Verlandung von Stauseen

Autor(en): **Vischer, Daniel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 47

PDF erstellt am: **10.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74610

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Verlandung von Stauseen

Von Daniel Vischer, Zürich

Wenn der Mensch einen Fluss aufstaut, so schafft er einen künstlichen See; er verwandelt damit eine Flusslandschaft in eine Seelandschaft. Es ist aber faszinierend und demütigend zugleich festzustellen, dass dieser Eingriff von der Natur gleichsam rückgängig gemacht wird: Der Fluss verfüllt nämlich den Stausee allmählich mit seinem Geschiebe und seinen Schwebstoffen und restauriert sich. Allerdings kann der Mensch diesen Verlandungsprozess durch geeignete Massnahmen verzögern oder gar verhindern. Die nachstehenden Zeilen vermitteln eine Übersicht über die Problematik aus der Sicht der Wasserkraftnutzung.

Lorsque l'homme crée une retenue artificielle sur un cours d'eau, il transforme un paysage fluvial en un paysage lacustre. Il est fascinant et humiliant tout à la fois de constater que la nature tend à annuler en quelque sorte cette intervention humaine: la rivière se restaure en remplissant peu à peu le bassin de retenue avec des apports solides transportés par suspension ou charriés sur le fond. Toutefois l'homme a les moyens de ralentir ou même d'empêcher ce processus de sedimentation à l'aide de mesures appropriées. Le texte ci-dessous donne un aperçu des problèmes qui se présentent lors de l'exploitation des retenues.

Impounding a river means creation of an artificial lake; thus the scenery of a river is transformed into lake scenery. It is both fascinating and humiliating to learn that such interference will be revoked by nature: the river will gradually silt up the lake with its bed load and suspended material and regenerate itself. However, by adequate means we are able to slow down or even prevent the process of silting-up. In the following, a review of the problem is given from the view of water power development.

Einleitung

Werden Seen und Meeresbuchten zu Land, weil sie durch Sedimente aufgefüllt werden oder zuwachsen, spricht man von *Verlandung*. Diesem Umwandlungsprozess sind grundsätzlich alle Seen und viele Meeresbuchten unterworfen. Deshalb sind auch die schönen Seen unseres Alpenraums letztlich eine vorübergehende Erscheinung. Immerhin steht ihr Verschwinden nicht unmittelbar bevor: ihre Verlandung dauert nach unseren Massstäben fast Äonen. Rechnet man beispielsweise mit einem unveränderten Fortschreiten des heutigen Sedimenteintrages in den Bodensee, so wird dieser erst in 15 000 bis 20 000 Jahren «passé» sein. Das heisst allerdings nicht, dass uns diese Entwicklung nicht schon heute beschäftigt: Die bereits im Zeitraum einer einzigen menschlichen Generation sichtbar werdende Teilverlandung ist imposant genug.

Die nachfolgende Abhandlung befasst sich aber nicht mit natürlichen Seen, sondern mit *künstlichen*. Im Brennpunkt stehen die durch Stauwehre und Talsperren geschaffenen Speicherseen. Sie unterliegen an sich dem gleichen Umwandlungsprozess und sind darum ebenfalls vergänglich. Doch erfolgt ihre Verlandung etwas anders, weil sie zwei Besonderheiten aufweisen:

- *Morphologische Besonderheit.*
  Der *tiefste Punkt* eines Stausees befindet sich fast immer beim Stauwehr oder bei der Talsperre und damit im Bereich des Ausflusses bzw. der Ausflussorgane. Bei einem natürlichen See hingegen liegt der tiefste Punkt des Beckens gewöhnlich weitab vom Abfluss.
- *Hydrologische Besonderheit.*
  Der Ausfluss eines Stausees kann mit den Ausflussorganen innerhalb gewisser Grenzen *reguliert* werden. Dementsprechend lässt sich auch die Wasserspiegellage beeinflussen. So ist es meist möglich, den Wasserspiegel soweit abzusenken, dass der künstliche See völlig entleert wird. Bei einem natürlichen See geht das selbstverständlich nicht.

Tabelle 1. Ablagerungsraten in natürlichen Seen

Fluss/See	*Einzugsgebiet* [km²]	*Mess-intervall*	*Ablagerungsrate* [m³/km² a]
Rhein/Bodensee	6123	1921–1951	425
		1969–1979	470
Linth/Walensee	530	1910–1931	227
		1931–1979	315
Aare/Brienzersee	554	1898–1933	280
Ticino-Verzasca-Maggia/Lago Maggiore	2897	1890–1932	388
Maggia/Lago Maggiore	926	1932–1953	262
Cassarate/Lago di Lugano	73	1930–1951	240
Baye de Montreux/Léman	15	1949–1956	123
Kander/Thunersee	1120	1740–1866	363

nach *Jäckli* (1958) und *Lambert* (1980), zusammengestellt vom SNGT (1981)

Die Ursache der Verlandung

Ein See verlandet, weil

- die Zuflüsse ihr Geschiebe und ihre Schwebstoffe in den See eintragen
- sich im See infolge biologischer Prozesse Sedimente bilden
- seichte Seen oder Seebuchten zuwachsen (Moorbildung).

