



Schlussbericht 01.12.2016

Schwebstoff-Monitoring und Verschleiss an Peltonturbinen (Teile a und b)

Monitoring of suspended sediment and wear at
Pelton turbines (Parts a and b)



Bild: VAW



Bild: VAW

Beispiel eines Gebirgsflusses mit stark schwebstoffhaltigem Wasser (Wysswasser unterstrom des Fieschergletschers, 08.08.2013) und abgenutzte Becher eines Laufrads einer unbeschichteten Pelton-turbine (Ausstellungsobjekt bei der Wasserkraftanlage Emosson, 2010).



ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik und Architektur
Kompetenzzentrum Fluidmechanik
und Hydromaschinen

Datum: 01.12.2016

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung (bis 2014):

Swisselectric
Seilerstrasse 3
CH-3001 Bern
www.swisselectric.ch

Auftragnehmerin:

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerberggring 26
CH-8093 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Hochschule Luzern, Technik und Architektur (HSLU)
Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Hydromaschinen
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
<http://www.hslu.ch/fmhm>

Autoren:

David Felix, VAW, felix@vaw.baug.ethz.ch
André Abgottspon, HSLU, andre.abgottspon@hslu.ch
Dr. Ismail Albayrak, VAW, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Robert Boes, VAW, boes@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Thomas Staubli, HSLU, thomas.staubli@hslu.ch

BFE-Bereichsleitung: Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net
BFE-Vertragsnummer: SI/500638-01 und -02

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Bei Hochdruckwasserkraftanlagen kann die Abnutzung von Peltonturbinen infolge Schwebstoffen im Triebwasser (Hydroabrasiv-Verschleiss) die Wirtschaftlichkeit und die Energieeffizienz erheblich beeinträchtigen. Daten über das Schwebstoffaufkommen, die Turbinenabration und Wirkungsgradabnahmen sind erforderlich, um die Zusammenhänge zu quantifizieren, aber bisher kaum verfügbar. Am KW Fieschertal im Kanton Wallis wurden die Konzentration und Grössenverteilung der Schwebstoffe mittels fünf Messmethoden seit 2012 kontinuierlich erfasst. Die Geometrieänderungen und der Materialabtrag an Bechern der Peltonlaufräder sowie die Wirkungsgradabnahmen wurden periodisch gemessen. Basierend auf den Messdaten der Jahre 2012 bis 2014 wurde ein analytisches Abrasionsmodell für beschichtete Peltonbecher angepasst und kalibriert. Weiter wurde eine Grenz-Schwebstoffkonzentration ermittelt, bei deren Überschreiten der Betrieb der Wasserkraftanlage unwirtschaftlich ist. Solche Kenntnisse dienen als Grundlage für die Optimierung des Entwurfs, des Betriebs und des Unterhalts von Wasserkraftanlagen sowie zur Steigerung der Effizienz der Wasserkraftnutzung. Die Untersuchungen zu den genannten Themen werden an dieser Prototypanlage weitergeführt.

Résumé

Aux aménagements hydro-électriques à haute chute, l'usure par abrasion des turbines Pelton, causée par des particules minérales dures contenues dans l'eau, peut réduire notablement leurs rentabilités et leurs rendements hydrauliques. Des données concernant la charge de particules, l'abrasion des turbines et la réduction de leur rendement sont requises pour investiguer des relations quantitatives, mais ne sont que rarement disponible jusqu'à présent. A l'aménagement hydraulique de Fieschertal dans le Canton du Valais, la concentration et la distribution des tailles des particules en suspension dans l'eau de turbinage ont été mesurées en continue dès 2012 en utilisant cinq techniques. En parallèle, la géométrie actuelle des augets des roues Pelton, la perte du matériel et la réduction du rendement ont été relevées périodiquement. Basé sur les données des années 2012 à 2014, un modèle analytique pour l'abrasion des augets revêtus a été modifié et calibré. Une concentration limite des sédiments a été estimée, au-delà de celle-ci l'exploitation de l'aménagement n'est plus rentable. Des telles connaissances servent de base pour des optimisations dans la conception, l'exploitation et la maintenance des aménagements hydro-électriques et pour la mise en valeur efficace du potentiel hydraulique. La recherche dans ces domaines est continuée à cet aménagement prototype.

Abstract

At high head hydro-electric power plants (HPPs), hydro-abrasive erosion at Pelton turbines caused by hard mineral particles in the turbine water may considerably reduce the profitability and energy efficiency. Data on the particle load, turbine erosion and corresponding efficiency reductions are required to quantitatively investigate their relations, but have rarely been available so far. At the Fieschertal HPP in the Canton of Valais, the concentration and size distribution of sediment particles have been continuously measured since 2012 using five techniques. In parallel, the changes of the turbines' bucket geometries, material losses and efficiency reductions have been periodically measured. An analytical erosion model for coated Pelton buckets have been adapted and calibrated based on the data of 2012 to 2014. Moreover, the so called switch-off sediment concentration was estimated, above which the operation of the HPP is not profitable due to excessive turbine erosion. Such knowledge serves as a basis for economic optimizations in the design, operation and maintenance of HPPs and for the efficient use of the hydropower potential. The research on these subjects is continued at this prototype HPP in follow-up projects.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. Ausgangslage | 5 |
| 1.1. Problemstellung | 5 |
| 1.2. Forschungsprojekt..... | 6 |
| 2. Stand der Technik und Grundlagen | 7 |
| 2.1. Schwebstoffe..... | 7 |
| 2.1.1. Definition und Eigenschaften | 7 |
| 2.1.2. Messmethoden..... | 7 |
| 2.2. Hydroabrasiv-Verschleiss | 8 |
| 2.2.1. Definition und Einflussfaktoren | 8 |
| 2.2.2. Typische Schäden an Peltonturbinen | 9 |
| 2.3. Wirkungsgradänderungen infolge Hydroabrasiv-Verschleiss | 9 |
| 3. Projektziele | 10 |
| 4. Vorgehen | 11 |
| 5. Ergebnisse | 12 |
| 5.1. Schwebstoffmonitoring..... | 12 |
| 5.1.1. Verwendete Schwebstoffmessgeräte | 12 |
| 5.1.2. Laboruntersuchungen zu Schwebstoffmessgeräten | 13 |
| 5.1.3. Schwebstoffmessungen an der Prototypanlage | 16 |
| 5.1.4. Schwebstofffrachten und <i>Particle Loads</i> an der Prototypanlage..... | 22 |
| 5.2. Monitoring der Turbinenabnutzung | 23 |
| 5.3. Wirkungsgradmonitoring | 25 |
| 5.4. Modellierung der Turbinenerosion | 28 |
| 5.5. Betriebsoptimierungen | 29 |
| 5.6. Wissensaustausch | 31 |
| 5.6.1. Tagung in Horw bei Luzern..... | 31 |
| 5.6.2. Tagung in Grenoble | 32 |
| 6. Diskussion und Schlussfolgerungen | 33 |
| 6.1. Schwebstoffmonitoring..... | 33 |
| 6.2. Monitoring der Turbinenabrasion | 34 |
| 6.3. Wirkungsgradmonitoring | 34 |
| 6.4. Gesamtbetrachtung..... | 35 |
| 7. Ausblick | 36 |
| 8. Referenzen | 37 |
| 8.1. Publikationen aus dem vorliegenden Forschungsprojekt | 37 |
| 8.2. Weitere Referenzen (ausgewählte Grundlagen) | 38 |
| Anhang | 39 |

1. Ausgangslage

1.1. Problemstellung

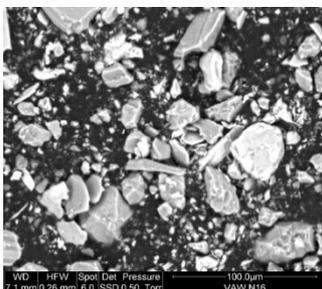
Im Triebwasser von Wasserkraftanlagen können mineralische Schwebstoffe enthalten sein, die an wasserberührten Anlagenteilen, speziell an Turbinen von Hoch- und Mitteldruckanlagen, zu Abrasionsschäden führen (Abb.1). Diese reduzieren den Wirkungsgrad der Turbinen und somit die Elektrizitätsproduktion. Weiter führt dies zu erhöhten Betriebskosten (häufigere und umfangreichere Revisionsarbeiten), früher erforderlich werdenden Ersatzinvestitionen und Ertragseinbussen, insbesondere wenn Turbineneinheiten aufgrund von Abrasionsschäden nicht für den Betrieb verfügbar sind. Durch die Abrasion an den Turbinen werden also die Energieeffizienz und die Wirtschaftlichkeit solcher Wasserkraftanlagen beeinträchtigt. Besonders betroffen sind:

- Anlagen in teilweise vergletscherten Einzugsgebieten, insbesondere falls Wasser turbiniert wird, welches nicht aus einem Speichersee entnommen wurde;
- Peltonturbinen, da bei diesem Turbinentyp die höchsten Fließgeschwindigkeiten und die stärksten Strömungsumlenkungen auftreten.

Die Thematik der Turbinenabration gewinnt aus folgenden Gründen an Bedeutung:

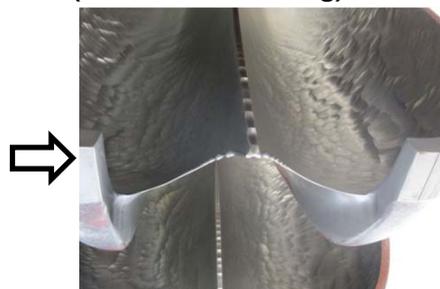
- Infolge des Rückzugs von Gletschern und Permafrost im alpinen Raum und der zunehmenden Variabilität der Niederschläge werden tendenziell mehr Sedimente in Fließgewässer eingetragen;
- Der Kostendruck in der Wasserkraftbranche fordert weitere wirtschaftliche Optimierungen, beispielsweise auch bezüglich der automatischen Überwachung des Sedimentaufkommens und des Wirkungsgrads (*condition monitoring*);
- Aufgrund der energiepolitischen Zielsetzungen soll das bestehende Wasserkraftpotential bestmöglich genutzt werden (Energieeffizienz);
- Bei Stauanlagen mit aktuellen Verlandungsproblemen bzw. zum Reduzieren von Konzentrationspitzen während Spülungen wird auch die Möglichkeit des kontinuierlichen Weiterleitens von Feinsedimenten über den Triebwasserweg vermehrt geprüft.

Schwebstoffe im turbinierten Wasser



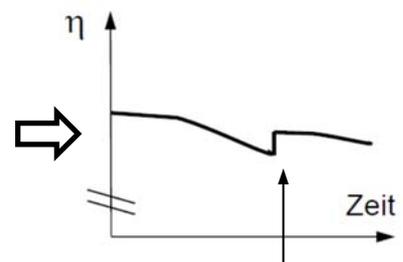
Schwebstoffe aus dem KW Fieschertal (Foto: VAW)

Abrasion (Geometrieänderung)



Becher eines Peltonlaufrades (KW Emosson, Foto: VAW)

Wirkungsgradänderungen



Revision

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wirkungskette



Der Schwebstoffgehalt des Triebwassers variiert zeitlich und örtlich stark. Hohe Schwebstoffkonzentrationen treten üblicherweise während der Schneeschmelze, infolge Regenereignissen, oder in stark vergletscherten Einzugsgebieten in warmen Perioden auf. Der Schwebstoffgehalt des Triebwassers und somit die Beanspruchung der Turbinen kann durch den Entwurf und den Betrieb einer Wasserkraftanlage beeinflusst werden. Zu diesen Möglichkeiten, die auf eine Reduktion der Schwebstoffbelastung der Turbinen abzielen, zählen der Bau von Speichern und Entsandungsanlagen oder temporäres Aussetzen des Turbinierbetriebs in Phasen erhöhter Schwebstoffbelastung. Auf der andern Seite kann durch geeignete Materialwahl und Beschichtungen der Widerstand der Turbinenbauteile erhöht werden.

Eine Wasserkraftanlage besteht nebst elektromechanischen Komponenten auch aus baulichen Anlagenelementen. Daher ist nicht allein die Reduktion der Abrasionsschäden an den Turbinen anzustreben, sondern der möglichst wirtschaftliche, sichere und ökologisch verträgliche Betrieb der Gesamtanlage über die Nutzungsdauer. Für eine wirtschaftliche Optimierung von Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen in Regionen mit hohem Feinsedimentaufkommen sind – nebst Informationen zu Kosten von Turbinenrevisionen, -beschichtungen, Spülungen, Entsandungsanlagen – quantitative und generell anwendbare Angaben zu den Zusammenhängen zwischen Schwebstoffaufkommen, Abrasionsschäden und Wirkungsgradabnahme erforderlich. Solche Informationen sind bisher kaum verfügbar. Insbesondere besteht ein Bedarf an möglichst einfach anwendbaren, kalibrierten Abrasionsmodellen.

Eine auch bezüglich Feinsedimenten optimierte Betriebsweise bedingt weiter Kenntnisse über das aktuelle Sedimentaufkommen. Für Kraftwerksbetreiber, Planer und Turbinenhersteller stellt sich deshalb die Frage, welche Messsysteme für das Echtzeit-Monitoring der Schwebstoffkonzentration und der Partikelgrössen im Zufluss und im Triebwasser je nach lokalen Bedingungen geeignet sind, d.h. eine angemessene Genauigkeit, hohe Zuverlässigkeit, ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis und einen geringen Betriebsaufwand aufweisen.

1.2. Forschungsprojekt

Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen hat die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern, Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Hydromaschinen, eine mehrjährige Forschungsarbeit initiiert, die unter anderem durch das BFE gefördert wurde und wird. Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die diesbezüglichen Forschungsprojekte:

- Im Teil a) dieser Forschungsarbeit wurden im ersten Semester 2012 verschiedene Schwebstoffmesstechniken im Labor untersucht. Seit Sommer 2012 wurden die Konzentration und Partikelgrössenverteilung der Schwebstoffe im Triebwasser des Kraftwerks Fieschertal mittels verschiedener Messmethoden kontinuierlich erfasst und die Wirkungsgradänderungen gemessen.
- Die Turbinenabrasion wurde seit Herbst 2013 in einem parallel laufenden Teilprojekt „Monitoring der Abnutzung an Bechern von Peltonturbinen mittels 3d-Digitalisierungen und Schichtdickenmessungen“ periodisch erfasst (siehe separater Schlussbericht von 2015).
- Im Teil b) dieser Forschungsarbeit wurden die Schwebstoff- und Wirkungsgradmessungen im Jahr 2014 weitergeführt und ausgewertet. Die Resultate wurden zeitnah in mehreren Fachartikeln publiziert. Gegen Schluss des Projekts wurden für den Wissensaustausch in diesem Fachgebiet zwei Tagungen/Workshops auf Deutsch bzw. Englisch durchgeführt.



Der vorliegende Schlussbericht bezieht sich auf die Teile a) und b) dieses Forschungsprojekts (schwarz markierte Projektteile in Abb. 2).

| Projektteil (BFE-Nummer): | Jahr: | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|
| Teil a): Schwebstoff- und Wirkungsgradmonitoring (SI/500638-01) | | | | | | | |
| Monitoring der Abnutzung an Bechern von Pelton turbinen (SI/500960-01) | | | | | | | |
| Teil b): Fortsetzung Schwebstoff- und Wirkungsgradmonitoring (SI/500638-02) | | | | | | | |

Abbildung 2: Übersicht über die Teile des Forschungsprojekts

2. Stand der Technik und Grundlagen

2.1. Schwebstoffe

2.1.1. Definition und Eigenschaften

In Fließgewässern werden – je nach Verfügbarkeit und Strömungsbedingungen – Sedimentpartikel bzw. -körner unterschiedlicher Grösse mittransportiert. Die feineren Partikel, die aufgrund ihres geringen Gewichts durch die Turbulenz der Strömung in Schwebelage gehalten werden, werden Schwebstoffe genannt. In Entsandungsanlagen oder kleineren Speichern werden nicht alle Feinsedimente ausgeschieden, weshalb ein Teil der natürlichen mineralischen Feststoffe im Triebwasser verbleibt. Zur Charakterisierung der Schwebstoffe werden v. a. folgende Parameter verwendet:

- Schwebstoffkonzentration (*Suspended Sediment Concentration, SSC*), in der vorliegenden Arbeit als Massekonzentration (g/l) verwendet
- Partikelgrößenverteilung (*Particle Size Distribution, PSD*)
- Partikelform
- Partikelhärte

2.1.2. Messmethoden

Da die SSC und PSD zeitlich stark variieren können, sind Messmethoden für deren kontinuierliche Erfassung erforderlich. Als Grundlage für Betriebsentscheidungen ist es von Vorteil, wenn Messresultate in Echtzeit verfügbar sind.

Für die Quantifizierung der SSC in Oberflächengewässern ist es üblich, die Trübung kontinuierlich zu messen und mit SSC, die von gelegentlich entnommenen Proben mit der Wägemethode (gravimetrisch) bestimmt wurden, zu korrelieren (Spreafico *et al.* 2005). Mit diesem Vorgehen führen jedoch zeitliche Variationen der Grösse, der Form und der Farbe der suspendierten Partikel zu Ungenauigkeiten in der SSC-Bestimmung (Sutherland *et al.* 2000).



Weitere Methoden für die SSC-Bestimmung, die auf anderen physikalischen Prinzipien basieren, sind in Wren *et al.* (2000) zusammengestellt. Für das vorliegende Forschungsprojekt ist die Methode der SSC-Bestimmung mittels Dichtemessung an einem schwingenden Rohrbogen von Bedeutung. Dieses Messprinzip wird in der Prozessindustrie in Coriolis-Massestrom und Dichtemessgeräten (*Coriolis Flow- and Density-Meter*, CFDM) eingesetzt, ist aber für das Schwebstoffmonitoring an Fließgewässern oder Wasserkraftanlagen noch nicht verbreitet (Bishwakarma & Støle 2008).

Weiter ist eine akustische Methode zu erwähnen, die sich für das Schwebstoffmonitoring in Wasserkraftanlagen anbietet, weil in vielen grösseren Wasserkraftanlagen bestehende Installationen für die akustische Durchflussmessung genutzt werden können. Diese Methode beruht auf der Dämpfung von Ultraschallsignalen, die von den im Wasser suspendierten Partikeln verursacht wird (Costa *et al.* 2012).

