

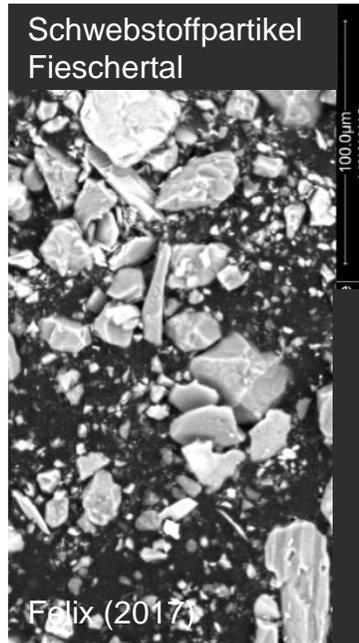
Schwebstoffhaltiger Gebirgsbach



Wysswasser, KW Fieschertal

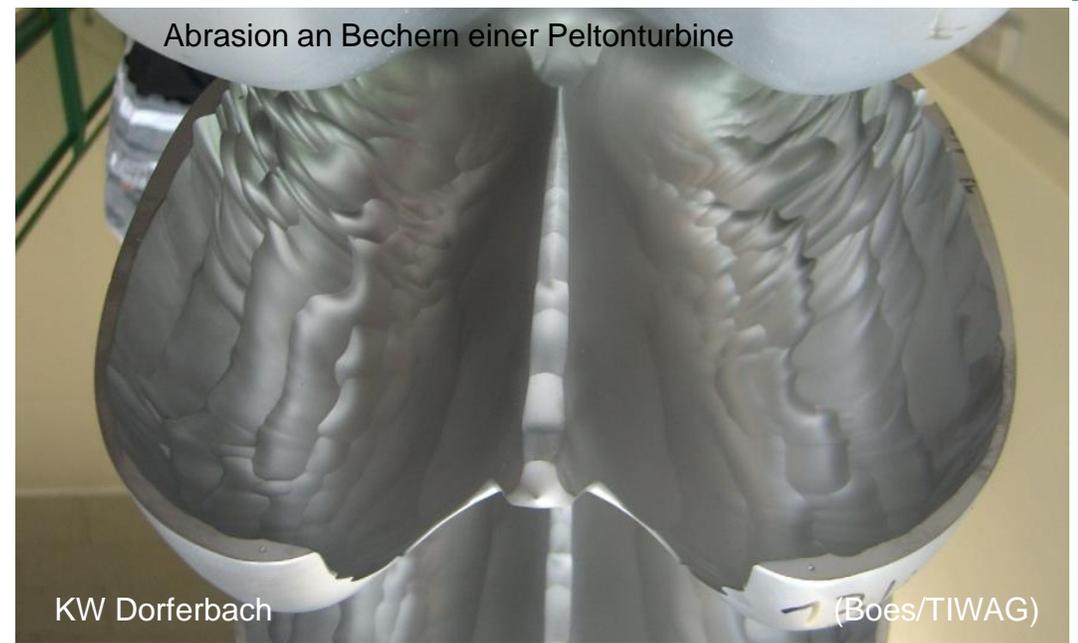
(VAW 08.08.2013)

Schwebstoffpartikel
Fieschertal



Felix (2017)

Abrasion an Bechern einer Pelton turbine



KW Dorferbach

(Boes/TIWAG)

Schwebstoff-Monitoring in Echtzeit für den optimierten Betrieb von Wasserkraftanlagen

Prof. Dr. Robert Boes, Dr. David Felix, Dr. Ismail Albayrak
ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

Gliederung

- 1) Einleitung: hydro-abrasiver Verschleiß und Gegenmaßnahmen
- 2) Pilotstudie KW Fieschertal (Kanton Wallis, CH)
- 3) Resultate der Schwebstoffmessungen
- 4) Abschalt-Szenario für Hochwasser 2012
- 5) Kraftwerks-Abschaltung im Hochwasser 2017
- 6) Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

Variables Sedimentaufkommen in alpinen Fließgewässern

Fast klares Wasser



Stark schwebstoffhaltiges Wasser



Gebirgsbach Wysswasser, oberstrom der Wasserfassung der WKA Fieschertal, Wallis (CH)

Probleme mit Sedimenten an Wasserkraftanlagen

Speicherwasserkraft

Stauseeverlandung



Stamm et al. (2016), KWO

Räterichsbodensee (Kraftwerke Oberhasli, KWO)

**Laufwasserkraft
(Hoch- und Mitteldruck)**

Turbinenabrasion

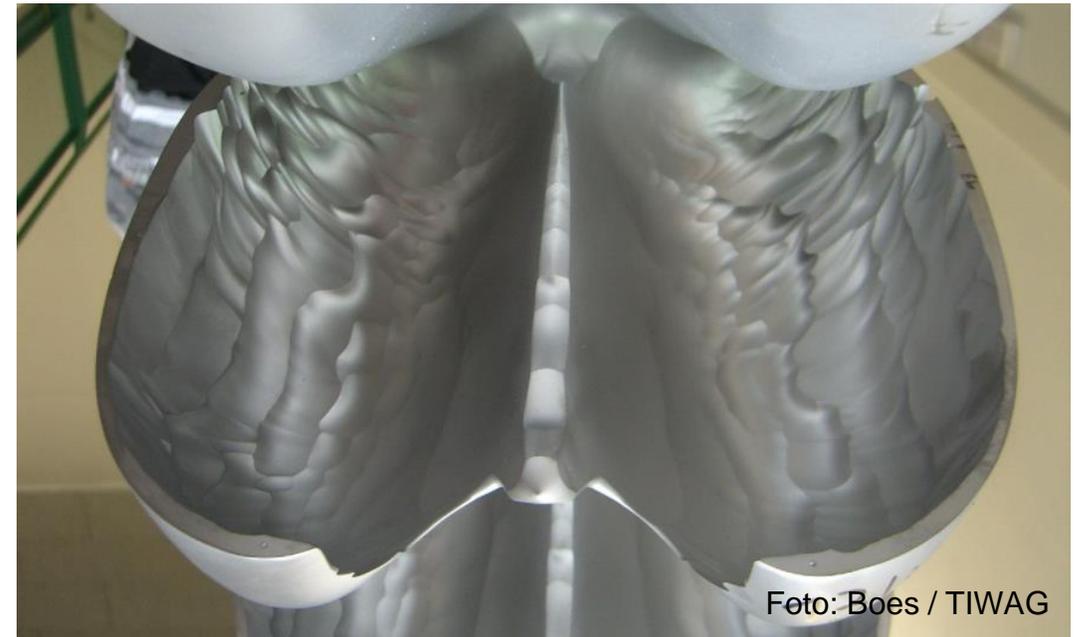
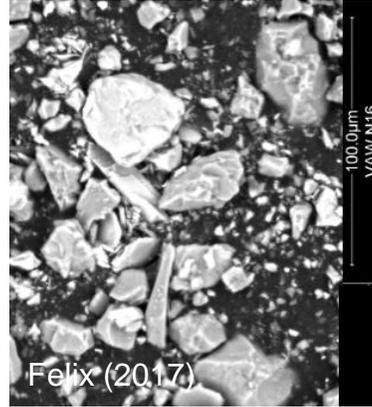


Foto: Boes / TIWAG

KW Dorferbach, $h_B = 686$ m (TIWAG-Tiroler Wasserkraft)