Bei den meisten Seen im Alpenraum sowie bei allen Stauseen dominieren die zuflussbedingten Ablagerungen. Sie sind zum weitaus überwiegenden Teil natürlichen Ursprungs und werden von den *Erosionsprodukten aus dem Einzugsgebiet* gespeist. Diese Erosion kann deshalb als die eigentliche Ursache der Verlandung bezeichnet werden. Damit ist auch gesagt, dass die Ablagerungen in qualitativer und quantitativer Hinsicht stark vom Charakter des Einzugsgebietes abhängen. Die wesentlichsten Einflussgrössen ergeben sich aus dessen Umfang, Topographie, Hydrologie, Geologie und Vegetation.

Dieser Zusammenhang begründet unter anderem die Definition einer *Ablagerungsrate*, die das Verhältnis zwischen dem jährlichen Ablagerungsvolumen und der Fläche des Einzugsgebietes darstellt. Sie wird gewöhnlich in $m^3/km^2 \cdot a$ oder in mm/a ausgedrückt und gibt eine interessante Vergleichsgrösse ab. Leider sind in der Schweiz nur wenige Zahlenwerte verfügbar. Die meisten stammen von Deltavermessungen in grossen natürlichen Seen (Tabelle 1) und erfassen damit nur die Ablagerungen im Deltagebiet; die Ablagerungen weitab vom Delta bleiben unberücksichtigt. Wie kürzliche Untersuchungen von Lambert (1980) am Walensee gezeigt haben, sind die letzteren mengenmässig nicht vernachlässigbar.

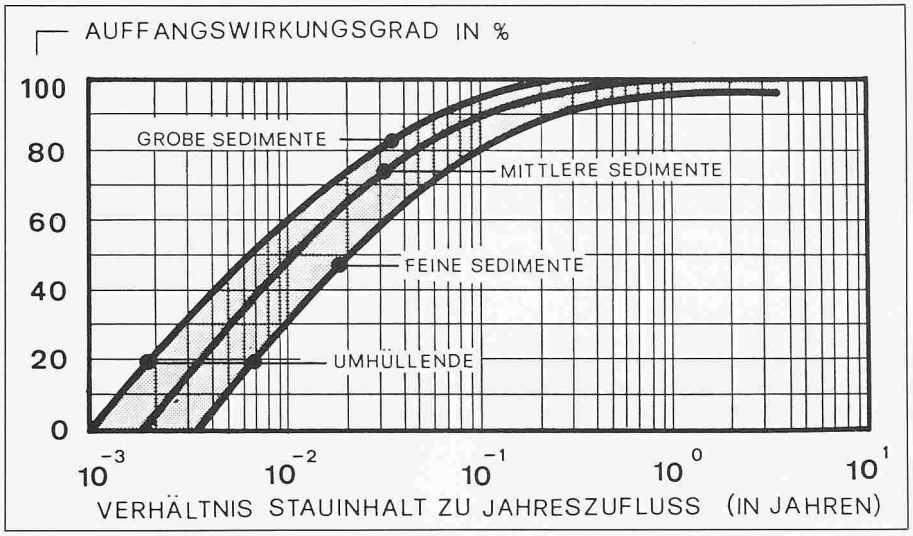

Bild 1. Auffangwirkungsgrad in Funktion des Verhältnisses von Stauinhalt zu mittlerem Jahreszufluss (bzw. zur mittleren Aufenthaltsdauer des Stauseewassers) nach Brune (1953)

Tabelle 2. Grenzkorn Geschiebe/Schwebstoff in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit im Fluss

Geschwindigkeit in m/s	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Grenzkorn in mm	0,1	0,3	0,6	1,1	1,8	2,5

Tabelle 3. Auffangwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen dem Seevolumen und dem mittleren Jahreszufluss bzw. von der mittleren Aufenthaltszeit

Verhältnis Seeinhalt/Jahreszufluss [m³/km² a]	*Aufenthaltszeit* [a]	*Auffangwirkungsgrad (Mittelwert nach Bild 1)* [%]
1/100	0,01	48
1/50	0,02	64
1/20	0,05	83
1/10	0,1	90
1/5	0,2	95
1/2	0,5	98
1/1	1	100

Für Stauseen sind noch weniger *Zahlenwerte* verfügbar:

- Aufgrund von Messungen in der Massa 1958 und 1959 wurde die mittlere Feststoffzufuhr zum Stausee Gebidem auf rund 500 000 m³ oder 2500 m³/km²·a veranschlagt (Oberlé et al 1967).
- Anlässlich der Entleerung des Grimsel-Stausees 1973 konnte festgestellt werden, dass sich dort seit dem ersten Aufstau 1932 rund 2,8 Millionen m³ an Sedimenten abgelagert haben. Bezieht man dieses Volumen auf das direkte Einzugsgebiet von 74 km², so ergibt sich eine Ablagerungsrate von 920 m³/km²·a; das indirekte Einzugsgebiet von etwa 50 km² dürfte nicht viel zur Verlandung beigetragen haben.
- Im Stausee Palagnedra lagerten sich von 1953 bis 1978 insgesamt 3,8 Millionen m³ ab. Bezieht man auch diese wiederum nur auf das direkte Einzugsgebiet – es beträgt 139 km² –, so resultiert eine Ablagerungsrate von 1100 m³/km²·a (SNGT 1981).

