstsein von Planern und Betreibern von Speicherseen gelangt ist. Vielfach begnügt man sich bei der Projektierung mit einer groben Abschätzung der erwarteten Sedimentzufuhr und der Bereitstellung eines entsprechenden Totraumes, welcher die Sedimente typischerweise während den nächsten 50 Jahren auffangen soll. In diesen Fällen wird die Problematik der Stauraumverlandung auf die nächste Generation weitergeschoben.

Es kann gefolgert werden, dass die Stauraumverlandung auch heute nur in seltenen Fällen bei der Konzeption von neuen Speichern umfassend in Betracht gezogen wird und entsprechende proaktive Massnahmen getroffen werden. Es werden leider immer noch weltweit Speicher realisiert, welche nur ungenügende Spülkapazitäten aufweisen und welche in

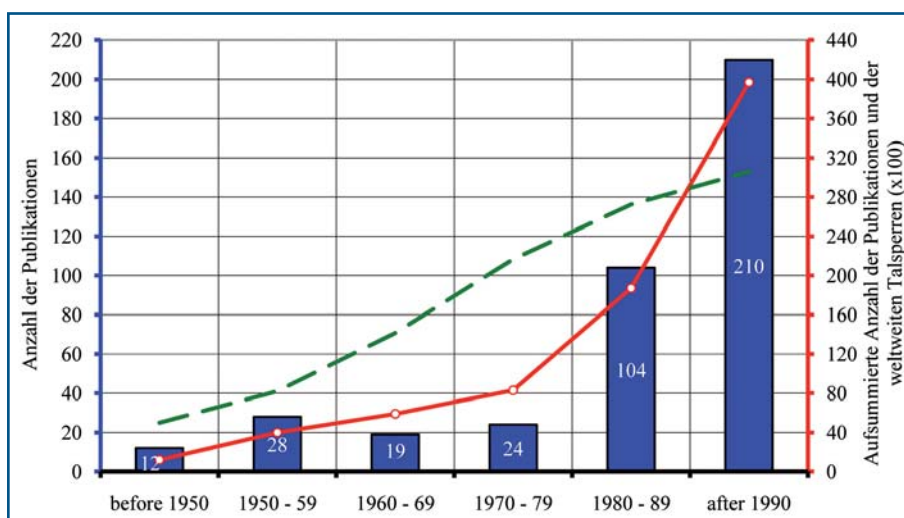
weniger als 50 Jahren grösstenteils verlandet sein werden. Andererseits sind die theoretischen Grundlagen für die Simulation der Verlandungsprozesse seit langem bekannt. Zudem gibt es eine Vielzahl von erprobten Massnahmen, welche aber auf den speziellen Fall angepasst werden müssen. Dies benötigt eine vertiefte Kenntnis der Verlandungsprozesse. Allgemeine Rezepte existieren leider nicht.

Bei den Speichern, welche schon seit längerem in Betrieb sind und wo die ersten Probleme mit dem Betrieb infolge der Verlandung schon aufgetreten sind, ist das Bewusstsein bei den Betreibern sicherlich vorhanden. In vielen Fällen wird die Verlandungsproblematik mit nur relativ befristet wirkenden Massnahmen angegangen, um Betriebseinschränkungen zu vermeiden. Viele der Massnahmen werden aber mittelfristig ihre Wirksamkeit verlieren, so dass der nachhaltige Betrieb des Speicherraumes gefährdet ist.

## 2. Weltweite Bedeutung der Verlandung

Die weltweite Speicherkapazität der künstlichen Stauräume wird auf etwa 7000 km<sup>3</sup> geschätzt, wobei rund 4000 km<sup>3</sup> tatsächlich für Wasserkraft, Bewässerung und Wasserversorgung genutzt werden können (Basson, 2009). Das mittlere Alter dieser Speicher beträgt etwa 30 bis 40 Jahre. Die weltweit mittlere Verlandungsrate wird bis heute auf etwa 0.8%/Jahr geschätzt (Basson, 2009). Erwartungsgemäss sind die mittleren Verlandungsraten in den ariden Gebieten wie im Mittleren Osten sowie in Afrika am grössten, wie die Tabelle 1 zeigt. Die Ersatzinvestition der jährlich verloren gegangenen Speicherkapazität von 0.8% kostet im Mittel etwa 13 Billionen (10<sup>12</sup>) \$/Jahr (Palmieri et al., 2001) bis 19 Billionen \$/Jahr. Die Kosten für den Betrieb und Unterhalt der bestehenden Speicher werden auf rund 60 Billionen \$/Jahr geschätzt. Demgegenüber werfen die Speicher weltweit einen Ertrag von 125 Billionen \$/Jahr für die Elektrizitätsproduktion sowie 50 bis 100 Billionen \$/Jahr für andere Zwecke, insbesondere für die Bewässerung resp. Nahrungsmittelproduktion, ab. Die jährlichen Investitionsverluste durch die Verlandung betragen also etwa 20% bis 30% der Unterhalts- und Betriebskosten. Im Vergleich dazu werden aber für Massnahmen gegen die Verlandung bei weitem nicht so viel investiert.

In Tabelle 2 ist der Zeitpunkt angegeben, wenn 80% des Nutzvolumens für die Wasserkraftnutzung (resp. 70% für andere des Volumens für andere Verwen-



**Bild 1. Historische Entwicklung der Anzahl der Publikationen (blau) zum Thema Stauraumverlandung (Stichprobe 400 Publikationen). Summenkurve der Publikationen (rot) im Vergleich zur Entwicklung des Talsperrenbaus gemäss ICOLD-Register (grün, Massstab x 100).**

dungszwecke) in den Speichern in verschiedenen Regionen durch Verlandung verloren gegangen sind. Es ist ersichtlich, dass in Asien 80% des bestehenden Nutzvolumens bereits 2035 verlandet sind und nicht mehr für die Wasserkraftproduktion zu Verfügung stehen. Anbetrachts des schnell steigenden Elektrizitätsbedarfs ist dies beängstigend. 70% des heute für die Bewässerung verfügbaren Speicherraumes werden in Asien bereits 2025 verloren sein. Im Mittleren Osten wird dies 2030 und in Mittelamerika 2040 der Fall sein. Dies verdeutlicht noch einmal, dass die Verlandungsproblematik die nachhaltige Energie- und Nahrungsproduktion in vielen Regionen gefährden kann. 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.

In Europa ist die mittlere jährliche Verlandungsrate mit 0.73% vergleichsweise mit anderen Regionen hoch, was vor allem den Speichern in Südeuropa zuzuschreiben ist, welche in ariden und vegetationsarmen Gebieten liegen. Im Alpenraum dürfte die durchschnittliche Verlandungsrate deutlich tiefer liegen. So wurde beispielsweise die durchschnittliche Verlandungsrate der Stauseen in der Schweiz auf 0.2% geschätzt. Obwohl der eigentliche Volumenverlust noch nicht schwer ins Gewicht fällt, will dies aber nicht bedeuten, dass die Verlandung unproblematisch ist. In alpinen, langgezogenen und engen Speichern treten regelmässig bei jährlichen Hochwasser Trübestrome auf, welche als Unterwasserlawine grosse Volumen von bereits abgesetzten Feinsedimenten entlang des Talweges bis zur Staumauer verfrachten. Am tiefsten Punkt des Speichers bei der Talsperre wachsen die Sedimentschichten relativ schnell an, und Zuwachsraten von 0.5 m bis 1.0 m pro Jahr sind keine Seltenheit. Deshalb können bereits nach 40 bis 50 Jahren Betrieb die Auslassorgane wie Triebwasserfassungen und Grundablässe beeinträchtigt werden. Dadurch können sich Betriebseinschränkungen sowie Sicherheitsprobleme ergeben.

