

# Feinsedimentweiterleitung aus Speicherseen via Triebwasser: Auswirkungen an Peltonturbinen und Gegenmassnahmen

Dr. David Felix, Aquased GmbH, Winterthur, Schweiz

vormals an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, ETH Zürich

Fachtagung Hydro+: Inspektion und Instandhaltung von Wasserkraftwerken  
Innovative Ansätze zur Stauraumentlandung

Freie Universität Bozen - Libera Università di Bolzano

14.06.2024

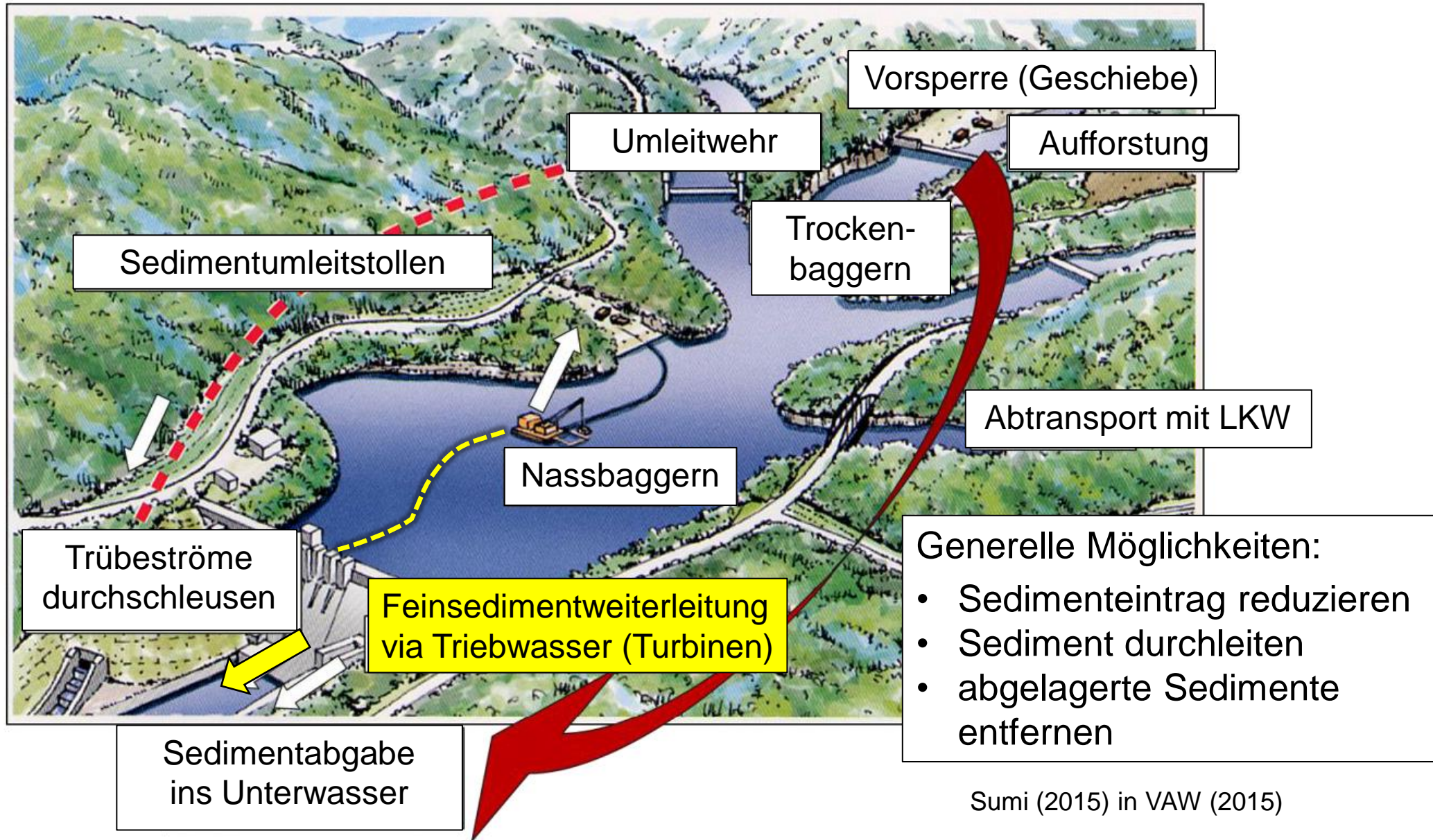


**ETH** zürich



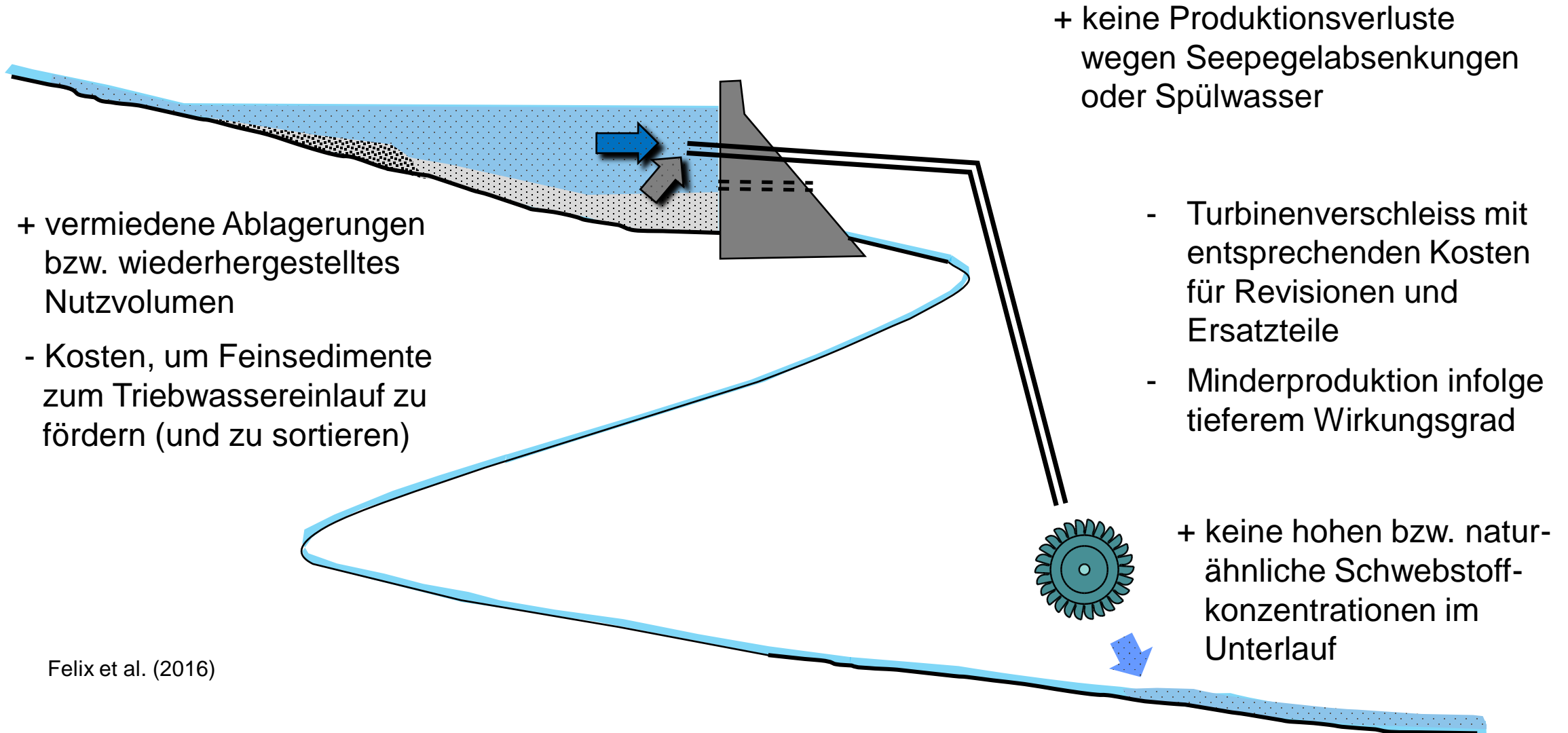
Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie

# Möglichkeiten für die Sedimentbewirtschaftung an Stauseen



Sumi (2015) in VAW (2015)

# Feinsedimentweiterleitung via Triebwasserweg: Vor- und Nachteile



Felix et al. (2016)

# Feinsedimentweiterleitung via Triebwasserweg mit welchen Schwebstoffkonzentrationen (SSC)?

