

Staurationverlandung und Klimawandel: *alle sprechen davon, getan wird aber wenig!*

Prof. em. Dr. Anton Schleiss

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Honorary President ICOLD

Koordinator Hydropower Europe



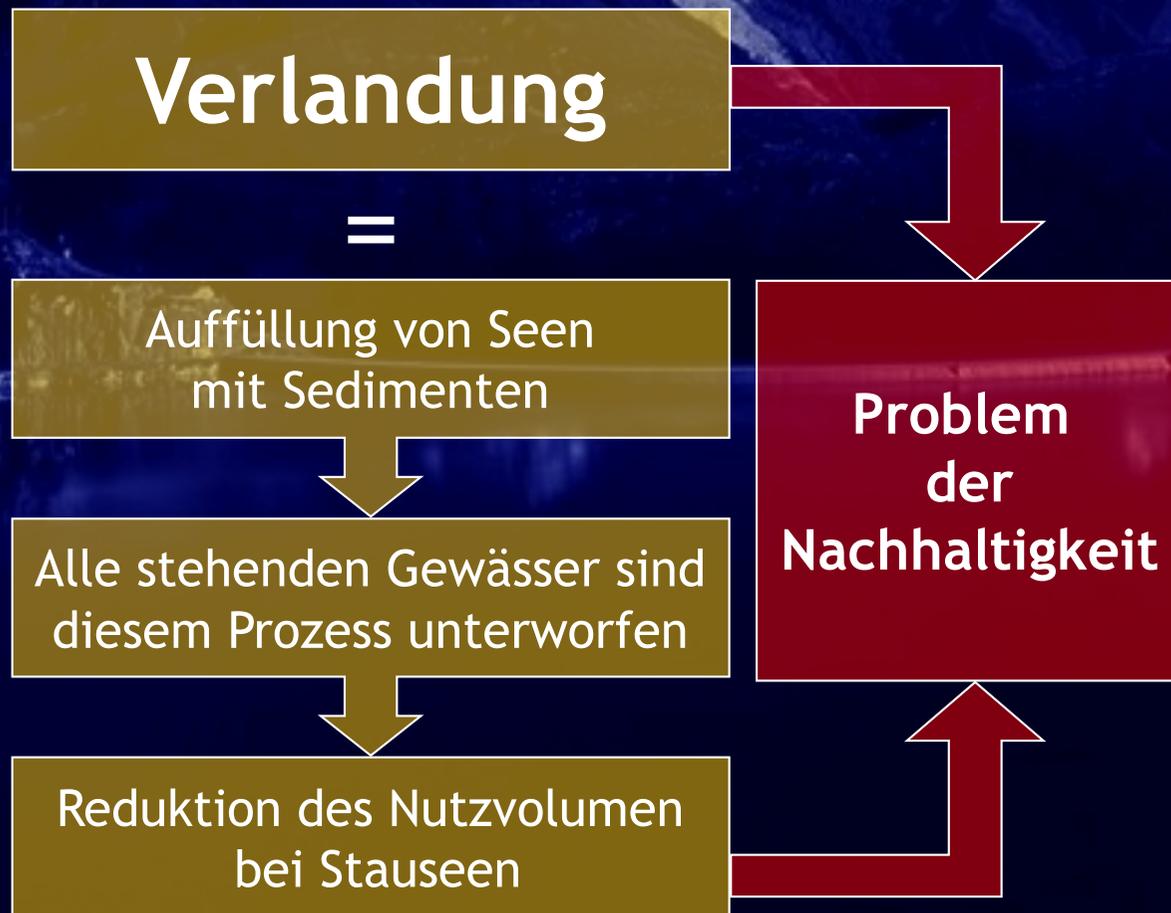
**3. INTERALPINE ENERGIE- & UMWELTTAGE
Prutz 27.-28. Februar 2020**

The EPFL logo, consisting of the letters "EPFL" in a bold, red, sans-serif font.

Inhalt des Vortrages

1. Weltweite Bedeutung und Ursache der Verlandung
2. Stauraumverlandung und Herausforderung des Klimawandels
3. Massnahmen gegen Verlandung - Was wissen wir seit wann?
4. Trübestrome als Hauptursache der Verlandung von alpinen Stauseen
5. Beherrschung von Trübestromen - Fallstudie Stausee Livigno
6. Neuere Forschungserkenntnisse: Einfluss von Pumpspeicherbetrieb, Durchleiten von Trübestromen und Aufwirbeln von Feinsedimenten in Stauseen
7. Schlussfolgerungen

Bedeutung und Ursache der Verlandung



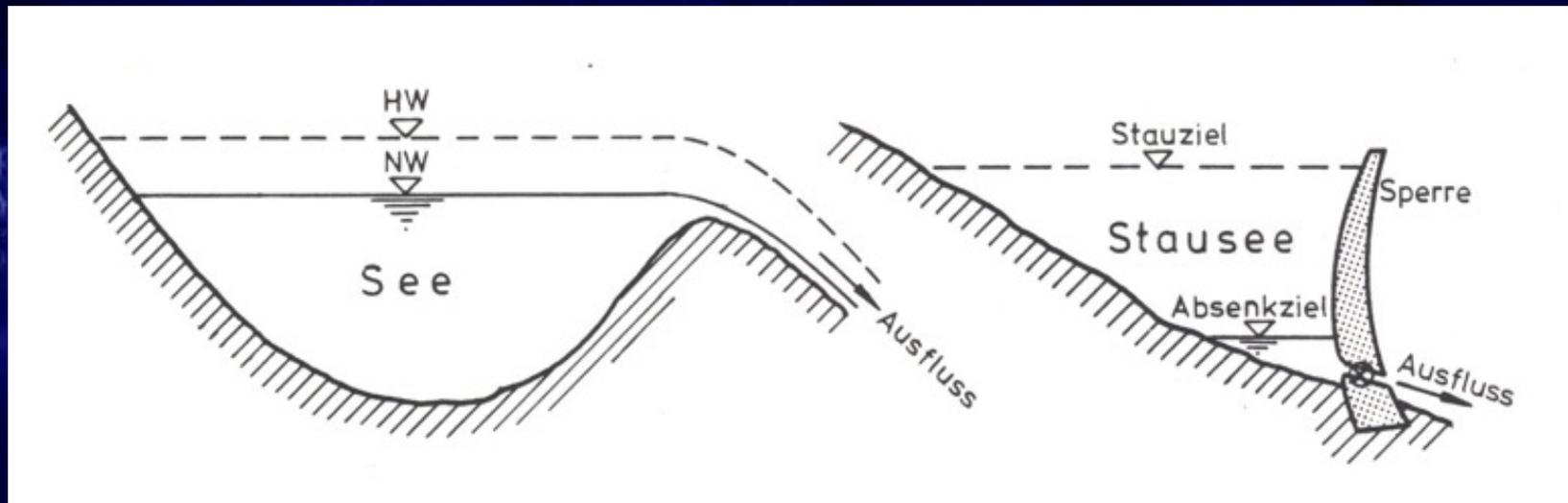
Staumauer Mauvoisin im Kt. Wallis



Sedimente vor Grundablass einlauf
bei Entleerung im Mai 1985

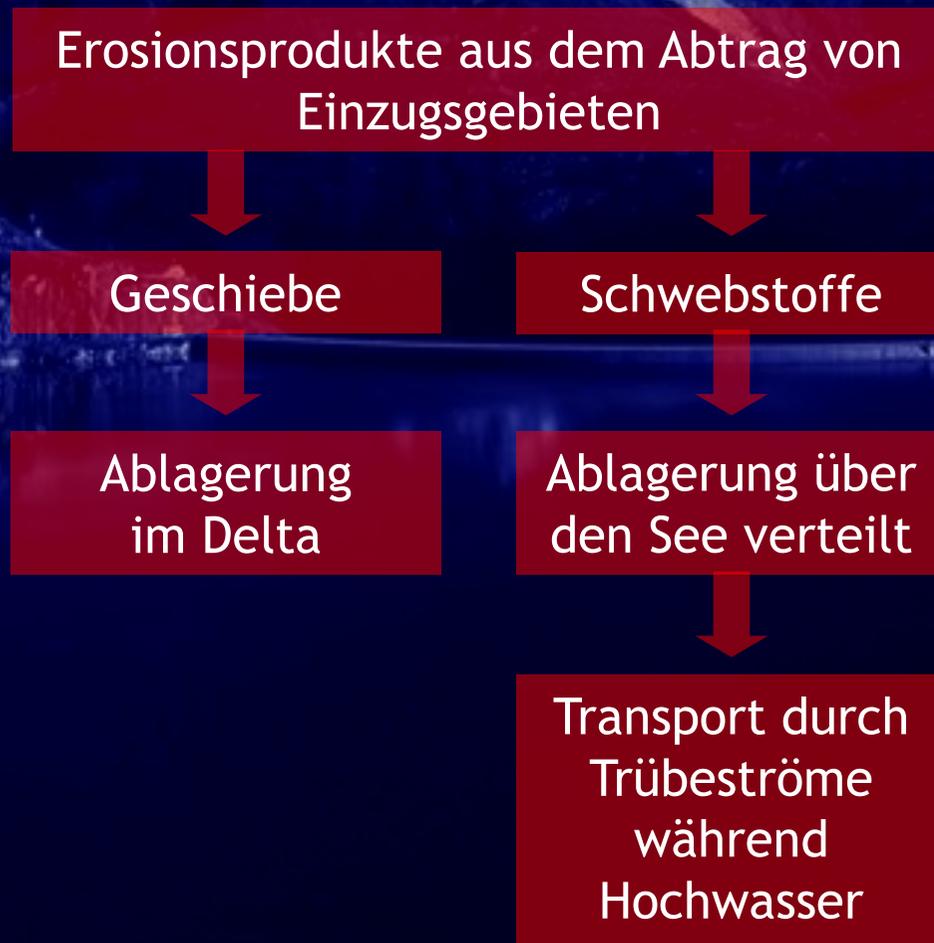
Bedeutung und Ursache der Verlandung

- Morphologische und hydrologische Besonderheiten von Stauseen



- Ursache der Verlandung
 - Eintrag von Geschiebe und Schwebstoffen
 - Bildung von Sediment durch biologische Prozesse
 - Zuwachsen durch Vegetation (Moorbildung)

Ursache der Verlandung und Prozesse

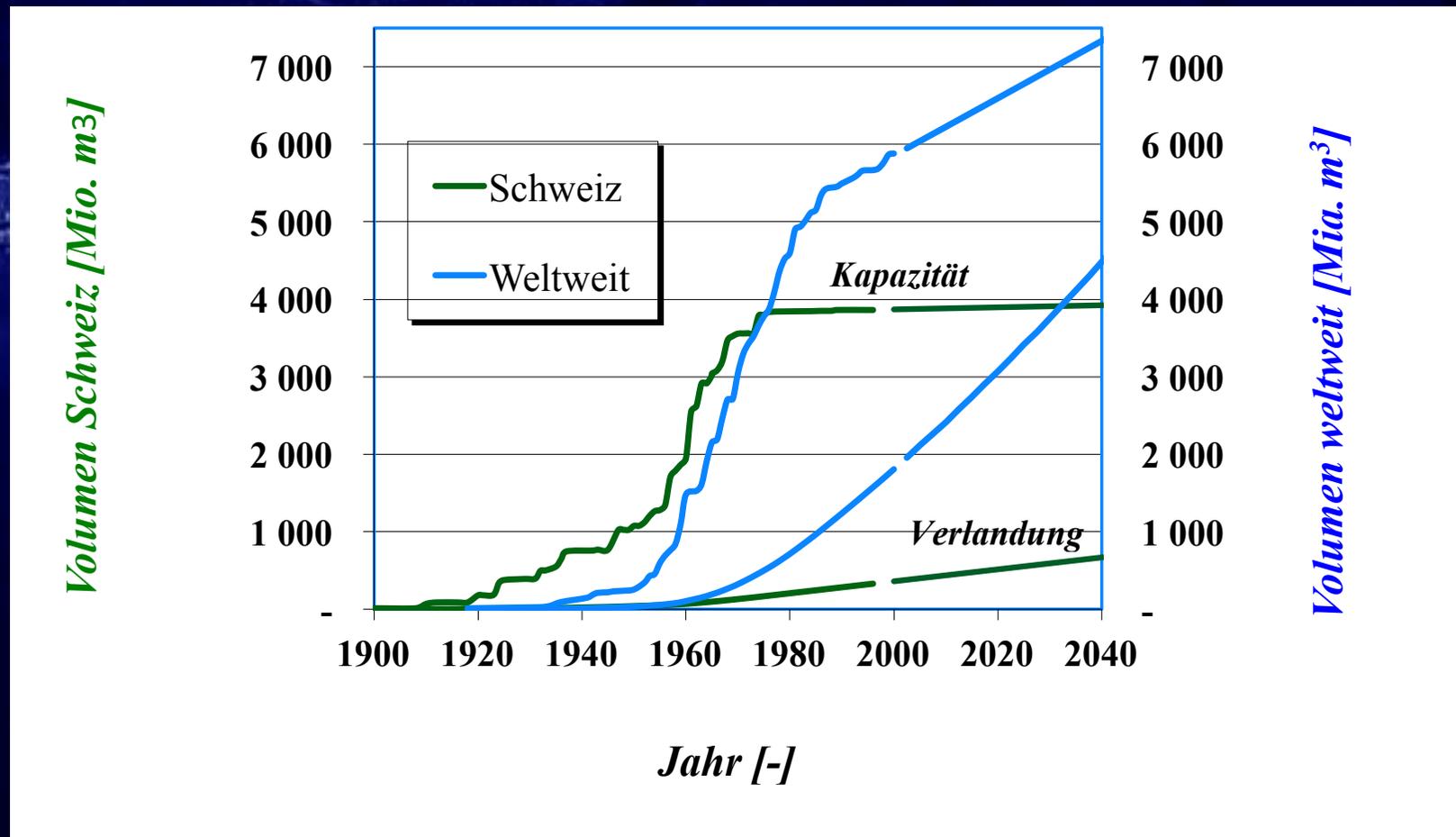


Stausee Mauvoisin während Entleerung im Mai 1985



Bedeutung der Stauraumverlandung

Durchschnittliche Abnahme der Stauseevolumen durch Verlandung in der Schweiz (0.2%/Jahr) und weltweit (1%/Jahr)



Vergleich mit Zunahme der Kapazität durch Bautätigkeit

Weltweite Bedeutung der Verlandung

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

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

Weltweite Bedeutung der Verlandung

- Ersatzinvestition der jährlich verloren gegangenen Speicherkapazität von 1 %: 16 - 24 Billionen \$/Jahr.
- **Kosten für den Betrieb und Unterhalt der bestehenden Speicher: 60 Billionen \$/Jahr geschätzt.**
- Weltweite Ertrag der Speicher: 125 Billionen \$/Jahr für Elektrizitätsproduktion; 50 bis 100 Billionen \$/Jahr für Bewässerung resp. Nahrungsmittelproduktion.
- **Die jährlichen Investitionsverluste durch die Verlandung betragen also etwa 25% bis 40% der Unterhalts- und Betriebskosten.**
- Im Vergleich dazu werden aber für Massnahmen gegen die Verlandung bei weitem nicht soviel investiert.

Stauraumverlandung und Herausforderung des Klimawandels

- Die nachhaltige Nutzung von Stauseen wird mehr und mehr durch die Verlandung gefährdet weil der Sedimenteintrag mit dem Klimawandel noch zunehmen wird.
- Dringende Massnahmen sind bereits heute bei vielen bestehenden Stauseen notwendig.
- Neue Stauseen müssen hinsichtlich ihrer Resilienz gegen Verlandung entworfen werden.