### 3. Einfluss der Klimaänderung

Der Sedimenteintrag in Stauseen hängt im Wesentlichen von den Erosionseigenschaften der Einzugsgebiete ab. Weltweit wird angenommen, dass durch die Auswirkungen der Klimaänderung die Boden-erosion in vielen Gebieten stark zunehmen wird. Zum einen ist dies der zunehmenden

Region	Mittlere Verlandungsrate (%/Jahr)
Afrika	0.85
Asien	0.79
Australien & Ozeanien	0.94
Mittelamerika	0.74
Europa	0.73
Mittlerer Osten	1.02
Nordamerika	0.68
Südamerika	0.75

**Tabelle 1. Mittlere Verlandungsraten in verschiedenen Regionen (Basson, 2009).**

Region	Speicher für Wasserkraftnutzung: Zeitpunkt wenn 80 % des Nutzvolumens verlandet ist	Sonstige Speicher: Zeitpunkt wenn 70% des Nutzvolumens verlandet ist
Afrika	2100	2090
Asien	2035	2025
Australasien	2070	2080
Mittelamerika	2060	2040
Europe und Russland	2080	2060
Mittlerer Osten	2060	2030
Nordamerika	2060	2070
Südamerika	2080	2060

**Tabelle 2. Zeitpunkt, wenn 80% des Nutzvolumens für die Wasserkraftnutzung (resp. 70% für andere des Volumens für andere Verwendungszwecke) in den Speichern in verschiedenen Regionen durch Verlandung verloren gegangen sind (Basson, 2009).**

Versteppung zuzuschreiben sowie der Zunahme der extremen Niederschlagsereignisse.

Aufgrund einer Analyse von 19 Stauseen in der Schweiz, indem der jährliche Sedimenteintrag entweder aus Seegrundvermessungen oder Feststoffmengen während Spülvorgängen bestimmt wurde (Beyer Portner, 1998, Beyer Portner et al., 2000), konnte ein empirisches Erosionsmodell gefunden werden, welches von folgenden Parametern abhängt:

- mittlere Regenhöhe im Sommer (Juni bis September) [mm]
- Anteil der vegetationslosen Flächen [%]
- Anteil der mit erodierbarem Boden bedeckten Flächen [%]
- mittlere jährliche relative Längenänderung der Gletscher [%]

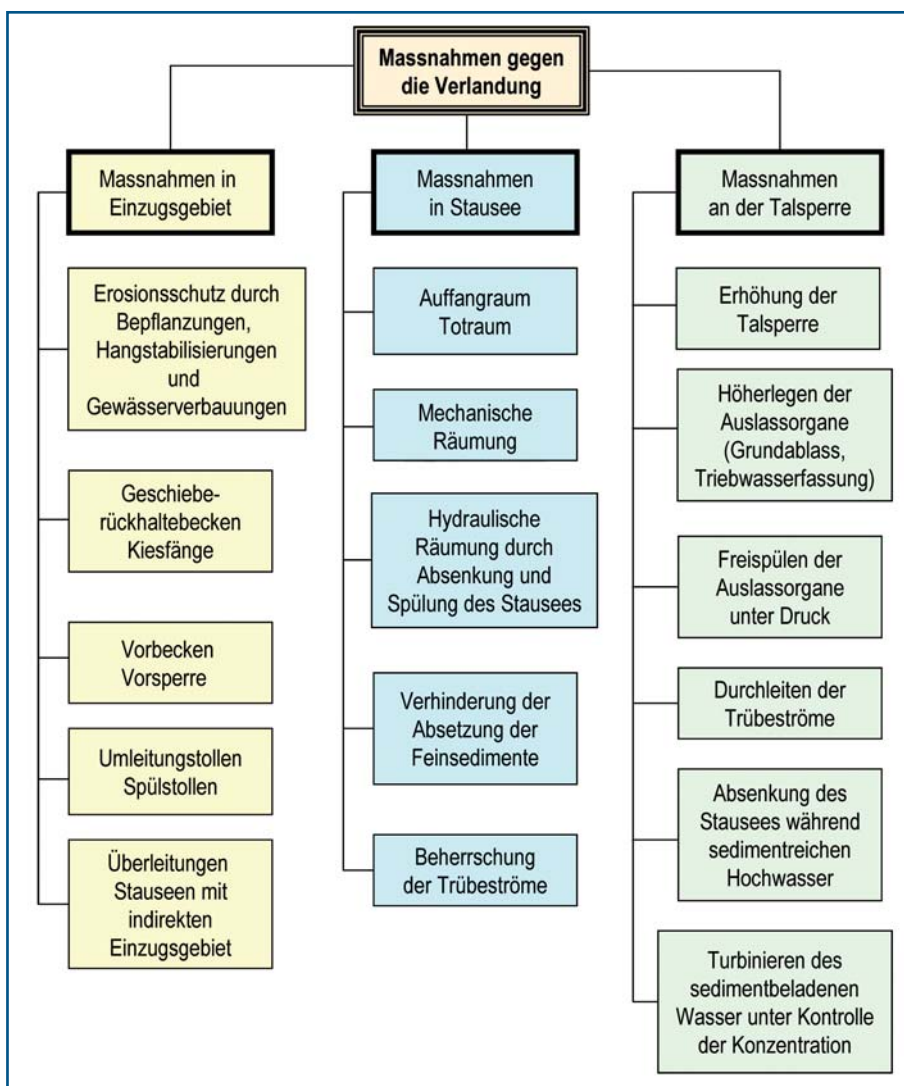
Alle diese Parameter unterliegen direkt den Auswirkungen der Klimaänderung. So ist aufgrund der klimatischen Veränderungen und den daraus resultierenden Folgen, wie Rückzug der Gletscher, Anstieg der Nullgrad- und Perma-

frostgrenze und verstärkter Niederschlag in den vegetationsarmen Wintermonaten, in Zukunft eine Zunahme der Sedimenteinträge in alpine Stauseen zu erwarten. Bei vielen Speichern wurde eine deutliche Zunahme der Sedimentzufuhr bereits seit 10–15 Jahren parallel mit dem Rückzug der Gletscher beobachtet. Werden die heute beobachteten Trends bezüglich mittlere Sommer- und Winterniederschläge sowie Entwicklung der Gletscheroberflächen bis 2050 extrapoliert, so ist gemäss dem empirischen Erosionsmodell etwa mit einer durchschnittlichen jährlichen Zunahme der Sedimentzufuhr zu den Speichern von 10% zu rechnen.