Bei Schwebstoff-Studien werden Partikelgrößenverteilungen in der Regel lediglich von ausgewählten Proben im Labor mittels Laserdiffraktometrie bestimmt. Seit einigen Jahren sind Laserdiffraktometer-Geräte (*Laser In-situ Scattering and Transmissiometry*, LISST) erhältlich, welche die Messung der PSD und der SSC mit hoher zeitlicher Auflösung ausserhalb des Labors ermöglichen (Agrawal *et al.* 2008). Ein solches Messgerät wurde an einer Hochdruckwasserkraftanlage in Österreich eingesetzt, um die Schwebstoffführung des Triebwassers zu erfassen (Boes 2009, 2010). In der Schweiz wurde nach Kenntnis der Autoren bisher noch kein LISST-Gerät in einer Wasserkraftanlage installiert.

Die Partikelform kann aufgrund von Mikroskop-Bildern von getrockneten Sedimentpartikeln bestimmt werden. Die Härte der Partikel kann mit der Mohs-Skala beschrieben werden, wobei jedem Mineral eine bestimmte Härte zugeordnet wird. Die quantitative mineralogische Zusammensetzung von Sedimentpartikeln wird mittels Rietveld-Röntgenbeugungsanalyse bestimmt.

An Wasserkraftanlagen ist ein kontinuierliches Echtzeit-Schwebstoffmonitoring bisher nicht Standard und beim Betrieb der Turbinen wird die aktuelle Schwebstoffführung des Triebwassers in der Regel nicht beachtet, ausser wenn durch Unwetter der Betrieb eingestellt werden muss und Wasserfassungen geschlossen (ausgeleitet) werden.

2.2. Hydroabrasiv-Verschleiss

2.2.1. Definition und Einflussfaktoren

Der Abtrag von Material durch eine partikelbeladene Strömung (3 Phasen-System) wird als Hydroabrasiv-Verschleiss oder gemäss IEC 62364 (2013) als *hydro-abrasive erosion* bezeichnet. Als Folge von Hydroabrasiv-Verschleiss tritt oft Kavitation auf, welche zu Sekundärschäden führt (Gummer 2009).

Der Hydroabrasiv-Verschleiss hängt stark von der Relativgeschwindigkeit zwischen den Turbinenbauteilen und der partikelhaltigen Strömung ab (Krause & Grein 1996, Thapa 2004). Die hydraulische Funktionsweise und der Entwurf von Peltonturbinen wurden z.B. von Zhang (2016) beschrieben. Bei Peltonturbinen hängen die Strahlgeschwindigkeit und die Relativgeschwindigkeit von der Fallhöhe ab. Daher ist bei grösseren Fallhöhen mehr Turbinenabrasion zu erwarten (Mei 1996).

Gemäss Untersuchungen von Sulzer Hydro (1996), auszugsweise publiziert in DWA (2006), ist die Erosionsrate, d.h. der Masseverlust pro Zeiteinheit, proportional zur SSC. Kantige Partikel verursachen stärkeren Verschleiss als gerundete Partikel (Nozaki 1990, auszugsweise publiziert in Ortmanns

2006). Für das Ausmass des Verschleisses ist der Anteil der Partikel entscheidend, die härter sind als das Oberflächenmaterial der exponierten Bauteile: bei dem üblicherweise verwendeten Chromnickelstahl und dem in den Alpen verbreiteten Granitgestein ist dies im Wesentlichen der Anteil an Quarz und Feldspat.

Größere Partikel verursachen bei gleicher SSC in der Regel mehr Abrasion als feinere (Nozaki 1990, Sulzer Hydro 1996). Für die Abrasion an Mittelschneiden von Pelton turbinen spielt die Partikelgrösse gemäss Laborversuchen von Winkler *et al.* (2011) eine wichtige Rolle (Abb. 3).

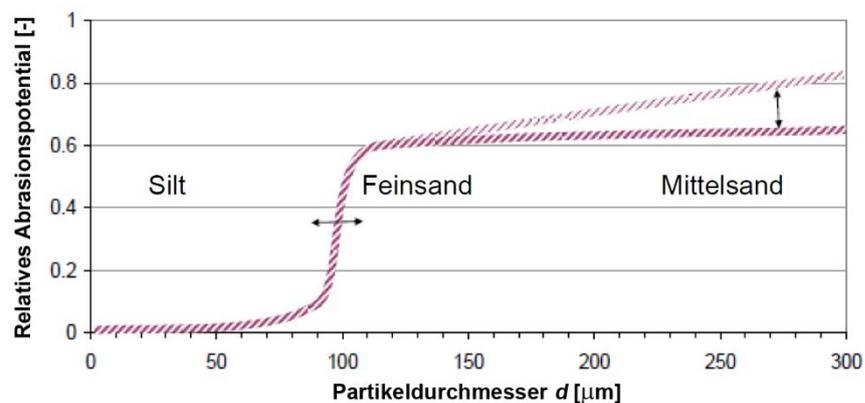


Abbildung 3: Relatives Abrasionspotential an Mittelschneiden der Becher eines Peltonlaufrads in Funktion der Partikelgrösse gemäss Laborversuchen (nach Winkler *et al.* 2011)

2.2.2. Typische Schäden an Pelton turbinen

An Peltonlaufrädern treten Verschleisschäden vor allem an den Mittelschneiden und an den Kanten der Ausschnitte der Becher, sowie in der Regel in geringerem Ausmass im Grund der Becherhälften auf. Weiter können Schäden an Nadeln und Düsenringen auftreten.

Zur Verlängerung der Einsatzzeiten zwischen Revisionen (*times between overhauls*) werden Hartbeschichtungen (mit Wolframkarbidpartikeln) auf Bauteile aufgebracht, die sedimenthaltigen Hochgeschwindigkeitsströmungen ausgesetzt sind (Karimi *et al.* 1995, Winkler 2014, Wedmark 2014).

Es sind kaum Studien verfügbar, in denen die Sedimentbelastung und die aufgetretenen Schäden an Prototyp-Anlagen detailliert und in entsprechenden Zeiträumen erfasst wurden. In früheren Untersuchungen (z.B. Strübin & Bussy 1988, Thomann 1988) konnten die SSC und PSD noch nicht mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden und die Abrasion wurde nicht quantifiziert.

2.3. Wirkungsgradänderungen infolge Hydroabrasiv-Verschleiss

Der Maschinensatzwirkungsgrad η_{Ma} , d.h. der Wirkungsgrad einer Turbine und eines Generators zusammen, ist definiert als Verhältnis der nutzbaren elektrischen zur aufgewendeten hydraulischen Leistung. Die elektrische Leistung (P_{Gen}) wird an den Generatorklemmen laufend gemessen. Die hydraulische Leistung kann aus dem Produkt der Fluidichte ρ , der Erdbeschleunigung g , der Nettofallhöhe H_N und des Volumenstroms Q (auch Durchfluss genannt) berechnet werden:



$$\eta_{\text{Ma}} = \frac{P_{\text{Gen}}}{\rho g H_N Q} \quad (1)$$

Der Turbinenwirkungsgrad kann durch Hydroabrasiv-Verschleiss und allfälliger Folgeschäden stark reduziert werden: Beim Kraftwerk Dorferbach (Österreich) mit einer Peltonturbine mit einer Bruttofallhöhe von 686 m wurde an einem unbeschichteten Laufrad innerhalb von vier Monaten eine Wirkungsgradabnahme von 6% festgestellt (Maldet 2008). Andererseits kann der Turbinenwirkungsgrad durch geeignete Revisionsmassnahmen an den Turbinenbauteilen wieder erhöht werden (Cateni *et al.* 2008). In der Literatur sind jedoch wenig quantitative Angaben zu Wirkungsgradveränderungen an Peltonturbinen und ihren Ursachen verfügbar (Hassler & Schnablegger 2006, Bajracharya *et al.* 2008, Dalhaug *et al.* 2010).

Gemäss einer groben Abschätzung von Brekke *et al.* (2002) nimmt der Wirkungsgrad einer Peltonturbine um etwa 1% ab, wenn die Mittelschneidenbreite auf 1% der inneren Becherbreite zunimmt. Bei einer Wirkungsgradabnahme um 1% beträgt der Produktionsverlust beispielsweise ca. 1 GWh/a für eine Wasserkraftanlage mit einer Produktion wie jener des KW Fieschertal. Mit dem Elektrizitätsverbrauch eines typischen Schweizer Haushalts von ca. 4000 kWh pro Jahr (Zweipersonenhaushalt in Mehrfamilienhaus mit Anteil Elektroboiler) entspricht dies dem Verbrauch von etwa 250 Haushalten.

Kalberer (1988) schätzte die Wirkungsgradreduktion von Peltonturbinen in der Schweiz infolge Hydroabrasiv-Verschleiss im zeitlichen Mittel auf ca. 0.5%. Dies ergab bei einer heute noch annähernd gültigen Produktionserwartung von 13 TWh/Jahr aus Wasserkraftanlagen mit Peltonturbinen einen Produktionsverlust von 65 GWh/Jahr, was dem Verbrauch von ca. 16'000 Haushalten entspricht. Dies zeigt die Wichtigkeit von Peltonturbinen für die schweizerische Elektrizitätsproduktion und die Bedeutung der im vorliegenden Forschungsprojekt behandelten Themen.

3. Projektziele

Die Zielsetzung des Forschungsprojekts umfasst:

- Untersuchen, Kalibrieren bzw. Validieren und Weiterentwickeln von Messeinrichtungen für das Echtzeit-Monitoring von Schwebstoffen;
- Quantifizieren der Schwebstoffführung, der Turbinenabrasion und der Wirkungsgradabnahme an einer Hochdruck-Wasserkraftanlage aufgrund von mehrjährigen Messungen;
- Verbesserung des Verständnisses für relevante Prozesse (Schwebstoffaufkommen; Turbinenerosion und Wirkungsgradminderung);
- Untersuchen und Weiterentwickeln von analytischen Modellen (Formeln) zur Abschätzung (Prognostizierung) des Hydroabrasiv-Verschleisses;
- Empfehlungen zu Messsystemen für das Echtzeit-Monitoring der Schwebstoffkonzentration und Partikelgrössenverteilung für die Anwendung in Wasserkraftanlagen;
- Empfehlungen zu Betriebsoptimierungen, beispielsweise vorübergehende Turbinen-Abschaltungen während erhöhtem Sedimentaufkommen;
- Wissensaustausch zwischen der Praxis (Betreiber von Wasserkraftanlagen) und der Forschung



Damit sollen Grundlagen für die Optimierung der Wirtschaftlichkeit und der Energieeffizienz von Wasserkraftanlagen, die von starkem Hydroabrasiv-Verschleiss betroffen sind, bereitgestellt werden.

4. Vorgehen

Zur Untersuchung physikalischer Phänomene werden im Wasserbau und im Fachgebiet der Strömungsmechanik in der Regel physikalische Modellversuche in reduziertem Massstab, numerische Simulationen und/oder Messungen an einem Prototypen durchgeführt. In diesem Forschungsprojekt wurde aus folgenden Gründen der letzteren Methode der Vorzug gegeben:

- Vermeiden von Massstabeffekten bei der Untersuchung des Abrasionsverhaltens,
- für numerische Simulationen sind entsprechende Kalibrierungs- bzw. Validierungsgrundlagen noch nicht vorhanden,
- die massgebenden Verschleiss-Prozesse können (noch) nicht alle numerisch modelliert werden.

Als geeignete Anlage für eine Fallstudie wurde die Hochdruck-Wasserkraftanlage Fieschertal gewählt, an welcher seit Inbetriebnahme 1975 starker Hydroabrasiv-Verschleiss beobachtet worden war. In dieser Anlage wird Wasser aus einem stark vergletscherten Einzugsgebiet (hauptsächlich Fiescher-gletscher) ohne Aufenthalt in einem Speichersee turbinert.

Zum Erreichen der beschriebenen Ziele wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Literaturstudie und Vorbereitungen
- Untersuchung der Schwebstoff-Messgeräte im Labor (1. Semester 2012)
- Untersuchungen an der Prototyp-Anlage (2012 - 2014), d.h. Messungen der
 - Schwebstoffe im Triebwasser
 - Turbinenabrasion (vorwiegend durch die Hochschule Luzern)
 - Wirkungsgradveränderungen (vorwiegend durch die Hochschule Luzern)
- Zusammenfassende Auswertungen;
- Organisation und Durchführung von Tagungen und Workshops.

An diesem interdisziplinären Forschungsprojekt waren nebst der ETH Zürich und der HSLU folgende Partner beteiligt:

- Gommerkraftwerke AG, Ernen, als Betreiberin des untersuchten Kraftwerks;
- BKW Engineering, Bern, für elektromechanische Ausrüstung und Leittechnik;
- Andritz Hydro AG, Kriens, für beschichtete Peltonturbinen;
- Rittmeyer AG, Baar, für Sedimentmonitoring mit akustischen Methoden sowie Sigrist Photometer, Ennetbürgen, und Endress+Hauser, Reinach, für Trübungsmessgeräte;
- swisselectric research, Bern (Kofinanzierung bis Sommer 2014).



5. Ergebnisse

5.1. Schwebstoffmonitoring

5.1.1. Verwendete Schwebstoffmessgeräte

Die in dieser Studie verwendeten Messgeräte für das Schwebstoffmonitoring sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Verwendung von Trübungssonden ist Standard; es wurden verschiedene Bautypen (1) – (5) gewählt, um ihre Eignung an Wasserkraftanlagen zu untersuchen. Da die Partikelgrösse im Zusammenhang mit dem Turbinenverschleiss ein wesentlicher Parameter ist (z.B. Winkler *et al.* 2011), wurde auch ein LISST-Gerät (6) eingesetzt. Damit kann die Partikelgrössenverteilung mit hoher zeitlicher Auflösung (z.B. jede Minute) vor Ort erfasst werden. Für die Messung höherer SSC (> einige g/l) wurde ein CFDM (8) eingesetzt. Die ADM (7) und die Drucksensoren (9) waren schon vor Beginn des Forschungsprojekts im Kraftwerk installiert und konnten zusätzlich für das Schwebstoffmonitoring genutzt werden. Weiter wurde ein automatischer Wasserprobennehmer eingesetzt.

Tabelle 1: Instrumente für das Schwebstoffmonitoring (modifiziert nach Felix *et al.* 2013b).

| No. | Messgeräte-Typ | Modell, Hersteller | Ausgabesignale, Messbereich | Abgeleitete Grössen |
|------|--|--|--|---|
| (1) | Trübungssonde, eintauchbar, mit Wischern | <i>Turbimax W CUS41</i> Endress+Hauser | Trübung ($\alpha = 90^\circ$ dual) 0 ... 10'000 [FNU] | SSC |
| (2) | | <i>Solitax ts-line sc</i> Hach-Lange | Trübung ($\alpha = 90^\circ$ dual) 0 ... 4000 [FNU] | SSC |
| (3) | Trübungsmessgeräte zum Einbau in Leitungen | <i>TurBiScat</i> Sigrist Photometer | Trübung ($\alpha = 90^\circ, 25^\circ$) 0 ... 4000 [FNU] | SSC |
| (4) | | <i>TF16-N with F20</i> Optek Danulat | Trübung (Transmission) 0 ... 5 [CU] ($\alpha = 0^\circ$) | SSC |
| (5) | | am fallenden Wasserstrahl | <i>AquaScat WTM A</i> Sigrist Photometer | Trübung ($\alpha = 90^\circ$) 0 ... 4000 [FNU] |
| (6) | <i>In-situ</i> Laserdiffraktometer (LISST) (<i>Laser In-Situ Scattering and Transmissometry</i>) | <i>LISST-100X</i> , Typ C, mit 90% Pfadreduktionsmodul Sequoia Scientific | Volumenkonzentrationen [ppm] in 32 Partikelgrössenklassen (3 - 380 μm) | SSC und PSD |
| (7) | Akustische Methode (basierend auf Standard-ADM-Messeinrichtung) | <i>Risonic Modular</i> Rittmeyer | Amplitude des Empfangssignals [V] (akustische Dämpfung) | SSC |
| (8) | Coriolis-Durchfluss- und Dichtemessgerät (CFDM) | <i>Promass 83 F15</i> DN15 Endress+Hauser | Volumenstrom [l/s], Dichte [g/l]; Temperatur [°C] | SSC |
| (9) | Differenzdruck (an der Druckleitung) | <i>2088, 1151</i> Rosemount | Statischer Druck [0 ... 55 bar] | SSC |
| (10) | Automatischer Wasserprobennehmer | <i>Isco 3700</i> Isco-Teledyne | Wasserproben in 24 1-Liter-Flaschen | SSC |

5.1.2. Laboruntersuchungen zu Schwebstoffmessgeräten

Als Vorbereitung für die Messungen am Kraftwerk Fieschertal wurden die Trübungssonden, das LISST-Gerät und die akustische Messmethode im Labor unter kontrollierten Bedingungen getestet. Die Messgeräte und die zugehörige Datenerfassungseinrichtung wurden an einem Mischtank im hydraulischen Labor der Hochschule Luzern installiert (Abb. 4).

Für die Laborversuche wurden mineralische Partikel (Abb. 5), die kommerziell erhältlich und mit den Partikeln in der Natur vergleichbar sind, sowie natürliche Partikel von Ablagerungen aus dem Unterwasserkanal des Kraftwerks Fieschertal beschafft (Felix *et al.* 2012a).

Im Mischtank wurden acht Messserien mit verschiedenen Partikelsorten durchgeführt. Die Konzentration der Suspensionen wurde jeweils stufenweise gesteigert und mit allen Messgeräten wurden gleichzeitig Messungen durchgeführt. Die vorhandene SSC im Tank wurde mit Schöpfproben, die im Ofen getrocknet und deren Rückstand mit der Waage gewogen wurden, bestimmt. Insgesamt wurden ca. 500 Schöpfproben gravimetrisch untersucht, welche als Referenz dienen.

