

# Technische Massnahmen zur Verminderung der Auswirkungen von Schwall und Sunk in Fliessgewässern

Prof. Dr Anton Schleiss

Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH)  
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)



Fachtagung Wasser-Agenda 21  
Solothurn 9. März 2009



## Inhalt des Vortrages

1. Einleitung - Bedeutung der heimischen Wasserkraft für die Schweiz und Europa
2. Ursachen von Schwall und Sunk
3. Technische Massnahmen gegen Schwall und Sunk
4. Beispiele von baulichen Massnahmen und Resultate der aktuellen Forschung
5. Schlussfolgerungen

# Einleitung - Bedeutung der heimischen Wasserkraft für die Schweiz und Europa

## Trümpfe der Wasserkraft

- Erneuerbare Energie ohne CO<sub>2</sub> - Emissionen
- Ausgezeichneter Wirkungsgrad und Effizienz
- regulierbar gemäss Nachfrage
- Heimische Energie welche Arbeitsplätze in den Alpentälern schafft (Steuern und Wasserzinse)
- Verbesserung der Infrastrukturen und der touristischen Attraktivität
- Bedeutender Beitrag an den Hochwasserschutz









## Wasserkraft in den Alpenländern und in Europa

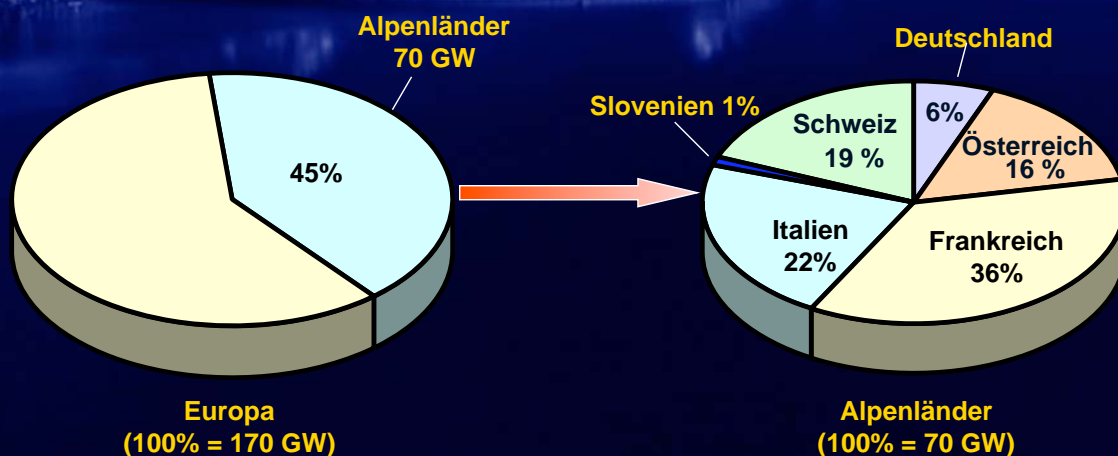
Land	Installierte Leistung MW	Mittlere Jahresproduktion GWh/a (2006/07)	Anteil Wasserkraft an der tot. Elektrizitätsproduktion
 Deutschland	4'525	27'900	4.4%
 Österreich	11'853	37'200	58.3%
 Frankreich	25'200	64'600	11.1%
 Italien	17'459	38'481	12.3%
 Slowenien	846	3'120	24.0%
 Schweiz	13'356	35'483	55.2%
Alpenländer	73'240	206'780	16.3%
 Europa*	178'814	531'000	15.5%

\* (ohne Russland und Türkei) gemäss Hydropower&Dams World Atlas 2008

# Bedeutung der Speicherenergie (Jahrespeicher - Stauseen)

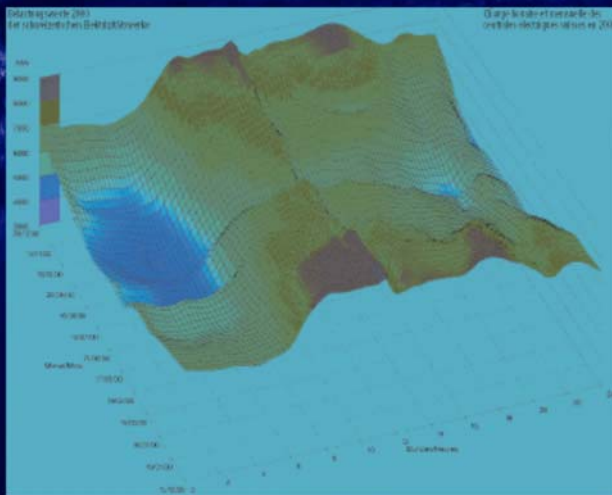
	Produktion GWh/a	% der Wasserkraft- produktion
 Deutschland	ca. 800	5%
 Österreich	11 622	30%
 Frankreich	ca. 12 000	17%
 Italien	16 871	36%
 Slowenien	-	-
 Schweiz	18 462	53%

# Rolle der Schweiz im Alpenraum und in Europa Leistung der Wasserkraftanlagen

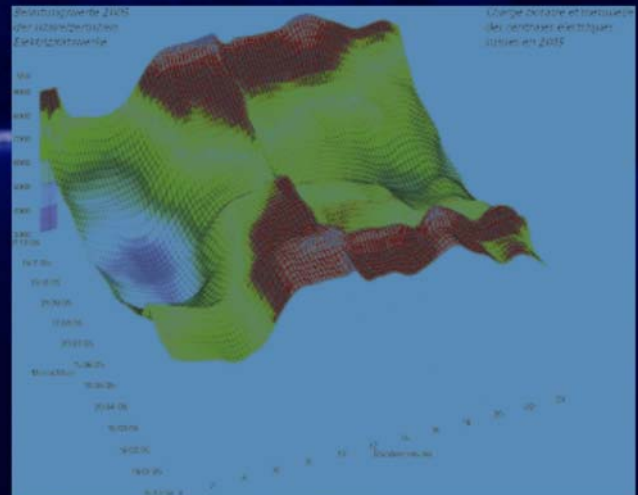


# Der Stromkonsument verlangt Spitzenenergie mit Knopfdruck

## Belastungsdiagramme

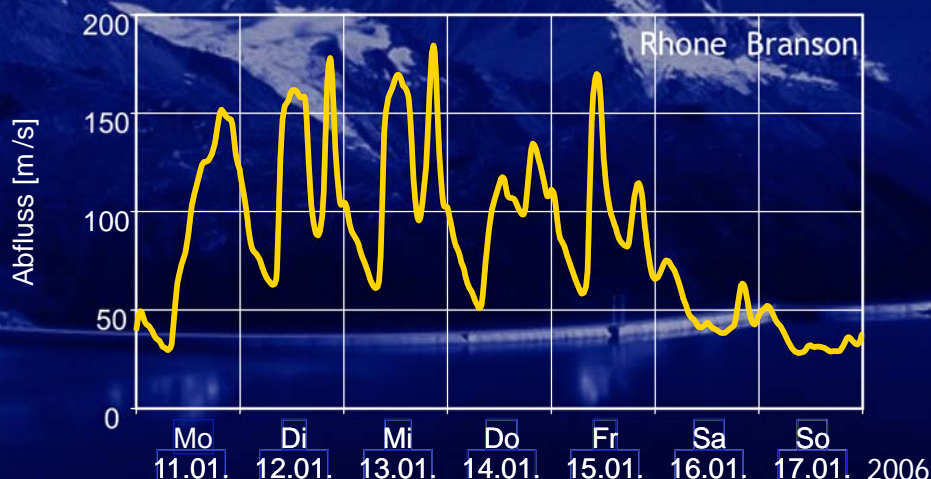


2000



2005

## Definition und Ursache von Schwall und Sunk



- Schwall:** rasch ansteigender Abfluss
- Sunk:** rasch sinkender Abfluss
- Schwall/Sunk:** häufiger Wechsel zwischen hohem und tiefem Abfluss
- Ursache:** Elektrizitätsproduktion der Speicherkraftwerke zur Deckung der *im Tagesverlauf stark variierenden Stromnachfrage*