Hydroabrasiver Verschleiß: Ursache und Auswirkungen

Feinsedimente und hohe Geschwindigkeiten



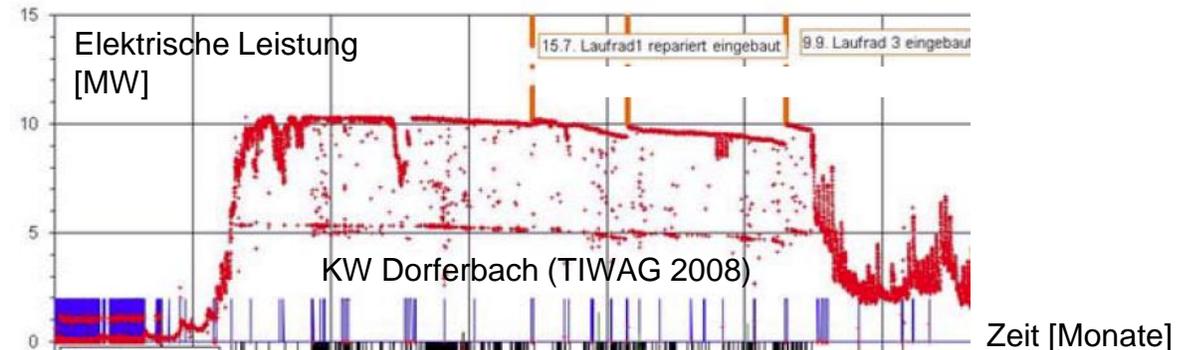
Turbinenabrasion



größere
Rauheit

Abweichungen
von der geplanten
Geometrie

Wirkungsgradreduktionen



höhere Unter-
haltskosten

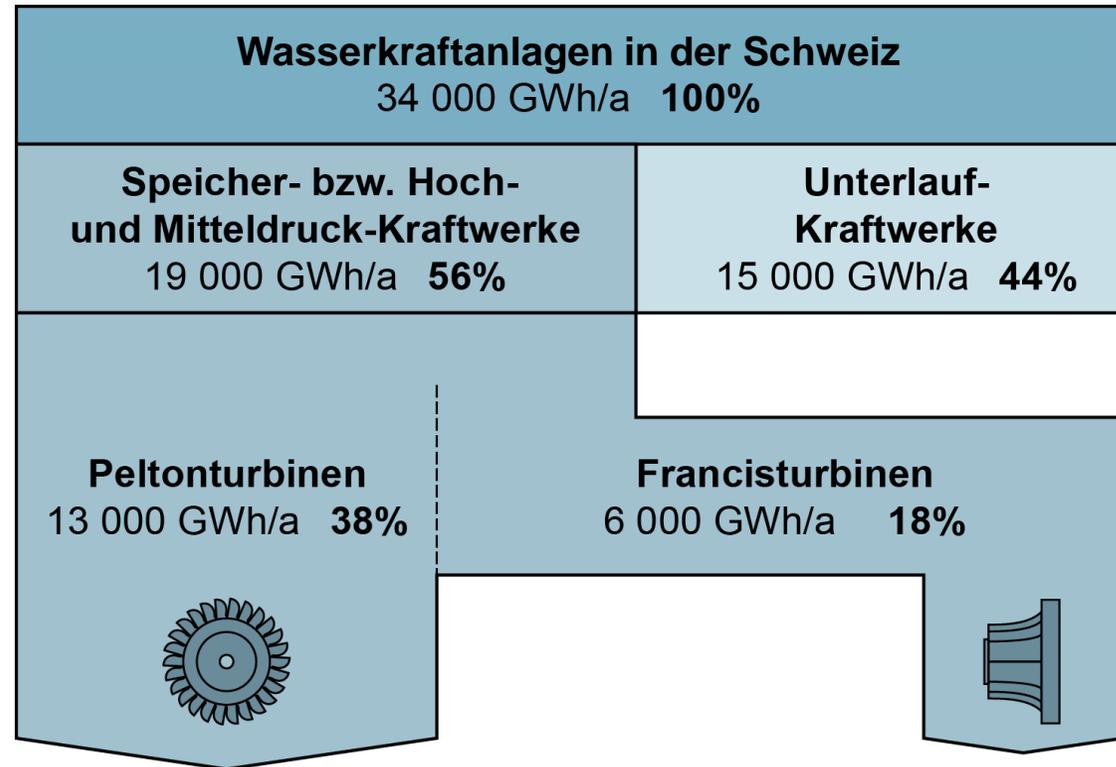
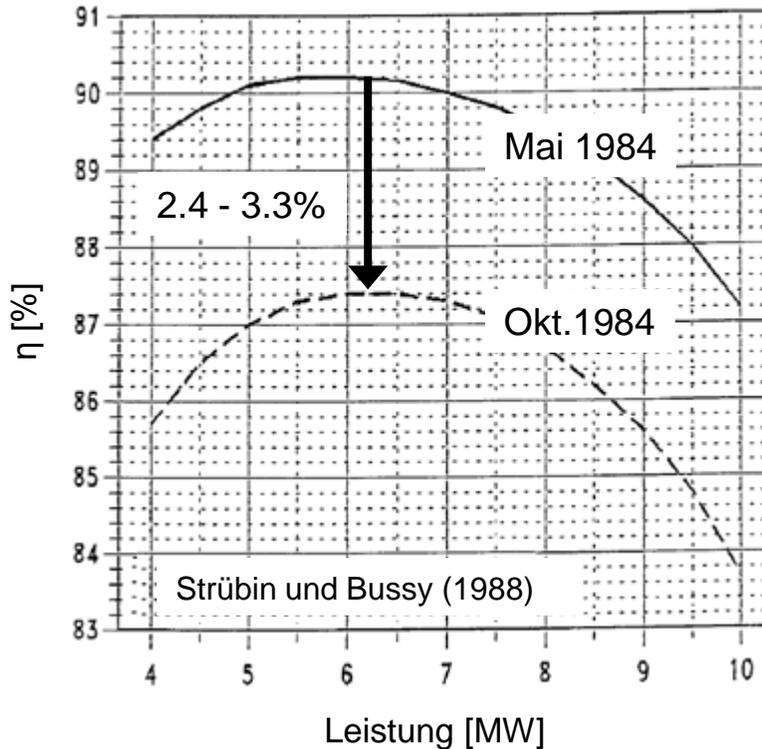
tiefere
Einnahmen

schlechtere
Wirtschaftlichkeit

ineffiziente Nutzung
des Wasserkraftpotentials

Wirkungsgradreduktionen und Produktionsverluste

Beispiel Wasserkraftanlage Aletsch-Mörel



$\Delta \eta \approx 0.5\%/a$ Wirkungsgradabfall $\Delta \eta \approx 1.5\%/a$

65 GWh/a Produktionsverlust **90 GWh/a**

□ 3.2 Mio € /a mit 50 €/MWh (Annahme) □ 4.5 Mio € /a
 + Revisionskosten □ 20 Mio € /a

nach Kalberer, Sulzer-Escher Wyss (1988)

Einflussgrößen für Turbinenabrasion

Basierend IEC 62364 (2013), angepasst für Erosion an Bechern von **Peltonlaufrädern** (Felix 2017)

Erosionstiefe im Lauf der Zeit

dimensionsbehafteter Koeffizient für Einflüsse des Strömungsfeldes (Auftreffwinkel), Bechergröße, relativer Erosionswiderstand [...]

Relativgeschwindigkeit (Wasser – Turbinenbauteil) [m/s]

Anzahl Wasserstrahlen (Düsen in Betrieb) [-]

$$\Delta d_e(t) = C w^3 \sum_{i=0}^{i=t/\Delta t} \frac{z_0(t)}{z_2} SSC(t) k_{size}(t) k_{shape} k_{hardness} \Delta t$$

Anzahl Laufradbecher [-]

Schwebstoffkonzentration [g/l]

Faktoren für Partikeleigenschaften [-]

Zeitintervall [h]

je nach Turbine

je nach Einzugsgebiet

je nach "Wetter"

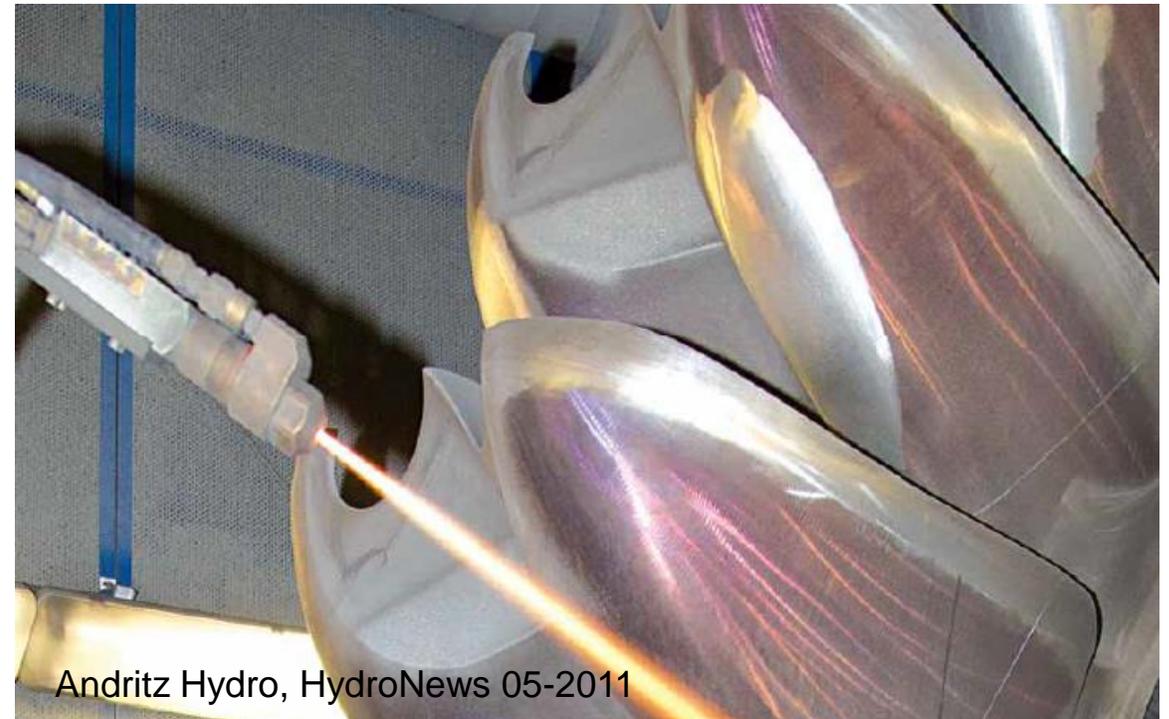
je nach Betrieb

Gegenmaßnahmen: Unterhalt und Widerstand erhöhen

Aufschweißen und Schleifen



Hartbeschichtungen (Wolframkarbid)



Gegenmaßnahmen: Reduktion der Sedimentfracht

Bauliche Maßnahmen

- Entsander, Kopfspeicher etc.



Betriebliche Maßnahmen

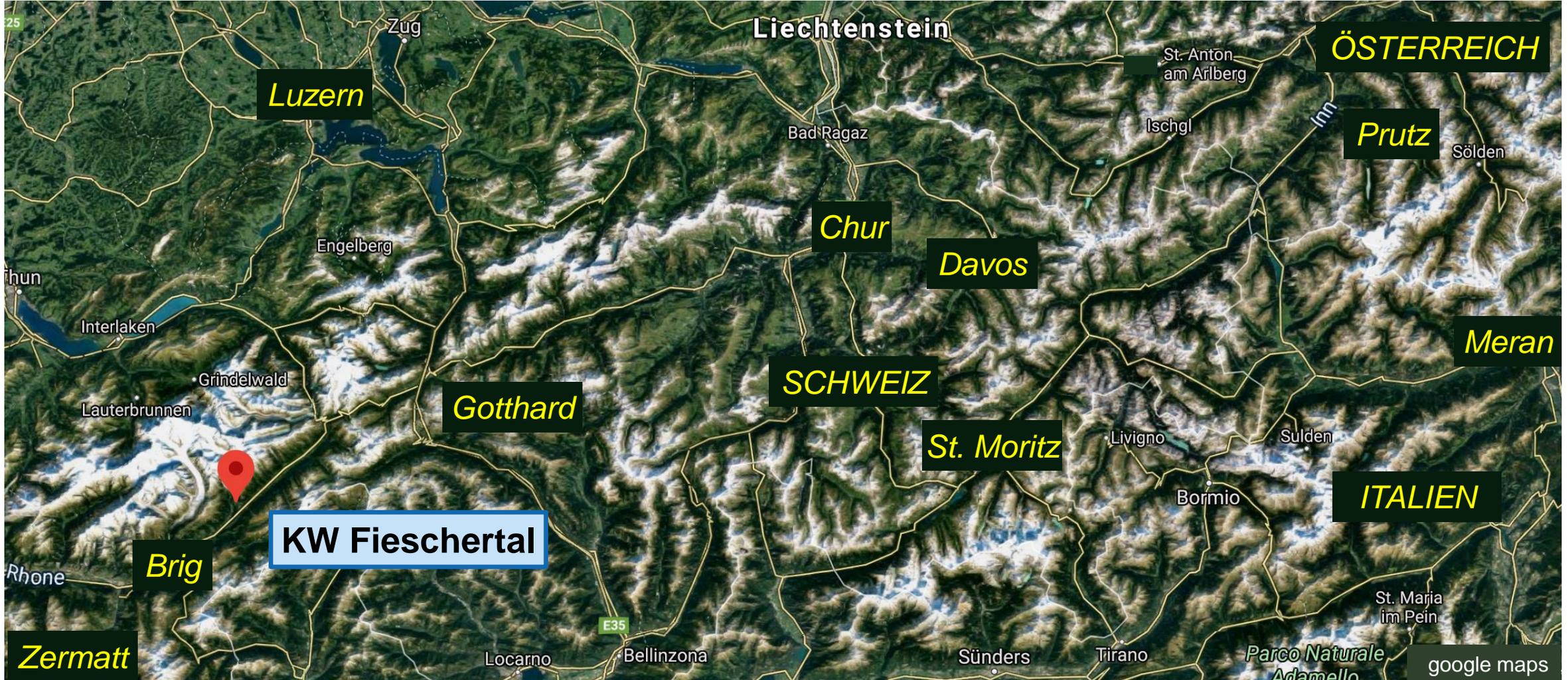
- optimierte Spülungen
- **Betrieb einstellen während Hochwassern**



