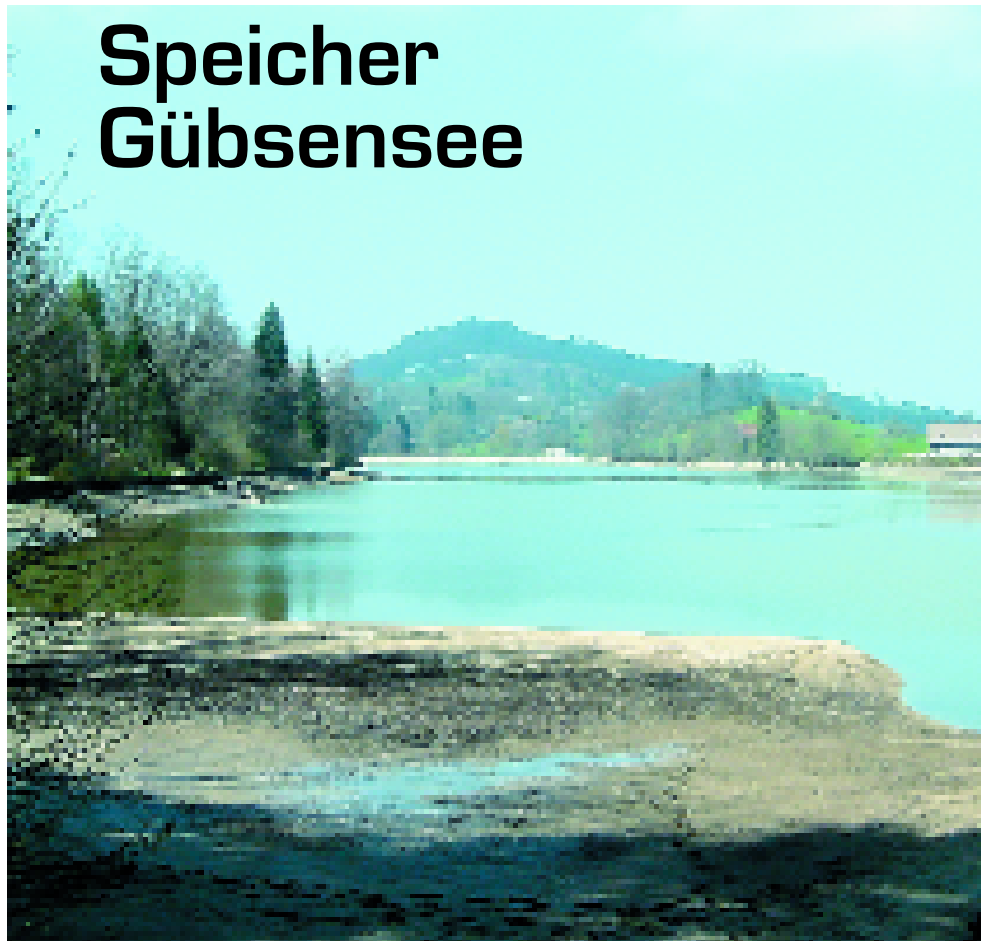


Am Beispiel eines kleinen hundertjährigen Speichers wird aufgezeigt, wie ein nachhaltiges Sedimentmanagement umgesetzt werden kann. Durch Leitinseln werden Schwebstoffe von den Zuläufen so direkt als möglich zur Triebwasserfassung und somit via Turbinen ins Unterwasser geleitet. Aufgrund dieser auch ökologisch interessanten Massnahme wird ein Absetzen der Feststoffe verhindert.

*Giovanni De Cesare, Anton Schleiss
und Reto Zuglian*



Speicher Gübsensee

Die Notwendigkeit nachhaltigen Sedimentmanagements wurde lange Zeit vernachlässigt. Die Kenntnisse der massgebenden Erosions-, Transport- und Ablagerungsprozesse, welche zu Speicherverlandung führen, sind in den Grundzügen seit langem bekannt. Jedoch wurde der Verlandung in der letzten Zeit durch Sichtbarwerden und durch deren Einfluss auf den normalen Betrieb vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt (Sinniger und De Cesare, 1997). Gemäss aktuellen Studien zur Verlandung von Speichern weltweit (Palmiere et al. 2001 und Schleiss und Oehy 2002) muss mit einem Verlust von mehr als 50% des Speichervolumens in den nächsten Jahrzehnten gerechnet werden. Um dem vorzukommen, sollten bei bestehenden wie auch bei neuen Anlagen konsequent der Thematik gerechte Massnahmen ergriffen werden, um diese einheimische, saubere Energiequelle für weitere Generationen zu erhalten. Massnahmen sind in allen Bereichen möglich, vom Ero-