Vergleicht man die verschiedenen Ablagerungsraten miteinander, muss man folgendes berücksichtigen: Die in Tabelle 1 erwähnten natürlichen Seen sind im Verhältnis zu ihren Zuflüssen *gross* und fangen damit den Hauptteil der *Schwebstoffe* auf. Dasselbe gilt auch für den Grimsel-Stausee, jedoch nicht für den Palagnedra-Stausee. Denn dieser ist rund 30- bis 40mal kleiner als der direkte, mittlere jährliche Zufluss (Melezza), so dass er bloss etwa 70% der Schwebstoffe zurückzuhalten vermag (vgl. Abschnitt «Verlandungsprozess»). Wäre er wesentlich grösser, würde seine Ablagerungsrate etwa den Wert von 1500 bis 1600 m³/km²·a erreichen.

Dennoch kann festgestellt werden, dass die ermittelten *Ablagerungsraten* überall fast von *derselben Grössenordnung* sind. Sie können folglich dazu benutzt werden, um die Geschiebe- und Schwebstoffzufuhr bei anderen natürlichen Seen und Stauseen des Alpenraums grob abzuschätzen. Die Variation von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet liegt offenbar im Bereich von 100 bis 2500 m³/km²·a, die Variation von Jahr zu Jahr streut dabei naturgemäss ebenso stark.

Übrigens wird die Ablagerungsrate in der Literatur oft als Erosionsrate oder Denudationsrate bezeichnet. Damit werden die Ablagerungen mengenmässig der Erosion gleichgesetzt, allenfalls unter Berücksichtigung eines unterschiedlichen Auflockerungsgrades. Dies ist *unzulässig*. Denn die Ablagerungen widerspiegeln nur einen Teil der Erosion; ein anderer Teil fliesst in Form von *feinen Schwebstoffen und gelösten Stoffen* durch den See hindurch, ohne dort Spuren zu hinterlassen. Und aus Messungen der Landeshydrologie geht hervor, dass *beide Teile etwa von derselben Grössenordnung* sind (Walser 1970, EAWAG 1977).

Der Verlandungsprozess

Die zuflussbedingte Verlandung eines Sees geschieht wie erwähnt deshalb, weil die Zuflüsse Geschiebe und Schwebstoffe führen. Die Grenze zwischen dem Geschiebe und den Schwebstoffen hängt von der Turbulenz ab und wird nach *Kresser* (1964) mit einer auf die transportierten Körner bezogenen Froudezahl von 19 angegeben. Daraus lässt sich in Funktion der Strömungsgeschwindigkeit ein *Grenzkorn* gemäss Tabelle 2 berechnen. Grössere Körner bewegen sich im Fluss als Geschiebe, kleinere schweben. In der Praxis wird als Durchmesser des Grenzkorns oft generell 1 mm angenommen.

Beobachtungen haben gezeigt, dass die *Schwebstoffe* gegenüber dem Geschiebe mengenmässig stark *überwiegen*. Aus Analysen im Stausee Palagnedra ist beispielsweise bekannt, dass die Ablagerungen dort zu 85–90% aus Schwebstoffen bestehen und dementsprechend nur zu 10 bis 15% aus Geschiebe. Im Rheindelta ist der Schwebstoffanteil noch wesentlich grösser.

Hinsichtlich der Sedimentation der Schwebstoffe kann ein See als *grosser Entsander* betrachtet werden: Je nach seinem Inhalt vermag er einen mehr oder weniger grossen Anteil der Schwebstoffe aufzufangen. Dieser lässt sich beispielsweise in Prozenten ausdrücken und als *Auffangwirkungsgrad* bezeichnen. Er hängt in erster Linie von der mittleren Aufenthaltszeit der Schwebstoffe im See und damit vom Verhältnis zwischen dem Seeinhalt und dem jährlichen Zufluss ab. Brune (1953) hat diesen Zusammenhang an über 40 amerikanischen Stauseen untersucht und die Kurven von Bild 1 veröffentlicht. Daraus gehen unter ande-

rem die Werte von Tabelle 3 hervor. Bei einem Verhältnis zwischen dem Seeinhalt und dem Jahreszufluss von 1 zu 1 und grösser werden also praktisch alle Schwebstoffe aufgefangen, bei einem Verhältnis von beispielsweise 1 zu 50 bloss 64%; die restlichen 36% werden durch den See hindurchgetragen.

Die *räumlich-zeitliche Entwicklung* der Verlandung geschieht nach einem ganz bestimmten Muster: Das Geschiebe und die groben Schwebstoffe bleiben bei der Einmündung des Zuflusses liegen und formen ein *Delta*. Die feinen Schwebstoffe werden in den See getragen und setzen sich ab oder werden weiterverfrachtet. Das Absetzen erfolgt grundsätzlich überall, vorwiegend aber in strömungsarmen Seeteilen. Bei starker Schwebstofführung können die Zuflüsse temporär über ihr Delta in die Tiefe tauchen und einen *seegrundberührenden Dichtestrom* bilden, der bis in die tiefsten Seeteile vordringt und diese auffüllt. In einem Stausee mit annähernd konstantem Stauspiegel und länglichem Becken entsteht dann eine *Ablagerungssequenz* gemäss Bild 2. In einem Stausee mit schwankendem Stauspiegel wird die Deltabildung wegen der entsprechend schwankenden Lage der Stauwurzel gestört, das heisst, das Delta wird gleichsam in die Länge gezogen.