Gliederung

- 1) Einleitung: hydro-abrasiver Verschleiß und Gegenmaßnahmen
- 2) Pilotstudie KW Fieschertal (Kanton Wallis, CH)
- 3) Resultate der Schwebstoffmessungen
- 4) Abschalt-Szenario für Hochwasser 2012
- 5) Kraftwerks-Abschaltung im Hochwasser 2017
- 6) Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

KW Fieschertal, Wallis (CH)

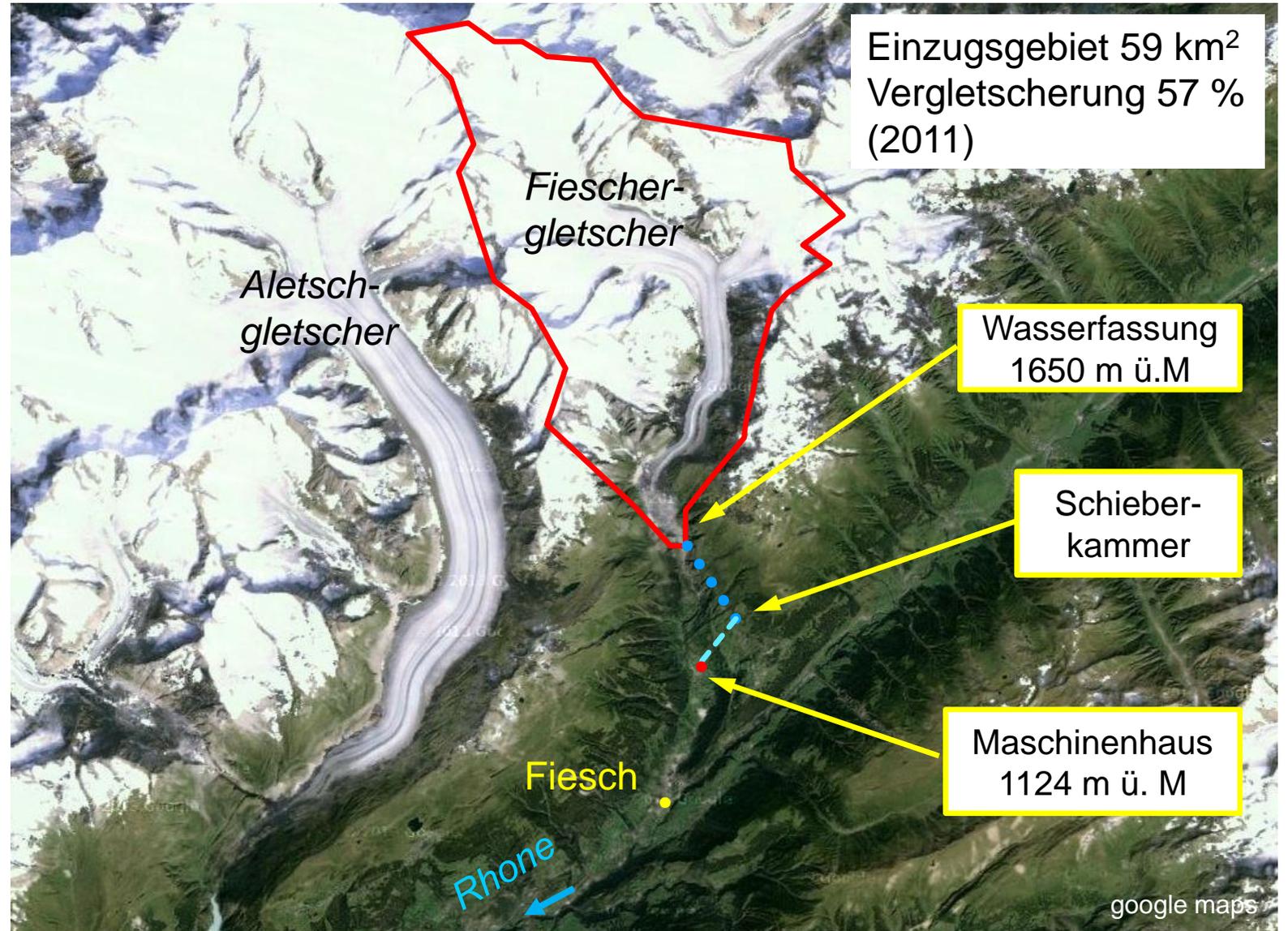


KW Fieschertal: Einzugsgebiet und Layout

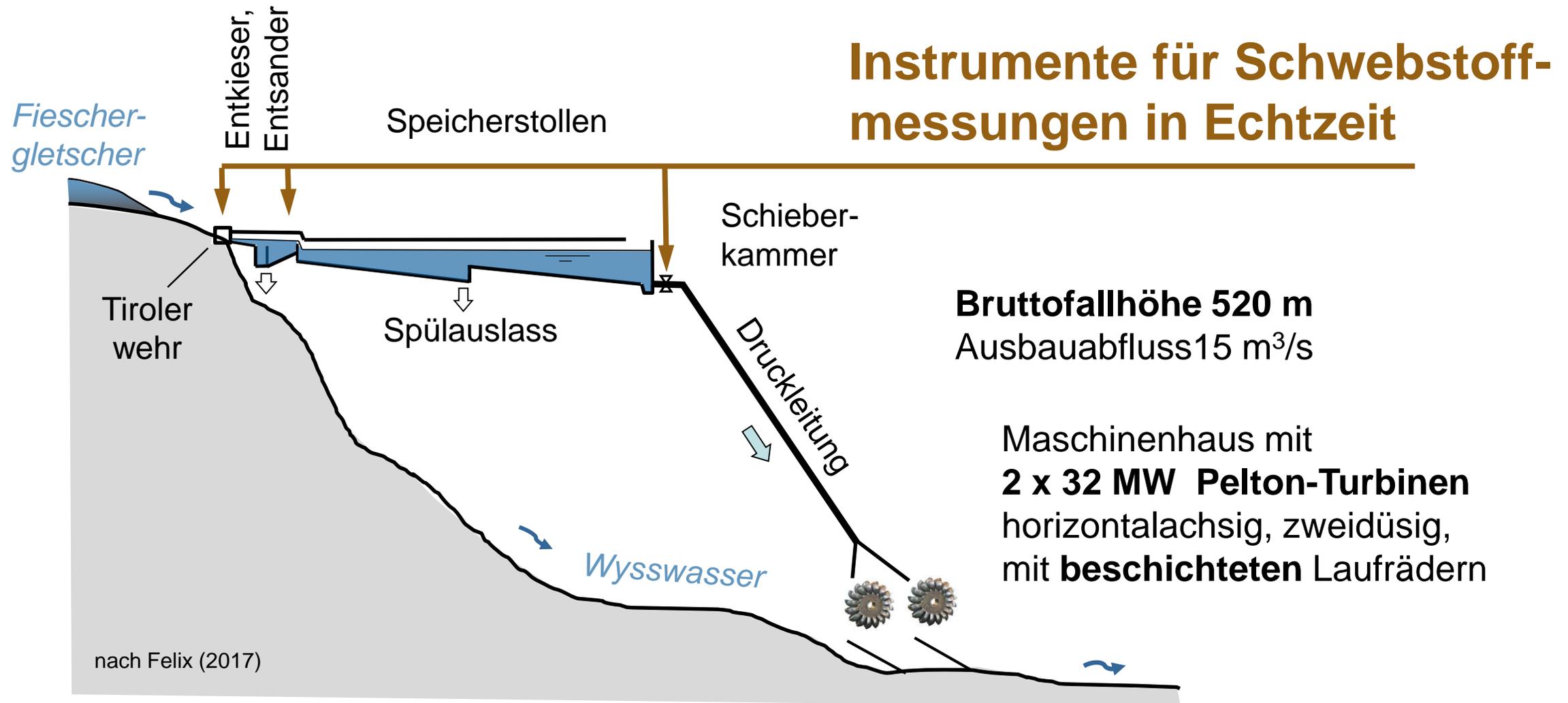
Inbetriebnahme: 1976

Betreiber:
Gommerkraftwerke AG (gkw)