Die Speicher in den Alpen wurden seinerzeit dazu ausgelegt, Wasser im Sommer zu speichern um im Winter Spitzenenergie zu produzieren wenn der Bedarf am höchsten ist und die Wasserführung an den Flüssen mit Laufwasserkraftwerken gering ist. Mit der Klimaänderung werden die Niederschläge im Winterhalbjahr eher zu und im Sommerhalbjahr eher abnehmen. Mit der Abnahme der Gletscher wird







**Bild 2. Übersicht über präventive und retroaktive Massnahmen gegen die Verlandung (Schleiss und Oehy, 2002).**

weniger Niederschlag im Winter in Form von Eis gespeichert und im Sommer durch die Gletscherschmelze den Speichern zugeführt. Die Speicher werden neben der Energieerzeugung zukünftig auch die Aufgabe bekommen, Wasser während der zunehmenden Trockenperioden im Sommer bereitzustellen. In diesem Sinne müssen die alpinen Stauseen sozusagen die Funktion der Gletscher übernehmen, dass heisst, das Überflusswasser im Winter zu speichern, um es dann in den trockenen Sommern wieder für Energieproduktion und Anreicherung der Flüsse abzugeben. Die wichtige Bedeutung der Stauseen wird also auch mit der Klimaänderung noch zunehmen. Andererseits wird ihr Nutzvolumen durch die Verlandung noch stärker gefährdet werden. In diesem Jahrhundert wird es also eine Hauptaufgabe der Planer und Betreiber von Speichern sein, mit effizienten Massnahmen frühzeitig der verschärften Verlandungsproblematik entgegenzuwirken und ihre nachhaltige Nutzung zu gewährleisten.

#### 4. Massnahmen gegen die Verlandung

Die denkbaren Massnahmen gegen die Verlandung von Stauseen sind allgemein bekannt und können grundsätzlich in präventive und retroaktive Massnahmen eingeteilt werden (Schleiss und Oehy, 2002). 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 2).

Alle diese Massnahmen wurden von Schleiss und Oehy (2002) bereits detailliert beschrieben. In der ATV-DVWK-Schrift (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) werden die verschiedenen Methoden und Verfahren zur Entlandung von Stauseen erläutert und hinsichtlich ökologischer Aspekte diskutiert (DWA, 2006). Das Europäische Forschungsprojekt ALPRESERV im Rahmen des Programms Interreg III B hat in

den entsprechenden Veröffentlichungen wichtige Impulse für nachhaltige Lösungen hinsichtlich Stauraumverlandung gegeben (Jenzer Althaus und De Cesare, 2006; alle Publikationen verfügbar unter <http://www.alpreserv.eu/>).

#### 5. Besonderheiten der Feinsedimente in alpinen Stauseen und die Beherrschung von Trübeströmen

Der grösste Anteil der in einen alpinen Stausee gelangenden Feststofffracht besteht normalerweise aus 80–90% Schwebstoffen bei kleineren und mittleren Speichern und 90% bis nahezu 100% bei grösseren Speichern. 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 Seewasser von der Mündung weg vor sich hin, bis ein Impuls-gleichgewicht 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. Der Trübestrom bewegt sich auf dem geneigten Seegrund mit beachtlichen Geschwindigkeiten bis 1 m/s in Richtung tiefster Punkt bei der Talsperre. Die Dicke des Trübestromes hinter seinem Kopf beträgt typischerweise etwa 10 m bis 15 m.

Trübestrome können nicht nur beobachtet, sondern auch heute verlässlich genau numerisch simuliert werden (De Cesare et al., 2001). Eine Berechnung im Stausee Luzzzone für ein hypothetisches Hochwasserereignis (Abflussspitze 137 m³/s) zeigte, dass der Trübestrom in der Lage ist, gewaltige Sedimentmengen im Stausee umzuwälzen. So wurden beispielsweise über das Hochwasserhydrogramm 9000 m³ Feinsedimente in den Stausee eingetragen, aber durch den Trübestrom infolgedessen Erosionswirkung 35 000 m³ Feststoffe entlang des Talweges in Richtung Staumauer transportiert. Dadurch entstehen Ablagerungen von maximal 53 cm Stärke in einem Nahbereich von rund 300 m oberhalb der Bogenmauer.

Trübestrome treten normalerweise bereits bei kleineren jährlichen Hochwassern auf. Sie sind deshalb bei alpinen Stau-

seen die Hauptursache für den Transport der Feinsedimente entlang des Talweges des Stausees bis zur Staumauer, wo sie sich ablagern.

Falls die Trübestrome 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 zumindest im Alpenraum erheblich verbessert werden, da die Sedimentvolumen im Vergleich zur Speicherkapazität relativ gering sind. Die technischen Massnahmen zielen grundsätzlich darauf ab, die Trübestrome zu stoppen oder zu verdünnen (Oehy und Schleiss 2003). Als Massnahmen selbst sind dichte oder durchlässige Hindernisse im Stausee sowie die Zuführung von Fremdenergie denkbar.

Dichte Hindernisse im Talweg des Stausees wie Schüttdämme des Stauseegrundes können, wenn sie mindestens die doppelte Höhe des Trübestromes aufweisen, diese stoppen und die Schwebstoffe zur Absetzung bringen (Oehy und Schleiss, 2003). Für die in alpinen Speichern typisch auftretenden Trübestrome ergibt dies Hindernishöhen von 20 m bis 30 m. Diese Hindernisse sollten wenn möglich immer überstaut sein, das heisst, unter dem Absenkenziel des Stausees liegen. Ansonsten müssten sie eine kleine Durchflussöffnung aufweisen, damit sie bei tiefem Stauspiegel im Stausee nicht Wasser zurückhalten. Dann allerdings bestünde die Gefahr, dass hinter dem Hindernis abgelagerte Sedimente wieder mobilisiert werden. Mit zunehmender Auffüllung mit Sedimenten verlieren die Hindernisse mit der Zeit ihre Wirkung, was je nach Hindernishöhe etwa nach 30–50 Jahren der Fall sein wird.

Trübestrome können auch durch ein durchlässiges Hindernis wie einen Geotextilvorhang gestoppt werden (Oehy und Schleiss, 2003). Der Vorhang sollte mindestens dreimal so hoch wie der Trübestrom sein, typischerweise also etwa 30 m bis 50 m, und eine Porosität kleiner als 30% aufweisen. Das Geotextil mit Maschenöffnungen von 5–10 cm ist entweder fix unter Wasser an Stahlseilen über den untersten Talquerschnitt gespannt oder an Schwimmern an der Seeoberfläche aufgehängt. Diese Vorhänge sollten wenn immer möglich unter dem tiefsten Absenkenziel liegen, falls aufgehängt und diesem flexibel folgen können. Die Stahlseile müssen den dynamischen Kräften beim Aufprall des Trübestroms standhalten können.

Die wirksamste Massnahme wäre sicherlich das Durchleiten der Trü-

bestrome mittels Tiefenauslässen, auch «Venting» genannt. Damit dies möglich ist, muss die Auslassöffnung eine Kapazität aufweisen, welche dem Abfluss des Trübestromes entspricht. Bei einer Höhe des Trübestromes von 15 m, einer Breite von 20 bis 50 m sowie einer Geschwindigkeit von 1 m/s würde dies einer erforderlichen Kapazität des Tiefenauslasses von 300 bis 750 m<sup>3</sup>/s entsprechen. Solche Kapazitäten sind bei den Grundablässen in den alpinen Speichern kaum vorhanden. Zudem wäre auch der Wasserverlust beträchtlich, wenn der Grundablass bei jedem Auftreten der Trübestrome während jährlichen Hochwassern geöffnet werden müsste. Das Durchleiten von Trübestromen ist bei alpinen Stauseen nur in seltenen Fällen möglich, beispielsweise wenn die Auslassorgane zur Hochwasserableitung jährlich in Betrieb genommen werden müssen. Bei grossen Stauseen mit relativ grossen Einzugsgebieten ist das Durchleiten der Trübestrome eine sehr wirksame Massnahme, sofern die Tiefenauslassorgane zu Beginn dafür ausgelegt wurden.

