

# Eigenschaften junger Sedimente in Speicherseen

## Propriétés des alluvions récentes dans les retenues alpines

Richard O. Sinniger, Giovanni De Cesare, Jean-Louis Boillat

### 1. Einführung

Sedimentablagerungen in einem Speicher sind das Resultat sowohl von natürlichen als auch von anthropogen beeinflussten Umweltprozessen im Speicher selbst oder in dessen Einzugsgebiet. Im Gegensatz zu natürlichen Mittellandseen weisen künstliche, im steilen Relief der Alpen angelegte Speicher grosse Gefälle der Zuflüsse auf, was zu bedeutenden Feststofffrachten und Akkumulationsraten führen kann. Ferner bedingen Grösse und Nutzungsart der Speicher normalerweise relativ kurze Aufenthaltszeiten des Wassers, verbunden mit starken Spiegelschwankungen.

Aus Gründen der Betriebssicherheit, namentlich der Funktionstüchtigkeit der Auslassorgane, oder auch aus wirtschaftlichen Erfordernissen werden vor allem aus kleineren Speichern und aus Ausgleichsbecken periodisch Sedimente abgeführt, sei dies durch Spülung oder mittels mechanischer Räumung. Dabei wird bei der Spülung oft, bei der mechanischen Räumung zwangsläufig eine totale Entleerung des Speichers vorgenommen.

Die unter Wasser entstandenen, vollständig gesättigten Formationen aus feinsten Gesteinstrümmern werden bei der Entleerung des Auftriebs beraubt, was zu derer teilweisen Entwässerung und Verfestigung führt. In der Tat weisen selbst junge Sedimente bald nach der Absenkung des Wasserspiegels Eigenschaften auf, die unter Umständen ein Befahren mit geeigneten Geräten erlauben und dem mechanischen Abtrag einen nicht vernachlässigbaren Widerstand entgegensetzen können. Auffällig ist in jungen Sedimenten bei abgesenktem Wasserspiegel vor allem aber auch die mögliche Bildung steiler Abbruch- oder Aushubböschungen, was auf eine nennenswerte Scherfestigkeit vor allem wegen der Kohäsion schliessen lässt.

Die Frage stellt sich nun, ob diese Eigenschaften auch auf junge Sedimente in tieferen Speichern ohne vollständige Entleerung übertragbar sind. Um diese Frage zu beantworten, wurden 1994 im Auftrag der Blenio Kraftwerke AG (OFIBLE) vom Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH) an der ETH Lausanne entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

### 2. Beschreibung der Stauanlage

#### 2.1 Kennwerte des Speichers

Die Luzzone-Talsperre der Blenio Kraftwerke AG wurde zwischen 1958 und 1963 in der Nähe der Ortschaft Olivone im Nordtessin erbaut (Fig. 1). Es handelt sich um eine doppelt gekrümmte Bogenmauer von ursprünglich 208 m Höhe, einer Kronenlänge von 530 m und einem Nutzinhalt des Speicherbeckens von 87 Mio. m<sup>3</sup>.

### 1. Introduction

La formation de dépôts dans un réservoir est le résultat de processus d'origine naturelle ou anthropogène qui se développent dans le réservoir même ou sur son bassin versant. Contrairement aux grands lacs naturels du plateau, les retenues artificielles des régions alpines sont situées dans un relief marqué par de fortes pentes, ce qui peut conduire à des apports solides et des taux d'accumulation importants. D'autre part, la taille et le mode d'exploitation des réservoirs conduisent à des temps de séjour de l'eau relativement courts ainsi qu'à de fortes variations du niveau d'eau.

Pour des raisons de sécurité d'exploitation, notamment pour garantir la capacité de fonctionnement des organes de vidange, mais aussi pour des raisons économiques, l'évacuation de sédiments des petits réservoirs et des bassins de compensation est périodiquement pratiquée par des opérations de purge ou par des moyens mécaniques. Pour des motifs impératifs, il est également procédé occasionnellement à la vidange totale du réservoir.

Lors d'une vidange totale, les dépôts de particules minérales fines, constitués entièrement sous l'eau, ne sont plus soumis à la poussée d'Archimède. Cela conduit à leur drainage partiel et à leur consolidation. Sitôt après l'abaissement du plan d'eau, même des couches sédimentaires récentes présentent des propriétés telles qu'elles permettent la circulation d'engins lourds et opposent une résistance non négligeable à leur extraction.

Lors de l'abaissement du plan d'eau dans des dépôts récents, il est également frappant d'observer la formation de talus de rupture ou d'excavation très raides, ce qui permet de conclure à une tension de cisaillement nominale élevée, due en particulier à la cohésion.

La question qui se pose est de savoir si ces propriétés sont applicables aux sédiments récemment déposés en eau profonde et jamais soumis à une vidange complète. Afin de répondre à cette question, des investigations idoines ont été réalisées en 1994 par le Laboratoire de Constructions hydrauliques (LCH) de l'EPF Lausanne, sur mandat des Forces Motrices de Blenio SA (OFIBLE).

### 2. Descriptif de la retenue de Luzzone

#### 2.1 Caractéristiques du réservoir

Le barrage de Luzzone, propriété des Forces Motrices de Blenio SA, a été construit entre 1958 et 1963 à proximité de la localité d'Olivone dans la partie nord du Tessin (Fig. 1). Il s'agit d'un barrage voûte à double courbure, qui avait à l'origine une hauteur de 208 m, une longueur de couronnement de 530 m et une capacité de stockage de 87 Mio. m<sup>3</sup>.