sionsschutz im Einzugsgebiet über Längsprofilstabilisierung der Zuflüsse bis hin zum Durchleiten der Sedimente durch den Speicher direkt ins Unterwasser, falls diese gehäuft auftreten und der Vorfluter diese ohne Umweltschädigung weitertransportieren kann. Die vorliegende Studie zielt auf die Reduktion der Verlandung des Speichers Gübsensee der St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerke AG (SAK). Die Grundelemente der Anlage und die Lage der Zuleitungen und der Wasserfassung im Bereich des Gübsensees sind in Bild 1 und Bild 2 ersichtlich. Das Grundkonzept dieser Anlage mit Wasserfassungen und Entsander, Umleitung in einen parallelen Speicher und nach Ausnützen des Gefälles im Maschinenhaus Rückgabe an den Fluss, ist in Bezug auf den Sedimenthaushalt optimal, da die Feststoffe mehrheitlich in den Zuflüssen verbleiben. Trotzdem hat der Stausee in den letzten 90 Jahren 25% seines ursprünglichen Nutzvolumens von 1,47 Mio. m³ verloren. Dieser



Verlust beträgt etwa 50% im Ostteil des Sees, wo sich die Triebwasserfassung und die beiden Zuläufe befinden.

Beschreibung der Anlage

Der Speicher Gübsensee wurde zwischen 1898 und 1900 erstellt. Die natürliche Vertiefung im «Gübsenmoos» wurde durch Aufschüttung zweier Erddämme sowie einer Gewichtsmauer zu einem Tagesspeicher ausgebaut. Der Normalstau wurde bei 682,30 m ü. M. festgelegt. Der Gübsensee wird als Tagesspeicher betrieben, der Seespiegel variiert um maximal 1,58 m pro Tag zwischen 680,70 m ü. M. und 682,28 m ü. M.

Der See wird durch zwei Zulaufstollen gespiesen, welche Wasser aus den Flüssen Sitter und Urnäsch durch einen ca. 6,5 km, respektive 4,6 km langen Stollen herbeileiten (Bild 1). Die Zuflussmengen sind in etwa gleich gross und betragen 0,5 bis 4,6 m³/s bei der Sitter, resp. bis 4,7 m³/s



Bild 1: Übersichtskarte des Speichers Gübsensee mit den Hauptelementen der Kraftwerksanlage (Speicher, Triebwasserfassung, Zuläufe und Kraftwerk).



Bild 2: Modell mit den Hauptelementen des Speichers Gübsensee.

bei der Urnäsch und werden hauptsächlich durch Niederschlag und Schneeschmelze bestimmt. Bei den Einläufen der beiden Stollen sind jeweils Ent-sander angeordnet, welche die groben Sedimente aussondern. Es werden somit keine Partikel grö-ser als ca. 0,5 mm dem Speicher zugeführt, das Feinmaterial gelangt hingegen in Suspension durch die Zuleitstollen in den Speicher, wo es sich abzusetzen vermag.

Das 1976 erneuerte Kraftwerk Kubel hat 3 Turbi-nen, je zwei mit einer nutzbaren Durchflusskapazi-tät von 4,0 bis 8,0 m³/s und der Dritten, welche zwischen 0,5 und 2,0 m³/s Wasser zu verarbeiten vermag. Die durchschnittliche Jahresproduktion beträgt 33 GWh mit einer installierten Kapazität von 15 MW, einem maximalen Abfluss von 18 m³/s und einer mittleren Fallhöhe von 70 m. Seegrund-aufnahmen von 1976 und 1997 zeigen einen Vo-lumenverlust von bis zu 50%, verglichen mit dem Ausgangszustand mit grösseren Auflandungen im Bereich der beiden Zulaufstollen (Bild 3). Diese wurden jeweils lokal ausgebaggert, in den Westteil transferiert und dort wieder eingebracht. Über den ganzen See verteilt erreicht der Verlust an Spei-cherkapazität um die 25%.