# Definition und Ursache von Schwall und Sunk



[Meile; 2006]

Vispa Minimalabfluss  
1 m<sup>3</sup>/s 16.02.2006 ; 8h



Vispa Abfluss  
13 m<sup>3</sup>/s ; 16.02.2006 ; 17h



[Schnell; 2005]

Lech Abfluss ca. 20 m<sup>3</sup>/s



Lech Abfluss ca. 160 m<sup>3</sup>/s

# Massnahmen gegen Schwall und Sunk

	Bauliche Massnahmen:	Betriebliche Massnahmen:
Turbiniertes Wasser nicht in Fluss einleiten	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Direkte Seeeinleitung</li> <li>2) Getrenntes Rückgabefliessgewässer</li> </ol>	---
Turbiniertes Wasser gedämpft in Fluss einleiten, Abflussregime verbessern (Annäherung an natürlichen Zustand)	<ol style="list-style-type: none"> <li>3) <b>Ausgleichsbecken</b></li> <li>4) Turbinieren in den Stauraum eines Ausgleichskraftwerks oder in ein Becken einer <b>wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlage</b></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5) Beschränkung der Leistung (<math>Q_{max}</math>)</li> <li>6) Erhöhung des Minimalabfluss (<math>Q_{min}</math>)</li> <li>7) Stufenweises An-/Zurückfahren der Turbinen</li> <li>8) Antizyklischer Betrieb mehrerer Zentralen</li> </ol>
In betroffenen Gewässerzonen Auswirkungen minimieren	<ol style="list-style-type: none"> <li>9) <b>Verbesserung der Gewässermorphologie</b></li> <li>10) <b>Rückzugsmöglichkeiten für aquatische Lebewesen</b></li> </ol>	---

## Problematik der betrieblichen Massnahmen

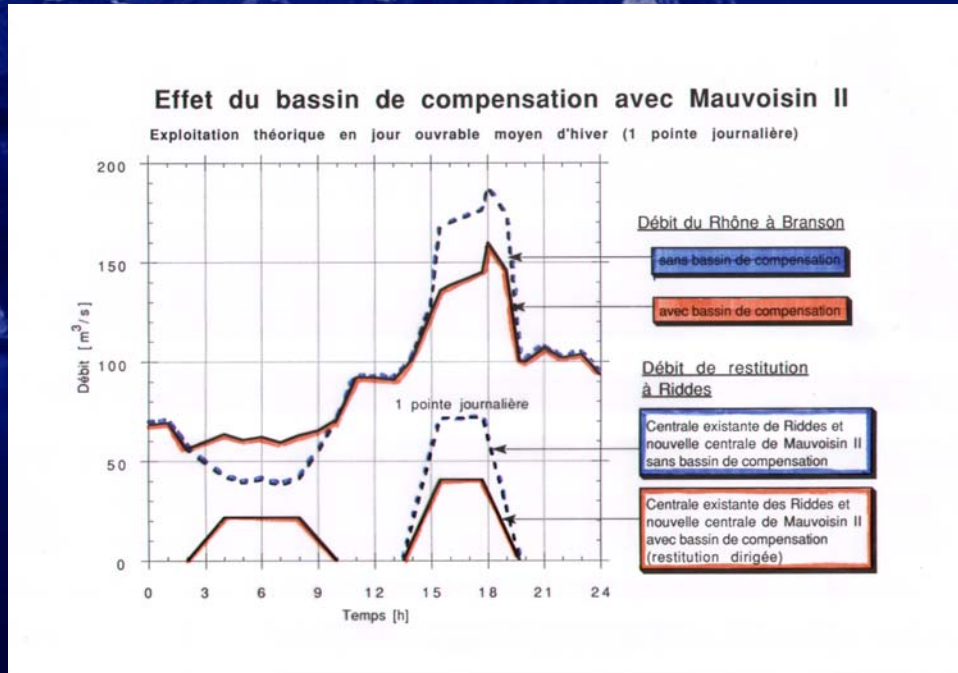
- Betriebliche Massnahmen bedeuten, dass die Speicherkraftwerke nicht mehr ungeschränkt zur Netzregulierung und zur Produktion von Spitzenenergie eingesetzt werden könnten
- Die betrieblichen Einbussen sind wirtschaftlich unverhältnismässig und gefährden die Nachhaltigkeit der Investitionen
- Die fehlende Spitzen- und Regulierenergie müsste anderweitig bereitgestellt werden, beispielsweise durch Gaskombikraftwerke, was wiederum mit zusätzlichen CO<sub>2</sub> - Emissionen verbunden wäre
- Die Eigenständigkeit der schweizerischen Elektrizitätsversorgung und Sicherheit der Stromversorgung würde gefährdet

## Problematik der technischen Massnahmen

- Bauliche oder technische Massnahmen sind auch investitionsintensiv
- Sie lassen sich ökonomisch und energiewirtschaftlich vertreten durch einen hohen Ökolabel der Wasserkraft (erhöhter Strompreis)
- Bauliche oder technische Massnahmen erzielen optimale Synergien falls sie als Mehrzweckprojekte realisiert werden
- Partnerschaft zwischen den verschiedenen Interessengruppen ist von grösster Bedeutung



# Beispiele von baulichen Massnahmen: Ausgleichsbecken



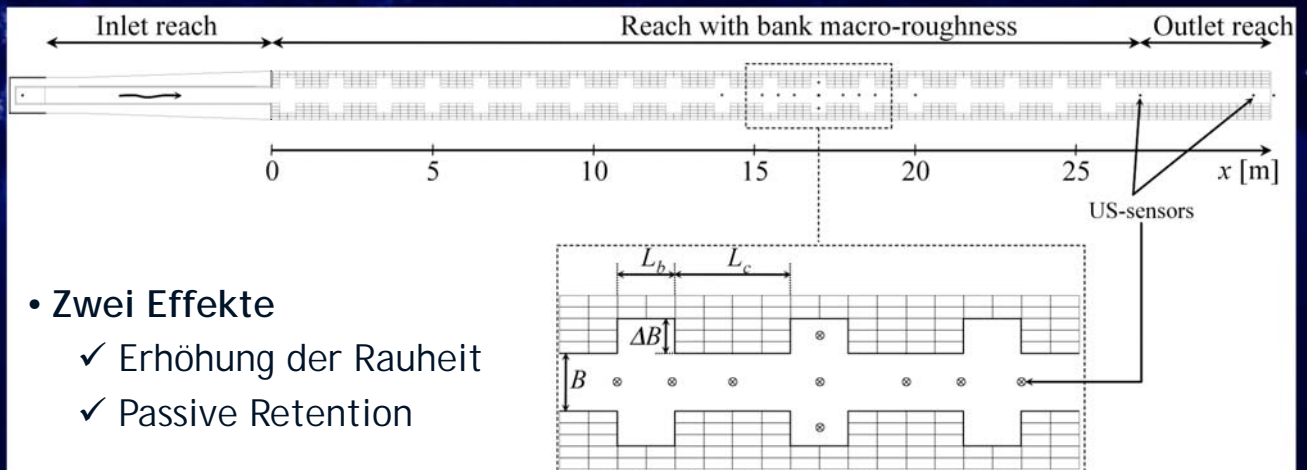
Projekt Mauvoisin II - 550 MW (1996)  
Ausgleichsbecken 470'000 m<sup>3</sup> Kosten 40 Mio. Fr.