Fig. 1. Lageplan und Aufnahme des Speichers Luzzone im nördlichen Tessin

Situation et photo de la retenue de Luzzone au Nord du Tessin

Die wichtigsten hydraulischen Anlageteile sind ein Grund- und Mittelablass, eine Triebwasserfassung in der Mauer, sowie eine mit Schützen ausgerüstete Hochwasserentlastung.

Zwischen 1995 und 1998 wurde die Talsperre um 17 m auf 225 m erhöht. Dadurch vergrößert sich das Nutzvolumen des Jahresspeichers um 20 Mio. m<sup>3</sup> auf 107 Mio. m<sup>3</sup>. Dies erlaubt die zusätzliche Umlagerung von rund 60 GWh im Sommer anfallender Energie in das Winterhalbjahr.

Das direkte Einzugsgebiet des Speichers beträgt 36.7 km<sup>2</sup>. Neun Wasserfassungen und zwei entsprechende Zuleitungen sammeln zusätzlich die Sommerabflüsse und erhöhen das Einzugsgebiet des Stausees auf total 107 km<sup>2</sup>.

## 2.2 Sedimenteintrag

Zur Erfassung der zeitlichen Veränderung des Nutzvolumens sowie zur Beurteilung der Betriebssicherheit der Auslassorgane ist eine periodische Vermessung des Seegrundes unerlässlich. Diese wurden unter anderem durch die Freiburgischen Elektrizitätswerke (EEF) mit einem Spezialboot durchgeführt. Die Auswertung der ermittelten Daten ergibt folgende massgebende Sedimentvolumina im Stausee Luzzone :

• Totaler Sedimenteintrag - apport total de sédiments, 1963 - 1994	$V_{tot}$	1'200'000	[m <sup>3</sup> ]
• Mittlerer jährlicher Eintrag - apport annuel moyen	$V_a$	38'000	[m <sup>3</sup> /Jahr-an]
• Im See vorhandene Sedimente - sédiments présents dans le lac, 1994	$V_{Sed}$	900'000	[m <sup>3</sup> ]

Die Differenz zwischen totalem Eintrag und vorhandenem Volumen ist auf die Wirkung der Spülungen zurückzuführen.

Die Vermessung des Seegrundes lässt erkennen, dass die jährlich eingeschwemmten Sedimentmengen für ein und dieselbe Anlage starken Schwankungen unterworfen sind. Grösse und jahreszeitliche Verteilung sowie Intensität der Niederschläge sind die wesentlichen Einflussfaktoren (Beyer Portner, 1998).

Im Speicher Luzzone erreicht zur Zeit die Auflandung im Nahbereich der Mauer und der unmittelbaren Umgebung des Grundablasses eine Mächtigkeit von ungefähr 18 m. Die Einlaufbauwerke der Triebwasserleitung und des Grundablasses sind somit unmittelbar betroffen (Fig. 2).

Les principaux organes hydrauliques de la retenue sont la vidange de fond, une vidange intermédiaire, une prise d'eau dans le mur du barrage ainsi qu'un évacuateur de crues équipé de vannes.

Entre 1995 et 1998, le barrage a été surélevé de 17 m pour atteindre une hauteur maximale de 225m. Le volume de la retenue a ainsi été augmenté de 20 Mio. de m<sup>3</sup> pour atteindre 107 Mio. de m<sup>3</sup>. Cela permet un transfert saisonnier de production de quelque 60 GWh de l'été vers l'hiver.

Le bassin versant direct de la retenue est de 36.7 km<sup>2</sup>. Neuf prises d'eau et deux galeries permettent de collecter des apports estivaux supplémentaires et accroissent le bassin versant de la retenue à 107 km<sup>2</sup> au total.

## 2.3 Apports de sédiments

Pour le suivi périodique de l'évolution temporelle du volume utile de même que pour l'évaluation de la sécurité d'exploitation des organes de vidange, un relevé de la bathymétrie du fond est réalisé périodiquement. Les dernières mesures ont été effectuées par les Entreprises Électriques Fribourgeoises (EEF) à partir d'un bateau spécialement équipé. L'analyse des données obtenues conduit aux volumes de sédiments suivants dans la retenue de Luzzone :

La différence entre l'apport total et les sédiments présents s'explique par l'effet des opérations de purge.

Les levés bathymétriques montrent que le volume sédimenté annuellement dans la retenue est sujet à d'importantes fluctuations. Le volume annuel de pluie et sa distribution saisonnière de même que l'intensité des précipitations sont les principaux facteurs d'influence de l'apport sédimentaire (Beyer Portner, 1998). Dans la retenue de Luzzone, l'alluvionnement atteint actuellement une épaisseur de 18 m environ à proximité du barrage et dans le voisinage immédiat de la vidange de fond. Les ouvertures d'entrée de la prise d'eau usinière et de la vidange de fond sont ainsi directement concernées par l'augmentation des dépôts (Fig. 2).

