Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 19.07.2022

Untersuchung der Schwebstoffbelastung, der hydro-abrasiven Erosion und der Wirkungsgradänderungen an beschichteten Peltonturbinen in der Hochdruckwasserkraftanlage Fieschertal

Field investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency changes of coated Pelton turbines in the high-head hydropower plant Fieschertal



Fieschergletscher (Foto: VAW)



KW Fieschertal (Foto: HSLU)

© ETH Zürich, VAW und HSLU, T&A, CC FMHM, 2022

ETH zürich

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie

HOCHSCHULE LUZERN

Technik und Architektur
Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und numerische Methoden

Datum: 19.07.2022

Ort: Bern

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:
2018–2020: Innosuisse via Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER), Supply of Energy (SoE), www.sccer-soe.ch

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

Hochschule Luzern, Technik und Architektur (HSLU)
Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Numerische Methoden (CC FNUM)
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw
https://www.hslu.ch/fnum

Autoren:
Dr. David Felix, ehemals VAW, david.felix@aquased.ch
André Abgottspon, ehemals HSLU, andre.abgottspon@etaeval.ch
Prof. Dr. Thomas Staubli, HSLU, thomas.staubli@hslu.ch
Martin von Burg, HSLU, martin.vonburg@hslu.ch
Maximilian Kastinger, VAW, kastinger@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Ismail Albayrak, VAW, albayrak@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. Robert Boes, VAW, boes@vaw.baug.ethz.ch

BFE-Projektbegleitung:
Dr. Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

BFE-Vertragsnummer: SI/501610-01

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

Zusammenfassung

Turbinen von Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen können durch schwebstoffhaltiges Wasser stark abgenutzt werden, was zu erheblichen Unterhaltskosten, Wirkungsgradabnahmen und Minderproduktion führt. Zu dieser Problematik wurde von 2018 bis 2021 am Hochdruck-Laufwasserkraftwerk Fieschertal (Wallis) ein BFE-Pilotprojekt durchgeführt. Mit einer innovativen Methodenkombination wurden die Schwebstoffbelastung, die Turbinenabrasion und die Wirkungsgradänderungen detailliert gemessen und ausgewertet. Zusammen mit Daten aus den Vorgängerprojekten seit 2012 resultierte eine umfassende Messreihe über neun Jahre, wie sie bisher in der Literatur nicht zu finden ist. Auf dieser Basis wurden Modelle für die Vorhersage der Abrasion an beschichteten Peltonlaufrädern und deren Wirkungsgradreduktion weiterentwickelt bzw. kalibriert. Weiter wurden betriebliche Massnahmen (vorübergehende Ausserbetriebnahmen von Wasserkraftanlagen während hoher Schwebstoffbelastung) und Revisionsarbeiten untersucht, um den Anlagebetrieb wirtschaftlich zu optimieren. Es wird erwartet, dass die Resultate dieses Projekts zur Steigerung der Energieeffizienz und der Wirtschaftlichkeit von Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen an stark sedimenthaltigen Fliessgewässern beitragen.

Résumé

Les turbines des centrales hydroélectriques à haute et moyenne chute peuvent être fortement usées par des particules des sédiments fins transportés en suspension dans les eaux motrices. Ceci entraîne des coûts de maintenance considérables, des réductions des rendements et des pertes de production. Cette problématique a été abordée dans un projet pilote de l'OFEN à la centrale hydroélectrique au fil de l'eau à haute chute de Fieschertal (Valais) de 2018 à 2021. En utilisant une combinaison innovante de méthodes, la charge en sédiments fins, l'abrasion des turbines et les changements de leur rendement ont été mesurés et évalués en détail. En combinaison avec des résultats des projets précédents depuis 2012, une série des données sur neuf ans a été obtenu qui n'était pas disponible dans la littérature avant. Sur cette base, des modèles pour prédire l'abrasion des roues Pelton revêtues et leur réduction en efficacité ont été développés plus avant et/ou calibrés. En outre, des mesures d'exploitation (mises hors service temporaires des aménagements hydroélectriques pendant les périodes où la charge de particules en suspension est exceptionnellement élevée) et des travaux de révision ont été étudiés afin d'optimiser l'exploitation de l'aménagement d'un point de vue économique. Les résultats de ce projet contribueront à accroître l'efficacité et la rentabilité des centrales hydroélectriques à haute et moyenne chute sur les cours d'eau fortement chargés en sédiments.

Summary

Turbines of high- and medium-head hydropower plants (HPP) can be heavily eroded by water containing suspended sediment particles. This leads to considerable maintenance costs, efficiency reductions and production losses. This problem was addressed in a SFOE pilot project at the high-head run-of-river HPP Fieschertal in Valais, Switzerland, from 2018 to 2021. Using an innovative combination of methods, the suspended sediment load, turbine abrasion and efficiency losses were measured and analysed in detail. Building on the previous projects since 2012, an unprecedented comprehensive data series over nine years was compiled. On this basis, models to predict abrasion on coated Pelton runners and their efficiency reduction were further developed and calibrated. Moreover, operational measures (temporary shutdowns of HPP in periods with exceptionally high suspended sediment loads) and refurbishment works were investigated to economically optimise the HPP operation. It is expected that the results of this project will contribute to increasing the energetic and economic efficiency of high- and medium-head hydropower plants on watercourses with increased sediment loads.

Wichtigste Erkenntnisse

- Die **Messung der Schwebstoffkonzentration** mit geeigneter Instrumentierung ist die Grundlage dafür, rechtzeitig und zuverlässig Alarme auszulösen, um Wasserkraftanlagen während hoher Schwebstoffbelastung vorübergehend ausser Betrieb zu nehmen und **Turbinen vor übermässigem hydro-abrasivem Verschleiss zu schützen.**
- Das **kontinuierliche Monitoring**, insbesondere der Turbinenwirkungsgrade und der Schwebstoffkonzentration, ist die wichtigste Grundlage für die betriebs- und energiewirtschaftliche Optimierung des Wasserkraftanlagenbetriebs an sedimentführenden Fliessgewässern.
- Methoden für die rechnerische Abschätzung der **Abschalt-Schwebstoffkonzentration** und des **optimalen Zeitpunkts** für grosse **Revisionen** von Peltonlaufrädern wurden ausgearbeitet.
- **Modelle für Prognosen der Abrasion und Wirkungsgradreduktionen** von hartbeschichteten Peltonlaufrädern wurden weiterentwickelt und kalibriert; zur Reduktion der Unsicherheiten werden weitere Untersuchungen empfohlen.

Conclusions principales

- La **mesure de la concentration des matières en suspension** (MES) à l'aide d'une instrumentation appropriée est la base pour déclencher des alarmes à temps et de manière fiable afin de mettre hors service temporairement des aménagements hydroélectriques pendant une forte charge en sédiments et de **protéger les turbines d'une usure hydro-abrasive excessive**.
- La **surveillance continue**, en particulier des rendements des turbines et de la concentration des matières en suspension, est la base primordiale à l'optimisation économique et énergétique de l'exploitation des centrales hydroélectriques sur les cours d'eau chargés de sédiments.
- Des méthodes pour estimer le **seuil de la concentration** des matières en suspension pour les mises hors service temporaires et du **moment optimal** pour les grandes **révisions** des roues Pelton ont été élaborées.
- Les **modèles prognostiques d'abrasion** et de **réduction de l'efficacité** des roues Pelton revêtus ont été développés et calibrés; des études supplémentaires sont recommandées pour réduire les incertitudes.

Key findings

- The **measurement of the suspended sediment concentration (*SSC*)** with suitable instrumentation is the basis for timely and reliable alarms to temporarily shut down hydropower plants during high sediment loads and to **protect turbines from excessive hydro-abrasive** erosion.
- **Continuous monitoring**, especially of turbine efficiencies and *SSC*, is the most important basis for optimising the operation of hydropower plants on sediment-laden watercourses in terms of cost and energy efficiency.
- Methods to estimate the **shut-down *SSC*** and the **optimal timing** for major **refurbishment** of Pelton runners were elaborated.
- **Models to predict erosion and efficiency reductions** of hard-coated Pelton runners were further developed and calibrated; follow-up studies are recommended to reduce uncertainties.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**
Résumé **3**
Summary **3**
Wichtigste Erkenntnisse **4**
Conclusions principales **4**
Key findings **4**
Inhaltsverzeichnis **5**
1 Einleitung **9**
1.1 Ausgangslage und Problemstellung 9
1.2 Notwendigkeit von Messungen an Kraftwerksanlagen 11
1.3 Forschungsprojekte am Kraftwerk Fieschertal 11
1.4 Zielsetzung 12
2 Stand der Technik und Grundlagen **13**
2.1 Schwebstoffe 13
2.1.1 Definition und Eigenschaften 13
2.1.2 Messmethoden 13
2.2 Hydro-abrasiver Verschleiss 14
2.2.1 Definition und Einflussfaktoren 14
2.2.2 Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2013/2019) für hydraulische Turbinen allgemein 15
2.2.3 Anpassung des IEC-Modells für beschichtete Peltonlaufräder gemäss Felix (2017) 16
2.2.4 Anpassung des IEC-Modells für Peltonturbinen gemäss Rai *et al.* (2020b) 17
2.2.5 Typische Schäden an Peltonturbinen 19
2.2.6 Typische Revisionsarbeiten und Zustandsprüfungen an Peltonturbinen 20
2.3 Wirkungsgradänderungen infolge hydro-abrasivem Verschleiss 21
2.4 Ausserbetriebnahme während hoher Schwebstoffbelastung 22
3 Beschreibung des Kraftwerks Fieschertal **24**
3.1 Übersicht 24
3.2 Einzugsgebiet und Gletscherentwicklung 25
3.3 Fassungsbauwerke 26
3.4 Speicherstollen und Schieberkammer 28
3.5 Maschinenhaus, Turbinen und Laufräder 29
4 Messungen im Kraftwerk Fieschertal **31**
4.1 Schwebstoffbelastung 31
4.1.1 Übersicht über die eingesetzten Messgeräte 31

4.1.2 Messeinrichtungen an der Wasserfassung ... 32
4.1.3 Messeinrichtungen am Ende des Entsanders ... 36
4.1.4 Messeinrichtungen in der Schieberkammer ... 38
4.1.5 Messeinrichtungen im Maschinenhaus ... 40
4.1.6 Messungen stromabwärts des Maschinenhauses während Stollenspülungen ... 41
4.1.7 Datenaufzeichnung, Feld- und Laborarbeiten des Sedimentmonitorings ... 42
4.1.8 Erstellung der SSC-Zeitreihe ... 44
4.1.9 Erstellen der Zeitreihe des Median-Partikeldurchmessers d_{50} ... 45
4.2 Hydro-abrasiver Verschleiss ... 46
4.2.1 Allgemein und Inspektionen ... 46
4.2.2 Optische 3D-Vermessung – Messprinzip und Kalibrierung ... 46
4.2.3 Optische 3D-Vermessung – Vorgehen im Kraftwerk ... 47
4.2.4 Optische 3D-Vermessung – Vorgehen bei der Auswertung ... 48
4.2.5 Schichtdickenmessungen – Messprinzip und Kalibrierung ... 50
4.2.6 Schichtdickenmessungen – Vorgehen im Kraftwerk ... 51
4.2.7 Schichtdickenmessungen – Vorgehen bei der Auswertung ... 53
4.3 Wirkungsgradänderungen ... 54
4.3.1 *Sliding-Needle*-Indexwirkungsgradmessungen (SNM) ... 54
4.3.2 Kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring ... 56
4.3.3 Neuartige frontbündige Drucksensoren ... 57
4.4 Zeitliche Übersicht der durchgeführten Messungen ... 58
5 Ergebnisse und Diskussion ... 60
5.1 Schwebstoffbelastung ... 60
5.1.1 Härte, Form und Dichte der Sedimentpartikel ... 60
5.1.2 Schwebstoffkonzentrationen *SSC* ... 62
5.1.3 Partikelgrössen (PSD) ... 64
5.1.4 Betriebliche Einflüsse auf die Schwebstoffbelastung im Triebwasser ... 65
5.1.5 Schwebstoff- und Wasserfrachten in der Druckleitung ... 66
5.1.6 Schwebstofffrachten der einzelnen Turbinen ... 68
5.1.7 Particle Loads gemäss IEC 62364 (2013/2019) ... 69
5.1.8 Leitlinien für Schwebstoffmonitoring-Systeme an Wasserkraftanlagen ... 71
5.2 Hydro-abrasiver Verschleiss ... 73
5.2.1 Inspektionen der Laufräder ... 73
5.2.2 Inspektionen der Düsen und weiterer Turbinenbauteile ... 74
5.2.3 Beispiele von der 3D-Vermessung der Laufradbecher ... 76
5.2.4 Abrasion an den Mittelschneiden gemäss 3D-Vermessungen ... 77
5.2.5 Abrasion an den Becherausschnitten gemäss 3D-Vermessungen ... 81
5.2.6 Abradierte Massen an den Mittelschneiden und Becherausschnitten ... 83
5.2.7 Historie charakteristischer Verschleissgrössen ... 84

5.2.8 Schichtdickenverteilungen in den Laufradbechern ... 86
5.2.9 Abrasion der Beschichtung in den Laufradbechern ... 86
5.3 Wirkungsgradänderungen ... 90
5.3.1 Druckmessungen als Grundlage für das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring ... 90
5.3.2 Wirkungsgradhistorie SNM ... 90
5.3.3 Kontinuierliche Wirkungsgradhistorie ... 92
5.3.4 Wirkungsgradreduktion während einer Schwebstoffsaison ... 94
5.3.5 Wirkungsgradänderungen infolge Revisionsarbeiten ... 95
5.4 Turbinenabrasion je nach Schwebstoffbelastung ... 97
5.4.1 Abrasion an Mittelschneiden und Ausschnitten der Laufradbecher ... 97
5.4.2 Abrasion an Mittelschneiden und Ausschnitten – Vergleich mit Felix (2017) ... 98
5.4.3 Abrasion an Mittelschneiden und Ausschnitten – Vergleich mit Rai *et al.* (2020b) ... 99
5.4.4 Abrasion der Beschichtung in den Laufradbechern ... 101
5.4.5 Anwendungsbeispiel zur Abschätzung der Mittelschneidenverbreiterung ... 102
5.5 Wirkungsgradreduktion je nach Schwebstoffbelastung und Abrasion ... 104
5.6 Ausserbetriebnahmen während Schwebstofftransportereignissen ... 107
5.6.1 Grundsätzliches ... 107
5.6.2 Abschätzung der Abschalt-*SSC* aufgrund der Daten 2012–2014 ... 107
5.6.3 Hochwasser vom 02.–03.07.2012 mit durchgehendem Kraftwerksbetrieb ... 109
5.6.4 Hochwasser vom 29.–30.07.2017 mit Kraftwerks-Ausserbetriebnahme ... 114
5.6.5 Schwebstofftransportereignis vom 21.–22.09.2019 mit Kraftwerks-Ausserbetriebnahme ... 119
5.6.6 Schwebstofftransportereignis vom 02.–03.10.2020 mit Kraftwerks-Ausserbetriebnahme ... 123
5.6.7 Zusammenfassung der Schwebstofftransportereignisse ... 127
5.6.8 Abschätzung der Abschalt-*SSC* aufgrund der Daten 2012–2020 und weiteren Aspekten ... 128
5.6.9 Anwendung der neuen Abschalt-*SSC* ... 131
5.7 Wirtschaftlichkeit von Revisionsmassnahmen ... 134
5.7.1 Produktionseinbussen und Mindereinnahmen infolge Wirkungsgradreduktionen ... 134
5.7.2 Schätzung des Wirkungsgraddefizits für das kommende Jahr ... 136
5.7.3 Typische Kosten und Intervalle von kleinen und grossen Revisionen ... 138
5.7.4 Untersuchung des optimalen Zeitpunkts für einen Laufradwechsel ... 138
5.7.5 Bemerkungen zum optimalen Zeitpunkt für einen Laufradwechsel ... 141
6 Wissenstransfer ... 142
6.1 Fachtagung 2015 in Horw ... 142
6.2 Workshop 2016 in Grenoble ... 143
6.3 Fachtagung 2021 in Naters ... 144
7 Erkenntnisse und Folgerungen ... 146
7.1 Schwebstoffmonitoring ... 146
7.2 Monitoring der Turbinenabrasion ... 146
7.3 Wirkungsgradmonitoring ... 147

7.4 Vorhersage der Turbinenabrasion ... 148
7.5 Vorhersage von Wirkungsgradänderungen ... 149
7.6 Wirtschaftlichkeitsüberlegungen ... 149
7.7 Ausserbetriebnahmen während ausserordentlicher Schwebstoffbelastung ... 149
7.8 Gesamtbetrachtung ... 150
7.9 Fazit ... 151
8 Ausblick ... 152
8.1 Empfehlungen für weitere Forschungsprojekte ... 152
8.2 Praktische Umsetzung und Anwendbarkeit ... 152
9 Referenzen ... 154
9.1 Publikationen aus dem Projekt ... 154
9.2 Studentenarbeiten ... 157
9.3 Literatur ... 158
Anhang ... 161
A Fotodokumentation ... 161
A1 Abrasionsschäden an den Mittelschneiden ... 161
A2 Abrasionsschäden an den Bechereintrittskanten und Mittelschneidenspitzen ... 164
A3 Weitere Bauteile im Turbinengehäuse ... 166
B 3D-Vermessungen der Mittelschneiden und Becherausschnitte ... 167
B1 Mittelschneidenhöhen ... 167
B2 Mittelschneidenbreiten ... 169
B3 Becherausschnittstiefen (Draufsicht) ... 171
C Schichtdickenmessungen in den Laufradbechern ... 173
C1 Verteilungen der Schichtdicken ... 173
C2 Schichtdickenreduktionen (Abrasion) über jeweils eine Schwebstoffsaison ... 179
C3 Schichtdickenveränderungen infolge Nachbeschichtens bzw. Messunsicherheit ... 182
C4 Schichtdickenveränderungen über mehrere Schwebstoffsaisons mit Nachbeschichten ... 183

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Im Triebwasser von Wasserkraftanlagen können mineralische Schwebstoffe enthalten sein. Diese können an Anlageteilen, die durch das Triebwasser benetzt sind, zu hydro-abrasivem Verschleiss führen. Turbinenbauteile von Hoch- und Mitteldruckanlagen sind speziell betroffen (Abbildung 1). Die Einflussgrössen wie die Fliessgeschwindigkeit und die Partikeleigenschaften sind in IEC 62364 (2013 / 2019) näher beschrieben. Solcher Verschleiss reduziert den Wirkungsgrad der Turbinen und somit die Elektrizitätsproduktion (z.B. Maldet 2008). Weiter führt dies zu erhöhten Betriebskosten (häufigere und umfangreichere Revisionsarbeiten), früher erforderlich werdenden Ersatzinvestitionen und Ertragseinbussen, insbesondere wenn Turbineneinheiten aufgrund von hydro-abrasivem Verschleiss 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 Einzugsgebieten mit aktuell oder früher hohem Vergletscherungsgrad, insbesondere, falls Wasser turbiniert wird, welches nicht aus einem Speichersee entnommen wurde;
- Peltonturbinen, da bei diesem Turbinentyp die höchsten Geschwindigkeiten zwischen der Strömung und den Turbinenbauteilen auftreten und die Strömung am stärksten umgelenkt wird.

Die Thematik der Turbinenabrasion 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 oder mittels zustandsbasierter Instandhaltungsprogramme;
- Aufgrund der energiepolitischen Zielsetzungen (Energiestrategie 2050) der Schweiz soll das bestehende Wasserkraftpotential bestmöglich genutzt werden, d.h. aus Sicht der Energieeffizienz sind möglichst hohe Turbinenwirkungsgrade (im zeitlichen Mittel) erwünscht;
- Bei Stauanlagen mit aktuellen Verlandungsproblemen bzw. zum Reduzieren von Konzentrationsspitzen während Spülungen wird auch die Möglichkeit des kontinuierlichen Weiterleitens von Feinsedimenten über den Triebwasserweg vermehrt geprüft.



Mineralische Schwebstoffe im Triebwasser (Beispiel vom KW Fieschertal, Foto: VAW)

Becher eines Peltonlaufrades mit Abrasionsschäden (Beispiel vom KW Emosson, Foto: VAW)

Schematischer Verlauf des Turbinenwirkungsgrads im Lauf der Zeit

Abbildung 1: Ursache und Wirkung von hydro-abrasivem Verschleiss an hydraulischen Turbinen.

Um Wirkungsgradreduktionen zu begrenzen und die Betriebssicherheit zu erhalten, werden Turbinenbauteile regelmässig revidiert oder ersetzt. Um den Abrasionswiderstand der Bauteile zu erhöhen, werden vermehrt Hartbeschichtungen angewendet, welche aber bei hoher Beanspruchung auch beschädigt werden können. Da das Schwebstoffaufkommen im Wasser je nach Jahreszeit, der hydrologischen Situation, der Gletscherentwicklung und dem Wetter stark variiert, ist eine weitere Möglichkeit, den Betrieb solcher Wasserkraftanlagen vorübergehend einzustellen, z.B. während Hochwasser nach Gewittern im Sommer (Boes *et al*. 2013, Felix 2017). Solche Massnahmen zur Optimierung des Betriebs und des Unterhalts von Wasserkraftanlagen, die von hydro-abrasivem Verschleiss betroffen sind, sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

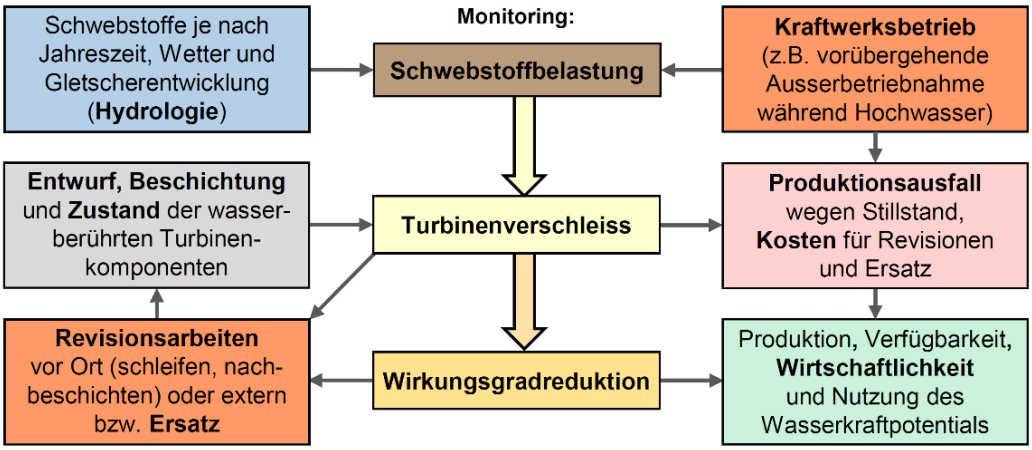
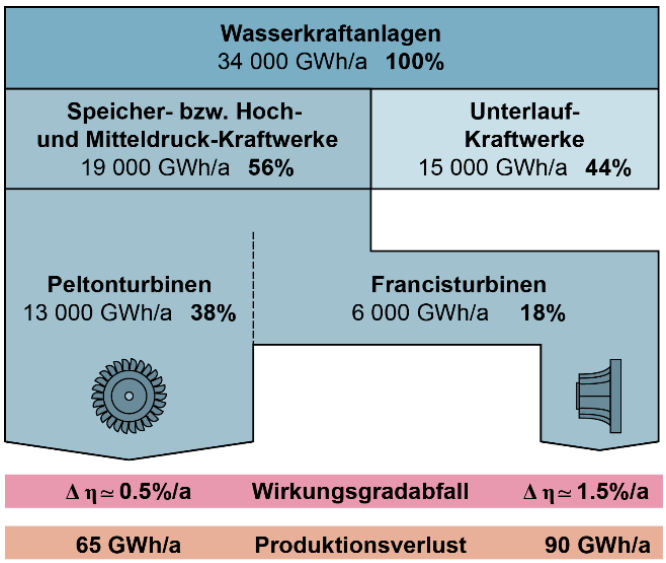


Abbildung 2: Einflussgrössen und Auswirkungen sowie Handlungsmöglichkeiten (orange) betreffend hydro-abrasivem Verschleiss an hydraulischen Turbinen; in der Mitte die Bereiche des Monitorings.

In der Schweiz stammt etwas mehr als die Hälfte der hydroelektrischen Produktion aus Hoch- bzw. Mitteldruckkraftwerken, welche von hydro-abrasivem Verschleiss betroffen sein können. Kalberer (1988) schätzte die dadurch verursachten Wirkungsgradreduktionen für Pelton- und Francisturbinen im zeitlichen Mittel auf 0.5 bzw. 1.5 % (Abbildung 3).



Mit der heute noch annähernd gültigen Produktionserwartung von ca. 13 TWh pro Jahr aus Wasserkraftanlagen mit Peltonturbinen in der Schweiz resultiert somit eine Produktionseinbusse in der Grössenordnung von 65 GWh pro Jahr.

Mit dem Elektrizitätsverbrauch eines typischen Haushalts von ca. 4000 kWh pro Jahr (Zweipersonenhaushalt in Mehrfamilienhaus mit Anteil Elektroboiler) entspricht dies dem Verbrauch von etwa 16'000 Haushalten.

Abbildung 3: Energiewirtschaftliche Bedeutung von Turbinenabrasion (Kalberer 1988).

1.2 Notwendigkeit von Messungen an Kraftwerksanlagen

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 einer Prototyp-Anlage durchgeführt. Im vorliegenden Pilotprojekt wurde der letzteren Methode aus folgenden Gründen der Vorzug gegeben:

- Die massgebenden Verschleiss-Prozesse können (noch) nicht alle numerisch modelliert werden, u.a. weil entsprechende Kalibrierungs- bzw. Validierungsgrundlagen fehlen und die massgebenden Prozesse der Abrasion in einer Peltonturbine (dreidimensionale Strömung mit freien Oberflächen, Partikelbahnen und –kollisionen mit den Turbinenbauteilen, Gefügeschädigungen und Materialabtrag) aufwändig zu simulieren sind und sich diese Verfahren erst im Entwicklungsstadium befinden.
- Bei Untersuchungen an physikalischen Modellen im Labor stellt sich die Frage nach der Skalierbarkeit der Ergebnisse von der reduzierten Grösse auf den Prototypen. Während für viele Strömungsphänomene Modellgesetze und deren Anwendungsgrenzen bekannt sind, sind beim hydro-abrasivem Verschleiss noch nicht alle Massstabseffekte geklärt.
- Für die praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse wurde Wert auf eine starke Praxisorientierung des Projekts und die Zusammenarbeit mit einem Kraftwerksbetreiber gelegt.

1.3 Forschungsprojekte am Kraftwerk Fieschertal

Um die Thematik der Turbinenabrasion weiter zu untersuchen, initiierten die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich und das Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Hydromaschinen der Hochschule Luzern (HSLU) im Jahr 2011 ein langjähriges Forschungsvorhaben am Kraftwerk (KW) Fieschertal. Das Vorhaben basierte auf Vorarbeiten der HSLU, der Masterarbeit von A. Abgottspon (2011) und der Erfahrungen von Prof. Dr. Robert Boes am KW Dorferbach (Tirol). Die Untersuchungen am KW Fieschertal wurden in mehreren Projekten massgeblich durch das BFE gefördert. In den Jahren von 2012 bis 2017 war dies im Rahmen des BFE Forschungsprogramms Wasserkraft, in den Jahren von 2018 bis 2021 im Rahmen eines Pilotprojekts des BFE:

– Im **Teil a)** (SI/500638-01) wurden im ersten Semester 2012 verschiedene Schwebstoffmesstechniken im Labor untersucht. Von Sommer 2012 bis Ende 2013 wurden die Konzentration und Partikelgrössenverteilung der Schwebstoffe im Triebwasser des KW Fieschertal mit verschiedener Messmethoden kontinuierlich erfasst und die Wirkungsgradänderungen gemessen.

– Vom Herbst 2013 bis Ende 2014 wurde die Turbinenabrasion im Teilprojekt „Monitoring der Abnutzung an Bechern von Peltonturbinen mittels 3d-Digitalisierungen und Schichtdickenmessungen“ (SI/500960-01) periodisch erfasst und anschliessend ausgewertet.

– Im **Teil b)** (SI/500638-02) wurden die Schwebstoff- und Wirkungsgradmessungen im Jahr 2014 weitergeführt und ausgewertet. In den Jahren 2015 und 2016 wurden für den Wissensaustausch in diesem Fachgebiet zwei Tagungen/Workshops auf Deutsch bzw. Englisch in Horw bzw. Grenoble durchgeführt.

– Im **Teil c)** (SI/500638-03) wurden die Schwebstoff- und Wirkungsgradmessungen in den Jahren 2015 bis 2017 weitergeführt und teilweise ausgewertet. Im Sommer 2017 wurde die Dissertation von Felix (2017) veröffentlicht, in der die Auswertung der Messdaten von 2012 bis 2014 und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt sind.