Einfluss der Klimaänderung Zunahme der Bodenerosion im alpinen Raum mit Rückzug der Gletscher



Zunge des Triftgletschers im September 2004 (OcCC - Kull)



Massnahmen gegen die Verlandung

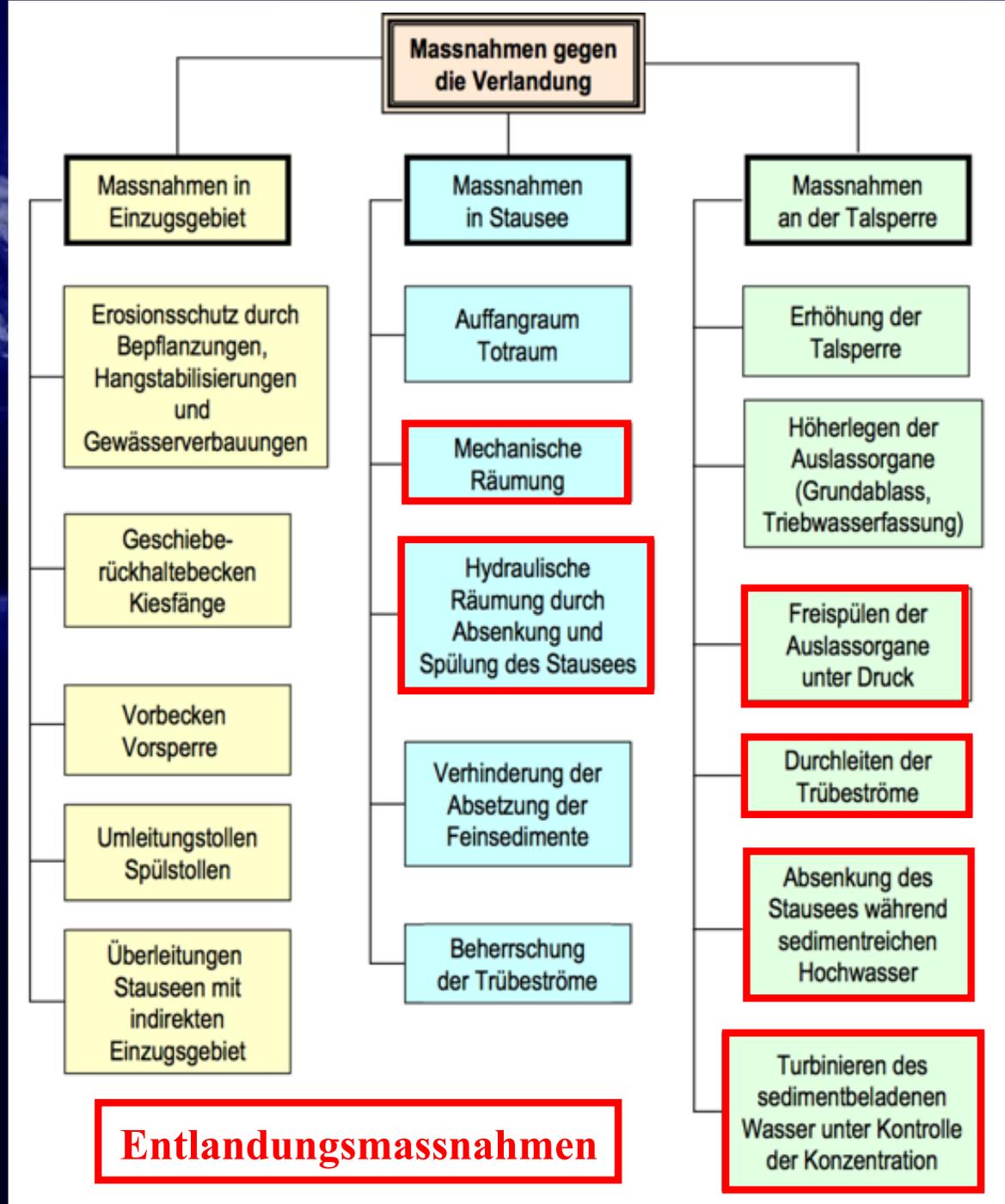
- Wann ?
 - Präventiv
 - Retroaktiv
- Wo ?
 - Einzugsgebiet
 - Stausee
 - Talsperre



Stausee Mauvoisin während Entleerung im Mai 1985



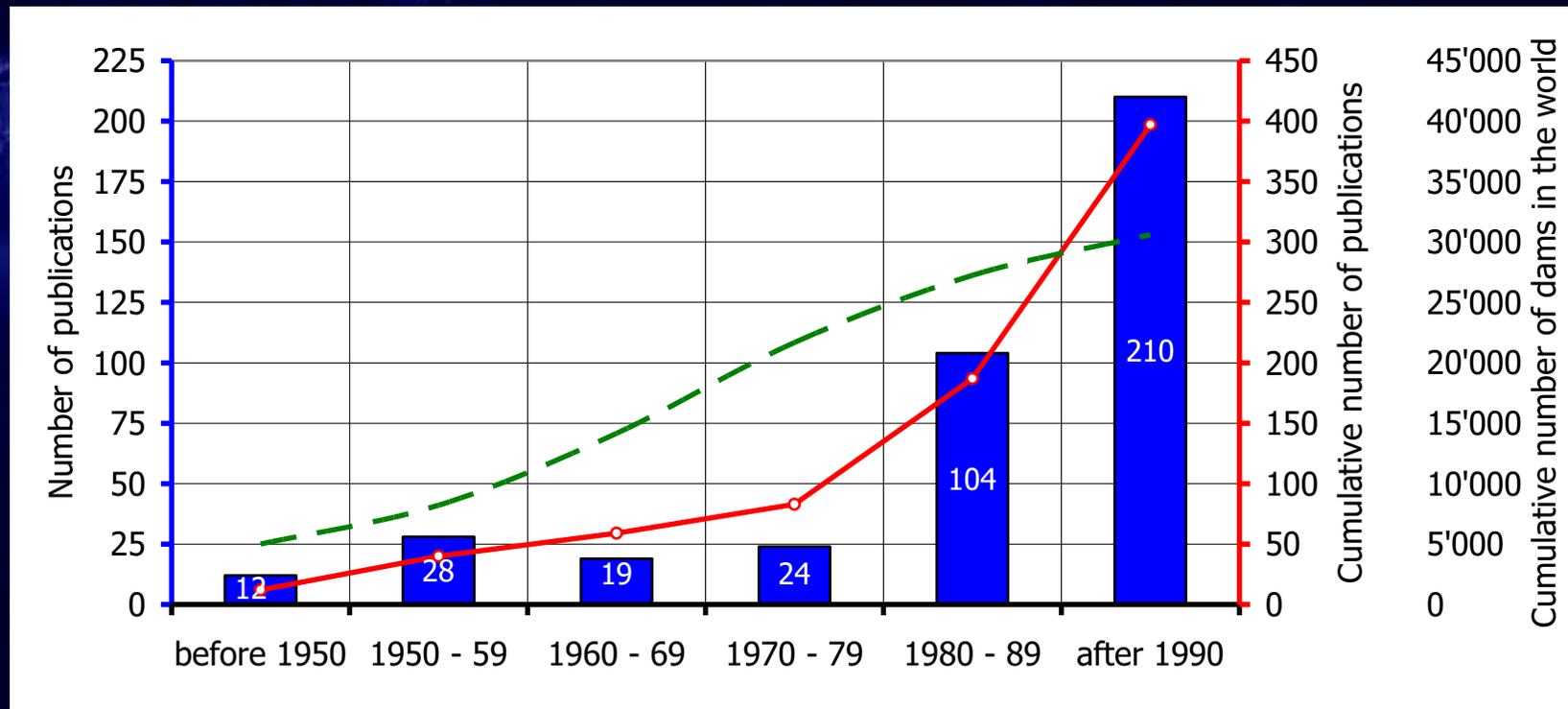
Massnahmen gegen die Verlandung sind seit langem bekannt



Problem der weltweiten Staauraumverlandung

Was wissen wir seit wann?

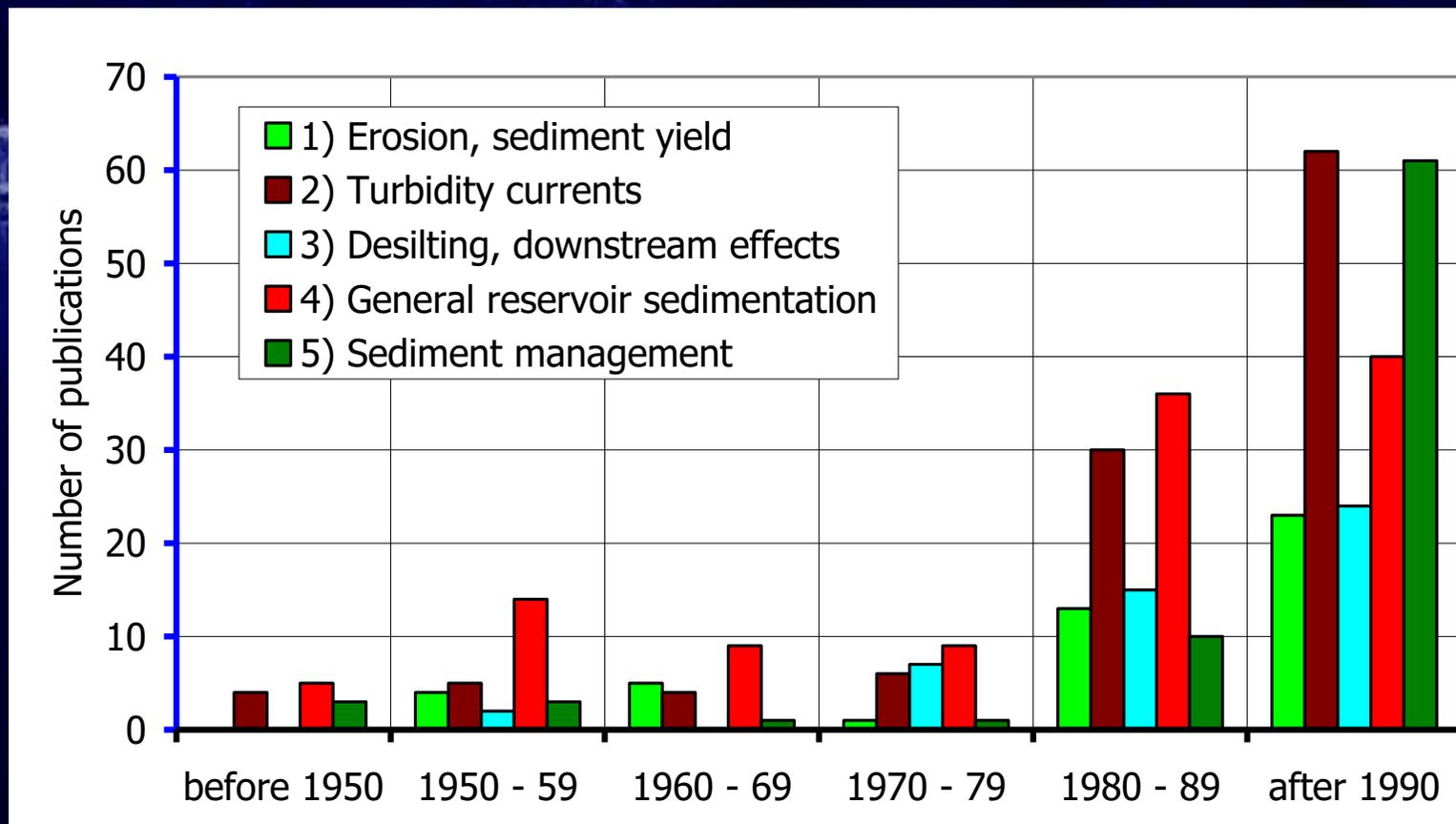
- Resultat der Analyse von 400 Publikationen seit Beginn de letzten Jahrhunderts bis 2005



Problem der weltweiten Staauraumverlandung

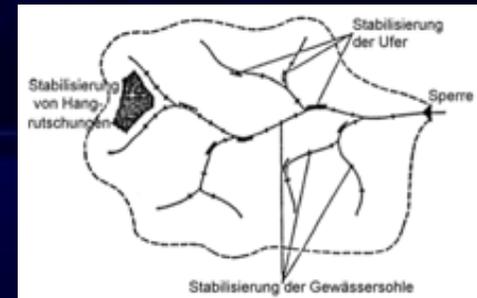
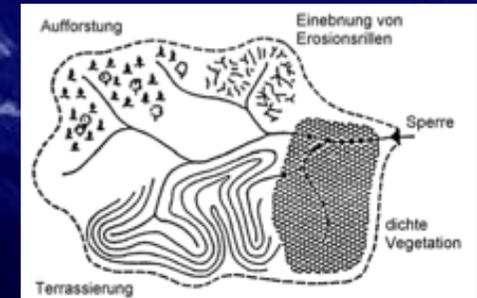
Was wissen wir seit wann?

- Publikationen zu Themen Sedimenteintrag, Trübeströme, Entlandung und Effekte flussabwärts, allgemein Staauraumverlandung und Sedimentbewirtschaftung



Entwicklung der Kenntnisse

- **Massnahmen gegen Oberflächenerosion** in Einzugsgebieten waren bereits vor 1950 in einigen betroffenen Ländern gut entwickelt



Old Aswan
Dam 1902



Hoover
Dam 1935



Gd. Dixence
Dam 1961



Tarbela
Dam 1976

1900

1950

2000

Entwicklung der Kenntnisse Massnahmen

- Methoden zur Abschätzung von Oberflächenerosionen in Einzugsgebieten wurden zwischen 1960 und 1970 entwickelt



Old Aswan
Dam 1902



Hoover
Dam 1935



Gd. Dixence
Dam 1961

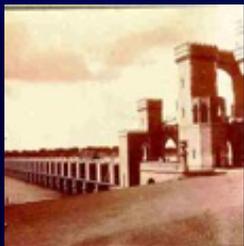


Tajbela
Dam 1976



Entwicklung der Kenntnisse

- Trübeströme wurden bereits vor 1950 beobachtet und die theoretischen Kenntnisse waren bereits vor 1980 vorhanden



Old Aswan
Dam 1902



Hoover
Dam 1935



Gd. Dixence
Dam 1961



Tarbel
Dam 1976

1900

1950

1980

2000

Entwicklung der Kenntnisse Massnahmen

- Entlandungsmassnahmen wie Spülungen und Baggerungen wurden bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts angewandt.



Entwicklung der Kenntnisse Massnahmen

- Methoden zur Abführung von eingetragenen Sedimenten wie Durchschleusen oder Durchleiten von Trübestrome (Venting) wurden bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts angewandt mit starken Zunahme seit 1970



Old Aswan
Dam 1902



Hoover
Dam 1935



Gd. Dixence
Dam 1961



Tarbela
Dam 1976

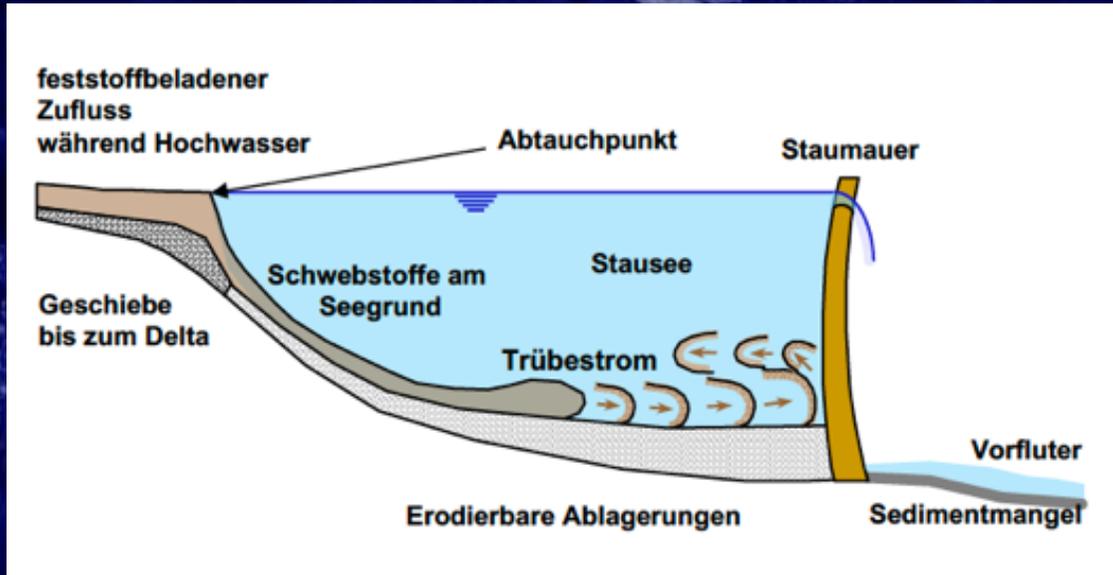
1900

2000

Beitrag von ICOLD hinsichtlich Staurationverlandung

- ❖ 1936 2nd Congress, Washington. Communication 5 "Silting of reservoirs"
- ❖ 1951 4th Congress, New Delhi. Q14 "Sedimentation in reservoirs and related problems"
- ❖ 1973 11th Congress, Madrid. Q40 "The consequences on the environment of building dams"
- ❖ 1976 12th Congress, Mexico. Q47 "The effect on dams and reservoirs of some environmental factors"
- ❖ 1982 14th Congress, Rio de Janeiro. Q56. "Reservoir sedimentation and slope stability..."
- ❖ 1997 19th Congress, Florence. Q74, "...Sedimentation including effects on structures, equipment, water quality and river downstream"
- ❖ 2009 23th Congress Brasilia. Q89 "Management of siltation in existing and new reservoirs"
- ❖ 2018 26th Congress Vienna. Q100 "Sedimentation and sustainable management"