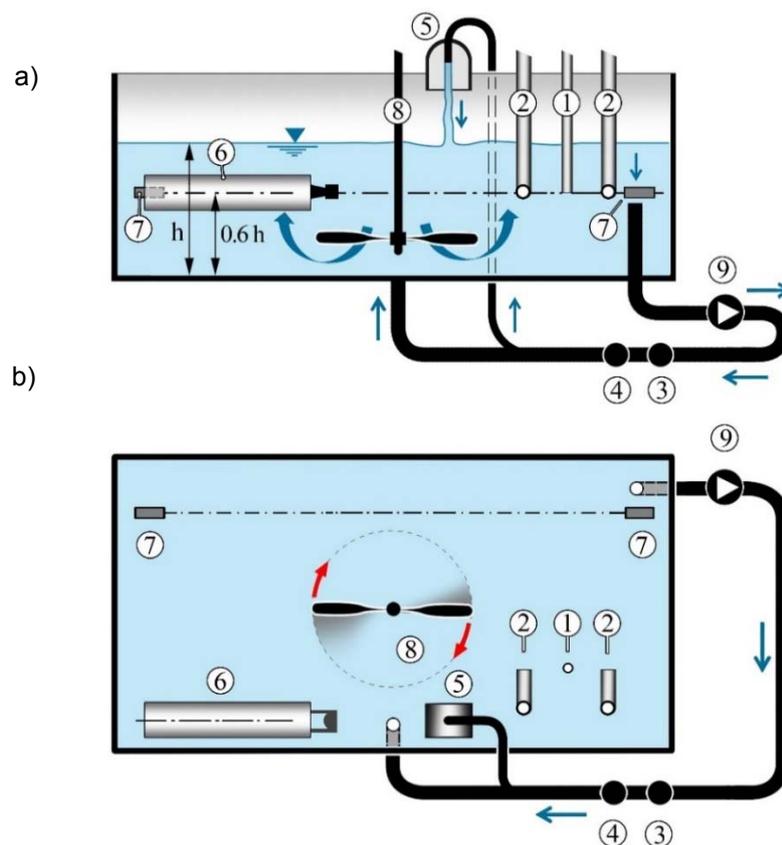


Abbildung 4: Mischtank mit Schwebstoffmessgeräten im hydraulischen Labor, a) im Vertikalschnitt, b) im Grundriss; die Nummern 1 - 7 beziehen sich auf Tabelle 1, ⑧ Rührer, ⑨ Pumpe (modifiziert nach Felix *et al.* 2013c).

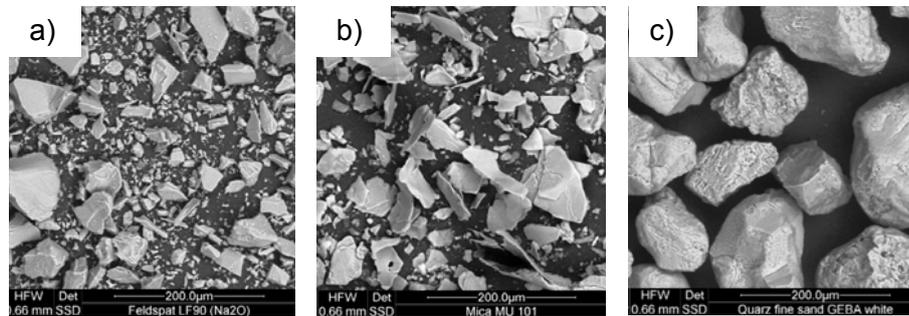


Abbildung 5: Mineralische Partikel, die in den Laborversuchen mit den Schwebstoffmessgeräten verwendet wurden; a) Feldspatpulver, b) Glimmerpulver, c) Quarzfeinsand (Felix *et al.* 2013a)

Die Messresultate zeigten, dass Trübungssonden für jede Partikelsorte und für verschiedene Geräte separat zu kalibrieren sind. In Abbildung 6 sind beispielsweise die experimentell bestimmten Kalibrierbeziehungen einer ausgewählten Trübungssonde für verschiedene Partikelsorten dargestellt. Die Partikelgrösse, hier quantifiziert mit dem Median-Durchmesser d_{50} (gemessen mit dem LISST), hat einen starken Einfluss. Weiter spielt die Partikelform eine Rolle; am meisten Streuung pro Masseinheit verursachen die plättchenförmigen Glimmerpartikel (Abb. 5b). Wenn die Partikeldurchmesser und -formen variieren, besteht also eine beträchtliche Unsicherheit bei der Umrechnung eines Trübungsmesswerts auf die SSC.

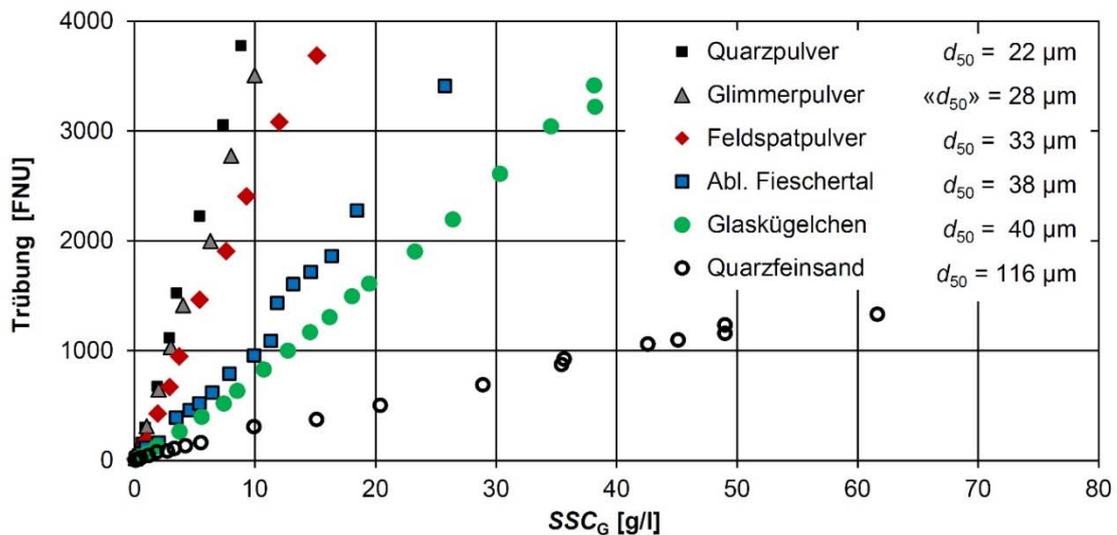


Abbildung 6: Trübungen, die mit einer Trübungssonde (© in Tabelle 1, Streulicht 90°) in Suspensionen mit verschiedenen Partikelsorten gemessen wurden, in Funktion der SSC_G , die mit der Wägemethode bestimmt wurden

Auch bei der akustischen Methode resultierten für verschiedene Partikelsorten unterschiedliche Umrechnungsbeziehungen (Abb. 7). Die akustische Methode erwies sich jedoch als weniger sensitiv auf Änderungen der Partikelgrössen, was für das Schwebstoffmonitoring von Vorteil ist.

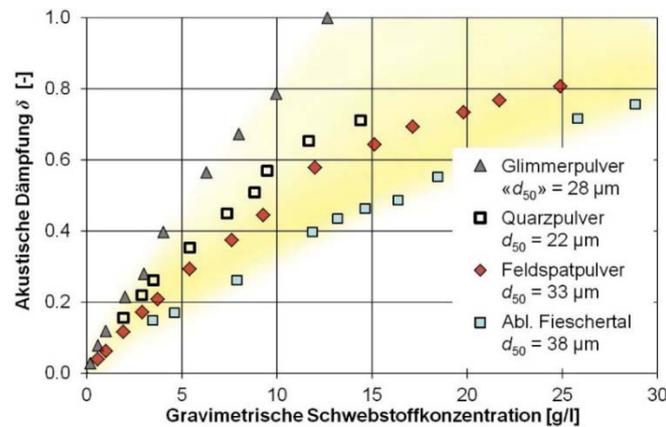


Abbildung 7: Dämpfung von Ultraschallsignalen, die in Suspensionen mit verschiedenen Partikelsorten gemessen wurden, in Funktion der SSC_G (Abgottspon *et al.* 2016a)

Im Gegensatz zu den Trübungssonden und der akustischen Methode wird bei der Konzentrationsmessung mit dem LISST die aktuelle Partikelgrößenverteilung erfasst und berücksichtigt. Die Partikelform wird aber auch vom LISST nicht erfasst. Die Laborversuche zeigten einen bisher in der Literatur nicht quantitativ beschriebenen Einfluss der Partikelform auf die SSC -Messungen mit dem LISST (Abb. 8a). Mit den in den Alpen typischerweise vorkommenden relativ kantigen oder plättchenförmigen Partikeln ist auch das LISST auf die am Einsatzort vorhandenen Partikel zu kalibrieren, um eine zufriedenstellende SSC -Messgenauigkeit zu erreichen. SSC -Messungen mit dem LISST sind nur möglich, wenn die Trübung nicht zu hoch ist. Die obere Grenze der messbaren SSC variiert mit der Partikelgrösse und wurde experimentell bestimmt (liegt zwischen den Punktepaaren in Abb. 8b). Der vom Hersteller angegebene nominelle SSC -Messbereich konnte bestätigt werden, wenn auch Messresultate bei hohen Trübungen akzeptiert wurden. Der begrenzte SSC -Messbereich stellt für die Anwendung des untersuchten LISST-Geräts eine Einschränkung dar. Würde ein anderes LISST-Modell mit automatischer Verdünnungseinrichtung verwendet, könnten höhere SSC gemessen werden.

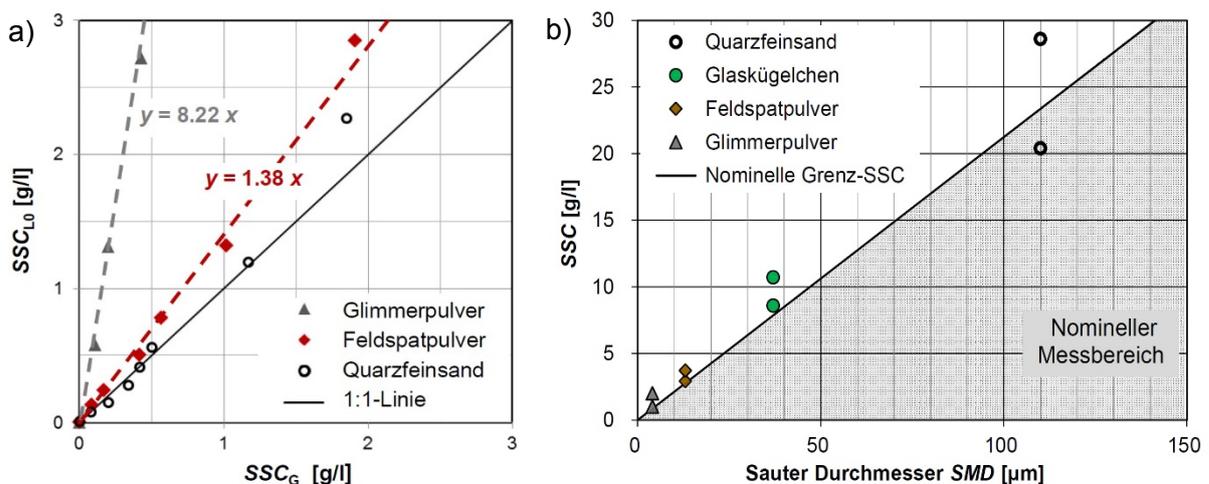


Abbildung 8: a) Schwebstoffkonzentrationen SSC_{L0} , welche aufgrund der Messresultate des Laserdiffraktometers (LISST, © in Tabelle 1) und den Partikeldichten berechnet wurden, im Vergleich zu SSC_G (modifiziert von Felix *et al.* 2013a,c); b) Messbereich des LISST (grau) in Funktion des sogenannten Sauter-Durchmessers (modifiziert von Felix *et al.* 2013c)



Die Untersuchungen der Schwebstoffmessgeräte im Labor erlaubten, deren Messbereiche und Sensitivitäten gegenüber verschiedenen Partikelsorten unter kontrollierten Bedingungen systematisch zu bestimmen.

5.1.3. Schwebstoffmessungen an der Prototypanlage

Im Anschluss an die Laborversuche wurden die Messinstrumente im Sommer 2012 für das Schwebstoffmonitoring im KW Fieschertal installiert (Abb. 9). Die meisten Instrumente (Abb. 10) befinden sich in der Schieberkammer an einer Probenahmeleitung, welche die Instrumente mit Wasser aus der Druckleitung speist (Abgottspon 2011). Im Juni 2013 wurde zusätzlich das CFDM installiert.

Als Referenz für die SSC-Bestimmung wurden Wasserproben mit einem automatischen Probennehmer in Flaschen gepumpt. Für dessen Steuerung wurde ein Programm entwickelt, das ein Signal einer Trübungssonde oder eines CFDM als Trigger verarbeitet. Die Probennehmer wurden so programmiert, dass Proben (i) nach fixen Zeitintervallen (alle 3 bis 5 Tage) und (ii) in Phasen mit erhöhtem Schwebstoffaufkommen häufiger entnommen werden. Der Vorteil der programmierbaren Wasserprobennehmer liegt darin, dass bei massgebenden, auch kurzzeitigen Ereignissen mit erhöhtem Schwebstoffaufkommen auch ausserhalb der üblichen Arbeitszeiten und an Orten ohne Personalpräsenz Wasserproben gewonnen werden können. Von den Flaschenproben des schwebstoffhaltigen Wassers wurde anschliessend im Labor durch Wägung des ofengetrockneten Rückstands die SSC bestimmt.

Für die Datenerfassung wurde an drei Standorten (Zentrale, Schieberkammer und bei der Wasserfassung) je ein Messrechner installiert. Mit den installierten Geräten werden seit Mitte 2012 kontinuierlich Daten zum Schwebstoffaufkommen im Triebwasser des KW Fieschertal erhoben.

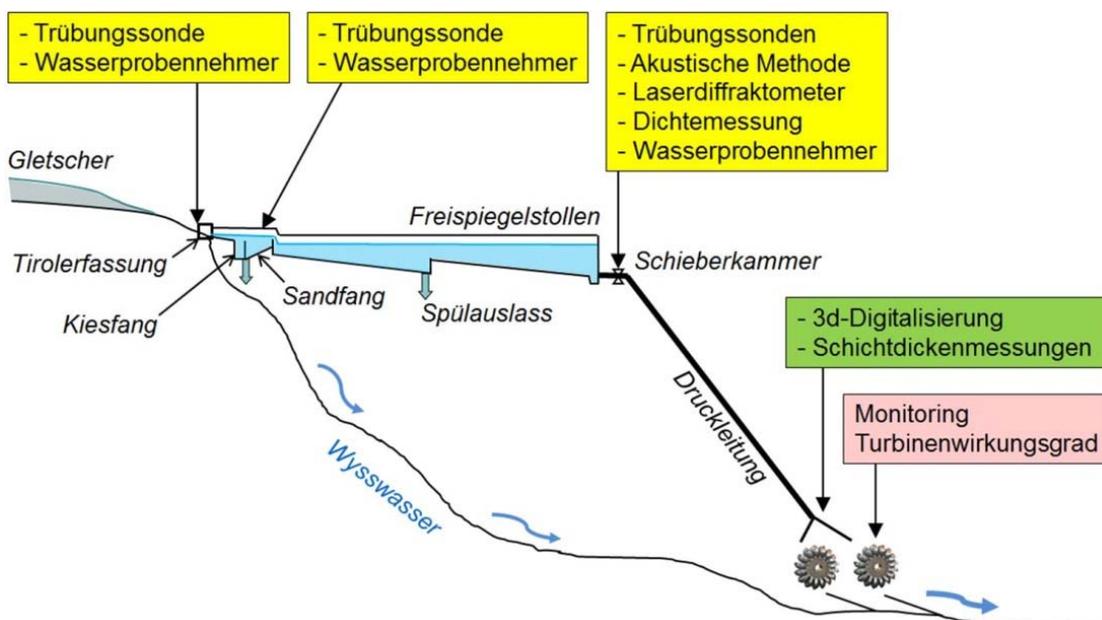


Abbildung 9: Schematisches Längenprofil der Kraftwerksanlage Fieschertal mit Untersuchungsprogramm (Abgottspon *et al.* 2016a)

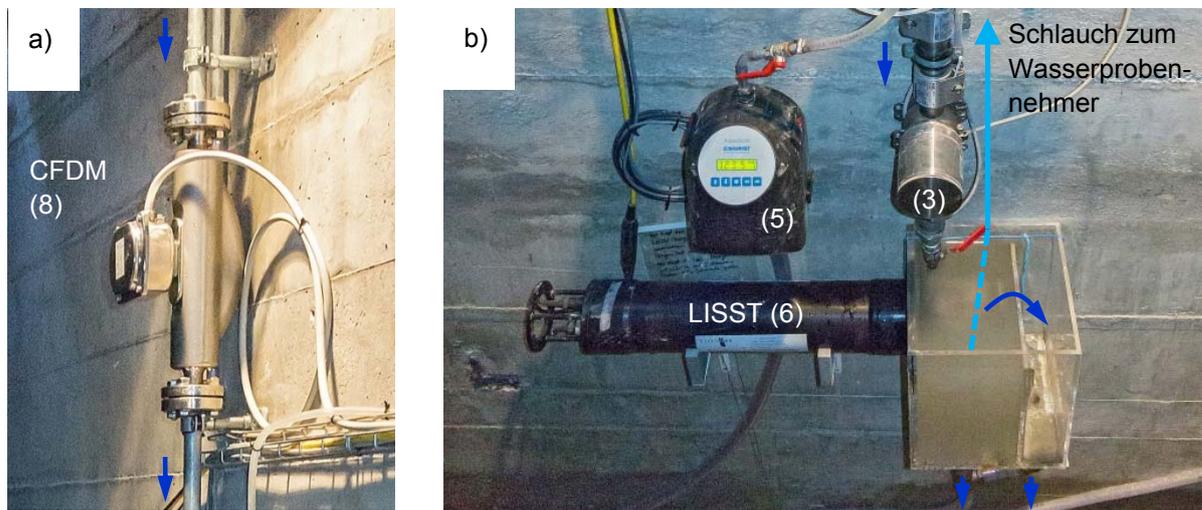


Abbildung 10: a) Coriolis-Massestrom und Dichtemessgerät (CFDM) am fallenden Strang der Probenahmeleitung, b) Laserdiffraktometer (LISST) mit Messkopf im Behälter am Ende der Leitung, sowie zwei *in-line* Trübungsmessgeräte; die Nummern der Instrumente beziehen sich auf die Tabelle 1

Die Signale der Schwebstoffmessgeräte sowie andere Grössen zur Beschreibung des aktuellen Anlagenzustands (Durchflüsse, Pegel, Drücke, Düsenstellungen, elektrische Leistungen etc.) aus dem Kraftwerksleitsystem wurden und werden im Minutentakt aufgezeichnet. Die Messeinrichtungen wurden soweit möglich regelmässig kontrolliert und gereinigt, um Verfälschungen durch Sedimentablagerungen zu minimieren.