– Im **Pilotprojekt** (SI/501610-01) wurden Schwebstoff-, Abrasions- und Wirkungsgradmessungen in den Jahren von 2018 bis 2020 weitergeführt und ausgewertet. Insbesondere wurden die Abrasion an den Laufrädern nach einem Unterbruch in den Jahren 2015–2017 wiederum mit detaillierter 3d-Vermessung (Digitalisieren) erfasst. Im 2021 wurde zum Abschluss eine Fachtagung in Naters (VS) organisiert und durchgeführt.

Der vorliegende **Schlussbericht** bezieht sich auf das BFE-Pilotprojekt in den Jahren von 2018 bis 2021. Die wesentlichen Resultate des Schlussberichts der Teile a) bis c) sind im vorliegenden Schlussbericht integriert, um die Resultate der gesamten Untersuchungsdauer 2012–2020 zusammenzufassen. Zum Teilprojekt „Monitoring der Abnutzung an Pelton-Bechern“ besteht ein separater Schlussbericht (Felix et al. 2015b).

1.4 Zielsetzung

Die Zielsetzungen des Forschungsprojekts waren:

- Quantifizieren der Schwebstoffbelastung, der Turbinenabrasion und der Wirkungsgradänderungen im KW Fieschertal über mehrere Jahre;
- Untersuchung von Instrumenten zur Schwebstoffmessung inklusive solcher, die an Wasserkraftanlagen in der Schweiz bis vor Beginn des Projekts nicht eingesetzt wurden, und deren Implementierung in eine Wasserkraftanlage unter realen Betriebsbedingungen;
- Untersuchung messtechnischer Probleme mit Drucksensoren in Wasserkraftanlagen mit hohem Schwebstoffaufkommen und Entwicklung von Lösungsansätzen;
- Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von vorübergehenden Ausserbetriebnahmen der Kraftwerksanlage während hoher Schwebstoffbelastung (typischerweise nach Gewittern), mit Abschätzung eines Schwellenwertes der Schwebstoffkonzentration («Abschalt-*SSC*»);
- Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit von Revisionsarbeiten an Laufrädern von Peltonturbinen;
- Wissenstransfer mit einer Tagung zum Schluss des Projekts und entsprechenden Publikationen auf Deutsch und Englisch.

Mit den Untersuchungen soll Betreibern von Wasserkraftanlagen, die stark von hydro-abrasivem Verschleiss betroffen sind, anhand eines Pilotprojekts aufgezeigt werden, dass

- praxistaugliche Messinstrumente und -methoden verfügbar sind und sich in Kraftwerksleitsysteme integrieren lassen,
- diese – zusammen mit dem entsprechenden Knowhow – verlässliche Messresultate liefern,
- sich aus den Messungen typische Grössenordnungen und Modelle ableiten lassen, welche mit den Messdaten zusammen für Optimierungen des Betriebs und des Unterhalts nützlich sind.

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 Schwebe 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 Untersuchung als Massekonzentration (g/l) verwendet
- Partikelgrössenverteilung (Particle Size Distribution, PSD)
- Partikelform (qualitativ)
- Partikelhärte (üblicherweise auf der Mohs-Skala)
- Feststoffdichte

Ein üblicher Parameter zur Beschreibung der Grössen von natürlicherweise vorkommenden Partikeln ist der Median-Partikeldurchmesser d_{50}. Er bezeichnet denjenigen Durchmesser, der von 50 % der Partikelmasse überschritten wird, d.h. die Hälfte der Partikelmasse ist gröber oder feiner.

2.1.2 Messmethoden

Da die *SSC* und PSD zeitlich stark variieren können, sind Messmethoden für deren kontinuierliche Erfassung erforderlich. Wenn Messresultate in Echtzeit verfügbar sind, können sie für Betriebsentscheidungen verwendet werden und bieten so einen höheren Nutzen als nachträglich eintreffende Resultate (z.B. von Laboranalysen).

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, Rai & Kumar 2015). 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 von Bedeutung ist die Methode der *SSC*-Bestimmung via Dichtemessung in schwingenden Messrohren. 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 in Wasserkraftanlagen noch nicht verbreitet (Bishwakarma & Støle 2008).

Weiter ist eine akustische Methode zu erwähnen, die sich für das Schwebstoffmonitoring in grösseren Wasserkraftanlagen anbietet, weil in vielen solchen Anlagen bestehende Installationen für die akustische Durchflussmessung (ADM) genutzt werden können. Diese Methode beruht auf der Dämpfung von Ultraschallsignalen, die von den im Wasser suspendierten Partikeln verursacht wird (Costa *et al.* 2012). Auf diese Methode wird in Abschnitt 4.1.4 näher eingegangen.

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 vor Beginn der Studie am KW Fieschertal im Jahr 2012 noch kein LISST-Gerät in einer Wasserkraftanlage installiert.

Die Partikelform- und härte werden vor allem durch die Geologie bestimmt und sind somit Eigenschaften eines Einzugsgebiets. In der Regel werden nur wenige Sedimentproben pro Kraftwerk auf diese Parameter untersucht, da die Partikelform- und härte im Lauf der Zeit weniger variieren als die *SSC* und die PSD. Die Partikelform kann aufgrund von Mikroskop-Bildern von getrockneten Sedimentpartikeln bestimmt werden. Für die Quantifizierung der Härte von mineralischen Partikeln wird die Mohs-Skala (von 1 für Talk – über 7 für Quarz – bis 10 für Diamant) verwendet. Durch Rietveld-Röntgenbeugungs-analyse (relativ aufwändig) können die in einer Probe vorkommenden Mineralien identifiziert und deren Massenanteile im Labor bestimmt werden.

Bei 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 Hydro-abrasiver Verschleiss

2.2.1 Definition und Einflussfaktoren

Der Abtrag von Material durch eine partikelbeladene Strömung (3 Phasen-System) wird als hydro-abrasiver Verschleiss oder Abrasion bzw. auf Englisch gemäss IEC 62364 (2013/2019) als *hydro-abrasive erosion* bezeichnet. Als Folge davon tritt oft Kavitation auf, welche zu Sekundärschäden führt (Gummer 2009). Auf Deutsch ist Erosion ist ein weiterer Begriff für Materialverlust durch verschiedene Prozesse.

Der hydro-abrasive Verschleiss hängt stark von der Relativgeschwindigkeit der partikelhaltigen Strömung gegenüber den Turbinenbauteilen ab (Krause & Grein 1996, Thapa 2004). Die hydraulische Funktionsweise und der Entwurf von Peltonturbinen wurden z.B. von Zhang (2016) beschrieben. Bei Peltonturbinen nehmen die Strahlgeschwindigkeit und die Relativgeschwindigkeit der Strömung am Laufrad mit der Fallhöhe zu. Daher ist bei grösseren Fallhöhen verstärkte Turbinenabrasion zu erwarten (Mei 1996 und IEC 62364 (2019)).

Gemäss zahlreichen Untersuchungen ist die Abrasionsrate, d.h. der Masseverlust pro Zeiteinheit, in erster Näherung (bei nicht zu hohen *SSC*) proportional zur *SSC*. Kantige Partikel verursachen stärkeren Verschleiss als gerundete Partikel (Nozaki 1990, auszugsweise publiziert in Ortmanns 2006). Für die Abrasion 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.

Gröbere Partikel verursachen bei gleicher *SSC* in der Regel mehr Abrasion als feinere (Nozaki 1990; Sulzer Hydro 1996, auszugsweise publiziert in DWA (2006)). Insbesondere für die Abrasion an Mittel-schneiden von Peltonturbinen spielt die Partikelgrösse gemäss Laborversuchen von Winkler *et al.* (2011a) eine wichtige Rolle (Abbildung 4a).

Die Abrasionsrate hängt auch vom Winkel ab, mit welchem die Sedimentpartikel auf die Oberfläche treffen. Bei duktilen Materialien ist die Abrasionsrate am grössten, wenn die Partikel unter 20° bis 40° auftreffen. Bei spröden Materialien hingegen ist die Abrasionsrate am grössten, wenn die Partikel senkrecht aufprallen (Abbildung 4b). Die Hartbeschichtung weist ein sprödes Verhalten auf.

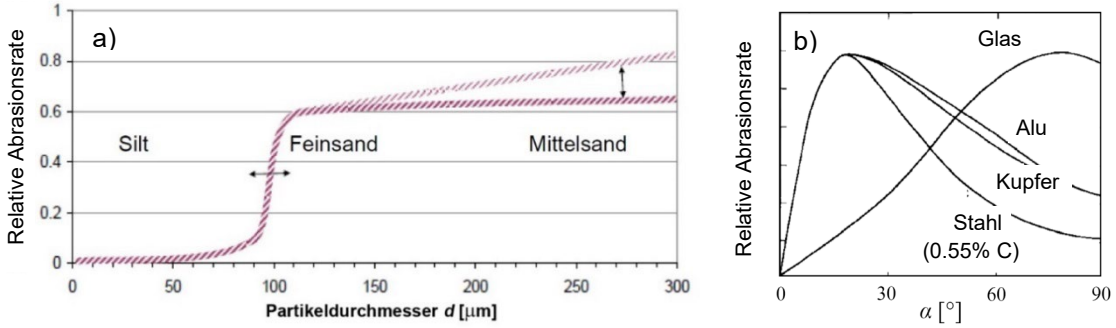


Abbildung 4: a) Relative Abrasionsrate an den Mittelschneiden der Becher eines Peltonlaufrads in Funktion der Partikelgrösse gemäss Laborversuchen nach Winkler *et al.* (2011a). b) Relative Abrasionsrate je nach Auftreffwinkel der Partikel *α* für drei duktile Materialien (Aluminium, Kupfer und Stahl) sowie für Glas als ein sprödes Material (Preece & Macmillan 1977, Smelzer *et al.* 1970).

2.2.2 Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2013/2019) für hydraulische Turbinen allgemein

Gemäss der Richtlinie IEC 62364 (2013/2019) kann die absolute Abtragsrate infolge hydro-abrasivem Verschleiss an hydraulischen Turbinen gemäss einem Konzept, das u.a. in Winkler et al. (2011a) beschrieben ist, wie folgt abgeschätzt werden:

$$\frac{\Delta d_e}{\Delta t} = \frac{K_f}{RS^p} K_m \, w^x \, SSC \, k_{size} \, k_{shape} \, k_{hardness} \qquad (1)$$

Δt Betriebsstunden [h];
Δd_e Abrasionstiefe [mm] während Δt;
K_f Beiwert zur Berücksichtigung der Anströmung [mm·s^x/(kg·h·m$^{0.4-p}$)];
RS Referenzabmessung (*Reference Size*) der Turbine [m],
für Peltonturbinen RS = innere Becherbreite B;
p Exponent zur Berücksichtigung von krümmungsbedingten Einflüssen [-];
K_m Beiwert zur Berücksichtigung des Materials an der Bauteiloberfläche [-],
K_m = 1 für üblichen, martensitischen Turbinenstahl mit 13 % Cr und 4 % Ni,
K_m < 1 für Beschichtungen;
w Charakteristische Relativgeschwindigkeit [m/s] zwischen der Strömung und dem Turbinenbauteil; unterschieden nach Düse (*injector*) und Laufrad (*runner*):
Düse (feststehend): $w_{inj} = \sqrt{2gh_n}$
Laufrad (drehend): $w_{run} = 0.5\sqrt{2gh_n}$
mit Nettofallhöhe h_n [m] und Erdbeschleunigung g [m/s^2]; die effektive Relativgeschwindigkeit am Laufrad ist etwas tiefer als der charakteristische Wert für w_{run} (z.B. Zhang 2016);
x Exponent [-], gemäss IEC x = 3.4, Literaturwerte variieren zwischen 2 und 4;
SSC Schwebstoffkonzentration (*Suspended Sediment mass Concentration*) [g/l] = [kg/m^3];
k_{size} Beiwert zur Berücksichtigung der Partikelgrösse [-], gemäss IEC d_{50} / 1000 µm,
in der Literatur aber auch andere Funktionen vorhanden;
k_{shape} Beiwert zur Berücksichtigung der Partikelform [-], gemäss Anhang D der IEC-Richtlinie: k_{shape} = 1 für gerundete, 1.5 für leicht kantige bzw. 2 für kantige Partikel;

$k_{hardness}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Partikelhärte [-]; massgebend ist gemäss IEC ist der Massenanteil der Partikel, die härter sind als das Oberflächenmaterial, d.h.
- Mohshärte > 4.5 für unbeschichtete Bauteile aus üblichem Turbinenstahl bzw.
- Mohshärte > 6.5 für hartbeschichtete Bauteile (Felix 2017).

Um die Abrasionstiefe seit dem Referenzzeitpunkt t_0 bis zum Zeitpunkt t abzuschätzen, wird Gl. (1) über die Zeit integriert. Mit Messwerten zu bestimmten Zeitpunkten führt dies zu einer Summierung der "gewichteten Konzentrations-Stunden". Dabei bezeichnet i die Laufnummer des Zeitschritts:

$$d_e(t) = \frac{K_f}{RS^p} K_m \, w^x \underbrace{\sum_{i=1}^{(t-t_0)/\Delta t} SSC_i \, k_{size,i} \, k_{shape,i} \, k_{hardness,i} \, \Delta t}_{PL(t)} \tag{2}$$

Die Parameter K_f, RS, p, K_m, w und x sind konstant oder werden als konstant angenommen. Die "gewichteten Konzentrations-Stunden" werden gemäss IEC 62364 (2013/2019) als Partikelbelastung (*Particle Load*, *PL*) bezeichnet, welche ein Mass für die «Schwebstoffbelastung» seit t_0 darstellt.

Die IEC 62364 (2013/2019) enthält numerische Werte für die Modellparameter K_f und p für Francisturbinen, nicht aber für Peltonturbinen. Weiter sind keine K_m-Werte für Beschichtungsmaterialen enthalten und es wird nicht darauf eingegangen, dass bei beschichteten Turbinen nach der zumindest stellenweisen Abrasion der Beschichtung über ihre ganze Dicke auch das Grundmaterial erodiert werden kann.

2.2.3 Anpassung des IEC-Modells für beschichtete Peltonlaufräder gemäss Felix (2017)

Um zu berücksichtigen, dass die Abrasion in einem Peltonbecher (im Gegensatz zu Laufrädern von Francis- und Kaplanturbinen) nur während eines Bruchteils der Betriebszeit stattfindet, wurde die Partikelbelastung pro Becher PL_b eingeführt (Felix 2017):

$$PL_b = \frac{z_0}{z_2} PL \tag{3}$$

PL_b Partikelbelastung pro Becher (*bucket*) [h·g/l];
PL Totale Partikelbelastung gemäss Gl. (2) [h·g/l];
z_0 Anzahl der Wasserstrahlen (Düsen in Betrieb) [-];
z_2 Anzahl Becher [-].

Das Verhältnis z_0/z_2 berücksichtigt, dass die Abrasionsrate mit der Anzahl Wasserstrahlen zunimmt (mehr Becher sind gleichzeitig der Abrasion ausgesetzt) und mit der Becheranzahl abnimmt (die Becher sind pro Laufradumdrehung weniger lang der Abrasion ausgesetzt). Das Verhältnis z_0/z_2 wird auch in IEC 62364 (2013/2019) im Abschnitt 3.2 (*Reference model*) genannt und geht auf frühere Publikationen u.a. von Sulzer/Escher-Wyss zurück.

Felix (2017) wandte das IEC-Abrasionsmodell für die beschichteten Becher der Peltonlaufräder des KW Fieschertal an. Mit der vorhandenen Datengrundlage konnten nicht alle Einflussgrössen gesondert quantifiziert werden. Deshalb wurde von Felix (2017) ein zusammenfassender Parameter C_g eingeführt, welcher als Kalibrierkonstante des Modells dient:

$$C_g = \frac{K_f}{RS^p} K_m \tag{4}$$

Der Exponent der charakteristischen Geschwindigkeit wurde basierend auf verschiedenen Literaturquellen betreffend Peltonturbinen zu x = 3 festgelegt. Damit folgt das Abrasionsmodell für unbeschichtete Peltonbecher:

$$d_e(t) = C_g \; w^3 \; PL_b(t) \tag{5}$$

Bei beschichteten Laufrädern wird zunächst bis zu einem Schwellenwert der Partikelbelastung $PL_{b,0}$ die Beschichtung abgetragen. Erst danach setzt die Abrasion des Grundmaterials ein. Somit berechnet sich die Abrasionstiefe des Grundmaterials nach Abtrag der Beschichtung (2. Phase der Abrasion):

$$d_e(t) = C_g \; w^3 \left(PL_b(t) - PL_{b,0} \right) \quad \text{für} \quad PL_b(t) > PL_{b,0} \tag{6}$$

Bei der Anwendung dieser Formel für die Berechnung von Abrasionstiefen d_e an verschiedenen Stellen innerhalb von Peltonbechern sind w und PL_b Eingabegrössen. Die Koeffizienten C_g und $PL_{b,0}$ sind die Parameter des Modells. Felix (2017) hatte diese für das KW Fieschertal bereits anhand der Messungen in den Jahren 2012–2014 bestimmt. Damit kann die Abrasion an vier Stellen eines Peltonbechers abgeschätzt werden. Die geometrischen Grössen und die aus deren Differenzen über die Zeit resultierenden Verschleissgrössen sind in Abbildung 5 definiert. Da sich die Datengrundlage mittlerweile um die Messungen in den Jahren 2018–2020 erweitert hat, wurden die Koeffizienten C_g und $PL_{b,0}$ im Rahmen dieses Projekts neu bestimmt (Abschnitt 5.4.1).

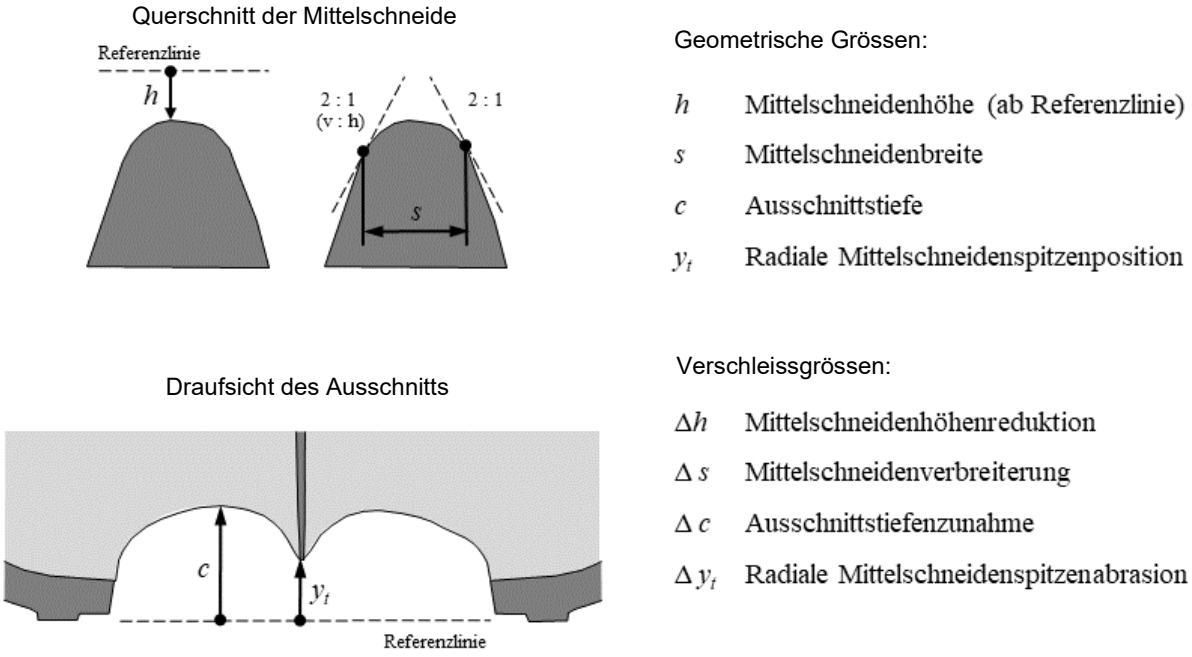


Abbildung 5: Definition der geometrischen Grössen und Verschleissgrössen für Peltonbecher nach Felix (2017).

2.2.4 Anpassung des IEC-Modells für Peltonturbinen gemäss Rai *et al.* (2020b)

Rai *et al.* (2020b) haben ebenfalls das IEC-Abrasionsmodell auf Peltonturbinen angewendet. Aufgrund von Messdaten von sieben Wasserkraftanlagen in Europa (u.a. Fieschertal) und Asien sowie physikalischen Modellversuchen in Indien (am IIT Roorkee, Rai *et al.* 2020a) kalibrierten sie die Parameter K_f, p und K_m. Es wurden auch unbeschichtete Laufradbecher und Düsen untersucht. Da Turbinen unterschiedlicher Grösse (*RS*) betrachtet wurden, konnte auch der Parameter p kalibriert werden.

Für die Partikelbelastung der Becher wurde PL_b nach Felix (2017) gemäss Gl. (3) übernommen. Die Düsenbauteile sind der totalen Partikelbelastung *PL* ausgesetzt. Für die Abrasion an Düsen wird als Referenzabmessung *RS* der Strahldurchmesser d_S (statt der inneren Becherbreite *B*) berücksichtigt:

$$d_S = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_T}{z_0 \cdot \pi \cdot \sqrt{2gh_n}}} \quad (7)$$

d_S Strahldurchmesser am Austritt der Peltondüse [m];
Q_T Turbinendurchfluss [m³/s]; Annahme bei Ausbaudurchfluss Q_A;
z_0 Anzahl Düsen [-].

Es wird davon ausgegangen, dass sich d_S als charakteristische Grösse einer Düse unabhängig vom tatsächlichen Durchfluss stets auf deren nominalen Strahldurchmesser bezieht, der mit dem Ausbaudurchfluss Q_A und allen Düsen in Betrieb berechnet wird.

Die Parameter p und K_f wurden für die Abrasion an verschiedenen Stellen der Becher und Düsen kalibriert, die in Abbildung 6 und Abbildung 7 definiert sind. Die Höhenreduktion und die Verbreiterung der Mittelschneiden sind nicht genauer definiert als in Abbildung 5 und somit ähnlich wie in Felix (2017). Bei Rai *et al.* (2020b) wurde die Abrasion an den Becherausschnittskanten entlang der „geneigten" Oberfläche im Bereich der Becherausschnitte gemessen, während sie bei Felix (2017) in Richtung der Laufradachse definiert ist (in der Draufsicht des Bechers). Für unbeschichtete Becher bringen Rai *et al.* (2020b) in ihrer Beschreibung die Bechergrundabrasion $S_{\Delta B}$ auch mit der Abrasion auf den stark gekrümmten Flächen auf der Innenseite der Becherwände (Becheraustritt) in Verbindung.

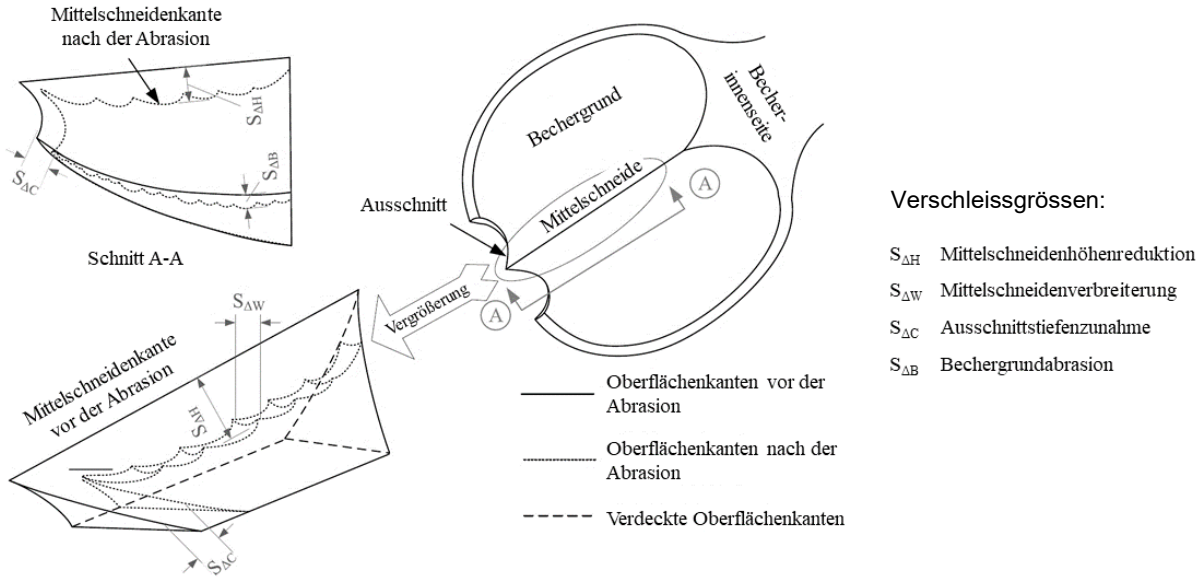


Abbildung 6: Geometrische Definitionen der Verschleissgrössen für Laufradbecher von Peltonturbinen nach Rai *et al.* (2020b).

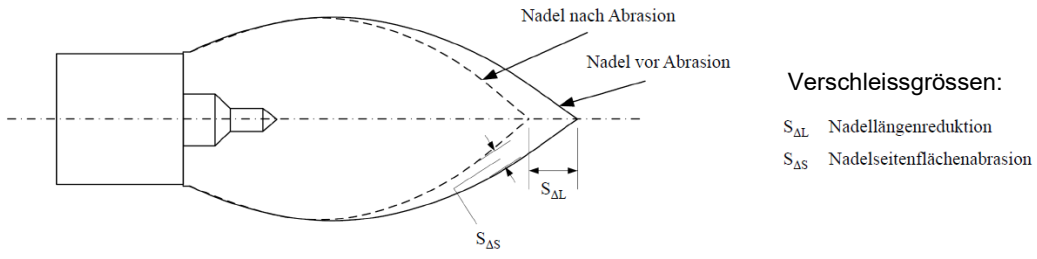


Abbildung 7: Geometrische Definition der Verschleissgrössen für Düsennadeln von Peltonturbinen nach Rai et al. (2020b)

Für den Exponenten der charakteristischen Geschwindigkeit nahmen Rai *et al.* (2020b) für die Abrasion an den Mittelschneiden ($S_{\Delta H}$ und $S_{\Delta W}$) x = 3 wie bei Felix (2017) an, da dieser Wert spezifisch für die Abrasion an Pelton-Mittelschneiden gestützt auf Winkler (2011a) gewählt worden war. Für alle anderen Anwendungsfälle übernahmen sie x = 3.4 gemäss IEC 62364 (2013/2019) und passend zu Resultaten ihrer Laborversuche (Rai *et al.* 2020a).

Die numerischen Werte von p und K_f für die verschiedenen Anwendungsfälle sind in der Tabelle 1 angegeben. Bei der Anwendung ist zu berücksichtigen, dass die berechneten Verschleissgrössen von den tatsächlichen abweichen können (Standardabweichung bis 35 %). Die Koeffizienten betreffend die Düsennadel sind überraschend unterschiedlich. Vermutlich ist die Unsicherheit noch zu hoch, da für deren Bestimmung nur 4 Datensätze zur Verfügung standen. Zum Vergleich: Die Koeffizienten an den vier Stellen der Laufradbecher bestimmten Rai *et al*. (2020b) aufgrund von 6 bis 9 Datensätzen. Die in der IEC-Richtlinie verfügbaren Koeffizienten für Francisturbinen sind ebenfalls aufgrund von 6 bis 7 Datensätzen bestimmt worden. In einem Anwendungsbeispiel lieferten die Koeffizienten für die Nadellängenreduktion $S_{\Delta L}$ unplausible Resultate. Daher wurden diese Koeffizienten in Tabelle 1 grau dargestellt.

Tabelle 1: Parameter p und K_f des IEC-Abrasionsmodells für verschiedene Bauteile von Peltonturbinen (Rai *et al.* 2020).