## ohne Massnahmen zur Sedimentbewirtschaftung

Feinsilt- und Tonpartikel (<6 µm) bleiben in einigen Stauseen monatelang in Schwebe und geben dem Stauseewasser seine typische Farbe. Sie werden auch ohne Massnahmen turbinieret bzw. gepumpt, in tiefen bis moderaten Konzentrationen von z.B. 0.05 bis 0.2 g/l (Bonalumi et al. 2011)



Grimselsee (Kraftwerke Oberhasli AG, KWO)

schweizersee.ch

für **quasi-kontinuierliche** Feinsedimentweiterleitung

- Gebietsabtrag z.B. 90% \* 0.5 mm/Jahr
- turbinierbarer Abfluss z.B. 1500 mm/Jahr  
=>  $1.2 \text{ kg} / 1.5 \text{ m}^3 = 0.8 \text{ g/l}$   
(als Grössenordnung)

meistens nicht im Winter wegen Ökologie (Laichzeiten) und nicht 24/7 wegen Arbeitszeiten

für "**Sanierungsprojekte**"

meistens bis einige g/l, je nach ökologischen Anforderungen im Unterlauf und Verdünnung

→ technische, wirtschaftliche und ökologische Optimierung

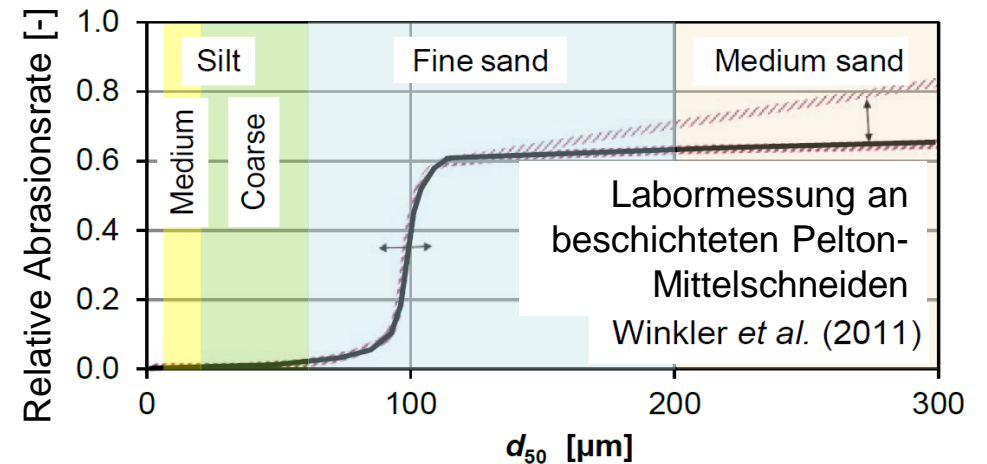
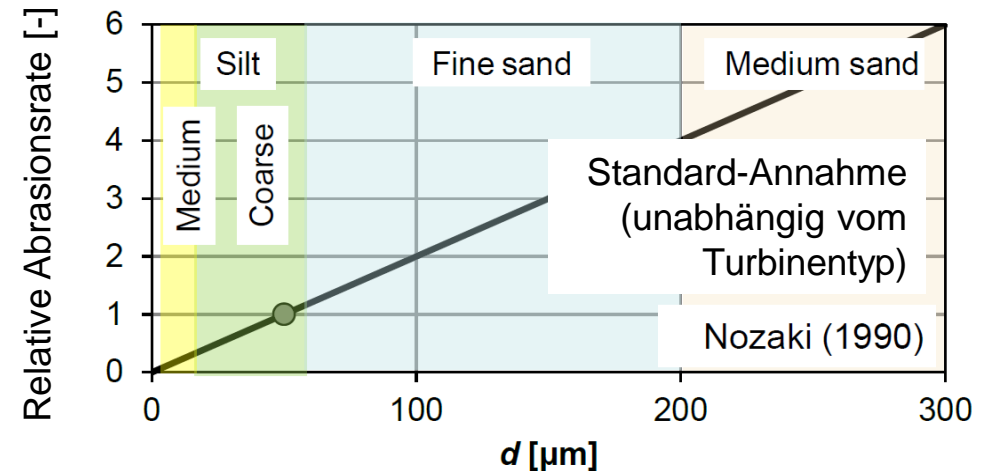
# Feinsedimentweiterleitung via Triebwasserweg bis zu welchen Partikelgrößen?