Abbildung 11 zeigt ein Beispiel der Schwebstoffdynamik und des Verhaltens der Schwebstoffmessinstrumente an drei Tagen im August 2012. Im unteren Teil der Abbildung sind die Ganglinien der Schwebstoffkonzentrationen dargestellt, welche mit verschiedenen Messgeräten basierend auf den Referenz-SSC der Schöpfproben (schwarze Kreissymbole) ermittelt wurden. Die grüne Kurve mit Skala am rechten Rand des Diagramms zeigt den Median-Durchmesser der transportierten Partikel im Lauf der Zeit. Gemäss den Messungen werden zeitweise, in Phasen mit erhöhter Schwebstoffkonzentration, auch gröbere Partikel transportiert (Abb. 11 und 12). In diesen Phasen unterschätzten die Trübungssonden und die akustische Methode (rote, blaue und graue Linien) die SSC, weil deren Umrechnungsbeziehungen auf den normalerweise vorhandenen, relativ feinen Partikeln beruhen und diese Messtechniken – wie in den Laborversuchen aufgezeigt – sensitiv auf Partikelgrössenveränderungen sind.

Das Laserdiffraktometer erlaubt im Gegensatz zu den andern Messmethoden auch die Messung der Partikelgrössenverteilung (Abb. 12) und ermöglicht – wie erwartet – eine genauere Messung der SSC, wenn die Partikelgrösse zeitlich variiert und nicht mit der Schwebstoffkonzentration korreliert (Felix *et al.* 2013b). Die SSC des LISST wurden unter Berücksichtigung der Referenz-SSC der Schöpfproben ermittelt, um den in den Laborversuchen festgestellten Einfluss der Partikelform zu kompensieren (Felix *et al.* 2014b).

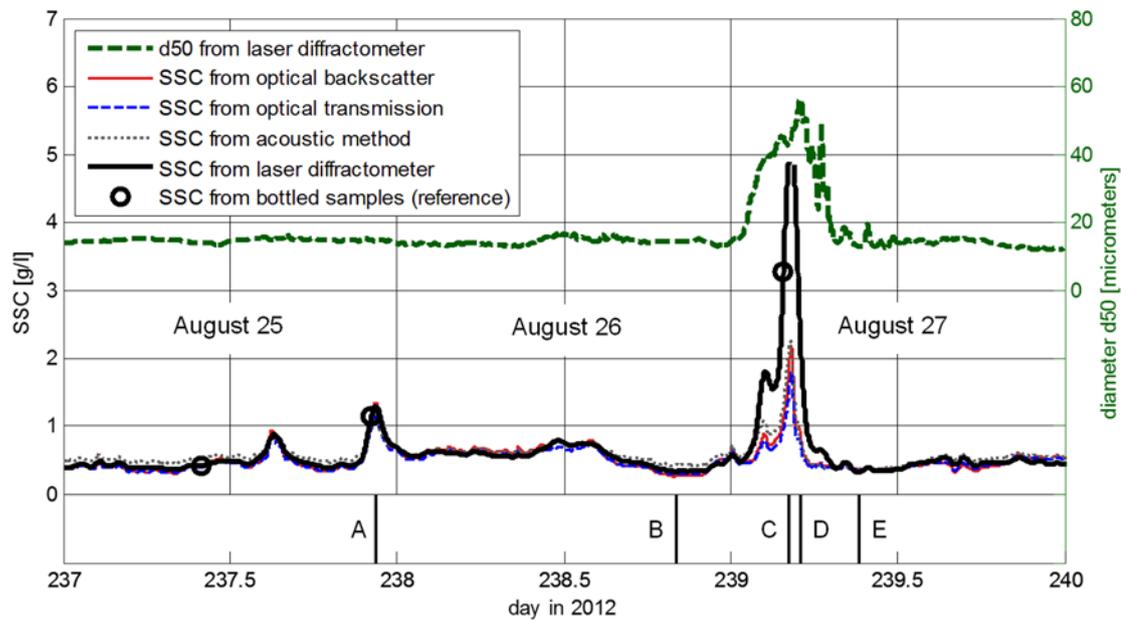


Abbildung 11: Ganglinien der Schwebstoffkonzentration (linke Achse), die mit verschiedenen Messtechniken ermittelt wurden, im Vergleich zu Schöpfproben (Kreissymbole) und Ganglinie der Partikelgrösse (rechte Achse) gemessen im Triebwasser des KW Fieschertal (Abgottspon *et al.* 2013a)

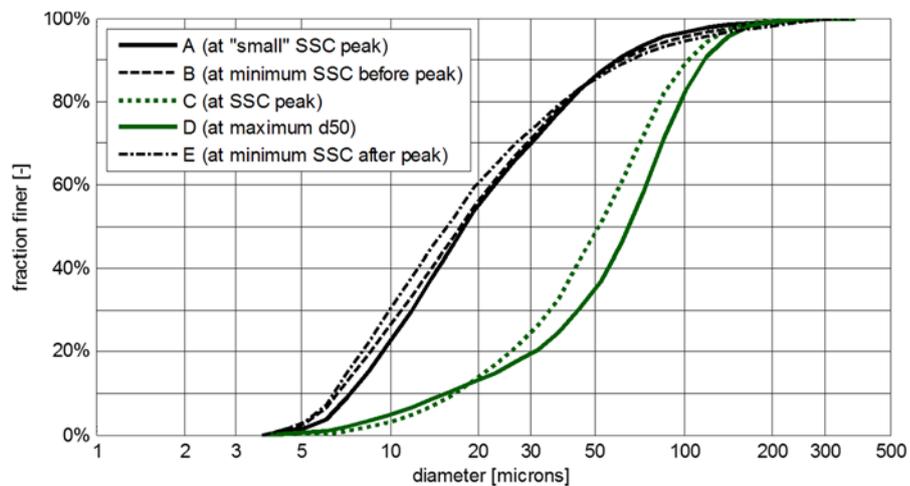


Abbildung 12: Ausgewählte Korngrössenverteilungen, die mit dem Laserdiffraktometer im Feld gemessen wurden, zu Zeitpunkten (A-E) gemäss Abbildung 11 (Abgottspon *et al.* 2013a)

Abbildung 13 zeigt ein weiteres Beispiel von Ganglinien der Schwebstoffkonzentration von verschiedenen Messtechniken und der Partikeldurchmesser (d_{10} , d_{50} und d_{90} , d.h. 10, 50 und 90% der Masse sind größer) während eineinhalb Tagen. Zusätzlich zum Beispiel in Abbildung 11 sind nun auch SSC-Ganglinien dargestellt, die auf der Dichtemessung des CFDM (schwarze Linie) und der Druckmessungen (rote Linie) basieren.

Die SSC des CFDM stimmen gut mit jenen der Referenzproben und des LISST überein. Über 2 g/l war es möglich, die SSC aus Druckmessungen zu ermitteln. Die SSC aus Druckmessungen sind ähnlich wie jene des CFDM und einer Flaschenprobe. Die Abweichungen zwischen der SSC aus Druckmessungen und den andern Messtechniken während abnehmender SSC werden vor allem mit den unterschiedlichen Messvolumen erklärt: Während sich die SSC aus Druckmessungen auf die suspendierten Sedimente in der ganzen Druckleitung (3500 m³) bezieht, wurden die SSC mit dem CFDM und dem LISST an der Probenahmeleitung gemessen. Aufgrund der vorübergehend gröberer Partikel unterschätzten die Trübungssonden und die akustische Methode die SSC während des Schwebstofftransportereignisses deutlich (wie in Abb. 11).

Wie bereits in den Laborversuchen festgestellt, weist das LISST einen begrenzten SSC-Messbereich auf. Mit dem verwendeten LISST-Modell ohne Verdünnungseinrichtung und den üblicherweise vorkommenden relativ feinen Partikeln können SSC bis wenige g/l gemessen werden. Dank der Schwebstoffmessungen mit der Dichte-Methode (CFDM) stehen aber seit 2013 auch in Phasen mit erhöhtem Schwebstoffaufkommen SSC-Messwerte zur Verfügung. Weitere Resultate zum Schwebstoffmonitoring sind in Albayrak *et al.* (2015) und Felix *et al.* (2015) beschrieben.

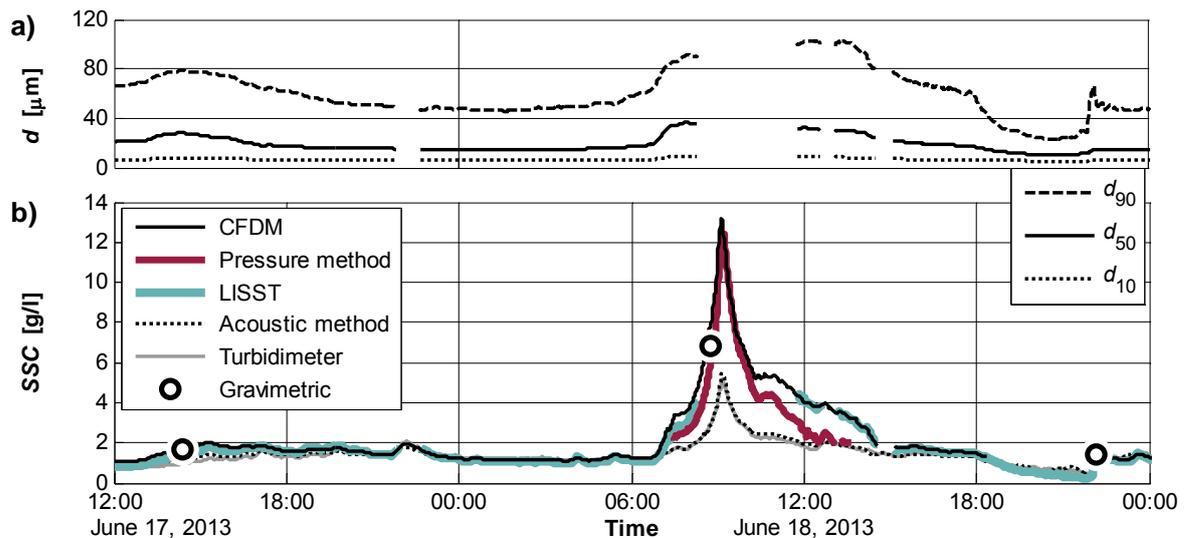


Abbildung 13: Ganglinien von a) ausgewählten Partikelgrössen (gemessen mit Laserdiffraktometer) und b) der Schwebstoffkonzentration gemessen mit verschiedenen Techniken im Triebwasser des KW Fieschertal (Felix *et al.* 2016b)

Aus den Schwebstoffkonzentrationsganglinien der verschiedenen Instrumente wurde eine *best-estimate*-SSC-Ganglinie zusammengestellt (Abb. 14). Bei Konzentrationen über 1 g/l wurde dem Messwert des CFDM der Vorzug gegeben. Bei kleineren Konzentrationen wurden Messwerte des Laserdiffraktometers verwendet, und falls keine solchen vorhanden waren, wurden Messwerte von Trübungssonden und der akustischen Methode miteinbezogen.

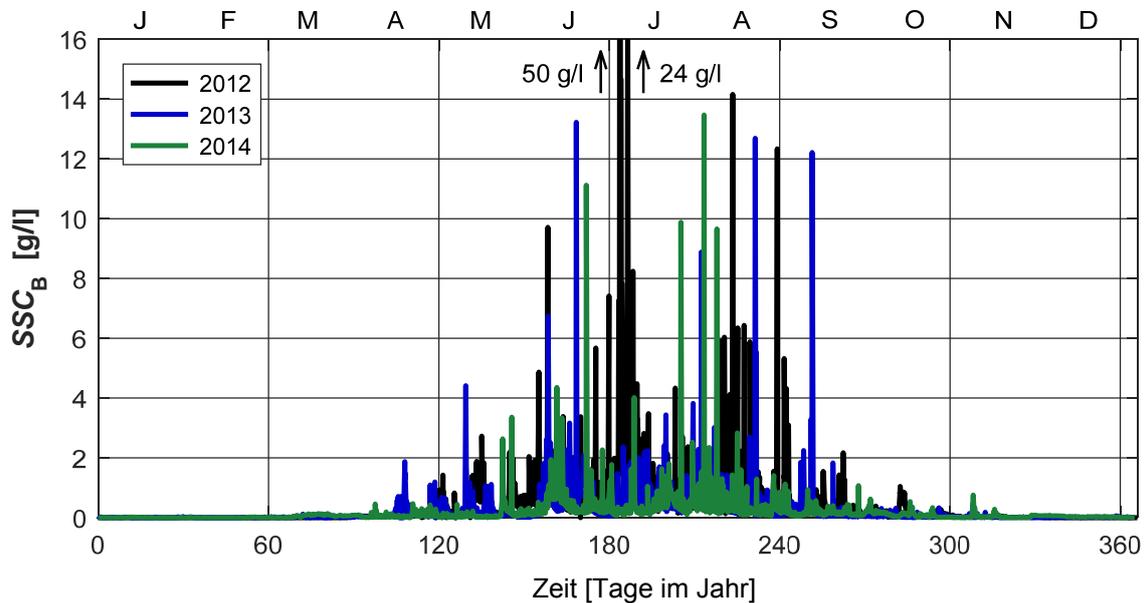


Abbildung 14: SSC-Ganglinien im Triebwasser des KW Fieschertal (modifiziert nach Felix *et al.* 2016c)

Seit Beginn der Schwebstoffmessungen am Kraftwerk Fieschertal Ende Juni 2012 bis zur Erstellung des vorliegenden Berichts trat das mit Abstand bedeutendste Sedimenttransportereignis während des **Hochwassers vom 2./3. Juli 2012** als Folge eines ergiebigen Starkregens auf. In der Region wurde den Abflüssen, welche durch den Starkregen verursacht wurden, eine Wiederkehrperiode von ca. 20 Jahren zugeordnet. Dabei wurden im Triebwasser SSC bis ca. 50 g/l gemessen (Abb. 15). Die Phase mit stark erhöhtem Schwebstofftransport dauerte weniger als einen Tag. Abbildung 16 zeigt Wasserproben mit entsprechenden Trübungen vor, während und nach dem Hochwasserereignis. Bei diesem Hochwasserereignis wurde das Laufrad einer Turbine lokal stark erodiert und musste im Sommer ausgetauscht werden, was zu einem Betriebsunterbruch von 17 h und zu einem Erzeugungsausfall von gut 0.5 GWh führte. Mit 0.05 CHF/kWh entspricht diese einer Ertragseinbusse von ca. CHF 30'000.

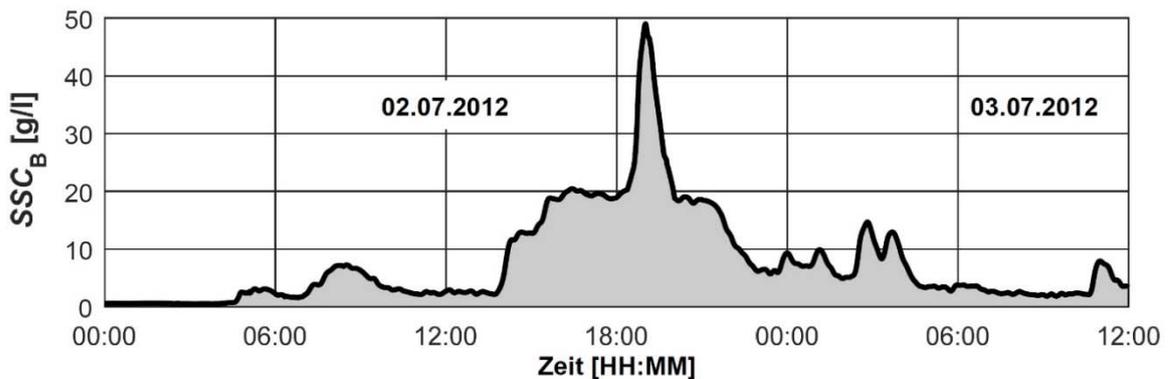


Abbildung 15: Detail der SSC-Ganglinie während des Hochwassers vom 2./3. Juli 2012 mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von 20 Jahren (modifiziert nach Felix *et al.* 2016c)

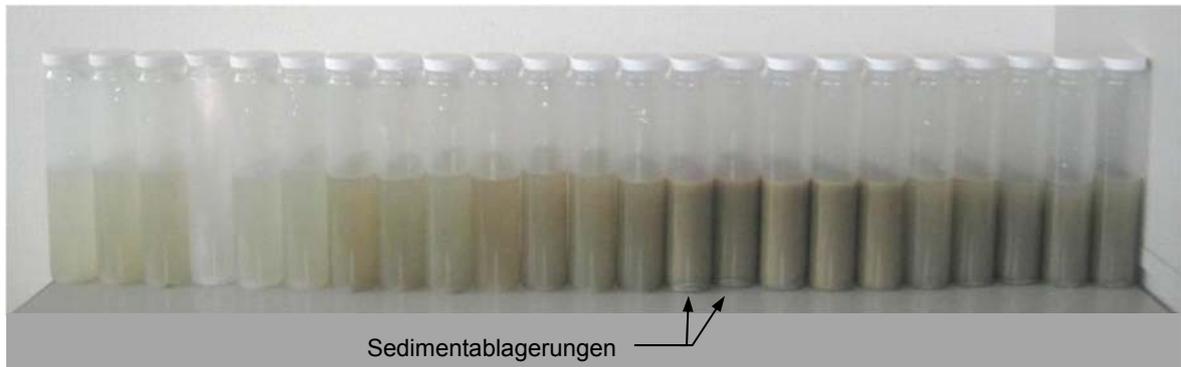


Abbildung 16: Wasserproben des turbinieren Wassers des KW Fieschertal vor, während und nach dem Hochwasserereignis vom 2./3. Juli 2012

Durch die Schwebstoffmessungen wurde zudem aufgezeigt, dass nicht nur Niederschlagsereignisse, sondern auch die Bewirtschaftung des Speicherstollens zu zeitweise stark erhöhter SSC führen können. Im Freisiegelstollen des KW Fieschertal, der ausserhalb der Volllastzeit als Tagesspeicher betrieben wird, nehmen bei einer Absenkung des Stollenpegels die Fliessgeschwindigkeit, die Sohl-schubspannung und die Sedimenttransportkapazität zu. So werden bei tiefen Stollenpegeln mehr und gröbere Partikel transportiert als bei hohen Pegeln (Abb. 17). Im Speicherstollen tritt also durch Ab-setz- und Resuspensionsvorgänge zeitweise eine Sortierung und Konzentrierung der Partikel auf. Diese Effekte führen dazu, dass die Turbinen zeitweise deutlich stärker mit Sedimenten belastet werden als im normalen Betrieb.