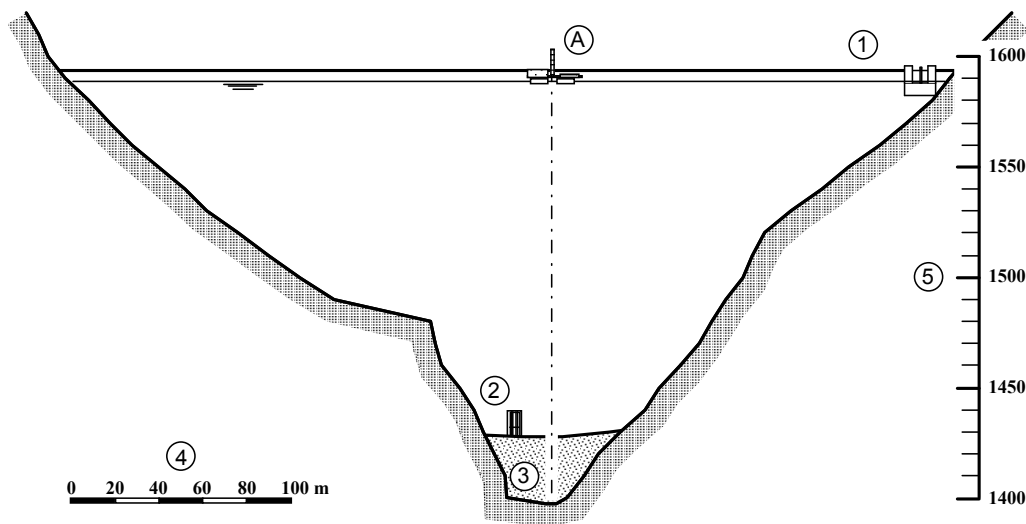


Fig. 2. Querprofil mit Auflandung im Nahbereich der Mauer mit schematischer Darstellung der dortigen Kernbohrung (A), die Mächtigkeit beträgt ca. 25 m

- ① Staumauer Luzzzone mit rechtsufriger Hochwasserentlastung, ② Triebwasserfassung, ③ Sedimentablagerungen, ④ Horizontaler Massstab, ⑤ Vertikaler Massstab in m ü. M.

Profil en travers à proximité du barrage et représentation schématique du carottage effectué (A); l'épaisseur de la couche sédimentaire atteint environ 25 m

- ① Barrage de Luzzzone avec l'évacuateur de crues en rive droite, ② Prise d'eau usinière, ③ Dépôts sédimentaires, ④ Echelle des distances horizontales, ⑤ Echelle des altitudes en m s.m.

### 3. Probenentnahme

#### 3.1 Durch Taucher

Im Mai 1994 erforderte ein durch Unwetter verursachter starker Sedimentschub den Einsatz eines Saugbaggers um den Einlauf der Triebwasserfassung freizulegen.

Diese Gelegenheit wurde benutzt, um durch die Taucher drei gestörte Sedimentproben an der Oberfläche und aus Tiefen von 0.75 und 1.50 m zu entnehmen.

Die Mittelkurve der drei sehr ähnlichen Kornverteilungen ist in Fig. 3 dargestellt und lässt erkennen, dass sich in der Nähe der Staumauer wohl die feinsten Körner ablagern, dass sich jedoch deren Verteilung weitgehend mit dem Feinbereich des Streubandes der übrigen Sedimentanalysen im Stauraum deckt.

#### 3.2 Mit Schwerelot

Im Juni 1994 wurden von Mitarbeitern der EAWAG mittels eines mit Zusatzgewicht versehenen Plastikrohres (Innendurchmesser 63 mm) zwei Sedimentproben entnommen. Die in der Nähe der Staumauer entnommene Probe mass 38 cm, diejenige aus der Umgebung des Grundablasses 13 cm.

Die Versuche weitere Proben zu entnehmen scheiterten, da die Sedimente trotz oben liegender Verschlussklappe beim Hochziehen meistens wieder ausflossen, obwohl die selben Sedimente dem Eindringen des Gerätes etwelchen Widerstand entgegenzusetzen, was die Entnahmetiefe erheblich reduzierte. Die längere der Proben wurde für weitere Analysen verwertet, wobei im vorliegenden Kontext lediglich die Kornverteilung (Fig. 3) wiedergegeben sei.

### 3. Prélèvement d'échantillons

#### 3.1 Par des plongeurs

En mai 1994, suite à des intempéries, un important apport de sédiments nécessita l'installation d'une pompe suceuse pour dégager l'entrée de la prise d'eau. A cette occasion, trois échantillons ont été prélevés, à l'amont immédiat de l'entrée de la prise d'eau, dans la couche de surface des dépôt et à des profondeurs de 0.75 et 1.50 m. Les prélèvements réalisés par des plongeurs sont à considérer comme totalement remaniés. La distribution granulométrique moyenne de ces trois échantillons très semblables est représentée sur la Fig. 3. Elle fait apparaître que les éléments les plus fins se trouvent à proximité du barrage et que leur distribution constitue l'enveloppe inférieure du domaine couvert par l'ensemble des analyses sédimentaires effectuées dans la retenue.

#### 3.2 Par carottage superficiel

En juin 1994, deux échantillons de sédiments ont été prélevés par des collaborateurs de l'EAWAG à l'aide de tubes plastiques lestés, de 63 mm de diamètre intérieur. Le premier, prélevé au voisinage du barrage mesurait 38 cm, celui prélevé à proximité de la vidange de fond, 13 cm. Les autres tentatives d'échantillonnage échouèrent car les tubes se vidaient pendant leur remontée, malgré la fermeture d'un couvercle sur l'ouverture supérieure du tube. Ceci, bien que les sédiments offraient une grande résistance à la pénétration du tube, réduisant considérablement la profondeur de prélèvement. Le plus long des échantillons a été utilisé pour des analyses complémentaires dont seule la distribution granulométrique est restituée dans le présent contexte (Fig. 3).

