

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 92 (2000)
Heft: 1-2

Artikel: Eigenschaften junger Sedimente in Speicherseen
Autor: Sinniger, Richard O. / De Cesare, Giovanni / Boillat, Jean-Louis
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940230>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.05.2025

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

Eigenschaften junger Sedimente in Speicherseen

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



Bild 1. Lageplan und Aufnahme des Speichers Luzzzone im nördlichen Tessin.

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 deren 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 entgegenzusetzen 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 Luzzzone-Talsperre der Blenio Kraftwerke AG wurde zwischen 1958 und 1963 in der Nähe der Ortschaft Olivone im Nordtessin erbaut (Bild 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 m³. Die wichtigsten hydraulischen Anlageteile sind ein Grund- und Mittelablass, eine Triebwasserfassung in der Mauer sowie eine mit Schützen ausgerüstete Hochwasserentlastung.

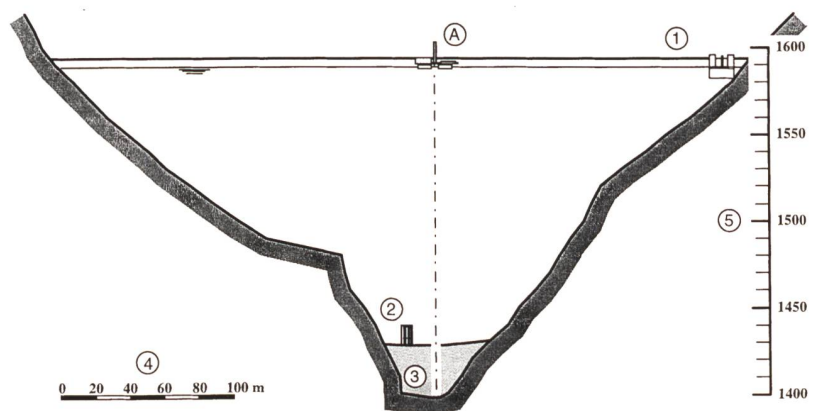


Bild 2. Querprofil mit Auflandung im Nahbereich der Mauer mit schematischer Darstellung der dortigen Kernbohrung A, die Mächtigkeit beträgt ca. 25 m.

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

Zwischen 1995 und 1998 wurde die Talsperre um 17 m auf 225 m erhöht. Dadurch vergrössert sich das Nutzvolumen des Jahres-speichers um 20 Mio m³ auf 107 Mio m³. Dies erlaubt die zusätzliche Umlagerung von rund 60 GWh im Sommer anfallender Energie in das Winterhalbjahr.

Das direkte Einzugsgebiet des Speichers beträgt 36,7 km². Neun Wasserfassungen und zwei entsprechende Zuleitungen sammeln zusätzlich die Sommerabflüsse und erhöhen das Einzugsgebiet des Stausees auf total 107 km².

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 Luzzzone:

- Totaler Sedimenteintrag 1963-1994	V_{tot} 1 200 000 [m ³]
- Mittlerer jährlicher Eintrag	V_a 38 000 [m ³ /Jahr]
- Im See vorhandene Sedimente 1994	V_{sed} 900 000 [m ³]