Ziele

Das Ziel der Studie war es, das Geschwindigkeits-feld und deren Einfluss auf den Sedimenttransport für unterschiedliche Betriebszustände zu untersu-chen und den Einfluss von geeigneten betriebli-chen und technischen Massnahmen auszuwerten. Zu diesem Zweck wurde ein numerisches 3-D-Modell erstellt und mit dem Flow-3-D-Rechen-programm die Fliessbedingungen im See ermittelt. (Flow Science 2004). Das Programm erlaubt, die Transportgleichungen in komplexer dreidimensio-naler Geometrie mit der Methode der finiten Volu-men zu lösen. Der Ansatz zur Bestimmung der turbulenten Strömungsanteile basiert auf dem k-e-Turbulenzmodell. Massnahmen wie Unter-wasserleitwände und Umlenkmauern erlauben es, Sedimentablagerungen im Speicher zu verringern und Feststoffe in Richtung Triebwasserfassung zu führen. Es gilt dabei, für die jeweils massgebende Korngrösse der Feststoffe die kritische Fliessge-schwindigkeit zwischen Transport und Ablagerung im Speicher nicht zu unterschreiten.

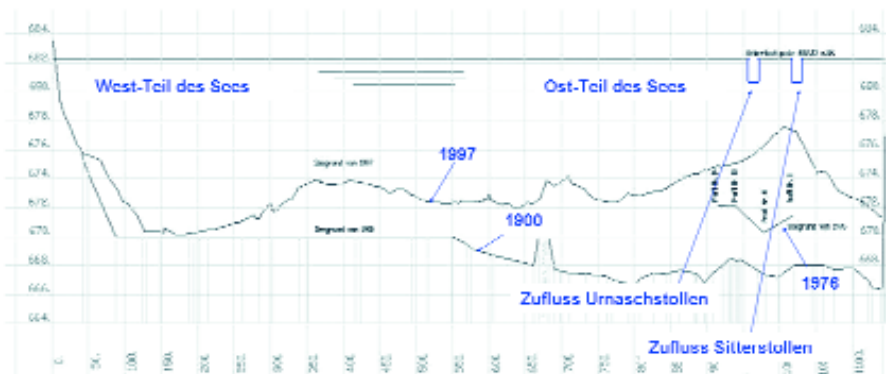


Bild 3: Längenprofil des Günsensees von 1997 und Teilprofil von 1976, verglichen mit dem Ausgangszustand 1900 und schematische Darstellung der Lage beider Zuläufe.

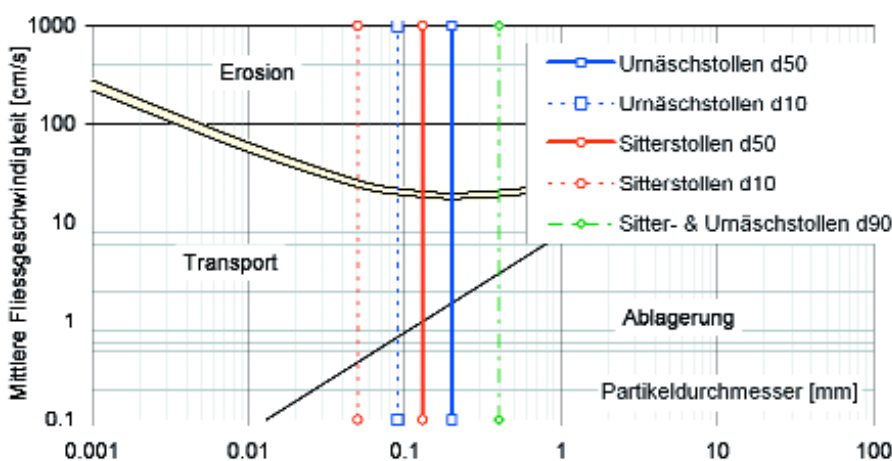


Bild 4: Ermittlung der kritischen Fließgeschwindigkeiten gemäss Hjulström (1935) für die zugeführten Feststoffe.