Das Ergebnis dieser Entwicklung ist ein *Vorrücken des Deltas* in den See hinein und eine *Hebung des Seegrundes*. Beides verringert fortwährend den Seeinhalt und führt mit der Zeit zur vollständigen Verlandung. Immerhin wird dieser Prozess – wenn der Stauinhalt kleiner ist oder wird als der mittlere jährliche Zufluss – zunehmend verlangsamt, weil der Auffangwirkungsgrad abnimmt. Ohne Eingriffe des Menschen wird der See aber schliesslich zu einem Fluss verengt, dessen Abflussregime den Zuflüssen entspricht. Deshalb kann der Verlandungsprozess bei einem Stausee geradezu als *Restaurationsprozess* bezeichnet werden: Der Mensch staut einen Fluss auf und verwandelt diesen damit auf der Staustrecke in einen See. Der Fluss verfüllt diesen See aber mit der Zeit und stellt gleichsam sein früheres Regime wieder her, allerdings auf einem um den Stau höheren Niveau.

Bild 3 zeigt diesen Restaurationsprozess im *Stausee eines Niederdruck-Laufwerkes*. Der Inhalt eines solchen Stausees ist im allgemeinen sehr viel kleiner als der mittlere jährliche Zufluss, weshalb der Auffangwirkungsgrad gering ist. Folglich setzt sich von den anfallenden Schwebstoffen nur ein geringer Teil ab, und zwar vorwiegend in strömungsarmen Buchten, Innenkurven, Untiefen

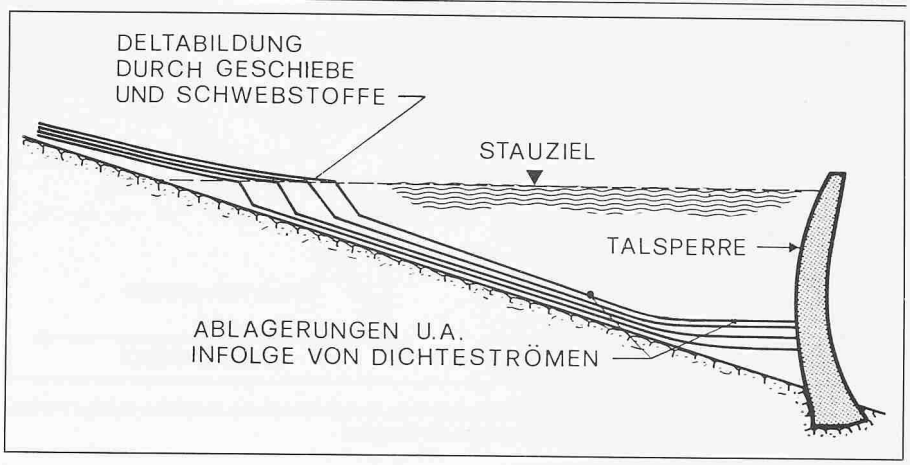

Bild 2. Verlandungsmuster für einen Stausee im Längsschnitt. Das Geschiebe und die gröberen Schwebstoffe bilden das Delta, die feineren Schwebstoffe setzen sich im ganzen See ab oder füllen mit Dichteströmen den Talweg und die tiefsten Seeteile vor der Sperre

Bild 3. Stand der Verlandung im Stausee Klingnau. Der Fluss restauriert gewissermassen sein Bett – allerdings auf einem um den Stau höheren Niveau (Foto Comet 1975)

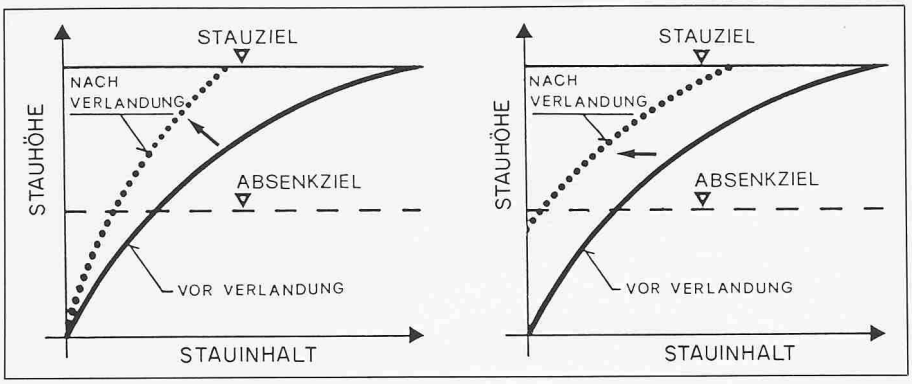

Bild 4. Veränderung der Seeinhaltskurven (Abhängigkeit des Seeinhalts von der Stauhöhe) infolge Verlandung. Links bei Deltabildung, rechts bei Ablagerungen am Seegrund

usw. Das Delta wird dann hauptsächlich vom Geschiebe gebildet und weist bei kleinen Stauhöhen meist flachere Böschungen auf als gewöhnlich. Werden keine Gegenmassnahmen ergriffen, so verwandelt sich ein solcher Stausee mit der Zeit in einen Fluss, der um die Stauhöhe höher liegt als der ursprüngliche. Falls dieser in seinen eigenen Sedimenten abfloss, nimmt der neue Fluss etwa dieselbe Breite und dasselbe Gefälle ein. Denn jeder Flusslauf strebt einem Gleichgewichtszustand zu, bei dem die anfallende Geschiebe- und Schwebstoffmenge unverändert weitertransportiert wird. Und diese Menge ist vor und nach einem Aufstau ja grundsätzlich dieselbe.