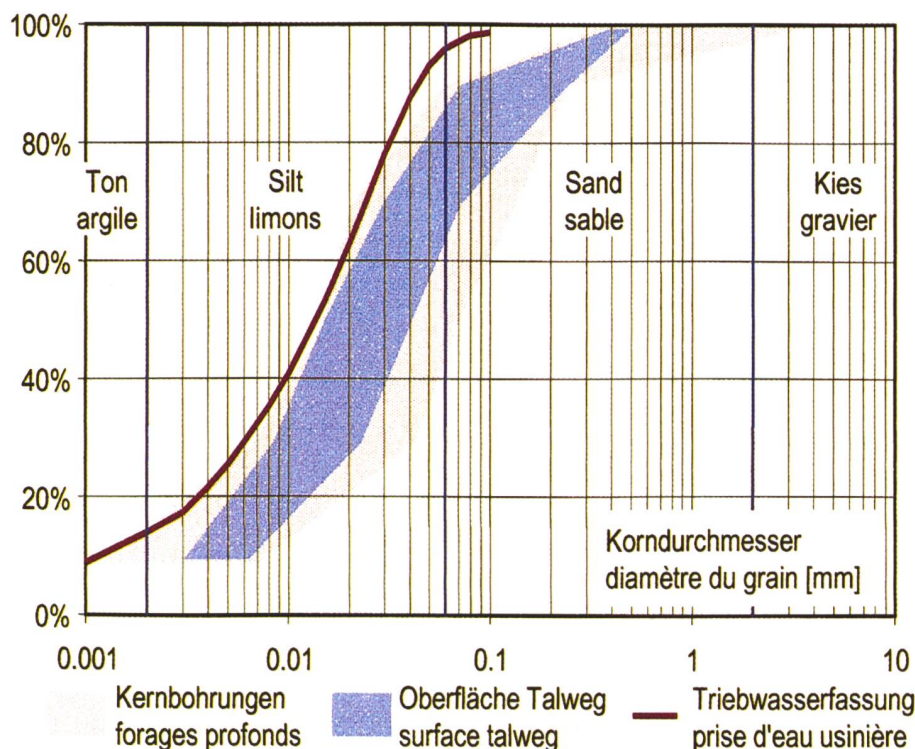


Bild 3. Streubereiche der Kornverteilungen der Seesedimente an der Oberfläche des Talwegs über 1500 m und der Kernbohrungen in Staumauernähe mit der Mittelkurve der durch Taucher entnommenen Proben bei der Triebwasserfassung.

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 Luzzzone erreicht zurzeit die Auflandung im Nahbereich der Mauer und in der unmittelbaren Umgebung des Grundablasses eine Mächtigkeit von ungefähr 18 m. Die Einlaufbauwerke der Triebwasserleitung und des Grundablasses sind somit unmittelbar betroffen (Bild 2).

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 Bild 3 dargestellt und lässt erkennen, dass 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 oberliegender Verschlussklappe beim Hochziehen meistens wieder ausflossen, obwohl die selben Sedimente dem Eindringen des Gerätes etwelchen Widerstand entgegensetzten, was die Entnahmetiefe erheblich reduzierte. Die längere der Proben wurde für weitere Analysen verwertet, wobei im vorliegenden Kontext lediglich die Kornverteilung (Bild 3) wiedergegeben sei.

3.3 Kernbohrungen

Ein kontinuierlicher, die gesamte Sedimentschicht erfassender Aufschluss erforderte letzten Endes Kernbohrungen von der Seeoberfläche aus (Bild 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 drei Bohrungen Sedimente einer Mächtigkeit von 21,4 m (A), 6,0 m (B) und 5,6 m (C) erbohrt (Bild 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 konnten. Weitere 15,65 m waren in stark gestörtem Zustand und 4,50 m waren als Verlust zu bezeichnen.

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 des-

halb die bodenmechanischen Eigenschaften in den Vordergrund gestellt. Sämtliche sechs Kornverteilungen der in den Bohrungen A bis C entnommenen Materialien (Bild 3) weisen grösstenteils auf einen Silt geringer Plastizität (ML nach USCS) hin. Für sechs Proben in Tiefen von 1 bis 15 m ergeben sich folgende Mittelwerte:

– Flie遝grenze	wL	$37,1 \pm 2,9$ [%]
– Ausrollgrenze	wP	$27,5 \pm 2,0$ [%]
– Plastizitätszahl	IP	$9,6 \pm 2,1$ [%]

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

– Wassergehalt	w	$53,6 \pm 2,1$ [%]
– Raumgewicht feucht	γ	$16,8 \pm 0,5$ [kN/m ³]
– Gewicht der Körner	γ_s	$27,8 \pm 0,5$ [kN/m ³]
– Trockenraumgewicht	γ_d	$11,0 \pm 0,5$ [kN/m ³]

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 zu über der 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 $\gamma_d = 13$ kN/m³ höher als in Wirklichkeit. Dementsprechend dürfte der tatsächliche Reibungswinkel um etwa 3° 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 φ' 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 in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Mittelwerte aus Kompressions-Triaxialversuchen stammen von drei Proben aus Tiefen von 0 bis 20 m.

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



Bild 4. Bohrplattform am Standort © im Stausee Luzzone mit vier Querverankerungen.

Eigenschaften der Ablagerung	Kompression	Dekompression
Reibungswinkel, φ' [°]	32	32
Kohäsion, c' [kN/m ²]	11	55

Tabelle 1. Mittelwerte aus den Triaxialversuchen.