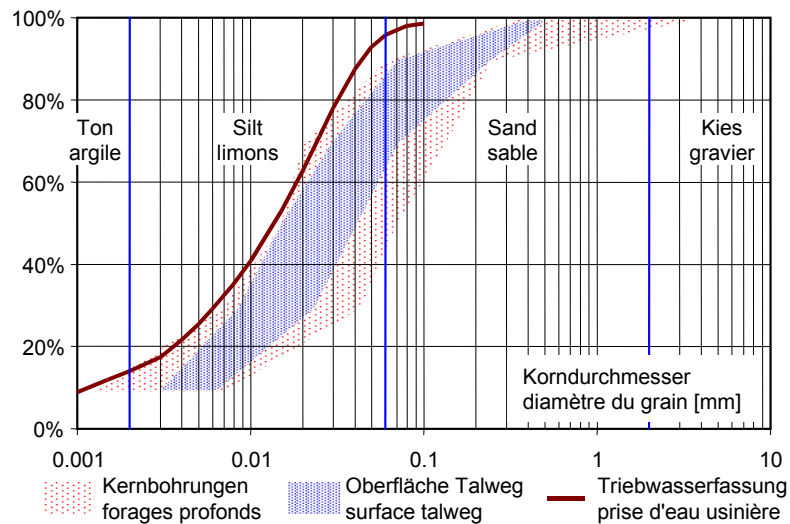


Fig. 3. Streubereiche der Kornverteilungen der Seesedimente an der Oberfläche des Talwegs über 1500 m und der Kernbohrungen in Staumauernähe mit der Mittelkurve der durch Taucher entnommenen Proben bei der Triebwasserfassung

Domaine de distribution granulométrique des sédiments de la retenue, prélevés par carottage superficiel dans le talweg, par forage profond à proximité du barrage et par des plongeurs dans la couche superficielle devant la prise d'eau et au voisinage du barrage

### 3.3 Kernbohrungen

Ein kontinuierlicher, die gesamte Sedimentschicht erfassender Aufschluss erforderte letzten Endes Kernbohrungen von der Seeoberfläche aus (Fig. 4). Die Arbeiten auf dem Floss bei variablem Seespiegel und einer Wassertiefe von über 165 m, sowie die, wie sich zeigte, äusserst geringe Festigkeit auch der tiefer liegenden Sedimente, erforderte von der Bohrfirma (Stump Bohr AG) grosses Können und innovative Lösungen. So wurden denn im Oktober 1994 bei 3 Bohrungen Sedimente einer Mächtigkeit von 21.4 m (A), 6.0 m (B) und 5.6 m (C) erbohrt (Fig. 5). Bei unten offenem Entnahmegesetz ergab sich beim Hochziehen ein zu grosser Kernverlust. In der Folge wurde das Gerät mit einer Klappe versehen, so dass insgesamt 14.85 m Kern gewonnen werden konnte. Weitere 15.65 m waren in stark gestörtem Zustand und 4.50 m waren als Verlust zu bezeichnen.

### 3.3 Par forage profond

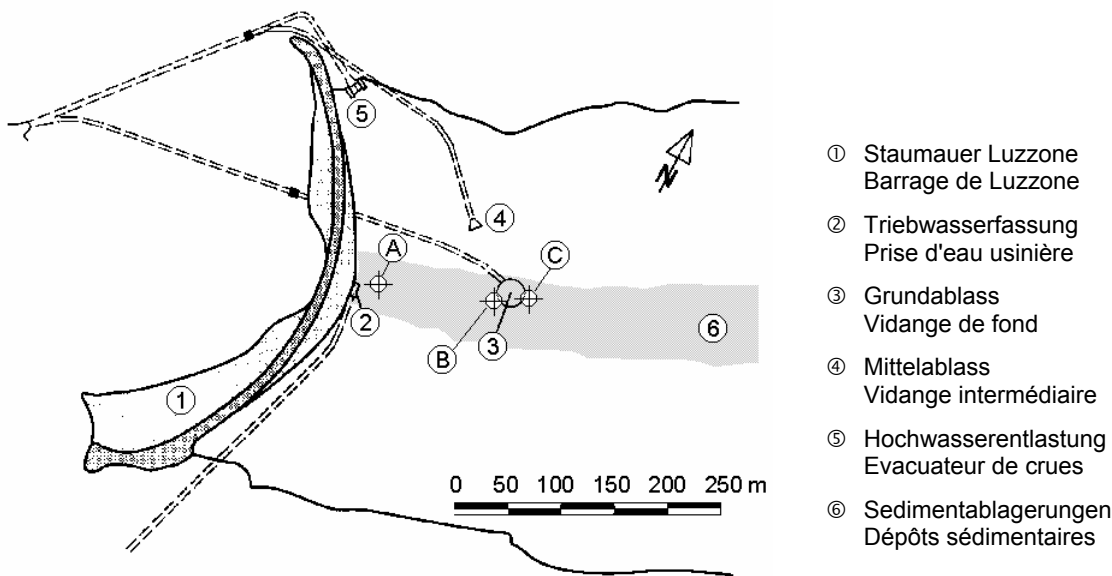
Afin de pouvoir analyser la couche totale des sédiments, des sondages profonds ont été réalisés. Les travaux conduits à partir d'un ponton flottant (Fig. 4), avec un niveau du lac variable et une profondeur d'eau supérieure à 165 m, dans des sédiments présentant une résistance extrêmement faible même en profondeur, nécessita de grandes compétences et la recherche de solutions innovatrices de la part de l'entreprise de sondages Stump SA. Trois forages de 21.4 m (A), 6.0 m (B) et 7.6 m (C) ont ainsi été réalisés en octobre 1994. Avec un instrument de prélèvement ouvert à son extrémité inférieure, la perte de matériaux était trop importante, raison pour laquelle une tête munie d'un clapet dut être installée. Cela permit de récupérer 31.5 des 35 m forés dont 14.85 m de carotte en tube et 15.65 m en vrac.