Grundlagen

Ein numerisches Geländemodell des Seegrundes wurde aufgrund der Seegrundvermessung von 1997 erstellt. In die Seetopographie und Dämme wurden die Zulaufstollen und die Triebwasserfassung eingebaut. Das Modell wurde in kubische Zellen mit 2 m Seitenlänge unterteilt, wobei lokal bei den Zuläufen und der Triebwasserfassung kleinere Zellen von jeweils 1 m Seitenlänge angewendet wurden. Es ergeben sich total 299 520 Zellen. Aufgrund erster Rechnungen im Gesamtspeicher, wo keine nennenswerten Zirkulationen im Westteil stattfinden, konnte der See auf den für den Betrieb und die Sedimentation massgebenden Ostteil reduziert werden, das Wasser kann jedoch frei an dieser Modellgrenze zirkulieren.

Der See wird durch zwei Zulaufstollen gespeist, welche im Modell jeweils denselben Zufluss haben. Der Ausfluss durch die Triebwasserfassung wird auf der gegenüberliegenden Seite eingegeben. Folgende drei Kombinationen wurden im Ist-Zustand und mit den vorgeschlagenen Massnahmen gerechnet:

1. Gleichgewichtszustand, Kontinuität zwischen Zufluss und Ausfluss (Turbinierwassermenge), jeweils $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$, bei Minimal-, mittlerem und Maximalstau.
2. Füllszenario, Zufluss ($9,3 \text{ m}^3/\text{s}$) bei minimaler Turbinierwassermenge von $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ bei niedrigstem Wasserspiegel ($680,70 \text{ m ü. M.}$). Hier ergeben sich die grössten Geschwindigkeiten im Bereich der Zuläufe, wobei die Sedimente am weitesten transportiert werden, jedoch nicht in Richtung Triebwasserfassung, sondern gegen den Westteil des Sees.
3. Leerungsszenario mit maximaler Turbinierwassermenge ($18,0 \text{ m}^3/\text{s}$), Ausfluss grösser als Zufluss ($8,0 \text{ m}^3/\text{s}$) bei maximalem Wasserspiegel ($682,28 \text{ m ü. M.}$). Hier ergeben sich die kleinsten

Geschwindigkeiten im Bereich der Zuläufe, die Sedimente werden somit kaum weitergeleitet.

Es wurden sowohl beim Einlauf in die Stollen als auch beim Zulauf in den See Sedimentproben entnommen und im Labor auf die Korngrössenverteilung untersucht. Einzelne Partikel, welche bis zum See gelangen, haben einen maximalen Durchmesser von ca. 2 mm, 90% aller Sedimente sind kleiner als ca. 0,4 mm.

Lösungsansätze

Wie schon erwähnt, zielen die Massnahmen darauf ab, die Sedimente gar nicht erst im See ablagern zu lassen, sondern weiterzuleiten. Da die rein betriebliche Variante mit Seespiegelabsenkung auf