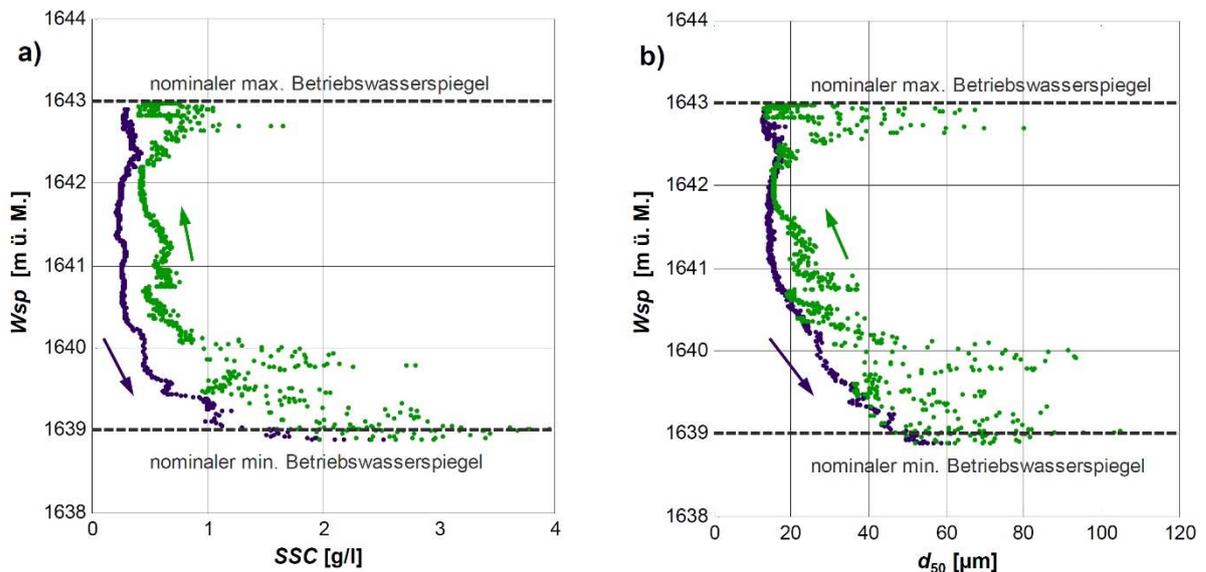


Abbildung 17: a) Schwebstoffkonzentration SSC und b) Median-Partikeldurchmesser d_{50} im Triebwasser des Kraftwerks Fieschertal in Abhängigkeit des Stollenpegels H, Beispiel des 10.08.2012; violette Punkte mit sinkendem Stollenpegel, grüne mit steigendem Stollenpegel (Felix *et al.* 2014a)



5.1.4. Schwebstofffrachten und *Particle Loads* an der Prototypanlage

Nachdem eine durchgehende Konzentrationsganglinie vorlag, wurde zusammen mit dem Durchfluss Q , der in der Druckleitung gemessen wurde, die Schwebstofftransportrate berechnet und über die Zeit integriert. In Abbildung 18 sind die Schwebstofffrachten (*Suspended sediment loads SSL*) in der Druckleitung seit Beginn jedes Jahres im Lauf der Zeit dargestellt.

Während des Hochwassers vom 2./3. Juli 2012 und der folgenden Tage war der Schwebstofftransport stark erhöht (gelbe Markierung). Auch in den Monaten nach dem Hochwasser 2012 wurden mehr Schwebstoffe turbinert als in den entsprechenden Monaten in den Jahren 2013 und 2014. Die jährlichen Schwebstofffrachten variierten stark: im Jahr 2012 mit dem bedeutenden Hochwasserereignis wurden etwa doppelt so viel Schwebstoffe turbinert als in einem Jahr ohne grösseres Hochwasser (2013 und 2014). Während des Hochwassers wurden innerhalb 39 h ca. 17'000 t Schwebstoffe turbinert, was 16% der Jahresfracht von 2012 entspricht. In einem Jahr ohne grösseres Hochwasser (2013 und 2014) würden die 17'000 t sogar 33% der Jahresfracht entsprechen.

Nebst starkem Schwebstofftransport infolge Hochwasser trat jeweils im Frühsommer eine Phase erhöhten Schwebstofftransports auf (steilere Abschnitte der Kurven in Abb. 18). Dies wird folgendem Vorgang im Einzugsgebiet zugeschrieben: Auch im Winterhalbjahr wird unter dem Gletscher Fels erodiert. Bei der Schneeschmelze und dem Beginn der Gletscherschmelze im Frühsommer werden vermutlich die entstandenen Feinsedimentpartikel vermehrt abtransportiert und gelangen ins Triebwasser.

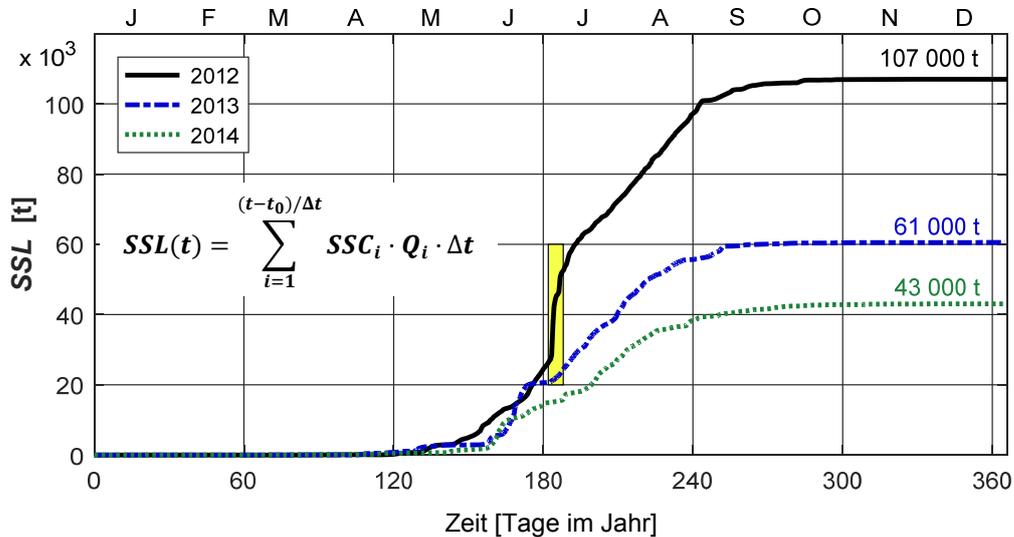


Abbildung 18: Schwebstofffrachten im Lauf der Jahre 2012-2014 in der Druckleitung des KW Fieschertal (modifiziert nach Felix *et al.* 2016c)

Anhand der Produktionsdaten wurde die Schwebstoffbelastung der einzelnen Turbinen in Funktion der Betriebsstunden berechnet (Abb. 19). Wie in Abbildung 18 sind hohe Schwebstoffaufkommen (i) während und nach dem Hochwasser vom 2./3. Juli 2012 sowie (ii) zu Beginn der Schwebstoffsaizens zu erkennen.

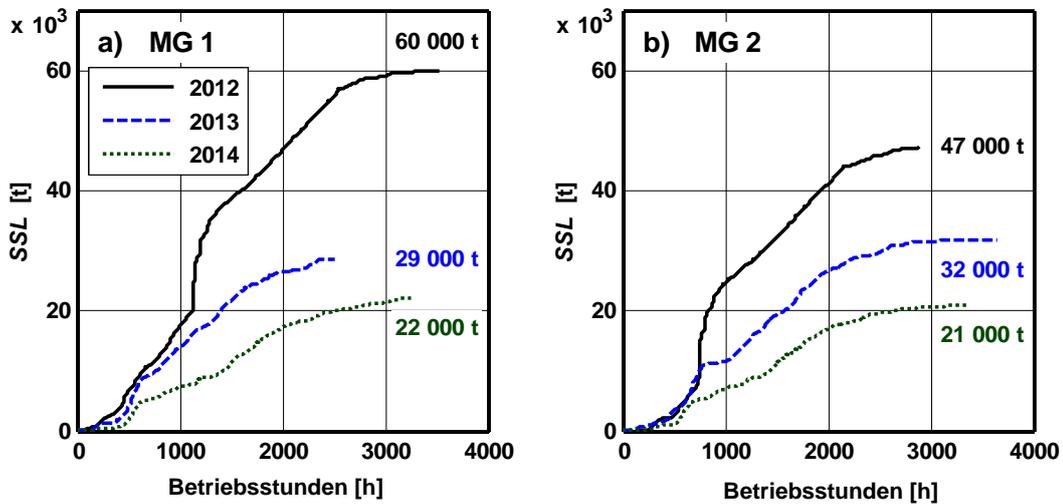


Abbildung 19: Schwebstofffrachten im Triebwasser der einzelnen Maschinengruppen (MG) des KW Fieschertal in Funktion der Betriebsstunden (Felix *et al.* 2016c)

Weiter wurden die so genannten *Particle Loads* pro Turbine gemäss IEC 62364 (2013) berechnet:

$$PL(t) = k_{\text{shape}} \cdot k_{\text{hardness}} \cdot \sum_{i=1}^{(t-t_0)/\Delta t} SSC_i \cdot k_{\text{size},i} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Die Koeffizienten k_{size} , k_{shape} und k_{hardness} berücksichtigen den Einfluss der Partikelgrösse, -form und -härte auf die Abrasionstiefe (IEC 62364 2013). Der Koeffizient k_{size} wurde in jedem Zeitschritt aufgrund der vorhandenen Partikelgrössen berechnet und betrug gemittelt über die Betriebsstunden 0.033. Die beiden letzteren Faktoren wurden als konstant angenommen: $k_{\text{shape}} = 2$ und $k_{\text{hardness}} = 0.75$. Die *Particle Load* ist ein Mass für die Schwebstoffbelastung bzw. das relative Abrasionspotential von Turbinen, welches im Gegensatz zur Schwebstofffracht nicht von der Grösse oder dem Durchfluss einer Turbine abhängt. Im Fall des KW Fieschertal haben die Schwebstofffracht und die *Particle Load* einer Turbine einen ähnlichen Verlauf, da die Maschinen während der Schwebstoffsaison oft mit Vollast betrieben werden (Felix *et al.* 2016c).

Ausgehend von der *Particle Load* einer Turbine und der Anzahl Becher pro Laufrad wurde die *Particle Load* pro Becher (PL_b) berechnet.

5.2. Monitoring der Turbinenabnutzung

Um den Verschleiss an Bechern der Pelton-turbinen an der untersuchten Anlage zu quantifizieren, wurden die Bechergeometrie und die Dicken der Beschichtung in ausgewählten Bechern vor und nach der Schwebstoffsaison gemessen. Durch Vergleich von Messungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt wurden, wurden die Geometrieänderung und der Materialverlust bestimmt.

Die räumliche Geometrie von zwei Bechern pro Laufrad wurde mehrmals mit einem optischen Digitalisiersystem erfasst (Hochschule Luzern). Dafür wurden mit einer Spezialkamera mit Streifenlicht-Projektion direkt im Turbinengehäuse zahlreiche Aufnahmen gemacht (Abb. 20a), die jeweils zu



einem digitalen 3D-Geometriemodell zusammengefügt wurden. Im Geometriemodell konnten verschiedene Schnitte erzeugt und Volumendifferenzen bestimmt werden. Abbildung 20b zeigt ein Beispiel eines Längenprofils durch die Mittelschneide eines Bechers, die zu zwei verschiedenen Zeitpunkten vermessen wurde. So konnte die Reduktion der Mittelschneidenhöhe detailliert quantifiziert werden. Weitere Resultate der Abrasionsmessungen an Mittelschneiden und Bechereintrittskanten sind in Abgottspon *et al.* (2013b, 2016b) publiziert.

Die lokale Dicke der Beschichtung in den Laufradbechern wurde mit einem magnetisch-induktiven Verfahren gemessen. Zum Lokalisieren der Messpunkte wurde eine Schablone erstellt und angewendet (Abb. 21a). Durch den Vergleich der gemessenen Schichtdickenverteilungen (Abb. 21b) zu verschiedenen Zeitpunkten wurde die Abnahme der Schichtdicke im Lauf der Zeit räumlich verteilt quantifiziert.

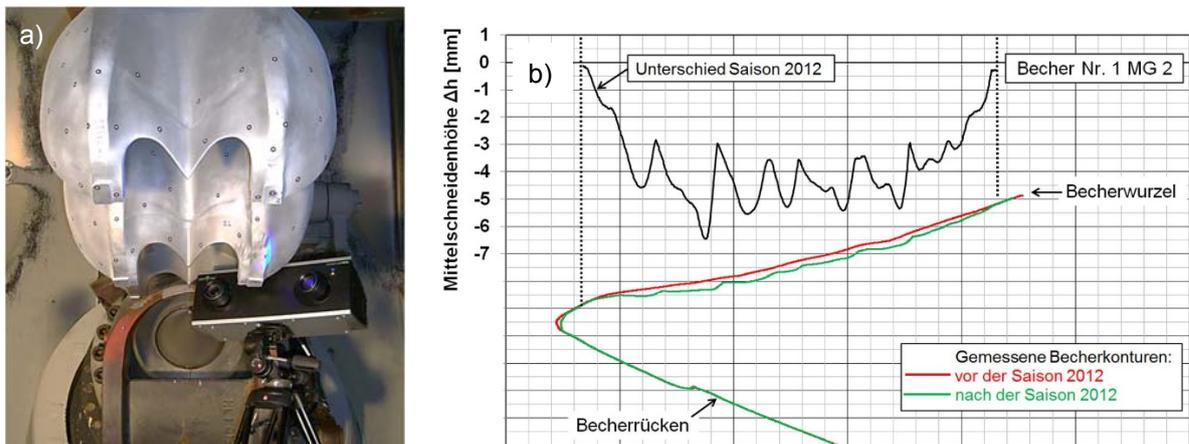


Abbildung 20: a) Digitalisieren von Peltonbechern im Turbinengehäuse, b) Längenprofil einer Mittelschneide vor (rot) und nach (grün) der Schwebstoffseason 2012 sowie Differenz (schwarz) (Abgottspon *et al.* 2016a)

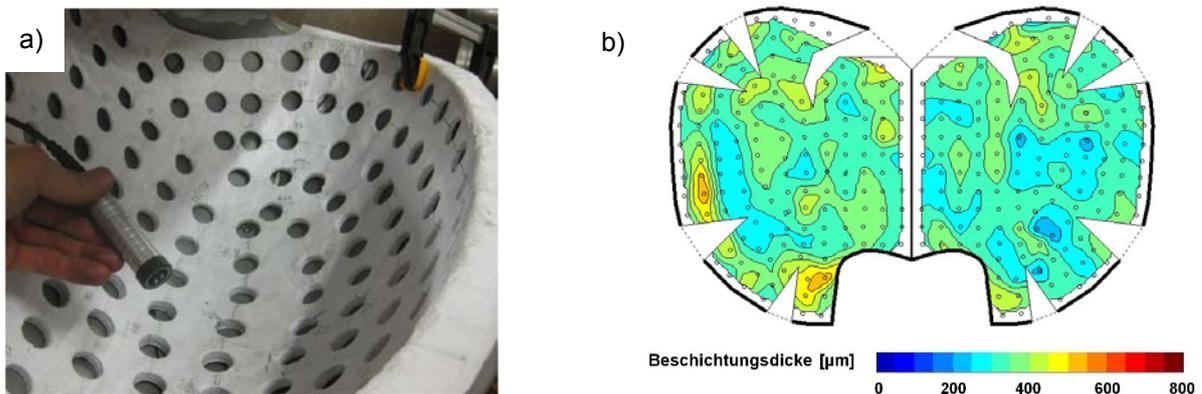


Abbildung 21: a) Schichtdickenmessung in einem Peltonbecher mit Schablone, b) gemessene Schichtdickenverteilung in einem Peltonbecher (Abgottspon *et al.* 2016a)

Die Abrasion an den Turbinen des Wasserkraftwerks Fieschertal zwischen Herbst 2013 und Dezember 2014 wurde im Rahmen des Projekts „Monitoring der Abnutzung an Bechern von Pelton-turbinen mittels 3d-Digitalisierungen und Schichtdickenmessungen“ (SI/500960-01) untersucht, welches ebenfalls durch das BFE gefördert wurde. Die Grundlagen, Methoden und Resultate dieses Projekts sind im entsprechenden Schlussbericht detaillierter beschrieben. Der Bericht enthält auch Angaben zur Messunsicherheit der Messmethoden.