- je feiner, je weniger abrasiv für die Turbinen
- DWA (2006) empfiehlt mittlere Partikelgröße  $d_{50} < 20 \mu\text{m}$ , d.h. Ton und Silt (=Schluff)
- Silt verursacht aber auch schon Abrasion
- Bemessungskorn für Entsander normalerweise 0.3 mm (0.2 bis 0.5 mm)
- Feinsand (bis 200  $\mu\text{m}$ ) und allenfalls Mittelsand (bis 600  $\mu\text{m}$ ) akzeptabel, wenn kleiner Anteil, überschaubare Menge bzw. Betriebsstunden, und weitere Faktoren so, dass nicht so starke Abrasion...

Planung der Feinsedimentweiterleitung aufgrund der Betriebserfahrung in ähnlichen Anlagen, evtl. rechnerische Abschätzung der Abrasion

→ an Kraftwerk Versuche durchführen mit Monitoring

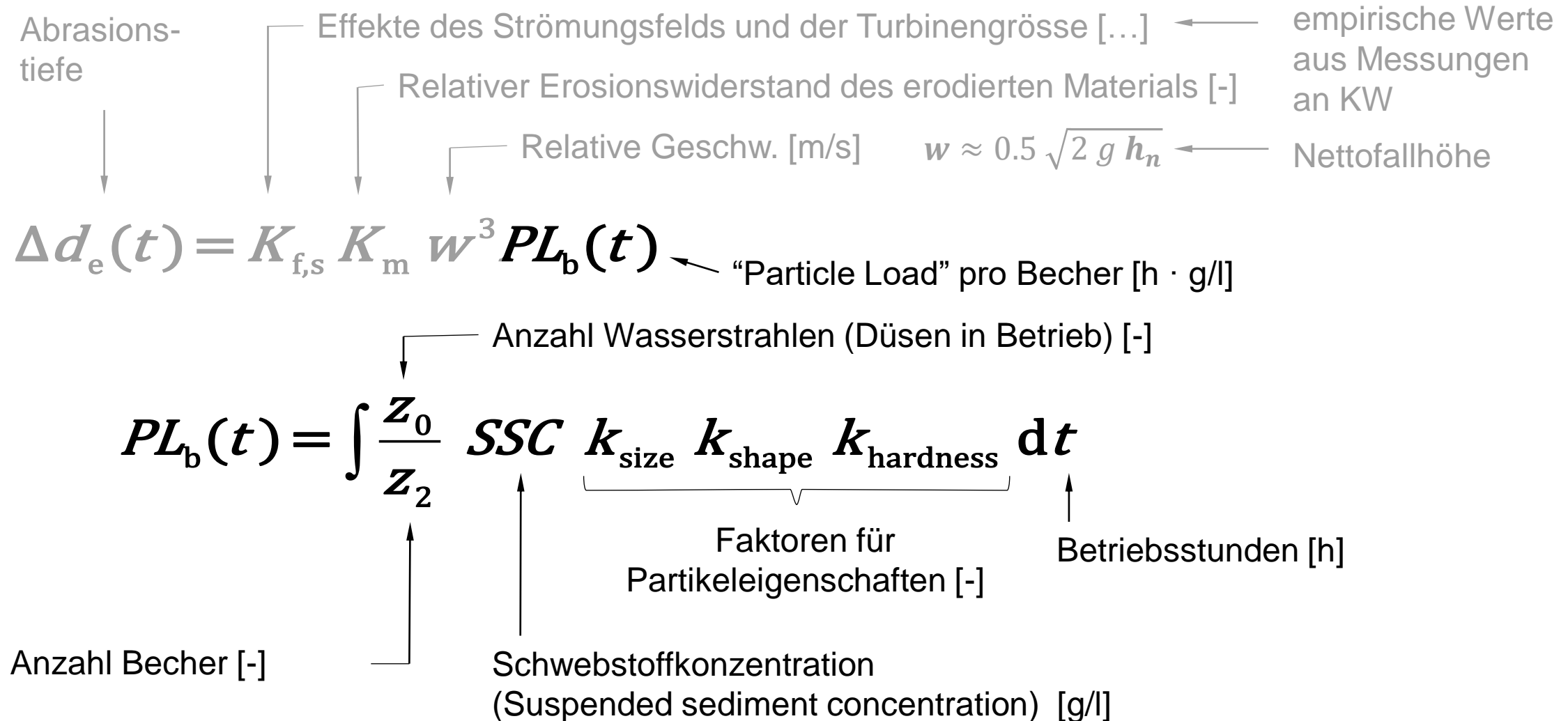
## Auswirkung der Partikelgröße auf die Abrasion