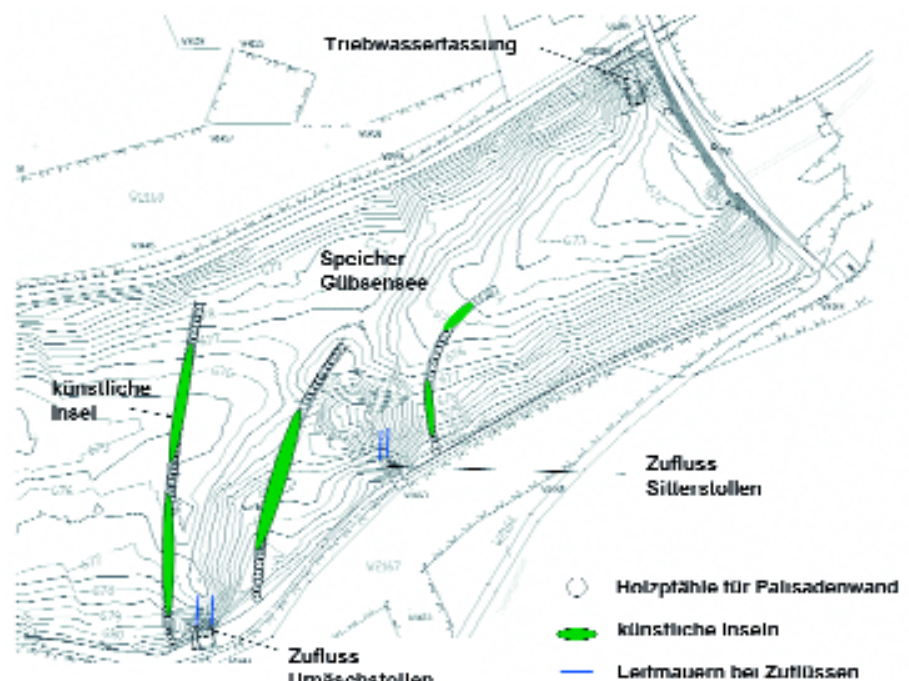


Bild 5: Details der vorgeschlagenen Massnahme mit den geometrischen Elementen (künstliche Inseln, versenkte Holzpalisadenwände, Umlenkkräfte bei den beiden Zulaufbauwerken).



Bild 6: Modell des Speichers mit den vorgeschlagenen Unterwasserleitwänden und den fünf künstlichen Inseln, sichtbar gemacht dank abgesenktem Seespiegel ein Meter unter der Oberkante der Holzpalisadenwände.

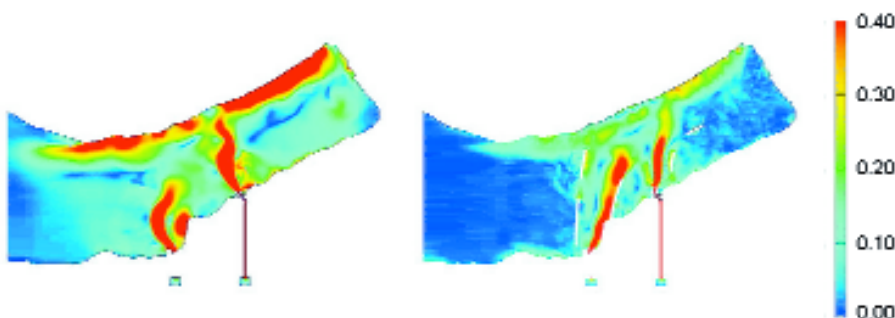


Bild 7: Fließgeschwindigkeiten im heutigen Zustand (links) und mit den vorgeschlagenen Massnahmen (rechts). Geschwindigkeitsskala von 0,00 bis 0,40 m/s, minimaler Wasserspiegel 680,70 m ü. M., Zufluss = Ausfluss = 8,0 m³/s.

den Minimalstau (680,70 m ü. M.) und kontinuierlichem maximalen Turbinenbetrieb von 18,0 m³/s die Effizienz nicht genügend zu steigern vermag (und auch keine weitreichende Spülwirkung ergibt), wurde die Idee mit Umlenkung der Zulaufströmung in Richtung Triebwasserfassung und Leitwänden hier weiterverfolgt und numerisch simuliert (Awad 2005 und Awad et al. 2005).

Bestimmung der kritischen Fließgeschwindigkeiten

Da der Transport der eingebrachten Sedimente in den Speicher an die Strömung des Wassers gebunden ist, musste eine Beziehung zwischen der Fließgeschwindigkeit und dem Verhalten der Sedimente (Absetzung, Transport und Erosion) in Funktion der massgebenden Korngrößen angewendet werden. Es wurde der Ansatz von Hjulström (1935) verwendet. Dieser ergibt für die massgebenden Korngrößen eine kritische mittlere Fließgeschwindigkeit von ca. 3 cm/s, welche ein Absetzen von mehr als 90% der Feinpartikel verhindern sollte. Die Lösungsansätze wurden auf eine minimale Geschwindigkeit von 4 cm/s ausgelegt, welche den Transit der Sedimente zwischen den Zuläufen und der Triebwasserfassung ins Unterwasser erlaubt.