Trübestrome als Hauptursache für den Sedimenttransport in alpinen Stauseen



Schematische Darstellung eines Trübestroms in einem Stausee

Abtauchen eines Trübestroms in den Lac Léman



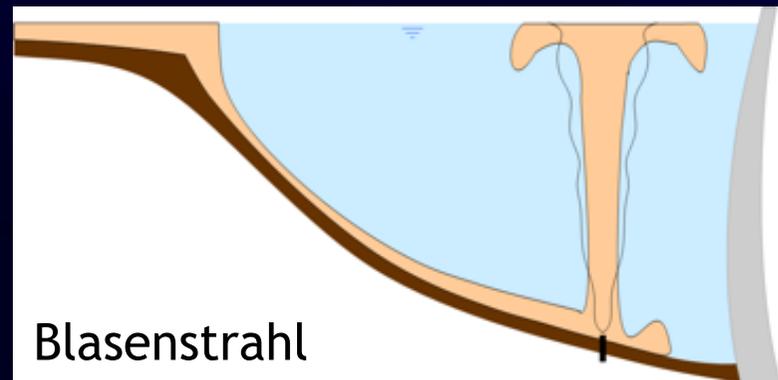
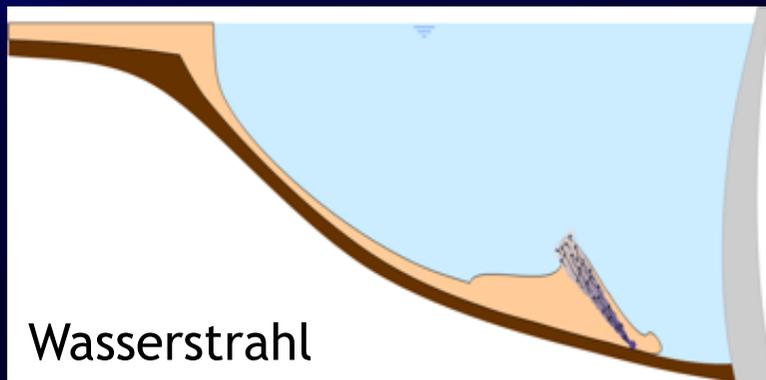
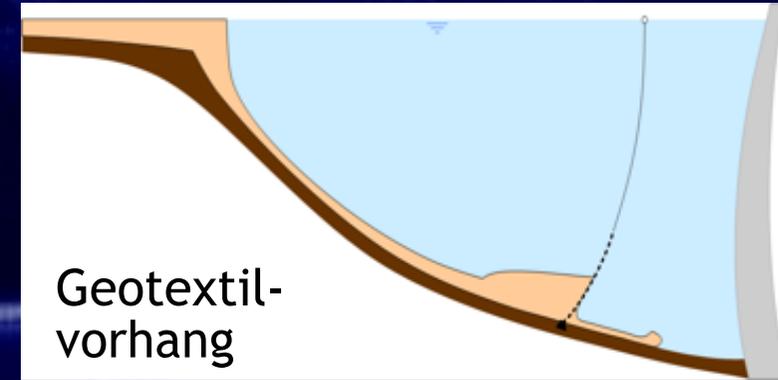
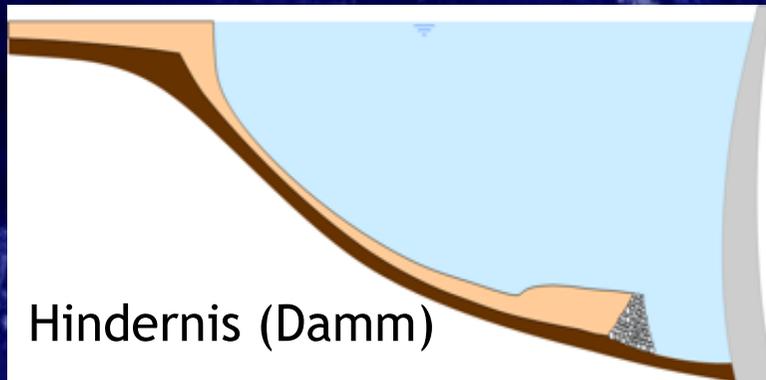
Beherrschung von Trübeströmen in Stauseen

- Technische Massnahmen und ihre Wirkung

Massnahme	Hindernisse	Rauhigkeits- elemente	Zuführung von Fremdenergie
Wirkung			
Stoppen	<ul style="list-style-type: none"> • Damm oder Mauer • Schwimmender oder fixer Geotextilvorhang 	<ul style="list-style-type: none"> • Gitter, Rechen • Buhnen • Schwellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Luftschleier • Wasserschleier
Verdünnen	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgelöste Gitterwände 	<ul style="list-style-type: none"> • Gitter, Rechen 	<ul style="list-style-type: none"> • Luftschleier • Wasserschleier • Mechanischer Mixer • Düsenmischer
Umleiten	<ul style="list-style-type: none"> • Leitdamm oder Leitmauer • Geotextilleitung • Schwimmender Geotextilvorhang 	<ul style="list-style-type: none"> • Geotextilleitung • Schwimmender Geotextilvorhang • Gitter, Rechen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokale Wasserinjektion

Beherrschung von Trübeströmen in Stauseen

- Mögliche und erforschte Lösungsansätze

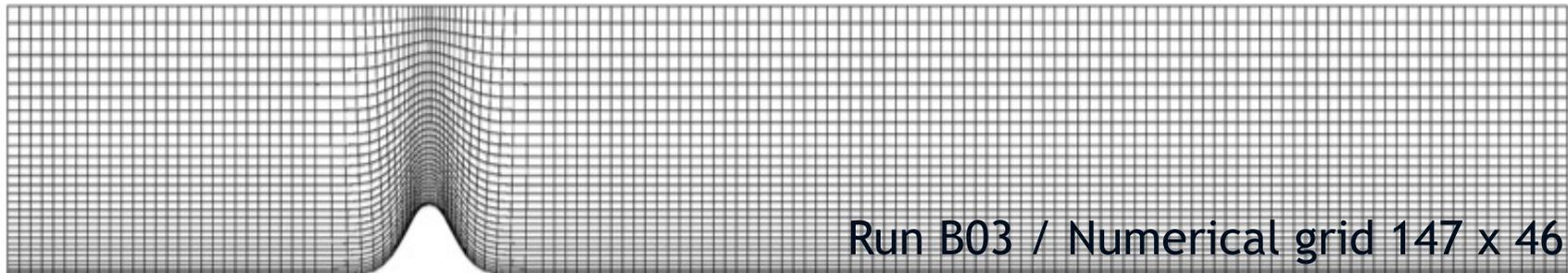
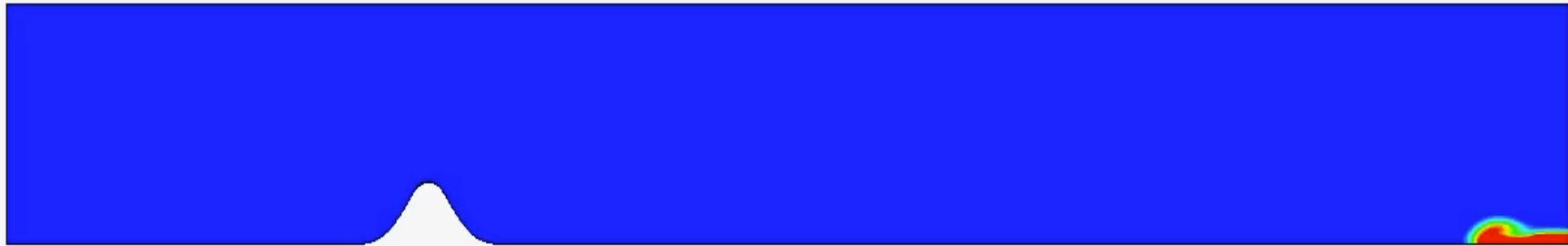


Beherrschung von Trübeströmen

- Wirkung von Hindernissen im Stausee
Modellversuch im Kanal



Nummerische Simulation eines Trübestromes über ein Hindernis



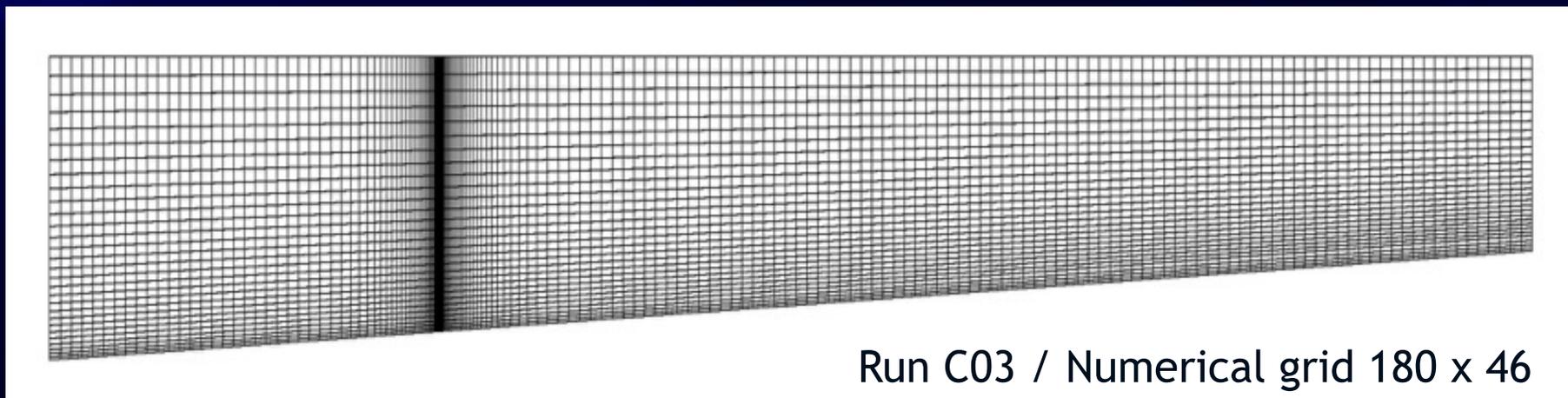
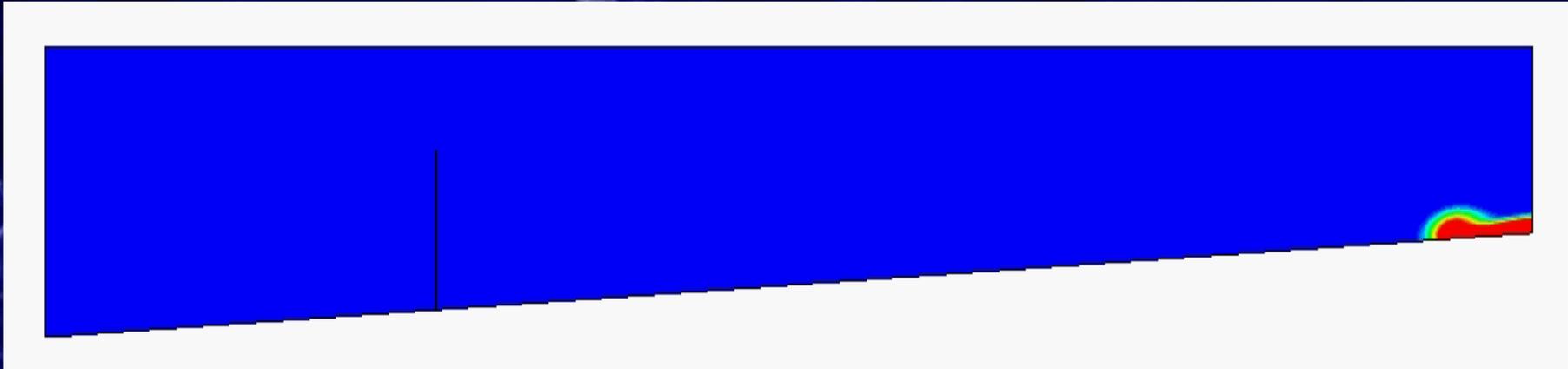
Run B03 / Numerical grid 147 x 46

Beherrschung von Trübeströmen

- Wirkung von Gitter/Geotextilvorhang im Stausee
Modellversuch im Kanal



Nummerische Simulation eines Trübestromes durch einen Geotextilvorhang



Run C03 / Numerical grid 180 x 46

Technische Massnahmen zur Beeinflussung von Trübeströmen - Empfehlungen

Hindernisse (Damm oder Mauer)

- ⇒ strömende Trübeströme
- ⇒ Hindernishöhe mindestens
2-fache Höhe des
Trübestromes (10 - 20 m)

Geotextilvorhang

- ⇒ strömende und schiessende
Trübeströme
- ⇒ Porosität nicht grösser
als 30%

Wasserstrahl

- ⇒ strömende Trübeströme
- ⇒ entgegenwirkende Stützkraft
mindestens 1.5x Stützkraft
des Trübestromes

Blasenstrahl

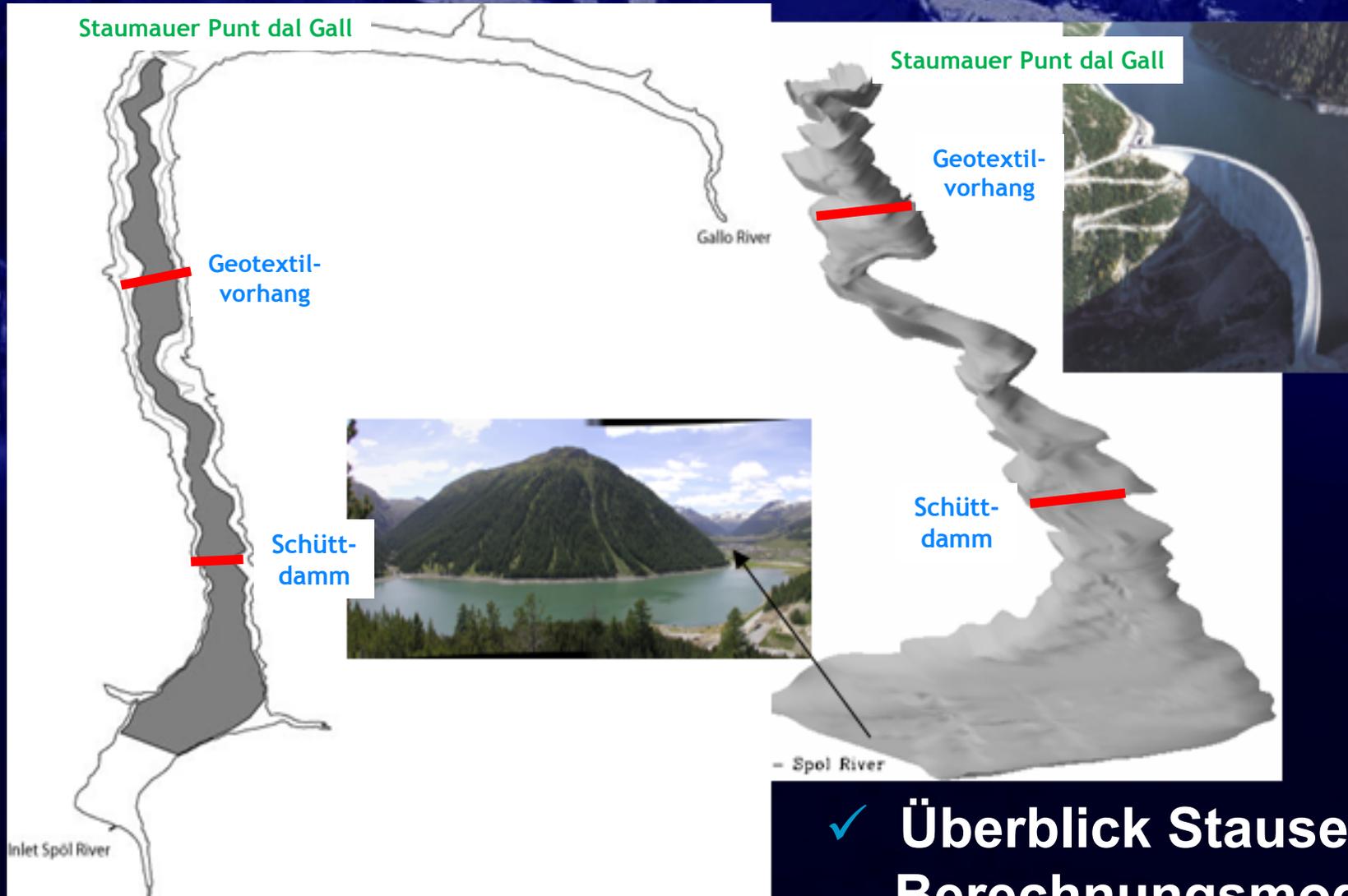
- ⇒ nur bei seichten Stauseen
wirtschaftlich

Fallstudie Livigno - Punt dal Gall

- ❖ Analyse des Effektes der Trübeströme auf die Verlandung
- ❖ Vorschlag von technischen Lösungen