Bauteil	Anwendungsfall	p [-]	K_f [mm·s^x/(kg·h·m$^{0.4-p}$)]	Std.abw. von geschätzten d_e
Becher	Mittelschneidenhöhenreduktion $S_{\Delta H}$	1.15	$4.21 \cdot 10^{-6}$	24 %
	Mittelschneidenverbreiterung $S_{\Delta W}$	2.69	$0.68 \cdot 10^{-6}$	35 %
	Ausschnittstiefenzunahme $S_{\Delta C}$	1.11	$1.10 \cdot 10^{-6}$	30 %
	Bechergrundabrasion $S_{\Delta B}$	0.83	$1.06 \cdot 10^{-6}$	30 %
Düsen	Nadelseitenflächenabrasion $S_{\Delta S}$	5.10	$2.72 \cdot 10^{-12}$	28 %
	Nadellängenreduktion $S_{\Delta L}$	1.51	$4.47 \cdot 10^{-9}$	18 %
	Einsatzringabrasion	4.31	$4.06 \cdot 10^{-12}$	22 %

In IEC 62364 (2013/2019) ist der Materialparameter K_m = 1 für den üblichen Turbinenstahl definiert, aber es sind keine numerischen Werte für andere Materialien enthalten. Rai *et al.* (2020b) haben K_m anhand physikalischer Modellversuche für Laufradbecher mit sechs verschiedenen Grund- und Beschichtungsmaterialien bestimmt (Tabelle 2). Es ist aber nicht näher beschrieben, für welche Beanspruchungsart diese Werte gelten (z.B. fast rechtwinkliger Anprall auf Mittelschneiden oder eher schleifende Einwirkung im Bechergrund).

Tabelle 2: Koeffizient K_m für verschiedene Materialien (Rai *et al.* 2020).

Material	Koeffizient K_m [-]
Bronze	2.18
16Cr-5Ni-Stahl	1.03
16Cr-4Ni-Stahl	1.00
13Cr-4Ni-Stahl (= Referenz)	1.00
13Cr-4Ni-Stahl mit Cr_2O_3-Beschichtung	0.57
13Cr-4Ni-Stahl mit WC-Co-Cr-Beschichtung	0.12

2.2.5 Typische Schäden an Peltonturbinen

An Peltonlaufrädern treten Verschleissschäden 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

(Felix 2017, Rai *et al.* 2021, Arora *et al.* 2022). Weiter können Schäden an Nadeln und Düsenringen auftreten (Bajracharya *et al.* 2008, Felix 2017, Guo *et al.* 2020).

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

2.2.6 Typische Revisionsarbeiten und Zustandsprüfungen an Peltonturbinen

Bei Laufrädern von kleineren Peltonturbinen (typischerweise unter 1 m Laufrad-Aussendurchmesser) werden oft keine Revisionsarbeiten durchgeführt. D.h. die fabrikneuen Laufräder werden eingesetzt und so lange betrieben, bis der Wirkungsgrad unakzeptabel abgenommen hat oder die Abrasionsschäden so stark zugenommen haben, dass zu starke Vibrationen auftreten und der Betrieb zu unsicher wird. Danach werden die verschlissenen Laufräder und Düsenbauteile entsorgt.

Bei grösseren Laufrädern, wie im Fall des KW Fieschertal mit 2.8 m Aussendurchmesser, werden verschiedene Revisionsarbeiten an den Laufrädern durchgeführt, so dass diese auch bei hoher Schwebstoffbelastung mehrere Jahrzehnte verwendet werden können. Dabei macht die Einsatzdauer nur einen Teil der Lebensdauer der Laufräder aus, da diese zeitweise als Ersatzteile bereitstehen bzw. in Revision sind. Bei den Revisionsarbeiten an Pelton-Laufrädern können kleine und grosse Revisionen unterschieden werden, welche oft zusammen mit Zustandsprüfungen durchgeführt werden (Thomann 1988):

Kleine Revisionen (vor Ort, im Turbinengehäuse), falls erforderlich jedes Jahr in der abflussarmen Jahreszeit (im Winter), dauert wenige Wochen:

- Schleifen (Abrunden) der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten,
- Eventuell stellenweise Reparaturen durch Schweissen von Hand,
- Kontrolle auf Risse (Magnetpartikelprüfung) insbesondere an der Becherwurzel,
- Bei beschichteten Läufern: Lokale Nachbeschichtung, falls «blanke» Stellen sichtbar, typischerweise an Mittelschneiden und Bechereintrittskanten (Abbildung 8).



Abbildung 8: Laufradbecher mit Nachbeschichtung der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten (hellere Bereiche) am Beispiel des Laufrads 2 (in MG 1), Becher 2, März 2019 (Foto: VAW).

Grosse Revisionen (extern, in der Regel beim Hersteller der Original-Bauteile oder allenfalls bei weiteren Dienstleistern, bedingt also Ausbau und Transport des Laufrads): in der Regel nach mehreren kleinen Revisionen, kann mit Abwicklung des externen Auftrags etwa ein Jahr dauern und führt zu einem Laufrad, das punkto Wirkungsgrad als neuwertig bezeichnet werden kann:

- Falls beschichtet: vollständiges Abtragen der Beschichtung durch spezielles Sandstrahlen,
- Prüfung auf Risse (Magnetpulverprüfung, Farbeindringprüfung),
- Wiederauftragen des erodierten Materials durch Schweissen (manuell oder mittels Roboter),
- Vorschleifen oder maschinelle Bearbeitung zur Annäherung an die geplante Geometrie,
- Prüfen auf Risse und Poren,
- Wärmebehandlung mit kontrolliertem Abkühlen,
- Dynamisches Auswuchten,
- Abschluss des Schleifens zur Wiederherstellung der ursprünglichen Geometrie und Polieren,
- Bei beschichteten Läufern: Auftragen der Beschichtung im Inneren der Becher (normalerweise durch einen Sprühroboter),
- Schlusskontrolle.

2.3 Wirkungsgradänderungen infolge hydro-abrasivem 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 Fluiddichte ρ, der Erdbeschleunigung g, der Nettofallhöhe h_n und des Volumenstroms Q (auch Durchfluss genannt) berechnet werden:

$$\eta_{Ma} = \frac{P_{Gen}}{\rho g h_n Q} \tag{8}$$

Mit der thermodynamischen Methode ist der hydraulische Wirkungsgrad einer Turbine am genausten messbar. Eine solche Messung liefert einen absoluten Wirkungsgrad und ist aufwändig, da nebst den oben genannten Grössen weitere Grössen zu messen sind, was spezielle Installationen erfordert. Für ein Wirkungsgradmonitoring im Zusammenhang mit Turbinenabrasion sind die Veränderungen des Wirkungsgrads im Lauf der Zeit von Interesse. Daher sind relative Werte, so genannte Indexwirkungsgrade, ausreichend.

Der Turbinenwirkungsgrad kann durch hydro-abrasiven Verschleiss und allfälliger Folgeschäden stark reduziert werden: Beim Pelton-Kraftwerk Dorferbach (Österreich) mit einer Bruttofallhöhe von 686 m wurde an einem unbeschichteten Laufrad innerhalb von vier Monaten eine Wirkungsgradabnahme von mehr als 5 % festgestellt (Runner 1 in Abbildung 9). 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, Padhy & Saini 2011).

Um Revisionsarbeiten an Peltonlaufrädern wirtschaftlich optimieren zu können, sind Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen geometrischen Veränderungen am Laufrad (Abrasion) und den damit einhergehenden Wirkungsgradreduktionen erforderlich.

Als wichtige Kenngrösse gilt die Mittelschneidenbreite *s* (Maldet 2008, Boes 2009). Für Turbinen mit unterschiedlich grossen Laufrädern kann die Mittelschneidenbreite auf die innere Becherbreite *B* bezogen werden und wird dann als relative Mittelschneidenbreite *s*/*B* bezeichnet (Bozic *et al.* 2004). Brekke *et al.* (2002) gaben als Richtwert an, dass der Volllast-Wirkungsgrad einer unbeschichteten Peltonturbine um etwa 1 % abnimmt, wenn die Mittelschneidenbreite auf 1 % der inneren Becherbreite zunimmt. In der Literatur sind kaum weitere quantitative Angaben über die Zusammenhänge zwischen geometrischen Veränderungen an den Laufradbechern und Wirkungsgradreduktionen zu finden.

Nebst der Mittelschneidenverbreiterung haben auch Geometrieveränderungen im Bereich der Mittelschneidenspitze und der Bechereintrittskanten sowie Veränderungen der Rauheit im Becher (z.B. starke Wellen- oder Riffelbildung bei unbeschichteten Laufrädern) – und allenfalls der Düsenbauteile Auswirkungen auf den Turbinenwirkungsgrad.

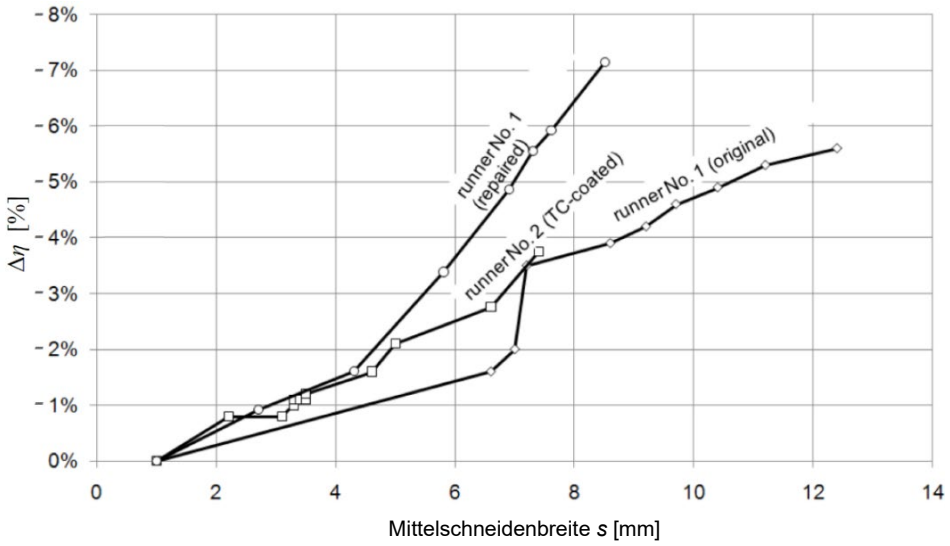


Abbildung 9: Absolute Wirkungsgradreduktionen von Peltonturbinen $\Delta\eta$ in Funktion der Mittelschneidenbreite *s* am KW Dorferbach (Maldet 2008).

Für weitere Informationen zu den physikalischen Grundlagen und zum Stand der Technik bezüglich des Phänomens des hydro-abrasiven Verschleisses an Peltonturbinen, zu möglichen Gegenmassnahmen und Messmethoden wird auf Felix (2017) und entsprechende Fachliteratur verwiesen.

2.4 Ausserbetriebnahme während hoher Schwebstoffbelastung

Bei seltenen Hochwassern und Unwettern, bei welchen z.B. Fassungen wegen hohem Geschiebeaufkommen nicht mehr betrieben werden können, Unterwasserspiegel unzulässig hoch ansteigen oder Übertragungsleitungen, Kommunikationseinrichtungen oder Zufahrtswege gestört sind, bleibt Betreibern von Laufwasserkraftanlagen in der Regel nichts anderes übrig, als den Turbinenbetrieb vorübergehend zu unterbrechen («Störung» wegen «höherer Gewalt»).

Aber auch bei weniger extremen Ereignissen kann es aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein, Laufwasserkraftanlagen in Phasen mit ausserordentlich hohem Sedimentaufkommen im Triebwasser vorübergehend ausser Betrieb zu nehmen. In solchen Phasen können die Kosten der Verschleissschäden grösser sein als der Erlös aus der Elektrizitätsproduktion (Boes *et al.* 2013). Im Alpenraum treten stark erhöhte *SSC* während kurzer Zeit, in der Regel weniger als einem Tag, typischerweise an Sommerabenden nach Gewittern auf.

Voraussetzungen für die systematische Umsetzung dieser Betriebsoption sind

- Technische und vertragliche Möglichkeiten des Energieversorgungsunternehmens, welches den produzierten elektrischen Strom abnimmt, den vorübergehenden Ausfall eines Kraftwerks von den übergeordneten Randbedingungen her zu tolerieren bzw. zu kompensieren (Produktionsverpflichtungen bzw. Produktionsausgleich durch andere Kraftwerke innerhalb einer Bilanzgruppe).
- Zuverlässige, möglichst frühzeitige Alarme von stark erhöhten *SSC* im Triebwasser und/oder im Zulauf zur Wasserfassung (redundantes Messsystem für Echtzeit-Schwebstoffmonitoring).
- Schwellenwert der *SSC*, ab welchem die Anlage ausser Betrieb genommen werden soll, im Folgenden «Abschalt-*SSC*» genannt.
- Technische Einrichtungen und Betriebsorganisation des Kraftwerksbetreibers (Leitsystem, Fernwirkanlagen und Pikettdienst).

In der Literatur sind nur wenige Angaben betreffend Abschalt-*SSC* verfügbar, welche von 1.1 bis 10 g/l variieren (Tabelle 3). In den Literaturquellen sind die Berechnungen für die Abschalt-*SSC* oft nicht im Detail dargestellt und daher nicht alle nachvollziehbar. Oft wurden vereinfachende Annahmen getroffen, um erste Werte für die Abschalt-*SSC* abzuschätzen, die dann im Lauf der Jahre aufgrund zunehmender Betriebsdaten verbessert werden können.

Tabelle 3: Abschalt-*SSC* für andere Kraftwerksanlagen gemäss Literaturstudie (Felix 2017, ergänzt mit 4 Peltonanlagen aus Bhutan).

Wasser-Kraft-werk, Land	Turbinen-kenndaten	Schwebstoffkenndaten (Mineralogie und Partikel-grössen)	Ab-schalt-*SSC*	Laufrad mit Hartbe-schichtung	Quelle
Dorferbach, Österreich	Pelton, 1 x 10 MW h_B = 686 m, 4 Dü-sen, B = 228 mm	Quarzgehalt ~ 50 %, oft 12 ≤ d_{50} ≤ 60 µm	**1.1 g/l**	Zuerst nein, dann ja	Boes (2009, 2010)
Basochhu Upper Stage, Bhutan	Pelton, 2 x 12 MW h_N = 337 m, 2 Dü-sen, B = 570 mm	Quarzgehalt 46 %, Feldspatgehalt 7 %, d_{50} ≈ 190 µm	**1.4 g/l**	nein	Namgyal und Tandin (2021)
Basochhu Lower Stage, Bhutan	Pelton, 2 x 20 MW h_N = 459 m, 4 Dü-sen, B = 580 mm	Quarzgehalt 45 %, Feldspatgehalt 5 %, d_{50} ≈ 140 µm	**1.7 g/l**	nein	Namgyal und Tandin (2021)
Chhukha, Bhutan	Pelton, 4 x 84 MW h_N = 435 m, 6 Dü-sen, B = 786 mm	Quarzgehalt 44 %, Feldspatgehalt 4 %, d_{50} ≈ 84 µm	**6.5 g/l**	ja	Namgyal und Tandin (2021)
Tala, Bhutan	Pelton, 6 x 170 MW h_N = 819 m, 5 Dü-sen, B = 747 mm	Quarzgehalt 40 %, Feldspatgehalt 3 %, d_{50} ≈ 57 µm	**5.5 g/l**	ja	Namgyal und Tandin (2021)
Dharasu, Indien	Francis, 4 x 76 MW h_N = 248 m	Quarz- und Feldspatgehalt = 72 %, 90 % ≤ 150 µm	**3 g/l**	Zuerst nein, dann ja	Singh *et al.* (2013)
Jhimruk, Nepal	Francis, 3 x 4 MW h_N = 202 m	Quarz- und Feldspatgehalt = 83 %, 80 % < 100 µm	**3 g/l**	nein	Pradhan (2004), Elkvik (2013)
Cahua, Peru	Francis, 2 x 22 MW h_B= 215 m	Quarzgehalt = 78 %, 82 % ≤ 60 µm	**3 g/l**, **10 g/l**	Zuerst nein, dann ja	Espinoza (2016)

3 Beschreibung des Kraftwerks Fieschertal

3.1 Übersicht

Als geeignete Anlage für das Projekt wurde, wie in Abschnitt 1.3 erwähnt, das KW Fieschertal gewählt, an welchem seit Inbetriebnahme im Jahre 1975 starker hydro-abrasiver Verschleiss beobachtet worden war. In dieser Hochdruck-Wasserkraftanlage wird Wasser aus einem stark vergletscherten Einzugsgebiet ohne Aufenthalt in einem Speichersee turbiniert (Abbildung 10). Der Ausbaudurchfluss der Anlage beträgt 15 m³/s und die Bruttofallhöhe 520 m. Im Maschinenhaus sind zwei horizontalachsige Peltonturbinen mit einer nominellen Leistung von je 32 MW installiert. Damit resultiert ein mittlerer Anlagenwirkungsgrad von gegen 84 % bezogen auf die Bruttofallhöhe.

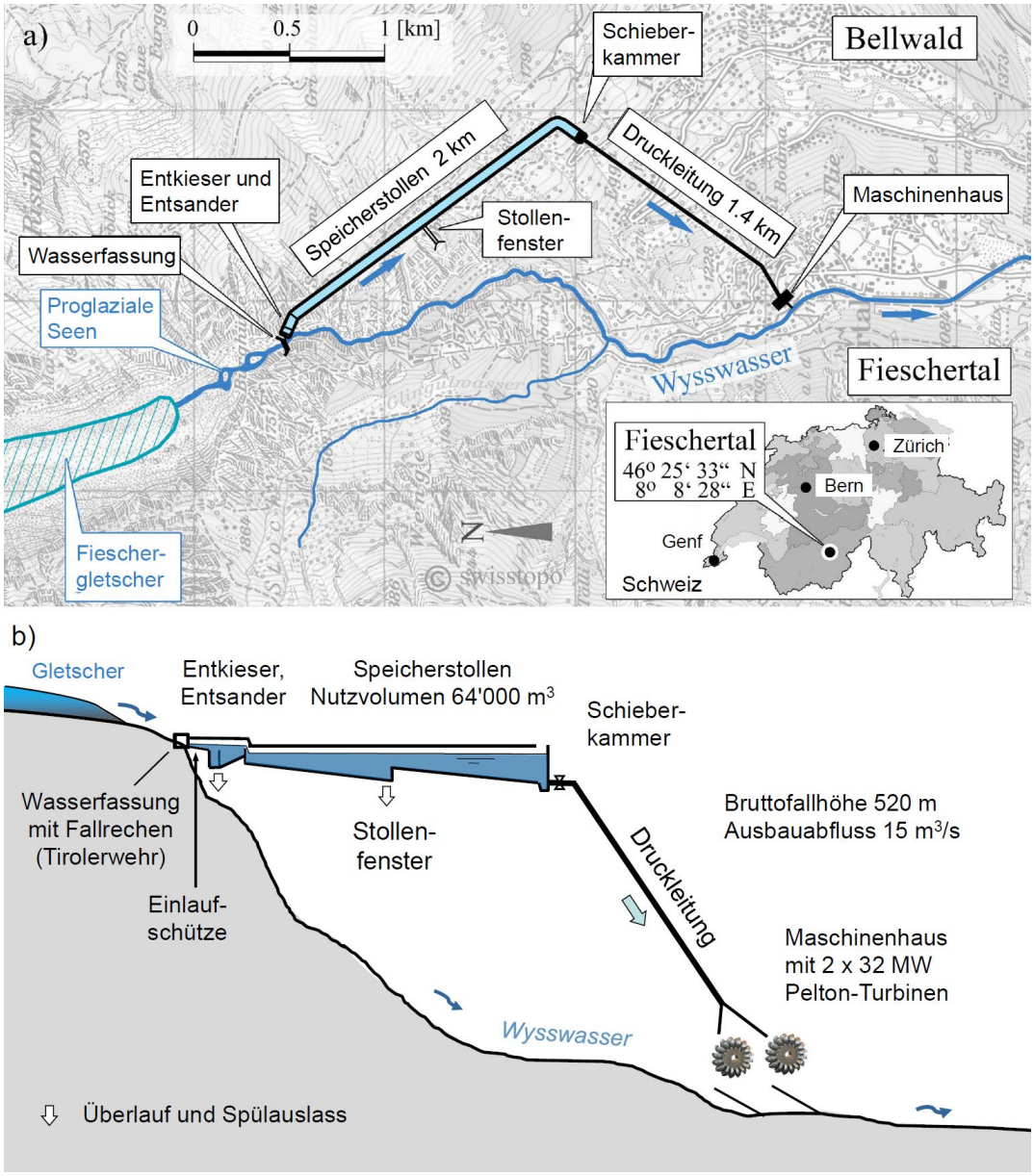


Abbildung 10: KW Fieschertal a) im Lageplan und b) im schematischen Längenprofil (nach Abgottspon *et al.* 2016a bzw. Felix 2017; Plangrundlagen: gkw; Kartengrundlage: Bundesamt für Landestopografie).

Die mittlere Produktionserwartung des KW Fieschertal beträgt gemäss Statistik der Wasserkraftanlagen (BFE 2019) 142 GWh/Jahr, wovon 13 GWh (9 %) im Winterhalbjahr (Oktober-März). Der Grossteil der Produktionserwartung (91 %) entfällt also auf die Sommermonate (alpines Laufwasserkraftwerk). Die effektive Produktion war in der vergangenen Dekade vor allem aufgrund des Eismassenverlusts des Fieschergletschers höher: die beiden MG produzierten je etwa 80 GWh/Jahr (Abschnitt 5.7.1). Mit einer nominellen Leistung von 32 MW pro MG resultieren 2500 volllast-äquivalente Betriebsstunden pro Jahr (80'000 MWh / 32 MW = 2500 h). Mit einem turbinierten Volumen von rund 140 Mio. m^3 (Abschnitt 5.1.5) resultiert ein Arbeitswert von aufgerundet 1.2 kWh/m^3.

3.2 Einzugsgebiet und Gletscherentwicklung

Das Einzugsgebiet des KW Fieschertal hat eine Fläche von 58.6 km^2 (maps.geo.admin.ch). Im Jahr 2016 wurden davon 29.8 km^2 durch den Fieschergletscher bedeckt (nach Swiss Glacier Inventory 2016, in Grab *et al.* 2021). Das entspricht einem Vergletscherungsgrad von 51 %. Die übrige Einzugsgebietsfläche ist zum Grossteil unbewachsen. Der Fieschergletscher liegt östlich neben dem bekannten Grossen Aletschgletscher (Abbildung 11a). Der Fieschergletscher ist nach dem Aletschgletscher der zweitlängste Gletscher der Alpen. Bezüglich Eisvolumen (ca. 3.5 km^3 im Jahr 2016) ist er der drittgrösste Gletscher der Schweiz (nach dem Grossen Aletsch und dem Gornergletscher).

Von Beginn der verfügbaren Aufzeichnungen im Jahr 1891 bis zum Bau der Wasserfassung des KW Fieschertal in den frühen 1970er-Jahren zog sich der Fieschergletscher in etwa 80 Jahren um 600 m zurück. Bis ins Jahr 2000 (ca. 27 Jahre) verkürzte er sich um weitere 300 m und bis zur jüngsten publizierten Vermessung 2015 um weitere 400 m in nur 15 Jahren (Glamos 2021). Die Reduktion der gletscherbedeckten Fläche in der Umgebung der Wasserfassung ist in Abbildung 11b dargestellt.

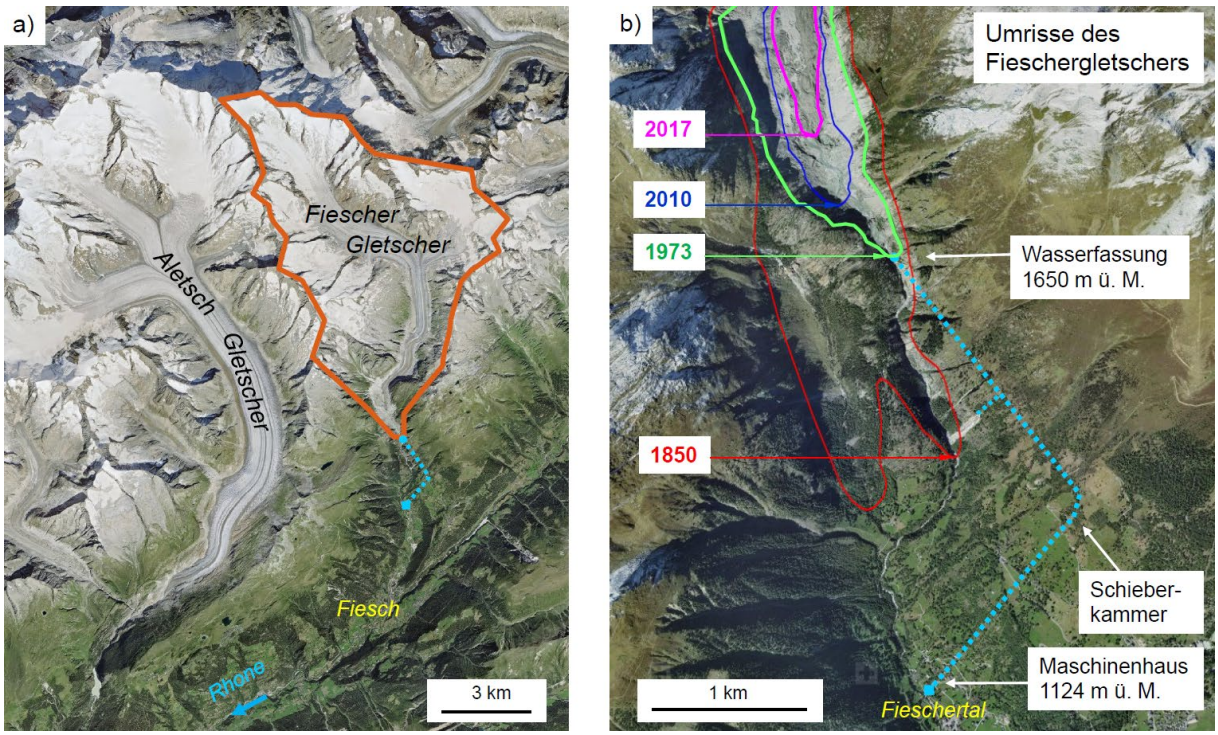


Abbildung 11: a) Lage und Einzugsgebiet des KW Fieschertal und b) Umrisse des sich zurückziehenden Fieschergletschers (Luftbilder: Bundesamt für Landestopografie via maps.geo.admin.ch; Gletscherumrisse von Swiss Glacier Inventory SGI, www.glamos.ch).

Die Wasserfassung wurde direkt an die damalige Gletscherzunge gebaut. Da sich diese in den fast 50 Jahren bis heute um mehr als 700 m zurückzog, ist in der Geländekammer stromaufwärts der Fassung ein Gletschervorfeld entstanden (Abbildung 12). Durch die Schmelze von Eis im Untergrund bildeten sich diverse Wasserflächen, so genannte proglaziale Seen. Von dem Gletscher, dem Gletschervorfeld und den Hängen sind Sedimente aller Fraktionen reichlich verfügbar. Gröbere Sedimente (Steine und Kies) lagern sich in den kleinen Seen ab, während Feinsedimente (Silt vom Gletscherschliff) vermutlich zum Grossteil in Schwebe bleiben und auch ohne Regenereignisse zur Wasserfassung transportiert werden.

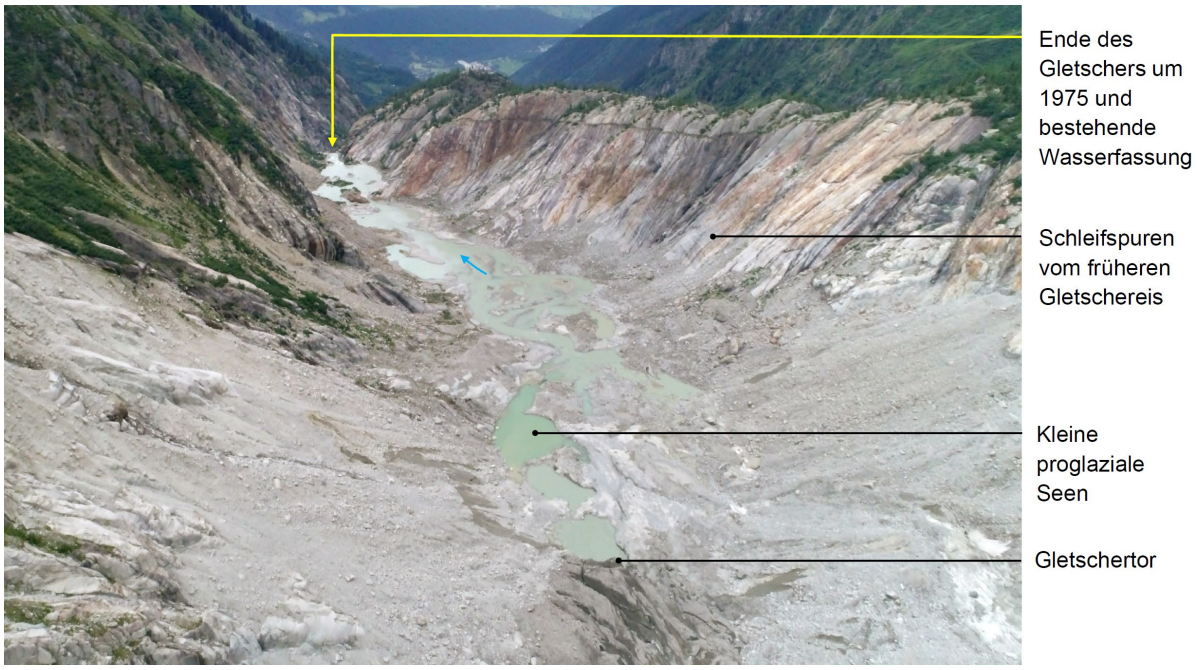


Abbildung 12: Blick vom Ende des Fieschergletschers talauswärts auf das Gletschervorfeld, das seit den 1970-er Jahren aufgrund des Gletscherrückzugs entstand (Drohnenbild: 21.07.2020, VAW).