## 6. Abführung von Feinsedimenten über Triebwassersysteme

Als weitere grundsätzliche Massnahme können die durch die Trübestrome transportierten Feinsedimente durch Zuführen von Fremdenergie in der Nähe der Tal Sperre und der Triebwasserfassung dauernd in Schwebe gehalten werden. Die Idee besteht darin, den ankommenden Trübestrom beispielsweise mit einem Düsenmixer zu verwirbeln. Die Schwebstoffe können dann kontinuierlich 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. Trübestrome erreichen Sedimentkonzentrationen von einigen Volumenprozenten, welche hinsichtlich Abrasion kaum schädlich sind. Die Verwirbelung wird etwa Sedimentkonzentrationen von derselben Grössenordnung in der Nähe der Triebwasserfassung erzeugen. Zudem halten die mit neuartigen Materialien beschichteten Laufräder der Hochdruckturbinen heute Sedimentkonzentrationen von 2–5 g/l und mehr über normale Revisionszyklen (3–5 Jahre) stand (Grein et al., 1996).

In einem Forschungsprojekt wird zurzeit die Wirkung und die optimale Anordnung von Düsenmixern systematisch untersucht (Jenzer et al. 2008, 2009). Um

die Sedimente in die Wasserfassung einziehen zu können, müssen diese vor dem Einlauf dauernd in Suspension gehalten werden. Dazu wird eine Aufwärtsströmung resp. eine entsprechende Turbulenz im Bereich der Fassung benötigt, welche die von Trübestromen antransportierten Feinsedimente am Absetzen hindert. Eine Aufwärtsströmung kann erfolgreich durch eine kreisförmige Düsenkonfiguration erzeugt werden. Entscheidender Parameter für die Wirksamkeit ist der Düsenimpuls, welche von der Austrittsgeschwindigkeit des Strahles sowie von dessen Durchmesser abhängig ist. Bei einer günstigen geometrischen Anordnung der Düsen im Vergleich zu den Abmessungen der Fassung und bei einer optimalen Wahl der Strahlimpulse könnten bei den systematischen Versuchen auf lange Dauer drei bis vier Mal mehr Sedimente über die Fassung ausgetragen werden als für den Referenzfall ohne Düsen (Jenzer et al. 2009). Für praktische Anwendungen ist dieses Resultat sehr erfolversprechend, da damit erhebliche Feinsedimentvolumen kontinuierlich über die Triebwasserfassung ausgetragen werden können. Die Konzentrationen bleiben in der Grösse der Konzentrationen der Trübestrome (etwa 5 g/l), was bezüglich Abrasion an den Turbinen sowie Ökologie im Unterwasser noch kein Problem darstellen sollte. Bei einer jährlichen Turbinierwassermenge von 100 Mio. m<sup>3</sup> könnten damit beispielsweise 500 000 t Feinsedimente abgeführt werden, falls dauernd in der Nähe der Fassung eine Konzentration von 5 g/l aufrecht erhalten werden kann.

Um die Düsenstrahlen in einer bestimmten Wassertiefe in der Nähe der Fassung zu erzeugen, wird natürlich Energie benötigt. Bei vielen alpinen Stauseen sind Beileitungen aus Nachbareinzugsgebieten vorhanden. Die Ausläufe der Überleitstollen befinden sich oftmals in beträchtlicher Höhe über dem höchsten Stauziel. Dieses Potenzial des in den Stausee frei fallenden Wassers könnte zur Erzeugung der Düsenstrahlen benutzt werden. Dazu wird das Wasser aus den Beileitungen über eine Tirolerfassung in eine Druckleitung eingespeist, welche in dem erwähnten Düsen system endet (Bild 3).

## 7. Anwendungsbeispiele

### 7.1 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, wo-

durch das Nutzvolumen des Speichers von heute 95 Mio m<sup>3</sup> auf 170 Mio. m<sup>3</sup> vergrößert wird. Der anfallende Abbruchbeton sowie das Aushubmaterial von etwa 150 000 m<sup>3</sup> könnte zum Bau von Hindernissen in Form von Schüttdämmen während der notwendigen Stauseeabsenkung verwendet werden. Im Rahmen einer Studie wurde der Stausee in einem numerischen Modell nachgebildet und der Trübestrom des Hochwassers vom Oktober 2000 (Abflussspitze 40 m<sup>3</sup>/s, angenommene Sedimentkonzentration 15 g/l) nachgerechnet (Oehy et al. 2002). Die Berechnungen zeigten, dass der Trübestrom nach etwa 36 Stunden bis in den Bereich der Triebwasserfassungen vorgestossen ist und dort anschliessend für dieses einzelne Ereignis ungefähr 10 cm Feinsedimente abgelagert (Bild 5 oben).

Die 10 m hohen (2 Hindernisse) bzw. 15 m hohen Schüttdämme (1 Hindernis) können den Trübestrom bremsen und die Absetzung der Feinsedimente grösstenteils oberhalb der Hindernisse erzwingen (Bild 5 Mitte und unten). Der 15 m hohe Schüttdamm oberhalb vom Kessiturm stoppt den Trübestrom nahezu vollständig. Bei der Variante mit zwei weiter unten

angeordneten 10 m hohen Hindernissen fliesst Trübestrom stark gebremst weiter, um dann bei der Verengung «Kessiturm» abzusterben, also mehr als 1 km oberhalb der Triebwasserfassungen. Das Volumen hinter den Hindernissen wird etwa nach 20–50 Jahren aufgefüllt sein, so dass ihre Wirkung nahezu verloren geht.

## 7.2 Stausee Livigno

Im Rahmen einer Studie wurden technische Lösungen gegen die Verlandung durch Trübestrome des Speichers Livigno an der schweizerischen-italienischen Grenze analysiert und vorgeschlagen. Dabei wurde das jährliche Hochwasser (Oktober 2000), das 1960 grösste beobachtete Hochwasser im Einzugsgebiet sowie das 100-jährige Hochwasserereignis ausgewählt und modelliert. Die Wirkung der vorgeschlagenen technischen Lösungen wurde vollständig für das Hochwasser 2000 ausgewertet. Es wurden zwei technische Lösungsansätze vorgeschlagen und deren Einfluss auf die Verlandung ausgewertet (Leite Ribeiro et al. 2005).

### Schüttdamm als künstliches Hindernis

Ein im Wurzelbereich des Stausees gele-

gener und normalerweise unter der Wasseroberfläche liegender Schüttdamm als künstliches Hindernis (Lage siehe Bild 6), welcher bei Hochwasser Trübestrome aufhält und somit Verlandung während einem gewissen Zeitraum im tiefer gelegenen Bereich des See zu verhindern vermag. Dieses Hindernis sollte auch verhindern, dass beim jährlichen, saisonbedingten Absenken des Seespiegels die durch kleinere Hochwasser oder Wellenschlag herbeigeführte Feststoffe in den weiter unten gelegenen Stauseebereich gelangen können. Die Lage des Hindernisses ergibt sich aus der Geometrie des Sees ca. 3 km unterhalb des Spöl-Zuflusses. Ab einem Stauspiegel von 1780 m ü.M. ist dieses Hindernis vollständig unter Wasser.