Fallstudie Livigno - Punt dal Gall



✓ Überblick Stausee und
Berechnungsmodell

Fallstudie Livigno - Punt dal Gall

✓ Szenarios

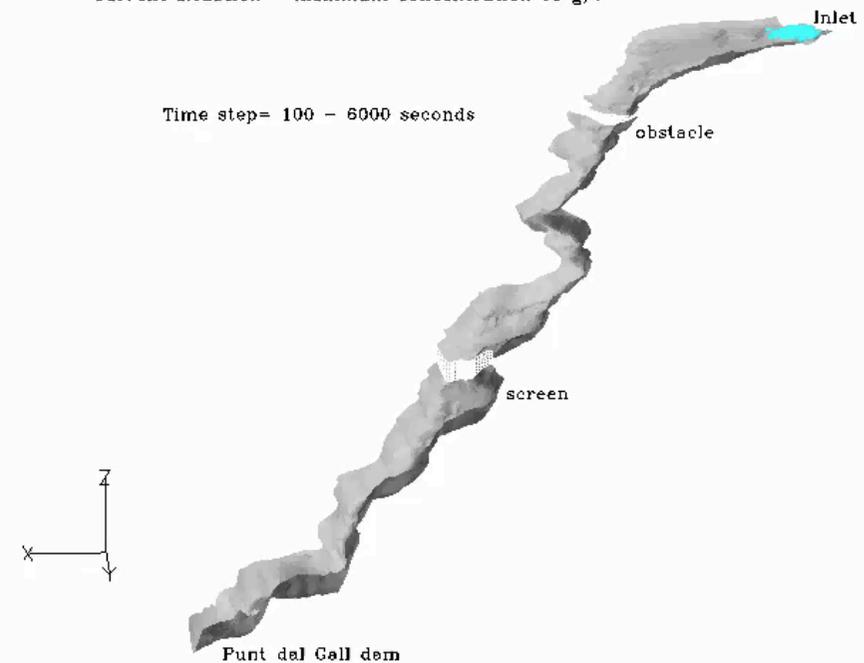
Konzentration (g/l)	Untersuchte Hochwasser	Massnahme
15	Jährlich	Hindernis 12 m
	Oktober 2000	Hindernis 8 m
	1960	Hindernis 4 m
	100 - jährlich	Geotextilvorhang 20% Porosität
30	Oktober 2000	Geotextilvorhang 30% Porosität
	1960	
	100-jährlich	

Fallstudie Livigno - Punt dal Gall

✓ Heutiger Zustand

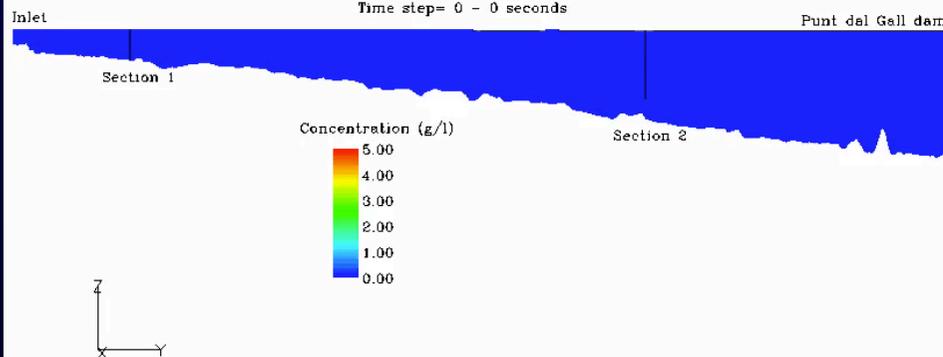
Livigno reservoir - 2000 october flood event
Current situation - maximum concentration 15 g/l

Time step= 100 - 6000 seconds



Livigno reservoir - 2000 october flood event
Current situation - maximum concentration 15 g/l

Time step= 0 - 0 seconds



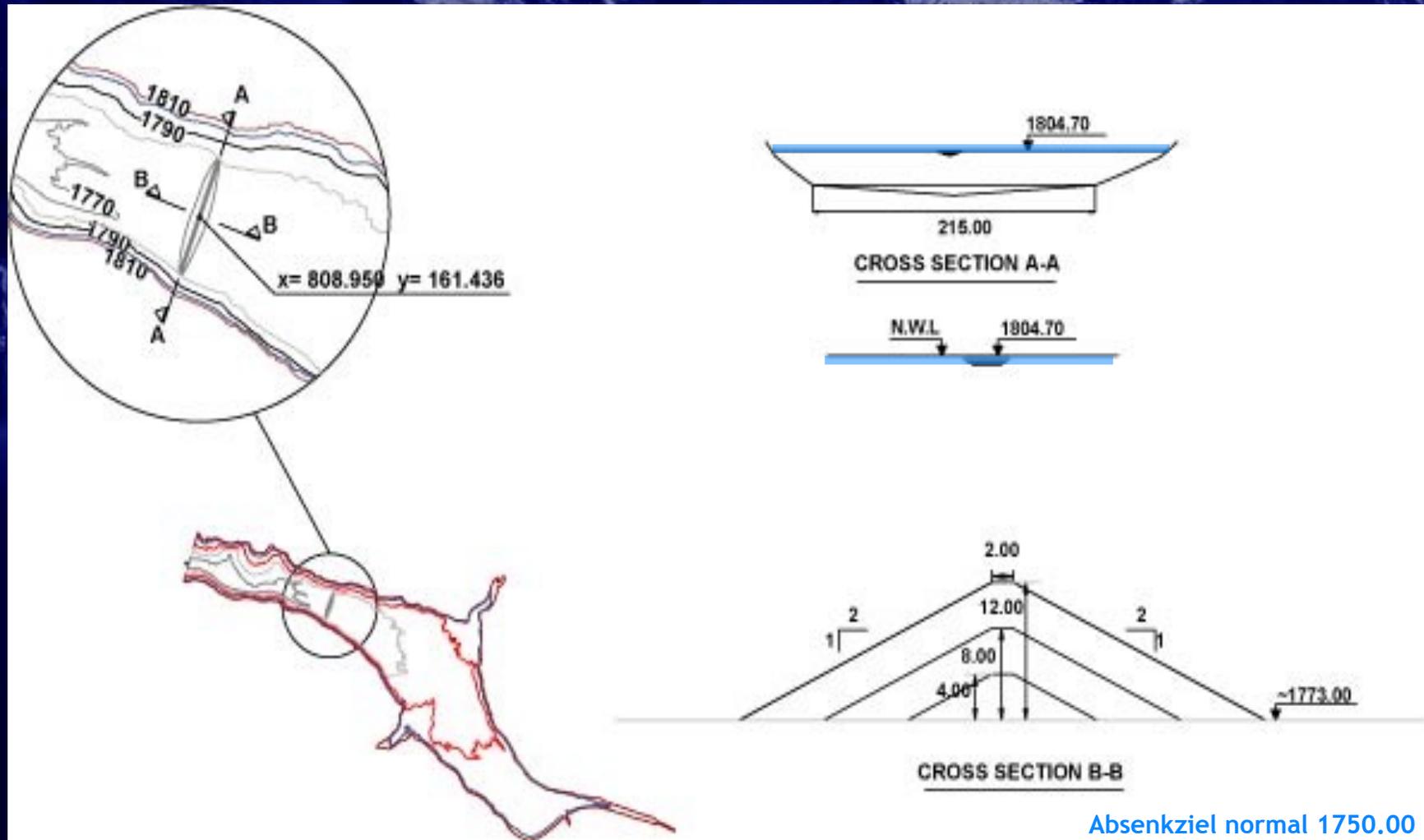
Fallstudie

Livigno - Punt dal Gall

<i>Hochwasser- ereignis</i>	<i>Maximale Zufluss- konzentration (g/l)</i>	<i>Sediment- zufluss(m³)</i>	<i>Absetzung oberhalb Querprofil 1</i>	<i>Absetzung oberhalb Querprofil 2</i>
<i>Jährlich</i>	<i>15</i>	<i>4'730</i>	<i>74%</i>	<i>98%</i>
<i>Oktober 2000</i>	<i>15</i>	<i>16'900</i>	<i>63%</i>	<i>94%</i>
	<i>30</i>	<i>33'755</i>	<i>60%</i>	<i>92%</i>
<i>1960</i>	<i>15</i>	<i>26'485</i>	<i>60%</i>	<i>92%</i>
	<i>30</i>	<i>52'971</i>	<i>58%</i>	<i>91%</i>
<i>100 - jährlich</i>	<i>15</i>	<i>31'593</i>	<i>59%</i>	<i>91%</i>
	<i>30</i>	<i>63'187</i>	<i>58%</i>	<i>90%</i>

Problem: Bei tiefem Speicherstand am Ende des Winters werden die abgelagerten Feinsedimente allenfalls (falls nicht gefroren) murgangartig zur Talsperre transportiert.

Fallstudie Livigno - Punt dal Gall



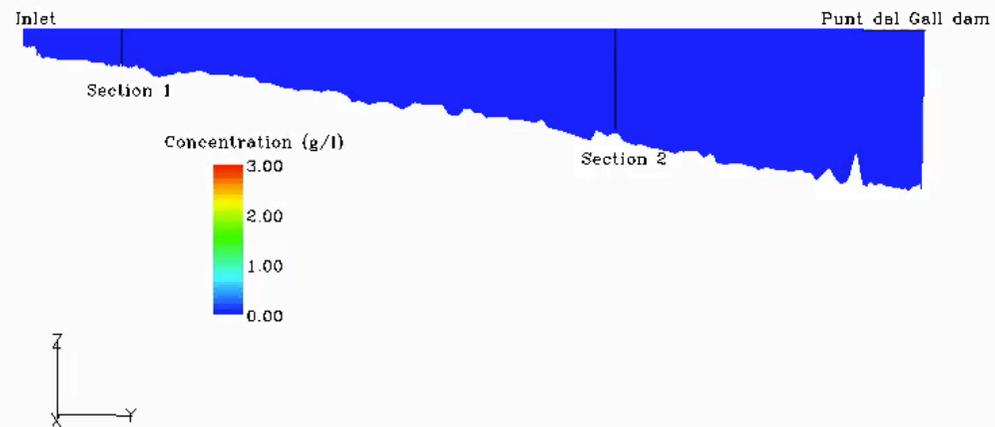
Schüttdamm (Hindernis) bei Querprofil 1

Fallstudie Livigno - Punt dal Gall

❖ Querprofil 1: Schüttdamm 12 m

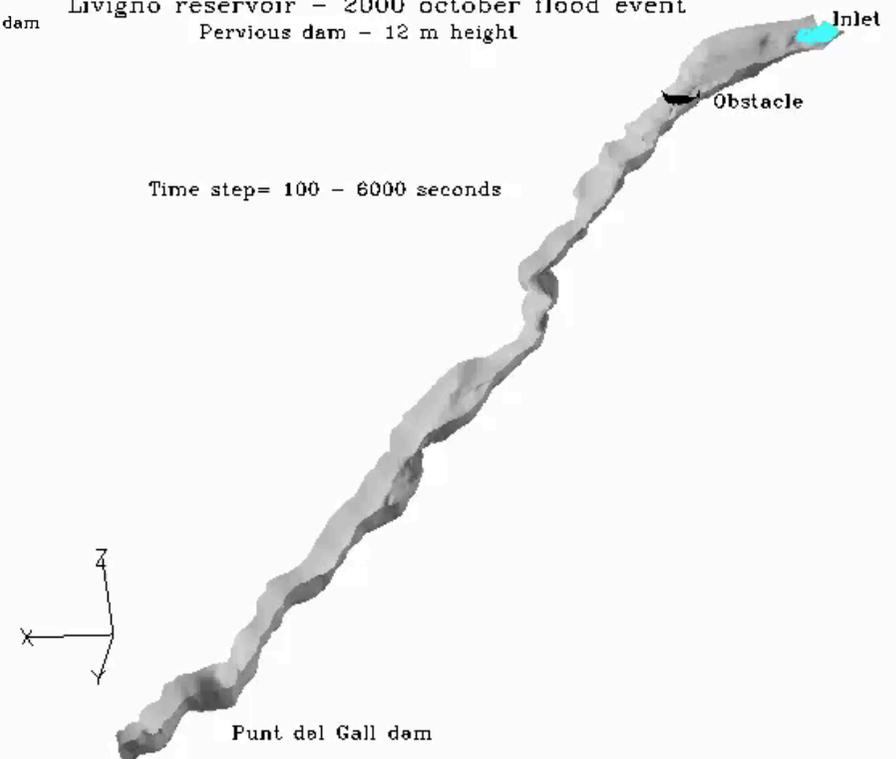
Livigno reservoir - 2000 october flood event
Pervious obstacle - 12 m height

Time step= 0 - 0 seconds



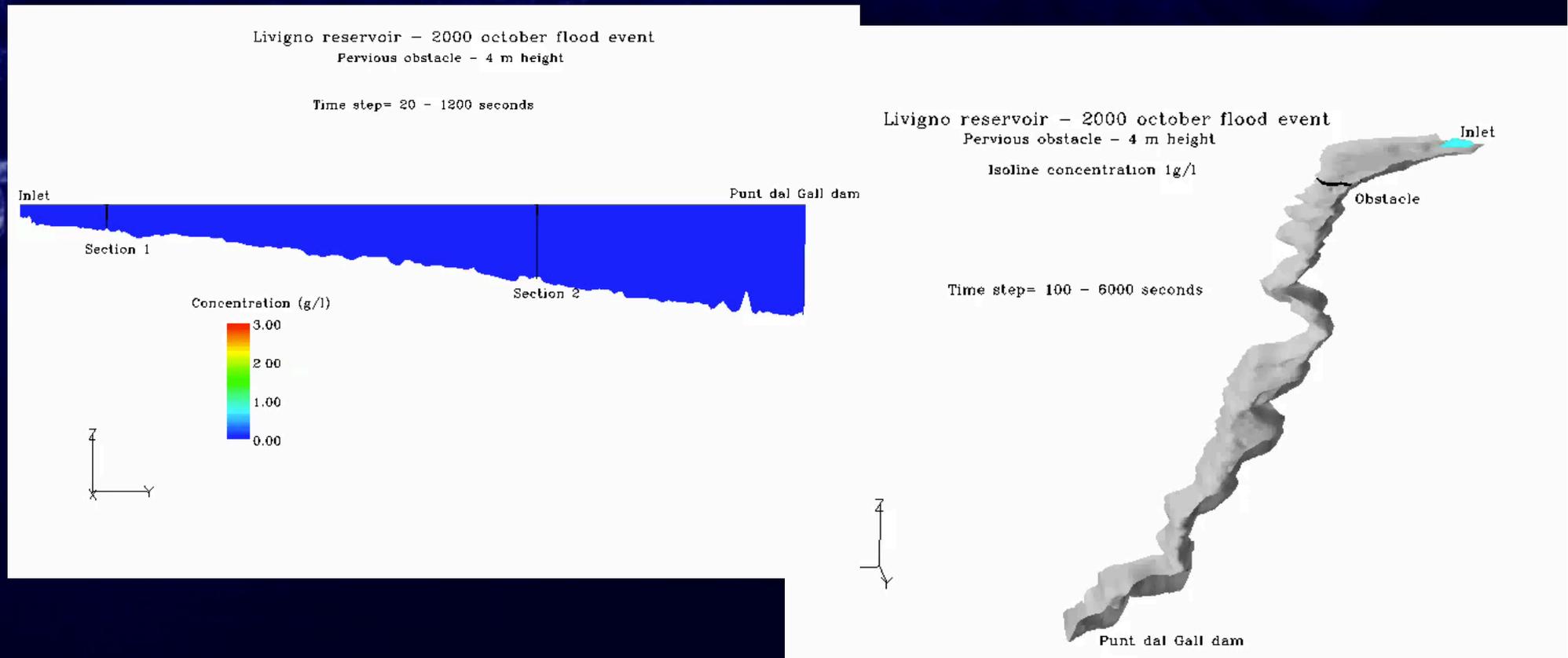
Livigno reservoir - 2000 october flood event
Pervious dam - 12 m height