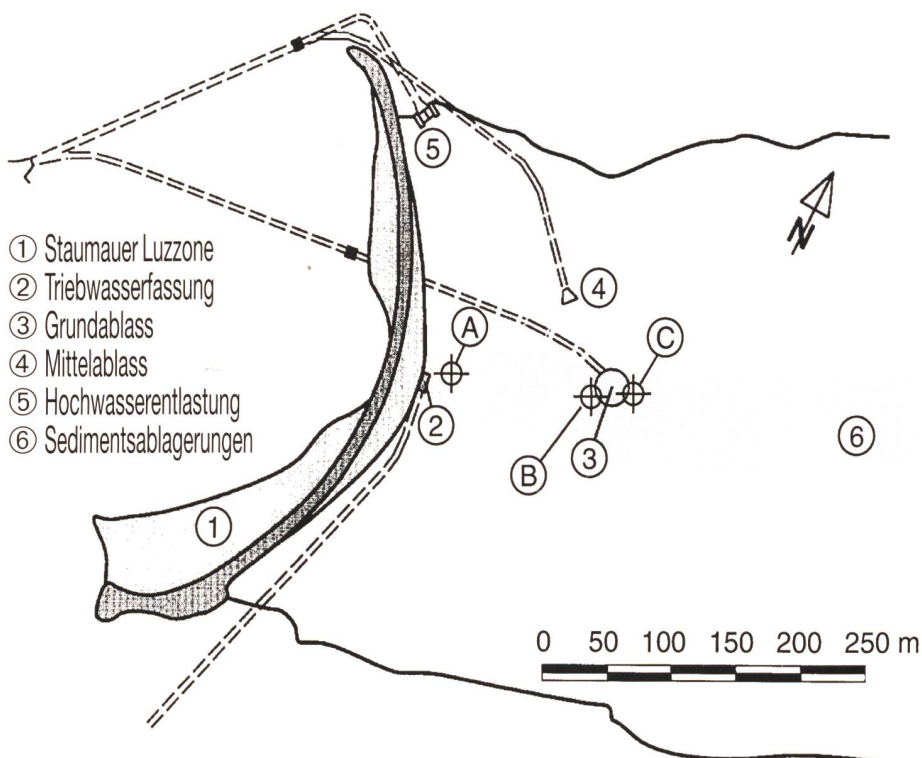


Bild 5. Bohrungen A in Staumauernähe, B und C unterhalb und oberhalb des Einlauftrichters des Grundablasses.

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 Luzzone erreichen diese eine Höhe von über 18 m – können somit grosse Sediment-

mengen 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 (Bild 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 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 Luzzzone vor allem nach Wiederholen der Spülungen in einem Abstand von 10 bis 20 Tagen erreicht.

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.

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-Sand-Bereich 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 verändernder 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.

Dank

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 Trübestremen 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.

Literatur

- Beyer Portner N. (1998): Erosion des bassins versants alpins par ruissellement de surface. Thèse EPFL n° 1815 et Communication du Laboratoire de constructions hydrauliques LCH n° 6.
- De Cesare G. (1998): Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. Thèse EPFL n° 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.

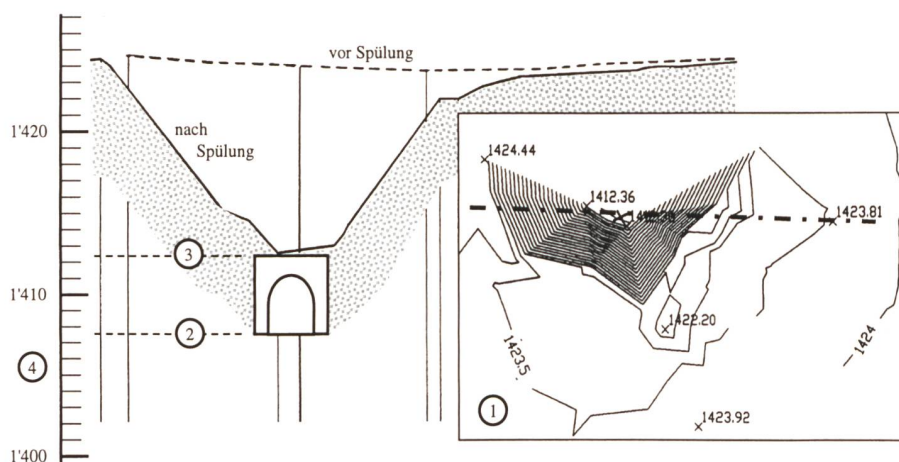


Bild 6. Einlauftrichter in den Seesedimenten beim Grundablass, durch Echolotmessungen vor und nach der Spülung vom 4. Juni 1992 bestimmt. ① Grundriss mit Höhenkurven 0,5 m mit Profilachse, ② Einlaufschwelle des Grundablasses, ③ Oberkante des Grundablasses, ④ Vertikaler Massstab in m ü. M.

Adressen der Verfasser

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