Dem Fieschergletscher entspringt der Gebirgsfluss Wysswasser. Durch eine felsige Schlucht erreicht das Wysswasser den Talboden des Fieschertals, wo es nach Fiesch fliesst und unterhalb des Dorfs in den Oberlauf der Rhone (Rotten) mündet. Zwischen Fieschertal und Fiesch wird bzw. wurde dem Wysswasser Kies und Sand (Baumaterial) entnommen. Zwischen dem Dorf Fiesch und der Einmündung in den Rotten ist seit 2012 ein Kleinwasserkraftwerk mit 2 Francisturbinen in Betrieb.

3.3 Fassungsbauwerke

Die Wasserfassung besteht aus einem festen Wehr mit zwei Feldern (Abbildung 13). Stromabwärts des Wehrfelds mit der tiefer gelegenen Schwelle (stahlgepanzert) befindet sich ein geneigter Fallrechen, mit welchem nominal bis 16 m^3/s gefasst werden können. Es handelt sich um eine der grössten Fallrechenfassungen der Alpen. Das zweite Wehrfeld mit der um 1.25 m höher gelegenen Schwelle dient als Hochwasserüberlauf. Bei Unwettern oder für Revisionsarbeiten kann eine Einlaufschütze im anschliessenden unterirdischen Kanal geschlossen werden. Unterhalb des Wehrs ist ein mit Eisenbahnschienen ausgekleidetes Tosbecken für die Energieumwandlung des überlaufenden Wassers angeordnet. Da das Wehr in der tiefen Schlucht nicht auf Fels fundiert werden konnte, sickert eine gewisse Wassermenge unter dem Wehr ins Unterwasser; eine eigentliche Dotierwasserabgabe ist gemäss gültiger Konzession nicht vorgeschrieben.

Von Fallrechen führt ein Kanal zum Entkieser und Entsander, die in einer Kaverne angelegt wurden (Abbildung 14).

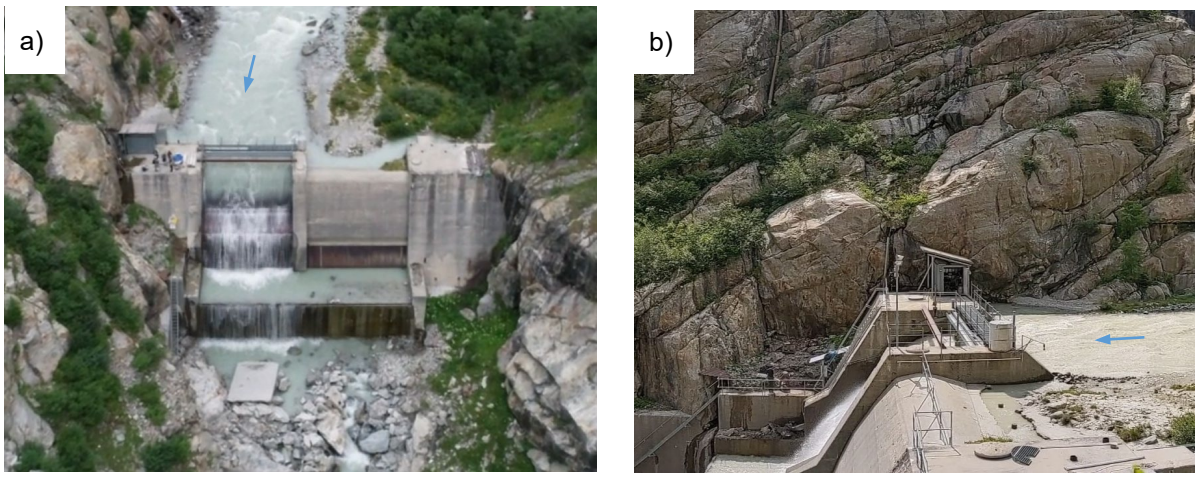


Abbildung 13: a) Blick gegen die Fliessrichtung auf die Wasserfassung des KW Fieschertal (Drohnenbild: 21.07.2020, VAW) und b) Seitenansicht (Foto 22.07.2021, VAW).

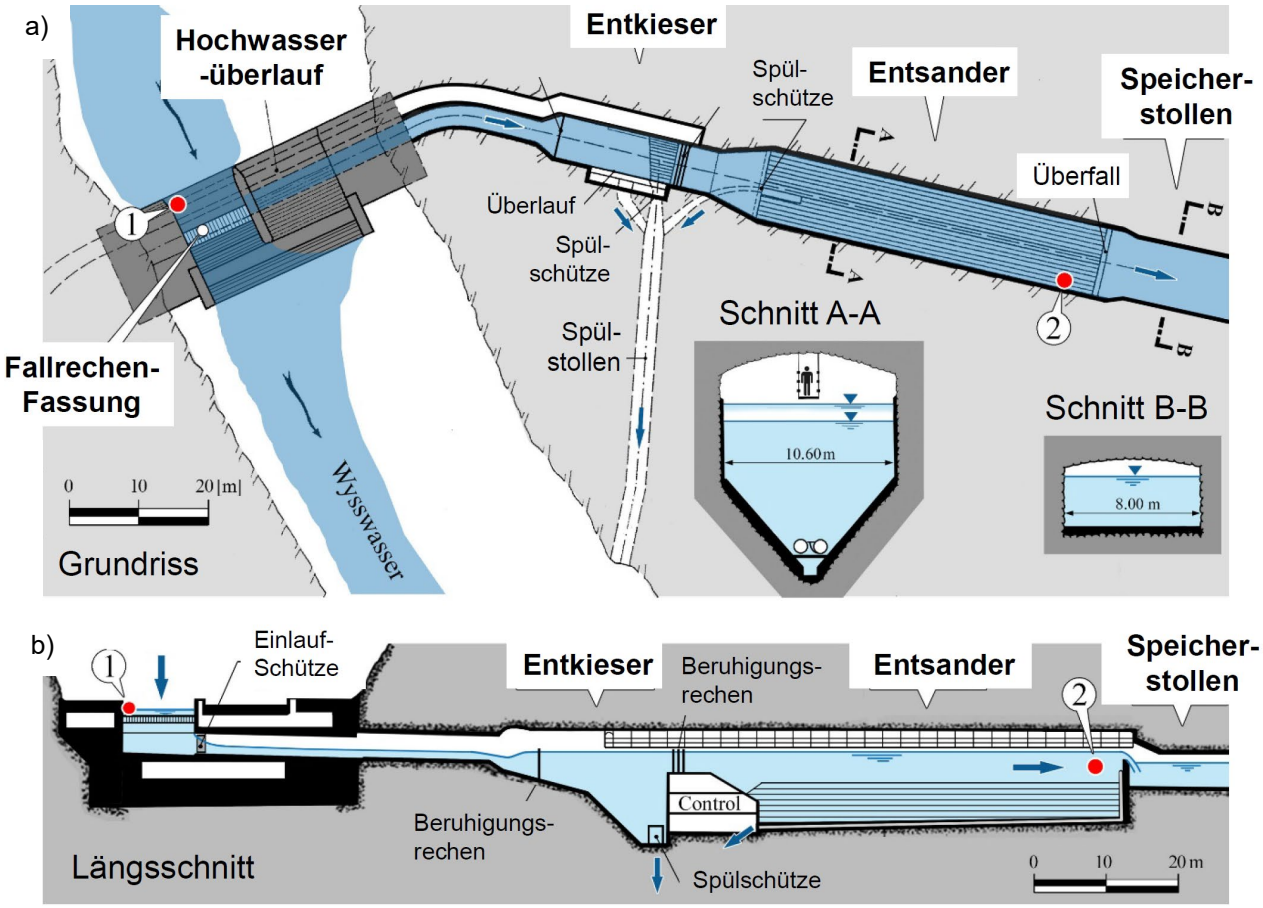


Abbildung 14: Bauwerke im Fassungsbereich des KW Fieschertal a) im Grundriss und b) im Längsschnitt entlang des Triebwasserwegs (Felix 2017, Plangrundlagen: gwk). Die Messstellen 1 und 2 beziehen sich auf die Abschnitte 4.1.2 bzw. 4.1.3.

Der Entkieser kann mit einer seitlichen Tafelschütze und dem anschliessenden Kanal gespült werden. Der 50 m lange Entsander, mit einem dreireihigen Beruhigungsrechen am Einlauf, ist mit dem Spülsystem «Hochschule Rapperswil HSR» ausgerüstet. Dieses ermöglicht, den abgelagerten Sand ohne Absenkung des Wasserspiegels ins Wysswasser zurückzuspülen (Truffer *et al.* 2009). Die Sohlen und sohlnahen Wandbereiche der Kanäle von der Fassung bis zum Auslauf des Spülkanals sind mit Schmelzbasaltplatten ausgekleidet, um den Beton vor Abrasion durch Geschiebe zu schützen. In den Jahrzehnten bevor sich die kleinen Seen im Gletschervorfeld bildeten, gelangten grosse Geschiebemengen zur Fassung und in deren Bauwerke. Damals waren bis zu 300 Entkieserspülungen pro Jahr erforderlich und es wurden praktisch in jedem Winter Schäden an der Basaltauskleidung repariert. In den Jahren 2018 und 2019 hingegen waren keine Entkieserspülungen erforderlich.

Am Ende des Entsanders fliesst das Wasser über einen Überfall, an welchem der Abfluss gemessen wird, in den Speicherstollen. Am Steg über dem Wasserspiegel des Entsanders verläuft eine Bypass-Leitung, mit welcher in den Wintermonaten der Zufluss via die sogenannte Winterfassung direkt in den Speicherstollen geleitet werden kann. Dies erlaubt, im Winter ohne Betriebseinschränkungen Revisionsarbeiten an den Kanälen, dem Entkieser und dem Entsander durchzuführen.

3.4 Speicherstollen und Schieberkammer

Der 2 km lange Speicherstollen ist 8 m breit. Mit einer Differenz von 4 m zwischen dem minimalen und maximalen nominellen Betriebspegel kann ein Speichervolumen von 64'000 m^3 genutzt werden. Damit kann die Kraftwerksanlage während einer Stunde mit Volllast betrieben werden, wenn kein Zufluss vorhanden wäre. Dieser kleine Speicher dient ausserhalb der Volllastzeit zum tageszeitlichen Ausgleich von Wasserdargebot und Nachfrage, und ermöglicht im Winter bei geringen Zuflüssen den stundenweisen Teillastbetrieb von einer der beiden Turbinen.

Auf halber Länge des Speicherstollens (Abbildung 15) befindet sich ein Fensterstollen, durch welchen bei Bedarf Wasser und Sediment via einen Überlauf (30 m lange Überlaufkante an der Talseite des Stollens auf 1643.10 m ü. M.) bzw. eine Spülschütze ins Wysswasser zurückgegeben werden können. Sedimente, die sich in der zweiten Stollenhälfte absetzen, werden hingegen je nach Betrieb wieder «aufgewirbelt», d.h. re-suspendiert, und turbiniert. Nach Änderungen des Turbinendurchflusses entstehen Schwall- bzw. Sunkwellen im Freispiegelstollen. Am Ende des Speicherstollens bzw. beim Einlauf in die Druckleitung befindet sich eine Schieberkammer (Abschnitt 4.1.4). Die erdverlegte Druckleitung führt den Abhang hinunter zum Maschinenhaus beim Dorf Fieschertal.

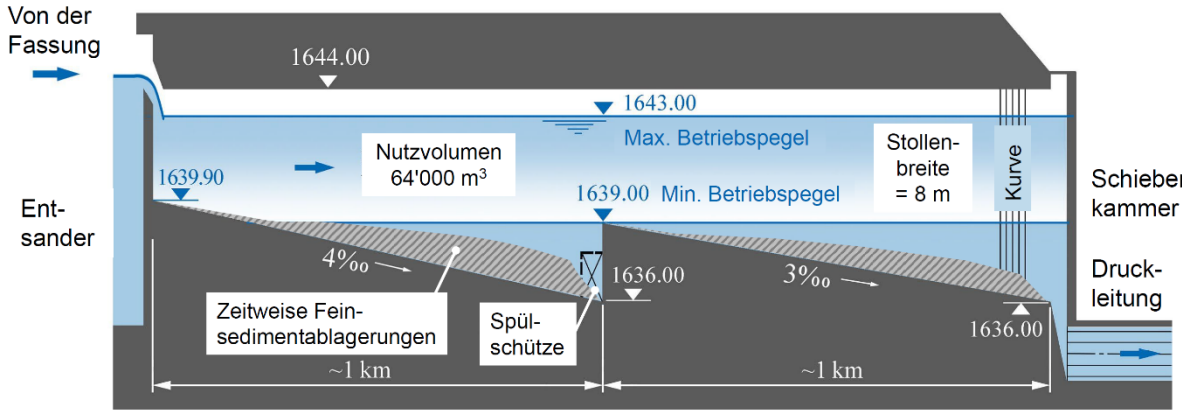


Abbildung 15: Schematisches Längenprofil (überhöht) des Speicherstollens des KW Fieschertal mit möglichen Feinsedimentablagerungen jeweils am Ende des Sommers (Felix 2017, Plangrundlagen: gwk).

3.5 Maschinenhaus, Turbinen und Laufräder

Auf der Bergseite des Maschinenhauses teilt sich die Druckleitung auf die zwei Maschinengruppen (MG) auf (Hosenrohr, Abbildung 16). Stromabwärts der MG vereinigen sich die beiden Unterwasserkanäle und das turbinierte Wasser wird ins Wysswasser zurückgegeben.

Bei den MG handelt sich um zwei baugleiche, horizontalachsige zweidüsige Peltonturbinen mit je einem Laufrad und ihre Generatoren (Baujahr 1974). Die Kenndaten einer MG sind (Felix 2017):

- Nominale Nettofallhöhe h_n = 509 m
- Nominaler Durchfluss (=Volumenstrom) Q_T = 7.5 m³/s (pro Turbine)
- Drehzahl 429 min^{-1} und spezifische Drehzahl n_q = 7.74 min^{-1} bzw. n_{QE} = 0.0233
- Nominale elektrische Wirkleistung 32 MW (pro MG)

Für Inspektionen und Revisionsarbeiten sind die Laufräder je durch eine Panzertür im Turbinengehäuse und mit einem begehbaren Rost zugänglich. Für das Auswechseln von Laufrädern wird der obere Teil des Turbinengehäuses demontiert (Abbildung 17).

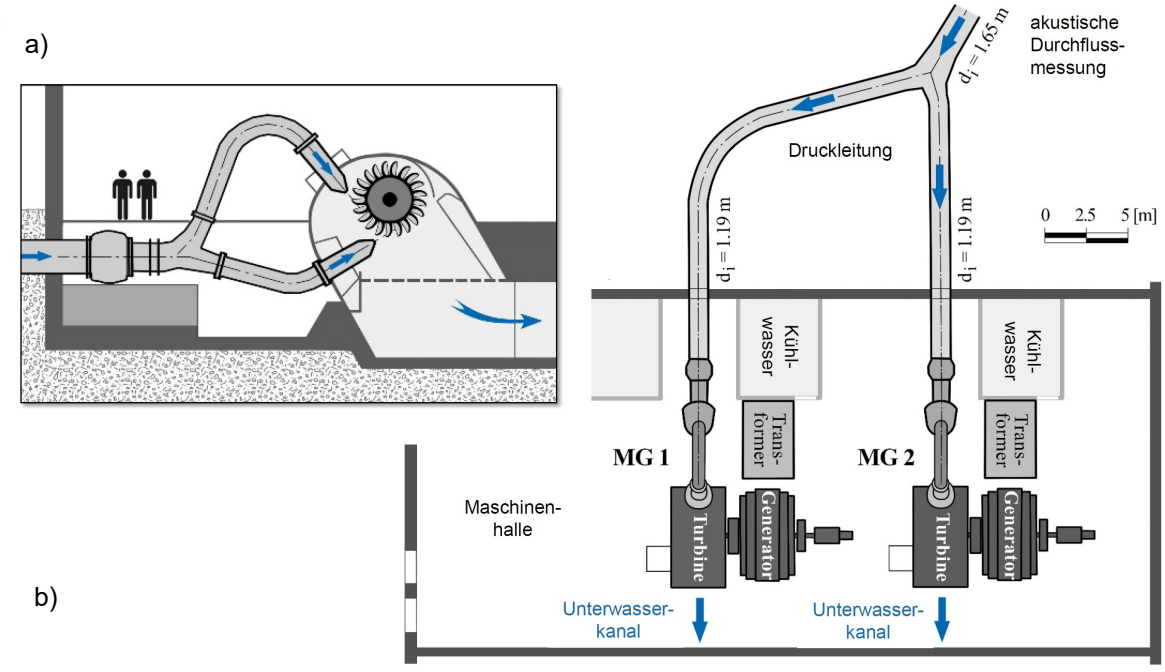


Abbildung 16: a) Schematischer Längsschnitt durch eine Peltonturbine und b) Grundriss des Maschinenhauses des KW Fieschertal (Felix 2017, Plangrundlagen: gwk).

Seit 2005 werden Laufräder verwendet, deren Becherinnenseiten mit einer Hartbeschichtung (Wolframkarbid in Kobalt-Chrom-Matrix) versehen sind. An den Laufrädern werden in der Regel in jedem Winter kleine Revisionen vor Ort und alle etwa sechs Jahre bzw. nach Bedarf eine grosse, externe Revision durchgeführt (Abschnitt 2.2.6).

Im KW Fieschertal sind für die beiden MG grundsätzlich je zwei Laufräder vorhanden. Ein Laufrad ist jeweils in der Turbine montiert. Das andere steht entweder ausgebaut und abgenutzt in der Maschinenhalle, befindet sich in Revision beim Hersteller oder steht danach aufbereitet als Ersatzlaufrad wieder zum Einbau bereit.

Die Laufräder 1 bis 4 stammen aus den Jahren 1974 bis 1987 und wurden bereits mehrmals beim Hersteller einer grossen Revision unterzogen. Im Jahr 2014 wurde das ebenfalls hartbeschichtete Laufrad 5, mit einem dem heutigen Stand der Technik entsprechenden hydraulischen Design, neu angeschafft. Nachdem beim Laufrad 3 bei der alljährlichen Prüfung im Jahr 2014 eine Auffälligkeit im Bereich einer Becherwurzel (mechanisches Problem) festgestellt wurde, wurde dieses entsorgt. Somit sind nach der Beschaffung des Laufrads 5 wieder für jede Turbine zwei Laufräder vorhanden.

Die Laufräder haben einen Strahlkreisdurchmesser von 2090 mm, einen Aussendurchmesser von 2790 mm, wiegen 8.5 t und weisen 20 Becher auf. Die Laufräder 1 bis 4 haben eine innere Becherbreite von B = 650 mm. Die Becher des neueren Laufrads 5 sind mit B = 668 mm unwesentlich breiter.



Abbildung 17: Peltonturbinen und Generatoren im Maschinenhaus des KW Fieschertal während Revisionsarbeiten an der MG 1 (Foto: VAW, Jan. 2019).

Das Düsenmundstück hat einen Durchmesser von 290 mm. Der Strahldurchmesser beträgt 228 mm bei Ausbaudurchfluss. Die Wasserstrahlen verlassen die Düsen mit ca. 100 m/s (360 km/h). Die Düsennadeln haben einen Kegelwinkel von 55°. Die untere Düse ist mit einem Düsenschutzdach ausgerüstet, welches – wie auch die Strahlablenker – starkem hydro-abrasivem Verschleiss ausgesetzt ist. Für die Düsennadeln und -einsatzringe werden seit einigen Jahren Bauteile aus Stellit mit einer Hartbeschichtung verwendet, weil damit gute Erfahrungen gemacht wurden. Diese hochwertigen Bauteile wurden gewählt, weil der Ersatz von Düsenbauteilen im Vergleich zu einem Laufradwechsel aufwändiger ist.

Im KW Fieschertal werden, abgesehen von den Maschinenstarts, stets beide Düsen mit demselben Öffnungsgrad betrieben. Diese Betriebsweise wurde gewählt, um Abrasion zwischen den Düsennadeln und -sitzen zu vermeiden. Solche Abrasion trat früher im Teillastbetrieb auf, wenn sich Düsen nicht perfekt schliessen liessen oder bereits etwas abradiert waren und folglich das Leckagewasser mit hoher Geschwindigkeit austrat. Während des Stillstands einer MG hingegen ist deren Kugelschieber auf der Oberwasserseite geschlossen und allfällige Undichtheiten an geschlossenen Düsen spielen keine Rolle.

4 Messungen im Kraftwerk Fieschertal

4.1 Schwebstoffbelastung

4.1.1 Übersicht über die eingesetzten Messgeräte

Seit 2012 wurde am KW Fieschertal ein System für die Messung der Schwebstoffbelastung aufgebaut. Ein Teil der Messinstrumente und -methoden wurde vorgängig mit verschiedenen Partikelsorten im Labor systematisch untersucht (Abgottspon 2011 und Felix 2017). Für die Messung der Schwebstoffkonzentrationen (*SSC*) und Partikelgrössen (PSD) waren die Messgeräte gemäss Tabelle 4 im Einsatz:

Tabelle 4: Instrumentierung für die Quantifizierung der Schwebstoffbelastung am KW Fieschertal (erweitert von Felix 2017)

Messort	Instrument	Modell und Hersteller	Mess-grösse	In Betrieb
an der Wasserfassung im Gebirgsfluss (Wysswasser)	Trübungssonde (zum Eintauchen)	*CUS41* bzw. *CUS52D* von Endress+Hauser	*SSC*	seit 2013
	Coriolis Durchfluss- und Dichtemessgerät (CFDM, in-line)	*Promass 83* F DN15 von Endress+Hauser	*SSC*	seit 2018
	Automatischer Wasserprobenehmer	*Isco 3700* mit 24 Flaschen; Isco-Teledyne	*SSC*	2013 und 2018–2020
am Ende des Entsanders (am Zufluss zum Speicherstollen)	Trübungssonde (zum Eintauchen)	*CUS51D* von Endress+Hauser	*SSC*	seit 2014
	Akustischer Sensor (zum Eintauchen)	*LISST-ABS* (8 MHz) von Sequoia Scientific	*SSC*	2017–2020
	Automatischer Wasserprobenehmer	*Isco 3700* mit 24 Flaschen; Isco-Teledyne	*SSC*	2014–2020
an der Druckleitung (in der Schieberkammer)	CFDM (in-line)	*Promass 83* F DN15 von Endress+Hauser	*SSC*	seit 2013
	Akustische Durchflussmessung (ADM)	*Risonic* (1 MHz), von Rittmeyer, an Druckleitung	*SSC*	seit 2012 auch für *SSC*
	Laserdiffraktometer (zum Eintauchen bzw. inline-Gerät für Wandmontage)	*LISST-100X* von Sequoia Scientific	*SSC,* PSD	2012–2014, 2017–2019
		LISST-StreamSide von Sequoia Scientific	*SSC,* PSD	2020
	Trübungssonden (in-line)	*AquaScat WTM A* von Sigrist Photometer	*SSC*	2012–2014
		TurBiScat (α = 90° und 25°) von Sigrist Photometer	*SSC*	2012–2013
		TF16-N mit *F20* (α = 0° und 11°) von Optek Danulat	*SSC*	2012–2014
	Automatischer Wasserprobenehmer	*Isco 3700* mit 24 Flaschen; Isco-Teledyne	*SSC*	2012–2014, 2017–2018
Im **Maschinenhaus,** MG 1 und 2	Trübungssonde (zum Eintauchen)	*Solitax ts-line sc* von Hach-Lange	*SSC*	seit 2012

Die meisten Messgeräte wurden in der Schieberkammer am Beginn der Druckleitung installiert, um die Schwebstoffbelastung der Turbinen zu quantifizieren. Um die Sedimentdynamik des Gesamtsystems besser zu verstehen und als Grundlage für vorübergehende Ausserbetriebnahmen des Kraftwerks während hoher Schwebstoffbelastung, wurden auch Instrumente für die Messung der *SSC* im Gebirgsfluss an der Wasserfassung und im Entsander installiert. Die Trübungssonde im Maschinenhaus bieten keine Vorwarnzeit, aber deren Unterhalt ist am unaufwändigsten, da dort Kraftwerksmitarbeiter oft präsent sind.

Die CFDM-Geräte eignen sich für mittlere bis hohe *SSC*. Die Trübungssonden und die akustischen Methoden eignen sich für tiefe bis mittlere *SSC* (Felix *et al.* 2018). Laserdiffraktometrie ist derzeit die einzige Messtechnologie, um Partikelgrössenverteilungen vor Ort mit hoher zeitlicher Auflösung und in detaillierten Grössenklassen zu messen (Abschnitt 2.1.2).

Ein Teil der Messgeräte wurde im Spätherbst 2014, am Ende der Datenerfassungsperiode der Doktorarbeit von Felix (2017) demontiert. Ein weiterer Teil der Messgeräte wurde im Spätherbst 2020 am Ende der Datenerfassungsperiode des vorliegenden Pilotprojekts demontiert. Die restlichen Messinstrumente, die sich für den Langzeiteinsatz zur Unterstützung des Kraftwerksbetrieb eignen, wurden vom Kraftwerksbetreiber übernommen und in der Anlage belassen (ohne Ende der Einsatzperiode in der letzten Spalte der Tabelle 4). Die Signale dieser Messgeräte wurden ins Leitsystem integriert.

In den folgenden Abschnitten werden die Instrumente an den vier Messstellen, dem Lauf des Triebwassers von der Fassung zum Maschinenhaus folgend, näher beschrieben:

4.1.2 Messeinrichtungen an der Wasserfassung

Im Jahr 2013 wurden am Gebirgsfluss Wysswasser, am rechten Widerlager der Wasserfassung, eine **Trübungssonde** installiert (Messstelle 1 in Abbildung 14, Abbildung 18a, b). Es handelt sich um eine Eintauch-Trübungssonde, wie oft in Kläranlagen oder für das Monitoring von Fliessgewässern verwendet. Zum Schutz vor Anprall von Steinen und Eisstücken wurde die Sonde an ihrem Halterohr (ø 40 mm) in einem massiven Schutzrohr (ca. ø150 mm) leicht unterhalb des minimalen Wasserspiegels montiert. Das Schutzrohr ist im unteren Bereich, wo sich die Sonde befindet, gelocht. Die Stirnseite des Schutzrohrs wurde mit aufgeschweissten Stäben geschützt (Abbildung 18c).

Obwohl die Sonde über keine automatische Reinigungseinrichtung verfügt, weist das Messsignal im Sommerhalbjahr keine systematische Zunahme durch Verschmutzung auf, d.h. es tritt in der für die Schwebstoffmessungen relevanten Jahreszeit keine Messwert-Drift auf. Da die Wassertemperatur an der Fassung meist lediglich 1 °C beträgt, ist vermutlich die Biofilmbildung gering und der Sondenkopf wird mit der Strömung des Gebirgsbachs im Sommerhalbjahr ausreichend gereinigt.

Da im Winterhalbjahr auf dem Überfall der Wasserfassung Dammbalken gesetzt werden und sich vor dem Einlauf in die sogenannte Winterfassung ein Aufstau bildet, befindet sich die Sonde im Winterhalbjahr mindestens 0.5 m unter dem Wasserspiegel und ist so weitgehend vor Frost geschützt. Im quasi stehenden Wasser zeigt die Sonde infolge Verschmutzung der Optik nach Wochen unplausibel hohe Trübungswerte, welche aber nicht verwendet werden. Seit 2013 musste die Sonde einmal ersetzt werden, da das ältere Modell *CUS41* (mit Wischer) undicht wurde.

Mit einem automatischen **Wasserprobennehmer** (Abbildung 18d), der im Unterstand auf der Wasserfassung aufgestellt war, wurden während einiger Schwebstoffsaisons alle ca. 10 Tage sowie zusätzlich bei erhöhter Trübung mit einer Peristaltik-Pumpe Wasserproben in Flaschen abgefüllt. Vom Kopf der Trübungssonde führte ein Kunststoffschlauch (Innendurchmesser d_i = 8 mm) zum Probennehmer.