Wasser sollte kontrolliert durch den Damm durchsickern können, um ein aufgefangenes Hochwasser bei niedrigerem Speicher langsam abzulassen. Die Dammkrone sollte zudem vor Erosion während Überspülung mit Freispiegel geschützt werden, entweder auf der ganzen Breite oder in einem als Entlastung leicht tiefer gelegenen Bereich. Der Damm von 160 m Länge und 12 m Höhe weist eine Neigung von 2:5 (v:h) sowohl oberwasser- wie unterwasserseitig auf. Die Lage des Dammes ermöglicht zudem, abgelagerte Sedimente allenfalls bei tieferem Stau im Frühjahr mechanisch zu entfernen. Der gebildete Stauraum kann ein Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von ca. 5 bis 10 Jahren mit der entsprechenden Sedimentfracht von geschätzten 16 000 m<sup>3</sup> fast vollständig zurückhalten. Ein allfälliges Überströmen des Hindernisses kann keinen starken Trübestrom im tiefer gelegenen Bereich des Sees mehr auslösen. Es wird ein Rückhaltvolumen von ca. 425 000 m<sup>3</sup> gebildet, welches über etwa 50 Jahre Sedimente aufzufangen vermag. Ab diesem abgelagerten Volumen ist der Damm nicht mehr genügend hoch, um einen Trübestrom aufzuhalten. Danach muss somit mit stärkerer Verlandung im tiefer gelegenen Bereich des Sees gerechnet werden.

### Geomembrane als künstliches Hindernis

Als zweite Massnahme kommt eine tiefer im See gelegene Geomembrane in Betracht. Dieser über die gesamte Breite des Tals an dessen tiefsten Punkt gespannte Vorhang vermag die Trübestrome aufzuhalten und verhindert somit, dass sich die Sedimente in der Nähe der Staumauer und den Entlastungsorganen ablagern können (Oehy und Schleiss, 2003). Als vorgeschlagener Standort bietet sich eine Verengung ca. 2.5 km oberhalb der Punt dal



**Bild 3. Versuchsanlage für kreisförmig angeordnete Düsen zur Erzeugung einer Aufwärtsströmung. Links: Detail einer Düse. Rechts: Düsenanordnung vor der Fassung. Schemaskizze der mit dem Wasser der Beileitungen gespiesenen Wasserstrahlen in der Frontwand im Hintergrund (Jenzer et al. 2009).**



**Bild 4. Schemaskizze der von Beileitungen gespiesenen Wasserstrahlen (Jenzer et al. 2008)**



Gall Sperre an (Lage siehe Bild 6). Diese Massnahme kann mit dem Schüttdamm kombiniert werden.

### Reduktion der Ablagerungen dank Hindernis

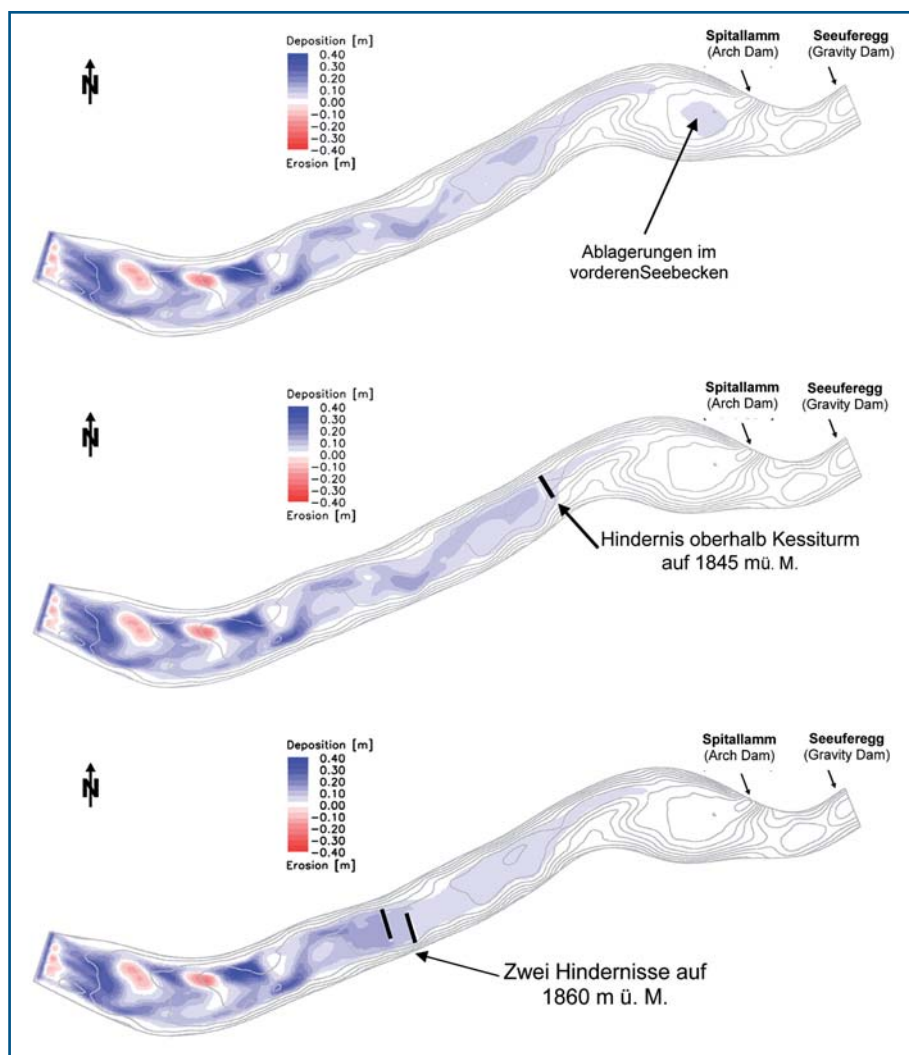
Für die Simulation eines Hindernisses in Form eines Schüttdammes im Speicher wurden drei Höhen (4, 8 und 12 m) untersucht. Als Grundlage für den Zufluss wurde das Hochwasser 2000 mit einer Zuflusskonzentration von 15 g/l verwendet. Tabelle 3 zeigt die Ablagerungen im Speicher Livigno oberhalb der vorgeschlagenen Stellen des Schüttdammes und des Geotextilvorhanges in Abhängigkeit der Höhe des Schüttdammes. Zum besseren Vergleich wurde auch die Variante ohne Hindernis sowie das Schüttvolumen des Dammes angegeben. Das Potenzial des Sedimentrückhaltes des Dammes ist ab einer Höhe von ca. 8 m klar ersichtlich. In diesem Fall nimmt der Prozentsatz der Ablagerungen vor dem Hindernis um 13% zu, für 12 m sogar um 24%. Die relative Zunahme der Ablagerungen vor Profil 2 ist wesentlich geringer, um 3% für 8 m und 5% für 12 m Höhe, dies weil wie schon erwähnt der Trübestrom auch im Falle ohne Hindernis nicht sehr viel weiter fließen kann.

Die schlussendlich vorgeschlagene Lösung mit einem 12 m hohen Schüttdamm befindet sich im Mittel während nahezu 5 Monaten von etwa Ende Januar bis ca. Mitte Juni über dem Wasserspiegel. In diesem Zeitraum dient das Hindernis ebenfalls zum Rückhalt von Sedimenten, in diesem Fall nicht durch Aufhalten von Trübestromen, sondern direkt als Absetzbecken.