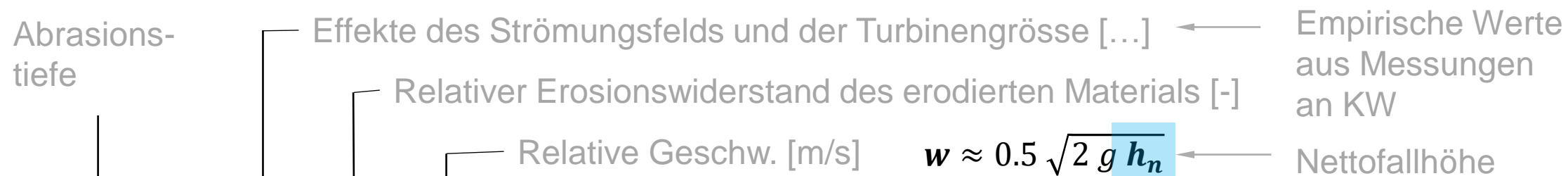
in der Forschung noch nicht klar

# Ansatz für rechnerische Abschätzung der Turbinenabration

Basierend auf der Richtlinie der Internationalen Elektrotechnischen Kommission IEC 62364 (2019),  
angepasst für Abrasion an Bechern von **Peltonlaufrädern** (Felix 2017)



# Steuerbare Grössen, um Abrasion zu begrenzen



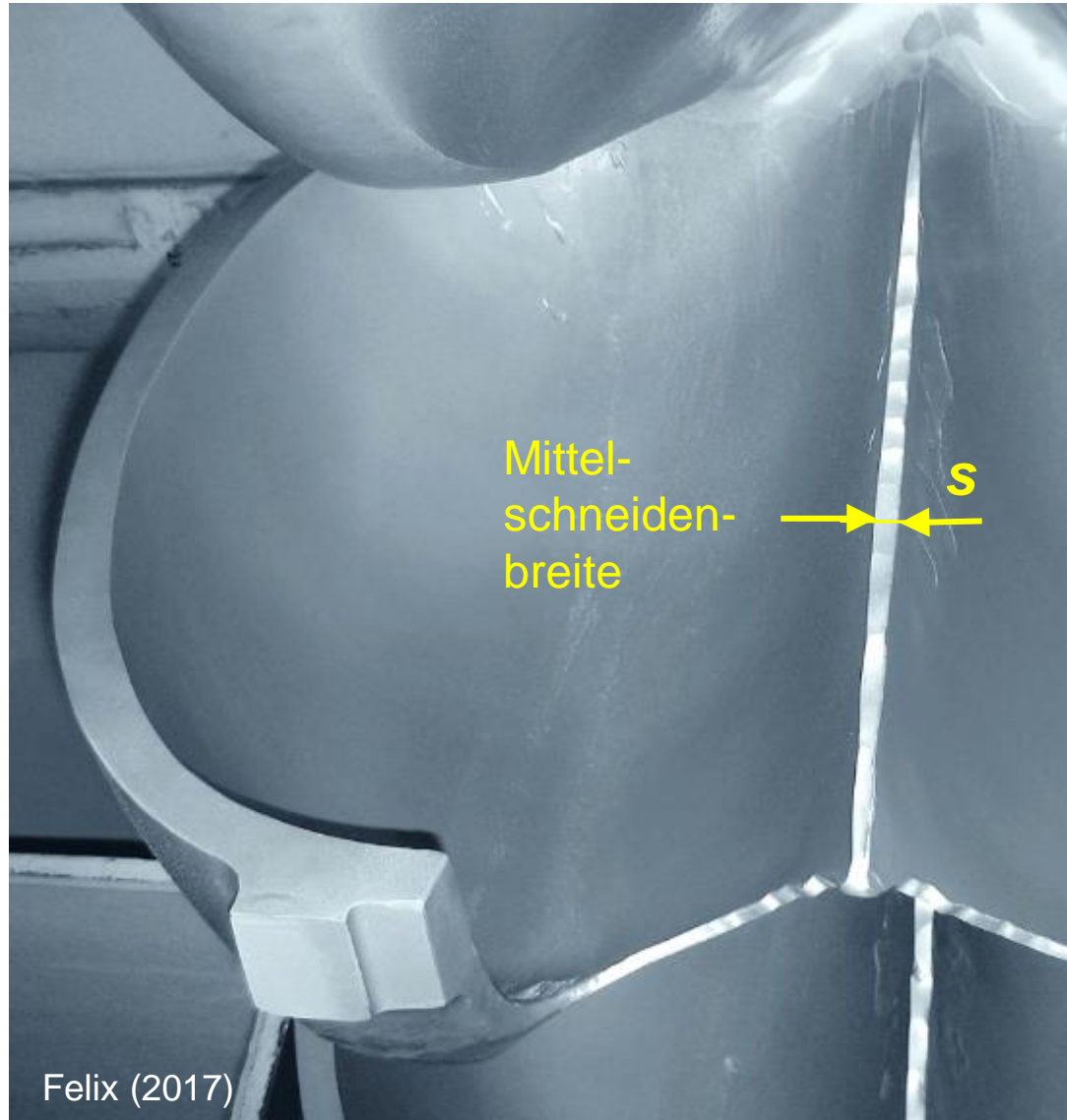
$$\Delta d_e(t) = K_{f,s} K_m w^3 PL_b(t)$$

"Particle Load" pro Becher [h · g/l]

$$PL_b(t) = \int \frac{z_0}{z_2} SSC k_{size} k_{shape} k_{hardness} dt$$

Anzahl Wasserstrahlen (Düsen in Betrieb) [-]  $\rightarrow$   $\frac{z_0}{z_2}$   
 Anzahl Becher [-]  $\rightarrow$   $\int$   
 Schwebstoffkonzentration (Suspended sediment concentration) [g/l]  $\rightarrow$   $SSC$   
 Faktoren für Partikeleigenschaften [-]  $\rightarrow$   $k_{size} k_{shape} k_{hardness}$   
 Betriebsstunden [h]  $\rightarrow$   $dt$