Unerwünschte Folgen der Verlandung

Bei Speicherseen haben die Geschiebe- und Schwebstoffablagerungen eine *Verkleinerung des Speichervolumens* und damit eine Einschränkung des Speicherbetriebs zur Folge. Dabei wirkt sich die Deltabildung im allgemeinen ungünstiger aus als die restliche Ablagerung. Denn sie engt die oberen Wasserschichten und damit dasjenige Stauvolumen ein, das als Speicher für Nutzungszwecke und Hochwasserrückhalt besonders wichtig ist. Bild 4 versucht dies anhand der zeitlichen Entwicklung der Seeinhaltskurven zu verdeutlichen. Bei Stauseen von Laufwerken spielt der Speicherbetrieb eine geringere oder gar keine Rolle, weshalb dort der Verlust an Stauraum weniger ins Gewicht fällt.

Wie aus Bild 2 hervorgeht, verursachen die Ablagerungen auch eine *Erhöhung der Sohle der Zuflüsse*. Diese Veränderung kann sich bei geringem Flussgefälle weit flussaufwärts bemerkbar machen und dort Ausuferungen im Hochwasserfall begünstigen bzw. entsprechende Gegenmassnahmen erheischen. Flussabwärts der Stauseen findet allenfalls ein reziproker Vorgang statt: Dort fällt infolge der Ablagerung kein Geschiebe und höchstens eine reduzierte Schwebstoffmenge an, was eine *Erosion* und damit eine Eintiefung der betroffenen Flüsse bewirken kann. In der Schweiz ist dieses Problem glücklicherweise nicht aktuell.

In schiffbaren Stauseen längs Flüssen besteht die Gefahr, dass die Ablagerungen eine *Schiffahrtsstrasse schmälern oder gar blockieren*. Als wunde Punkte erweisen sich diesbezüglich die Einfahrten zu unteren Schleusenvorhäfen. Ein Beispiel hierfür findet sich in Birsfelden am Hochrhein.

Weitere nachteilige Folgen ergeben sich, wenn die Ablagerungen den Einlauf der Fassungen und anderer Abflussorgane erreichen. Praktisch alle Stauseen im Alpenraum weisen eine Triebwasserfassung für die Kraftnutzung und einen Grundablass oder Wehrschützen auf. Diese Anlagen können durch Geschiebe und Schwebstoffe ganz oder teilweise *verstopft* werden und schliesslich ihren Dienst versagen. Oder ihr Betrieb kann wegen dem schwebstoffbefrachteten Wasser gefährdet werden, etwa infolge von Abschliff an Rechen, Schützen und Schiebern. Geht die Entsanderwirkung eines Kraftwerk-Stausees verloren, so leiden natürlich auch die Turbinen darunter. Mit diesen Beispielen ist die Liste der unerwünschten Folgen einer Verlandung zwar lang, aber noch keineswegs vollständig.

Massnahmen gegen die Verlandung

Günstige Plazierung des Stausees

In gewissen Gebieten ist es möglich, einen benötigten Stausee in einem *Nebental* statt im Haupttal anzuordnen. Das Wasser des Haupttals wird dann geschiebefrei gefasst, entsandet und in den Stausee übergeleitet. Dasselbe wird allenfalls auch mit dem Wasser aus weiteren Nebentälern gemacht. Auf diese Weise verfügt der Stausee über ein kleines direktes Einzugsgebiet sowie über ein grosses indirektes. Er unterliegt damit einer wesentlich kleineren Geschiebe- und Schwebstoffzufuhr, als wenn er im Haupttal liegen würde.

Viele Stauseen im Alpenraum profitieren hinsichtlich Verlandung davon, dass sie nur ein *kleines direktes Einzugsgebiet* aufweisen, dafür aber ein grosses indirektes. Ihre diesbezügliche Anordnung wurde aber selten aufgrund sedimentologischer Gesichtspunkte gewählt. Das gilt beispielsweise auch für die Grande Dixence. Es ist in diesem Zusammenhang aber interessant festzustellen, dass dieser mit 400 Mio m^3 Inhalt grösste Stausee der Schweiz ein direktes Einzugsgebiet von bloss 44 km^2 gegenüber einem indirekten von 360 km^2 aufweist.

Minderung der Feststoffzufuhr

In Abschnitt «Ursache der Verlandung» wurde als Ursache der Feststoffzufuhr die Erosion im Einzugsgebiet genannt. Es ist deshalb naheliegend, dass man diese *Erosion zu mindern* sucht. Dazu eignen sich grundsätzlich Bepflanzungen (insbesondere Aufforstungen), Hangverbauungen, Wildbach- und Flusskorrektionen usw. Doch sind solche weiträumigen Massnahmen zu kostspielig, um sich allein im Hinblick auf die Verringerung einer Verlandung zu rechtfertigen. Ausserdem kommen sie meist erst nach Jahren oder gar Jahrzehnten zum Tragen und wirken auch dann nur begrenzt.