Fig. 4.

Bohrplattform am Standort (C) im Stausee Luzzone mit vier Querankerungen

Plateforme de Forage à l'emplacement (C) dans la retenue de Luzzone avec ses quatre ancrages par câble



- ① Staumauer Luzzone  
Barrage de Luzzone
- ② Triebwasserfassung  
Prise d'eau usinière
- ③ Grundablass  
Vidange de fond
- ④ Mittelablass  
Vidange intermédiaire
- ⑤ Hochwasserentlastung  
Evacuateur de crues
- ⑥ Sedimentablagerungen  
Dépôts sédimentaires

Fig. 5. Bohrungen (A) in Staumauernähe, (B) und (C) unterhalb und oberhalb des Einlauftrichters des Grundablasses

Emplacements des forages, (A) à proximité du barrage, (B) et (C) à l'amont et à l'aval du cône de dégagement de la vidange de fond

#### 4. Materialkennziffern

Vorerst sei darauf hingewiesen, dass sich die untersuchten Ablagerungen ausschliesslich durch Sedimentation unter Wasser gebildet haben und bis zu ihrer Entnahme ständig unter Auftrieb standen. Eine Konsolidierung, wenn überhaupt von einer solchen gesprochen werden kann, hat somit nur unter reduziertem Eigengewicht stattgefunden.

Ferner interessiert für die Sicherheit der Auslassorgane vor allem die Stabilität der Böschung, die sich in unmittelbarer Nähe der Einlauföffnungen in den Sedimenten bilden kann. Im vorliegenden Beitrag werden deshalb die bodenmechanischen Eigenschaften in den Vordergrund gestellt. Sämtliche 6 Kornverteilungen der in den Bohrungen A bis C entnommenen Materialien (Fig. 3) weisen grösstenteils auf einen Silt geringer Plastizität (ML nach USCS) hin. Für sechs Proben in Tiefen von 1 bis 15 Metern ergeben sich folgende Mittelwerte :

• Fließgrenze - Limite de liquidité	wL	37.1 ± 2.9	[%]
• Ausrollgrenze - Limite de plasticité	wP	27.5 ± 2.0	[%]
• Plastizitätszahl - Indice de plasticité	IP	9.6 ± 2.1	[%]

An vier Proben aus Tiefen von 0 bis 15 Metern wurden ferner folgende Mittelwerte bestimmt :

• Wassergehalt - teneur en eau	w	53.6 ± 2.1	[%]
• Raumgewicht feucht - poids volumique apparent humide	$\gamma$	16.8 ± 0.5	[kN/m <sup>3</sup> ]
• Gewicht der Körner - poids volumique des grains	$\gamma_s$	27.8 ± 0.5	[kN/m <sup>3</sup> ]
• Trockenraumgewicht - poids volumique apparent sec	$\gamma_d$	11.0 ± 0.5	[kN/m <sup>3</sup> ]

#### 4. Caractéristiques des dépôts

Il convient ici de rappeler que les dépôts examinés ont été constitués entièrement sous l'eau et maintenus dans un état déjaugé jusqu'au moment de leur extraction. Pour autant qu'on puisse parler de consolidation, celle-ci n'a pu se produire que sous l'effet d'un poids propre réduit.

En outre, pour la sécurité de fonctionnement des organes de sortie, c'est avant tout la stabilité des talus de sédiments proches qu'il faut considérer. C'est pourquoi la présente contribution s'intéresse principalement aux caractéristiques géotechniques des dépôts constitués. La totalité des 6 distributions granulométriques des matériaux extraits des forages A à C (Fig. 3) peuvent être assimilées à des limons de faible plasticité (ML selon la classification USCS). Pour six échantillons prélevés à des profondeurs entre 1 et 15 mètres, les valeurs moyennes suivantes ont été obtenues :

Sur quatre échantillons prélevés à des profondeurs entre 0 et 15 m, les valeurs moyennes suivantes ont été obtenues :



Daraus geht hervor, dass die letzten Endes im Labor eingetroffenen Sedimentproben nur noch, aber immerhin, einen Sättigungsgrad von 97% aufwiesen. Ferner lassen die Werte auf ein Porenvolumen von 61% schliessen, was heisst, dass die Ablagerungen über die Hälfte ihres Volumens aus Wasser bestehen.

Die triaxialen Scherfestigkeitsversuche mussten aus versuchstechnischen Gründen an sehr gering konsolidierten, gesättigten und undrainierten Proben durchgeführt werden. Entsprechend war das Trockenraumgewicht mit  $\gamma_d = 13 \text{ kN/m}^3$  höher als in Wirklichkeit. Dementsprechend dürfte der tatsächliche Reibungswinkel um etwa  $3^\circ$  kleiner sein.