Für die Bestimmung der Schwebstofffracht aus dem Einzugsgebiet sind neben *SSC*-Daten an der Wasserfassung auch Daten zur Wasserführung des Wysswassers (**Zuflussmessung**) erforderlich. In

der Kraftwerksanlage werden seit deren Inbetriebnahme der Abfluss vom Entsander in den Speicherstollen und der Abfluss in der Druckleitung gemessen. So kann vom Abfluss in der Anlage auf den Zufluss geschlossen werden, sofern dieser den Ausbauabfluss der Fassung (16 m^3/s) nicht übersteigt und der Entkieser- und der Entsander nicht gespült werden. Um auch Zuflüsse > 16 m^3/s (insbesondere Hochwasserabflüsse) im Wysswasser messen zu können, wurden unmittelbar oberwasserseitig der Wehrschwellen Radar-Pegelsonden montiert. Nun wird im Sommerhalbjahr ausgehend vom aktuellen Pegelmesswert und einer Pegel-Abflussbeziehung der Zufluss zur Wasserfassung im Leitsystem angezeigt und aufgezeichnet. Der gemessene natürliche Zufluss war für die Interpretation der grösseren Schwebstofftransportereignisse in den Jahren 2017, 2019 und 2020 nützlich.

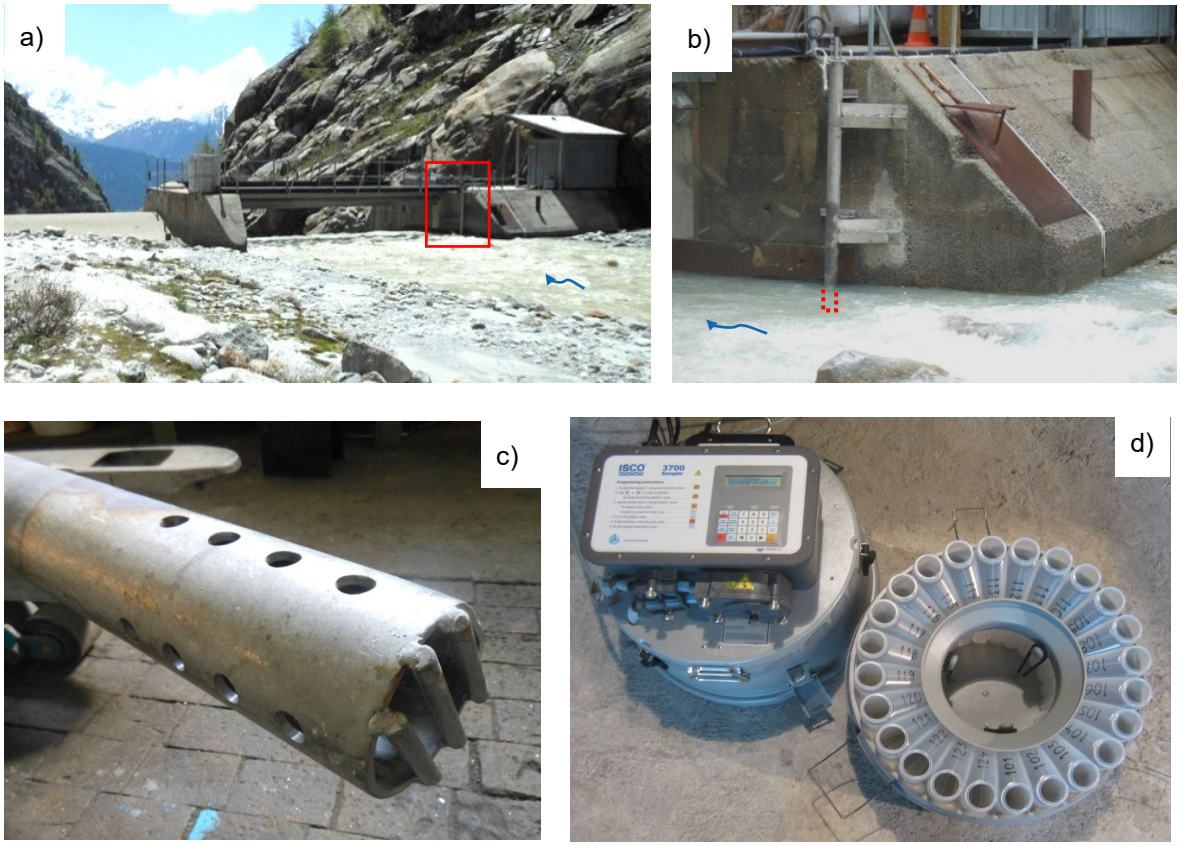


Abbildung 18: a) Wasserfassung des KW Fieschertal mit b) Trübungssonde in einem Schutzrohr am rechten Widerlager, c) Detail des Schutzrohrs im unteren Bereich vor der Montage und d) automatischer Wasserprobenehmer (oberer Teil mit Steuereinheit und drehendem Füllarm abgehoben, um gefüllte Flaschen abzuholen und leere Flaschen einzusetzen) (Fotos: VAW).

Beim Hochwasser im Juli 2017 hat sich gezeigt, dass das Wasser des Gebirgsflusses zeitweise so viel Schwebstoffe enthält, dass die *SSC* nicht durchgehend mit der vorhandenen Trübungssonde gemessen werden kann (Abschnitt 5.6.4). Für die Quantifizierung der Schwebstofffracht während eines Hochwassers und für die Wiederinbetriebnahme der Anlage nach einem allfälligen Betriebsunterbruch ist es aber erforderlich, auch hohe *SSC* messen zu können. Daher wurde im Juli 2018 zusätzlich ein **Coriolis Durchfluss- und Dichtemessgerät (CFDM)** installiert. Ein weiteres solches Gerät ist seit 2013 in der Schieberkammer im Einsatz und bewährt sich für die Messung mittlerer bis hoher *SSC*.

Im Gerät werden der Durchfluss (Volumenstrom), die Gemischdichte und die Mediumstemperatur gemessen. Die Durchflussmessung erlaubt, von Ferne zu kontrollieren, dass die Probenahmeleitung und das CFDM nicht verstopft sind. Die *SSC* wird aus der gemessenen Gemischdichte, der als konstant angenommenen Partikeldichte und der temperaturabhängigen Klarwasserdichte berechnet. Das Gerät

wurde rechtsufrig am luftseitigen Fuss der Mauer der Wasserfassung montiert, so dass es ohne Pumpe, aufgrund des Höhenunterschieds, mit Flusswasser gespeist werden kann (Abbildung 19).

Zu Beginn, d.h. im Jahr 2018, wurde Flusswasser mit einem Schlauch am Widerlager unmittelbar stromabwärts der Trübungssonde gefasst und durch das Messgerät geleitet (Abbildung 19). Der trichterförmige Schlaucheinlauf war zum Schutz vor Verstopfungen mit einem 4 mm-Drahtgeflecht überzogen. Es zeigte sich aber, dass bei Zuflüssen von mehr als 8 m^3/s Luftblasen in den Zuleitungsschlauch des CFDM gelangten, was die Messung der *SSC* erschwerte bzw. verunmöglichte. Der Lufteintrag wurde durch eine stehende Welle verursacht, die von der starken Umlenkung der Strömung vom Bereich oberwasserseitig des Widerlagers resultierte.

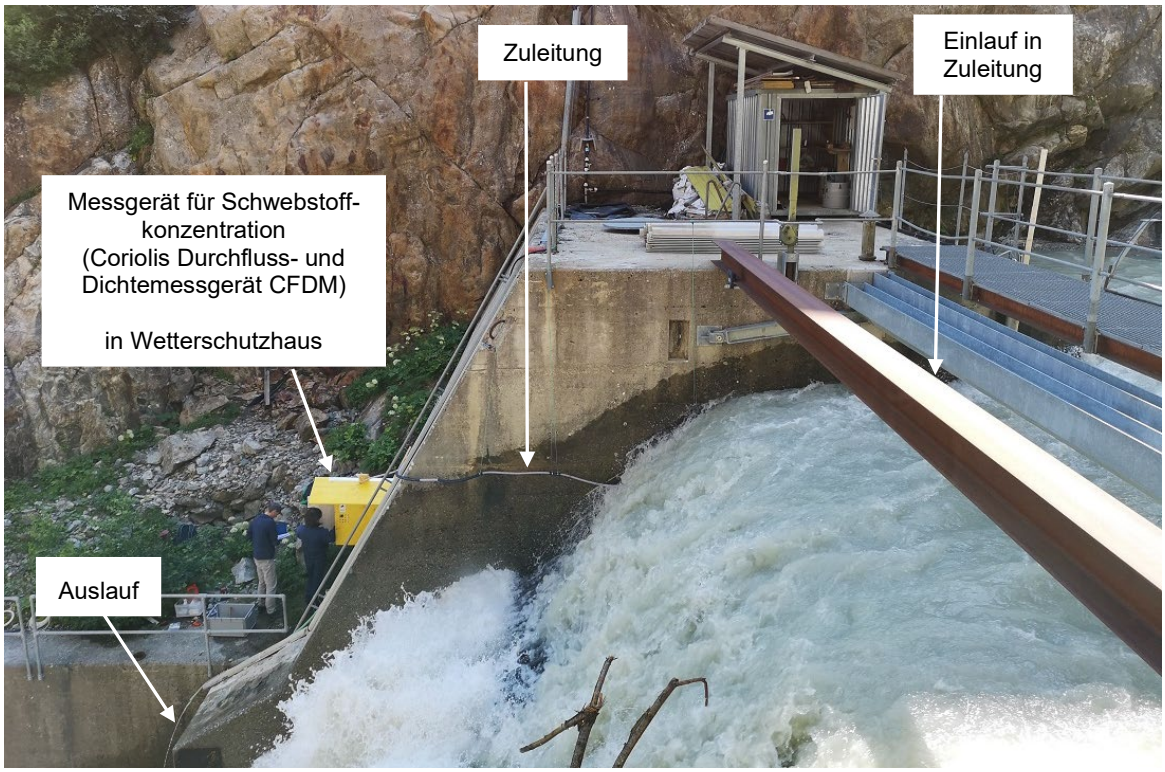


Abbildung 19: Blick ans rechte Widerlager der Wasserfassung Titer mit sommerlichem Zufluss und Schlauch als Zuleitung zum Dichtemessgerät (anfängliche Installation) (Foto: VAW, 25.07.2018).

Daher wurde im Frühsommer 2019 der Einlauf des CFDM-Zuleitungsschlauches 3 m vom Widerlager entfernt auf der Wehrschwelle montiert. So konnte der Lufteintrag vermieden werden und es resultieren brauchbare *SSC*-Messwerte. Jedoch wurde der Schlauch vom ersten grösseren Abfluss im Sommer weggerissen und konnte erst im Herbst bei geringeren Abflüssen wieder installiert werden.

Im Dezember 2019 wurde die Wasserzuleitung zum CFDM stabiler ausgeführt in Form von Wasserleitungen aus Stahl (Abbildung 20). Es wurden zwei parallele Leitungen installiert, damit eine zweite Leitung zur Verfügung steht, wenn eine durch Sedimente verstopft würde. Die Einläufe in die beiden Leitungen wurden wegen des Geschiebetriebs leicht über der Sohle angeordnet. Die Einläufe wurden mit 6 mm-Lochblechen überdeckt, so dass keine Partikel, die grösser sind als der Innendurchmesser der Messrohre im CFDM (8 mm), in die Leitung gelangen. Die Lochbleche wurden ±45° zur Hauptströmungsrichtung angeordnet, damit allfälliges Geschwemmsel durch die Strömung möglichst weitertransportiert wird (Selbstreinigung). Diese Konstruktion für die Wasserzuleitung zum CFDM funktioniert seit der Schwebstoffsaison 2020 und erlaubte unter anderem die *SSC*-Messungen während des Ereignisses vom 02.-03.10.2020 (Abschnitt 5.6.6).

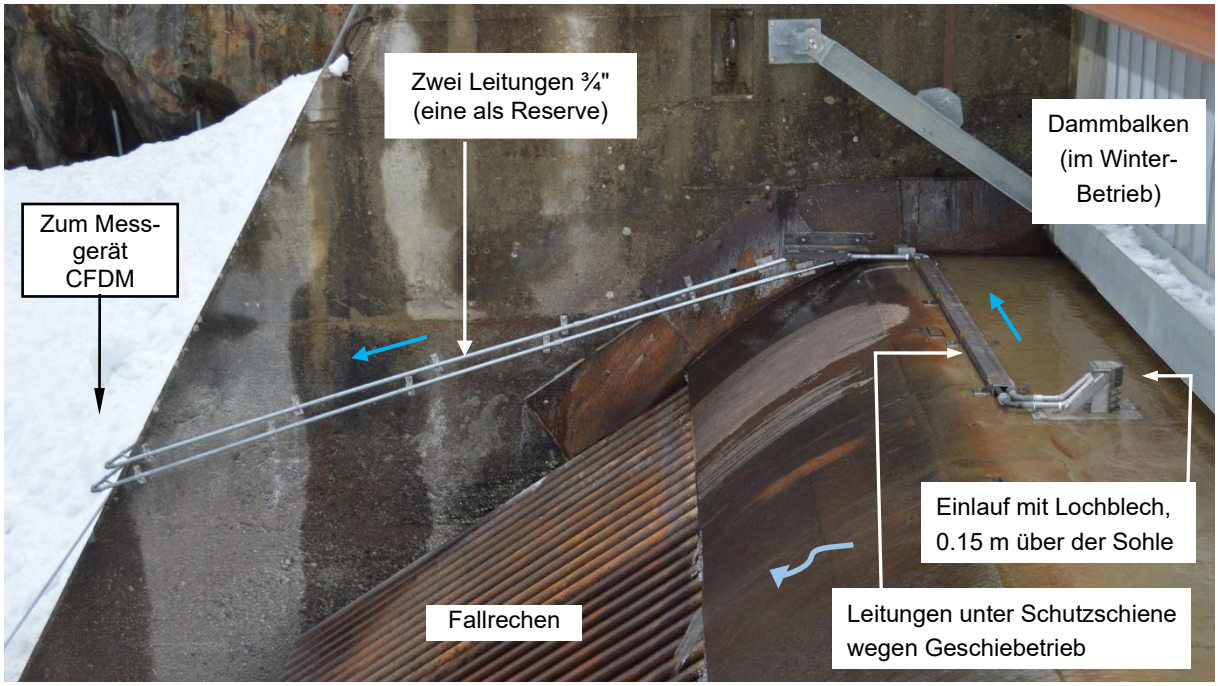


Abbildung 20: Blick ans rechte Widerlager der Wasserfassung Titer im Winter (bei Niederwasser) nach Installation von stabileren Wasserzuleitungen für das Dichtemessgeräte (CFDM) (Foto: VAW, 19.12.2019).

Das CFDM am Fuss der Mauer war in den ersten drei Jahren in einem Schutzhaus aus Holz untergebracht, um es vor der Witterung (Niederschlag und starke Erwärmung durch Sonneneinstrahlung) zu schützen (Abbildung 21a). Im Jahr 2020 wurde dieses Schutzhaus jedoch durch Steinschlag beschädigt; das CFDM war noch funktionstüchtig. Daher wurde im Frühsommer 2021 ein solideres Schutzhaus aus Stahl erstellt und das CFDM darin installiert (Abbildung 21b und c).

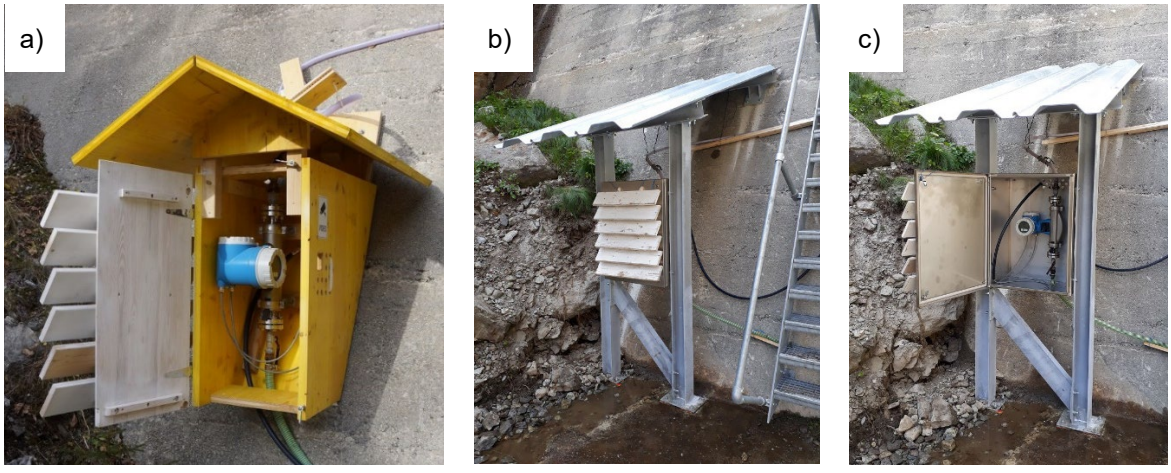


Abbildung 21: Dichtemessgerät (CFDM) am Fuss der Mauer der Wasserfassung des KW Fieschertal. a) anfänglich in Wetterschutzhaus aus Holz (installiert am 25.07.2018), dann b) und c) in Schrank unter soliderer Konstruktion aus Stahl (22.07.2021) (Fotos: VAW).

Die am Ende des Projekts vorhandene Instrumentierung für das Echtzeit-Schwebstoffmonitoring an der Wasserfassung ist in der Abbildung 22 zusammengefasst:

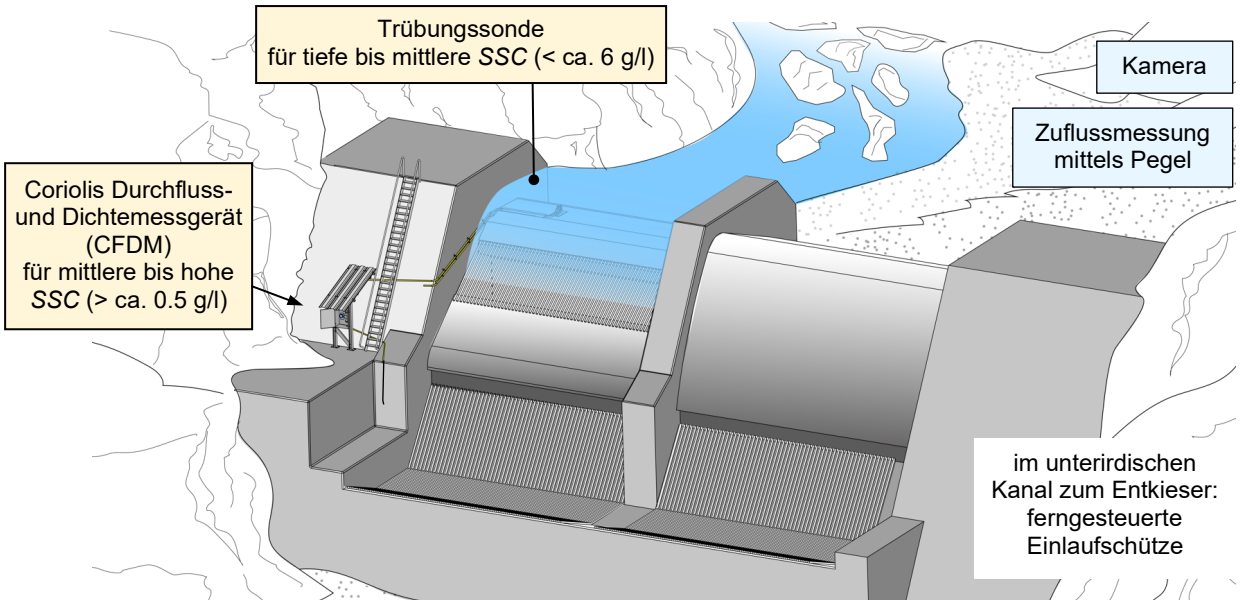


Abbildung 22: Wasserfassung des KW Fieschertal mit kombinierter Instrumentierung für die Messung von tiefen bis hohen Schwebstoffkonzentrationen (*SSC*) in Echtzeit, um die Fassung bei zu hoher Schwebstoffbelastung, z.B. nach Gewittern, rechtzeitig schliessen und die Turbinen vor übermässiger Abrasion schützen zu können (Visualisierung: VAW, Plangrundlage: gkw).

4.1.3 Messeinrichtungen am Ende des Entsanders

Am Ende des Entsanders fliesst das Triebwasser über eine Überfallkante in den Speicherstollen (Abbildung 23). Aufgrund der geringen Fliessgeschwindigkeit im Entsander, dem Schutz vor Naturgefahren und stets ähnlichen Temperaturen bietet diese Stelle günstige Bedingungen für *SSC*-Messungen, welche der Quantifizierung des Feinsedimenteintrags in den Speicherstollen dienen.

Im Frühling 2014 wurde an der rechten Wand des Entsanders eine **Trübungssonde** installiert (Messstelle 2 in Abbildung 14). Die Sonde wurde höhenverstellbar unterhalb des minimalen Betriebswasserspiegels installiert (Abbildung 24a). Es handelt sich um eine Eintauch-Trübungssonde wie bei der Wasserfassung. Das hier vorhandene Modell *CUS51D* ist vom grösseren nominalen Messbereich her dem Modell *CUS52D*, das derzeit an der Wasserfassung installiert ist, vorzuziehen. Für die automatische Reinigung wurde ein Kunststoffschlauch (d_i = 6 mm) von einem Druckluftkompressor zum Kopf der Sonde geführt (Abbildung 24b). Alle 12 h wurde, gesteuert durch den Messumformer der Trübungssonde (Zusatzfunktion «Reinigungszyklus»), ein Druckluftpuls abgeben. Die Sonde funktioniert seit acht Jahren, wobei der Druckluftkompressor (kostengünstiges Modell) in den Umgebungsbedingungen der Entsanderkaverne zweimal ersetzt werden musste.

An dieser Messstelle war ein weiterer **automatischer Wasserprobennehmer** von 2014 bis 2020 installiert, mit welchem Wasser vom Sondenkopf angesaugt und in Flaschen abgefüllt wurden.

Weiter wurde neben der Trübungssonde, auf derselben Wassertiefe, von 2017 bis 2020 ein **akustischer Sensor** (LISST-ABS) unter realen Bedingungen in einer Kraftwerksanlage getestet (Abbildung 23 und Abbildung 24c). Dieses Produkt wurde vor wenigen Jahren für Echtzeit-*SSC*-Messungen entwickelt (Agrawal *et al.* 2016). Das Messprinzip basiert auf der Rückstreuung von Ultraschallsignalen (Acoustic BackScatter ABS). Das Messsignal des LISST-ABS kann wie bei einer Trübungssonde mit der *SSC* korreliert werden. Während Trübungssonden am empfindlichsten auf feine Partikel (Ton und Feinsilt) reagieren, ist der akustische Sensor gemäss Hersteller aufgrund der gewählten Frequenz von 8 MHz empfindlicher auf Feinsand, welcher ein höheres Abrasionspotential aufweist. Weiter sind akustische Sensoren weniger empfindlich auf Verschmutzung als optische Sensoren.

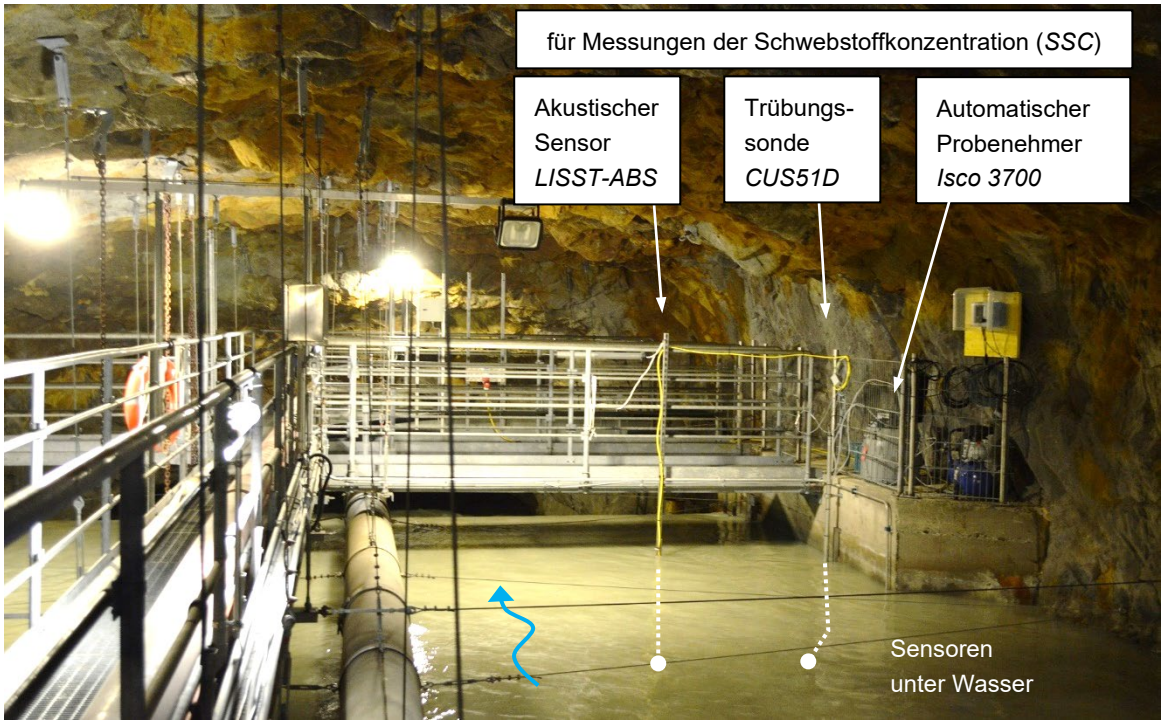


Abbildung 23: Blick ans Ende des Entsanders des KW Fieschertal mit Schwebstoffmessgeräten (Foto: VAW 12.06.2018).

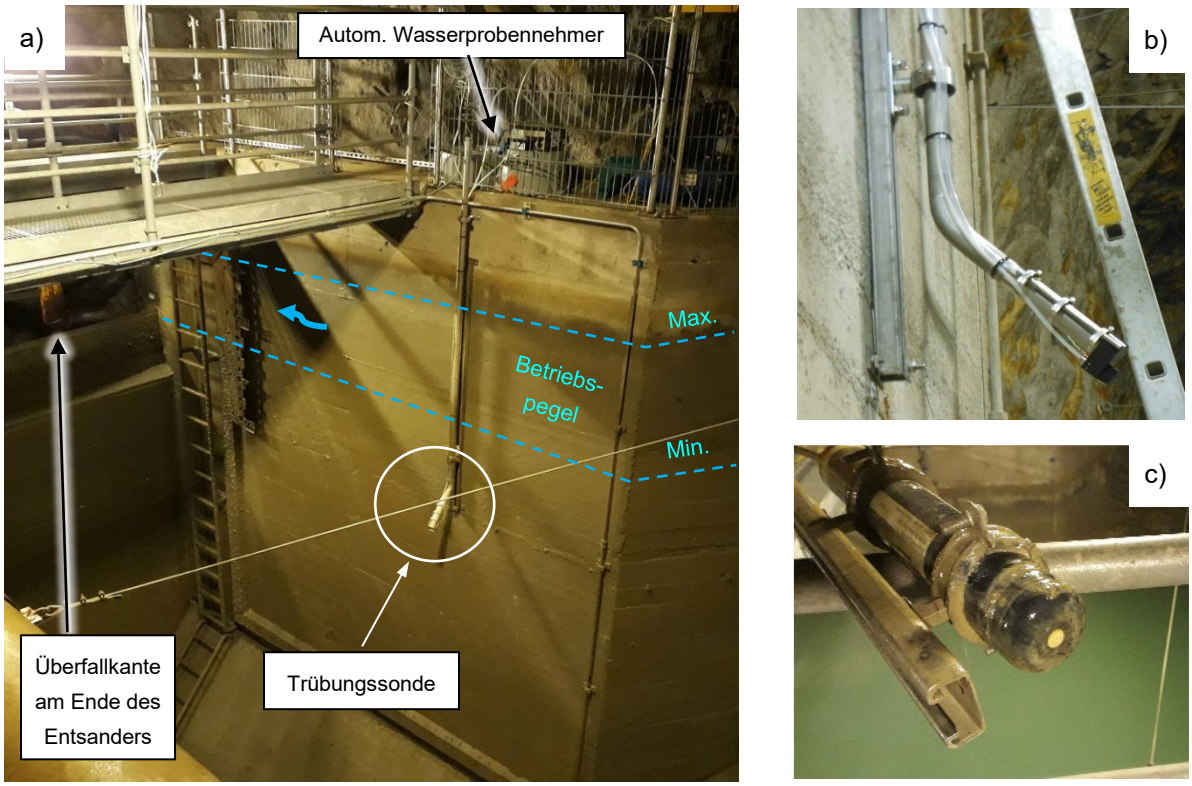


Abbildung 24: Schwebstoffmesseinrichtungen am Ende des Entsanders: a) Blick zum Ende des entleerten Entsanders (19.12.2019), b) Trübungssonde mit Druckluftreinigung für automatische Reinigung und Ansaugschlauch für Wasserproben (27.03.2014), c) akustischer Sensor (*LISST-ABS)* über dem Wasser fotografiert bei Kontrolle des Sensors im November 2019 (Fotos: VAW).