5.3. Wirkungsgradmonitoring

Mittels so genannter *Sliding-Needle*-Messungen (Abgottspon *et al.* 2013a) wurden die Indexwirkungsgrade der beiden Maschinengruppen im Kraftwerk Fieschertal zu gewissen Zeitpunkten bestimmt (Hochschule Luzern unter Mitwirkung von GWK und BKW). Bei einer *Sliding-Needle*-Messung wird der Volumenstrom (Durchfluss) und somit die Leistung einer Turbine innerhalb ca. 1 h von Teil- auf Volllast und wieder zurück reguliert (Abb. 22). Dabei werden die für die Bestimmung des Indexwirkungsgrades erforderlichen Grössen wie Durchfluss, Nettofallhöhe und elektrische Leistung, die im Kraftwerksleitsystem verfügbar sind, aufgezeichnet (Abgottspon & Staubli 2008).

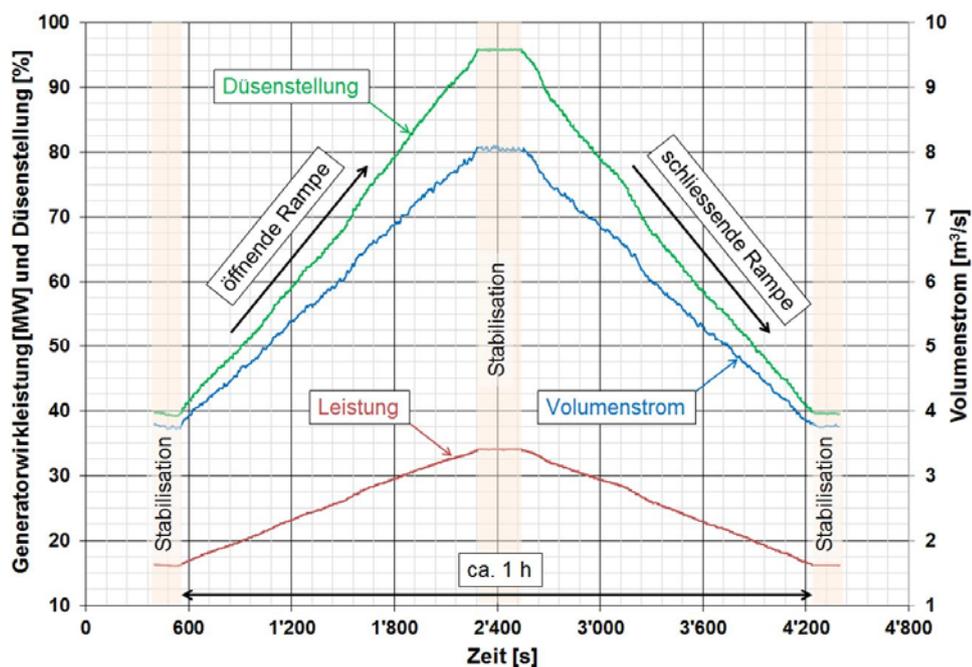


Abbildung 22: Ganglinien der elektrischen Wirkleistung und der Düsenstellungen (linke Achse) sowie des Volumenstroms (blau, rechte Achse) während einer *Sliding-Needle*-Indexwirkungsgradmessung (Abgottspon *et al.* 2016a)



Bei der Auswertung der *Sliding-Needle*-Indexwirkungsgradmessungen wurden folgende Aspekte, die insbesondere bei Wasserkraftwerken mit starkem Hydroabrasiv-Verschleiss von Bedeutung sind, untersucht und berücksichtigt:

- *Durchfluss (Volumenstrom)*: Für die Bestimmung von Indexwirkungsgraden ist es wichtig, den turbinierten Volumenstrom möglichst reproduzierbar zu messen. Am Kraftwerk Fieschertal stehen dafür zwei akustische Volumenstrommessungen (ADM) zur Verfügung: eine am oberen und eine am unteren Ende der Druckleitung. Die Messungen in beiden Messquerschnitten wurden miteinander und mit anderen Signalen aus dem Kraftwerkleitsystem verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die ADM am oberen Ende der Druckleitung weniger gut reproduzierbare Werte liefert als diejenige am unteren Ende. Ein möglicher Grund dafür sind Strömungsmuster, die nahe des Einlaufs weniger homogen sein könnten als am unteren Ende der Druckleitung. Für die Berechnung der Indexwirkungsgrade wurde der Volumenstrommessung am unteren Ende der Druckleitung der Vorzug gegeben. Die Volumenstrommessung in der Druckleitung kann für *Sliding-Needle*-Messungen ausschliesslich im Einmaschinen-Betrieb verwendet werden.

Weiter kann der Volumenstrom aus gemessenen Düsenstellungen und den Düsenkennlinien berechnet werden. Düsenkennlinien werden durch Korrelation von Düsenstellungen und gemessenem Durchfluss erstellt. Diese Kennlinien können durch Hydroabrasiv-Verschleiss oder Unterhaltsarbeiten an den Düsen, deren Antrieb oder deren Positionsmessung beeinflusst sein.

Eine weitere Methode für die Bestimmung des Volumenstroms, nämlich basierend auf Differenzdruckmessungen an Venturi-Messstrecken in der Turbinenzuleitung, konnte im Fall des Kraftwerks Fieschertal nicht verwendet werden, da sie nicht die erforderliche Reproduzierbarkeit aufwies. Möglicherweise wurden die Druckmessaufnehmer trotz periodischer Spülungen durch Feinsedimente beeinflusst.

- *Druck bzw. Nettofallhöhe*: Für die Bestimmung der Nettofallhöhe werden normalerweise Druckmessungen verwendet. Im Fall des KW Fieschertal wiesen die Druckmessungen nicht die erforderliche Reproduzierbarkeit auf, vermutlich infolge Beeinträchtigung durch Feinsedimente. Die Nettofallhöhe wurde aus dem Oberwasserpegel und berechneten Druckverlusten (in Funktion des Volumenstroms) bestimmt. Bei einer Hochdruckwasserkraftanlage fallen die Druckverluste gegenüber der Fallhöhe wenig ins Gewicht und eine näherungsweise Berücksichtigung der Druckverluste konnte akzeptiert werden.

Der Wirkungsgrad variiert in Funktion des aktuellen Volumenstroms von Teillast bis zum Ausbauvolumenstrom. Von jeder *Sliding-Needle*-Messung wurde ein über den Leistungsbereich gewichteter Indexwirkungsgrad berechnet. Die Historie der gewichteten Indexwirkungsgrade für jede der beiden Maschinengruppen des KW Fieschertal ist im unteren Teil der Abbildung 23 dargestellt. Bei MG 1 stehen seit dem 04.07.2012 (nach dem bedeutenden Hochwasser) Wirkungsgradmessungen zur Verfügung, bei MG 2 seit Februar 2013. Die Reproduzierbarkeit dieser Messungen wird auf 0.2% geschätzt.

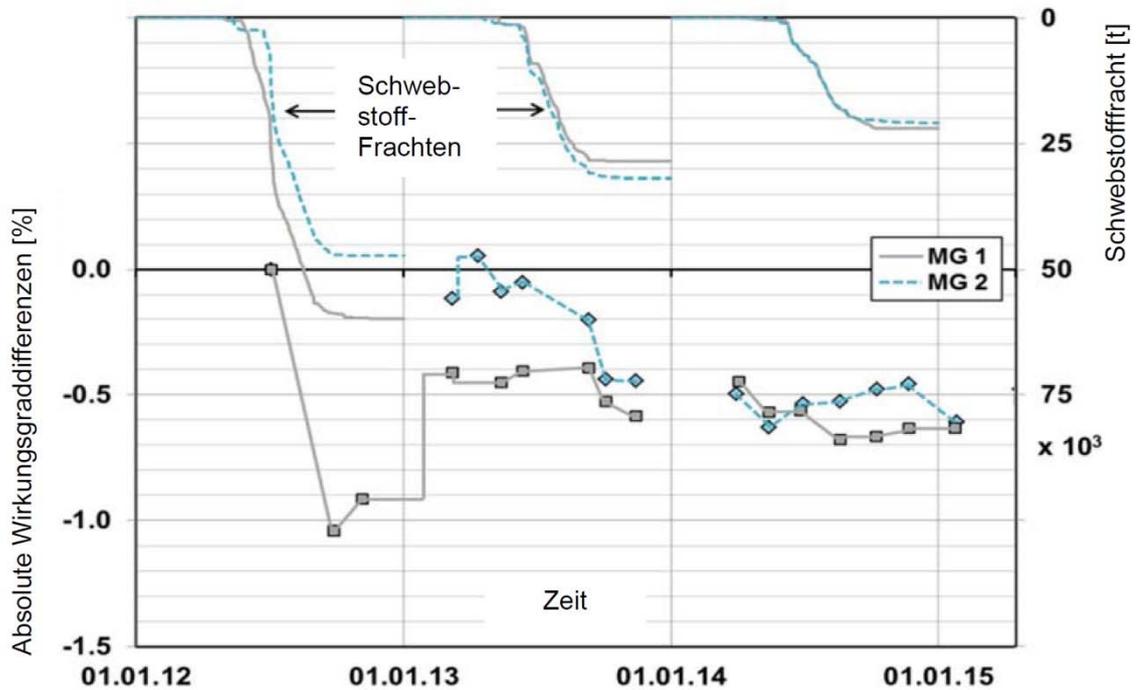


Abbildung 23: Wirkungsgradhistorien (linke Achse) und jährliche Schwebstofffrachten (rechte Achse) der beiden Turbinen des KW Fieschertal (modifiziert nach Abgottspon *et al.* 2016b)

Die grösste gemessene Wirkungsgradabnahme am KW Fieschertal in den Jahren 2012 bis 2014 war 1.0% im zweiten Semester 2012, nachdem durch das Hochwasser vom 2./3. Juli eine grössere Menge an Feinsedimenten in den Speicherstollen eingetragen wurde. Im Jahr 2014 mit der kleinsten Sedimentfracht betrug die Wirkungsgradabnahme weniger als 0.2%. Nebst Wirkungsgradabnahmen infolge Hydroabrasiv-Verschleiss wurden auch Wirkungsgraderhöhungen infolge der routinemässig im Winter durchgeführten Unterhaltsarbeiten am Laufrad festgestellt. Das Schleifen (abrunden) von stumpf und unregelmässig erodierten Mittelschneiden und Bechereintrittskanten in dem Winter nach dem bedeutenden Hochwasserereignis brachte eine Erhöhung des Wirkungsgrads um ca. 0.5%. In andern Wintern, wenn die Abrasion während der vorherigen Schwebstoffsaion geringer war, nahm der Wirkungsgrad nach dem Schleifen weniger oder gar nicht zu.

Der Vergleich der Wirkungsgradänderungen mit den jährlichen Schwebstofffrachten im oberen Teil der Abbildung 23 zeigt, dass die Wirkungsgradabnahmen nicht alleine mit der Schwebstofffracht erklärt werden können. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Abnutzungszustand eines Laufrads vor Beginn einer Schwebstoffsaion. Wenn die Mittelschneiden und Bechereintrittskanten eines Laufrads stark abgenutzt (stumpf) sind, führt eine bestimmte Schwebstoffbelastung zu grösserer Erosion als bei einem neuwertigen Laufrad.

5.4. Modellierung der Turbinenerosion

Die folgenden, durch Erosion verursachten geometrischen Veränderungen an den Bechern der Laufäder, die aufgrund der Messungen in den Jahren 2012 - 2014 an beiden MG bestimmt worden waren, wurden zusammen mit den *Particle Loads* eines Bechers ausgewertet (Abb. 24):

- Reduktion der Höhe der Mittelschneide Δh ,
- Zunahme der Breite der Mittelschneide Δs ,
- Zunahme der Tiefe der Becherausschnitte Δd .

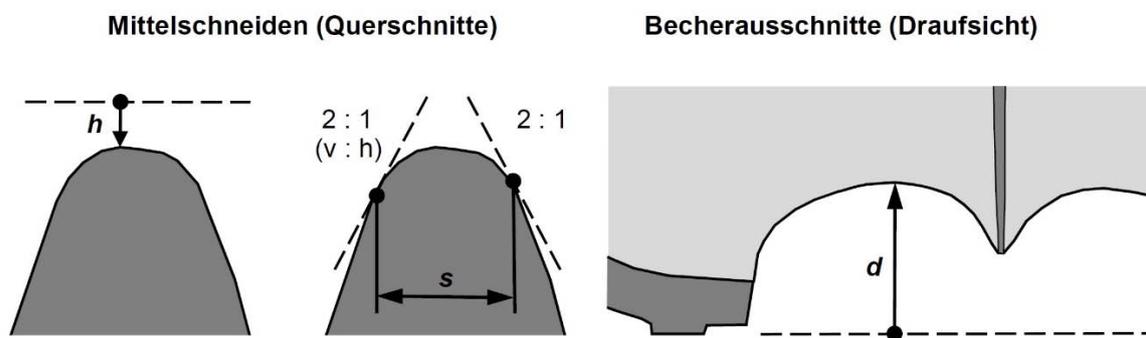


Abbildung 24: Definition von geometrischen Parametern zur Beschreibung der Abrasion an Mittelschneiden und Ausschnitten von Laufadbechern an Peltonturbinen (Felix *et al.* 2016d basierend auf Abgottspon *et al.* 2013b).

Die ersten beiden Grössen hängen voneinander ab (Querschnittsform der Mittelschneide). In Abbildung 25 sind Δs und Δd in Funktion der *Particle Loads* pro Becher für jede Schwebstoffsaaison dargestellt. Es zeigte sich, dass Δd fast dreimal so gross ist wie Δs , und dass beide Grössen in ähnlicher Art von der *Particle Load* abhängen. Die Erosion der hart beschichteten Laufradbecher im Millimeterbereich, d.h. die Erosion des Grundmaterials, setzte erst nach ca. 20'000 t ein. Ein solcher Schwellenwert war in bisher verfügbaren Formeln für die Berechnung der Turbinenabrasion nicht enthalten, da sich diese auf unbeschichtete Bauteile bezogen und davon ausgingen, dass die Abrasionstiefe proportional zur Sedimentfracht bzw. zur *Particle Load* sei. Im Jahr 2014, d.h. im Jahr mit der geringsten Schwebstofffracht der drei untersuchten Jahre, kam es zu keiner nennenswerten Abrasion des Grundmaterials an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten. Da die *Particle Loads* im Jahr 2014 für beide MG sehr ähnlich waren, liegen die beiden Punkte in Abbildung 25 aufeinander. Die in dieser Abbildung dargestellten Beziehungen können verwendet werden, um die Verbreiterung der Mittelschneiden und die Vertiefung der Becherausschnitte in Funktion der *Particle Load* pro Becher abzuschätzen.

Auch im Jahr 2014 wurde die Beschichtung auf den Mittelschneiden und an den Bechereintrittskanten teilweise erodiert. Solche Schäden wurden jeden Winter vor Ort repariert (Nachbeschichtung).

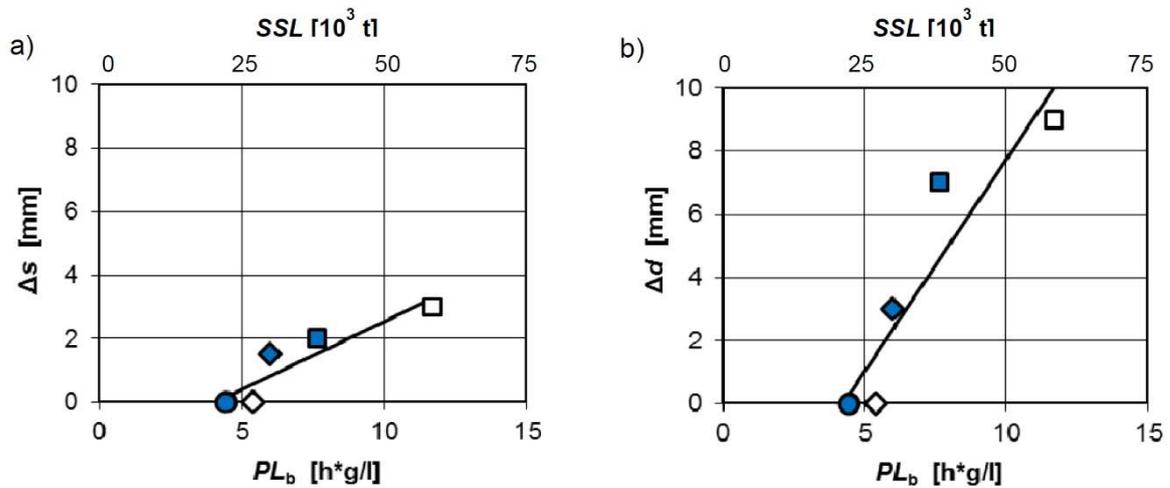


Abbildung 25: Zunahme der a) Breite der Mittelschneide Δs und b) Tiefe der Becherausschnitte Δd der Laufradbecher der MG 1 (leere Symbole) und der MG 2 (blau gefüllte Symbole) des KW Fieschertal in den Schwebstoffsaisons 2012 (\square), 2013 (\diamond) und 2014 (\circ) in Funktion der *Particle Load* eines Bechers PL_b gemäss IEC 62364 (2013) und der ungefähren Schwebstofffrachten (SSL) (modifiziert nach Felix *et al.* 2016d)

5.5. Betriebsoptimierungen

Eine Möglichkeit zur Optimierung des Kraftwerksbetriebs besteht in der vorübergehenden Ausserbetriebnahme von Kraftwerken in Phasen mit grossem Sedimentaufkommen im Triebwasser, wenn die Kosten infolge der Verschleisschäden, die in dieser Zeit entstehen würden, grösser sind als der Erlös aus der Elektrizitätsproduktion (Boes *et al.* 2013). Für diese Betriebsoption sind natürlich auch übergeordnete Randbedingungen, wie Produktionsverpflichtungen und Produktionsausgleich durch andere Kraftwerke innerhalb einer Bilanzgruppe zu berücksichtigen.