Lenkung der Zuläufe in Richtung Triebwasserfassung

Das numerische Modell im Ist-Zustand wurde mit folgenden neuen Elementen erweitert (siehe Bild 5):

- Jeweils zwei Umlenkmauern, vom Seegrund bis zur Wasseroberfläche reichend, welche direkt an die beiden Stollenausgänge angebaut werden und etwa 6 m weit in den See reichen.
- Drei Unterwasserleitwände (106 m, 65 m und 61 m lang), welche in regelmässigen Abständen

	Abflusskontinuität	Füllszenario	Leerungsszenario
Ist-Zustand	23%	19%	27%
Mit Massnahmen	35% (+52%)	32% (+68%)	34% (+26%)

Tabelle 1: Auswertung der Menge an durchgeleitetem Tracer (resp. Feinsedimenten) für die verschiedenen Betriebsszenarien im Ist-Zustand und mit den vorgeschlagenen Massnahmen.

bis über die Wasseroberfläche gebaut, lokal verbreitert und aufgefüllt werden, um kleine geschützte Vogelinseln zu gestalten.

Die Unterwasserleitwände (ohne verbreiterte Vogelinseln) wurden im numerischen Modell mittels aneinander gereihter Zylinder ausgeführt (Bilder 5 und 6). Die Oberkante der Leitwände befindet sich zwei Meter unterhalb des Minimalstaus, diese sind mit Ausnahme der Inseln somit nicht sichtbar.

Validierung durch numerische Simulation

Die Fliessgeschwindigkeiten im heutigen Zustand, verglichen mit den vorgeschlagenen Massnahmen, sind in Bild 7 für gleiche Zufluss- wie Turbinierwassermenge bei Minimalstau ersichtlich. Im Ist-Zustand weist das Geschwindigkeitsfeld im Prinzip genügend hohe Geschwindigkeiten (> 4 cm/s) auf. Hingegen hat es eine schlechte Orientierung mit einer klaren Tendenz hin zum Westteil des Sees. Die hohen Geschwindigkeiten im Bereich der seichten, den Zuläufen gegenüberliegenden Ufer sind bedingt durch Randeffecte des numerischen Modells. Die Lenkungswirkung der vorgeschlagenen Massnahmen ist gut ersichtlich und die Abdrift in den Westteil des Sees kann beinahe vollständig unterbunden werden.

Zur Visualisierung der bevorzugten Fliesswege wurden analog zu Feldversuchen numerische Tracerversuche durchgeführt. Diese erlauben es, das Fliessverhalten von Schwebstoffen im Speicher qualitativ darzustellen und die Effizienz der Massnahme zu prüfen. Die Auswertung über denselben

Referenzzeitraum der Menge an durchgeleitetem Tracer lässt eine Verbesserung des Schwebstofftransits für alle Betriebszustände erkennen. Tabelle 1 fasst die Menge an Tracer (resp. Feinsedimenten), welche in die Triebwasserfassung gelangt, in Prozent des Zuflusses zusammen.

Wie zu erwarten, gelangen während des Füllens des Speichers am wenigsten Sedimente in die Wasserfassung, doch genau hier kann dieser Anteil von 19 auf 32% gesteigert werden.

Im heutigen Zustand (Bild 8) ist klar ersichtlich, dass ein Grossteil der Feststoffe nicht bis zur Wasserfassung gelangt, sondern sich gegen Westen hin entfernt und dort abgelagert. Bild 8 auf der rechten Seite zeigt ein besser konzentriertes Bild der Schwebstoffe, welche in grösserem Umfang zur Triebwasserfassung geleitet werden.

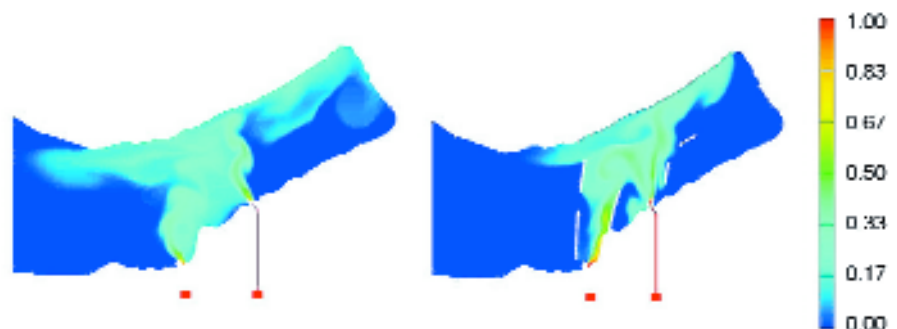


Bild 8: Zur Charakterisierung bevorzugter Fliesswege angewandte numerische Tracerversuche, welche das Fliessverhalten von Schwebstoffen im Speicher qualitativ darstellen, im heutigen Zustand (links) und mit den vorgeschlagenen Massnahmen (rechts). Tracerindikatorskala von 0,00 bis 1,00 (0 bis 100%), minimaler Wasserspiegel 680,70 m ü. M., Zufluss = Ausfluss = 8,0 m³/s.