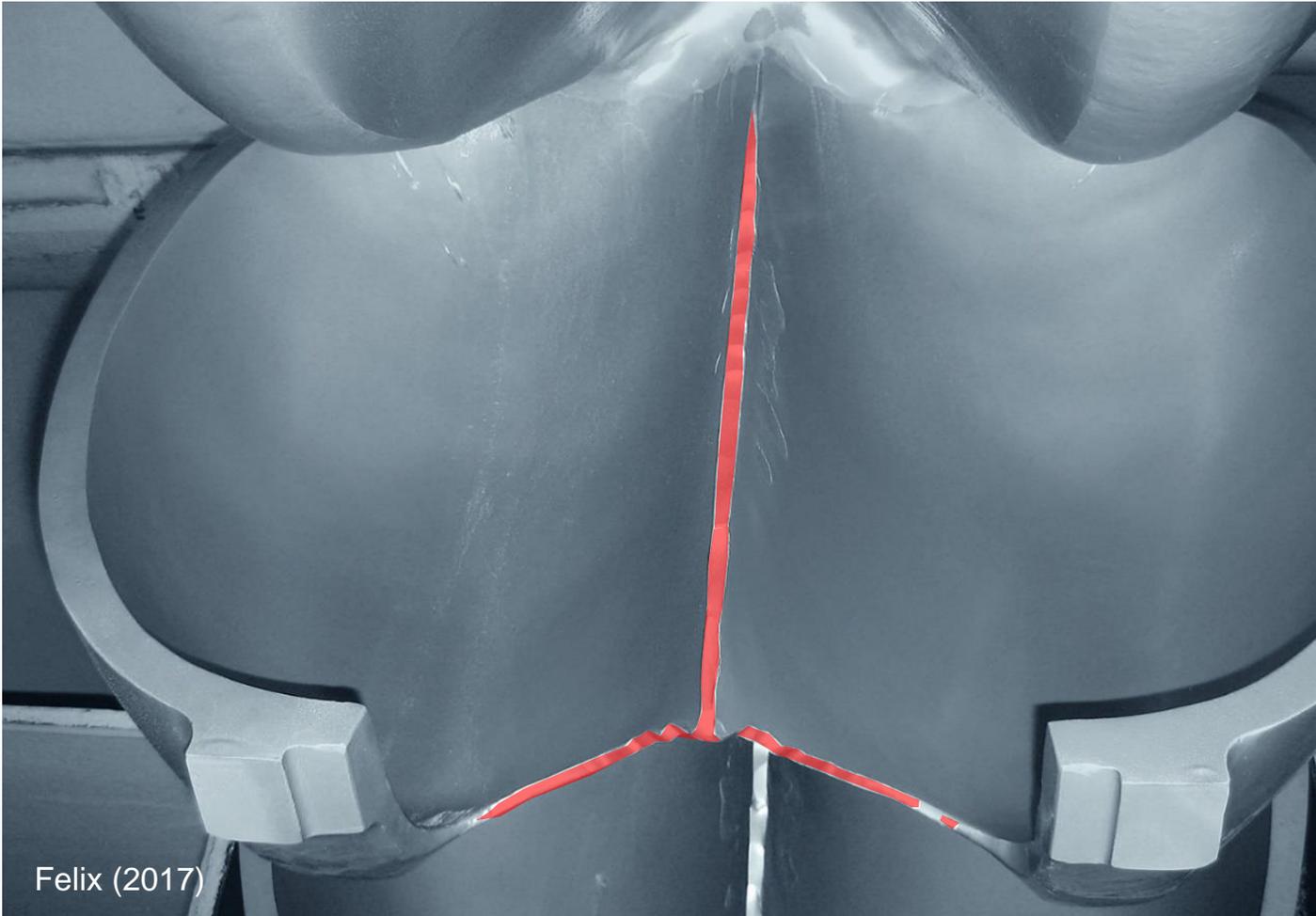
seit 2012 **Pilotstudie** der VAW,
ETH Zürich in Zusammen-arbeit
mit der Hochschule Luzern,
Kompetenzzentrum Fluidodynamik
und Hydromaschinen
(Prof. Dr. T. Staubli, Prof. Dr. E.
Casartelli, A. Abgottspon)



KW Fieschertal: Schematisches Längsprofil



Typische Erosion an Peltonbechern im KW Fieschertal



Laufräder

Aussendurchmesser = 2.80 m,
20 Becher,
innere Becherbreite $B = 650$ mm

2 Düsen

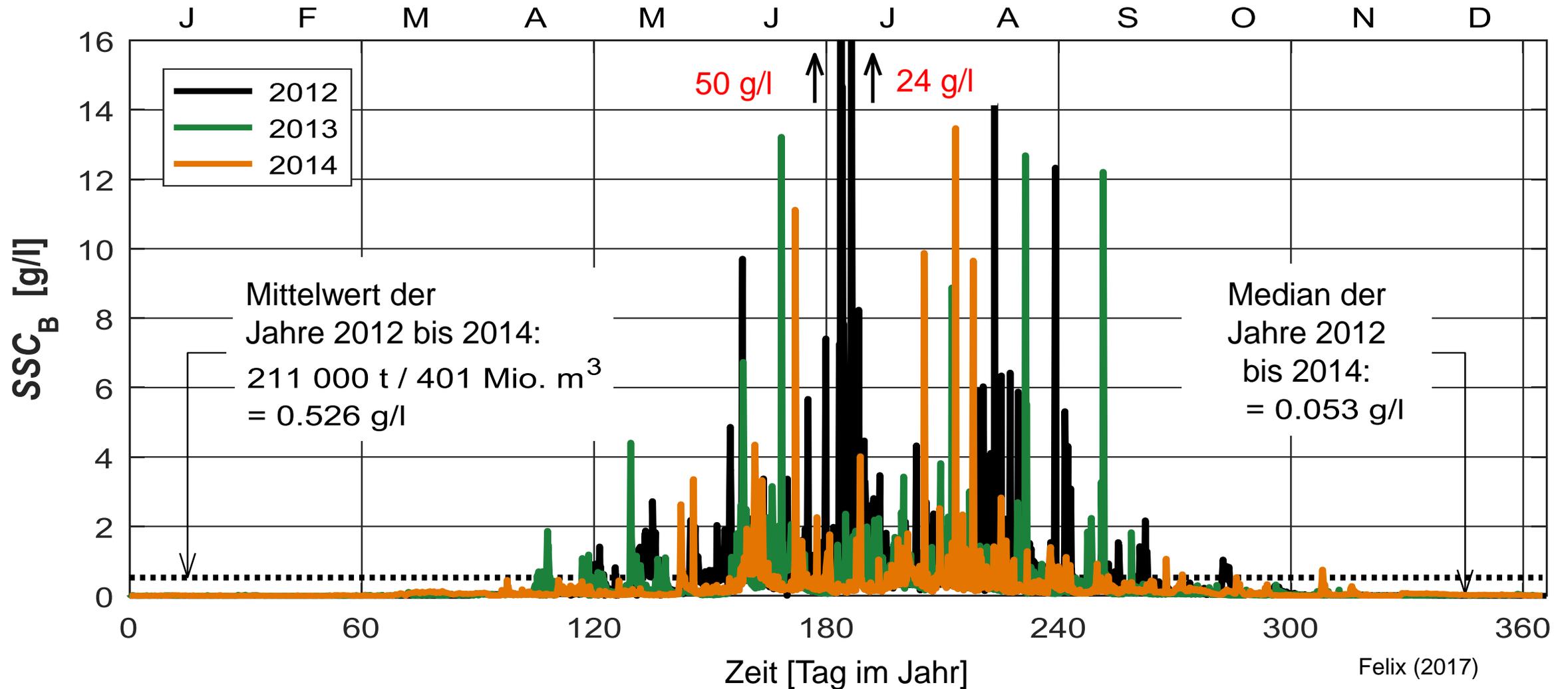
Erosion vor allem auf den
Mittelschneiden und an
den Bechereintrittskanten

- in jedem Winter: schleifen und nachbeschichten (im Turbinengehäuse)
- alle ca. 6 Jahre: grosse Revision beim Hersteller

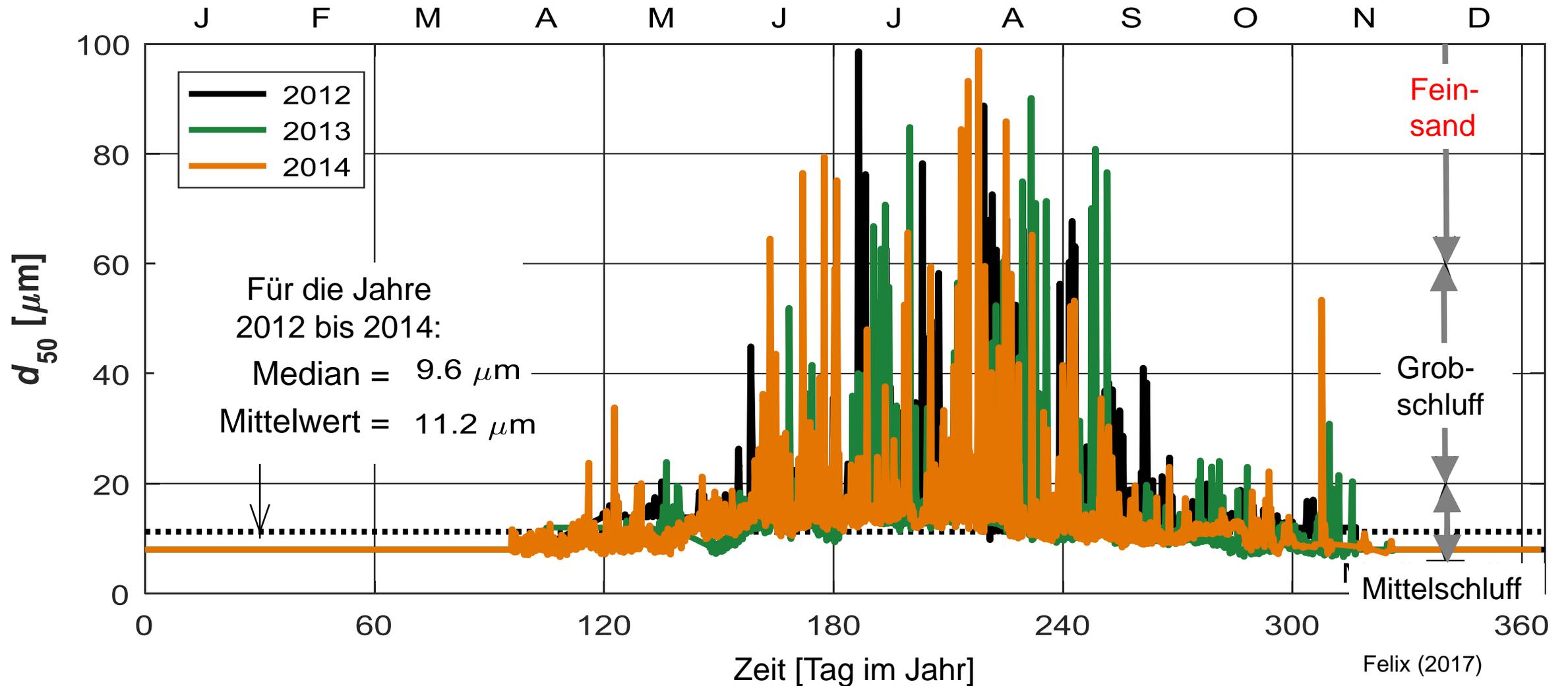
Gliederung

- 1) Einleitung: hydro-abrasiver Verschleiß und Gegenmaßnahmen
- 2) Pilotstudie KW Fieschertal (Kanton Wallis, CH)
- 3) Resultate der Schwebstoffmessungen**
- 4) Abschalt-Szenario für Hochwasser 2012
- 5) Kraftwerks-Abschaltung im Hochwasser 2017
- 6) Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