Time step= 100 - 6000 seconds

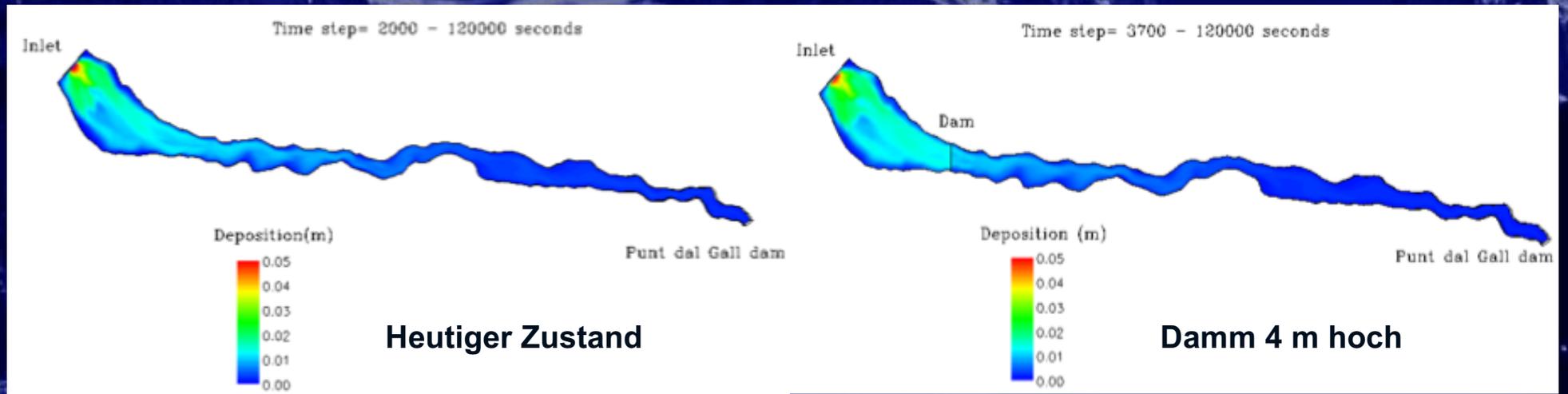


Fallstudie Livigno - Punt dal Gall

❖ Querprofil 1: Schüttdamm 4 m

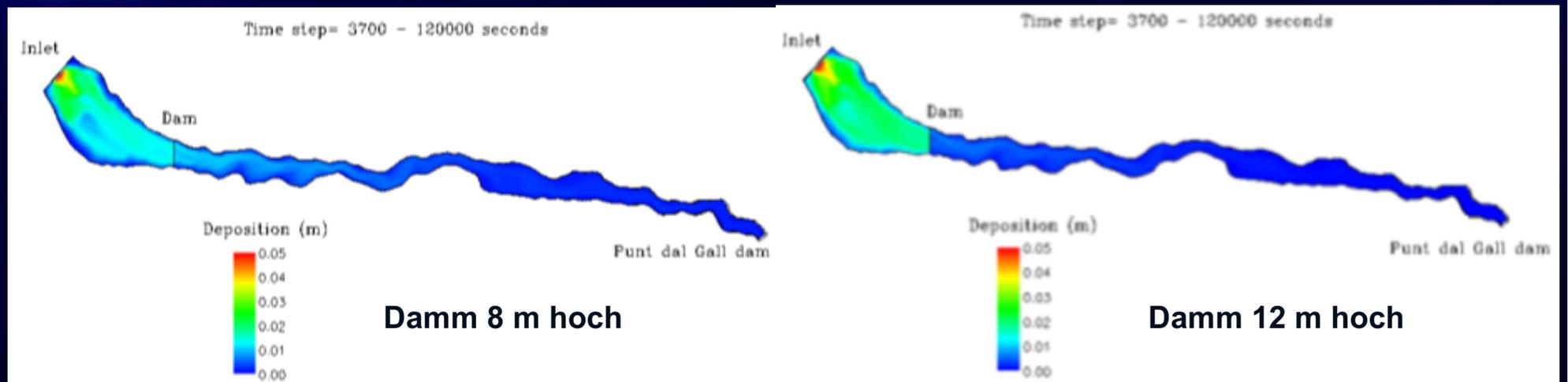


Fallstudie Livigno - Punt dal Gall



Absetzung oberhalb Querschnitt 1: 63%

Absetzung oberhalb Querschnitt 1: 69%



Absetzung oberhalb Querschnitt 1: 76%

Absetzung oberhalb Querschnitt 1: 87%

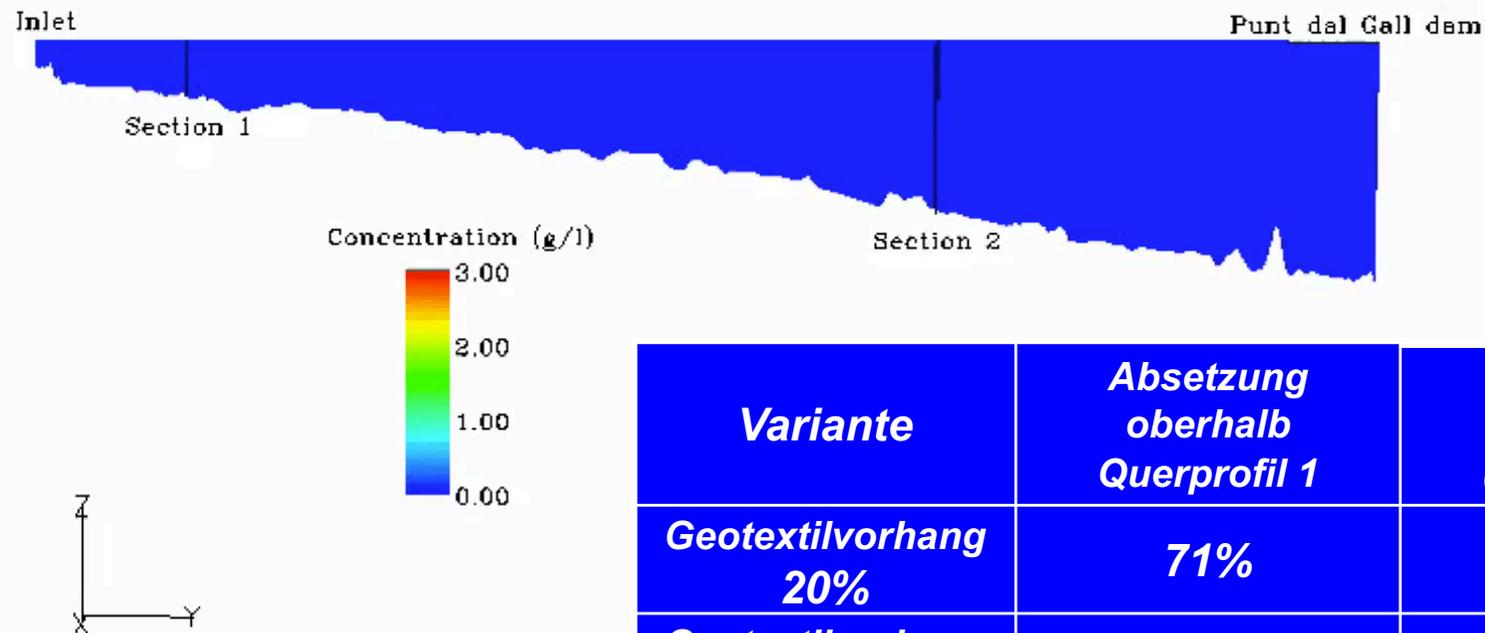
Fallstudie Livigno - Punt dal Gall

❖ Profil 2: Geotextilvorhang

Livigno reservoir - 2000 october flood event

Geotextile screen - 20% porosity

Time step= 0 - 0 seconds



<i>Variante</i>	<i>Absetzung oberhalb Querprofil 1</i>	<i>Absetzung oberhalb Querprofil 2</i>
<i>Geotextilvorhang 20%</i>	<i>71%</i>	<i>96%</i>
<i>Geotextilvorhang 30%</i>	<i>69%</i>	<i>95%</i>

Einfluss des Pumpspeicherbetriebs auf Staurationverlandung

(Forschungsprojekt Michael Müller)



Tourtemagne
Reservoir, Switzerland

Kann die Pumpspeicheraktivität
die Verlandung des oberen und
des unteren Stausees günstig
beeinflussen?



Eggberg Reservoir
Säckingen, Germany

Einfluss des Pumpspeicherbetriebs auf Staurationverlandung

(Forschungsprojekt Michael Müller)

Was ist der Einfluss von raschem und regelmässigem Wechsel zwischen Pump- und Turbinierbetrieb

- Strömungsverhältnisse und Turbulenz im Stausee
- Absetzungsprozess der Feinsedimente?

Wie beeinflussen die Parameter

- Abfluss
- Dauer der Pumpspeicherzyklen
- Standort der Einläufe und Ausläufe des Stausees (Fassungen)

den Verlandungsprozess?



Pumpspeicherwerk Grimsel II

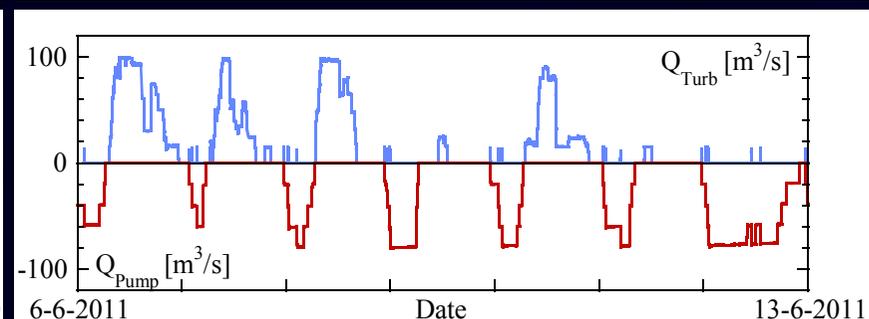
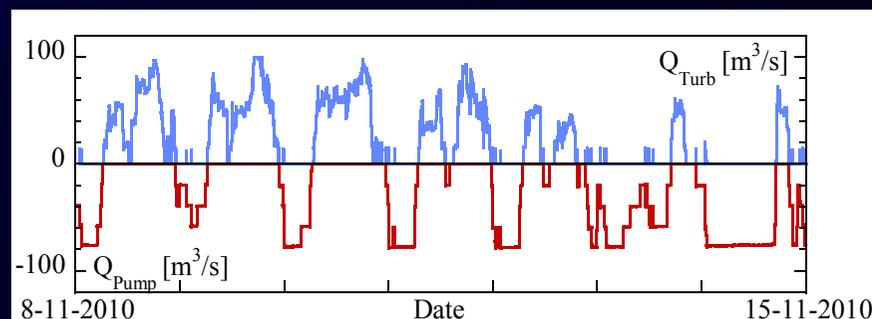
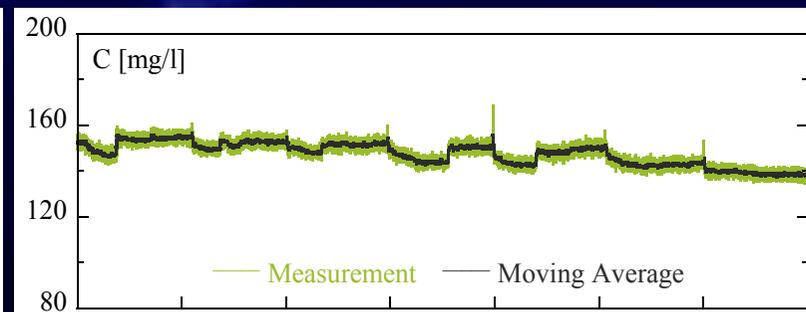
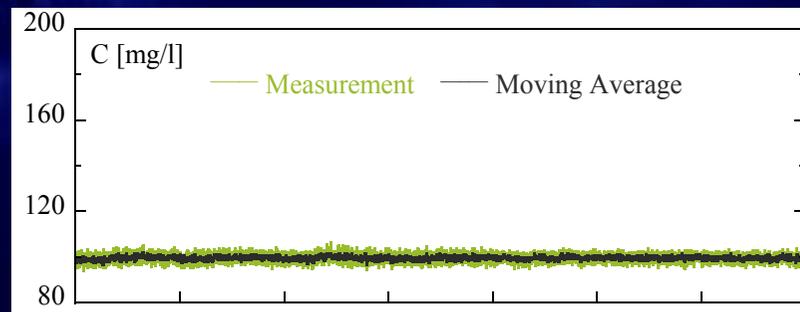
Einfluss des Pumpspeicherbetriebs auf Staurationverlandung

Sechs Monate kontinuierliche Messung der Trübung im Druckschacht des Pumpspeicherwerkes Grimsel II

→ Sedimentbilanz zwischen oberem (Oberaar) und unterem Stausee (Grimsel)

Saisonale Unterschiede der Sedimentkonzentration

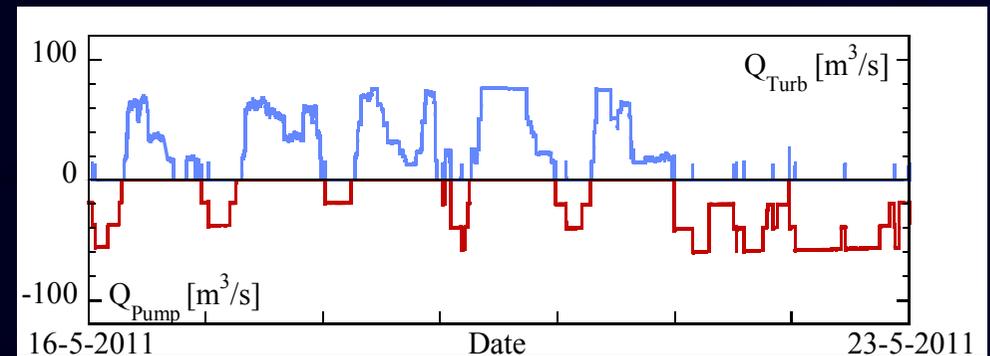
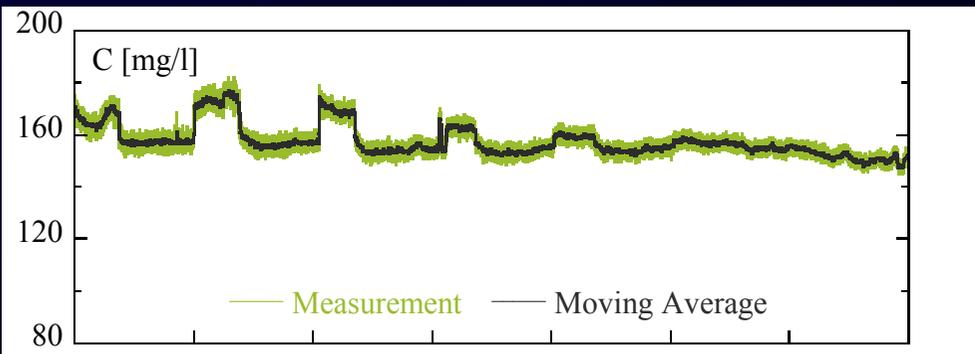
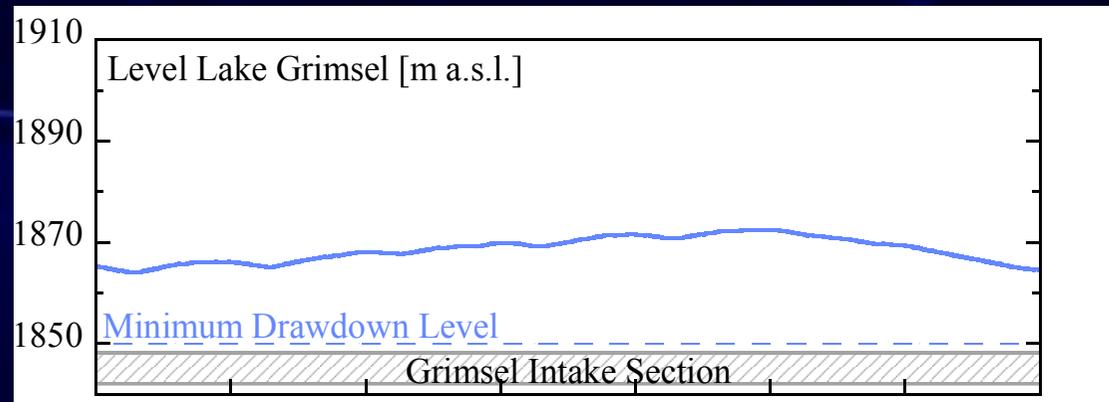
- Winter: kleine Werte (Schnee, Gletscher) $80 < C < 100$ mg/l
- Frühjahr/Sommer: höhere Werte wegen Zuflüssen $150 < C < 180$ mg/l



Einfluss des Pumpspeicherbetriebs auf Staurationverlandung

Trübungsmessung im Druckschacht

Pumpspeicheraktivität ist sichtbar aber abhängig vom
Speicherspiegelstand,
Tiefer Grimselseestand : Sedimenttransport zum Speicher Oberaar