Der abgesenkte Seespiegel.

Schlussfolgerungen

Die Beeinträchtigung des Betriebes sowie der Volumenverlust durch Sedimentablagerungen gehören zu den Hauptproblemen in Wasserkraftwerken mit Speichern. Beim Tagesspeicher Gübsensee im Kanton St. Gallen gingen in rund 90 Jahren Betrieb im wichtigen Ostteil des Sees 50% des Volumens verloren. Die vorliegende Studie präsentiert technische Massnahmen, um Sedimentablagerungen im Speicher Gübsensee zu reduzieren und den Speicher nachhaltig zu bewirtschaften. Durch geeignete Massnahmen wie Unterwasserleitwände

und Umlenkmauern werden Schwebstoffe so direkt wie möglich durch die Triebwasserfassung und die Turbinen ins Unterwasser abgeleitet und können sich gar nicht erst im See ablagern. Dank den vorgeschlagenen Massnahmen konnte eine stark verbesserte Durchleitung von Schwebstoffen und somit weniger Sedimentablagerungen im Speicher für alle Betriebszustände erreicht werden. Ausserdem bietet der Bau von kleinen Vogelinseln, welche teilweise aus den Unterwasserpalisadenwänden herauswachsen, für Zugvögel und Amphi-

bien Brut- und Zufluchtsstätten. Die spezifischen ökologischen Verhältnisse und das Fehlen direkter menschlicher Störungen solcher isolierter Plätze sind ideal. Diese ökologische Massnahme ist überdies gut in das bereits sehr attraktive Naherholungsgebiet der Stadt St. Gallen integrierbar. Es ergibt sich somit eine Synergiesituation, von welcher alle Beteiligten profitieren.

*Dr. Giovanni De Cesare, dipl. Bau-Ing. EPF, Prof.
Dr. Anton Schleiss, dipl. Bau-Ing. ETH, Laboratoire
de constructions hydrauliques (LCH), Ecole
Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
und Reto Zuglian, Leiter der Kraftwerke,
St. Gallisch-Appenzellische
Kraftwerke AG (SAK), St. Gallen*



Bilder: ztg

Bibliografie

- 1) Sinniger, R., De Cesare, G. (1997): Kraftwerkstechnik – Verlandung von Stauseen. In: Schweizerische Technische Zeitung, STZ 4/97, S. 30–33.
 - 2) Palmiere, A., Shah, F. and Dinar, A. (2001): Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of Environmental Management*, Vol. 61, No. 2, S. 149–163.
 - 3) Schleiss, A.; Oehy, Ch. (2002): Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. *wasser, energie, luft – eau, énergie, air*, 94. Jahrgang 2002, Heft 7/8, S. 227–234.
 - 4) Flow Science (2004): FLOW-3D® User Manual, Flow Science Inc., Santa Fe, NM, USA.
 - 5) Awad, I. (2005): Sedimentation in the Gübsensee – Numerical modelisation and optimization of technical measures to reduce sedimentation inside the lake. In: *Mitteilung des LCH Nr. 23, Master of Advanced Studies (MAS) in hydraulic schemes, Edition 2003–2005, Collection of papers of the diploma theses*, ISSN 1661-1179, Lausanne, EPFL, S. 13–21.
 - 6) Awad, I., De Cesare, G., Schleiss, A., Zuglian, R. (2005): Potential of sediment transfer in a shallow storage lake, numerical modeling to assess the efficiency of technical solutions and their optimization, *Proceeding of Hydro 2005. Policy into Practice (auf CD-ROM)*, 17–20 October 2005, Villach, Austria, N°15.11, S. 1–8.
 - 7) Hjulström, F. (1935): The Morphological Activity of Rivers as illustrated by River Fyris. *Bull. Geol. Inst., Uppsala*, No. 25, S. 89–122.
-