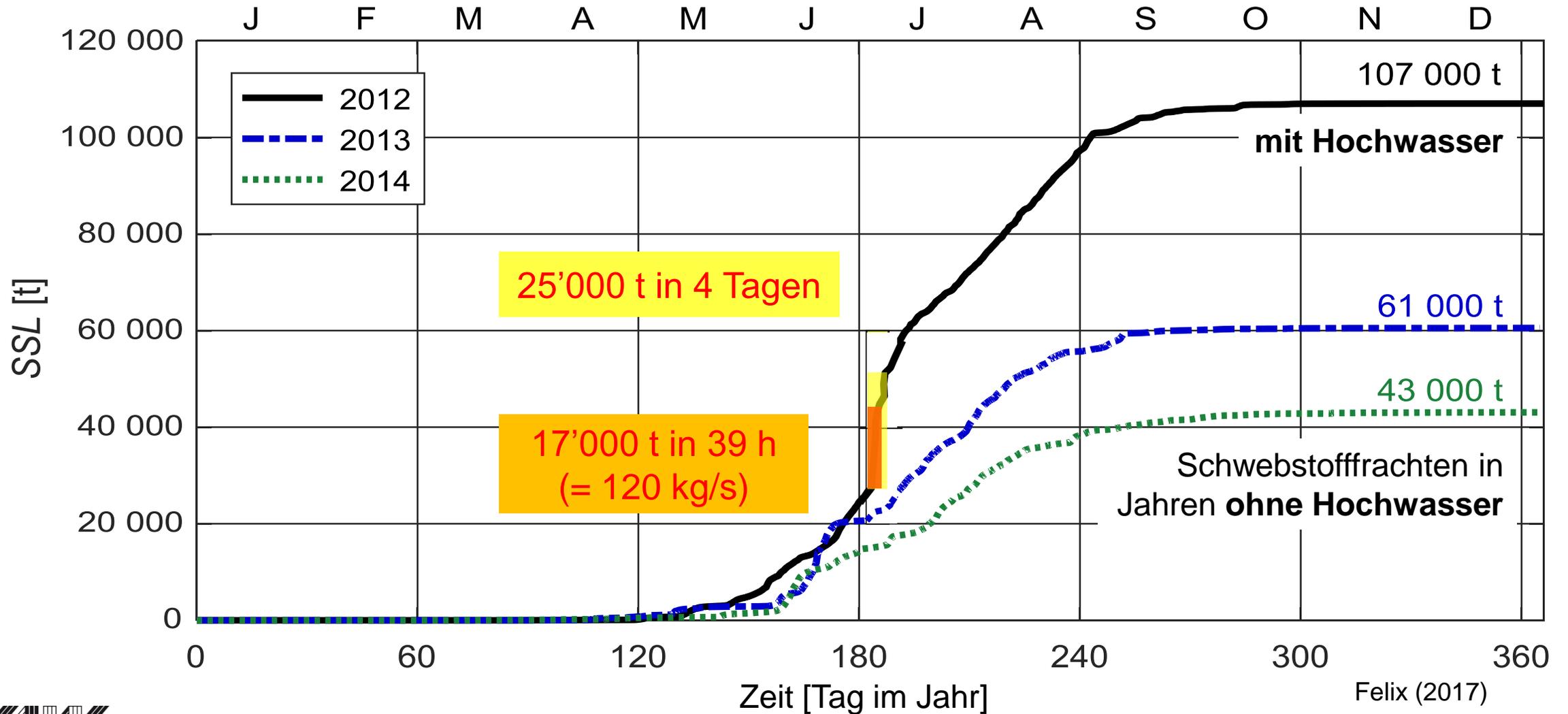
SSC-Ganglinien in Druckleitung des KW Fieschertal



Median-Partikelgrößen d_{50} in der Druckleitung des KW Fieschertal



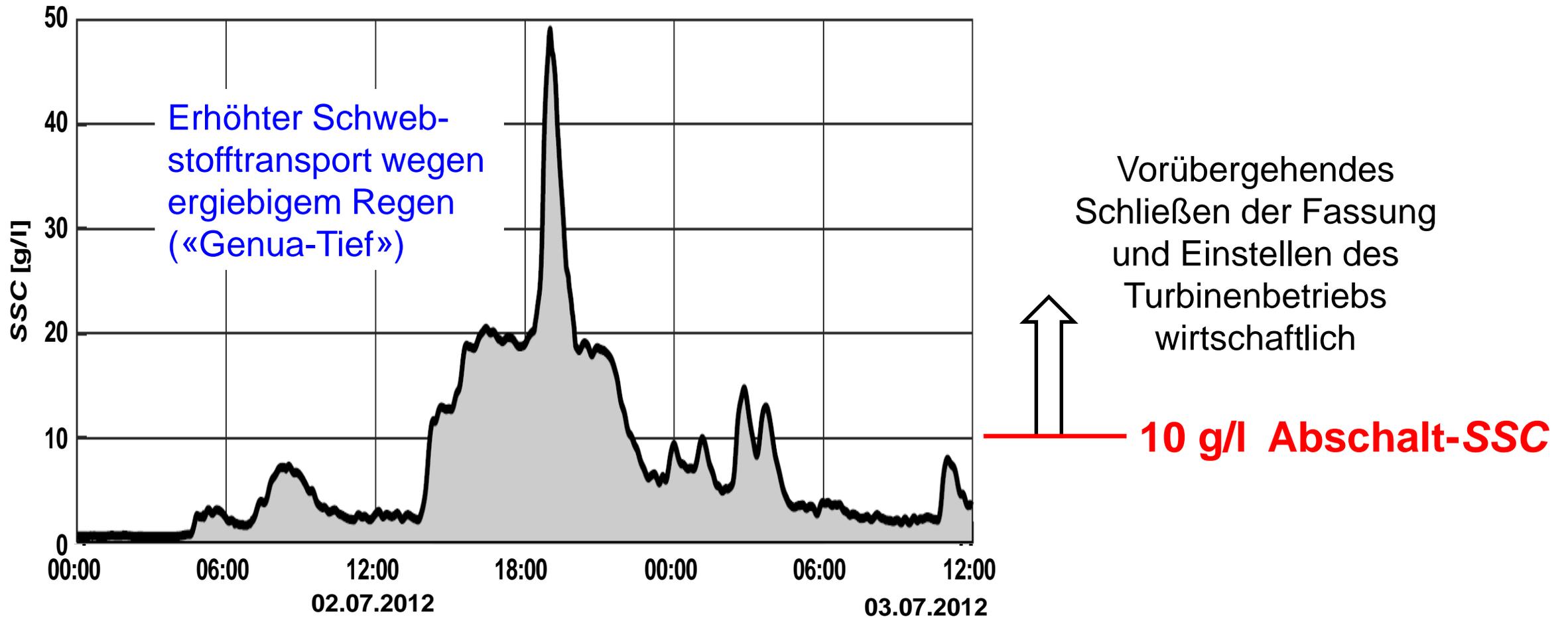
Schwebstofffrachten (SSL) in der Druckleitung