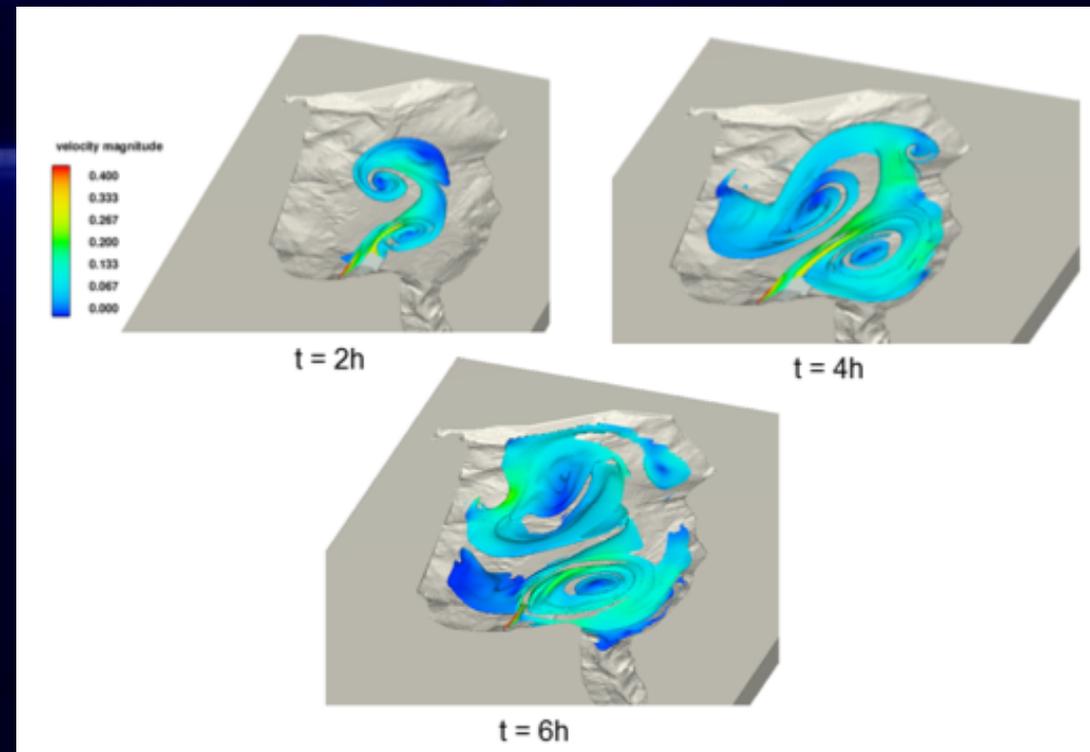
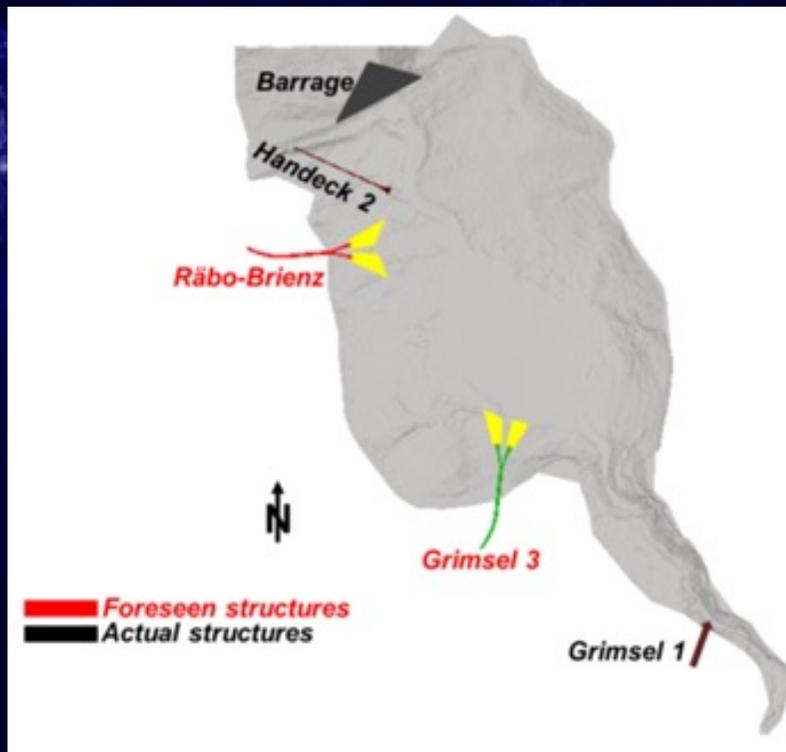
Verringerung der Absetzung von Feinsedimenten durch optimale Anordnung von Einläufen und Ausläufen von Pumpspeicherwerken in einem Speicher

Fallstudie PSP Grimsel III



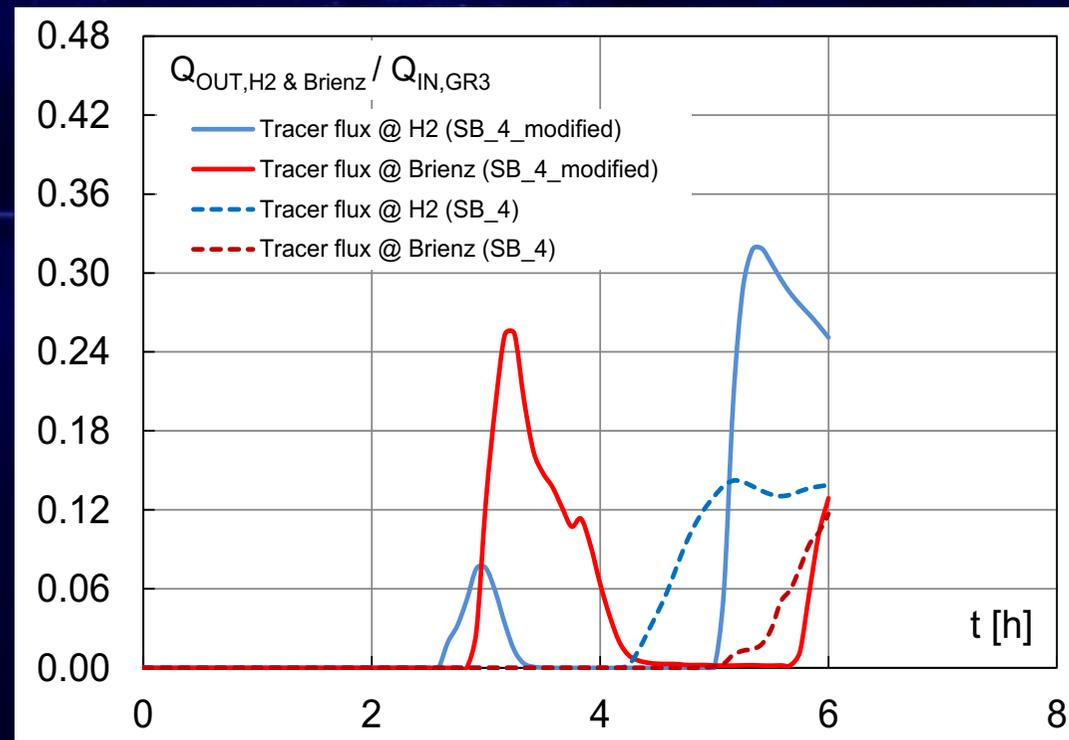
Verringerung der Absetzung von Feinsedimenten durch optimale Anordnung von Einläufen und Ausläufen von Pumpspeicherwerken in einem Speicher

Fallstudie PSP Grimsel III



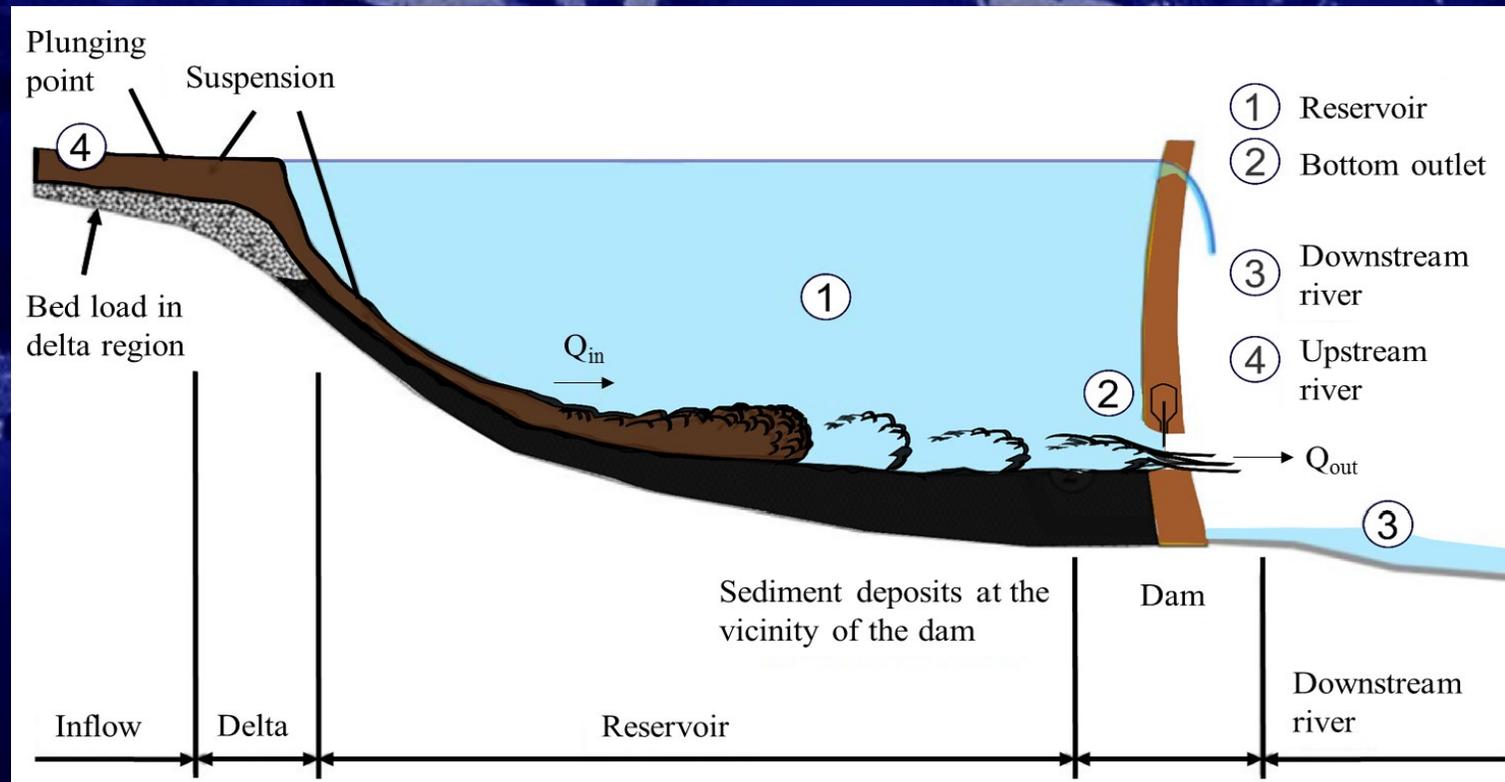
Verringerung der Absetzung von Feinsedimenten durch optimale Anordnung von Einläufen und Ausläufen von Pumpspeicherwerken in einem Speicher

Fallstudie PSP Grimsel III



Kurzschluss von Ausfluss von Grimsel III in Stausee Råbo und dessen Ausfluss in die unterliegenden zwei Kraftwerksstufen dank optimierter Anordnung der Einläufe und Ausläufe

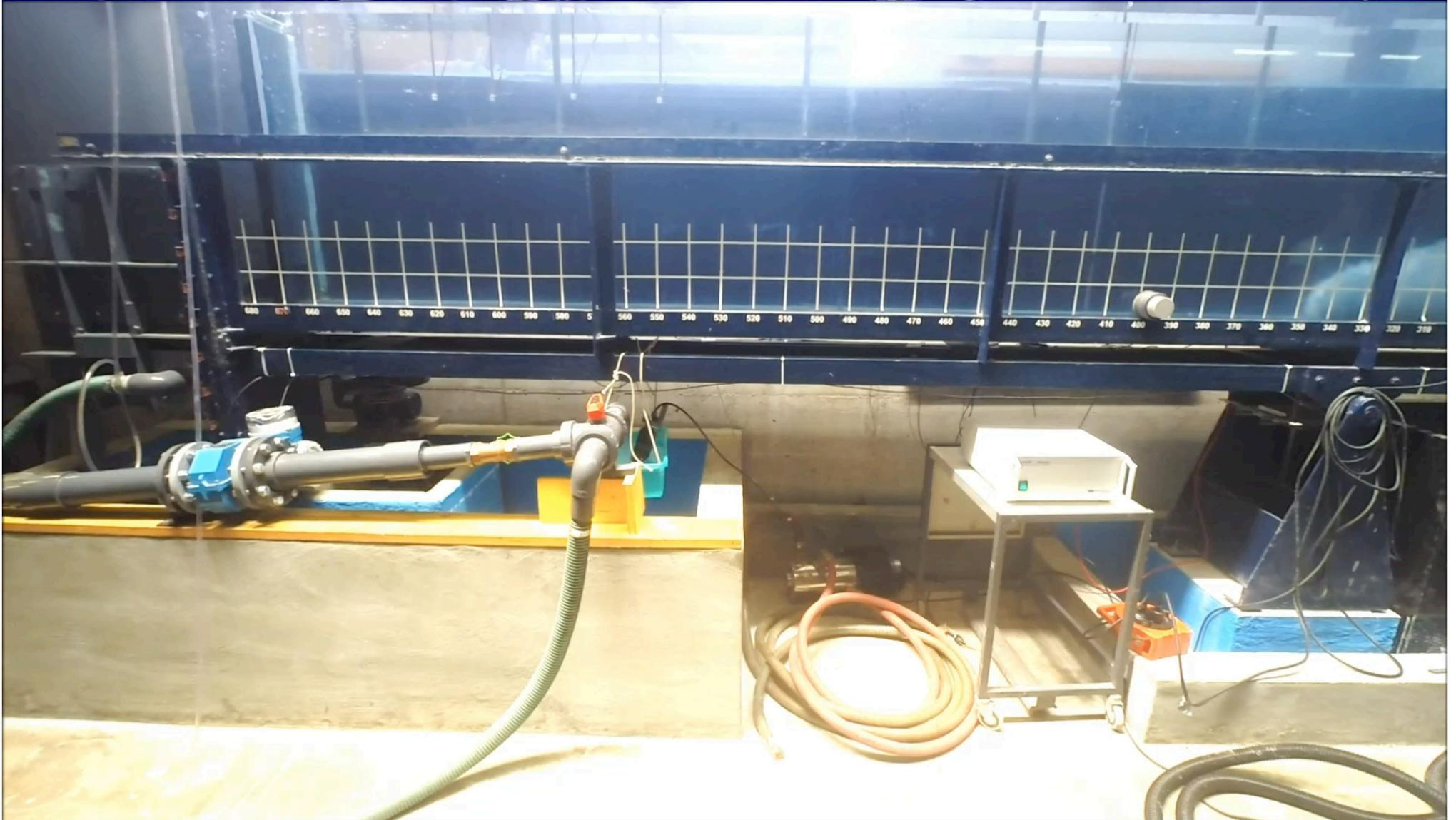
Durchleiten von Trübestrome (venting)



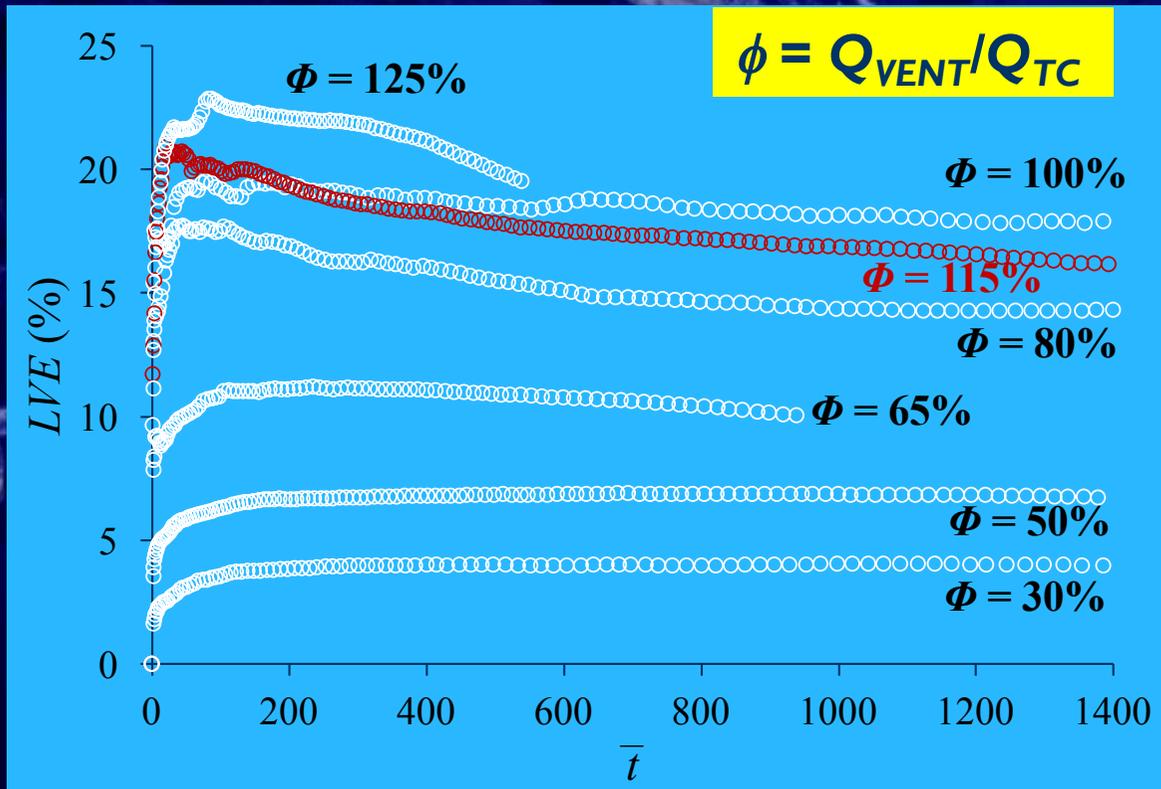
Durchleiten der Feinsedimente von Trübestrome durch den Grundablass. Feinsedimente während Hochwasser sind auch wichtig für die Erhaltung der Auenwälder.