# Abrasion an grossem Pelton-Laufrad mit Hartbeschichtung

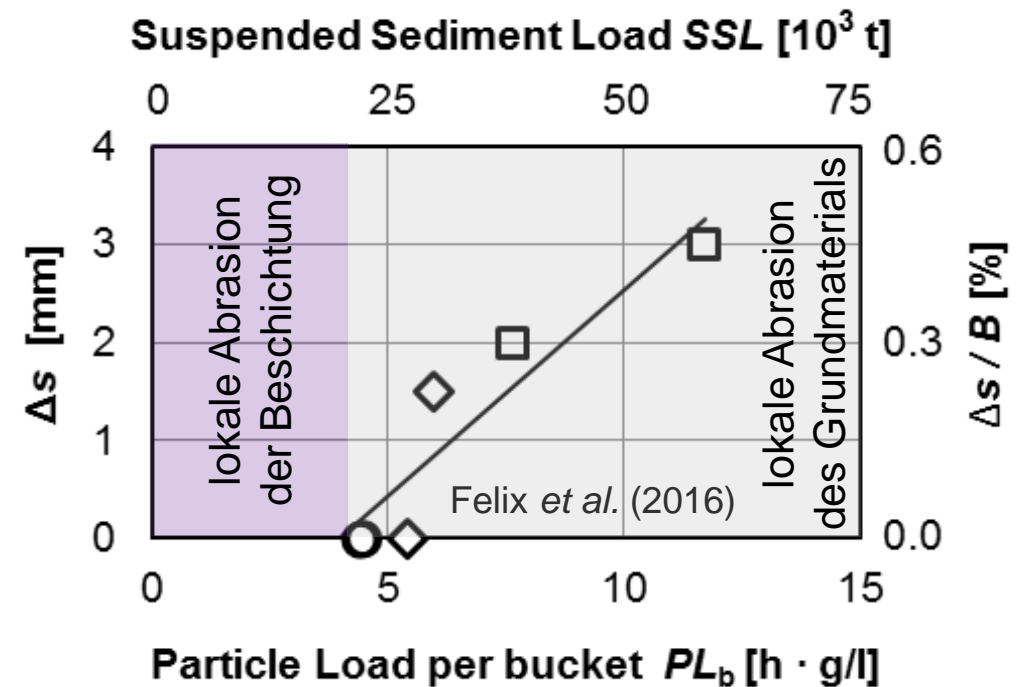


KW Fieschertal

Wallis, Schweiz, unterstrom eines Gletschers  
Bruttofallhöhe 520 m, 2 x 7.5 m<sup>3</sup>/s, 2 x 32 MW  
je 2 Düsen

innere Becherbreite  $B = 650$  mm

Zunahme der Mittelschneidenbreite  $\Delta s$  im Jahr  
2012 ( $\square$ ), 2013 ( $\diamond$ ) und 2014 ( $\circ$ ).