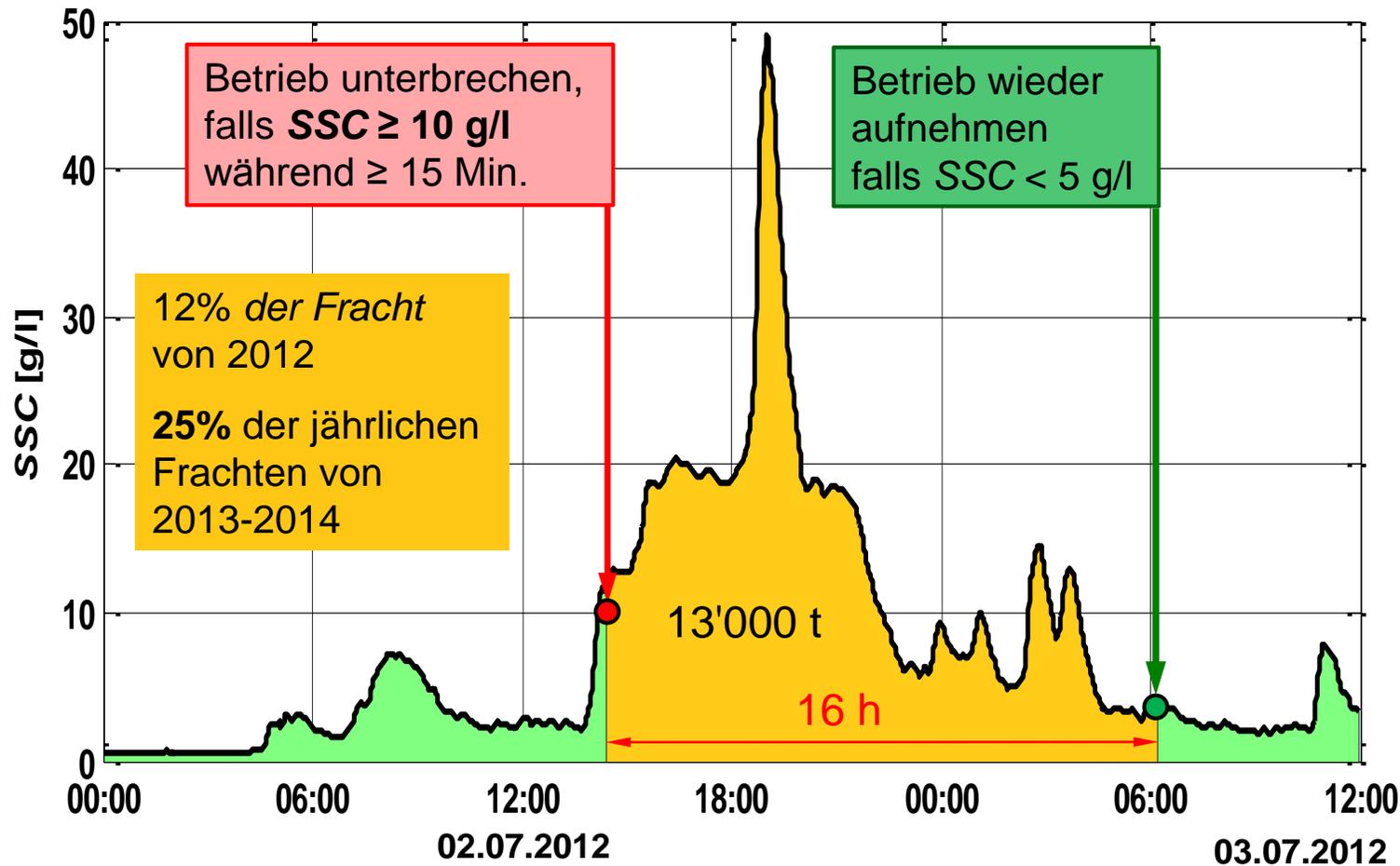
Gliederung

- 1) Einleitung: hydro-abrasiver Verschleiß und Gegenmaßnahmen
- 2) Pilotstudie KW Fieschertal (Kanton Wallis, CH)
- 3) Resultate der Schwebstoffmessungen
- 4) **Abschalt-Szenario für Hochwasser 2012**
- 5) Kraftwerks-Abschaltung im Hochwasser 2017
- 6) Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

SSC-Ganglinie im Hochwasserereignis vom 02./03.07.2012



Abschalt-Szenario für das Hochwasser vom 02./03.07.2012



- 50 k€ Erzeugungsausfall wegen 16 h Stillstand
- + 200 k€ Vermiedene Reparaturkosten
- + 50 k€ Vermiedener Mindererlös wegen Wirkungsgrad

- + 200 k€ Einsparung (entspricht 2.7% des nominalen Jahreserlöses)

Felix et al. (2016)

Übersicht «Abschalt-SSC»

Kraftwerk	Turbinen- kenndaten	Schwebstoff- kenndaten	Abschalt -SSC	Lauftrad	Quelle
Fiescher- tal, Schweiz	Pelton, 2 x 32 MW $h_B = 520$ m, 2 Düsen, $B = 650$ mm	Quarz- und Feldspatgehalt = 75%, $d_{50} \approx 10$ μm (Median), oft ≤ 20 μm , selten 100 μm	10 g/l	Beschichtet (seit 2005)	Felix et al. (2016)
Dorfer- bach, Österreich	Pelton, 1 x 10 MW $h_B = 686$ m, 4 Düsen, $B = 228$ mm	Quarzgehalt = 50%, oft $12 \leq d_{50} \leq 60$ μm , meist kantig	1.1 g/l	Zuerst unbeschichtet, dann beschichtet	Boes (2009, 2010)
Dharasu, Indien	Francis, 4 x 76 MW $h_n = 248$ m	Quarz- und Feldspatgehalt = 72%, $90\% \leq 150$ μm	3 g/l	Zuerst unbesch., dann beschichtet	Singh et al. (2013)
Jhimruk, Nepal	Francis, 3 x 4 MW $h_n = 202$ m	Quarz- und Feldspatgehalt = 83%, $80\% < 100$ μm	3 g/l	unbeschichtet	Pradhan (2004), Elkvik (2013)
Cahua, Peru	Francis, 2 x 22 MW $h_B = 215$ m	Quarzgehalt = 78%, $82\% \leq 60$ μm	3 g/l, 10 g/l	Zuerst unbesch., dann beschichtet	Espinoza (2016)

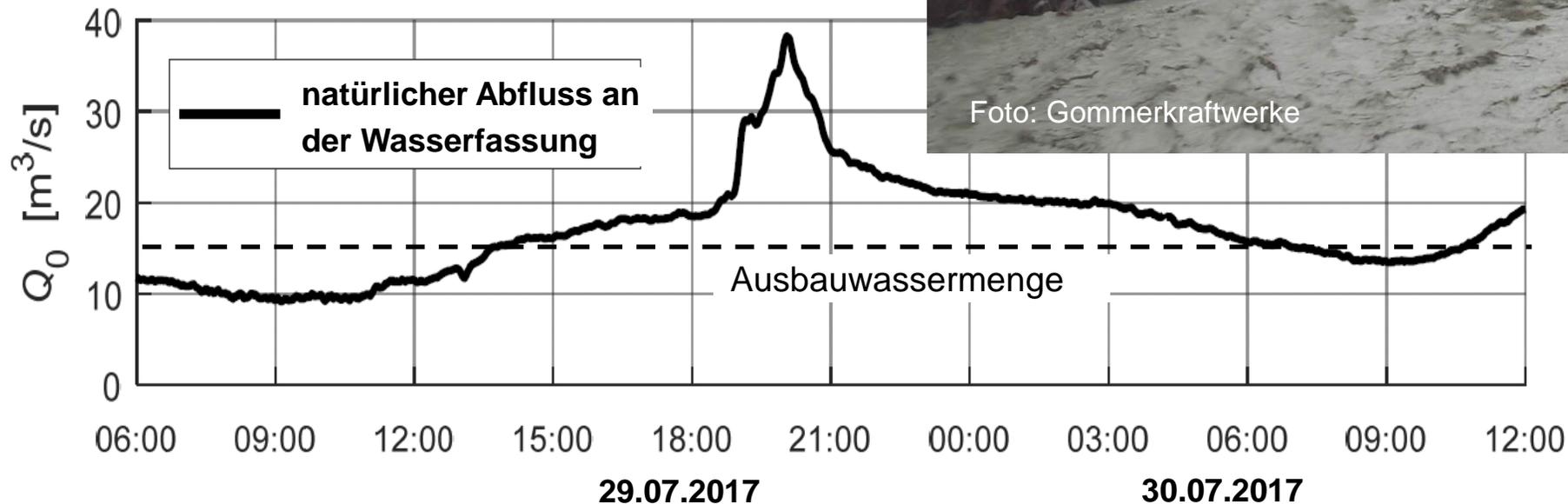
Felix (2017)

Gliederung

- 1) Einleitung: hydro-abrasiver Verschleiß und Gegenmaßnahmen
- 2) Pilotstudie KW Fieschertal (Kanton Wallis, CH)
- 3) Resultate der Schwebstoffmessungen
- 4) Abschalt-Szenario für Hochwasser 2012
- 5) Kraftwerks-Abschaltung im Hochwasser 2017**
- 6) Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

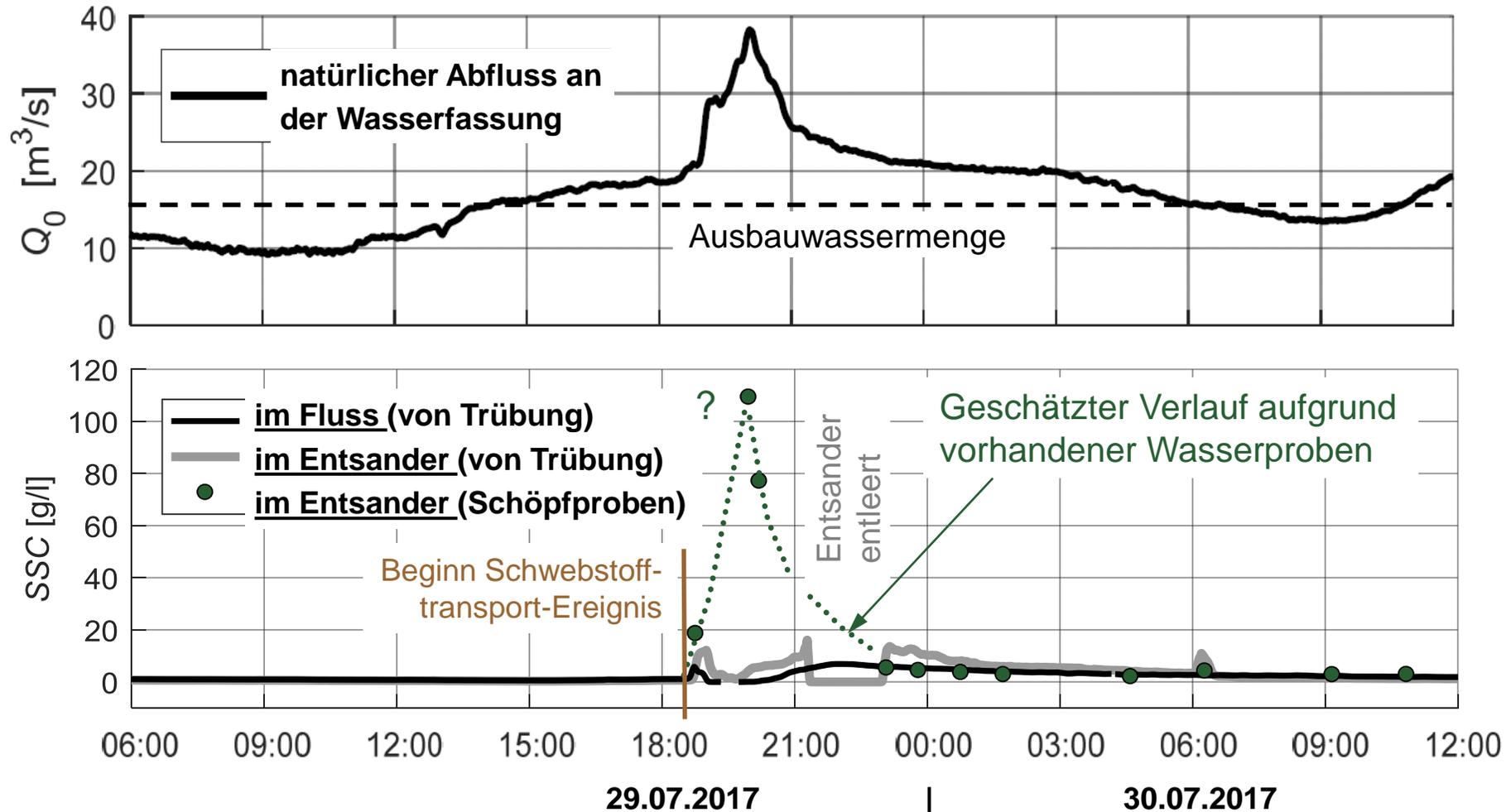
Hochwasser-Ereignis vom 29./30.07.2017

kein außerordentlicher Spitzenabfluss,
aber hohe Trübung
(Ereignis auch via Webcam erkannt)