Systematische Laborversuche

Forschungsprojekt Sabine Chamoun



Durchleiten von Trübestrome unter begrenzter Öffnung oder Kapazität des Grundablasses



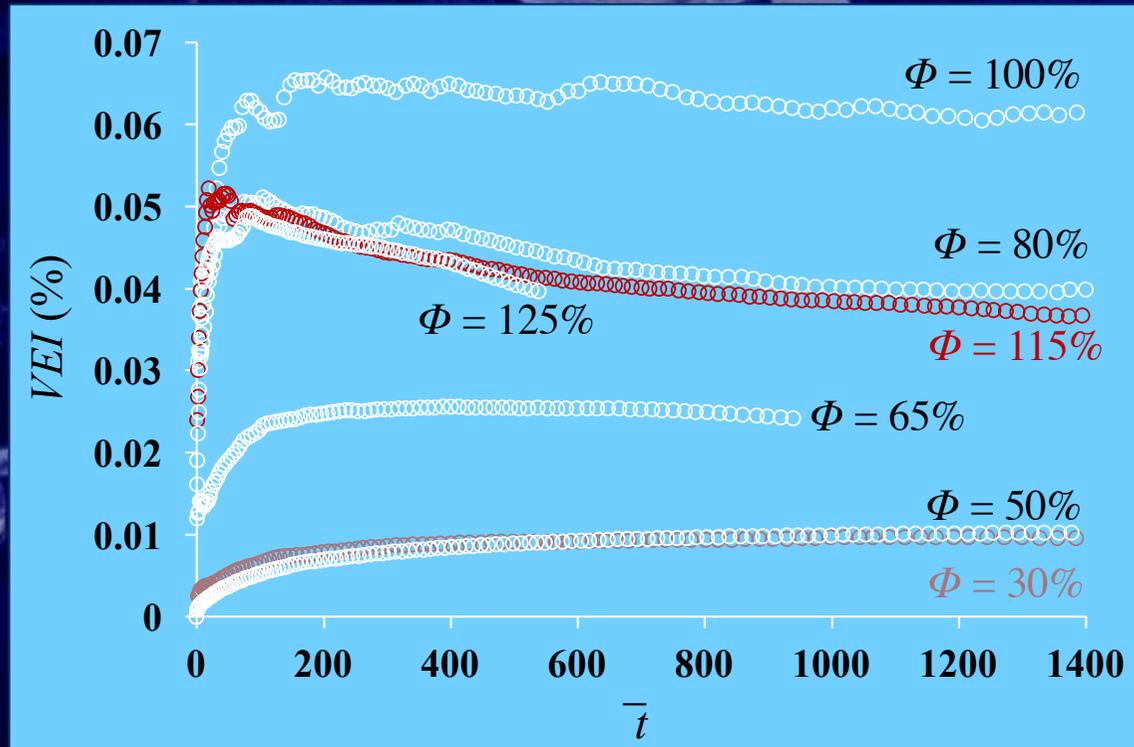
$$\phi = Q_{VENT} / Q_{TC}$$

$$VE = \frac{M_{VENT}}{M_{TC}} = \frac{\int_{t=0}^{t=T} C_{VENT} Q_{VENT} dt}{\int_{t=0}^{t=T} C_{TC} Q_{TC} dt}$$

➤ Selbst für $\phi = 65\%$ bis $\phi = 80\%$ kann ein erheblicher Anteil der Feinsedimente durch Venting abgeführt werden.

\bar{t} : Normalisierte Dauer des Venting
 LVE : Lokale Venting - Effizienz

Venting Effizienzindikator *VEI*



**Unter Berücksichtigung
der Wasserverluste**

***Venting hat die grösste
Effizienz bei $\phi = 100\%$
aber mit $\phi = 65-80\%$
erzielt man schon gute
Resultate***

\bar{t} : Normalisierte Dauer des Venting
LVE : Lokale Venting - Effizienz

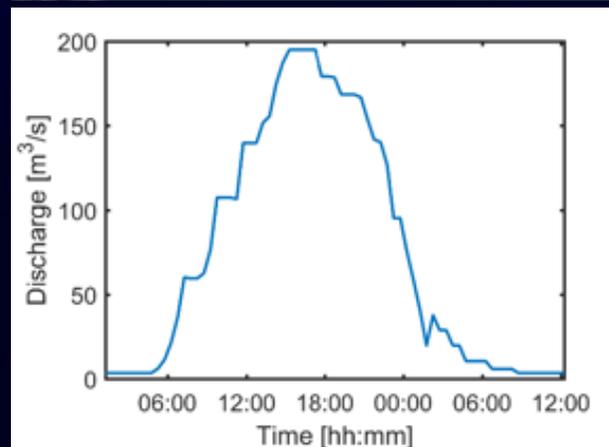
**VEI = Total ausgetragenes Sedimentvolumen /
Totaler Ausfluss von Reinwasser während Venting**

Wann soll mit Venting begonnen und wann gestoppt werden?

Der Beginn des Venting sollte mit der Ankunft des Trübestromes bei der Talsperre synchronisiert werden (Messquerschnitt etwa 300 m im Stausee oberhalb Grundablass)

Venting sollte mindestens solange dauern wie ein Trübestrom noch zur Talsperre fließt. Anschliessend sollte Venting noch solange aufrecht erhalten werden, bis die Feinsedimente vor dem Grundablass evakuiert sind (« sauberes Wasser »).

Synergien von Spülungen und Venting mit künstlichen Hochwasser und Geschiebeschüttungen?



Staumauer Rossens in der Schweiz

Künstliches Hochwasser mit Geschiebeschüttungen

Staumauer Rossens in der Schweiz

4 Geschiebedepots wie
alternierende Kiesbänke
geschüttet, welche sich auch
Clusterartig nach unten
fortpflanzen

4 x 250 m³

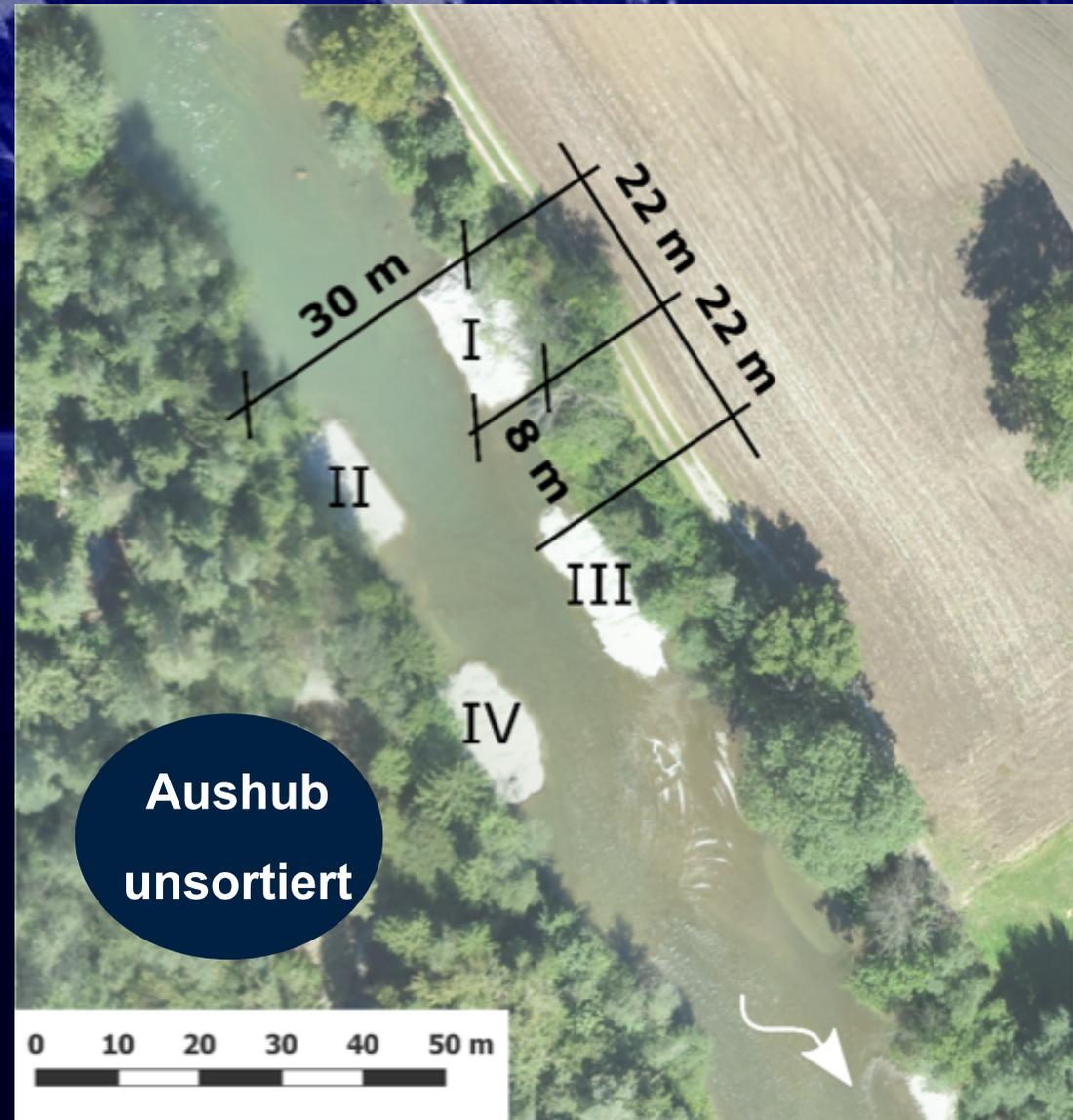
Länge: 22 m

$d_m = 57 \text{ mm}$

Breite: 8 m

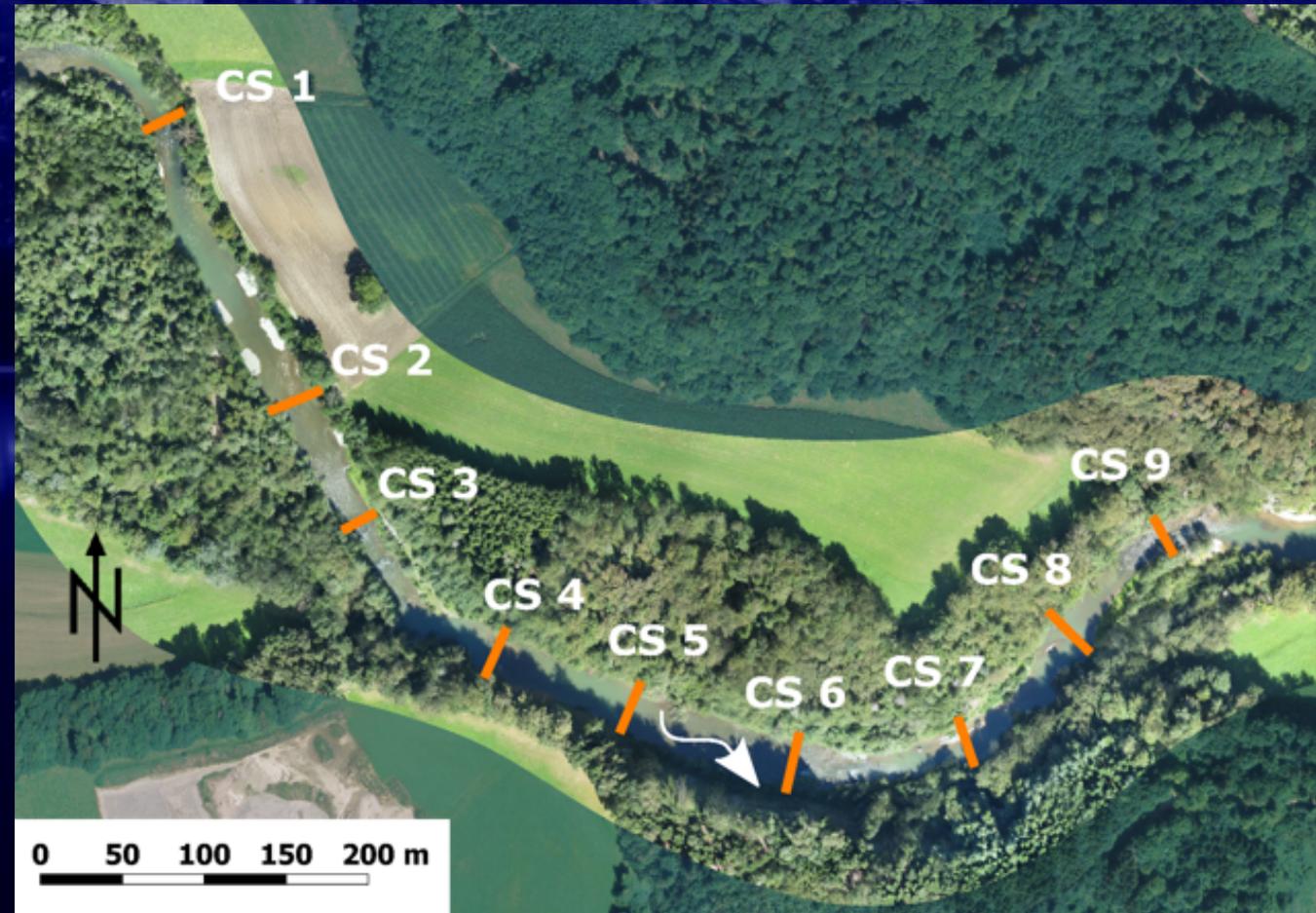
$d_{90} = 113 \text{ mm}$

Höhe 1.5 m

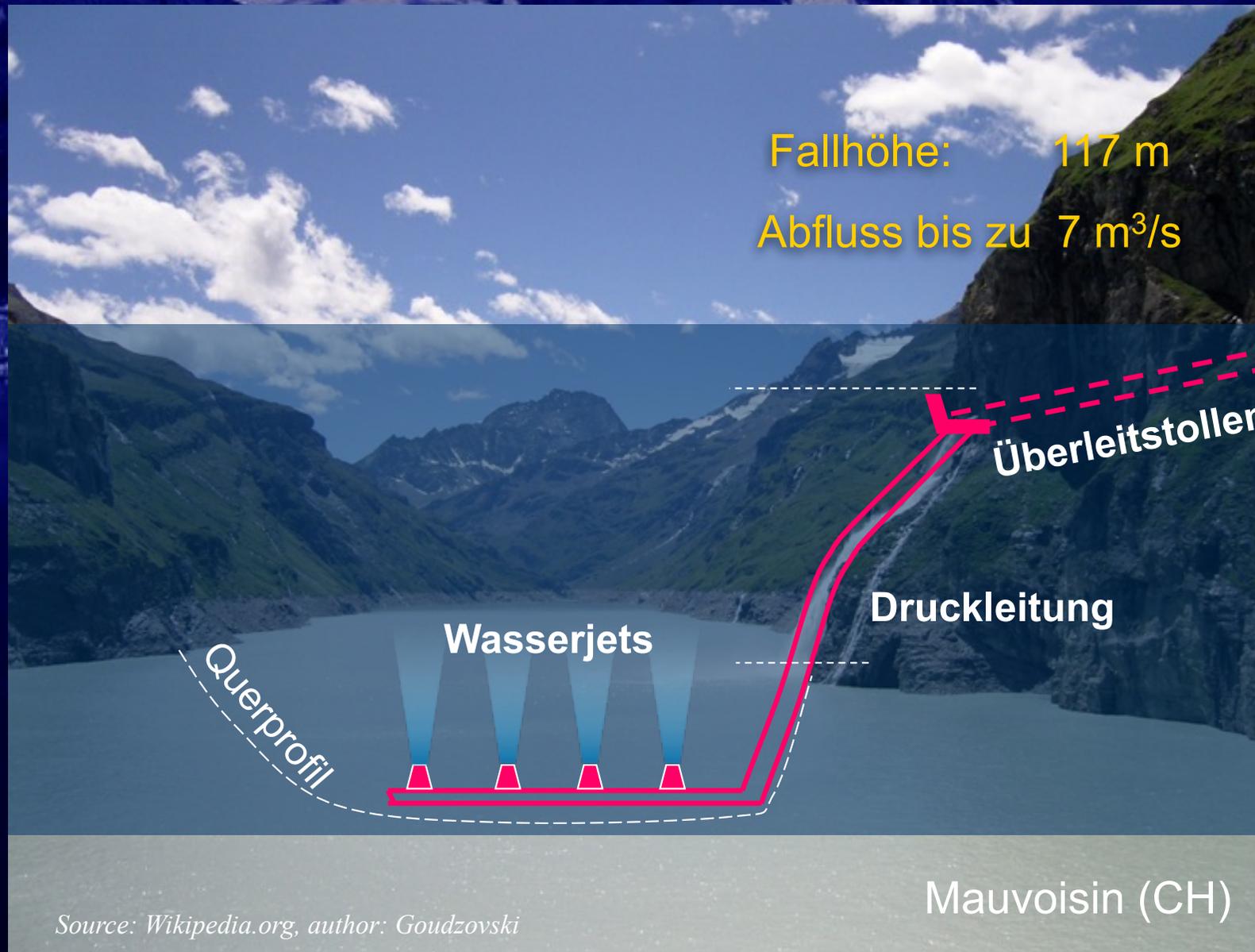


Künstliches Hochwasser mit Geschiebeschüttungen

Überprüfung der
ökologischen
Wirkung vor und
nach Hochwasser
durch Vergleich
des Hydraulisch-
morphologischen
Index der
Vielfältigkeit
(HMID) sowie TAXA
- Aufnahmen