4.1.4 Messeinrichtungen in der Schieberkammer

Die Schieberkammer war die Hauptmessstelle in diesem Projekt, da die Quantifizierung der Schwebstofffracht im turbinierten Wasser im Fokus stand.

Eine akustische Durchflussmessung (**ADM**) wurde im Jahr 2001 (vor dem Beginn des Forschungsprojekts) in der Druckleitung, ca. 28 m stromabwärts von deren Einlauf, installiert. Sie weist vier akustische Pfade auf, die in zwei vertikalen Ebenen gekreuzt angeordnet sind (Abbildung 25). Entlang dieser Pfade werden Ultraschallpulse durch das Wasser hin- und her gesendet. Aufgrund der Laufzeitdifferenz wird in der Auswerteeinheit die Fliessgeschwindigkeit des Wassers entlang eines Pfads berechnet. Aus den Fliessgeschwindigkeiten entlang aller vier Pfade und der Querschnittsfläche der Druckleitung wird der aktuelle Durchfluss (Volumenstrom) berechnet.

Nebst dieser primären Aufgabe einer ADM kann diese auch für die Messung der *SSC* eingesetzt werden (Gruber *et al.* 2016, Felix *et al.* 2019). Zu diesem Zweck wird die zusätzliche Dämpfung der Ultraschallsignale aufgrund der im Wasser enthaltenen Partikel ausgewertet. Da die Signale mit konstanter Amplitude gesendet werden, kann aus der reduzierten Amplitude der empfangenen Signale die Dämpfung berechnet werden. Bei der im KW Fieschertal vorhandenen ADM war es möglich, die Empfangsamplituden der vier Pfade als zusätzliche Ausgabesignale zu definieren. So konnte die bestehende Hardware weiter genutzt werden und für diese Messmethode waren keine zusätzlichen Sensoren erforderlich.

Weiter wurde in der Schieberkammer ein **CFDM** (gleiches Modell wie an der Wasserfassung) an einer Probenahmeleitung installiert (Abbildung 25 und Abbildung 26a). An dieser Messstelle ist für die Anwendung eines CFDM günstig, dass es vor Wetter- und Naturgefahren geschützt ist, die Wasser- und Lufttemperaturen wenig variieren, das Wasser praktisch kein Geschwemmsel enthält und Wasser mit einem moderaten Druck von wenigen Metern Wassersäule (ohne Pumpe) zur Verfügung steht.

Die ¾ Zoll-Probenahmeleitung (d_i = 20 mm) zweigt auf Höhe der Rohrachse seitlich von der Druckleitung ab. Diese Stelle auf halber Höhe des Druckleitungsdurchmessers wurde gewählt, damit die Probenahme möglichst repräsentativ ist, auch wenn die *SSC* in der Druckleitung vom Rohrscheitel zur Sohle zunimmt. Mit dem Hahn am Ende der Probenahmeleitung wurde ein Durchfluss von ca. 0.2 bis 0.3 l/s eingestellt (variierte aufgrund des Stollenpegels). Ein kleiner Durchfluss ist erwünscht, da das Wasser aus der Probenahmeleitung vom Tiefpunkt der Schieberkammer hinausgepumpt werden muss und für die Elektrizitätsproduktion verloren geht. Weiter soll die Fliessgeschwindigkeit in den beiden Messrohren (d_i = 8 mm) im CFDM nicht zu hoch sein, um übermässige Abrasion zu vermeiden. In diesen Messrohren floss das Wasser mit 2 bis 3 m/s und das CFDM konnte bisher während mindestens 9 Schwebstoffsaisons betrieben werden. Andererseits war ein Mindestdurchfluss erforderlich, um Ablagerungen in der Probenahmeleitung zu vermeiden. Die Fliessgeschwindigkeit betrug 0.7 bis 1.0 m/s.

Am Beginn der Probenahmeleitung befinden sich zwei Kugelhahne. Der erste ist grundsätzlich stets voll geöffnet. Der zweite ist im Sommerhalbjahr für Durchfluss- und Druckreduktion teilgeöffnet und im Winterhalbjahr geschlossen, da dann keine Messungen erforderlich sind. Durch das schwebstoffhaltige Wasser wird der zweite Kugelhahn erodiert und ist alle paar Jahre zu ersetzen. Für den Ersatz dieses Hahns ohne Betriebsunterbruch der Druckleitung kann der erste Kugelhahn geschlossen werden.

Am Ende der Probenahmeleitung war weiter ein **Laserdiffraktometer** (*LISST-100x*) im Einsatz. Der Kopf dieses eintauchbaren Messgeräts war seitlich in einen Behälter mit Überlauf und Bodenöffnung eingebaut (Abbildung 25 und Abbildung 26b). Der Kugelhahn nach der Bodenöffnung war leicht geöffnet, so dass Sedimentablagerungen in der Regel laufend abgezogen wurden. Bei grösseren Schwebstofftransport-Ereignissen kam es vor, dass sich so viel Feinsand im Behälter absetzte, dass manuell gespült werden musste. Der Auslauf der Probenahmeleitung wurde direkt über dem optischen Pfad des *LISST-100x* platziert, so dass die im Wasser vorhandenen Partikel möglichst den Laserstrahl durchquerten und die Strömung für eine gewisse kontinuierliche Reinigung der wasserberührten optischen

Teile sorgte. Zusätzlich wurden diese etwa monatlich mit einem Wattestäbchen gereinigt, um Ablagerungen bzw. Biofilmbildung zu entfernen. Dieses Allround-Laserdiffraktometer wird von allen Modellen, die vom Hersteller angeboten werden, weltweit bisher am meisten verwendet und ist entsprechend erprobt. Es lieferte im KW Fieschertal während mehrerer Schwebstoffsaisons brauchbare Messwerte.

Im Jahr 2020 wurde ein weiteres Laserdiffraktometer-Modell, *LISST-StreamSide*, getestet. Dieses Gerät wurde für die Installation neben einem Fluss bzw. Kanal konzipiert und ist kostengünstiger als das *LISST-100x*. Das *LISST-StreamSide* wird durch einen dünnen Schlauch (d_i = 6 mm) mit Wasser gespeist. Dieses Modell ermöglicht eine automatische tägliche Spülung mit Klarwasser, was für den Langzeiteinsatz im Prinzip von Vorteil ist. Das *LISST-StreamSide* lieferte aber aufgrund häufiger Störungen (evtl. wegen Luftblasen oder Ablagerungen in den Schläuchen und im Messgerät) keine brauchbaren Messresultate. Eine Revision beim Hersteller brachte eine gewisse Verbesserung; aber das Gerät vermochte im praktischen Langzeitbetrieb nicht zu überzeugen. Der Hersteller hat das Gerät unterdessen aus dem Sortiment genommen.

Weiter waren in den ersten drei Projektjahren **Trübungsmessgeräte** an der Probenahmeleitung im Einsatz (schwarze Punktsymbole in Abbildung 25 und in oberer Hälfte von Abbildung 26b). Das *TurBiScat* ist zwar aufgrund seiner zwei Messkanäle (α = 90° und 25°) interessant, da das Verhältnis der beiden Signale gemäss den Laborversuchen von Felix (2017) eine Schätzung des mittleren Partikeldurchmessers erlaubt. Im praktischen Langzeitbetrieb in dieser Anwendung überzeugte das *TurBiScat* jedoch nicht, da die wasserberührten Teile der Optik verschmutzten und es zur Reinigung jeweils demontiert werden musste, was zu aufwändig erschien. Aus demselben Grund überzeugt auch das Trübungsmessgerät von Optek in dieser Anwendung nicht. Beim *AquaScat* wird die Trübung an einem im Innern des Geräts frei fallenden Wasserstrahl gemessen, so dass keine optischen Teile verschmutzt werden können. In der relativ dünnen Zuleitung zum *AquaScat* (d_i = 12 mm) kam es jedoch zu Ablagerungen und Verstopfungen, wenn infolge von Starkregen- oder Resuspensions-Ereignissen deutlich mehr oder gröbere Partikel im Wasser enthalten waren. Insgesamt bot keines der untersuchten Trübungsmessgeräte an diesem Standort einen Vorteil gegenüber der akustischen Messmethode, die sich an diesem Standort aufgrund der vorbestehenden ADM mit geringem Aufwand anwenden liess.

Während mehrerer Jahre wurden mit einem weiteren **automatischen Wasserprobennehmer** (mit Peristaltik-Pumpe) Wasserproben aus dem Behälter am Ende der Probenahmeleitung entnommen.

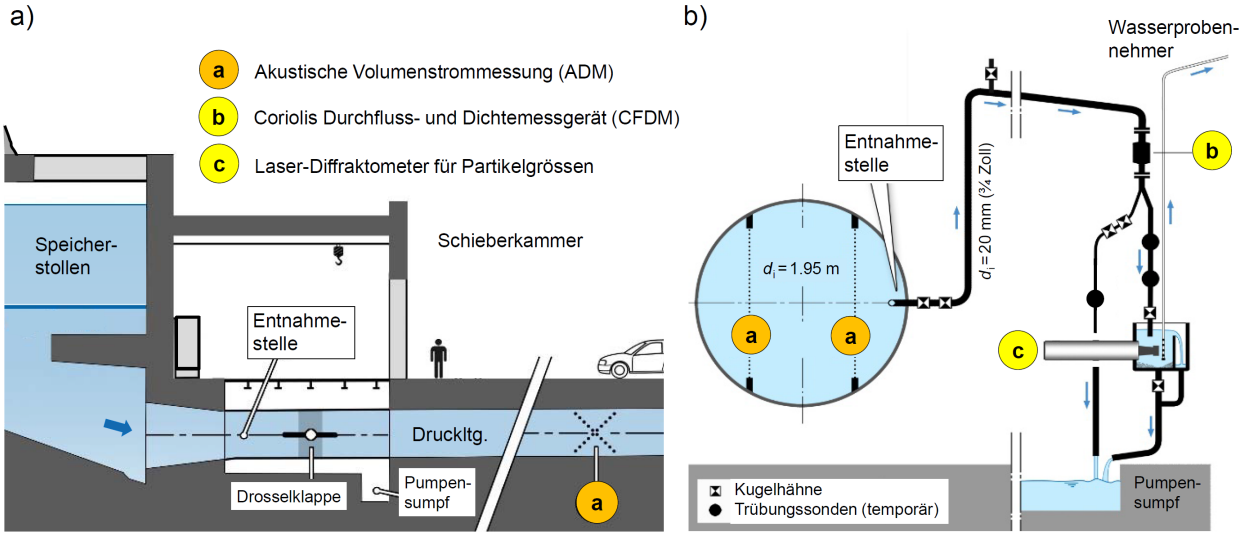


Abbildung 25: a) Längsschnitt der Schieberkammer des KW Fieschertal und b) Querschnitt der Druckleitung in der Schieberkammer mit Anordnung der Messinstrumente für das Schwebstoffmonitoring (ADM projiziert; modifiziert von Felix 2017, Plangrundlage: gkw).

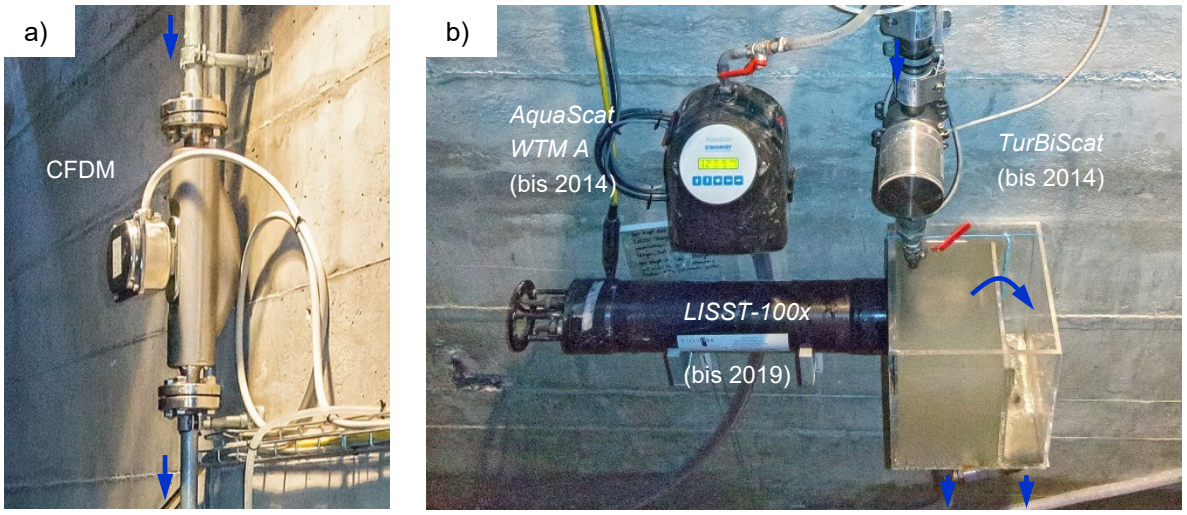


Abbildung 26: a) Dichtemessgerät (CFDM) am fallenden Strang der Probenahmeleitung, b) Laserdiffraktometer (*LISST-100x*) mit Messkopf im Behälter am Ende der Leitung, sowie zwei *in-line* Trübungsmessgeräte; Spezifikation der Geräte siehe Tabelle 4 (Fotos: VAW).

4.1.5 Messeinrichtungen im Maschinenhaus

Im Maschinenhaus wurde bei jeder MG eine Trübungssonde installiert. Wie an der Wasserfassung und im Entsander handelt es sich um Eintauch-Trübungssonden. Diese sind seitlich in Eimern eingelassen (Abbildung 27). Die Eimer werden von Wasser, das aus dem Unterwasserkanal der jeweiligen MG für die Maschinenkühlung heraufgepumpt wird, gespeist. Dementsprechend messen diese Trübungssonden nur während des Betriebs der jeweiligen MG die *SSC* im Triebwasser.

Bei jeder MG wurde eine ¾ Zoll-Probenahmeleitung eingerichtet, welche von der Kühlwasserleitung abzweigt, bevor diese die Entsandungsanlage erreicht. Um Ablagerungen in den Zuleitungen zu vermeiden, wurden diese mit mindestens 10 % Gefälle bzw. als fallende Leitungsstränge ausgeführt. Der Durchfluss der Probenahmeleitung wird mit einem teilweise geöffneten ⅜ Zoll-Kugelhahn am Ende der Leitung geregelt. Relativ kleine, mindestens um 30° geöffnete Kugelhahnen erwiesen sich als weniger verstopfungsanfällig als grössere, nur wenig geöffnete übliche Wasserhahnen. Durch das schwebstoffhaltige Wasser werden die Armaturen stark erodiert und mussten während der Projektdauer schon ersetzt werden.

Die Eimer wurden mit Bodenöffnungen versehen, so dass sich weniger Sedimente in ihnen ablagern. Der Durchfluss in der Probenahmeleitung wurde so eingestellt, dass das Wasser leicht über den Eimerrand überläuft. Mit den Eintauchtrübungssonden in den Eimern kann es aber vorkommen, dass sich während Schwebstofftransportereignissen so viel Sedimente in den Eimern ablagern, dass die Ablagerungen das Niveau der Sonden erreichen oder überschreiten (wie beim *LISST-100x* in der Schieberkammer). Dann sind die Messwerte unbrauchbar und die Sonden müssen freigespült werden.

Die Trübungssonden im Maschinenhaus sind im Gegensatz zu denen an der Wasserfassung und am Entsander mit Wischern ausgerüstet, mit denen die Fenster am Sondenkopf periodisch gereinigt werden. Die Wischerprofile sollten je nach eingestelltem Reinigungsintervall und Abnutzung periodisch ersetzt werden und können ein Grund sein, warum Wasser in Trübungssonden eindringt (Abschnitt 4.1.2). Die Trübungssonden im Maschinenhaus funktionieren seit etwa 10 Jahren ohne Ersatz der Wischerprofile, wobei aber die Qualität der Messwerte nicht mehr überprüft wurde, da die Trübungsmessungen im Maschinenhaus tiefe Priorität haben.

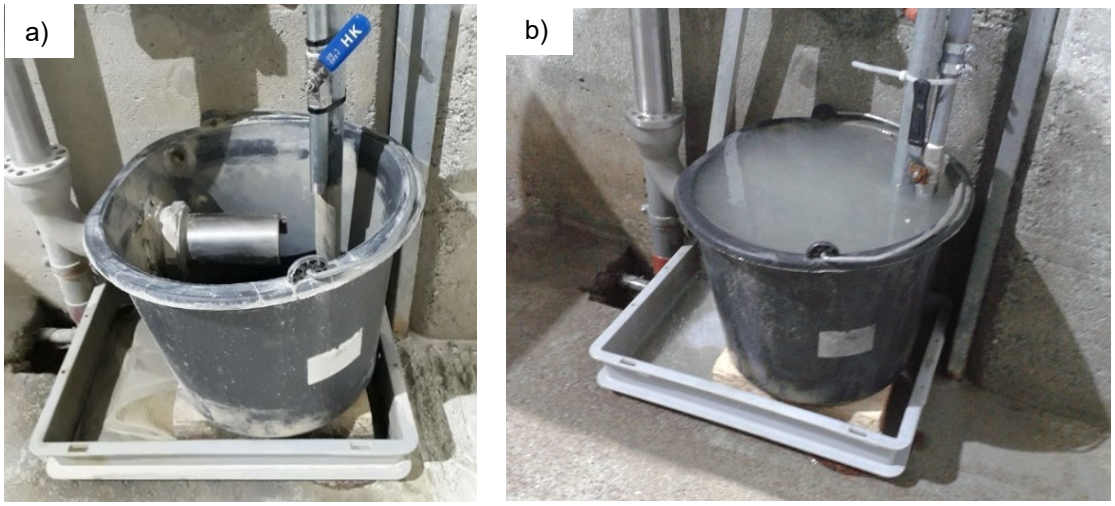


Abbildung 27: Trübungssonden im Maschinenhaus des KW Fischenthal a) ohne Wasser bei Stillstand und b) mit Wasser bei Betrieb der entsprechenden MG (Fotos: VAW).

Mit der vorhandenen Messanordnung sind keine lückenlosen Trübungsmessungen möglich bzw. es wäre häufigerer Unterhalt erforderlich. Aufgrund der folgenden Gründe wurden jedoch keine weiteren Anstrengungen unternommen, die Trübungsmessstellen im Maschinenhaus unterhaltsfreundlicher auszubilden:

- Die Trübungsmessungen im Maschinenhaus zeigen nur dann hohe Werte an, wenn sich schon viel Feinsedimente im Kraftwerkssystem und sogar bei den Turbinen befinden, d.h. sie bieten keine Vorwarnzeit für allfällige vorübergehende Ausserbetriebnahmen der Anlage.
- Aufgrund asymmetrischer Geometrie der Verzweigung von der Druckleitung zu den einzelnen MG einer Wasserkraftanlage und aufgrund von Sekundärströmungen kann es vorkommen, dass die *SSC* der einzelnen MG systematisch voneinander abweichen. So kann eine MG von grösserem Verschleiss betroffen sein und häufigeren Unterhalt erfordern als andere MG in derselben Wasserkraftanlage. Solche Abweichungen der *SSC* der einzelnen MG von der *SSC* in der Druckleitung können durch gröbere Partikel (Feinsand) entstehen, die aufgrund ihrer grösseren Trägheit weniger gleichmässig in der Strömung verteilt sind. Feinere Partikel (Silt) sind gleichmässiger verteilt und Trübungssonden sind besonders sensitiv sind auf solche feinen Partikel. Daher können allfällige systematische Abweichungen zwischen den *SSC* der einzelnen MG nicht zuverlässig mit Trübungssonden gemessen werden.

4.1.6 Messungen stromabwärts des Maschinenhauses während Stollenspülungen

Der Speicherstollen wird bei Bedarf und je nach Möglichkeit ein- bis zweimal jährlich gespült (nach Bewilligung durch den Kanton und Information der Unterlieger). Für eine gewisse Verdünnung werden die Spülungen nur bei genügend grossem Abfluss im Wysswasser durchgeführt, typischerweise in Verbindung mit einem Regen. Abends werden der Pegel im Speicherstollen abgesenkt, die Turbinen ausser Betrieb genommen, die Einlaufschütze an der Wasserfassung teilweise geschlossen und die Schütze am Spülfenster des Speicherstollens (Abbildung 10) angehoben. Durch die weitere Absenkung des Wasserspiegels entsteht in der ersten Hälfte des Speicherstollens ein frei fliessender Abfluss, welcher sich in die Sedimentablagerungen eintieft. So werden Sedimente ins Wyssswasser weitergegeben. Durch Verdünnung mit dem an der Fassung überlaufenden Anteil des Zuflusses wird die *SSC* im Wysswasser gegenüber der *SSC* im Spülwasser reduziert. Am Ende der Spülung, in der Regel gegen

Mitternacht, werden die Schütze am Spülfenster geschlossen und Einlaufschütze an der Wasserfassung wieder voll geöffnet. Nachdem der Pegel im Speicherstollen mindestens den minimalen Betriebspegel erreicht hat, wird der übliche Kraftwerksbetrieb wieder aufgenommen.

Zur Dokumentation der *SSC* während einer Stollenspülung wurden aus dem Wysswasser, von einer Brücke wenig stromabwärts des Maschinenhauses, alle 15 Minuten eine Wasserprobe entnommen (Abbildung 28a). Von diesen Proben wurden mittels Imhoff-Trichter die volumetrische Schwebstoffkonzentration (in cm^3/Liter = ml/l) direkt vor Ort näherungsweise bestimmt (Abbildung 28b).

Von zwei Proben des sedimenthaltigen Wassers wurde die *SSC* zusätzlich durch die VAW mit der gravimetrischen Methode im Labor ermittelt. So konnte bestimmt werden, dass die Lagerungsdichte der unkonsolidierten Feinsedimente im Imhoff-Trichter 1.32 bis 1.37 g/ml betrug. Mit dieser Angabe können volumetrische Schwebstoffkonzentrationen (ml/l) näherungsweise in gravimetrische *SSC* (g/l) umgerechnet werden.

a)



b)



Abbildung 28: Messung der Schwebstoffkonzentration im Wysswasser ca. 200 m stromabwärts des KW Fieschertal durch den Kraftwerksbetreiber während einer Stollenspülung bei erhöhtem Abfluss infolge Regens: a) Probenahme mit einem Gefäss an einem Seil und b) Wasserproben mit Sedimentablagerungen in den Imhoff-Trichtern nach ca. 10 Minuten Absetzzeit (Fotos: VAW, 20.08.2019).

4.1.7 Datenaufzeichnung, Feld- und Laborarbeiten des Sedimentmonitorings

Für die Datenerfassung wurde an drei Standorten (Zentrale, Schieberkammer und bei der Wasserfassung) je ein Messrechner installiert. Die Signale der Schwebstoffmessgeräte sowie andere Grössen zur Beschreibung des aktuellen Anlagezustands (Durchflüsse, Pegel, Drücke, Düsenstellungen, elektrische Leistungen, usw.) aus dem Kraftwerksleitsystem wurden im Minutentakt aufgezeichnet.

Das Schwebstoffmonitoring umfasste u.a. folgende Arbeiten:

- Installation bzw. Wiederinstallation und Inbetriebnahme der Messgeräte jeweils zu Beginn der Schwebstoffsaison (im Winterhalbjahr, mit meist geringen Abflüssen und sehr klarem Wasser, sind einige Messgeräte ausser Betrieb).
- Betrieb der Messgeräte und Messrechner während der Schwebstoffsaison (in der Regel April bis November), z.B. Störungsbehebung nach Stromausfall und Sedimenttransportereignissen, Kontrolle der optischen Geräte auf Verschmutzung und Reinigung.
- Abholen von Wasserproben, die von den automatischen Probenehmern in Flaschen gepumpt wurden. In den Jahren 2012–2020 wurden von der Wasserfassung 178 Proben, vom Ende des Entsanders 298 Proben und von der Schieberkammer 430 Proben ins Labor transportiert.

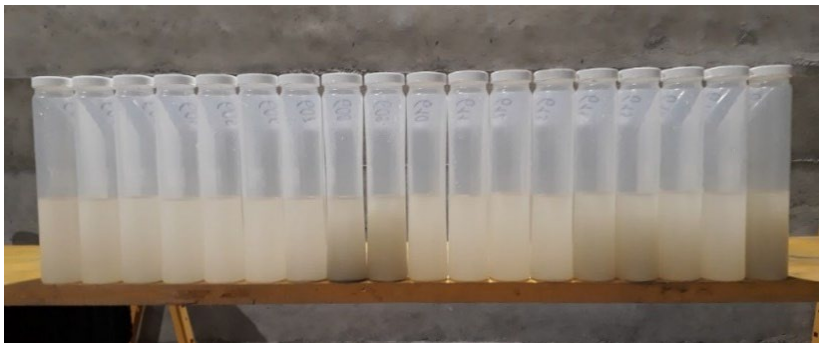
- Transfer der Messdaten von den drei Messrechnern und Kontrolle bezüglich Aufzeichnungslücken; wenn nötig und sofern möglich Ergänzung mit Daten aus dem Kraftwerksleitsystem.
- Nachbearbeiten (*Post-Processing*) der Daten, insbesondere des Laserdiffraktometers.
- Zusammenstellen der Messdaten zu jährlichen Zeitreihen.
- Koordinieren der Arbeiten vor Ort mit dem Kraftwerksbetreiber.

Die ins Labor transportieren Wasserflaschen wurden bis zur Analyse kühl gelagert. Von den Proben wurde die *SSC* mit der Wägemethode (gravimetrisch) wie folgt bestimmt.

- Leere Aluschalen wurden nummeriert und gewogen (auf mg),
- Wasserprobe wurde in die Aluschale gegossen und das Brutto-Gewicht bestimmt,
- Noch Ofentrocknung wurde das Gewicht der Schale und des Rückstands bestimmt,
- Berücksichtigung der ehemals gelösten Stoffe (0.06 g/l im Wasser aus Granitgebiet),
- Berechnung der *SSC* = Schwebstoffmasse / Gemischvolumen.

Die Abbildung 29 zeigt eine Serie von Wasserproben und die entsprechenden *SSC*.

a)



b)

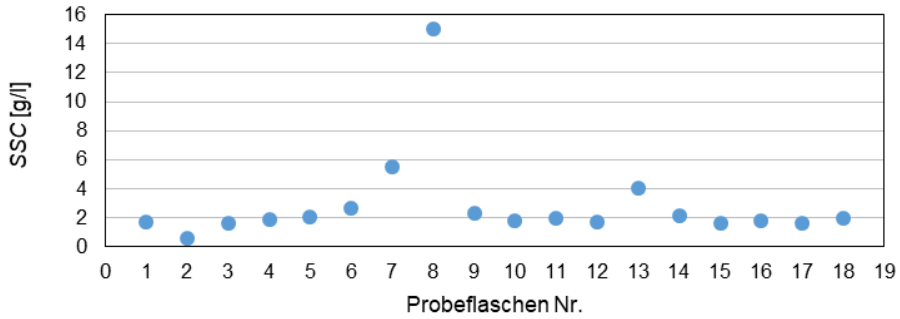


Abbildung 29: a) Beispiel von Wasserproben vom 28.07. bis 29.08.2018 aus der Schieberkammer des KW Fieschertal (Foto: VAW) mit b) entsprechenden Schwebstoffkonzentrationen (*SSC*), die im Labor durch Wägung des getrockneten Rückstands bestimmt wurden.

Für die Charakterisierung der Härte und Form der Sedimentpartikel wurden von einigen Proben mineralogische Analysen und Mikroskop-Bilder angefertigt.

4.1.8 Erstellung der SSC-Zeitreihe

Die gravimetrischen *SSC* dienten als Referenz für die «Kalibrierung» der indirekten Messmethoden, welche quasi-kontinuierliche Signale liefern, d.h. die Trübungssonden, die akustischen Sensoren (ADM und *LISST-ABS*) und das *LISST-100x*. Für das Beispiel einer Trübungssonde zeigt Abbildung 30a die Trübungsmesswerte zu den Zeitpunkten der Probenahmen und die zugehörigen Referenz-*SSC*. Basierend auf diesen Punkten wurde eine lineare Umrechnungsbeziehung, d.h. ein Faktor bestimmt, mit welchem die im Minutentakt gemessenen Trübungen in eine *SSC*-Ganglinie umgerechnet wurden.