Beim letzten der insgesamt vier Versuche wurde der Bruch durch die Reduktion des Seitendruckes erzeugt. Dadurch sollte die Scherfestigkeit des nach einem Rutsch noch verbleibenden Materials getestet werden. Da nur eine Probe mittels Dekompression getestet wurde, musste  $\varphi'$  von den drei anderen Versuchen übernommen werden. Die sich daraus ergebende hohe Kohäsion kann sich durch den bei der seitlichen Entlastung entstehenden Porenwasserunterdruck, der tatsächlich gemessen wurde, erklären. Die Mittelwerte aus den Triaxialversuchen sind wie folgt :

Eigenschaften der Ablagerung Caractéristiques des dépôts	Kompression Compression	Dekompression Décompression
Reibungswinkel - Angle de frottement, $\varphi'$ [°] Kohäsion – Cohésion, $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	32 11	32 55

Die Mittelwerte aus Kompressions-Triaxialversuchen stammen von 3 Proben aus Tiefen von 0 bis 20 Metern.

Die Kohäsion aus dem Dekompressions-Triaxialversuch stammt aus einer Probe aus 20 Metern Tiefe.

## 5. Stabilitätsanalysen

Bildet sich infolge Wasserentnahme in den Sedimenten ein Trichter, können dessen Wände im Laufe der Zeit, zum Beispiel durch Zunahme der Sedimentstärke, instabil werden. Bei grossen Höhen der Trichterwände, bei Luzzzone erreichen diese eine Höhe von über 18 m, können somit grosse Sedimentmengen spontan dem Auslassorgan zufließen. Dabei stellen sich zwei Fragen :

- wie steil können Trichterwände sein und
- lassen sich die abgerutschten Sedimente durch erneute Wasserentnahme, z.B. Spülen des Grundablasses, wieder entfernen ?

Zur Beantwortung der Frage nach der Steilheit der Trichterwände dienten im Stausee Luzzzone bathymetrische Messungen (Fig. 6) sowie Volumenermittlungen der bei den Spülungen abgeführten Sedimentmengen. Dabei wurde angenommen, dass bei der Spülung um die in der Talflanke liegende Grundablassöffnung ein halber, gerader Kreiskegelstumpf mit dem unteren Radius von 6 m und einer Höhe von 18 m entsteht. Bei bekanntem Volumen konnte der Öffnungswinkel, der dem

Il résulte de ces analyses que, lors de leur analyse au laboratoire, les échantillons présentaient encore un degré de saturation de 97%. Le volume de vides était de 61%, ce qui signifie que les dépôts sont constitués d'eau pour plus de la moitié de leur volume.

Pour des raisons techniques, les essais de cisaillement triaxiaux ont dû être réalisés sur des échantillons très peu consolidés, saturés et non drainés. Le poids volumique apparent sec, avec une valeur  $\gamma_d = 13 \text{ kN/m}^3$ , était de ce fait plus élevé que dans la réalité. En conséquence, l'angle de frottement effectif devrait être d'environ  $3^\circ$  plus faible.

Pour le dernier des quatre essais, la rupture a été produite avec une réduction de la contrainte latérale. Cette manière de faire visait à tester la contrainte de cisaillement du matériau en place après une rupture de talus. Etant donné que seul un échantillon a été testé en décompression, l'angle de frottement  $\varphi'$  a dû être déterminé à partir des trois autres échantillons. La cohésion élevée qui en résulte peut s'expliquer par la pression interstitielle négative qui a été réellement mesurée lors de la décompression latérale.

Les valeurs moyennes résultant des essais triaxiaux sont les suivantes :

Les valeurs moyennes résultant des essais triaxiaux en compression proviennent de trois échantillons prélevés à des profondeurs entre 0 et 20 m. La cohésion obtenue par l'essai triaxial en décompression provient d'un échantillon prélevé à une profondeur de 20m.

## 5. Analyses de stabilité

Lorsqu'un cône se forme à l'entrée de la vidange de fond suite à une opération de purge, ses parois peuvent devenir instables au cours du temps consécutivement, par exemple à l'augmentation de la couche de sédiments. Pour des grandes hauteurs de dépôts importantes, comme à Luzzzone où la couche de sédiments atteint plus de 18 m, de quantités de matériaux peuvent ainsi être mises en mouvement en direction de l'organe de vidange. Deux questions se posent alors :

- Quelles pentes peuvent atteindre les parois du cône ?
- Les sédiments éboulés peuvent-ils être évacués par une nouvelle purge de la vidange de fond ?

Pour répondre à la première question, les mesures bathymétriques effectuées à Luzzzone (Fig. 6) ainsi que les volumes de sédiments évacués lors des purges ont été analysés. Il a été admis qu'un demi tronç de cône de diamètre de base égal à 6 m et d'une hauteur de 18 m se forme devant l'entrée de la vidange de fond. Pour les volumes connus, l'angle d'ouverture correspondant à l'angle du talus a ainsi pu être calculé.