Felix et al. (2020)

Hochwasser-Ereignis vom 29./30.07.2017

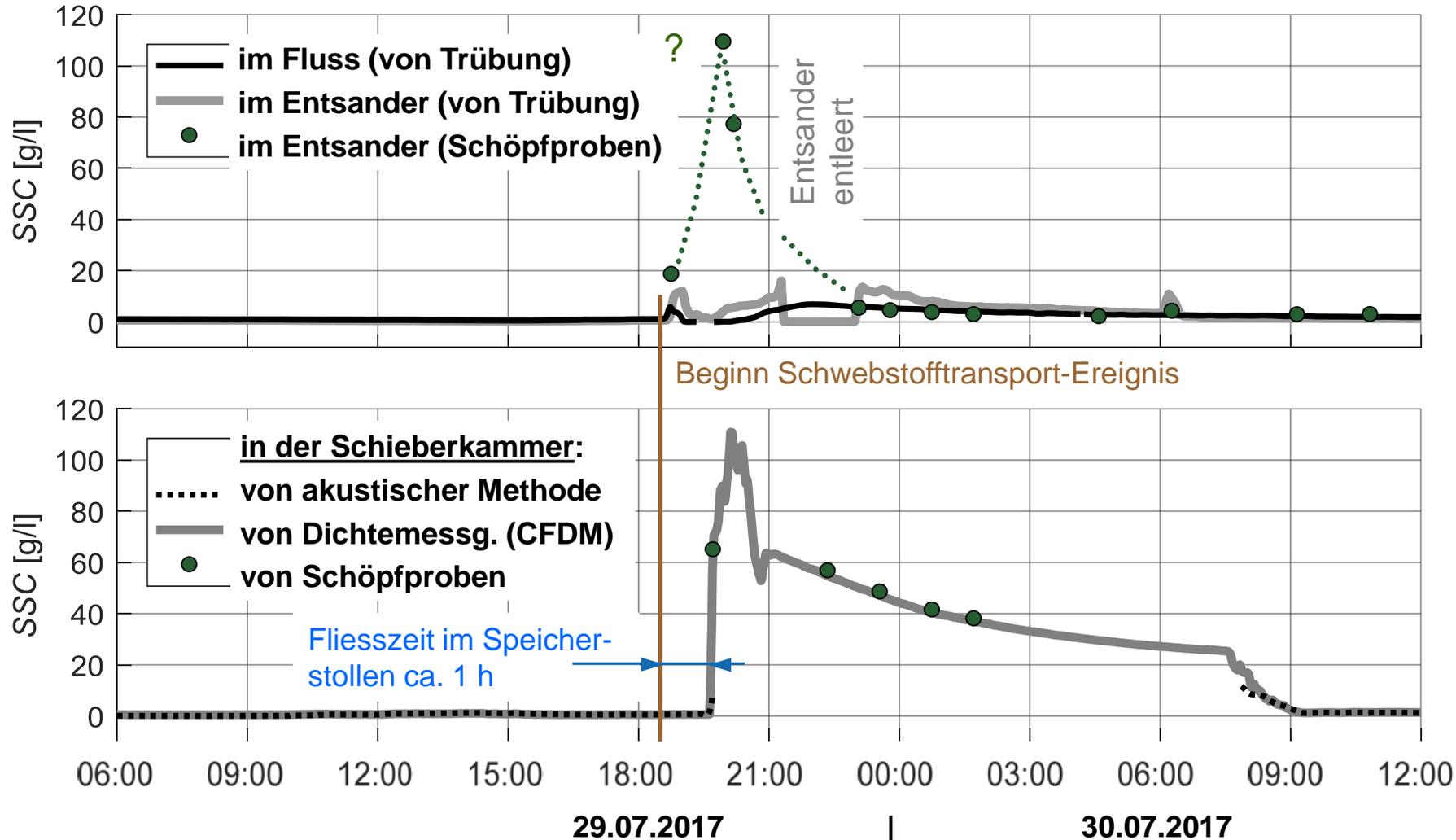


Wasserproben ergaben
(im Nachhinein)
bis 110 g/l !

SSC überschritt den
Messbereich der
Trübungssonden (zeigen
dann zu tiefe Werte an)

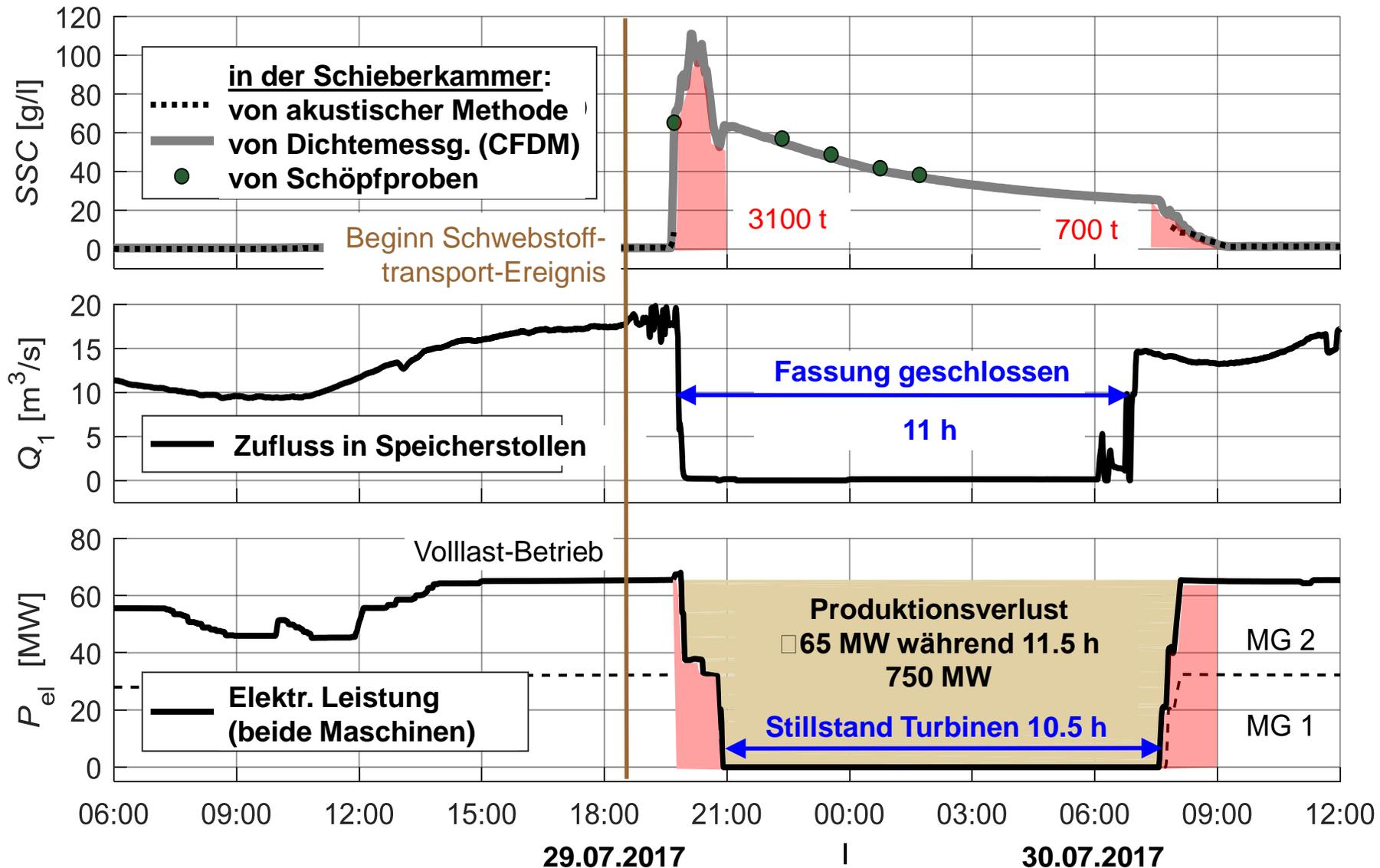
Felix et al. (2020)

Hochwasser-Ereignis vom 29./30.07.2017 (Fortsetzung)



mit Dichtemessgerät (*Coriolis Flow- und Density Meter*) installiert in der Schieberkammer konnten SSC bis 110 g/l gemessen werden, passend zu Schöpfproben