Erfolge lassen sich am ehesten noch bei der *Minderung der Geschiebezufuhr* erzielen. Man kann im Einzugsgebiet einige besonders stark erodierende Wildbäche abtreppen und mit Kiesfängen versehen. Diese bestehen im wesentlichen aus kleinen Staubecken, die immer geräumt werden. Eine wirksamere Alternative besteht in der Erstellung eines *Vorbeckens an der Wurzel des Stausees*. Ein solches Becken kontrolliert praktisch das ganze Einzugsgebiet und drosselt, wenn es zuverlässig geräumt wird, die Geschiebezufuhr in den Stausee vollständig. Die Räumung der Kiesfänge und Vorbecken stellt allerdings gewisse Probleme, die im übernächsten Abschnitt beschrieben werden. Vereinzelte Vorbecken wurden deshalb auch schon mit Spülkanälen versehen, die ins Unterwasser des Stausees ausmünden (Bild 5).

Es ist klar, dass Kiesfänge und Vorbekken die Schwebstoffe nicht zurückzuhalten vermögen. Sie sind im allgemeinen derart klein, dass ihr Auffangwirkungsgrad praktisch null ist. Eine Ver-

besserung bringt jene Lösung, wie sie vor wenigen Jahren im Stausee Palagnedra verwirklicht worden ist. Dort wurde anstelle einer Vorsperre eine Zwischensperre in den Stausee eingebaut, die normalerweise überstaut wird. Sie weist einen grossen Teil der Schwerstoffe und insbesondere die grundberührenden Dichteströme in einen bei Hochwasser betätigten Spülstollen ab.

Schaffung eines Auffangraumes im Stausee

Eine bewährte Methode, um den Speicherraum und damit den Nutzraum eines Stausees zu erhalten, besteht darin, diesen *von Anfang an um einen Auffangraum zu vergrössern*. Die Bemessung desselben kann beispielsweise auf die während 50 Jahren (oder der Konzessionsdauer) zu erwartenden Ablagerungen Rücksicht nehmen. Entsprechend vorstehendem Abschnitt sollten dabei aber sowohl die Deltabildung als auch die übrige Sedimentation beachtet werden.

Häufig wird der Auffangraum jedoch nur in Form eines *Totraums* vorgesehen und damit praktisch nur auf die übrige Sedimentation – insbesondere also auf die seegrundberührenden Dichteströme – ausgerichtet. Als Totraum wird der Stauraum unterhalb der Fassung definiert. Tabelle 4 vermittelt eine Übersicht über den Totraum der zehn grössten Schweizer Stauseen (Quelle: Bundesamt für Wasserwirtschaft).

Räumen der Ablagerungen

Eine Verlandung kann selbstverständlich auch dadurch gehemmt oder verhindert werden, dass man die *Ablagerungen laufend oder periodisch räumt*. Dies lässt sich mit Baggern vom Ufer oder von Schiffen aus verwirklichen.

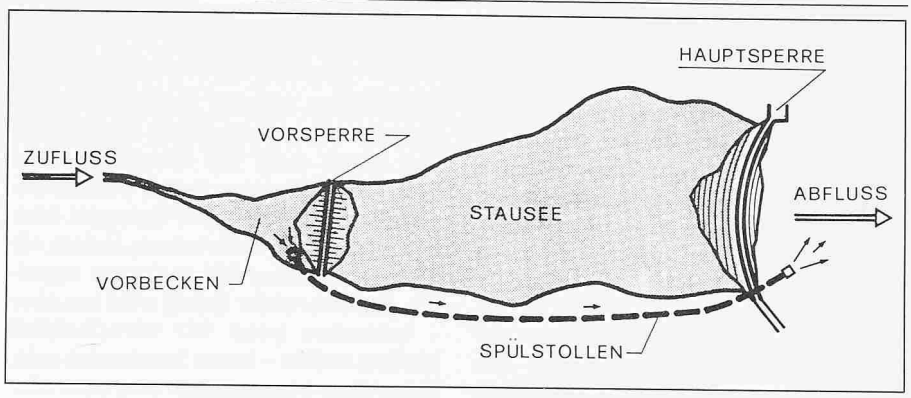

Bild 5. Situation eines Stausees mit einem Vorbecken, das mit einem ins Unterwasser ausmündenden Stollen gespült werden kann

Tabelle 4. Stauinhalt und Totraum der 10 grössten Schweizer Stauseen

Name	*Stauinhalt* [Mio m³]	*Totraum* [Mio m³]	*Totraum in % des Stauinhalts* [%]
Dixence	401	1	0,2
Emosson	227	2	0,9
Gruyère	200	20	10
Valle di Lei	200	3	1,5
Mauvoisin	181,5	1,5	0,8
Livigno	164,2	0,2	0,1
Wägital	148,8	72,7	49
Vogorno	106,0	12,8	12
Grimsel	101	7,1	7
Mattmark	101	1	1

Sofern das Baggergut aus Geschiebe und damit aus Kies besteht, ist es im allgemeinen verwertbar. Es findet als Material für Strassenkoffer, Dammschüttungen und – von Holz und anderen organischen Beimengungen befreit – als Betonzuschlagstoff Absatz. Enthält es dagegen grosse Mengen an Schwebstoffen und damit an Schlamm, so fehlt eine sinnvolle Verwendungsmöglichkeit, und es stellen sich unangenehme Deponieprobleme. Das heisst, die Räumung der Ablagerungen wird dann zu einer kostspieligen Massnahme.