Böschungswinkel entspricht, berechnet werden. Die Resultate zeigen, dass, je nach abgeführtem Volumen, um eine Spülöffnung Trichterwände von ganz unterschiedlicher Steilheit auftreten können. Dies als Folge der im Moment vorherrschenden Kohäsion. Reduziert sich letztere auf sehr geringe Werte, stellen sich Böschungen ein, deren Winkel in etwa dem Reibungswinkel der Sedimente, im vorliegenden Fall rund 30°, entspricht. Dieser Zustand wird nach den Erfahrungen in Luzzone vor allem nach wiederholten der Spülungen in einem Abstand von 10 bis 20 Tagen erreicht.

Les résultats montrent que, selon les volumes évacués, des parois de pentes très différentes peuvent se produire à l'intérieur du cône, en fonction de la cohésion régnant sur le moment. Si cette dernière se réduit à des valeurs très faibles, les talus correspondent environ à l'angle de frottement des sédiments qui, dans le cas présent, se situe aux environs de 30°. Cet état est atteint à Luzzone lorsque les purges sont répétées avec un intervalle de 10 à 20 jours.

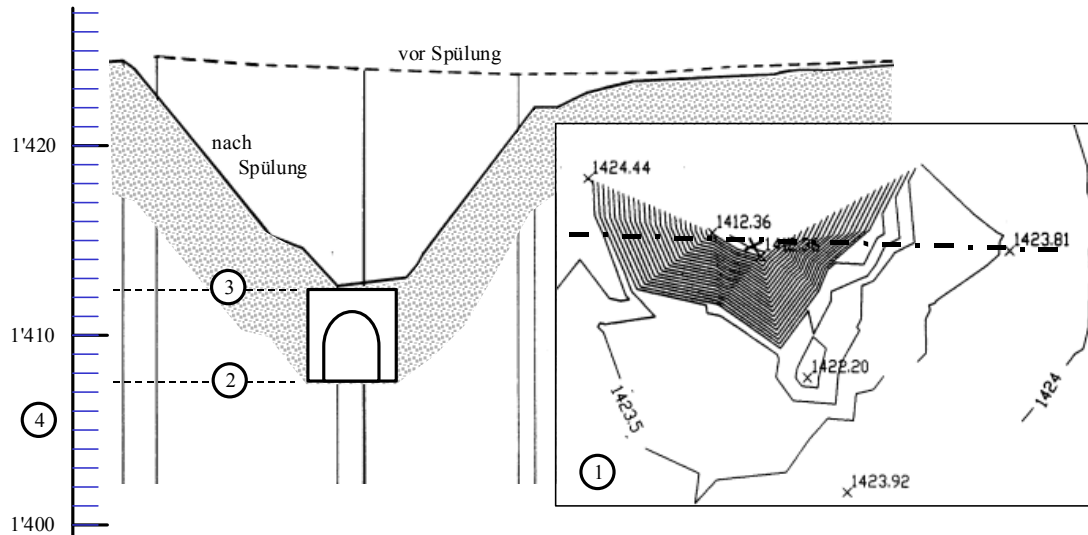


Fig. 6. Einlauftrichter in den Seesedimenten beim Grundablass, durch Echotmessungen vor und nach der Spülung vom 4.6.1992 bestimmt. ① Grundriss mit Höhenkurven 0.50 m mit Profilachse, ② Einlaufschwelle des Grundablass, ③ Oberkante des Grundablass, ④ Vertikaler Massstab in m ü. M.

Bathymétrie de la zone d'entrée de la vidange de fond mesurée par échosondage avant et après la purge du 4.6.1992. ① Situation avec courbes de niveaux équidistantes de 0.50 m et axe de coupe verticale, ② Seuil d'entrée de la vidange de fond, 1'407.70 m s.m., ③ Cote supérieure de la dalle à l'entrée de la galerie, 1'412.30 m s.m., ④ Echelle des altitudes en m s.m.

Die Erfahrung hat auch gezeigt, dass die neu im Trichter abgelagerten Sedimente, die diesen im Extremfall fast gänzlich auffüllen können, aber auch die zwischen zwei Spülungen aus der Trichterwand abgerutschten Sedimente problemlos durch erneutes Spülen entfernt werden können. In der Tat verhalten sich die mit Wasser gesättigten Sedimente bei geringster Störung wie eine Flüssigkeit. Nur wenn die Sedimente durch eine Sickerströmung einer Konsolidation unterworfen werden, können sich diese ganz erheblich verfestigen.

Wird die Sickerströmung durch eine undichte Schütze erzeugt, kann sich hinter dieser ein Sedimentpfropfen bilden, der unter Umständen die Spülung beeinträchtigt. Auch dieses Phänomen wurde bereits beobachtet. Durch die Wasserspiegelabsenkung können ebenfalls Trübestrome ausgelöst werden, welche im Verlaufe der Spülung grössere Mengen an Sedimenten vom durch die Absenkung freigelegten Uferbereich direkt zum Grundablass bringen können.

L'expérience a également montré que les sédiments fraîchement déposés dans le cône ou ceux qui ont glissé sur ses parois peuvent être évacués totalement par une opération de purge, même si le cône peut être presque entièrement comblé dans les cas extrêmes. En fait, sous l'influence de faibles perturbations, les sédiments saturés d'eau se comportent pratiquement comme un fluide. Toutefois, lorsque les sédiments sont consolidés par drainage, ils peuvent se solidifier de manière importante.

Par exemple, lorsque des fuites se produisent à travers une vanne non parfaitement étanche, un bouchon de sédiments peut se former derrière celle-ci. Ce phénomène, déjà observé en réalité, peut dans certaines circonstances contrarier la purge.