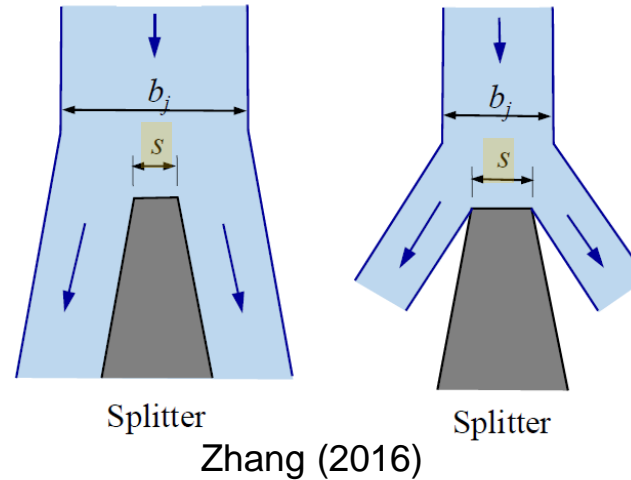




# Abrasionsbedingte Wirkungsgradänderungen $\Delta\eta$

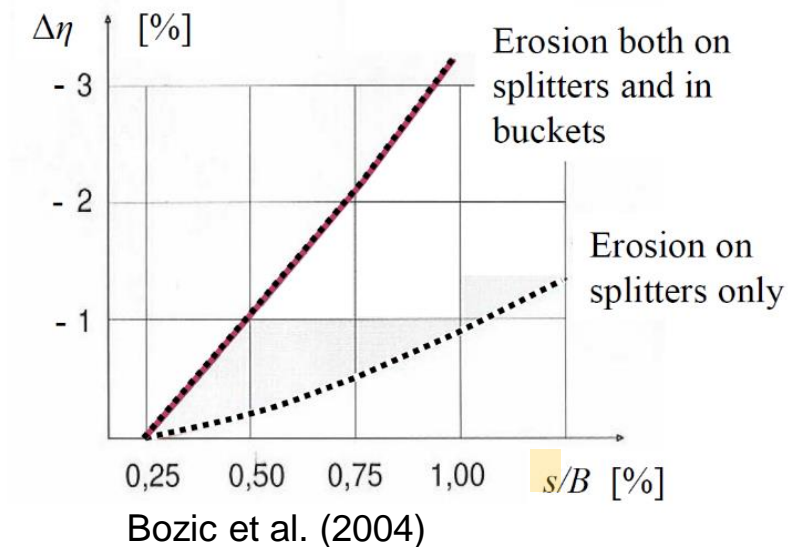
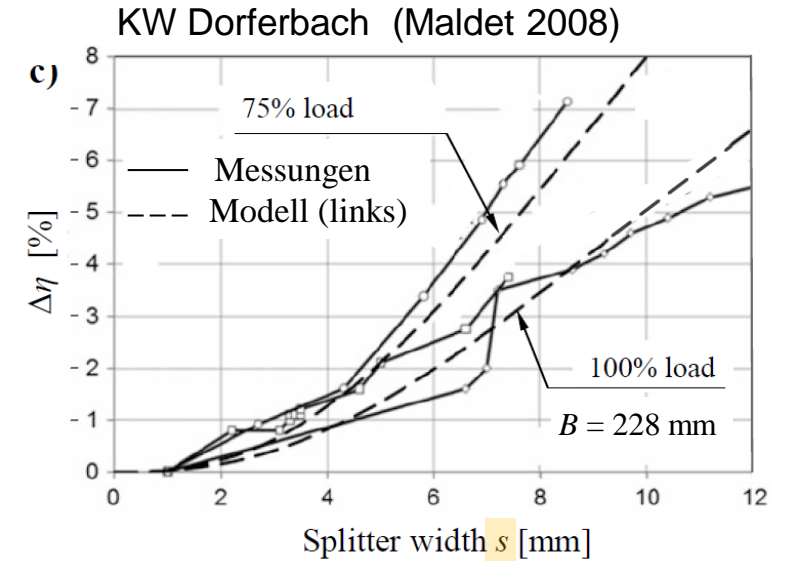
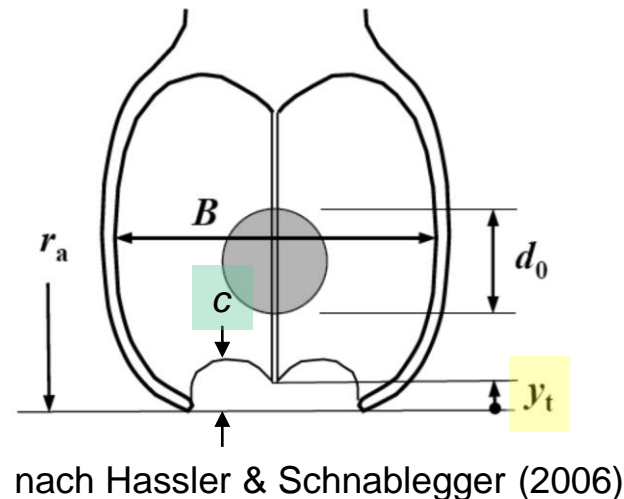
## Geometrieänderungen an den Schneiden:

- Zunahme der Mittelschneidenbreite  $s$
- Zunahme der Becherausschnittstiefe  $c$  und radiale "Verkürzung" der Mittelschneidenspitze  $y_t$

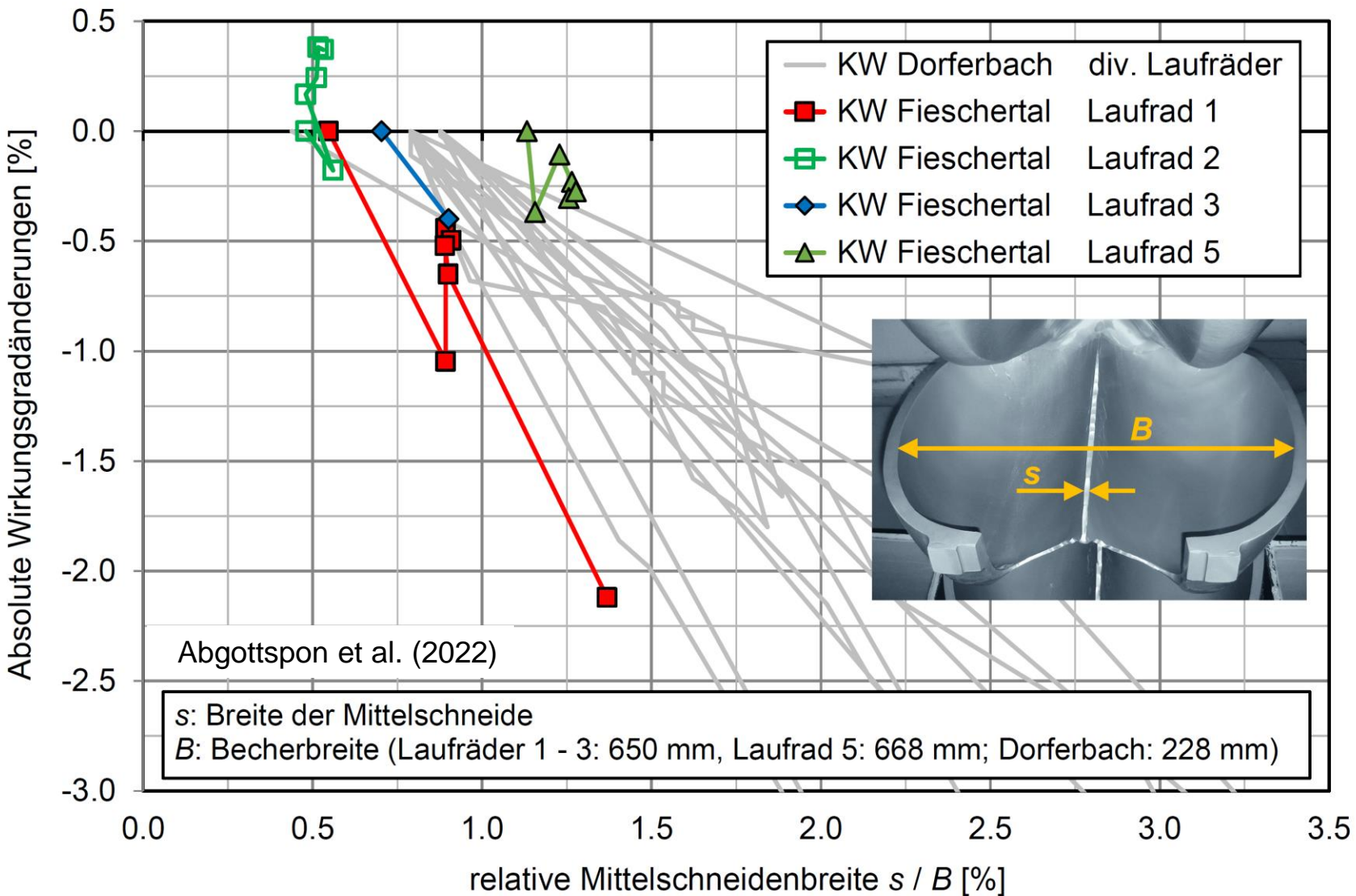


## Veränderung der Rauheit in den Bechern

- bei unbeschichteten Laufrädern: Zunahme der Welligkeit
- bei beschichteten Laufrädern: Beschichtung wird anfangs "poliert", später eventuell lokale "Auswaschungen"