Spülung des Stausees

Bis zu einem gewissen Grad können Sedimente auch beseitigt werden, indem man sie *durch den Grundablass wegspült*. Die Wirkung der Spülung ist um so besser, je länger sie intensiv erfolgt und je tiefer der Stauspiegel dabei abgesenkt wird. Diese Aussage wird verständlich, wenn man bedenkt, dass es grosser und anhaltender Schleppkräfte bedarf, um Geschiebe- und konsolidierte Schwebstoffablagerungen aufzulokkern und abzutragen.

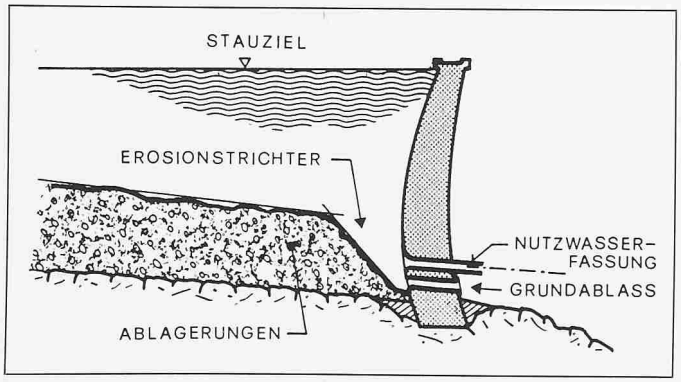

Bild 6 (oben). Längsschnitt einer Sperre mit Grundablass und darüberliegender Fassung. Kurze Spülungen bei vollem Stausee schaffen bloss einen Erosionstrichter mit steilen Böschungen, vermögen also die Ablagerungen nur in einem engen Bereich abzutragen.

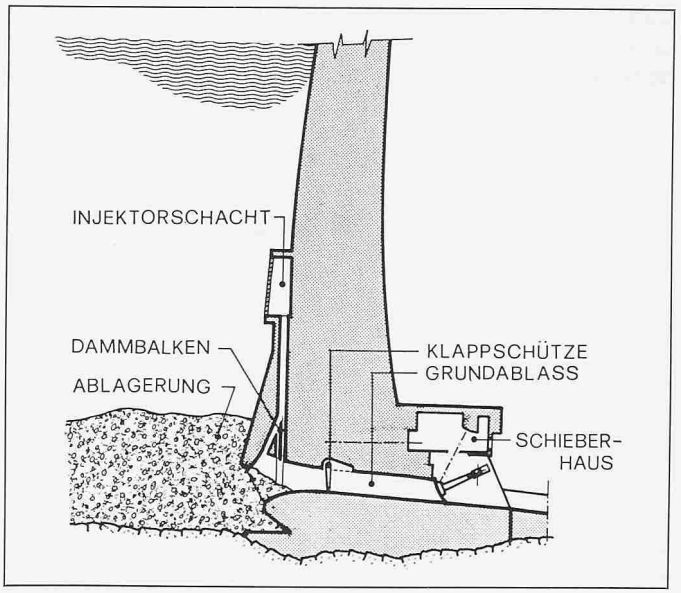

Bild 7 (rechts). Längsschnitt durch einen Grundablass mit Injektorschacht. Wenn die Ablagerungen den Grundablass zudecken, können sie nur weggespült werden, wenn genügend Wasser zugeführt wird. Dies geschieht durch den Injektorschacht (Beispiel Stausee Gebidem)

Mit einer kurzen Spülung bei vollem Stausee ist nicht viel zu erreichen. Man erzeugt einzig unmittelbar vor dem Grundablass einen Erosionstrichter mit steilen Böschungen. Dieser genügt allenfalls, um den Grundablass und eine darüber liegende Fassung freizulegen, aber nicht, um einen teilweise verlandeten Stauram zurückzugewinnen (Bild 6).

Wenn die Gefahr besteht, dass der Grundablass vor oder während der Spülung verstopft, muss er besonders ausgebildet werden. Eine gute Lösung besteht darin, den zum selbsttätigen Ausputzen erforderlichen Durchfluss mit einem Injektorschacht gemäss Bild 7 sicherzustellen.

Lange Spülungen bei abgesenktem Stauspiegel schmälern den Betrieb des Stausees erheblich und sind darum unwirtschaftlich. Deshalb trachtet man im Sinne eines Kompromisses nach einem möglichst gerafften, aber doch effizienten *Spülprogramm*. Dies hat wiederum zur Folge, dass der Abfluss schubweise mit hohen Feststoffkonzentrationen belastet wird. Die entsprechend nachteiligen Folgen für die Unterlieger und insbesondere für die Fischerei lassen sich mildern, wenn die Spülungen jeweils auf die Hochwasserzeiten beschränkt werden, also auf Zeiten, in denen die Flüsse ohnehin feststoffbefrachtet sind. Dabei gelingt es unter Umständen auch, die beim Delta abtauchenden, grundberührenden Dichteströme direkt durch den Grundablass weiterzuleiten.