# Beispiele von baulichen Massnahmen Ausgleichsbecken



Projekt Mauvoisin II - 550 MW (1996)  
Ausgleichsbecken 470'000 m<sup>3</sup> Kosten 40 Mio. Fr.

# Beispiele von baulichen Massnahmen: Verbesserung der Gewässermorphologie mit grossmassstäblichen Uferrauheiten



Forschungsprojekt Dr. Tobias Meile 2003 - 2008

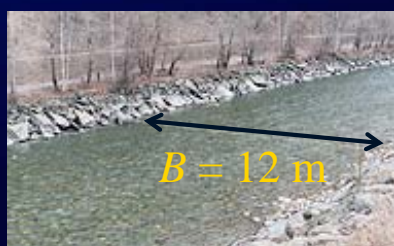
## Verbesserung der Gewässermorphologie mit grossmassstäblichen Uferrauheiten

- **Anwendungsbeispiel** Ausgangslage:
  - ✓ Gewässergeometrie:  $B = 12 \text{ m}$ ,  $S_0 = 1.5 \text{ ‰}$ ,  $K_{St} = 35 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ ,  $L = 20 \text{ km}$
  - ✓ Speicherzentrale bei km 0.0:  $Q_{total} / Q_b = 58.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / 9.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 6 / 1$
  - ✓ Turbinierdauern:  $T = 2 \text{ h}$  respektive  $T = 0.5 \text{ h}$



• Zieldefinition:  $Q_{max} / Q_{min} = 2$

0 km



10 km



20 km

Forschungsprojekt Dr. Tobias Meile 2003 - 2008

Bilder: [rivermanagement.ch]

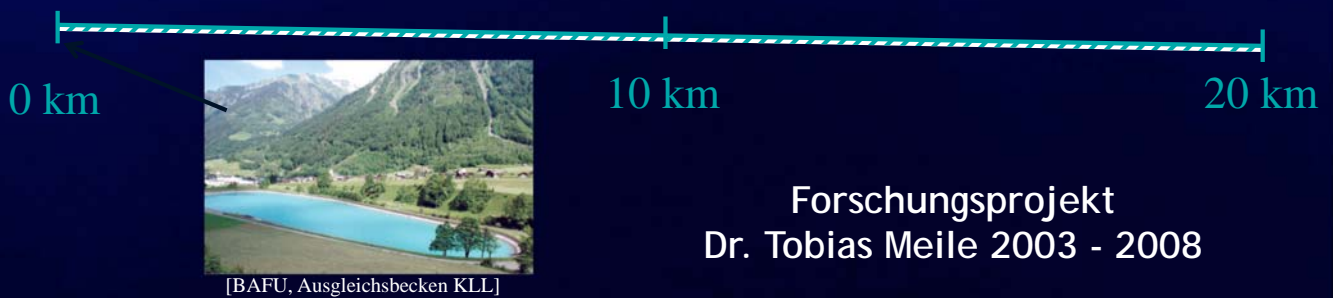
# Verbesserung der Gewässermorphologie mit grossmasstäblichen Uferrauheiten

## Vergleich von 4 Fällen

1) **Status quo** = Fließretention prismatisches Gerinne



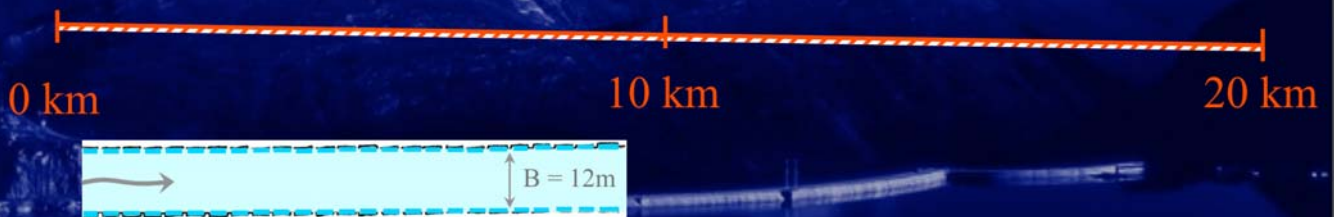
2) **Ausgleichsbecken** unmittelbar nach Zentrale



# Verbesserung der Gewässermorphologie mit grossmasstäblichen Uferrauheiten (GMR)

## Vergleich von 4 Fällen

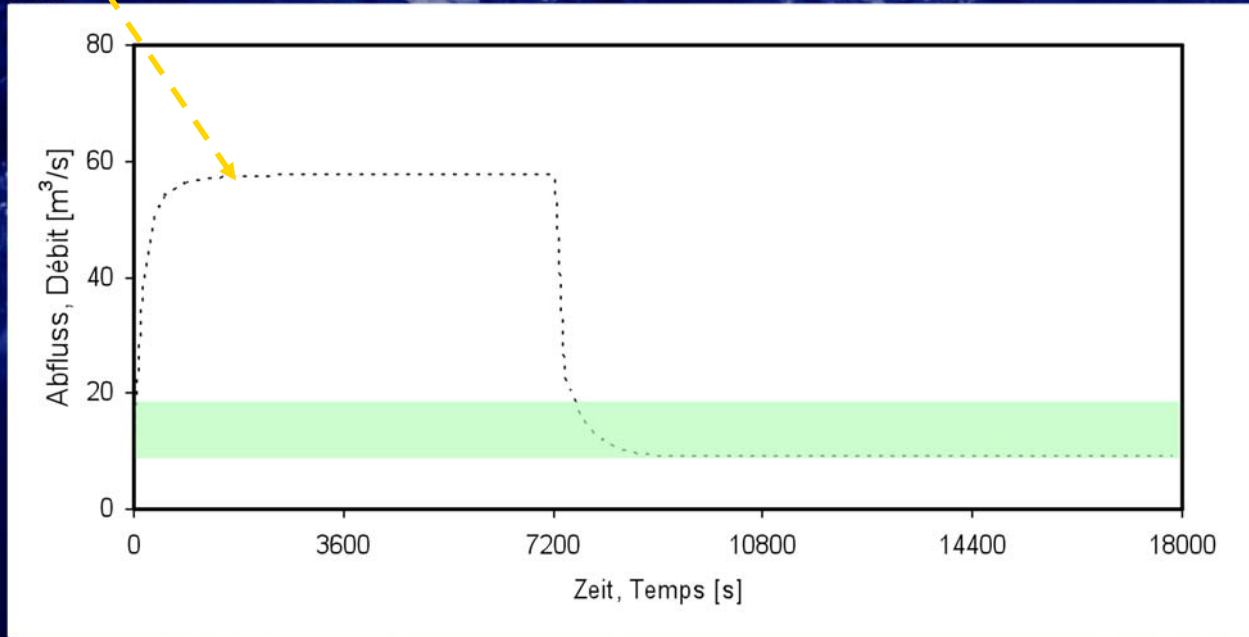
3) **Ufer mit GMR** (ohne signifikante passive Retention)



4) **Ufer mit GMR** (inklusive passive Retentionsflächen)