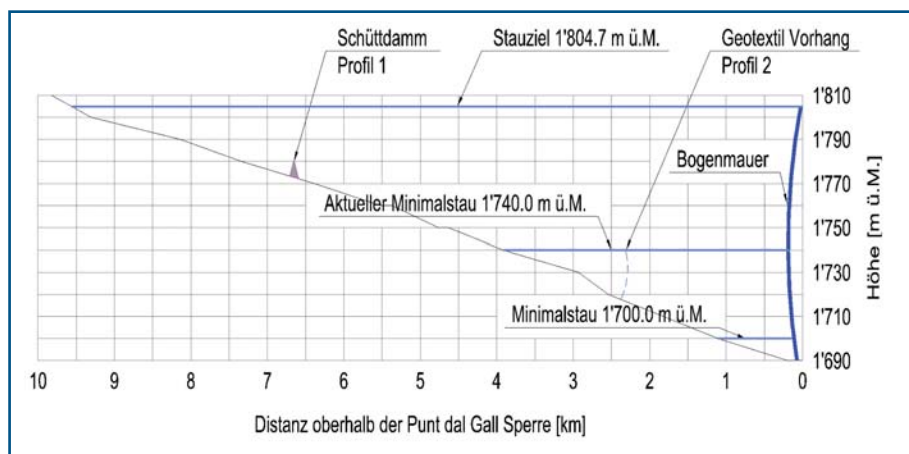
Im Normalfall lagern sich alle Feinsedimente bereits oberhalb des Geotextilvorhanges ab, so dass dieser mittelfristig noch nicht notwendig ist. Er könnte aber langfristig als zusätzliche Massnahme eingesetzt werden, falls der Schüttdamm im Stauwurzelsbereich seine Wirkung als Hindernis verloren hat.

## 7.2 Stausee Dez in Iran

Die Wasserkraftanlage Dez in der Provinz Khuzestan wurde 1964 mit einer installierten Leistung von 520 MW in Betrieb genommen. Die 203 m hohe Bogenstaumauer bildet einen Stausee von rund 60 km Länge mit einem Inhalt von  $3.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ . Der jährliche Sedimenteintrag wird auf 10 bis 20 Mio.  $\text{m}^3$  pro Jahr geschätzt. Davon werden jährlich mehr als 2 Mio.  $\text{m}^3$  durch Trübestrome bis zur Staumauer transportiert. Das durch die größeren Sedimente



**Bild 5. Ablagerungen und Erosionen eines im Grimselfstausee simulierten Trübestroms während dem Hochwasser vom Oktober 2000 (Abflussspitze  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ , angenommene Sedimentkonzentration  $15 \text{ g/l}$ ). Oben: ohne Massnahmen, Mitte: Hindernis oberhalb Kessiturm auf  $1845 \text{ m ü. M.}$  (Variante 1), Unten: Zwei Hindernisse  $1860 \text{ m ü. M.}$  (Variante 2).**



**Bild 6. Lage der vorgeschlagenen technischen Lösungen im Stausee Livigno: Schüttdamm und Geotextilvorhang als Hindernis gegen Trübestrome.**

gebildete Delta ist bereits über 30 km im engen Stausee vorgerückt. Die regelmässig durch die Trübestrome transportierten Feinsedimente haben vor der Staumauer eine Höhe erreicht, welche sich nur noch 10 m unter der Einlaufkote der Triebwas-

serfassungen (Kapazität  $516 \text{ m}^3/\text{s}$ ) befindet. Die drei Bewässerungsauslässe (Kegelstrahlschieber von total  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  Kapazität) sind bereits mit nahezu 40 m Feinsedimenten überdeckt und können nicht mehr sicher betrieben werden. Ins-

gesamt sind 600 Mio. m<sup>3</sup> des Stauraumes verloren gegangen, wobei 130 Mio. m<sup>3</sup> den Trübeströmen zugeschrieben wird. Diese lassen die Sedimente im Bereich der Staumauer und der Triebwasserfassungen um jährlich 1.5 m anwachsen, so dass der Einlauf der Triebwasserfassungen in weniger als 10 Jahren erreicht sein wird. Die Feldmessungen der Trübeströme ergab, dass diese etwa eine Höhe von 20 m aufweisen und mit einer Geschwindigkeit von 0.8 cm/s gegen die Staumauer vorrücken. Dadurch ergibt sich eine typische Trübestromabflussmenge von 1600 m<sup>3</sup>/s.

Um die nachhaltige Bewirtschaftung des Stauraumes und der Wasserkraftanlage zu gewährleisten, kommt der Beherrschung der Trübeströme die grösste Bedeutung zu. Verschiedene Varianten wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie untersucht (Pöyry, 2008). Dabei hat sich gezeigt, dass die Wasserkraftanlage zukünftig nur nachhaltig betrieben werden kann, falls es gelingt, die Trübeströme während Hochwasser mit einer leistungsfähigen Durchlassöffnung weiter zu leiten, was als «venting» bezeichnet wird. Das erfolgreiche «venting» der Trübeströme erfordert eine Abflusskapazität aller Ableitorgane, welche der Abflussmenge des Trübestromes, also 1600 m<sup>3</sup>/s entspricht. Je nach Dauer der jährlichen Hochwasser entstehen die Trübeströme während einigen Tagen bis maximal zwei Wochen. Jährliche Tageshochwasser erreichen Spitzen bis etwa 2000 m<sup>3</sup>/s. Sobald der Trübestrom resp. die Unterwasserlawine die Staumauer erreicht hat, müssen die