Des courants de turbidité peuvent également être déclenchés par effondrement des dépôts sous l'effet de l'abaissement du plan d'eau au cours d'une purge. De grandes quantités de sédiments sont alors apportées directement vers la vidange de fond.

## 6. Schlussfolgerungen

Die in der Einleitung gestellte Frage bezüglich der Eigenschaften junger Sedimente in Speicherseen, die bei Spülungen ohne vollständige Entleerung im Speicher verbleiben, kann wie folgt beantwortet werden :

- Sedimentformationen im Silt-Sandbereich bewahren, selbst bei beachtlichen Schichtstärken von weit über 10 m, eine äusserst geringe Lagerungsdichte.
- Deutlich mehr als die Hälfte des Volumens besteht auch nach vielen Jahren aus Wasser.
- Die geringste Böschungsneigung von Einlauftrichtern bei Auslässen entspricht in etwa dem Reibungswinkel der Sedimente.
- Infolge unterschiedlicher, sich über die Zeit verändernde Kohäsion können sich auch steilere Böschungen einstellen.
- In den Einlauftrichter abgerutschte oder sich darin neu gebildete Sedimente können problemlos durch Spülen entfernt werden.
- Wo Sedimente bis zum Abschlussorgan gelangen, ist sicherzustellen, dass letzteres absolut dicht schliesst. Bei Leckstellen besteht die Gefahr, dass die Sedimente infolge der entstehenden Sickerströmung im Einlaufbereich konsolidieren und zur Pfropfenbildung neigen.

### Verdankung

Die Arbeiten standen im Rahmen des vom LCH bearbeiteten Projektes "Verlandung von Stauseen", welches vom Projekt- und Studienfonds der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (PSEL) unterstützt wurde (Sinniger, Boillat et al., 1997). Die weiterführende Studie zum Durchgang von Trübeströmen in Stauseen war Gegenstand einer Doktorarbeit (De Cesare, 1998). An dieser Stelle sei ebenfalls die wertvolle Unterstützung bei der Durchführung der Studie durch Mitarbeiter der EAWAG, sowie der Blenio Kraftwerke AG, in deren Auftrag die Untersuchungen durchgeführt wurden, verdankt.

### Literaturnachweis / Références bibliographiques

- *Beyer Portner N. (1998). Erosion des bassins versants alpins par ruissellement de surface. Thèse EPFL No 1815 et Communication du Laboratoire de constructions hydrauliques LCH N° 6*
- *De Cesare G. (1998). Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. Thèse EPFL No 1820 et Communication du Laboratoire de constructions hydrauliques LCH N° 7*
- *Sinniger R., Boillat J.-L., Beyer Portner N., De Cesare G. (1997). Alluvionnement des retenues, Rapport final PSEL N° 31 / Rapport EPFL-LCH N° 15/97*
- *Sinniger R., Boillat J.-L. (1995). Barrage de Luzzzone - Analyse de la stabilité des dépôts, Rapport EPFL-LCH N° 6/95*

### Adressen der Verfasser / Adresses des auteurs

- Prof. *Richard O. SINNIGER*, dipl. Bauing. ETH, Sonnenbergstrasse 36, CH-8708 Männedorf
- Dr. sc. techn. *Giovanni DE CESARE*, dipl. Bauing. EPF
- Dr. sc. techn. *Jean-Louis BOILLAT*, dipl. Bauing. ETH, Laboratoire de constructions hydrauliques - LCH, EPFL, CH-1015 Lausanne  
<http://lchwww.epfl.ch> \* e-mail: [secretariat.lch@epfl.ch](mailto:secretariat.lch@epfl.ch)

## 6. Conclusions

A la question, concernant les propriétés de sédiments récents des lacs d'accumulation qui ne peuvent être évacués par les opérations de purge sans vidange totale, il peut être répondu comme suit :

- Les formations sédimentaires du domaine sable-limons conservent une densité extrêmement faible, même dans des couches d'épaisseur supérieure à 10 m.
- Même après plusieurs années, plus de la moitié du volume des dépôts reste constituée d'eau.
- La plus faible pente de talus des cônes dégagés à l'entrée des ouvrages de vidange est approximativement égale à la pente de frottement des matériaux sédimentaires.
- En relation avec la cohésion qui peut varier en fonction du temps, des pentes plus raides peuvent également s'établir.
- Les sédiments effondrés dans le cône ou fraîchement décantés peuvent être purgés sans problème.
- Lorsque des sédiments parviennent jusqu'à l'organe de fermeture, il convient de s'assurer que ce dernier est parfaitement étanche. Dans le cas contraire, le danger existe que les sédiments drainés se consolident derrière la vanne et conduisent à la formation de bouchons.

### Remerciements

Les travaux présentés ici ont été réalisés dans le cadre du projet "Alluvionnement des retenues" traité par le LCH et soutenu par le fonds d'études et de projets de la société suisse des électriciens (PSEL) (Sinniger, Boillat et al., 1997). L'étude suivante concernant les écoulements de turbidité dans les retenues a fait l'objet d'un travail de doctorat (De Cesare, 1998). Dans ce contexte, il convient de mentionner le précieux soutien de l'EAWAG ainsi que des Forces Motrices de Blenio SA pour le compte desquelles les investigations ont été effectuées. Nous tenons à remercier tous ces organismes et leurs collaborateurs qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.