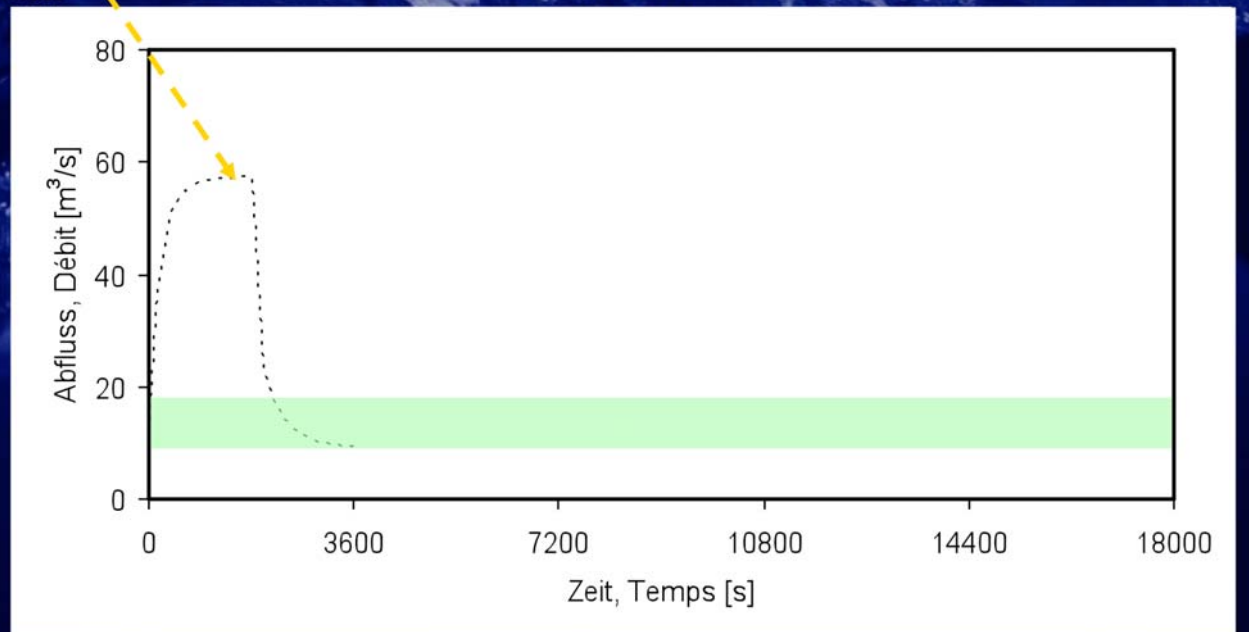


## Turbinierdauer = 2 Stunden





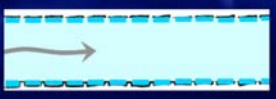

Forschungsprojekt Dr. Tobias Meile 2003 - 2008

## Turbinierdauer = 0.5 Stunden



Forschungsprojekt Dr. Tobias Meile 2003 - 2008

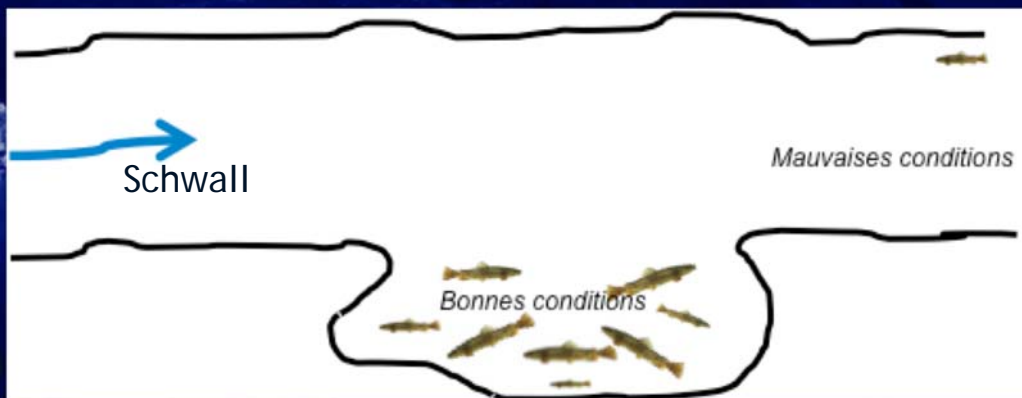
## Reduzierung des Schalles durch grossmasstäblichen Uferrauheiten: Vergleich von 4 Fällen

	$T = 2 \text{ h}$ $Q_{max} / Q_{min}$	$T = 30 \text{ min}$ $Q_{max} / Q_{min}$	Massnahme
	6 / 1	3.9 / 1	Status quo
	2 / 1	2 / 1	Vol. = 280'000 m <sup>3</sup> (2h) Vol. = 70'000 m <sup>3</sup> (30min)
	5.6 / 1	3 / 1	Gewässerumbau zur Erhöhung der Uferrauheit ; 10 km
	4.9 / 1	2.3 / 1	Idem & Bereitstellung von passiven Retentionsflächen 64'000 m <sup>2</sup>

- Einfluss von  $T$  ist gross
- Optimierung der Massnahmen

Forschungsprojekt  
Dr. Tobias Meile 2003 - 2008

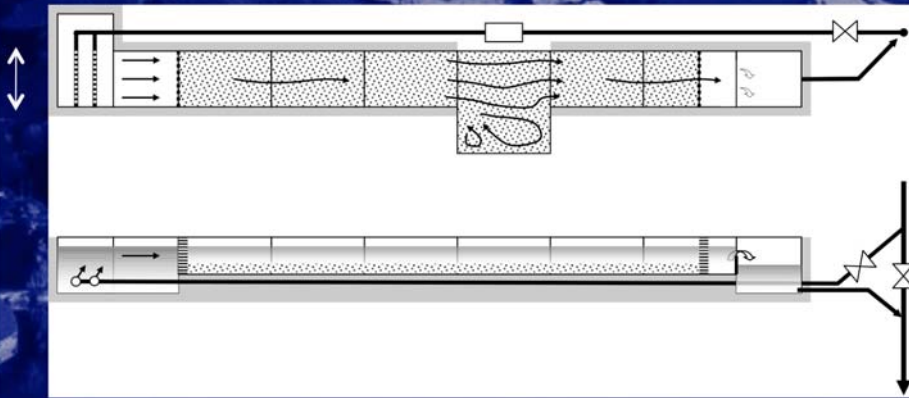
## Beispiele von baulichen Massnahmen: Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk Uferrückzugsmöglichkeiten von Fischen



Wie müssen die Uferbuchten ausgestaltet sein, damit sich die Fische bei Schwall und Sunk dorthin zurückziehen können?