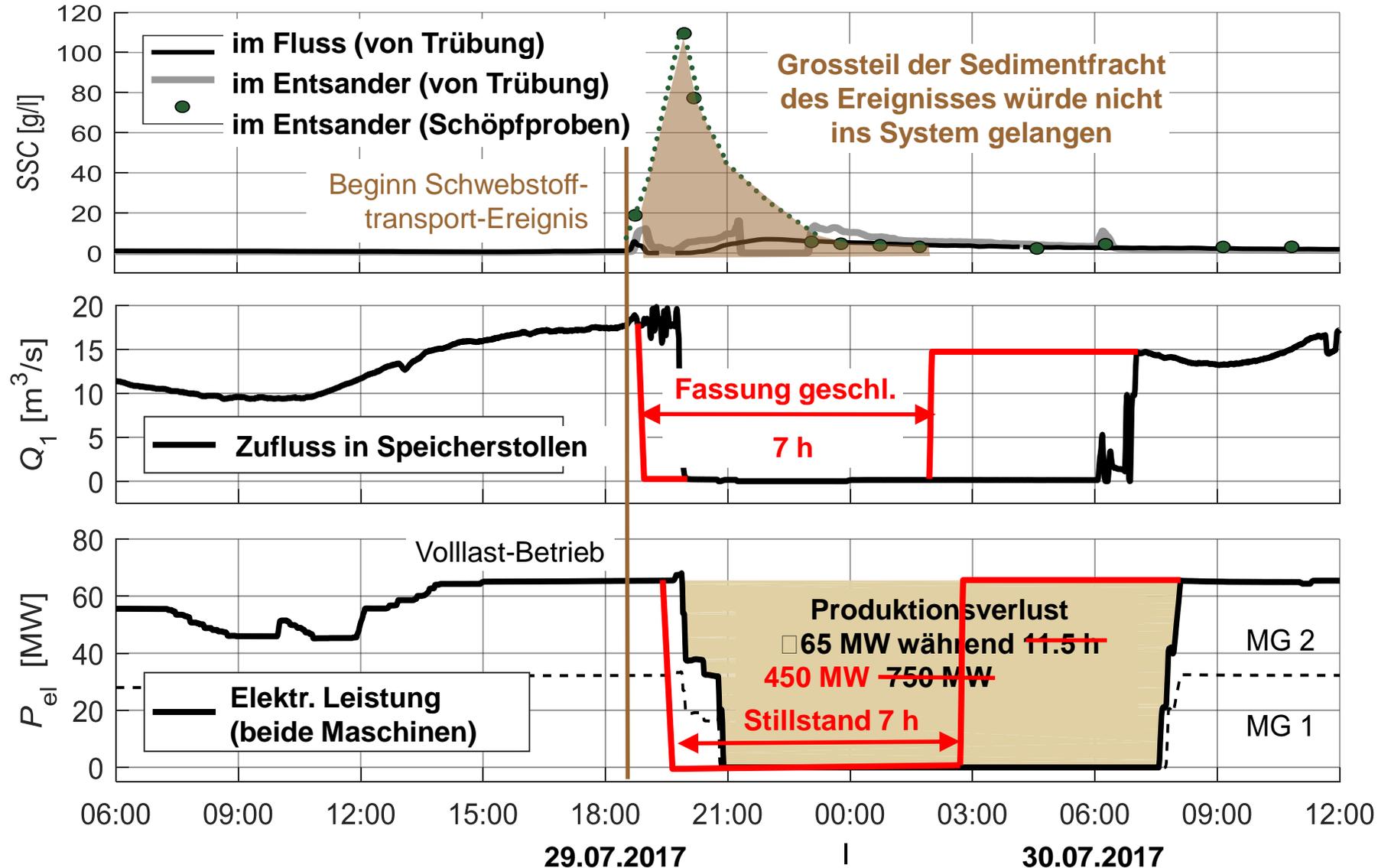
Hochwasser-Ereignis vom 29./30.07.2017 (Fortsetzung)



Abstellung wurde ausgeführt

... aber es war ungünstig, dass stark schwebstoffhaltiges Wasser in den Speicherstollen gelangte und turbiniert wurde (ca. 3800 t)

Hochwasser-Ereignis vom 29./30.07.2017: optimiertes Szenario



Es wäre besser, wenn die Fassung schon geschlossen würde, wenn das Abschaltkriterium an der Fassung (statt in der Schieberkammer) erfüllt wird

→ 1h früher schließen

→ frühere Wiederinbetriebnahme

Hochwasser-Ereignis vom 29./30.07.2017: Szenarienvergleich

Szenario	Abstell-dauer [h]	Schwebstoff-fracht im KW-System [Tonnen]	Sediment-induzierte Kosten * [Tsd €]	Erzeugungsausfall ** [Tsd €]	Ergebnis [Tsd €]	Vergleich mit «keine Abstellung» [Tsd €]
Keine Abstellung (Referenz-Szenario)	0	12600 (100%)	75	0	75	0
Abstellung wie durchgeführt	11.5	4600 (37%)	28	23	51	-24

* mit 6 €/t feinsedimentbedingten Kosten und -folgekosten für Turbinenpassage (basierend auf Daten 2012-2014, Felix 2017)

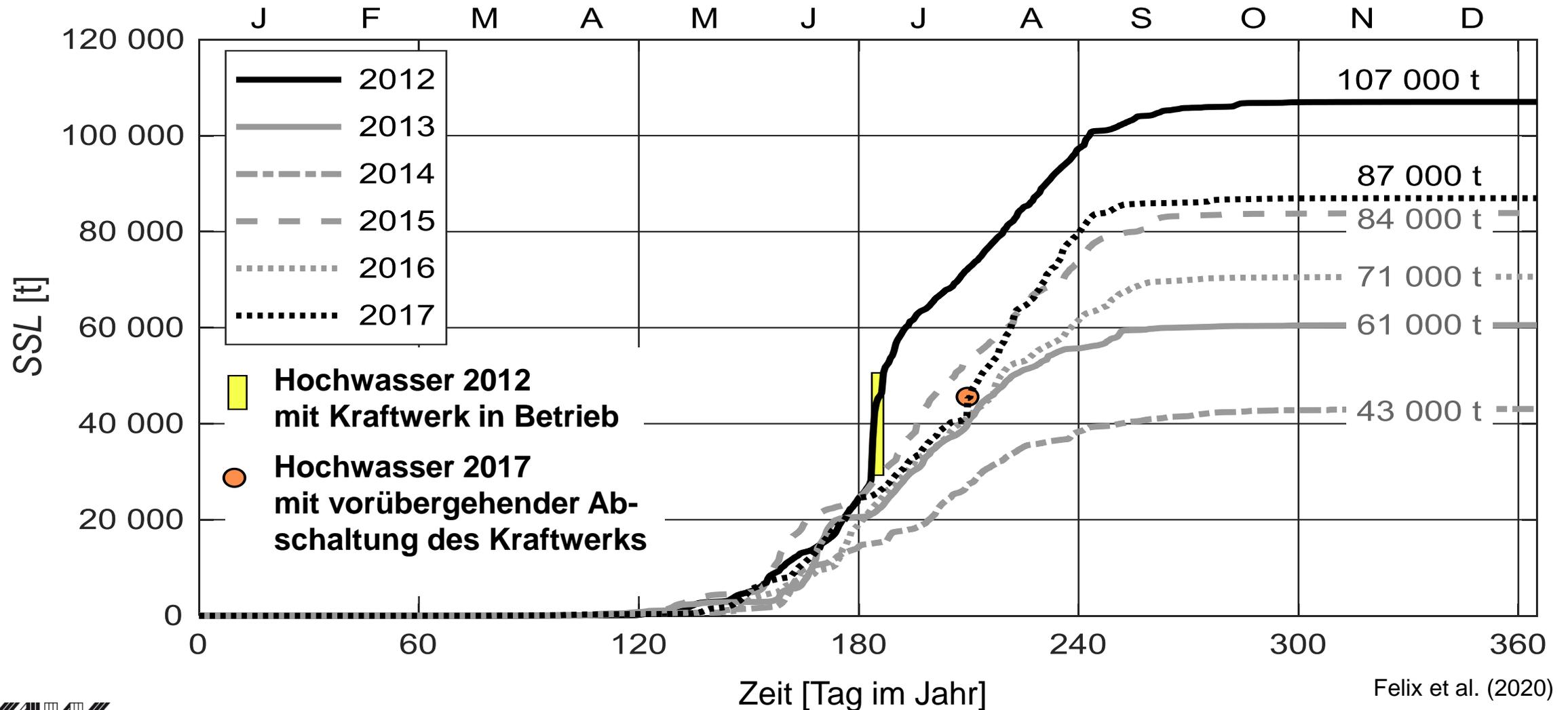
** mit angenommenem Stromgrosshandelspreis 30 €/MWh (in Nacht von Samstag auf Sonntag im Sommer)

*** falls möglich: Zuverlässige SSC-Messwerte (möglichst früh), Zeit für Information/Koordination mit stromabnehmender Gesellschaft, Wetterprognose, Verfügbarkeit von zusätzlichem Personal in der Nacht für Wiederinbetriebnahme der Anlage

→ Dichtemessgerät (CFDM) an Fassung installieren

Felix et al. (2020)

Schwebstofffrachten (SSL) in der Druckleitung über die Jahre



Felix et al. (2020)

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

- **Vergleich** verschiedener Messgeräte unter realen Bedingungen
- **Partikelgrößen** schwieriger zu messen als **Schwebstoffkonzentration**
- **Kombinationen** von Messgeräten empfohlen (ergänzen sich bei verschiedenen SSC-Messbereichen bzw. Redundanz in überlappenden Messbereichen)
- Schwebstoffmessungen in **Echtzeit** erlauben, Anlagen **während Hochwasser außer Betrieb** zu nehmen, mit **wirtschaftlichem Vorteil**
- **Langjähriges** Monitoring ist wertvolle Grundlage für Weiterentwicklung von Berechnungsmodellen und wirtschaftliche Optimierungen
- **Weitere Untersuchungen** empfohlen (im Feld, im Labor und numerisch)

Ausblick

Forschungsprojekt KW Fieschertal

Weitere Resultate werden vorgestellt am

- 05.-10.07.2020 in Lausanne am *IAHR Symposium on Hydraulic Machinery*
- 11.-13.11.2020 in Wien an der *Viennahydro*

Zum Abschluss des Forschungsprojekts ist im **Sommer/Herbst 2021 eine ein-tägige Veranstaltung im Wallis** geplant.

Forschungsprojekt KW Susasca

Kleinwasserkraftwerk auf der Engadiner Seite des Flüelapasses

- Schwebstoffmessungen seit 2019
- Untersuchung des Entsandens
- Abrasion an Peltonturbinen
(2 x 3 MW, vierdüsig, $h_B = 365$ m)

<https://vaw.ethz.ch/forschung/wasserbau/abrasion-und-sedimentmonitoring.html>

Danke für Ihre
Aufmerksamkeit

Mündung des Wysswassers
in die Rhone (Bild: VAW)

boes @vaw.baug.ethz.ch

unterstützt durch:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN



Gommerkraftwerke AG



swisselectric
research



Endress+Hauser 
People for Process Automation

im Rahmen von:



SWISS COMPETENCE CENTER for ENERGY RESEARCH
SUPPLY of ELECTRICITY