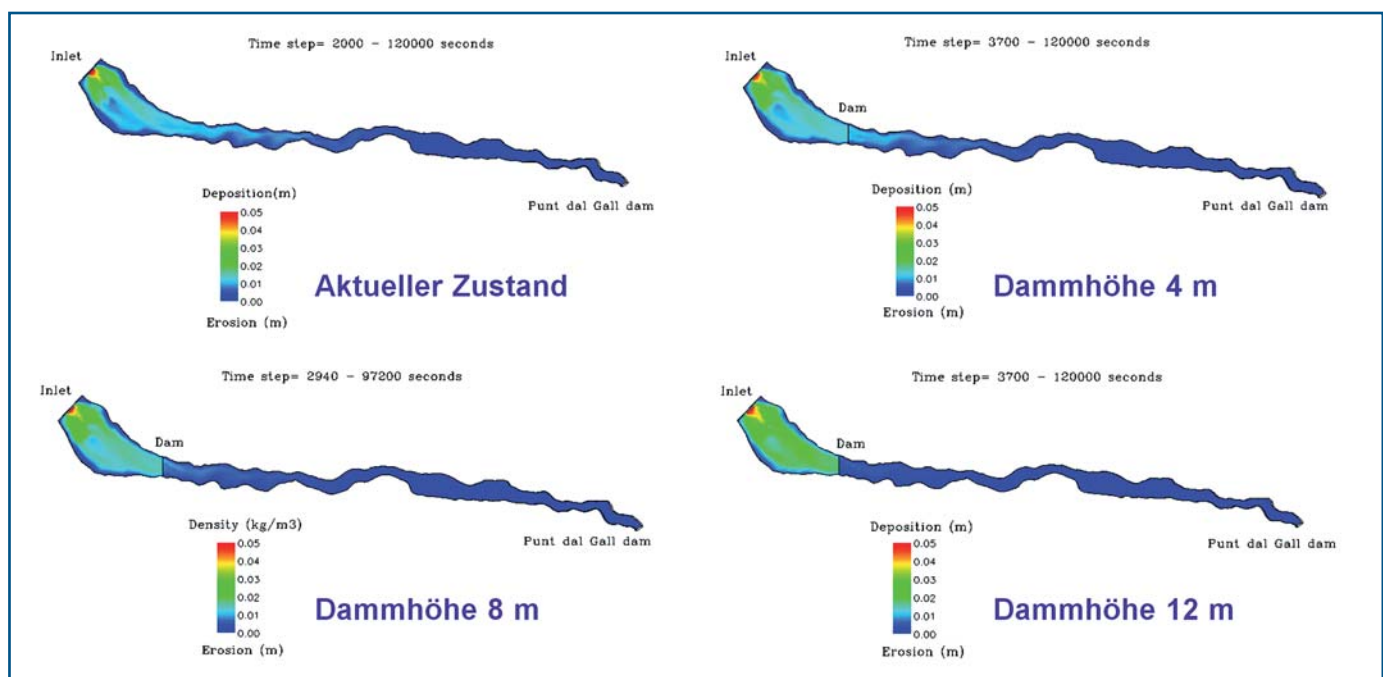
Durchlassöffnungen mit etwa 1600 m<sup>3</sup>/s geöffnet werden, bis der Trübestrom gegen Ende des Hochwassers beim Delta wieder abstirbt. Zusätzlich zur speziellen Durchlassöffnung, welche sich etwas unterhalb der Einlaufkote der Triebwasserfassung befinden soll, kann auch letztere für die Durchleitung der Trübeströme verwendet werden. Die erforderliche Kapazität der Durchlassöffnung reduziert sich entsprechend.

Für die Staumauer Dez wird zurzeit eine Erweiterung des Kraftwerkes durch eine zweite Zentrale mit rund 500 MW geplant. Dabei muss eine neue Triebwasserfassung (ca. 500 m<sup>3</sup>/s) geplant werden, welche oberhalb der bestehenden liegt. Ein untersuchtes, erfolgreiches Konzept besteht nun darin, die bestehende Wasserfassung zukünftig als Durchlassöffnung für die Trübeströme zu verwenden und neben der neuen Triebwasserfassung für die zweite neue Zentrale gleichzeitig eine erhöhte Triebwasserfassung für die bestehende Zentrale zu bauen. Dadurch könnte mit dem Betrieb der beiden Zentralen mit insgesamt 800 bis 1000 m<sup>3</sup>/s während Hochwasser die erforderliche Kapazität der Durchlassöffnung für das «venting» der Trübeströme auf 600 bis 800 m<sup>3</sup>/s beschränkt werden.

Menschenhand geschaffenen Speicher ist heute bereits in der gleichen Grössenordnung wie der Zuwachs an Speicherkapazität durch den Neubau von Talsperren. Die Auswirkungen der Klimaänderungen werden die Verlandungsproblematik deutlich verschärfen. In diesem Jahrhundert wird es also eine Hauptaufgabe der Planer und Betreiber von Speichern sein, mit effizienten Massnahmen diesem schleichenden Prozess entgegenzuwirken. Die Ersatzinvestition der weltweit jährlich verloren gegangenen Speicherkapazität von 0.8% kostet im Mittel etwa 13 bis 19 Billionen \$/Jahr. Dies entspricht etwa einem Drittel der Aufwendungen für den Betrieb und Unterhalt der bestehenden Stauanlagen. Obwohl der eigentliche Speicherverlust bei den alpinen Stauseen noch relativ gering ist, bewirken die in lang gezogenen und engen Speichern auftretenden Trübeströme jährliche Zuwachsraten der Sedimentablagerungen von 0.5 m bis 1.0 m unmittelbar bei der Talsperre. Deshalb können bereits nach 40 bis 50 Jahren Betrieb die Auslassorgane wie Triebwasserfassungen und Grundablässe beeinträchtigt werden. Dadurch können sich Betriebseinschränkungen sowie Sicherheitsprobleme ergeben. 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 erfolgversprechende Massnahmen, welche die Trübeströme in genügendem Abstand oberhalb der Talsperre stoppen oder bei der Talsperre verwirbeln sowie durchleiten können. Die Verwirbe-

## 8. Schlussfolgerungen

Die Verlandung beeinflusst die Nachhaltigkeit von Stauseen und insbesondere die Spitzenenergieproduktion der Wasserkraft in entscheidendem Masse. Die weltweite mittlere Verlandungsrate der von

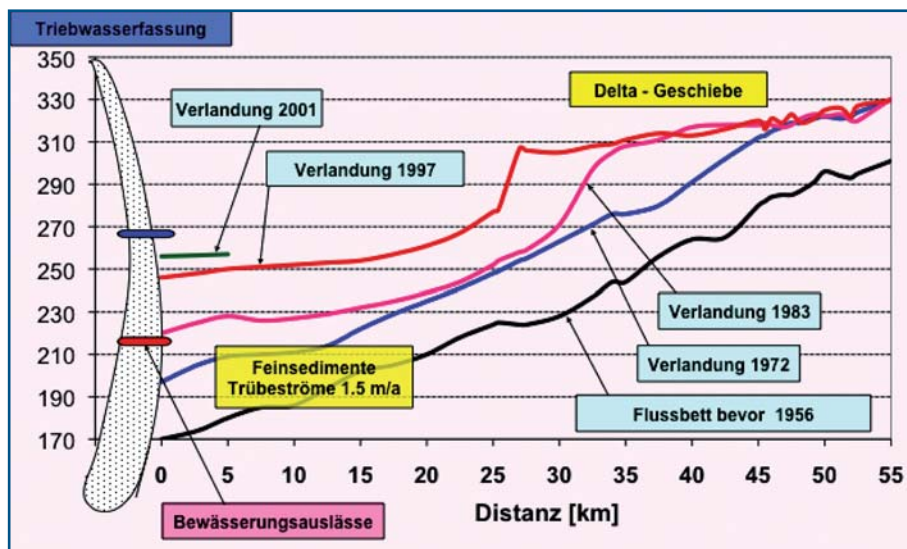


**Bild 7. Ablagerungen am Seegrund für das Hochwasser 2000 mit einer Zuflussschwebstoffkonzentration von 15 g/l in Abhängigkeit der Schüttdammhöhe als Hindernis gegen Trübeströme.**



Höhe des Schüttdammes	Ablagerungen oberhalb Profil 1 Schüttdamm	Ablagerungen oberhalb Profil 2 Geotextilvorhang	Volumen des Schüttdammes [m <sup>3</sup> ]
0 m	63%	94%	0
4 m	69% (+ 6%)	95% (+ 1%)	1'700
8 m	76% (+ 13%)	97% (+ 3%)	12'300
12 m	87% (+ 24%)	99% (+ 5%)	34'600

**Tabelle 3. Ablagerungen im Speicher Livigno durch Trübeströme für das Hochwasser 2000 mit einer Zuflusskonzentration von 15 g/l oberhalb der vorgeschlagenen Stellen des Schüttdammes und des Geotextilvorhanges für verschiedene Höhen des Schüttdammes mit Volumenangabe.**



**Bild 8. Entwicklung der Verlandung im Stausee Dez seit Inbetriebnahme im Jahre 1963 (Pöry, 2008).**

lung der Feinsedimente mit Düsenstrahlen, welche beispielsweise durch die Verwendung der Energie von Beileitungen erzeugt werden kann, ist sehr erfolgversprechend. Im Rahmen eines Forschungsprojektes werden zurzeit die Wirkung und die optimale Anordnung von Düsenmischern systematisch mit Modellversuchen unter-

sucht und anschliessend mit numerischen Simulationen auf reelle Stauseegeometrien übertragen.