Für die Umsetzung dieser Betriebsoption stellt sich die Frage, wie hoch die so genannte „Abschaltkonzentration“ gewählt werden soll. Für die rechnerische Abschätzung der Abschaltkonzentration wurde ein Vorgehen vorgeschlagen, das auf betriebswirtschaftlichen Überlegungen beruht. Im Folgenden wird dies am Beispiel des KW Fieschertal anhand der verfügbaren Daten von 2012-2014 aufgezeigt (Abgottspon *et al.* 2016a):

- Die durch Feinsedimente verursachten Reparatur- und Ersatzinvestitionskosten an beiden Maschinen wurden auf etwa 300'000 CHF pro Jahr geschätzt. Dazu kommen Ertragsausfälle wegen Erzeugungsverlusten in der Grössenordnung von 30'000 CHF pro Jahr.
- Die jährliche Schwebstofffracht wurde im langjährigen Mittel auf 50'000 t geschätzt. Mit der vereinfachenden Annahme, dass die durch Feinsedimente verursachten Kosten proportional zur Schwebstofffracht sind, ergeben sich damit spezifische Kosten pro Tonne Feinsediment von 6.6 CHF/t (0.66 Rp/kg).
- Im Normalfall mit $SSC = 0.5 \text{ g/l}$ resultieren durch Feinsedimente verursachte spezifische Kosten von 0.33 Rp/m^3 Wasser oder 0.28 Rp/kWh .



- Bei einer 20-mal höheren Konzentration sind diese spezifischen Kosten entsprechend höher und erreichen den angenommenen Erlös von 5.5 Rp/kWh.

Somit wurde die Abschaltkonzentration auf 10 g/l geschätzt. Gemäss den wenigen auffindbaren Literaturangaben liegen Abschaltkonzentrationen bei andern Wasserkraftanlagen im Bereich von 1.1 g/l (Wasserkraftanlage Dorferbach in Österreich mit Peltonturbinen, Boes 2010) bis einige g/l (z.B. 3 g/l bei einer Wasserkraftanlage in Indien, Singh *et al.* 2013). Die Abschaltkonzentration ist ein anlagenspezifischer Wert, der von vielen Faktoren abhängt (Fallhöhe, spezifische Drehzahl, Abrasivität der Partikel, Beschichtung etc.).

Beim Kraftwerk Fieschertal wurde ins Auge gefasst, dass zukünftig die Fassung ausgeleitet (geschlossen) und der Turbinierbetrieb anschliessend unterbrochen wird, wenn die SSC in der Druckleitung 10 g/l während mehr als 15 Minuten überschreitet. Da die Wiederinbetriebnahme mit einigem Aufwand verbunden ist, wird der Betrieb erst wieder aufgenommen, wenn die SSC unter 5 g/l gesunken ist und das Ende des Ereignisses absehbar wird. In Abbildung 26 ist dargestellt, wie dieses Szenario im Fall des Hochwassers vom Juli 2012 ausgesehen hätte.

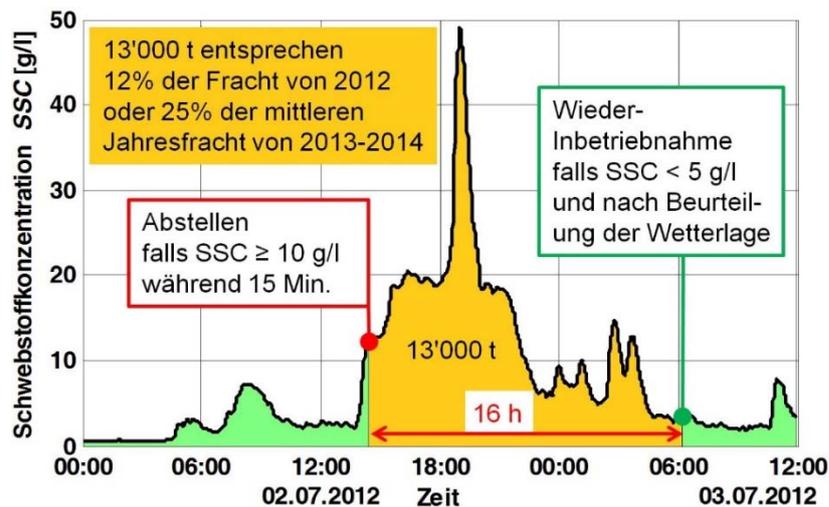


Abbildung 26: Ganglinie der Schwebstoffkonzentration im Triebwasser des KW Fieschertal Anfang Juli 2012 mit Szenario für das vorübergehende Einstellen des Turbinierens (Abgottspon *et al.* 2016a)

Während der Ausserbetriebnahme von 16 h wären 13'000 t Feinsedimente weniger über die Turbinen geleitet worden, das entspricht 12% der Jahresfracht von 2012 oder etwa 25% der Fracht in einem Jahr ohne grösseres Hochwasser. Wenn die Fassung während des Hochwasserereignisses ausgeleitet worden wäre, wären zudem deutlich weniger Feinsedimente in das System eingetragen worden. Dadurch wäre auch die Schwebstoffbelastung in den Wochen nach dem Hochwasserereignis geringer ausgefallen, da die während des Hochwassers im Speicherstollen abgelagerten Feinsedimente anschliessend infolge Resuspension turbinieren wurden (Abgottspon *et al.* 2016a).

Die Ertragseinbussen infolge des vorübergehenden Einstellens des Kraftwerksbetriebes während des Hochwassers vom Juli 2012 und die dadurch vermiedenen Kosten wurden vereinfacht abgeschätzt (Tabelle 2). In Summe wäre eine Abstellung bei diesem Ereignis deutlich wirtschaftlich gewesen. Die Daten für eine solche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung standen aber Mitte 2012 (zu Beginn des Forschungsprojekts) noch nicht zur Verfügung.

Tabelle 2: Wirtschaftliches Potential einer vorübergehenden Ausserbetriebnahme des KW Fieschertal am Beispiel des Hochwasserereignisses vom Juli 2012 (Abgottspon *et al.* 2016a)

| | |
|--|------------------|
| Erzeugungsverlust während ca. 16 h Stillstand in Volllastzeit (64 MW, Annahme 55 CHF/MWh) | - 60'000 |
| vermiedene Reparaturkosten für beide MG (in diesem Ereignis; grobe Schätzung) | + 200'000 |
| vermiedener Produktionsausfall infolge weniger reduziertem Wirkungsgrad (Schätzung) | + 30'000 |
| vermiedener Erzeugungsverlust für Laufradtausch während Volllastzeit (1 MG, 17 h) | + 30'000 |
| Strafgebühr / Pönale für starke Abweichung der Produktion vom angemeldeten Sollwert | evtl. |
| Total (ohne allfällige Pönale) | + 200'000 |

5.6. Wissensaustausch

5.6.1. Tagung in Horw bei Luzern

Am 30.09.2015 wurden die Resultate des Forschungsprojekts im Rahmen der Tagung „**Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen von Pelton-turbinen**“ in Horw an der Hochschule Luzern präsentiert (Abb. 27). Ein Vortrag über die Fallstudie am KW Dorferbach (Österreich) ergänzte das Programm. Die Tagung wurde hauptsächlich durch die Hochschule Luzern, Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Hydromaschinen, organisiert.

An der Tagung nahmen ca. 70 Vertreter von Kraftwerksbetreibern, Turbinen- und Messgeräteherstellern, Ingenieurbüros sowie von Hochschulen teil. Die Teilnehmer kamen vorwiegend aus dem deutschsprachigen Alpenraum (Schweiz, Österreich, Deutschland, Italien). Wie uns die positiven Rückmeldungen zeigten, entsprach die Tagung einem Bedürfnis unter den beteiligten Fachleuten.

Im Anschluss an diese Tagung wurde ein umfangreicher deutschsprachiger Fachartikel (mit französischem Resumé) verfasst und im März 2016 in der Fachzeitschrift *Wasser, Energie, Luft* publiziert (Abgottspon *et al.* 2016a).



Abbildung 27: Eindrücke der Tagung „Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen von Pelton-turbinen“, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts am 30.09.2015 in Horw durchgeführt wurde; a) A. Abgottspon erläuterte die Untersuchungen am Wasserkraftwerk Fieschertal, b) Teilnehmer (Fotos: HSLU)



5.6.2. Tagung in Grenoble

Im Rahmen des „28th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems“ organisierte die VAW den Workshop „**Dealing with hydro-abrasive erosion at high-head hydropower plants**“. Der Workshop fand am 06.07.2016 in Grenoble statt und war auf ein internationales Publikum ausgerichtet. Die Themen wurden einerseits anhand der Methoden und Ergebnisse der seit 2012 laufenden Studie am Kraftwerk Fieschertal, andererseits anhand internationaler Beiträge besprochen (Abb. 28).

Der Workshop wurde von etwa 50 Fachpersonen besucht (v.a. Ingenieure und Wissenschaftler von Turbinenherstellern und Hochschulen). Wie die Diskussionen im Anschluss an die Vorträge zeigten, stiessen insbesondere die praxisnahen Messtechniken für das Schwebstoffmonitoring, die Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung durch temporäre Kraftwerksabstellungen während ausserordentlich hohem Schwebstoffaufkommen, sowie die gesamthafte Betrachtung des Feinsediment-Managements an Wasserkraftanlagen auf reges Interesse.

Die VAW und die HSLU wirkten an folgenden sieben Konferenzbeiträgen mit, die einen Bezug zum in diesem Bericht behandelten Forschungsprojekt haben (siehe Auflistung im Abschnitt 8.1):

- 1) Rückblick auf 100 Jahre Forschung und Entwicklung zur Verminderung der Turbinenabrasion (Felix *et al.* 2016a);
- 2) Möglichkeiten des Schwebstoffmonitorings mittels akustischer Methoden (Gruber *et al.* 2016);
- 3) Einsatz und Vergleich von fünf Techniken für das kontinuierliche Schwebstoffmonitoring am KW Fieschertal (Felix *et al.* 2016b);
- 4) Quantifizierung der Schwebstoffbelastung der Turbinen des KW Fieschertal: Schwebstofffrachten und *Particle Loads* gemäss IEC 62364 (Felix *et al.* 2016c);
- 5) Quantifizierung der Turbinenabrasion und der Wirkungsgradänderungen am KW Fieschertal (Abgottspon *et al.* 2016b);
- 6) Anpassung und teilweise Kalibrierung des IEC-Berechnungsmodells für hydro-abrasiven Verschleiss an beschichteten Peltonlaufrädern (Felix *et al.* 2016d);
- 7) Feinsediment-Management an Wasserkraftanlagen: vorübergehenden Kraftwerksabschaltungen während Hochwassern und Feinsedimentweiterleitung aus Stauanlagen über den Triebwasserweg (Felix *et al.* 2016e).



Abbildung 28: Eindrücke des Workshops „*Dealing with hydro-abrasive erosion at high-head hydropower plants*“, der am 06.07.2016 im Rahmen dieses Forschungsprojekts in Grenoble durchgeführt wurde: a) internationale Teilnehmer, b) D. Felix erläuterte die Kalibrierung des Abrasionsmodells, c) Prof. Dr. T. Staubli berichtete über das Wirkungsgradmonitoring und d) Prof. Dr. R. Boes präsentierte verschiedene Möglichkeiten für das Feinsediment-Management an Wasserkraftanlagen und leitete die Diskussion im Anschluss an die Vorträge (Fotos: VAW).

6. Diskussion und Schlussfolgerungen

6.1. Schwebstoffmonitoring

Die Laboruntersuchung der Schwebstoffmessinstrumente vor dem Einsatz in der Feldstudie bewährte sich, da dadurch das Verhalten, die Kalibrierung und die Messunsicherheit der Geräte unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden konnte.

Für die Messung der Schwebstoffkonzentration wurden mehrere Instrumente, die auf verschiedenen physikalischen Prinzipien beruhen, eingesetzt. Dies hat folgende Vorteile:



- auch hohe SSC, die für die Turbinenabrasion besonders relevant sind, können gemessen werden;
- die Verlässlichkeit der Messungen wird gesteigert und Datenlücken treten seltener auf;
- in überlappenden Messbereichen können Messresultate verglichen und weniger plausible Messwerte verworfen werden, wodurch schliesslich die Genauigkeit der berechneten Schwebstofffrachten und *Particle Loads* verbessert wird.

Nach Kenntnis der Autoren wurden Trübungssonden, LISST, die Dichtemessung mittels CFDM, die akustischen Methode basierend auf ADM und die Methode der Druckmessungen erstmals miteinander an einer Wasserkraftanlage eingesetzt und verglichen.

Mit den Schwebstoffmessungen am Kraftwerk Fieschertal in den Jahren 2012 - 2014 liegen Datenreihen bezüglich SSC und PSD mit hoher zeitlicher Auflösung (ein Wert pro Minute) und hoher Qualität vor. Da die SSC und die mittlere Partikelgrösse nur schwach korrelieren, wäre die Messunsicherheit deutlich höher gewesen, wenn lediglich Trübungssonden und der automatische Probenehmer eingesetzt worden wären. Mit Schöpfproben alleine wäre die Schwebstoffdynamik ungenügend erfasst worden.

Mit einer Auswahl an Schwebstoffmessgeräten, die in diesem Projekt eingesetzt und auf ihre Tauglichkeit unter realen Bedingungen getestet wurden, lassen sich Hochdruck-Wasserkraftanlagen anforderungsgerecht instrumentieren. Es sind vielversprechende Kombinationen möglich.

6.2. Monitoring der Turbinenabrasion

Die räumlich verteilte, gut reproduzierbare Messung der Beschichtungsdicken in Peltonbechern mit Schablonen stellt nach Kenntnis der Autoren eine Neuerung dar. Für das routinemässige Laufradmanagement kann der Messaufwand reduziert werden, indem die Beschichtungsdicke nur an ausgewählten, kritischen Stellen überwacht wird. In Jahren ohne grössere Hochwasser war die Abrasion der Beschichtung in den Bechern unwesentlich; massgebend war der lokale Verlust der Beschichtung an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten, der zu Erosion des Grundmaterials führte.

Die Erosion des Grundmaterials konnte mit der Methode des 3d-Digitalisierens detailliert quantifiziert werden. Solche Auswertungen wären mit Daten von einfacheren Messmethoden (z.B. Messungen mit einem Massstab) nicht möglich gewesen. Die verwendete Methode erscheint im Rahmen eines Forschungsprojekts angebracht, ist aber für das routinemässige Laufradmanagement einer Wasserkraftanlage aufgrund des Aufwands weniger geeignet.

Um Produktionsverluste zu vermeiden, konnte die Erosion an den Turbinen lediglich mit relativ geringer zeitlicher Auflösung, d.h. vor allem vor und nach den Schwebstoffsaïsons gemessen werden.

6.3. Wirkungsgradmonitoring

Die Indexwirkungsgradmessungen nach dem *Sliding-Needle*-Verfahren lassen sich gut durchführen und weisen eine genügende Reproduzierbarkeit auf. Im Kraftwerk Fieschertal ist das Messverfahren im Kraftwerksleitsystem implementiert worden und ermöglicht so dem Kraftwerksbetreiber, ohne Anwesenheit eines Ingenieurs periodische Messungen durchzuführen. Es wird empfohlen, die Messungen durch einen spezialisierten Ingenieur auswerten und beurteilen zu lassen, und ein Expertensystem aufzubauen, welches kontinuierliche Plausibilitätsüberprüfungen der Messdaten beinhaltet.



Es wurden Wirkungsgradabnahmen von bis zu 1.0% infolge Hydroabrasiv-Verschleiss gemessen. Andererseits führte das Schleifen von abgestumpften Mittelschneiden und Bechereintrittskanten (Revisionsmassnahme vor Ort) zu Wirkungsgradzunahmen von bis zu ca. 0.5%.

In den Sommermonaten mit Vollastbetrieb würden *Sliding-Needle*-Messungen zu Produktionsverlusten führen. Daher wurden in den Sommermonaten keine oder nur wenige solcher Messungen durchgeführt. Aus Sicht der Kraftwerksbetreiber und der verantwortlichen Ingenieure besteht ein Interesse an der Entwicklung weiterer Methoden für das Wirkungsgradmonitoring, welche keine Betriebseinschränkungen erfordern (kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring).

6.4. Gesamtbetrachtung

Die Erosionstiefen und Wirkungsgradabnahmen korrelieren wenig mit den Betriebsstunden und saisonal-typischen SSC, da die SSC und die Partikelgrössen variieren und die Erosion stark von der Geometrie der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten vor einer Schwebstoffbelastungsperiode sowie vom allfälligen lokalen Verlust der Beschichtung abhängt. Im Fall von stumpfen Schneiden ist die Erosion ausgeprägter infolge von Sekundärschäden.

Durch die Ermittlung der quantitativen Beziehungen zwischen der *Particle Load* pro Becher und der Verbreiterung der Mittelschneiden bzw. der Vertiefung der Becherausschnitte (Abb. 25) wurde das analytische Abrasionsmodell (Berechnungsformel) gemäss IEC 62364 (2013) für beschichtete Becher von Peltonlaufrädern angepasst und kalibriert. Nach Kenntnis der Autoren waren vorher für diese Anwendung keine Modellkonstanten bekannt.

Die Auswertungen zeigten relativ grosse Unterschiede im Schwebstoffaufkommen von Jahr zu Jahr: Im Jahr 2012 mit einem ca. 20-jährlichen Hochwasserereignis wurde deutlich mehr (und gröbere) Schwebstoffe durch die Druckleitung und die Turbinen transportiert und es traten deutlich grössere Abrasions- und Folgeschäden auf als in den Jahren 2013 - 2016 ohne grössere Hochwasser. In diesen Jahren konnten das Schwebstoffaufkommen, die Turbinenabrasion und die Wirkungsgradabnahmen in „normalen“ Schwebstoffsaïsons untersucht werden.

Während des Hochwassers vom 2./3. Juli 2012 wurde das Kraftwerk durchgehend betrieben. Aufgrund der nachträglich an den Laufrädern und am Kühlwassersystem der Turbinen festgestellten Schäden wurde nach dem Ereignis abgeschätzt, dass es wirtschaftlich deutlich vorteilhaft gewesen wäre, den Turbinierbetrieb während dieses Ereignisses zu unterbrechen. Mit der Abschaltkonzentration von 10 g/l und einer Wiederinbetriebnahme bei 5 g/l wäre ein Unterbruch von 16 h ausreichend gewesen, um mehr als 13'000 t Feinsedimente von den Turbinen fernzuhalten.