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk



Systematische Experimente in einem Kanal  
mit Fischen:  
Zusammenarbeit LCH-EPFL -EIA-Fr - EAWAG

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

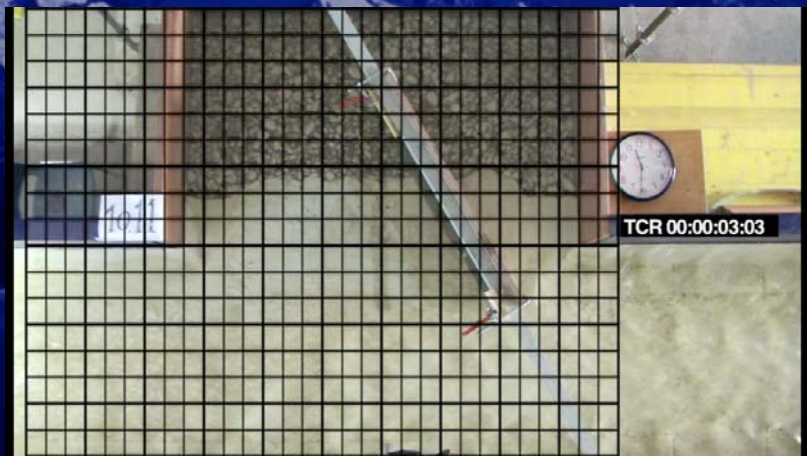
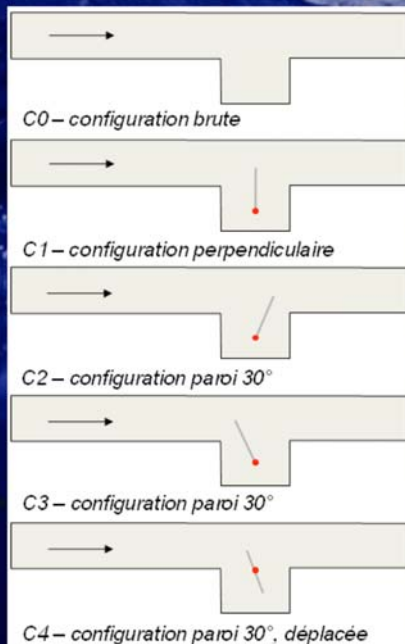
# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk



Systematische Experimente in einem Kanal  
mit Fischen:  
Zusammenarbeit LCH-EPFL -EIA-Fr - EAWAG

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk

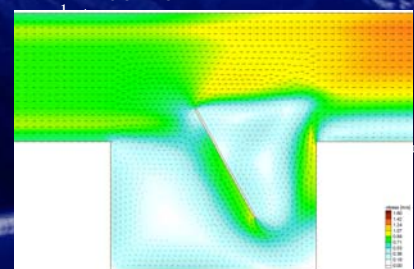
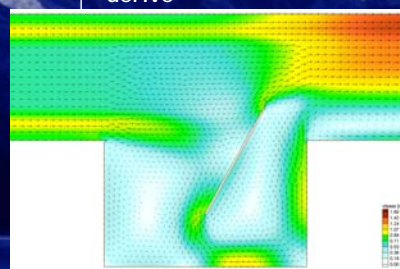
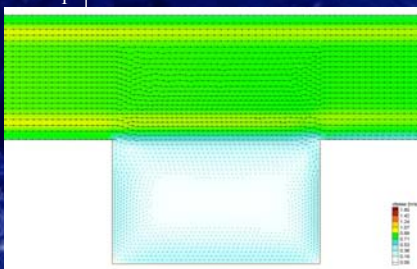


Systematische Experimente in einem Kanal mit Fischen: Untersuchte Bucht-konfigurationen

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

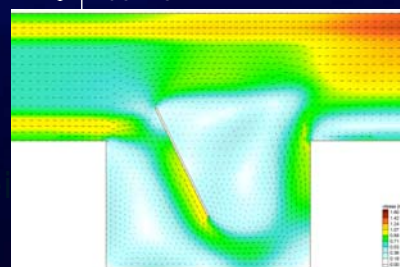
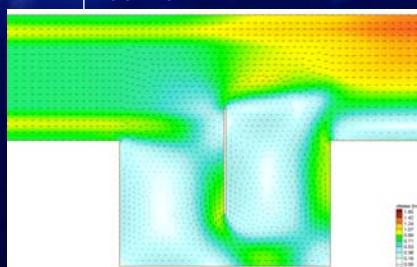
# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk

C0:  $Q_{\text{dérivé}} = 3,5 \text{ l/s (1,6 \%)}$     C2:  $Q_{\text{dérivé}} = 48 \text{ l/s (22 \%)}$     C4:  $Q_{\text{dérivé}} = 53 \text{ l/s (42 \%)}$



C1:  $Q_{\text{dérivé}} = 59 \text{ l/s (27 \%)}$

C3:  $Q_{\text{dérivé}} = 69 \text{ l/s (31 \%)}$

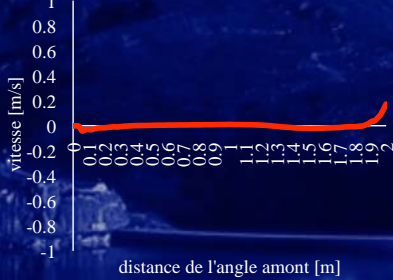


Geschwindigkeitsverteilung

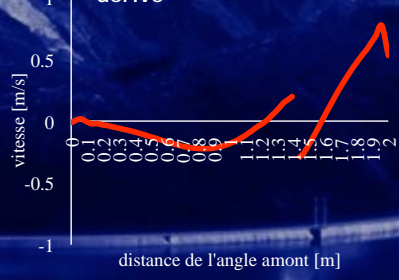
Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk

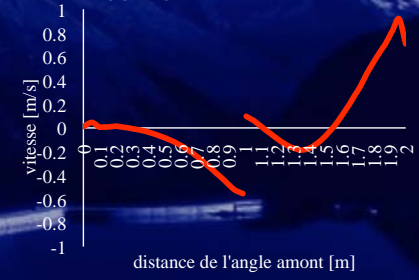
CO:  $Q_{\text{dérivé}} = 3,5 \text{ l/s (1,6 \%)}$



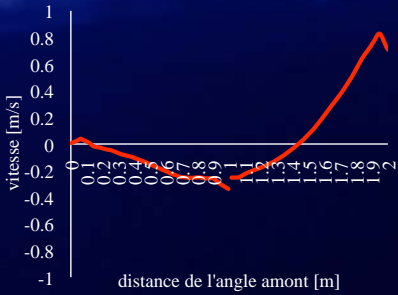
C2:  $Q_{\text{dérivé}} = 48 \text{ l/s (22 \%)}$



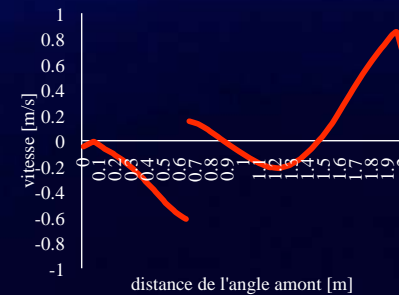
C4:  $Q_{\text{dérivé}} = 53 \text{ l/s (42 \%)}$



C1:  $Q_{\text{dérivé}} = 59 \text{ l/s (27 \%)}$



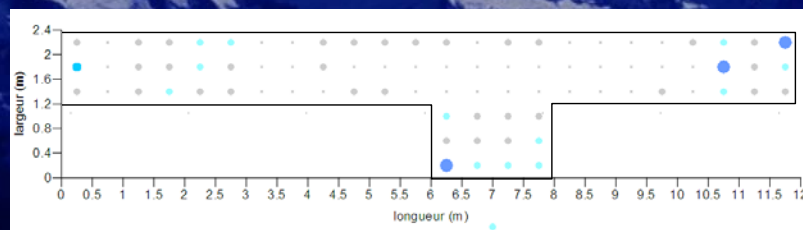
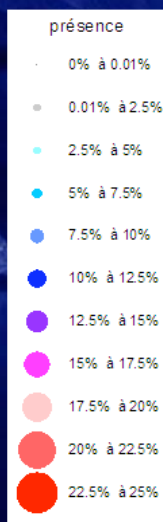
C3:  $Q_{\text{dérivé}} = 69 \text{ l/s (31 \%)}$