Der Hauptgrund für die Streuung der Punkte in Abbildung 30a ist gemäss dem Funktionsprinzip von Trübungssonden die Partikelgrösse. Feinere Partikel verursachen eine höhere spezifische Trübung, weil bei gleicher *SSC* mehr Partikel vorhanden sind. Mit den Messungen des Laserdiffraktometers konnte bestätigt werden, dass der Umrechnungsfaktor von Trübung auf *SSC* von der Partikelgrösse abhängt (Abbildung 30b). Mit dem konstanten Faktor, wie in Abbildung 30a mit der geraden Linie dargestellt, basiert die Umrechnung auf den im zeitlichen Mittel vorhandenen Partikeleigenschaften.

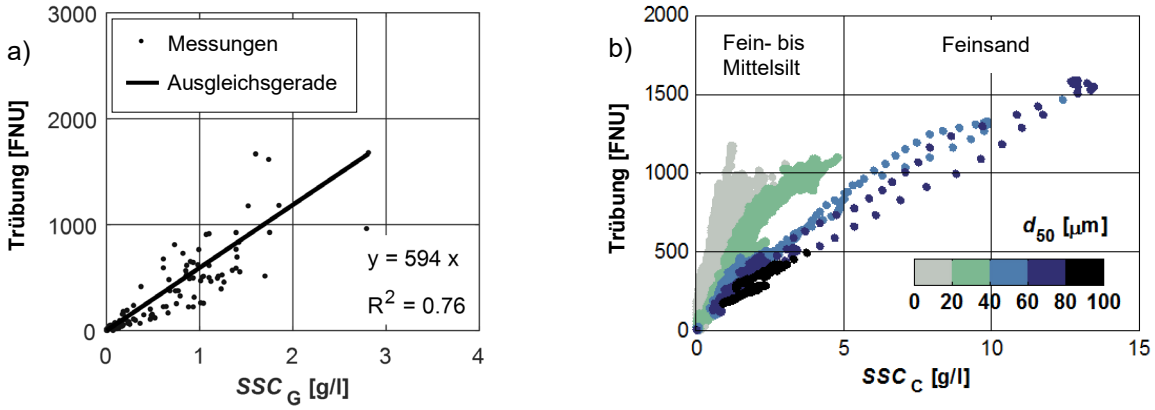


Abbildung 30: a) Trübung (gemessen mit dem *AquaScat*) in der Schieberkammer von 2013 bis 2014 in Funktion einer Referenz-SSC; a) mit der gravimetrischen *SSC* als Referenz und b) mit der *SSC* gemäss dem CFDM als Referenz, wobei die Farben den Median-Partikeldurchmesser d_{50} gemäss LISST-Messungen angeben (Felix 2017).

Die Dämpfungs-Ganglinien der ADM sowie die unkalibrierten *SSC*-Ganglinien des *LISST-ABS* und des *LISST-100x* wurden – analog zu dem beschriebenen Vorgehen bei den Trübungssonden – in *SSC*-Ganglinien (g/l) umgerechnet.

Bei der Auswertung der CFDM-Messungen mussten keine empirischen Umrechnungsbeziehungen ermittelt werden, da die Gemischdichte bereits in g/l gemessen wird und ein physikalisch klarer Zusammenhang für die Umrechnung in *SSC* besteht. Um verschiedene Nebeneffekte (v.a. variable Ablagerungen bzw. Biofilmbildung in den Messrohren und variable Umgebungs- und Mediumstemperaturen) zu kompensieren, wurde ein zeitlich variabler Versatz (Offset) in der Gemischdichte berücksichtigt. Diese Versatzgrösse wurde ermittelt, indem die mit dem CFDM gemessenen *SSC* mit den *SSC* abgeglichen wurden, die andere Messmethoden in Perioden mit tiefer *SSC* oder Klarwasser lieferten.

Für detailliertere Informationen zum Verhalten der einzelnen Schwebstoff-Messgeräte wird auf Abgottspon *et al.* (2016) und Felix (2017) verwiesen. Die obere Grenze des *SSC*-Messbereichs von Trübungssonden lag bei 8 bis 15 g/l (je nach Modell und Partikelgrössen), für die akustische Methode basierend auf der ADM bei bis ca. 20 g/l (bei 1 MHz und einer Pfadlänge von 2.73 m) und für das *LISST-100x* (mit 90 %-Pfadreduktionsmodul) bei wenigen g/l (je nach Partikelgrösse und -form). Mit den beiden CFDM konnten hingegen mittlere bis hohe *SSC* (bis 110 g/l) kontinuierlich gemessen werden.

In den *SSC*-Ganglinien der verschiedenen Messgeräte waren aufgrund ihres *SSC*-Messbereichs, den Betriebsperioden und gelegentlicher Störungen (Stromausfall oder Verstopfungen der Probenahmeleitungen) diverse Lücken vorhanden bzw. die Daten waren nicht alle als gleich verlässlich einzustufen. Für die Berechnung der Schwebstofffrachten über die Jahre sind aber durchgehende *SSC*- und Abfluss-Ganglinien erforderlich. Daher wurden für die Messstelle in der Schieberkammer alle plausiblen und verfügbaren Messdaten zu einer *best estimate-SSC* zusammengestellt. Dabei wurden die als am verlässlichsten eingestuften Daten, oder Kombinationen von Daten verschiedener Messgeräte, verwendet. Die *SSC* in kürzeren Datenlücken (typischerweise im Minutenbereich, z.B. infolge Unterhalts der Messgeräte) wurden interpoliert. Zum Auffüllen längerer Lücken (z.B. als während des Hochwassers 2012 noch kein CFDM installiert war und die *SSC* die obere Messbereichsgrenze der akustischen Methode überschritt), wurde die *SSC*-Ganglinie aufgrund von Druckmessungen und anderen Grössen aus dem Leitsystem berechnet und verwendet (Felix *et al.* 2016b).

4.1.9 Erstellen der Zeitreihe des Median-Partikeldurchmessers d_{50}

Die Messdaten des *LISST-100x* wurden mit den Daten der anderen Messgeräte in der Schieberkammer zusammen analysiert. Aus den plausiblen *LISST*-Daten wurde die Zeitreihe des Median-Partikeldurchmessers d_{50} (Abschnitt 2.1.1) berechnet, welche allerdings Lücken aufwies. Kürzere Lücken (typischerweise im Minutenbereich) wurden interpoliert. In längeren Perioden ohne plausible LISST-Daten (insbesondere als in den Jahren 2015, 2016 und 2020 das *LISST-100x* nicht verfügbar war) wurden die d_{50} mit zwei Korrelationen rechnerisch abgeschätzt. Die erste und wichtigste dieser Korrelationen basiert auf folgenden Überlegungen:

- Die *SSC*, die von der Dämpfung der ADM-Signale berechnet wird, d.h. SSC_A, hängt von der Partikelgrösse ab.
- Hingegen hängt die *SSC* von der Dichtemessung (CFDM), d.h. SSC_C, weniger oder nicht von der Partikelgrösse ab.
- Das Verhältnis der *SSC* der beiden Methoden, also SSC_A/SSC_C variiert mit d_{50}.
- Mit dieser Abhängigkeit wurde d_{50} aufgrund von Messwerten der SSC_A und SSC_C geschätzt, wenn $SSC_C > 0.5$ g/l war (genug verlässliche Referenz-*SSC*).

Andernfalls wurde eine zweite Korrelation angewendet, welche auf folgenden Überlegungen basiert:

- Bei hoher Fliessgeschwindigkeit im Speicherstollen, also bei tiefem Wasserspiegel in Verbindung mit hohem Turbinendurchfluss (hoher Teillast- oder Volllastbetrieb), können gröbere Partikel in die Druckleitung gelangen (Resuspension, Abschnitt 5.1.4).
- Berechnung der Referenz-Fliessgeschwindigkeit im Stollen aus Pegel und Turbinendurchfluss.
- Abschätzung von vorübergehend erhöhten d_{50} aufgrund typischer Verläufe bei Resuspensions-Ereignissen, von welche auch d_{50}-Daten vorlagen.

Im Winterhalbjahr war das Wasser jeweils praktisch klar und die Probenahmeleitung in der Schieberkammer wurde ausser Betrieb genommen. Um dennoch eine durchgehende d_{50}-Ganglinie zu erhalten, wurden im Winterhalbjahr typische d_{50}-Werte angenommen. Diese Annahme stützte sich auf tiefe d_{50}-Werte, die jeweils am Ende der Schwebstoffsaison gemessen wurden. Aufgrund der geringen *SSC* im Winterhalbjahr fällt diese Annahme nicht ins Gewicht.

4.2 Hydro-abrasiver Verschleiss

4.2.1 Allgemein und Inspektionen

Um den Verschleiss an den Peltonturbinen im KW Fieschertal zu quantifizieren, wurden die Becher-geometrie und die Beschichtungsdicken jeweils an zwei Bechern pro Laufrad in der Regel vor und nach der Schwebstoffsaison gemessen (Abbildung 45 im Abschnitt 4.4). Durch Vergleich von Messungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt worden waren, wurden die Geometrieänderungen und Materialverluste (abradierte Massen) bestimmt.

Im Anschluss an die Schichtdickenmessungen bzw. 3D-Vermessungen wurden die Turbinen jeweils ausführlich inspiziert und der Zustand der Bauteile mit Fotos dokumentiert. Zusätzliche Turbinen-inspektionen waren während Stollenspülungen (Abschnitt 4.1.6) möglich, die in einigen Jahren im Juni bzw. gegen Ende August durchgeführt wurden. Bei solchen Spülungen war die Produktion infolge infolge der Absenkung des Stollenpegels unter den minimalen Betriebspegel jeweils von 19 Uhr bis gegen Mitternacht unterbrochen. Nachdem die MG vom Netz genommen werden, dauert es fast zwei Stunden, bis die Laufräder stillstehen, da deren Achsen mit den Generatoren (grosse Schwungmasse) verbunden sind. Daher betrug das Zeitfenster für Zwischen-Inspektionen der stillstehenden Laufräder der beiden MG während solcher Spülungen nur zwei bis drei Stunden.

4.2.2 Optische 3D-Vermessung – Messprinzip und Kalibrierung

Mit beschichteten Laufradbechern treten Abrasionsschäden vor allem an den Mittelschneiden und den Bechereintrittskanten auf. Solche Schäden können mit einem optischen, dreidimensionalen (3D) Messsystem («Scanner») direkt im Turbinengehäuse erfasst werden (Abbildung 31a). Dieser Vorgang wird auch als «Digitalisieren» bezeichnet. Das verwendete Messsystem basiert auf Streifenlicht-projektion und Triangulation (Abbildung 31b). Es resultieren digitale 3D-Modelle mit hoher Auflösung (Punktabstand im Mittel 190 µm). Aus diesen können charakteristische Verschleissgrössen abgegriffen, Querschnitte erzeugt und Abrasionsvolumina bzw. Massenverluste ermittelt werden (Abgottspon *et al.* 2013, 2016b).

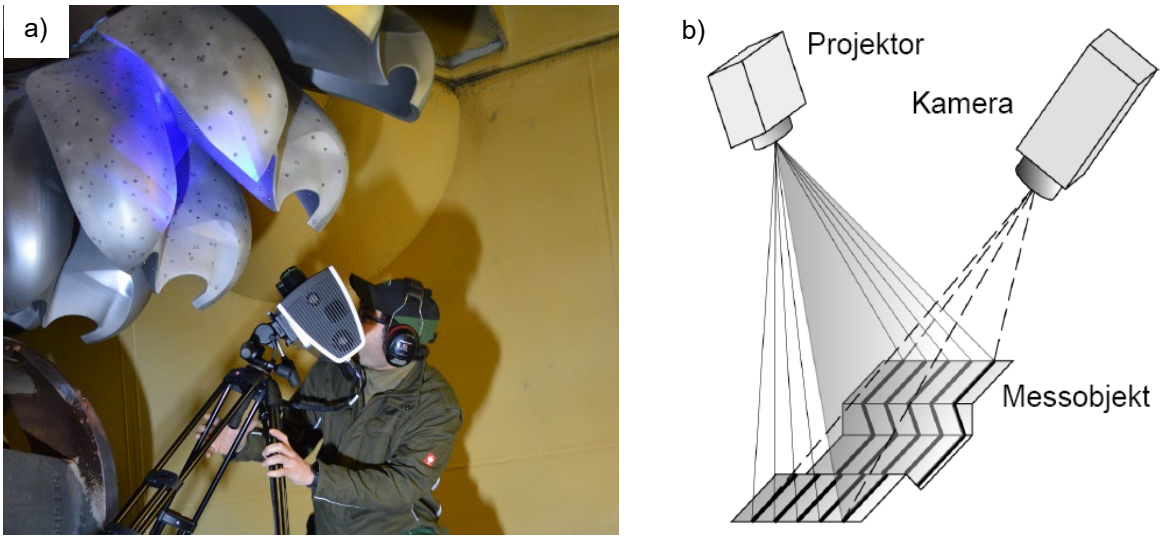


Abbildung 31: a) Optische 3d-Vermessung von zwei beschichteten Bechern eines Peltonlaufrads im KW Fieschertal (Foto: VAW/HSLU, 26.11.2019, MG 2) und b) Messprinzip des optischen Scanners (Quelle: Steinbichler Optotechnik 2012).

Das Messsystem wurde beim Hersteller kalibriert und validiert. Zu diesem Zweck wird das Messgerät vor einer Referenzplatte aufgestellt. Auf dieser ist ein Muster mit bekannter Grösse abgebildet. Bei zwei Validierungsmessungen beim Hersteller betrugen die Abweichungen zum Soll und untereinander gemäss Prüfprotokoll lediglich ca. 10 µm; Abweichungen bis 40 µm werden vom Hersteller als zulässig erachtet (Steinbichler Optotechnik 2012). Nach dem Transport des optischen Messsystems zur Kraftwerksanlage wurde jeweils die Kalibrierung des Messsystems validiert, nachdem es an die am Messort vorhandene Lufttemperatur akklimatisiert wurde. Die Lufttemperatur im Turbinengehäuse wurde mit einer Heissluft-Heizung innerhalb des vom Hersteller des Messsystems vorgeschriebenen Temperaturbereichs gehalten, passend zur Lufttemperatur bei der Kalibrierung / Validierung.

4.2.3 Optische 3D-Vermessung – Vorgehen im Kraftwerk

Die aufzunehmenden Becher wurden zuerst gereinigt und getrocknet. Zur Reduktion von Reflexionen auf dem Chromstahl werden die Laufradbecher vor dem Digitalisieren mit einer weisslichen Substanz eingesprüht (Mattierungs-/Entwicklerspray mit Titanoxid). Dann wurden Markierpunkte in einem unregelmässigen Muster aufgeklebt, in einem Abstand von maximal ca. 10 cm (Abbildung 32a).

Das Messgerät wurde auf einem Stativ im Turbinengehäuse aufgebaut und mit einem leistungsfähigen Messrechner (Laptop) verbunden, auf dem die entsprechende Software installiert war. Das Messgerät wurde jeweils in der passenden Distanz zum Becher frei positioniert und durfte während der Aufnahme nicht verschoben werden. Am Messrechner werden die Parameter für die Aufnahme (Beleuchtungshelligkeit und Kontrast) eingestellt. Aus den Aufnahmen der projizierten Streifenmuster (Abbildung 32b) berechnete die Software die räumliche Lage der Oberflächenpunkte der aufzunehmenden Partie und zeigte diese als Teilmodell (Abbildung 33a) auf dem Bildschirm des Mess-Laptops an.

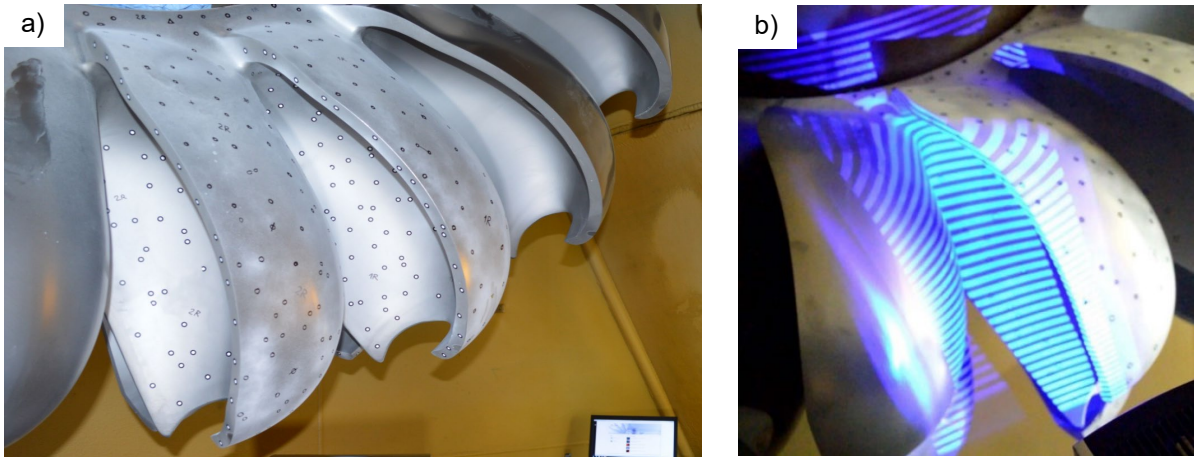


Abbildung 32: a) Laufradbecher, welche mit Mattierungsspray und Referenzpunkten für die optische 3D-Vermessung vorbereitet wurden und b) Streifenlichtprojektion während der Aufnahme eines Becherbereichs (Fotos: VAW/HSLU).

Aufgrund der gegebenen geometrischen Verhältnisse (Sichteinschränkungen durch benachbarte Becher bzw. durch Becherrand und Mittelschneide) und der Grösse der Peltonbecher im vorliegenden Fall, kann ein Becher nicht mit einer einzigen Aufnahme vermessen werden, sondern es waren pro Becher ca. 75 bis 90 Einzelaufnahmen (wie in Abbildung 33a) aus verschiedenen Blickwinkeln und mit geeigneter Distanz erforderlich. Die Einzelaufnahmen wurden mithilfe der Markierpunkte zu einem Gesamtmodell zusammengefügt (Abbildung 33b). Dabei wurde die neue Aufnahme durch die Software jeweils möglichst gut in das schon bestehende Modell eingefügt. Aufnahmen bzw. Teilbereiche mit schlechter Aufnahmequalität wurden verworfen.

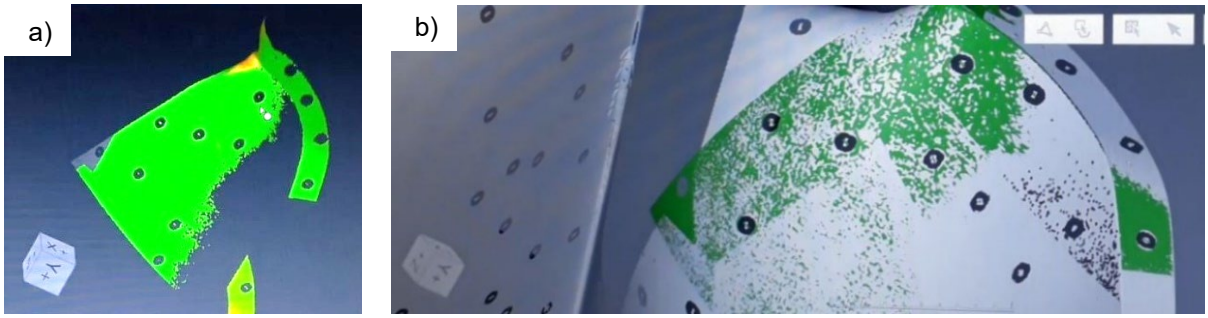


Abbildung 33: a) Teilmodell einer einzelnen Aufnahme und b) Einfügen des Teilmodells ins Gesamtmodell am Bildschirm des Mess-Laptops während der optischen 3D-Vermessung eines Peltonbechers (Bildschirmfotos: VAW/HSLU).

Durch Vergleich der Oberflächengeometrie in 3D-Modellen derselben Becher von mehreren Messterminen in beschichteten Bereichen (mit Abrasion << 0.1 mm) wurde geschätzt, dass die erweiterte Messunsicherheit im Bereich der Mittelschneiden ±0.2 mm beträgt und bis ±0.6 mm an den Becherausschnitten (Felix et al. 2015b; Felix 2017). Diese Werte werden nicht durch die Messunsicherheit einer Einzelaufnahme bestimmt, sondern vielmehr dadurch, wie gut die zahlreichen überlappenden Einzelaufnahmen zu einem möglichst klaffungsfreien Gesamtmodell zusammengefügt werden.

Für die Aufnahme eines Peltonbechers wurde ein Vorgehen entwickelt, dank welchem die Teilaufnahmen beginnend von der Becheraussenseite möglichst gut zusammengefügt werden können. Von einigen Bereichen der Becherinnenseite und der Mittelschneide nahe der Becherwurzel ist es aufgrund der geometrischen Verhältnisse schwierig, gute Aufnahme zu machen. Dem optischen Messprinzip entsprechend können keine „hinterschnittenen" Erosionsformen (z.B. grössere Auswaschung hinter einer kleinen Öffnung) aufgenommen werden.

Für die optische Vermessung von je zwei Bechern pro Laufrad von zwei Maschinengruppen waren inklusive Reise, Einrichten und Aufräumen, Vorbereiten der Laufradbecher, Kalibrierung, Fotodokumentation und Notizen bei den ersten Messkampagnen eine Arbeitswoche eines Zweierteams erforderlich. Mit zunehmender Erfahrung konnte der Einsatz vor Ort auf drei Tage verkürzt werden. Während der Aufnahmen arbeitet eine Person mit Kenntnis der Aufnahmesoftware vorwiegend am Messrechner, die andere Person am Stativ mit dem Messgerät (Scanner). Die Arbeit erfordert ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen und eine Schulung bzw. Erfahrung im Umgang mit dem Messsystem.

Von MG 1 und MG 2 wurden in den Jahren 2012–2014 und 2018–2020 in der Regel vor und nach der Schwebstoffsaison je die Becher Nr. 1 und 2 vermessen. Es resultierten 24 Messtermine, die mit hellgrünen quadratischen Symbolen auf dem Zeitstrahl in Abbildung 45 im Abschnitt 4.4 dargestellt sind.

4.2.4 Optische 3D-Vermessung – Vorgehen bei der Auswertung

Die einzelnen Aufnahmen wurden in einer Nachbearbeitung nochmals gesichtet und gegebenenfalls ganz oder teilweise verworfen. Die konsolidierten geometrischen Modelle (3D-Punktewolken) wurden räumlich an Referenzflächen ausgerichtet. Als Referenzflächen wurden der Becherrand und die seitlichen Partien der Becherausschnitte verwendet, da diese nicht von hydro-abrasivem Verschleiss betroffen sind. Basierend auf diesen Referenzflächen wurde ein lokales kartesisches Koordinatensystem bezogen auf den Becher definiert (Abbildung 34):

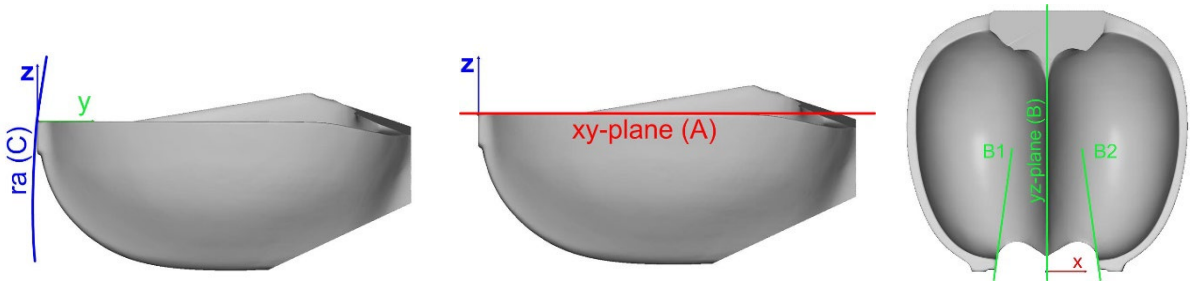


Abbildung 34: Definition des verwendeten Koordinatensystems in einem Peltonbecher.

Durch Vergleich der geometrischen Modelle, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden, wurden folgende Grössen bestimmt, die in der Abbildung 5 definiert sind:

- Abnahme der Mittelschneidenhöhe Δh
- Zunahme der Mittelschneidenbreite Δs
- Zunahme der Becherausschnittstiefe Δc

Dabei wurde die Mittelschneidenbreite wie folgt bestimmt (Abgottspon 2013b): Entlang der Mittelschneide wurde alle 1 mm ein Querschnitt platziert. In jedem Schnitt wurden Tangenten mit einer Steigung von 2:1 (v:h) an beiden Seiten der Mittelschneide gelegt. Der Abstand der Berührungspunkte in Becher-Querrichtung wurde als lokale Mittelschneidenbreite *s* im entsprechenden Schnitt definiert.

Durch Vergleich von 3D-Modellen, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden, kann der Volumenunterschied und somit das Abrasionsvolumen im Bereich der Mittelschneide oder der Becherausschnitte ausgewertet werden. Die Volumenunterschiede wurden mit einer Dichte von 7.7 g/cm^3 für das übliche Turbinengrundmaterial in einen Massenverlust umgerechnet. In Abbildung 35 sind die Bereiche dargestellt, in denen die Volumenunterschiede ausgewertet wurden. Um den Einfluss der Messunsicherheit in den nicht von Abrasion betroffenen Bereichen zu minimieren, wurden die zu vergleichenden Volumenmodelle auf einen möglichst kleinen Bereich entlang der abradierten Kanten beschränkt. Die Volumenunterschiede an der Mittelschneide wurden auf dem Grossteil ihrer Länge in einem Bereich ausgewertet, in dem für alle Laufräder Daten vorhanden waren (Abbildung 35a). Die Volumenunterschiede an der Becherausschnitten wurde auf deren ganzer Länge, inklusive der Spitze der Mittelschneide, ausgewertet (Abbildung 35b).

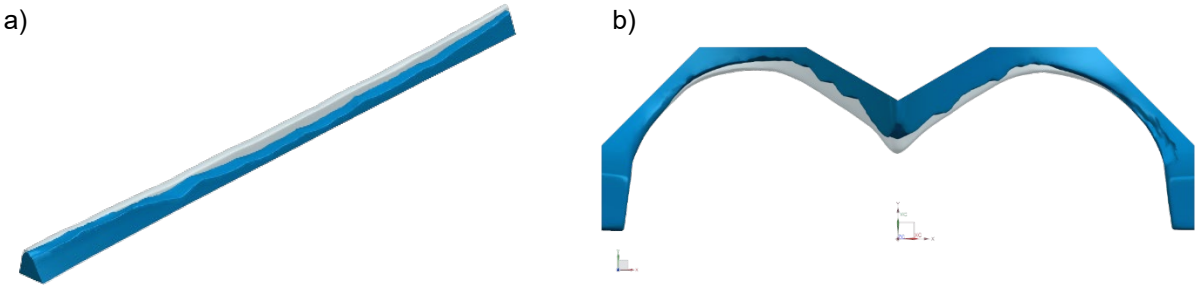


Abbildung 35: Vergleich der Geometrie von a) der Mittelschneide und b) der Becherausschnitte aufgrund von 3d-Vermessungen im Lauf der Zeit, am Beispiel des Bechers 1 des Laufrads 1 in MG 1 vom Nov. 2014 (hellgrau) bis Okt. 2017 (blau).

Das Auswerten der optischen Vermessungen (räumliches Referenzieren, Erzeugen von Schnitten, Volumenberechnungen) war auch aufgrund der grossen Datenmengen der 3D-Punktwolken aufwändig und erforderte einen erfahrenen CAD-Anwender.

4.2.5 Schichtdickenmessungen – Messprinzip und Kalibrierung

Die Messung der lokalen Beschichtungsdicke in den Peltonbechern erfolgte mit einem Schichtdickenmessgerät. Das Messverfahren nach dem Prinzip der magnetischen Induktion (Abbildung 36a) beruht darauf, dass die Beschichtung (Wolframkarbidpartikel in Chrom-Kobalt-Matrix) weniger magnetisierbar ist als das Grundmaterial. Im Gegensatz zu vielen Chromstahlsorten, die nicht magnetisierbar sind, hält ein Magnet auf dem martensitischen Chromnickelstahl eines Laufrads. An den Düsennadeln konnten keine Schichtdicken gemessen werden, da deren Grundmaterial (Stellit) nicht oder zu wenig magnetisierbar ist.

Es wurde ein tragbares Schichtdickenmessgerät *Deltascope FMP30* von Helmut Fischer AG (Abbildung 36b) mit einer Zweipolsonde (Bezeichnung *V7FKB4*, Detail in Abbildung 36c) verwendet. Damit können Schichtdicken bis 2 mm gemessen werden. Gemäss Angaben des Herstellers ist eine Zweipolsonde für die Messung auf rauen Oberflächen – wie im vorliegenden Fall – besser geeignet als eine Einpolsonde. Bei einer Zweipolsonde wird die Beschichtungsdicke im Bereich zwischen den beiden Sondenpolen gemessen. Durch den grösseren räumlichen Messbereich als bei einer Einpolsonde sind die Schichtdickenmesswerte weniger von lokalen Effekten abhängig. Der Achsabstand der beiden Sondenpole beträgt ca. 4.5 mm. Der Sondenkopf hat einen Aussendurchmesser von 18 mm.