# Abrasionsbedingte Vollast-Wirkungsgradänderungen $\Delta\eta$



farbige Linien:  
von grossen  
Peltonturbinen

KW Fieschertal,  
beschichtete Laufräder

$D = 2800$  mm  
 $B = 650$  mm

graue Linien:  
zum Vergleich mit  
kleinerer Pelton turbine

KW Dorferbach  
Tirol, Österreich  
unbeschichtete und  
beschichtete Laufräder

$D = 1025$  mm  
 $B = 228$  mm

Prognose schwierig -> **Wirkungsgradmonitoring** empfehlenswert

# Kosten für Feinsedimentweiterleitung via Triebwasserweg

## Feinsedimentpassage durch Pelton-Turbinen

Kennwerte pro Maschine	KW Fieschertal VS, Schweiz (2012-2021)	KWKW Susasca GR, Schweiz (2019-2021)	KWKW Saldur Südtirol, Italien (2018)
Bruttofallhöhe, Anzahl Düsen Lauftrad-Aussendurchmesser $D$ Quelle	520 m, 2 Düsen 2800 mm, beschichtet Abgottspon et al. (2022)	365 m, 4 Düsen 986 mm, beschicht. Felix et al. (2023)	456 m, 5 Düsen 1004 mm, beschicht. Bittner et al. (2023)
Kosten infolge Feinsediment (Revi- sionen bzw. Ersatz von Düsen und Lauftrad sowie Mindererlös wegen $\Delta\eta$ )	145 kEUR/Jahr	19 kEUR/Jahr	31 kEUR/Jahr
Schwebstofffracht	37'500 t/Jahr	670 t/Jahr	3'000 t/Jahr
Spezifische Kosten	ca. <b>4 EUR/t</b>	<b>28 EUR/t</b>	ca. <b>10 EUR/t</b>

### + Kosten für Sedimentmobilisierung und –sortierung; Monitoring, Projekt und Bauleitung

Vergleichen mit anderen Möglichkeiten für Feinsedimentbewirtschaftung

z.B. Einheitspreise für Sedimentbewirtschaftung von Stauseen in der EU (Panagos et al. 2024):  
meistens Ausbaggern, z.T. mit Abführen auf Deponie: min. 3 (Osteuropa) 5, oft **10 bis 40**, selten bis 100 **EUR/m<sup>3</sup>**  
mit Lagerungsdichte von z.B. 1.6 t/m<sup>3</sup> -> **oft 6 bis 25 EUR/t**

Feinsediment turbinieren **kann wirtschaftlich sein** bei eher grossen, geeigneten Wasserkraftanlagen

# Feinsedimentweiterleitung via Peltonturbinen

## Abrasion nicht so problematisch

kleinere Fallhöhe (Ausnahmefall für Pelton)

feine Partikel (bis Mittelsilt); Siebung etc.

weicherer Gestein ("Kalk", Voralpen)

geringe Sedimentmasse (moderate SSC und wenige Stunden mit Sedimentförderung)

breite Becher, wenige Düsen (früher oft 2)

Beschichtete/hochwertige/robuste Bauteile (Wolframkarbid, Stellite, dickwandig); oder werden aus anderen Gründen bald ersetzt

Anlage hat geschlossenes Kühlwassersystem, zeitweise hohe Sedimentbelastungen konnten früher schon bewältigt werden (Erfahrung)

gute Möglichkeiten, eine allfällige Nichtverfügbarkeit der Anlage zu kompensieren

## gewichtiges Problem bis kritisch

große Fallhöhen ( $>300$  m,  $\text{Fallhöhe}^{1.5}$ )

mit Fein- u. Mittelsand, Gröberes nicht ausgeschl.

hoher Anteil an Quarz und Feldspat ("Urgestein")

aktuell oder frühere Gletscher, "Sanierungsprojekt" (große Fracht in wenigen Monaten turbinieren)

schmale Becher, viele Düsen (heute oft bis 6)

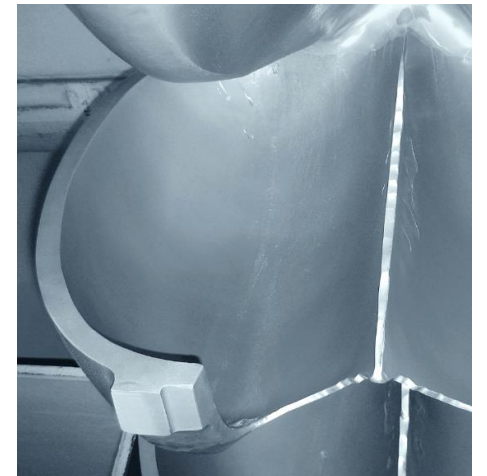
Düsen und Becher aus CrNi-Stahl, "neue" Becher mit Design für hohe Wirkungsgrade

Anlage ist nicht für erhöhte SSC ausgelegt (z.B. Filter für Druckwasser für Kugelschieberantrieb), Ablagerungen im Wasserschloss oder Ausgleichsbecken, Sedimentweitergabe an weitere KW-Stufe

hohe Anlagenverfügbarkeit erwartet (wichtige Anlage, Regelenergie, Systemdienstleistungen)