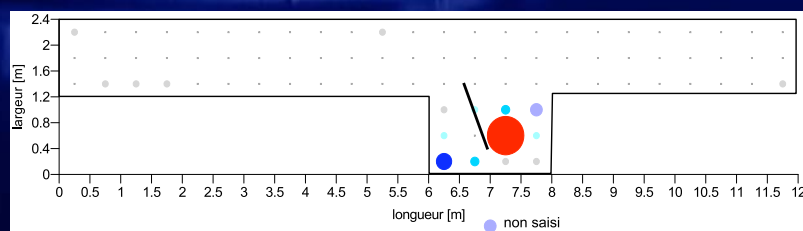
**Geschwindigkeitsverteilung zwischen Kanal und Bucht**

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk



C1



C4

**Räumliche Verteilung der Forellen**

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

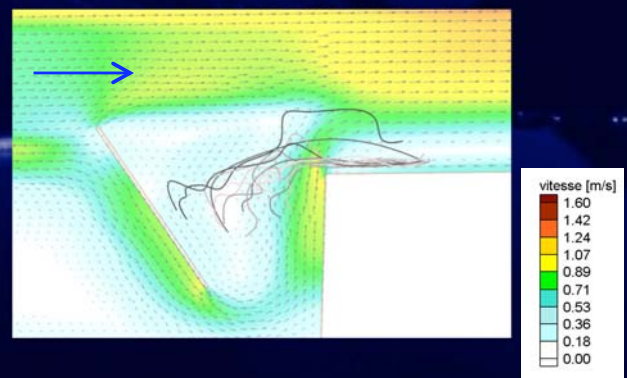
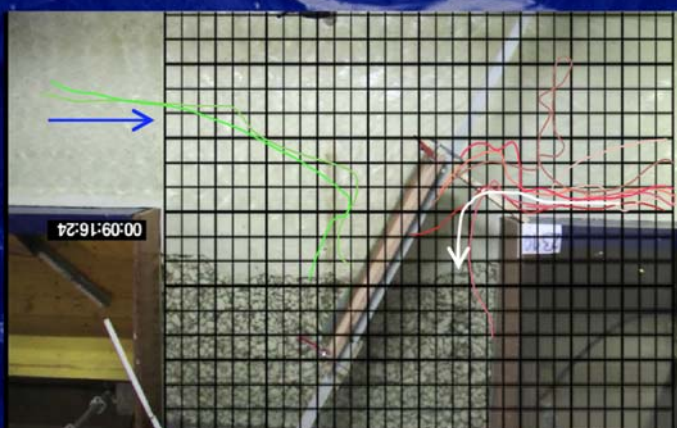
# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk

Aufenthaltsparameter	Buchtkonfigurationen				
	C0	C1	C2	C3	C4
<i>Totale Präsenzzeit [%]</i>	33	75	75	85	80
<i>Minimaler Aufenthalt [%]</i>		38	45,5	64	45
<i>Maximaler Aufenthalt [%]</i>		100	95,5	100	100
<i>Eintrittszahl von oben [%], [n°Eintritt :n° Total]</i>	14 (1:7)	-	32 (7:22)	-	46 (6:13)
<i>Eintrittszahl von unten [%], [n°Eintritt :n° Total]</i>	55 (6:11)	55 (6:11)	53 (8:15)	-	94 (17:18)
<i>Breite des Eintrittsfenster [m]</i>	-	0.36	0.32	-	0.38

Vergleich der Buchtkonfigurationen:  
Mittel von 3 Versuchen (10 , 10, 20 Forellen)

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

# Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk



**Buchtkonfiguration C4: Schwimmwege der Fische**

Forschungsprojekt J.-M. Ribí 2006 - 2010, Masterarbeit K. Steffen 2009

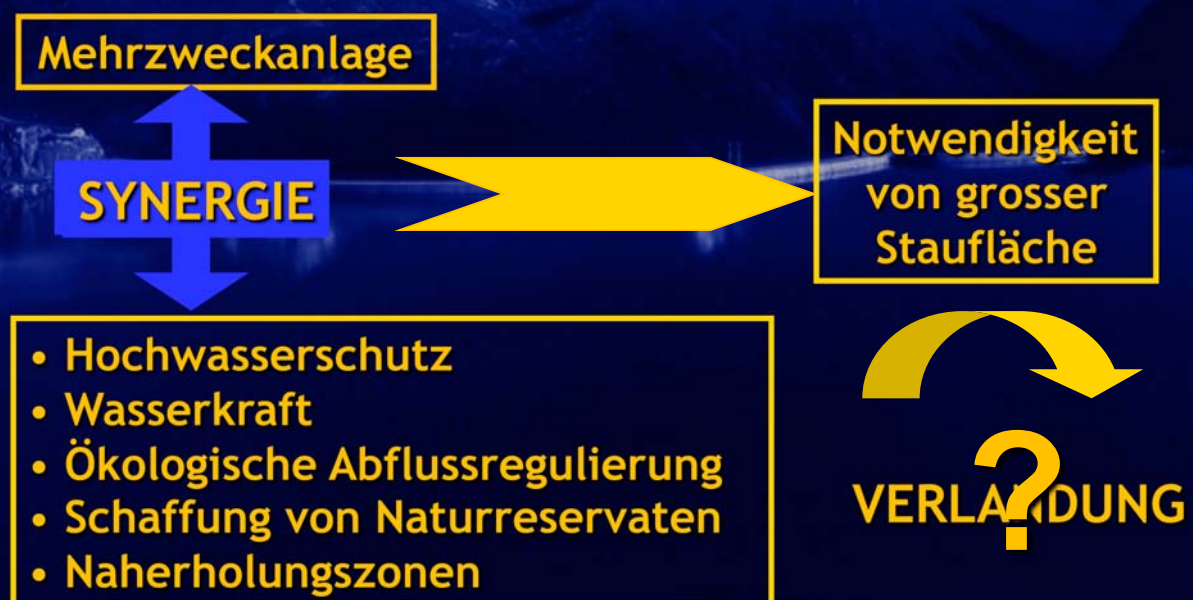
# Beispiele von baulichen Massnahmen: Ausnutzung von Synergien bei Mehrzweckprojekten



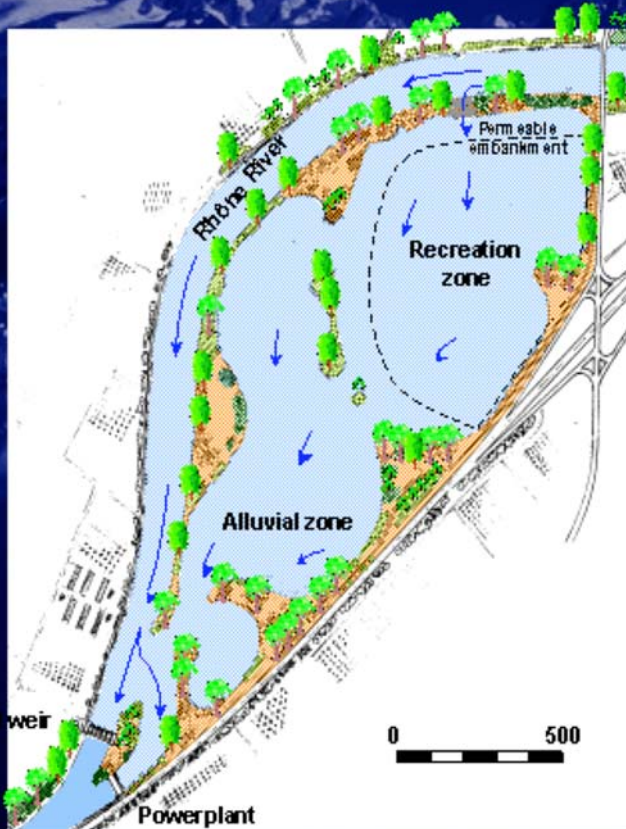
Wissenschaftliche  
Fallstudie an der  
Rhone