Um eine Vorwarnzeit für eine Abschaltung zu erhalten, sind nicht nur Messungen im Triebwasser, sondern auch bereits im Fassungsbereich oder im Fluss oberstrom der Fassung empfehlenswert. Wenn die Signale der Schwebstoffmessungen auch im Kraftwerksleitsystem integriert werden, können Warnungen vor hohen Schwebstoffbelastungen wie andere Alarme an den Pikettdienst ausgegeben werden, welcher die Entscheidung einer Abschaltung zu treffen hat (Abgottsson *et al.* 2016a).

Die Durchführung einer mehrjährigen Messkampagne an einer Prototyp-Anlage ist mit erheblichem Aufwand verbunden (Betreuung der Messeinrichtungen, Koordination mit dem Kraftwerksbetrieb) und die Sedimentbelastung ist nicht kontrollierbar, sondern hängt von unvorhersehbaren Starkniederschlägen ab. Dennoch erscheint eine solche Studie lohnenswert, da ein Kraftwerksbetreiber in der Regel eine solche Studie ohne Beteiligung von Hochschulen und gemeinsamer Forschungsförderungsmittel



nicht durchführen könnte und die am Prototypen gewonnenen Messdaten nicht durch numerische Simulation oder Versuche an physikalischen Modellen substituierbar sind. Das Kraftwerk Fieschertal eignet sich von den natürlichen Bedingungen und vom Anlagenlayout her gut für die Untersuchung der Schwebstoffe im Triebwasser und ihrer Auswirkungen.

Das hier beschriebene Forschungsprojekt zeichnete sich durch eine in diesem Bereich unbedingt erforderliche, aber sonst kaum stattfindende Zusammenarbeit in den Fachgebieten Schwebstoffmessung, Turbinenabration und Wirkungsgradmonitoring aus.

7. Ausblick

Das vorliegende Projekt ist Bestandteil der Dissertation von D. Felix. Nach Abschluss der Dissertation wird diese voraussichtlich ab April 2017 in der ETH-Bibliothek sowie als VAW-Mitteilung in elektronischer Form frei zugänglich sein:

<http://e-collection.library.ethz.ch/>

<http://www.vaw.ethz.ch/das-institut/vaw-mitteilungen/2010-2019.html>

Im Teil c) des Forschungsprojekts und im Rahmen allfälliger weiterer Folgeprojekte sind folgende Arbeiten vorgesehen (in Zusammenarbeit mit dem Kraftwerksbetreiber):

- Weiterführung der kontinuierlichen Schwebstoffmessungen
- Weiterführung der Turbinenabrationmessungen (mit reduziertem Aufwand, im Winter)
- Wirkungsgradmessungen
- Entsprechende Auswertungen (Berechnung der Schwebstofffrachten, Anpassungen / Kalibrierungen bestehender Berechnungsansätze)
- Ausarbeiten von Empfehlungen für den Umgang mit Feinsedimenten an Hoch- und Mitteldruckwasserkraftanlagen
- Veröffentlichungen (vorzugsweise in referierten Fachzeitschriften).

Eine Weiterführung des Forschungsprojekts am Kraftwerk Fieschertal erscheint sinnvoll, weil die Messreihen mit relativ geringem Mehraufwand verlängert werden können und aussagekräftiger werden. Es wird empfohlen, in einigen Jahren den Wert der Abschaltkonzentration basierend auf längeren Datenreihen erneut zu berechnen und gegebenenfalls anzupassen.

Entsprechende Studien an andern Wasserkraftanlagen mit Peltonturbinen (z.B. mit anderen Becherbreiten) sind wünschenswert, um die Datenbasis zu erweitern und die Unsicherheit in den Berechnungsmodellen zu reduzieren. Weiter sind Laboruntersuchungen erforderlich, in denen ausgewählte Parameter systematisch und einzeln variiert werden können. Feld- und Labordaten können für die Entwicklung, Kalibrierung und Validierung von numerischen Berechnungsmodellen verwendet werden.

Nach Einschätzung der Autoren dürfte das Thema „Feinsedimentweitergabe aus Stauanlagen über den Triebwasserweg“ zukünftig an Bedeutung gewinnen. Um die Nutzvolumen von Speichern zu erhalten, ist es langfristig unumgänglich, Sedimente aus Stauanlagen weiterzuleiten. Wenn Feinsedimente kontrolliert über den Triebwasserweg weitergeleitet werden, sind die Konzentrationen im Unterwasser im Gegensatz zu seltenen Stauraumpülungen moderat und das Schwebstofftransportregime kann jenem vor dem Bau der Stauanlagen angeglichen werden, was ökologische Vorteile bringt.



Nachteilig ist die verstärkte Sedimentbelastung der Turbinen. Für die Abschätzung der zu erwartenden Turbinenabration und Wirkungsgradreduktionen, und für die Wahl geeigneter Gegenmassnahmen wie Beschichtungen, separaten Kühlwassersystemen, sowie Grenzkonzentrationen und –partikelgrössen sind verbesserte Kenntnisse betreffend Hydroabrasiv-Verschleiss erforderlich. So lassen sich Wasserkraftanlagen gesamthaft bezüglich des Umgangs mit Feinsedimenten optimieren, was zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und der Effizienz der Wasserkraftnutzung beiträgt.

8. Referenzen

8.1. Publikationen aus dem vorliegenden Forschungsprojekt

Der Fachartikel von Abgottspon *et al.* (2016a) gibt einen guten Überblick über das Forschungsprojekt auf Deutsch. Weitere Informationen können den übrigen, meist englischsprachigen Artikeln entnommen werden; die Publikationen sind nach Erscheinungsjahr und alphabetisch nach Erstautor aufgelistet.

2012

- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2012a). **Schwebstoff- und Verschleiss-Monitoring an Wasserkraft-Hochdruckanlagen: Laborversuche zu Partikelmessmethoden und Vorbereitung der Fallstudie Fieschertal.** *Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft*, TU München, Nr. 125: 11-24.
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2012b). **Schwebstoffmonitoring und Verschleiss an Pelton turbinen am Fallbeispiel Fieschertal - Vorbereitende Laborversuche zu Partikelmessmethoden.** *Proc. Wasserbausymposium 2012*, ISBN 978-3-85125-230-9. Graz, Österreich: 117-124.
- Felix D., Albayrak I., Abgottspon A., Boes R.M., Gruber P. (2012c). **Suspended Sediment and Pelton Turbine Wear Monitoring: Experimental Investigation of various Optical and Acoustic Devices and Begin of the Prototype Study Fieschertal.** *Proc. Vienna Hydro 2012, 17th International Seminar on Hydropower Plants*, Wien, Österreich: 483-494.

2013

- Abgottspon A., Staubli T., Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2013a). **Hydro-abrasive Erosion of Pelton buckets and Suspended Sediment Monitoring.** *Proc. Hydrovision International 2013*, Denver, USA.
- Abgottspon A., Stern P., Staubli T., Felix D., Winkler K. (2013b). **Measuring Turbine Abrasion and Efficiency Decrease: First Results of the Case Study at HPP Fieschertal.** *Proc. Hydro 2013 Conference*, Innsbruck, Österreich: paper no. 18.05.
- Boes R. M., Felix D., Albayrak I. (2013). **Schwebstoffmonitoring zum verschleissoptimierten Betrieb von Hochdruck-Wasserkraftanlagen.** *Wasser Energie Luft* 105(1): 35-42; schriftliche Fassung zum Vortrag vom 08.11.2012 von Prof. Dr. R. Boes in Horw an der Fachtagung Wasserkraft des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbands (SWV).
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M (2013a). **Monitoring Suspended Sediment Concentration and Particle size using Optical and Acoustic Methods – Laboratory tests and Case study in the Swiss Alps.** *Advances in River Sediment Research*, Fukuoka S., Nakagawa H., Sumi T., Zhang H. (eds), Taylor & Francis Group, London: 1757-1766
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M., Abgottspon A., Deschwanden F., Gruber P. (2013b). **Measuring Suspended Sediment: Results of the first Year of the Case Study at HPP Fieschertal in the Swiss Alps.** *Proc. Hydro 2013 Conference*, Innsbruck, Österreich: paper no. 18.03.
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2013c). **Laboratory Investigation on measuring Suspended Sediment by portable Laser Diffractometer (LISST) focusing on Particle Shape.** *Geo-marine Letters* 33(6): 485-498.

2014

- Abgottspon A., Staubli T., Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2014). **Monitoring Suspended Sediment and Turbine Efficiency.** *Hydro Review Worldwide*, 22(4): 28-36.
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2014a). **Variation des Feinsedimentgehalts im Triebwasser infolge Speicherstollenbewirtschaftung.** *Proc. Wasserbausymposium 2014, VAW-Mitteilung 227*, Boes R.M. (ed.), ETH Zürich: 183-193.
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2014b). **Site-specific Conversion of Laser Diffractometer (LISST) Data to Suspended Sediment Mass Concentration (SSC).** *Proc. Conference "Particles in Europe"*, Esbjerg, Dänemark.



2015

- Albayrak I., Felix D., Hagmann M., Boes R.M. (2015). **Suspended Sediment and Bed Load Transport Monitoring Techniques**. 38. *Dresdner Wasserbaukolloquium, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 53*, ISBN 978-3-86780-420-2: 405-414.
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2015). **Field measurements of suspended sediment using several methods**. *36th IAHR World Congress*, Den Haag, Niederlande.

2016

- Abgottspson A., Felix D., Boes R., Staubli T. (2016a). **Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Pelton-turbinen - Ein Forschungsprojekt am KW Fieschertal**. *Wasser Energie Luft* 108(1): 9-24.
- Abgottspson A., Staubli T., Felix D. (2016b). **Erosion of Pelton buckets and changes in turbine efficiency measured in the HPP Fieschertal**. *Proc. 28th IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Grenoble, Frankreich: 1181-1190.
- Felix D., Albayrak I., Abgottspson A., Boes R.M. (2016a). **Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment – a century of research and development**. *Proc. 28th IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Grenoble, Frankreich: 907-916.
- Felix D., Albayrak I., Abgottspson A., Boes R.M. (2016b). **Real-time measurements of suspended sediment concentration and particle size using five techniques**. *Proc. 28th IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Grenoble, Frankreich: 1057-1066.
- Felix D., Albayrak I., Abgottspson A., Boes R.M. (2016c). **Suspended sediment measurements and calculation of the particle load at HPP Fieschertal**. *Proc. 28th IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Grenoble, Frankreich: 1067-1076.
- Felix D., Abgottspson A., Albayrak I., Boes R.M. (2016d). **Hydro-abrasive erosion on coated Pelton runners: Partial calibration of the IEC model based on measurements in HPP Fieschertal**. *Proc. 28th IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Grenoble, Frankreich: 1191-1200.
- Felix D., Albayrak I., Abgottspson A., Boes R.M. (2016e). **Optimization of hydropower plants with respect to fine sediment focusing on turbine switch-offs during floods**. *Proc. 28th IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Grenoble, Frankreich: 1211-1220.
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2016f). **Continuous measurement of suspended sediment concentration: Discussion of four techniques**. *Measurement* 89: 44-47.
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2016g). **Combining in-situ laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry to measure low and high suspended sediment concentrations**. *Proc. 13th Int. Symposium on River Sedimentation*, Stuttgart, Deutschland: 1264-1271.
- Gruber P., Felix D., Storti G., Lattuada M., Fleckenstein P., Deschwanden F. (2016). **Acoustic measuring techniques for suspended sediment**. *Proc. 28th IAHR-Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Grenoble, Frankreich: 927-936.

8.2. Weitere Referenzen (ausgewählte Grundlagen)

- Abgottspson A. (2011). **Messung abrasiver Partikel in Wasserkraftanlagen**. *Master Thesis* (unpubliziert), Competence Center Fluid Mechanics and Hydro Machines, Hochschule Luzern.
- Abgottspson A. & Staubli T. (2008). **Index Tests of a Francis Unit using the Sliding Gate Method**. *Proc. 7th Int. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurements (IGHM)*, Milano, Italien.
- Agrawal Y., Mikkelsen O.A., Pottsmith H.C. (2011). **Sediment monitoring technology for turbine erosion and reservoir siltation applications**, *Proc. Hydro 2011 Conference*, Prag, Tschechische Republik: 29.09
- Bajracharya T.R., Acharya B., Joshi C.B., Saini R.P., Dahlhaug O.G. (2008). **Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: A case study of Chilime Hydropower Plant**. *Wear*, 264(3-4): 177–184.
- Bishwakarma M.B. & Støle H. (2008). **Real-time sediment monitoring in hydro-power plants**. *J. of Hydraulic Research*, 46(2): 282–288.
- Boes R.M. (2009). **Real-time monitoring of SSC and PSD in the headwater way of a high-head hydropower plant**. *Proc. 33rd IAHR Congress*, Vancouver, Kanada: 4037–4044.
- Boes R.M. (2010). **Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und -korngrößenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Pelton-turbine**. *Wasser Energie Luft*, 102(2): 101-107.
- Brekke H., Wu Y.L., Cai B.Y. (2002). **Design of Hydraulic Machinery Working in Sand Laden Water**. In Duan C.G. und Karelin V.Y. (eds.), *Abrasive Erosion & Corrosion of Hydraulic Machinery* (pp. 155-233). London: Imperial College Press.



- Cateni A., Magri L., Grego G. (2008). **Optimization of Hydro Power Plants Performance – Importance of rehabilitation and maintenance in particular for the runner profiles.** *Proc. 7th Int. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurements (IGHM)*, Milano, Italien.
- Costa I., Storti G., Lüscher B., Gruber P., Staubli T. (2012). **Influence of solid particle parameters on the sound speed and attenuation of pulses in acoustic discharge measurements (ADM).** *J. of Hydrological Eng.*, 17(10): 1084–1092.
- Dahlhaug O.G., Skåre P.E., Mossing V., Gutierrez A. (2010). **Erosion resistant coatings for Francis runners and guidevanes,** *Intl. J. on Hydropower & Dams* 17(2):109-112.
- DWA (2006). **Entlandung von Stauräumen.** *Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.*, Hennef, Deutschland.
- Gummer J.H. (2009). **Combating Silt Erosion in Hydraulic Turbines.** *Hydro Review Worldwide*, 17(1).
- Hassler P. und Schnablegger W. (2006). **Pelton runner maintenance and its results at Verbund-Austrian Hydro Power AG.** *Proc. 14th International Seminar on Hydropower Plants*, Doujak E. (ed.), Wien, Österreich: 445-454.
- IEC 62364 (2013). **Guide for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis, and Pelton turbines.** International Electrotechnical Commission, Genf.
- Kalberer A. (1988). **Erfahrungen mit neuartigen Beschichtungen im Wasserturbinenbau.** *Intern. Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau. VAW-Mitteilung* 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich: 245-258.
- Karimi A., Verdon C., Martin J.L., Schmid R.K. (1995). **Slurry erosion behaviour of thermally sprayed WC-M coatings.** *Wear*, 186-187: 480-486.
- Krause M. & Grein H. (1996). **Abrasion research and prevention.** *Int. J. on Hydropower & Dams*, 3(4):17-20.
- Maldet R. (2008). **Pelton runner with high erosion caused by glacier sediment: assessment and measures.** *Proc. 15th International Seminar on Hydropower Plants*, Doujak E. (ed.), Wien, Österreich: 639-646.
- Mei Z.Y. (1996). **Review of Research on Abrasion and Cavitation of Silt Laden Flows Through Hydraulic Turbines in China.** *Proc. 18th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation*, Valencia, Spanien: 641–650.
- Nozaki T. (1990). **Estimation of repair cycle of turbine due to abrasion caused by suspended sand and determination of desilting basin capacity.** *Report.* Tokyo, Japan International Cooperation Agency.
- Ortmanns C. (2006). **Entsander von Wasserkraftanlagen.** *PhD thesis, VAW-Mitteilung* 193, Minor H.-E. (ed.), ETH Zürich.
- Singh M., Banerjee J., Patel P.L., Tiwari H. (2013). **Effect of silt erosion on Francis turbine: a case study of Maneri Bhali Stage-II, Uttarakhand, India.** *ISH J. of Hydraulic Eng.*, 19(1): 1-10.
- Spreafico M., Lehmann C., Jakob A., Grasso A. (2005). **Feststoffbeobachtung in der Schweiz – Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie.** *Berichte des BWG*, Serie Wasser Nr. 8, Bern.
- Strübin P. und Bussy M. (1988). **Erosionserscheinungen im Kraftwerk Mörel der Aletsch AG aus Sicht der Betriebsleitung.** *Intern. Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau. VAW-Mitteilung* 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich: 95-123.
- Sutherland T.F., Lane P.M., Amos C.L., Downing J. (2000). **The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels.** *Marine Geology* 162: 587-597.
- Thapa B. (2004). **Sand Erosion in Hydraulic Machinery.** *PhD thesis*, NTNU, Trondheim, Norway.
- Thomann P. (1988). **Erosion an den Pelton-Rädern der Zentrale Stalden der Kraftwerke Mattmark AG.** *Intern. Symposium über Erosion, Abrasion und Kavitation im Wasserbau. VAW-Mitteilung* 100, Vischer D. (ed.), ETH Zürich: 151–160.
- Wedmark A. (2014). **Living with particle abrasion,** *Proc. Hydro Conf.*, Cernobbio (Lake Como), Italien: paper no. 08.02.
- Winkler K., Dekumbis R., Rentschler M., Parkinson E., Garcin H. (2011). **Understanding hydro-abrasive erosion,** *Proc. Hydro 2011 Conference*, Prag, Tschechische Republik: 2.05
- Winkler K. (2014). **Hydro-abrasive erosion: Problems and solutions.** *Proc. 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Montreal, Kanada. *IOP Conf. Series: Earth and Env. Science*, 22: 052022.
- Wren D., Barkdoll B., Kuhnle R., Derrow R. (2000). **Field Techniques for Suspended-Sediment Measurement.** *J. of Hydraul. Eng.*, 126(2): 97–104.
- Zhang Z. (2016). **Pelton turbines.** Springer; Berlin, Heidelberg, New York.

Anhang

Die aus diesem Forschungsprojekt hervorgegangenen Publikationen gemäss Abschnitt 8.1 liegen diesem Schlussbericht bei.