# Schlussfolgerungen

- **Verstärkte Feinsedimentweiterleitung via Triebwasserweg** kann nennenswert dazu beitragen, **Stauraumverlandung zu reduzieren** und zeitweise **hohe SSC im Unterlauf zu vermeiden**
- **Machbarkeit** kann aufgrund von **Referenzobjekten** oder mithilfe **empirischer Ansätze abgeschätzt** werden
- **Optimierung aufgrund Monitoring** der Schwebstoffbelastung, Turbinenabration, Wirkungsgradveränderungen und ggf. ökologischer Auswirkungen im Unterwasser sowie Seegrundentwicklung (idealerweise über mehrere Jahre)
- **Weitere Untersuchungen** insbesondere an realen Speicherwasserkraftanlagen, um Unsicherheiten in Projekten zu reduzieren



# Quellenangaben

## KW Fieschertal

Abgottspon A., Felix D., Staubli T., Boes R. (2022). Betriebs- und Unterhaltsoptimierung von beschichteten Peltonturbinen mit hydro-abrasivem Verschleiss. [Wasser Energie Luft](#) 114(2): 105–117.

Felix D. (2017). Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines. [VAW-Mitteilung](#) 238 (R.M. Boes, ed.), und [Diss. 24145](#), ETH Zürich. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/161430>

## KWKW Susasca

Felix D., Kastinger M., Cracknell N., Davidis S., Marschall Y., Albayrak I., Boes R. (2023): Optimierung von Hochdruck-Kleinwasserkraftanlagen an feinsedimentreichen Flüssen (OptiSed) - Fallstudie zu Entsandung und Turbinenabrasion am Kleinwasserkraftwerk Susasca. Schlussbericht vom 28.02.2023 an das BFE. VAW, ETH Zürich.

## KWKW Saldur

Bittner P., Balzarini A., Felix D., Boes R., Gostner W. (2023). Verschleißminderung an der Kleinwasserkraftanlage Saldur, Südtirol. (Turbine wear reduction at the high-head small hydropower plant Saldur). [Wasserwirtschaft](#) 113(5), 10-17.

## KWKW Dorferbach

Maldet R. (2008). Pelton runner with high erosion caused by glacier sediment: assessment and measures. Proc. 15<sup>th</sup> Intl. Seminar on HPPs, Doujak. E. (ed.), Vienna, Austria: 639-646

## Peltonturbinen allgemein

Hassler P., Schnablegger W. (2006). Pelton runner maintenance and its results at Verbund-Austrian Hydro Power AG. Proc. 14<sup>th</sup> Intl. Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (Hrsg.), Wien: 445–454.

IEC 62364 (2019). Guide for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis, and Pelton turbines. 2. Edition, International Electro-technical Commission, Genf.

Winkler K., Dekumbis R., Rentschler M., Parkinson E., Garcin H. (2011a). Understanding hydro-abrasive erosion, Proc. Hydro Conf., Prague, Czech Republic: paper no. 02.05.

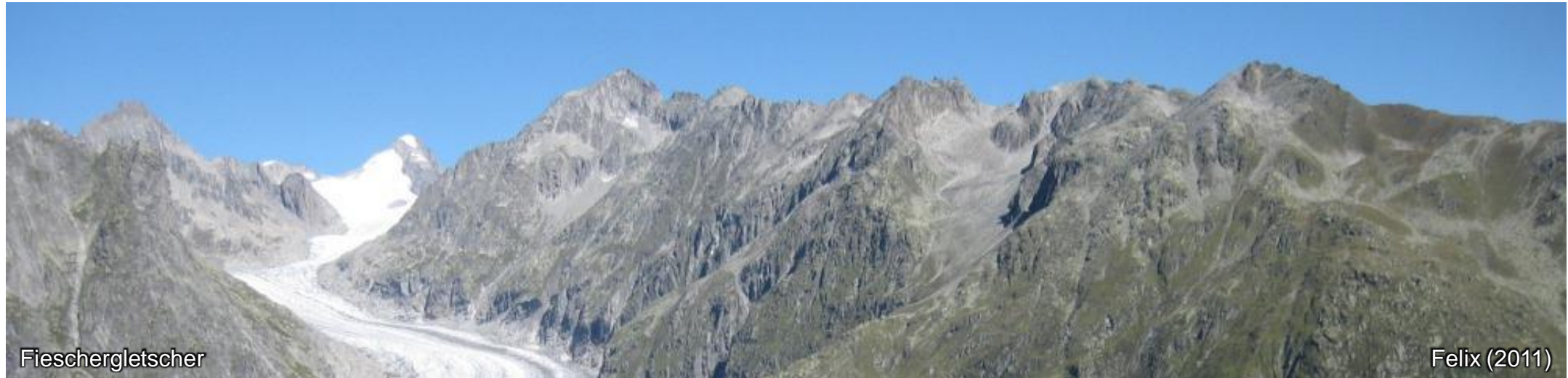
Zhang Z. (2016). Pelton turbines. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

## Sedimentmanagement an Stauanlagen (u.a.)

DWA (2006). Entlandung von Stauräumen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.

Panagos, P., Matthews, F., Patault, E., De Michele, C., Quaranta, E., Bezak, N., ... & Borrelli, P. (2024). Understanding the cost of soil erosion: An assessment of the sediment removal costs from the reservoirs of the European Union. [Journal of Cleaner Production](#), 434, 140183.

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE  
Office fédéral de l'énergie OFEN

**ETH** zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie

Prof. Dr. Robert Boes  
Dr. Ismail Albayrak

Studie am KW Fieschertal



Gommerkraftwerke AG

**HOCHSCHULE  
LUZERN**

Kompetenzzentrum Fluidmechanik und  
numerische Methoden

Prof. Dr. Thomas Staubli,  
André Abgottspon

Studie am KW Susasca



Ouvra Electrica Susasca Susch SA

Giancarlo Neuhäusler



Markus Hintermann



david.felix@aquased.ch