Forschungsprojekt Dr. Ph. Heller und Dr. M. Pellaud 2003 - 2007

# Beispiele von baulichen Massnahmen: Ausnutzung von Synergien bei Mehrzweckprojekten



# Denkbares Mehrzweckprojekt an der Rhone



Oberfläche 1 km<sup>2</sup>

Volumen 7.6 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (Stauhöhe 7 m)

Verminderung der Hochwasserspitze um 200 m<sup>3</sup>/s

Eliminierung von Schwall und Sunk : 0.7 m im Becken (Wochentag)

Jährliche Energieproduktion: 43 GWh

Schaffung von Biotopen und Naturschutzreservaten

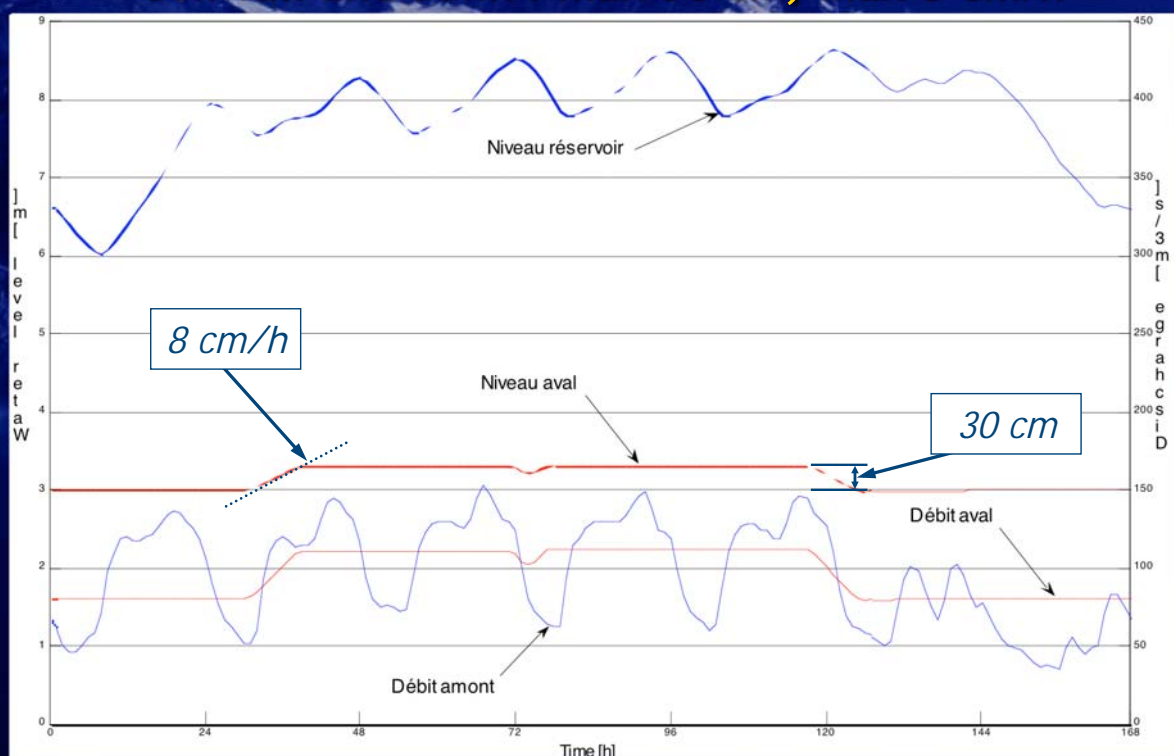
Naherholung, Wassersport

Beherrschung der Verlandung

Kosten ca. 200 Mio. Fr.

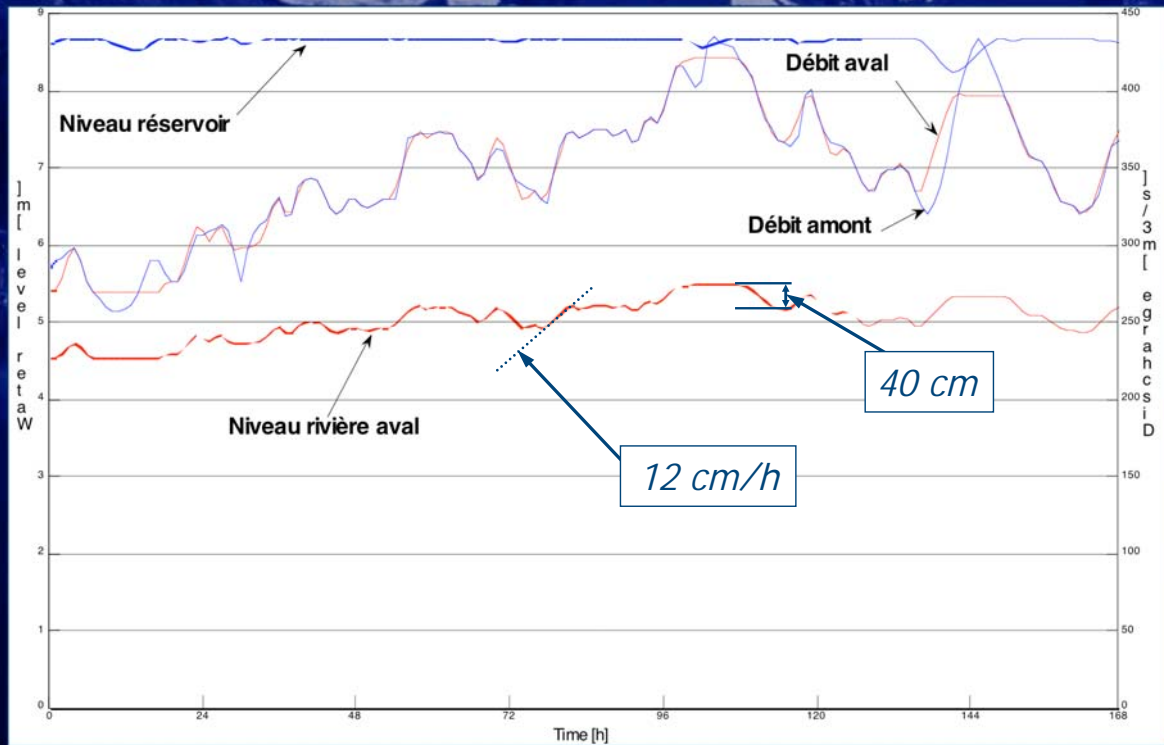
## Schwalldämpfung: typische Winterwoche