Die vorgestellten Studienbeispiele zeigen deutlich, dass die Grundlagen zur Dimensionierung von Massnahmen zur Beherrschung der Trübestrome in Stauseen vorhanden sind und deren Wirkung

gewährleistet werden kann. Wichtig ist, dass die Massnahmen von den Betreibern der Stauanlagen rechtzeitig geplant und umgesetzt werden. Da die verfügbaren Stauseevolumen für die Spitzenenergieproduktion und die Versorgungssicherheit unabdingbar sind, gefährdet die Verlandung die nachhaltige Bereitstellung dieser wertvollen regulierbaren Energie. Leider besteht immer noch die Tendenz, eher Massnahmen zu ergreifen, welche kurzfristig die Symptome der Verlandung beheben, aber langfristig nicht nachhaltig sind.

#### Verdankung

Das Forschungsprojekt «Massnahmen gegen die Verlandung von Stauseen» wird von swiss-electric research unterstützt.

#### Literaturverzeichnis

- Basson, G. R. (2009): Management of siltation in existing and new reservoirs. General Report Q. 89, Proceedings (on CD) of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams ICGI-COLD, 25–29 May 2009, Brasilia, Volume II.
- Beyer Portner, N. (1998): Erosion de bassins versant alpins suisses par ruissellement de surface. Communications du laboratoire de constructions hydrauliques, LCH No 8, Ed. A. Schleiss.
- Beyer Portner, N.; Schleiss, A. (2000): Boden-erosion in alpinen Einzugsgebieten in der Schweiz. Wasserwirtschaft 90, p. 88–92.
- De Cesare, G.; Schleiss, A.; Hermann, F. (2001): Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. Journal of Hydraulic Engineering 127(1), p. 6–16.
- De Cesare, G.; Lafitte, R. (2007): Outline of the historical development regarding reservoir sedi-

#### Summary: Reservoir sedimentation endangers the sustainable use of hydropower

Even if the reasons and the involved processes of reservoir sedimentation are well known since a long time, sustainable and preventive measures are rarely taken into consideration in the design of new reservoirs. In order to avoid operation problems of powerhouses, sedimentation is often treated for existing reservoirs with measures, which are efficient during limited time only. Since most of the measures will lose their effect, the sustainable operation of reservoirs and the production of valuable peak energy are endangered. Today's worldwide yearly 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. In Asia for example 80% of the useful storage capacity for hydropower production will be lost in 2035.

In Alpine regions the loss rate in reservoir capacity is significantly below world average. The main process in narrow reservoirs is the formation of turbidity currents, which transport the fine sediments regularly near the dam, where they can increase sediment levels up to 1 m per year. The outlet devices such as intakes and bottom outlets are therefore in many reservoirs after 40 to 50 years of operation already affected. The effects of climate change will in future increase the sediment yield entering the reservoirs. Turbidity currents may be stopped and forced to settle down by obstacles situated in the upper part of the reservoir in order to keep the outlet structures free of sediments. They can also be whirled up near the dam and intakes and kept all the time in suspension, which allows a continuous evacuation through the turbines. In certain cases fully venting of turbidity currents is possible.

The present contribution discusses the sedimentation problem in view of sustainable use of hydropower. The particularities of fine sediments in alpine reservoirs are highlighted. The possible measures to manage turbidity currents are presented and illustrated in case studies.

mentation. 32nd IAHR Congress, Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics, Venice, Italy, 1–6 July 2007, CD-Rom.

DWA (2006): Entlandung von Stauräumen. Bericht der DWA-Arbeitsgruppe WW-2.5, DWA Themenband, Hennef, ISBN-13:978-3-3937758-33-6.

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

Jenzer Althaus, J.; De Cesare, G. (2006): Reservoir sedimentation. Interreg III Alpreserv Project «Sustainable Sediment Development in Alpine Reservoirs considering ecological and economical aspects, Volume 3/2006, ISSN 1862–9636.

Jenzer Althaus, J.; De Cesare, G.; Schleiss, A. (2008): Abführung von Feinsedimenten über Treibwassersysteme als nachhaltige Massnahme gegen Stauraumverlandung. Proc. Int. Symposium, Neue Anforderungen an den Wasserbau, ETH Zürich 11.–12. September 2008, Mitteilungen 207 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, (VAW), pp. 349–360

Jenzer Althaus, J.; De Cesare, G.; Schleiss, A. J. (2009): Experiments on flow pattern and suspen-

ded sediment concentration in water jet induced cyclonic circulation in a cuboidal basin. Proceedings of the 33rd Congress of IAHR, ISBN: 978-94-90365-01-1, Vancouver, Canada, 9.–14. August 2009, CD-Rom, pp.3527–3534.

Jenzer Althaus, J. M. I.; De Cesare, G.; Boillat, J.-L.; Schleiss, A. J. (2009): Turbidity currents at the origin of reservoir sedimentation, case studies. Proceedings (on CD) of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGBICOLD, 25–29 May 2009, Brasilia, Volume II, Q.89–R.24.

Leite Ribeiro, M.; De Cesare, G.; Schleiss, A., J.; Kirchen, G.F. (2005): Sedimentation management in the Livigno reservoir. *International Journal on Hydropower & Dams*, Volume 12, Issue 6, pp. 84–88.

Oehy, Ch.; Schleiss, A. (2003): Beherrschung von Trübeströmen in Stauseen mit Hindernissen, Gitter, Wasserstrahl- und Luftblasenschleier, *Wasser Energie Luft* – eau, énergie, air, 95. Jahrgang, Heft 5/6, pp. 143–152, 2003.

Oehy, Ch.; Schleiss, A. (2002): Einfluss von Hindernissen auf das Fließverhalten von Trübeströmen am Beispiel des Grimselsees. Proceedings Int. Symposium 7.–9. Oktober 2002: Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, VAW, ETH, Zürich, pp. 51–60.

Palmieri, A.; Shah, F.; Dinar, A. (2001). Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of Environmental Management*, Vol. 61, No 2.

Pöyry (2008): Dez Dam-New Flushing Tunnels Project – Feasibility Study (unveröffentlichter Bericht).

Schleiss, A.; Oehy, Ch. (2002): Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. *Wasser Energie Luft – eau énergie air*, 94. Jahrgang, Heft 7/8, pp. 227–234, 2002.

Anschrift der Verfasser:

Anton Schleiss, Prof. Dr. Dipl. Bauing. ETH, Direktor; Dr. Giovanni De Cesare, wissenschaftlicher Adjunkt; Jolanda Jenzer Althaus, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), EPFL, Station 18, CH-1015 Lausanne, anton.schleiss@epfl.ch

giovanni.decesare@epfl.ch

jolanda.jenzer@epfl.ch

<http://lchwww.epfl.ch/>