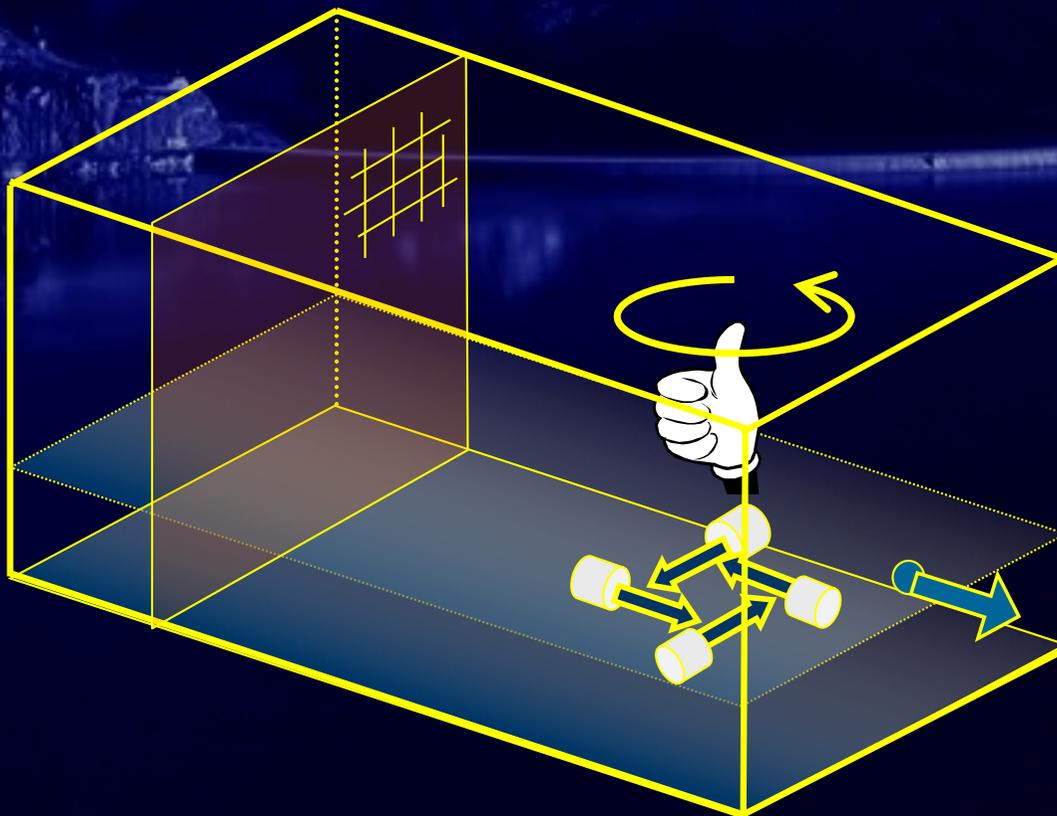


Abführung von Feinsedimenten über Triebwassersysteme

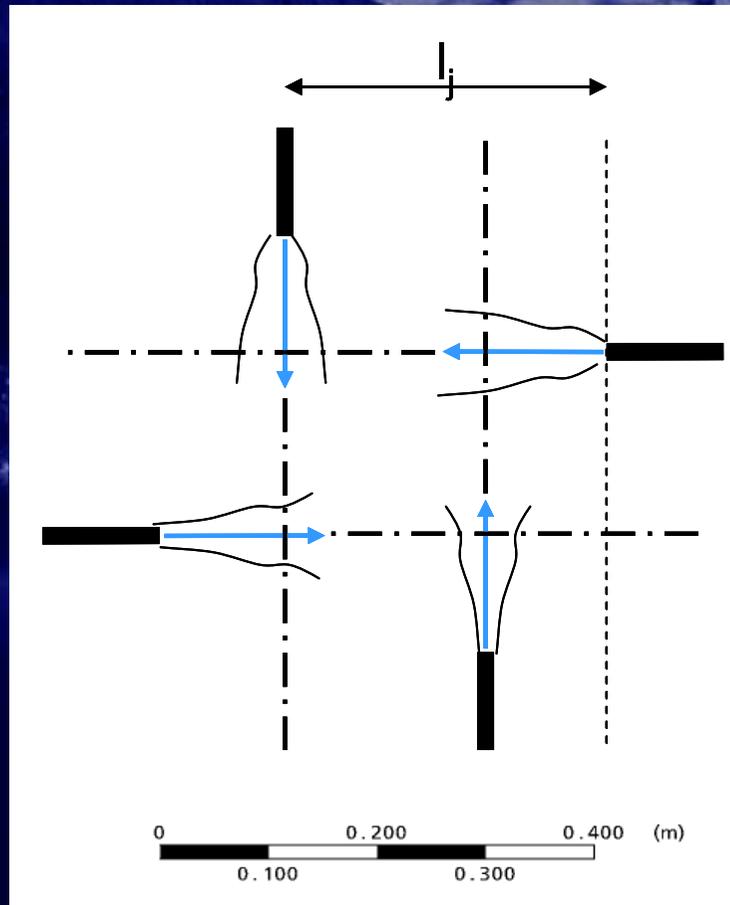


Abführung von Feinsedimenten über Triebwassersysteme Systematische Laborversuche

Aufwärtsströmung durch eine kreisförmige
Düsenkonfiguration vor der Triebwasserfassung



Abführung von Feinsedimenten über Triebwassersysteme



Kreisförmige Jetanordnung



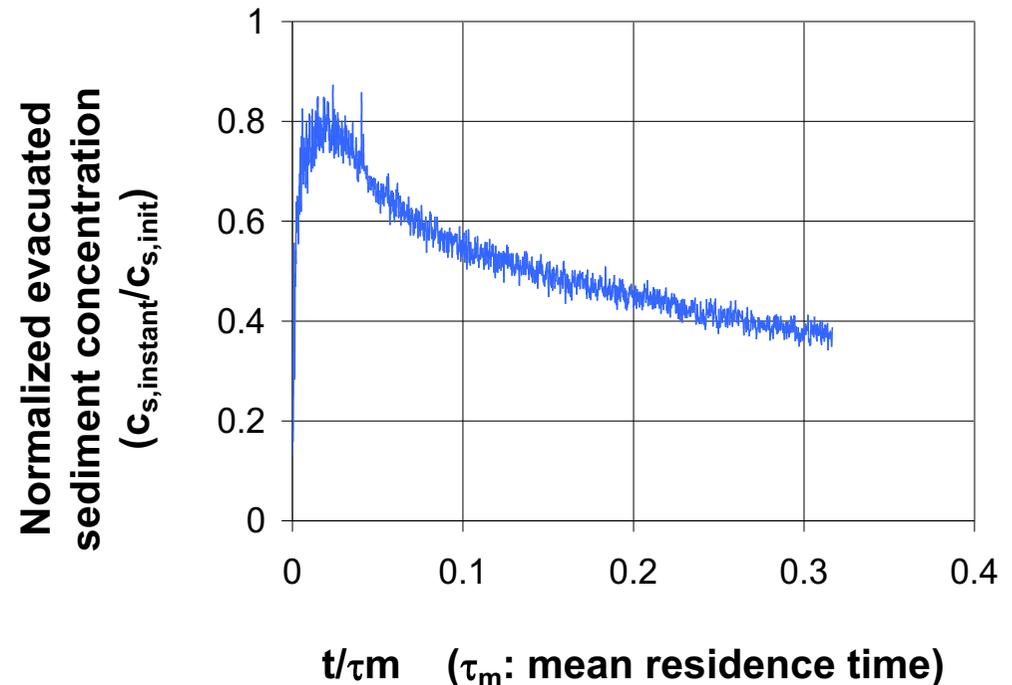
Jenzer-Althaus J., De Cesare G., & Schleiss A. J. (2014). Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet-induced flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141 (2),
 Jenzer-Althaus J., De Cesare G., & Schleiss A. J. (2016). Release of suspension particles from a prismatic tank by multiple jet arrangements. *Chemical Engineering Science*, 144, 153-164.

Abführung von Feinsedimenten über Triebwassersysteme

Systematische
Laborversuche

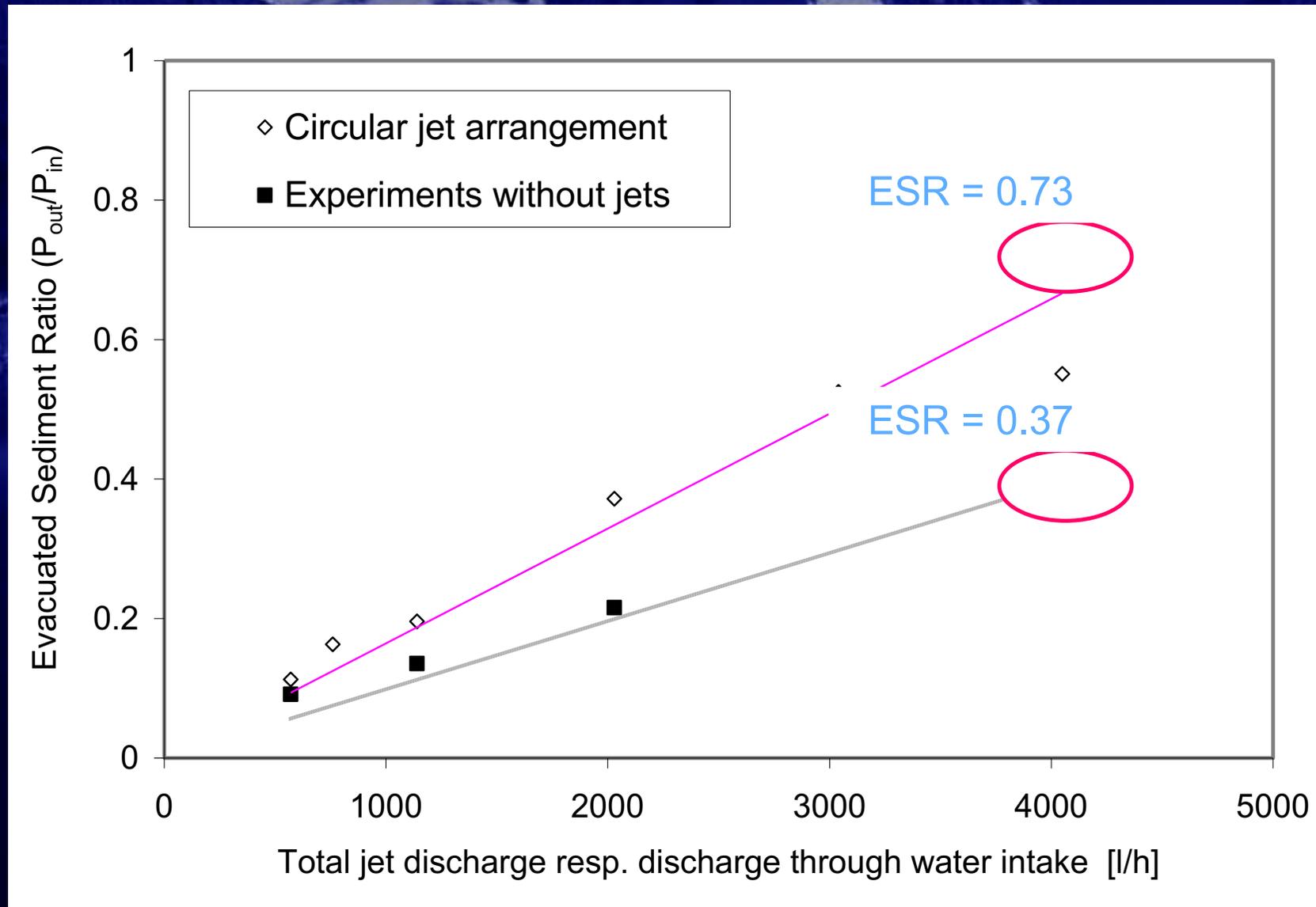
Sedimentaustrags-
effizienz

ESR

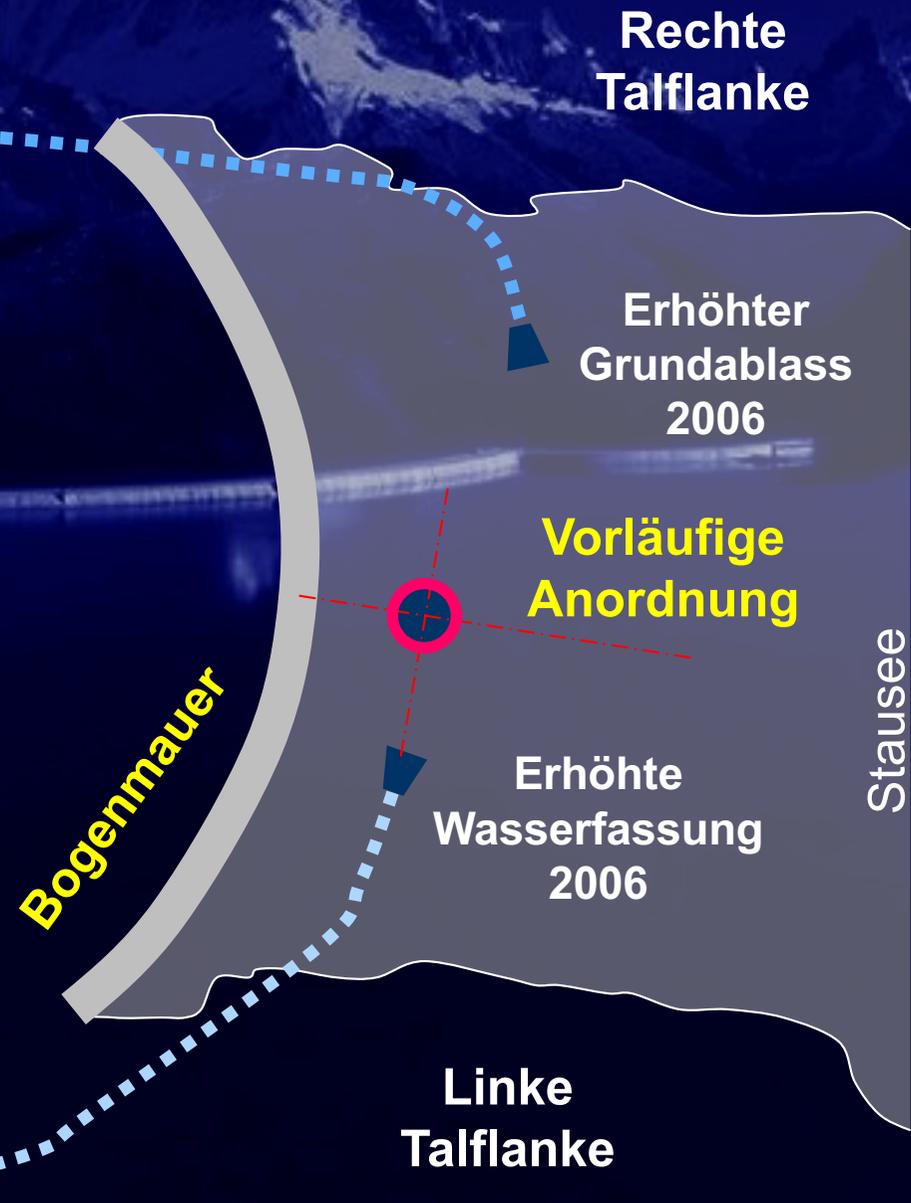


$$ESR = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\sum c_{s,i} [g/l] \cdot Q_{out} [l/s] \cdot \Delta t [s]}{P_{in} [g]}$$

Sedimentaustragseffizienz als Funktion des Fassungsabflusses



Fallstudie Mauvoisin, Schweiz



Fallstudie Mauvoisin, Schweiz - Vorstudie zur Anordnung

Kostenschätzung der Jetanlage zum Aufwirbeln der Feinsedimente vor der Triebwasserfassung ca. 1 Mio. CHF

	Ohne Jets	Mit Jets
Jahres- kosten [10 ⁶ CHF]	1.4 – 4.6 (konventionelle Saugbaggerung)	0.08 (20 Jahre Rückzahldauer)
	1.27 (Erhöhung Grundablass und Fassung mit 20 Jahre Rückzahldauer)	

Falls nur 7 % der jährlichen eingetragenen Feinsedimente durch Trübestrome abgeführt werden können, ist die Jetanlage wirtschaftlich und empfehlenswert für die Nachhaltigkeit des Stausees

Forschungsprojekt: SEDMIX

Grossversuch in Staubecken



Schlussfolgerungen

- Verlandung beeinflusst die Nachhaltigkeit von Stauseen in entscheidendem Masse, **Verschärfung mit Klimawandel**
- Die physikalischen Prozesse und die Problematik der Verlandung sind seit langem bekannt; **Massnahmen werden aber oft zu spät getroffen**
- Für die nachhaltige Nutzung der tiefen alpinen Speicher ist die Beherrschung der Trübestrome die wichtigste Herausforderung; **innovative Ansätze sind erprobt**
- Aufwirbeln von Feinsedimenten und Abführen über Triebwassersystem ist sehr effizient und nachhaltig und **kostengünstig**
- Venting über Grundablass kann mit ökologischen Hochwasser und allenfalls Geschiebeschüttungen kombiniert werden **Win-Win Situation**
- Die richtige Wahl der Ein- und Auslaufbauwerke bei PSW kann die Verlandung stark verringern

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Du Vernex Lake
Shallow reservoir sedimentation.