Schwall und Sunk : max 30 cm, max 8 cm/h

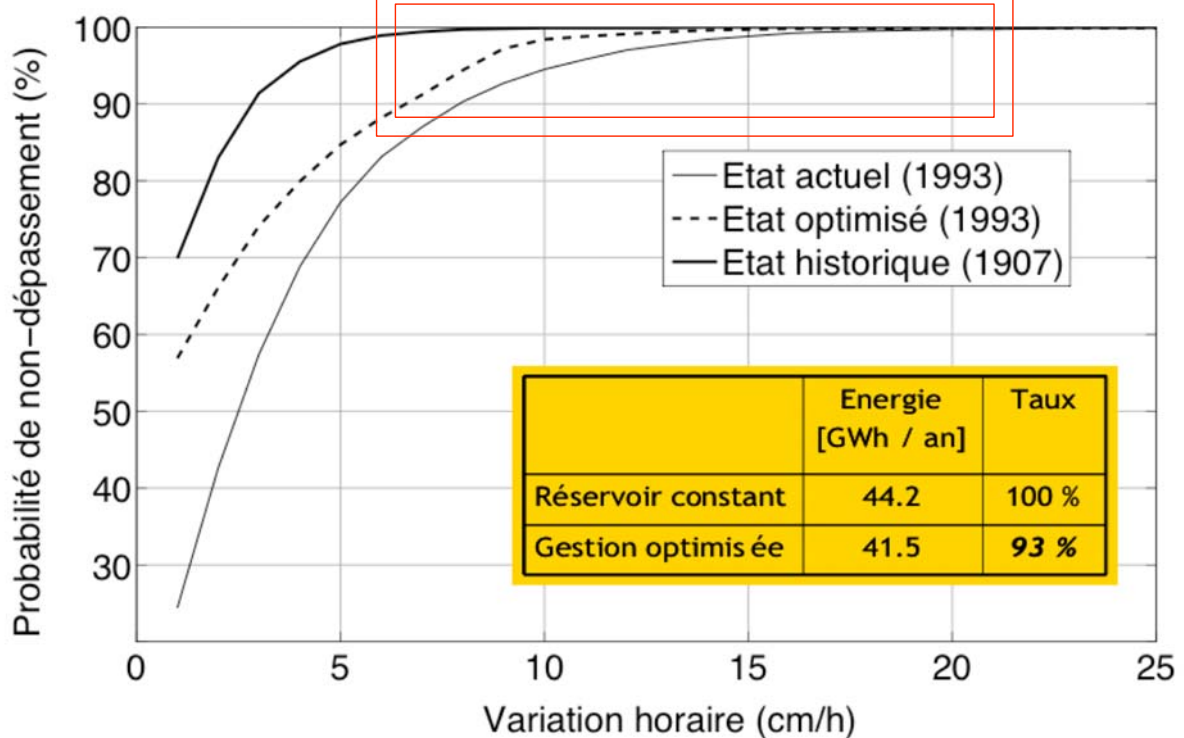


# Schwalldämpfung: typische Sommerwoche

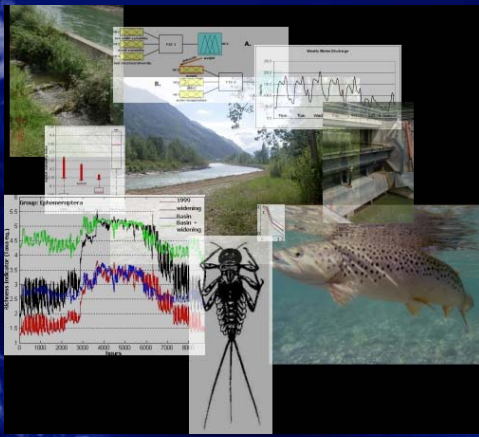
Schwall und Sunk : max 40 cm, max 12 cm/h



# Ökologisch optimierte Schwalldämpfung



## Vergleich von Szenarien Indikator EPT



Invertebraten (Gruppen E,P,T)

C	Heute	Rhone- verbreiterung	Synergie	Rhoneverbreiterung und Synergie
E	2.43	3.72	2.87	4.60
P	1.27	0.89	5.48	7.29
T	1.21	0.95	3.31	3.23
EPT	4.91	5.57	11.65	15.13

## Denkbares Mehrzweckprojekt an der Rhone SYNERGIE

### Vergleich von Szenarien - SPU Fische (ha)

Fische: Habitatsqualität (statistisches Modell)  
gemäss CEMAGREF

	Heute	Verbreiterung	Synergie	Verbr. + Synergie
Sohle	9.02	15.69 (+6.67)	9.63 (+0.61)	16.5 (+7.48)
Ufer	35.93	46.69 (+10.76)	34.01 (-1.92)	46.51 (+10.58)
Feuchtzonen	30.09	40.09 (+10)	24.26 (-5.83)	41.40 (+11.31)
Abflussber.	90.98	127.34 (+36.36)	100.75 (+9.77)	136.68 (+45.7)

*Qualität der Gerinneverbreiterung vermutlich unterschätzt!*

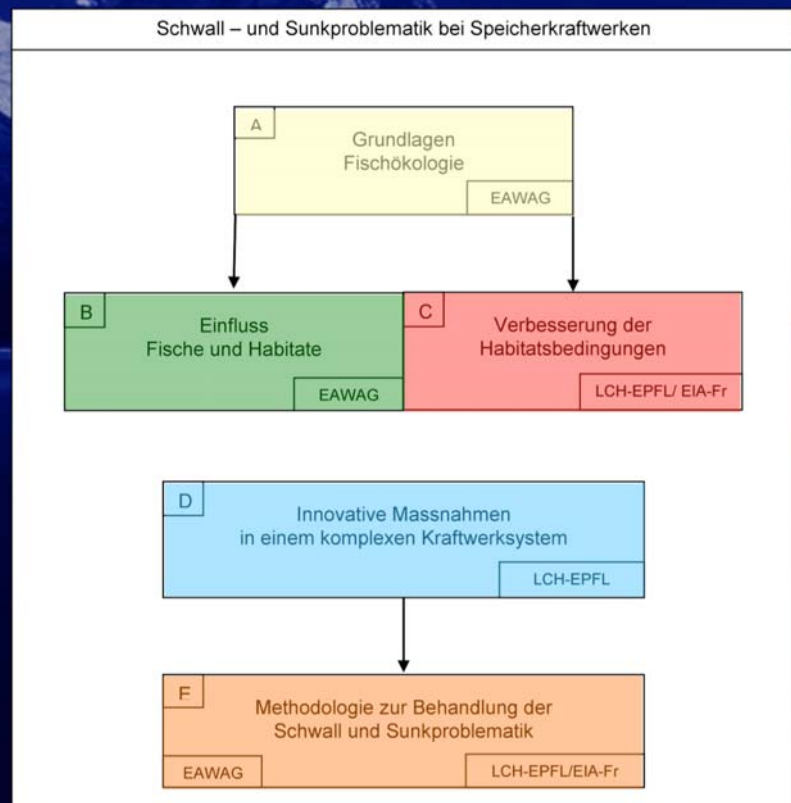
QuickTime™ and a  
Cinepak decompressor  
are needed to see this picture.

## KTI-Forschungsprojekt 2008 - 2011

### *Nachhaltige Nutzung der Wasserkraft*

*Innovative  
Massnahmen zur  
Reduzierung der  
Schwall- und  
Sunkproblematik*

**Zusammenarbeit  
LCH-EPFL -EIA-Fr -  
EAWAG - KWO -  
groupe e - Kt. FR -  
Ribi - SWV**



## Schlussfolgerungen

- Betriebliche Massnahmen sind wirtschaftlich unverhältnismässig und gefährden die Versorgungssicherheit
- Technische Massnahmen sind investitionsintensiv und müssen durch einen höheren Strompreis amortisiert werden (Ökolabel)
- Verbesserung der Gewässermorphologie ist weniger effizient in der Schwallverminderung als die Verbesserung des Abflussregimes ( Ausgleichsbecken)
- Die beste Wirkung kann grossräumig mit Mehrzweckbecken erzielt werden (Beispiel Rhone)

*„Das Wasser rauscht, das Wasser schwoll, ein  
Fischer sass daran.“*

*Goethe*

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**