In diesem Zusammenhang sei noch bemerkt, dass die meisten *Hochwasserentlastungen* der Stauseen eigentlich das falsche Wasser entlasten, nämlich das relativ saubere Oberflächenwasser. Sie sollten deshalb nicht als Überläufe, sondern *als Grundablässe* konzipiert werden. Vielleicht rechtfertigt die Entwicklung betriebssicherer Grundablassschützen ein entsprechendes Umdenken?

Schlussfolgerungen

Die Erosion unserer Landschaft müssen wir als naturgegeben hinnehmen und somit auch die Geschiebe- und Schwebstofführung unserer Flüsse. Gegen die Verlandung der Stauseen können wir uns zur Wehr setzen, indem wir die geschilderten Massnahmen ergreifen. Ein dauernder Erfolg wird uns aber – besonders wenn wir wirtschaftlich bleiben wollen – kaum beschieden sein. Denn diese Massnahmen sind entweder wenig wirksam oder dann sehr teuer. Sie können zwar dazu dienen, einige Teilziele zu verwirklichen, wie etwa die Freilegung eines Grundablasses oder einer Fassung, sie vermögen aber die Verlandung als solche nicht zu verhindern. Deshalb müssen wir uns damit abfinden, dass insbesondere unsere *schwer spülbaren Stauseen* ähnlich wie die natürlichen Seen *vergänglich sind*.

Glücklicherweise erfolgt die Verlandung der im Alpenraum geschaffenen grossen Stauseen im allgemeinen nur *sehr langsam*. Als Beispiel kann der Grimselsee mit seinem Stauvolumen von rund 100 Mio m³ dienen. Wenn er in Zukunft derselben Ablagerungsrate wie in den letzten 40 Jahren unterliegt, so verschwindet er erst in 1500 Jahren. Bei den kleinen Stauseen geht die Entwicklung aber rascher. Dem Beispiel Grimselsee kann das Beispiel des Gebidemsees mit seinem Stauvolumen von 9 Mio m³ gegenübergestellt werden. Er würde ohne kräftige Spülungen in weniger als 20 Jahren mit Feststoffen verfüllt (Oberlé et al 1967). Und da er 1967 in Betrieb genommen wurde, wäre er schon Mitte der 80er Jahre Vergangenheit, das heisst eine Ebene und *begehbar*.

Im grossen und ganzen darf aber festgehalten werden, dass die vollständige Verlandung bei den meisten Stauseen im Alpenraum kein akutes Problem darstellt. Es sind also gewissermassen bloss die *Vorboten der Vergänglichkeit*, die uns heute beunruhigen, aber nicht die Vergänglichkeit selbst. Mit ihr werden sich spätere Generationen auseinandersetzen müssen. Wir heutigen Wasserbauer können uns diesbezüglich ähnlich wie Ludwig XIV. mit seinem «après moi le déluge» der Verantwortung entledigen und (mit Hartung, 1959) ausrufen: «Nach uns die Verlandung!» – oder vielleicht noch besser: *«Die Verlandung? – Nach uns!»*

Literaturnachweis

Brune G.M. (1953): «Trap efficiency of reservoirs». Transactions of American Geophysical Union, 34 (3), S. 407–418

EAWAG, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (1977): Jahresbericht 1976, S. 15–17

Hartung F. (1959): «Ursache und Verhütung der Stauraumverlandung bei Talsperren». Wasserwirtschaft Heft 1, S. 3–13

Jäckli H. (1958): «Der rezente Abtrag der Alpen im Spiegel der Vorlandsedimentation». Eclogae geol. Helv. 51/2, S. 354–365

Kresser W. (1964): «Gedanken zur Geschiebe- und Schwebstofführung der Gewässer». Österreichische Wasserwirtschaft Jg. 16, Heft 1/2, S. 6–11

Lambert A. (1980): «Das Delta der Linth im Walensee; ein Vergleich der Seegrundaufnahmen von 1931 und 1979». Wasser, Energie, Luft Jg. 72, Heft 7/8, S. 243–246

Oberlé R., Dubas Chr., Gardet A., Charpié J., Decoppet J.P. (1967): «Protection contre l'ensablement du bassin d'accumulation de l'aménagement hydroélectrique de la Massa». Rapport Q 33/R 37, 9e Congrès des Grands Barrages, Istamboul 1967, S. 665–688

SNGT, Schweizerisches Nationalkomitee für grosse Talsperren (1981): General paper for the 14th ICOLD-Congress in Rio de Janeiro 1982 (im Druck)

Walser E. (1970): Transport gelöster Stoffe in Fliessgewässern; Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft anlässlich der 150. Versammlung in Bern. Berichthaus-Verlag Zürich, S. 175–176

Eröffnungsvortrag an der internationalen Fachtagung über die «Verlandung von Flussstauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum» am 22./23. Okt. 1981 an der ETH Zürich.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *D. Vischer*, Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.