Die verwendete Methode ist für Schichtdickenmessungen auf einem Körper ohne Diskontinuitäten geeignet. Auf den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten sowie in deren Nähe (im Millimeterbereich) wären spezielle Effekte zu berücksichtigen bzw. es sind keine Messungen möglich. Daher wurden nur Messungen in der Fläche der beiden Becherhälften durchgeführt.

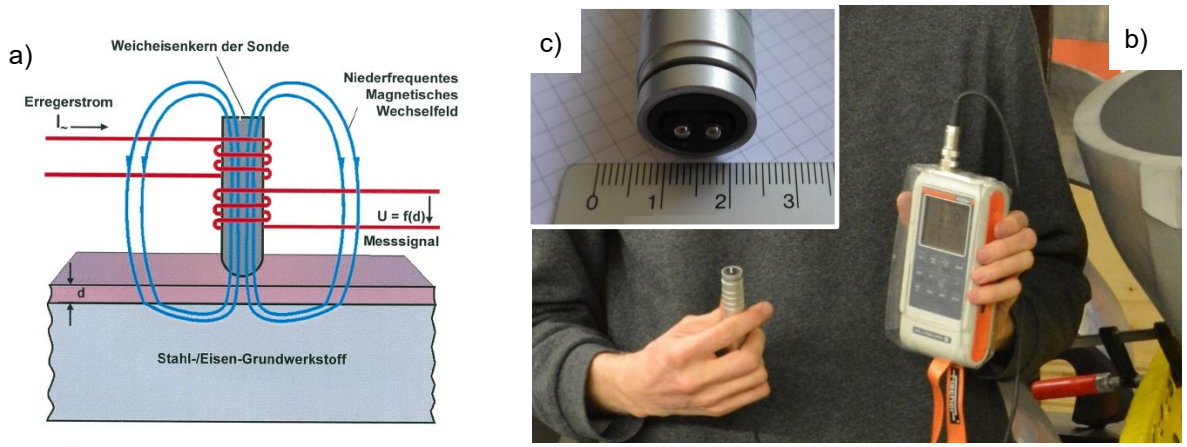


Abbildung 36: a) Funktionsprinzip einer magnetisch-induktiven Sonde für die Messung der Schichtdicke (Quelle: Helmut Fischer 2012), b) Messgerät mit Sonde und c) Detail des Sondenkopfs mit den zwei sogenannten Polen (Fotos: VAW).

Das Messgerät ist für jedes Grundmaterial zu kalibrieren, da verschiedene Stahlsorten unterschiedlich stark magnetisch sind. Dafür werden zertifizierte Folien mit bekannten Dicken verwendet. Das Vorgehen bei der ersten Anwendung des Geräts war wie folgt:

- für den Nullabgleich wird wiederholt auf einer unbeschichteten, möglichst ebenen und glatten Stelle eines Bechers gemessen,
- dann wurde eine 239 µm-Folie auf diese Stelle aufgelegt und der Mittelwert aus 10 Schichtdickenmessungen wurde der nominalen Dicke dieser Folie gleichgesetzt.

Es wurde also eine Zweipunkt-Kalibrierung verwendet. Die Linearität des Messgeräts wurde vom Hersteller bereits bei der Auslieferung geprüft.

Bei den folgenden Messungen wurde die Kalibrierung des Geräts belassen und systematische Abweichungen der Messwerte von den Referenzwerten bei der Auswertung rechnerisch korrigiert. Solche Vergleichsmessungen mit verschiedenen Folien bekannter Dicke (Abbildung 37b) wurden in jeder Messkampagne an mindestens zwei unbeschichteten Stellen pro Becher durchgeführt (Abbildung 37a).

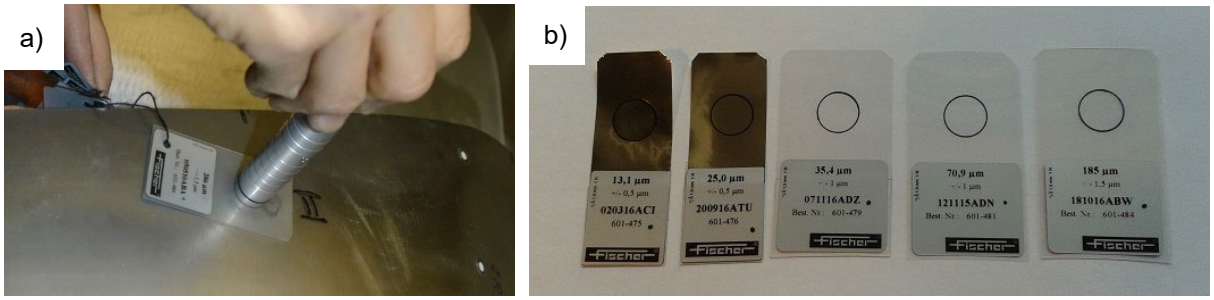


Abbildung 37: Schichtdickenmessung in einem Peltonbecher: a) Referenzmessung mit einer Folie bekannter Dicke auf der unbeschichteten Aussenseite der Becherwand an einer möglichst ebenen Stelle und b) Folienset für solche Referenzmessungen (Fotos: VAW).

4.2.6 Schichtdickenmessungen – Vorgehen im Kraftwerk

Für die Definition der Lage der Messpunkte in den Laufrad-Bechern und zum Wiederauffinden der Punkte bei Folgemessungen wurden Schablonen mit Löchern verwendet. Für jede Becherhälfte wurde im Jahr 2012 eine Schablone aus zusammengeklebten Papierlagen (Pappmaché) erstellt (Abbildung 38a). In die Schablonen wurden Löcher mit einem Durchmesser von 20 mm gestanzt, in welche der Sondenkopf mit allseitig ca. 1 mm Spiel platziert werden kann. Um die Schablonen wasserbeständig zu machen, wurden sie mit einer Synthetik-Farbe mehrmals gestrichen. Die Schablonen für die linke und die rechte Becherhälfte weisen dasselbe gespiegelte Lochmuster mit 152 Messpunkten auf (Abbildung 38b). Der maximale Zentrumsabstand der Löcher beträgt ca. 40 mm.

Im KW Fieschertal waren bzw. sind mehrere Laufräder aus den 1980er-Jahren (Laufrad 1 bis 4) und ein neueres Laufrad (Laufrad 5) vorhanden (Abschnitt 3.5). Laufräder 1 bis 4 haben dieselbe nominale innere Becherbreite (B = 650 mm), aber deren Bechergeometrie variiert um bis zu wenige cm, vermutlich aufgrund der unterschiedlichen Revisionsgeschichten und Baujahre. Gemäss Beobachtungen beim Einsetzen der Schablonen in die Becher der Laufräder 1 bis 4 wird geschätzt, dass mit diesen Schablonen die Lage der Messpunkte in den Bechern auf ±0.5 bis ±1 cm genau definiert ist. Für die beiden Becherhälften des Laufrads 5 mit leicht breiteren Bechern (B = 668 mm) und einer längeren Becherform wurden im Jahr 2017 zwei separate Schablonen erstellt, welche 162 Messpunkte aufweisen.

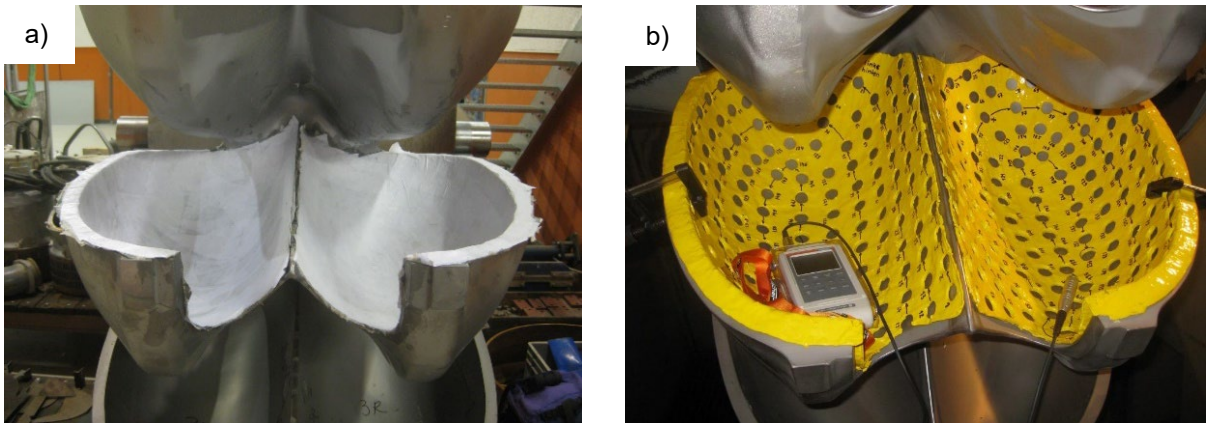


Abbildung 38: a) Herstellung und b) Anwendung der Schablonen für die Messung der Schichtdicken in den Bechern eines Pelton-Laufrads (Fotos: VAW 2012 und 2014).

Die Schichtdickenmessungen wurden meist im Turbinengehäuse auf einem Gerüst über der unteren Düse durchgeführt (Abbildung 39a). Im Fall von ausgebauten oder noch nicht eingebauten Laufrädern konnte im Maschinensaal gemessen werden (Abbildung 39b).

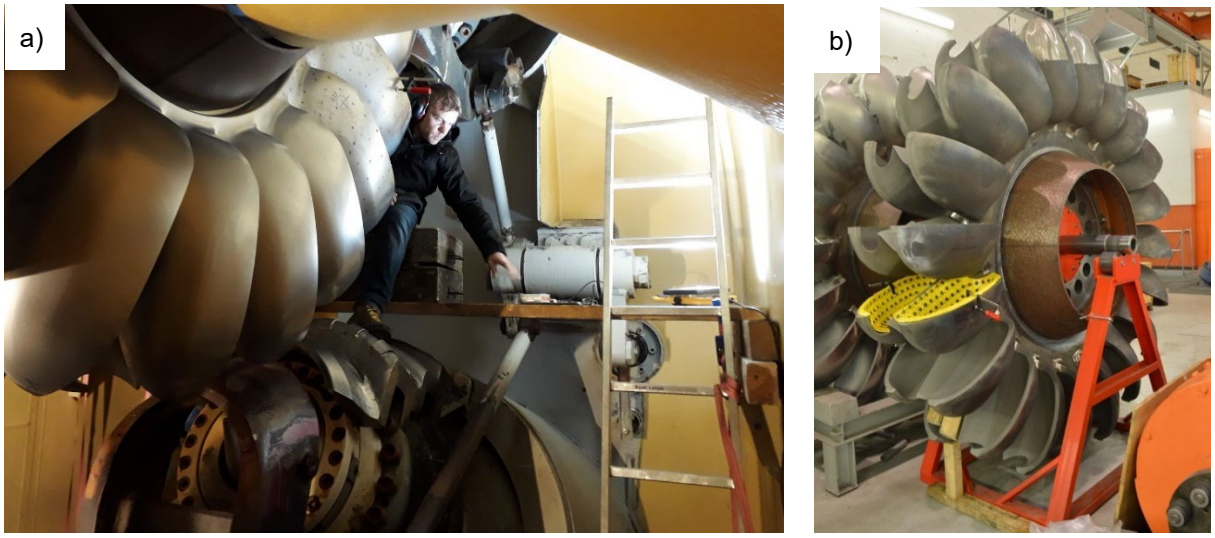


Abbildung 39: Schichtdickenmessungen mit Schablonen im KW Fieschertal: a) im Turbinengehäuse und b) an einem Ersatzlaufrad im Maschinensaal (Fotos: VAW).

Vor Beginn der Schichtdickenmessungen wurden die Becher gereinigt und getrocknet. Die Schablonen wurden eingesetzt und mit Schraubzwingen befestigt. Bei Folgemessungen wurde die Lage der Schablonen gemäss Fotos von früheren Messkampagnen eingerichtet und kontrolliert.

In jeder Messkampagne wurde die Schichtdicke an jedem Messpunkt n = 10 Mal gemessen, um bei der Auswertung durch Mittelwertbildung die Messunsicherheit zu reduzieren. Für jede Messung ist die Sonde erneut abzusetzen, wodurch die Messung ausgelöst wird. Von Einzelmessung zu Einzelmessung wurde die Sonde jeweils leicht um ihre Längsachse gedreht (gegen 180° innerhalb von n = 10 Messungen), damit die Messstrecke zwischen den beiden Sondenpolen keine bevorzugte Richtung aufweist. Der Mittelwert aus den n = 10 Messungen charakterisiert somit die Schichtdicke innerhalb einer Fläche von 4.5 mm Durchmesser (= Abstand der Sondenpole).

In der Regel wurden die Schichtdicken an beiden MG von 2013–2014 sowie von 2017/2018–2020 vor und nach der Schwebstoffsaison gemessen. Es resultierten 22 Messtermine, die als hellblaue Punkte auf dem Zeitstrahl in Abbildung 45 im Abschnitt 4.4 dargestellt sind. Bei jedem Messtermin wurde jeweils an den Bechern Nr. 1 und 2 eines Laufrads gemessen. Pro Messtermin mit zwei Bechern wurden ca. 6'000 Schichtdickenmesswerte aufgenommen.

Die Messzeit für die systematischen Schichtdickenmessungen betrug etwas mehr als 1 h pro Becherhälfte. Zusammen mit Reise, Einrichten und Aufräumen (Gerüst und Beleuchtung), Vergleichsmessungen an unbeschichteten Stellen, Fotos, Messprotokoll und Notizen waren für die Schichtdickenmessungen und Inspektion von zwei Bechern pro Laufrad etwa zwei Arbeitstage einer Person erforderlich.

4.2.7 Schichtdickenmessungen – Vorgehen bei der Auswertung

Die Messdaten wurden jeweils vom Messgerät in einer strukturierten Tabelle heruntergeladen und den Messpunkten zugeordnet.

Die Pole der Schichtdickenmess-Sonde wurden im Lauf der vielen Messungen auf der Hartbeschichtung abgenutzt. Abbildung 40 zeigt die sichtbare Abrasion an den Sondenpolen nach den Messungen in den zwei Jahren bis Ende 2014 (mit 8 Messterminen, also etwa 48'000 Einzelmesswerte). Vor dem Wiederbeginn der Messungen im Jahr 2017 wurde die Sonde ersetzt; diese wurde bis 2020 ebenfalls stark abgenutzt. Aufgrund der Vergleichsmessungen mit den Folien, die bei jedem Messtermin an unbeschichteten Referenzpunkten durchgeführt wurden, konnte quantifiziert werden, wie stark die Sonde abgenutzt wird, wenn in einem Becher alle Punkte zehnmal gemessen werden (ca. 3000 Einzelmesswerte): ca. 2 µm von 2012 bis 2014 und ca. 1 µm mit der neuen Sonde von 2017 bis 2020. Der unerwünschte Effekt der Sondenabrasion wurde in der Datenauswertung kompensiert.

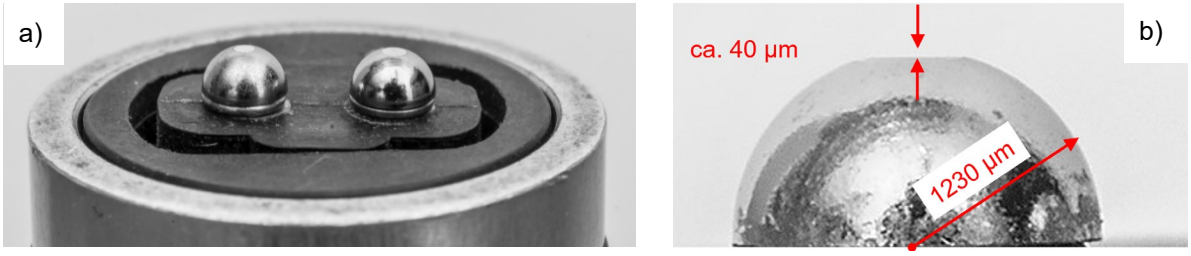


Abbildung 40: a) Schrägansicht des Sondenkopfs des Schichtdickenmessgeräts mit von Auge sichtbarer Abnutzung der beiden Sondenpole und b) stark vergrösserte Seitenansicht eines Sondenpols mit Abnutzung oben an der Halbkugel (Fotos: VAW 2014).

In der Auswertung wurde die Standardabweichung von den n = 10 Messwerten pro Messpunkt berechnet. Folgende Messwerte wurden von der Auswertung ausgeschlossen:

- Einzelne Messwerte, die weit von den anderen entfernt waren (Ausreisser), z.B. weil die Sonde während der Messung möglicherweise nicht korrekt (rechtwinklig und berührend) positioniert war.
- Alle Messwerte an einem Messpunkt in einer Kampagne, deren Streuung als zu gross beurteilt wurde (falls $\sigma \geq 7$ µm), z. B. Fehlmessungen oder lokal aussergewöhnlich variable Schichtdicke z.B. infolge Nachbeschichtung.
- Wenige Mittelwerte einzelner Messpunkte, deren Resultate über mehrere Messtermine gesehen unplausibel waren.

Von den plausiblen Messwerten wurde pro Messpunkt und Messtermin ein Mittelwert der Schichtdicke berechnet. Durch den Vergleich der gemessenen Schichtdickenverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten wurden die Veränderungen der Schichtdicken im Lauf der Zeit räumlich verteilt quantifiziert.

Schliesslich wurde auch die mittlere Schichtdicke pro Becher und Messtermin berechnet. Durch Vergleich dieser Werte über den Winter (d.h. zwischen zwei Schwebstoffsaisons) in Bereichen, in denen keine Nachbeschichtung aufgebracht wurde, wurde geschätzt, dass die erweiterte Unsicherheit des Mittelwerts von mittleren Schichtdickendifferenzen ±5 µm beträgt (Felix et al. 2015b; Felix 2017).

4.3 Wirkungsgradänderungen

Die Wirkungsgradänderungen der beiden Maschinengruppen (MG) im Lauf der Jahre wurden mit zwei Methoden erfasst, die im Folgenden beschrieben werden.

4.3.1 *Sliding-Needle*-Indexwirkungsgradmessungen (SNM)

Während einer sogenannten *Sliding-Needle*-Indexwirkungsgradmessung (SNM) wird der Volumenstrom bzw. die Leistung einer Turbine allmählich erhöht und wieder reduziert (Abbildung 41). Dabei werden die für die Bestimmung des Indexwirkungsgrades erforderlichen Grössen wie Volumenstrom, Druck und elektrische Leistung, die im Kraftwerksleitsystem verfügbar sind, aufgezeichnet (Abgottspon & Staubli 2008). SNM liefern den aktuellen Indexwirkungsgrad einer Maschine über den interessierenden Leistungsbereich (Abgottspon *et al.* 2013a, Abgottspon *et al.* 2016a, b).

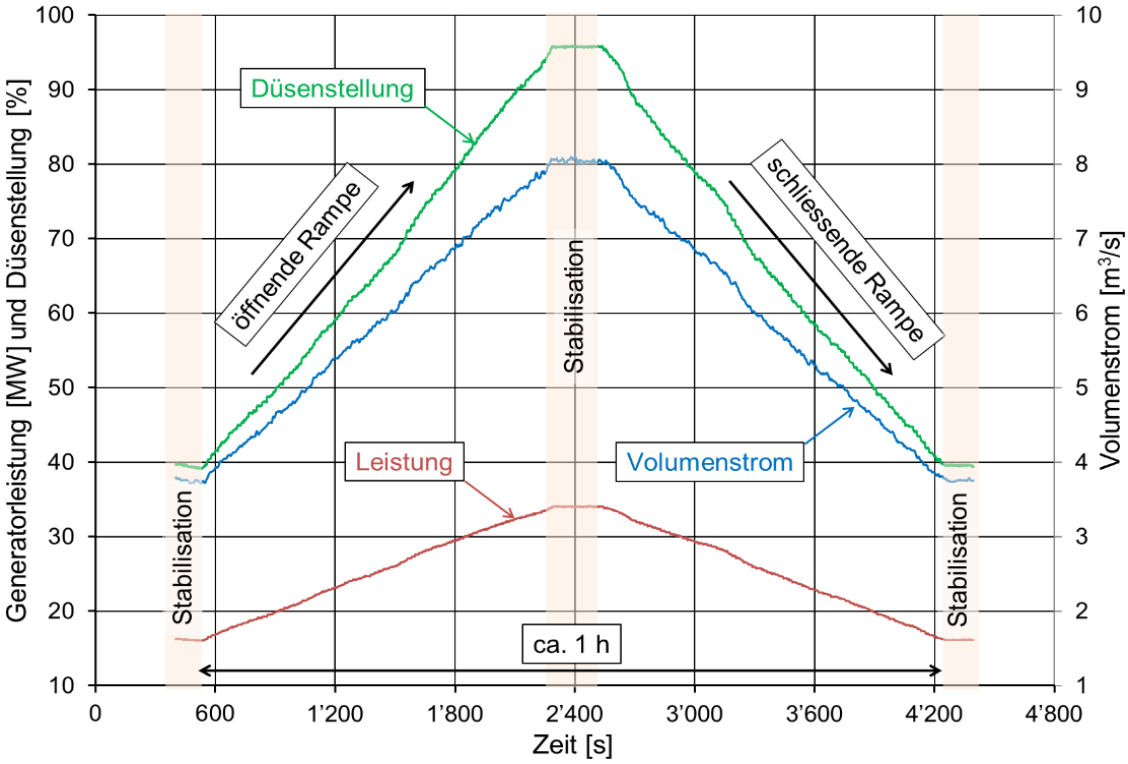


Abbildung 41: Ganglinien der elektrischen Wirkleistung und der Düsenstellungen (linke Achse) sowie des Volumenstroms (blau, rechte Achse) während einer *Sliding-Needle*-Indexwirkungsgradmessung (Abgottspon *et al.* 2016a).

Die Regulierung der Düsennadeln während des Messvorgangs sind im Leitsystem des KW Fieschertal programmiert. Der Messvorgang kann durch einen Kraftwerksmitarbeiter unter Berücksichtigung des Produktionsprogramms und des Wasserdargebots gestartet werden.

Die Messungen wurden von der HSLU geplant und ausgewertet. Pro Jahr und MG wurden im Mittel fünf SNM durchgeführt; im Forschungsprojekt über neun Jahre resultierten 90 SNM (Tabelle 5). Bei der jährlichen Planung der SNM wurde angestrebt, mindestens je eine (besser zwei) SNM pro MG vor und nach den winterlichen Revisionsarbeiten durchzuführen, so dass die Auswirkungen des hydro-abasiven Verschleisses (im Sommerhalbjahr) auf den Wirkungsgrad von den Auswirkungen der Revisionsarbeiten unterschieden werden konnten.

Tabelle 5: Anzahl SNM-Indexwirkungsgradmessungen an beiden MG des KW Fieschertal im Forschungsprojekt.

Jahr	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total
MG 1	3	6	6	5	7	6	5	4	5	47
MG 2	1	7	7	5	5	5	4	4	5	43
Beide MG	4	13	13	10	12	11	9	8	10	90

Von jeder SNM, welche eine Vielzahl von Wirkungsgraden über den Lastbereich liefert, wird ein für den betrachteten Betriebsbereich repräsentativer oder gewichteten Wirkungsgrad berechnet. Um diesen zu erhalten, können die Wirkungsgrade – dem so genannten «Lastprofil» entsprechend – über den Betriebsbereich unterschiedlich gewichtet werden. Im Falle des KW Fieschertal wurde eine gleichmässige Gewichtung über den Betriebsbereich gewählt. Daher wurde der gewichtete Wirkungsgrad zu einem bestimmten Datum als Mittelwert der gemessenen Wirkungsgrade berechnet (Abbildung 42).

Bei hydraulischen Turbinen ist es im Allgemeinen erforderlich, deren Wirkungsgrade in Funktion des Durchflusses (Volumenstroms) und der Fallhöhe zu betrachten (so genannte Muschelkurven). Da im KW Fieschertal die Fallhöhe sehr wenig variiert (4 m / 509 m = 0.8 %), konnte das beschriebene, vereinfachte Verfahren angewendet werden.

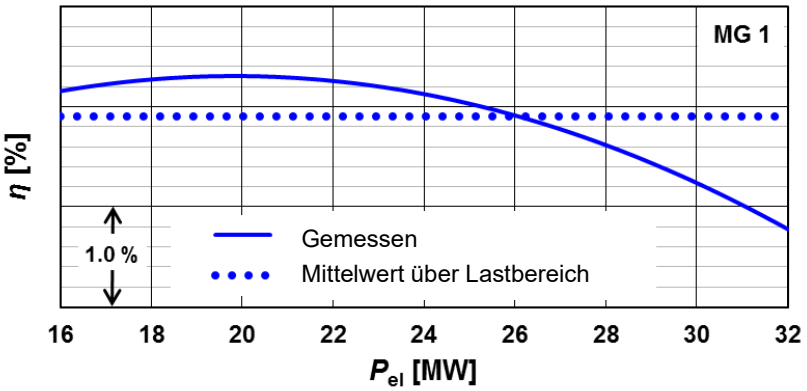


Abbildung 42: Bestimmung des gewichteten Wirkungsgrads aus einer SNM.

Abbildung 43 zeigt das Resultat von vier SNM (aus den ersten Projektjahren). Die Form der Kurven ist ähnlich, aber sie sind wie erwartet vertikal versetzt. Die oberste Kurve (SNM vom 04.07.2012) wurde kurz nach dem Hochwasserereignis vom 02.–03.08.2012 gemessen. Die Kurven der späteren beiden SNM vom 27.09. und 05.11.2012 liegen etwa 1 % tiefer. Diese relativ starke Wirkungsgradreduktion wird mit einer speziell hohen Schwebstofffracht erklärt, die zu starkem hydro-abrasivem Verschleiss führte. Zusätzlich zu der für August und September typischen Schwebstofffracht wurde nach dem Hochwasser eine erhöhte Menge Sedimentpartikel, die sich vorher im Speicherstollen ablagerten und gröber sind als üblich, durch die Turbinen transportiert. Die vierte Kurve (SNM vom 08.03.2013) liegt etwa 0.6 % höher. Diese Wirkungsgradsteigerung resultierte von den Revisionsarbeiten an den Laufradbechern im Winter.

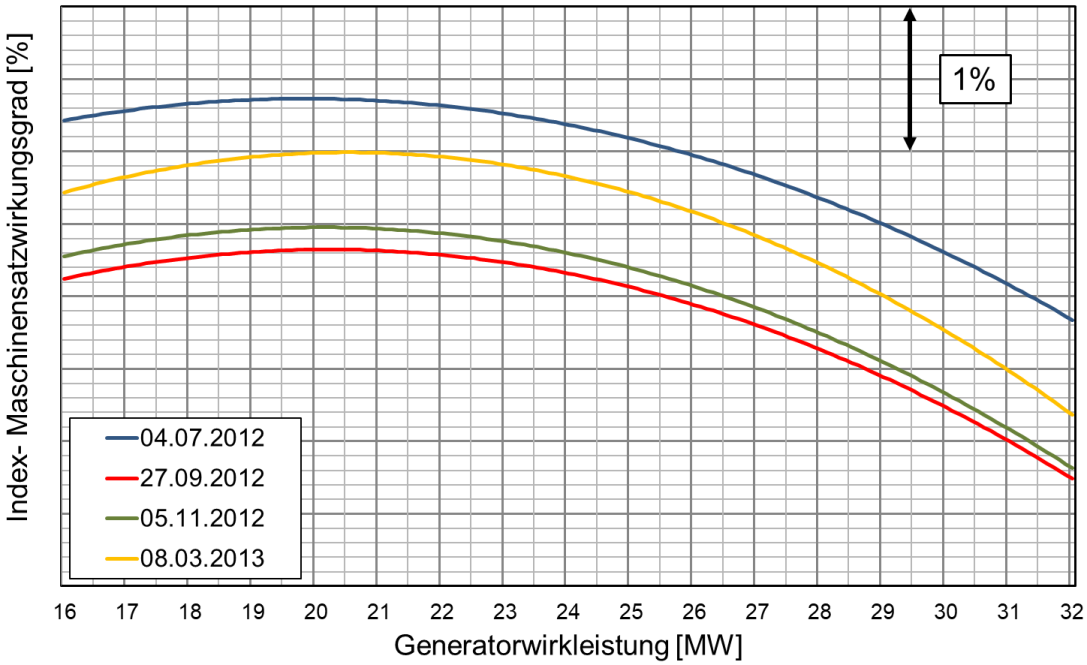


Abbildung 43: Resultierende Wirkungsgradkurven von vier SNM (Messdaten: gkw; Auswertung: HSLU).

Jede SNM wurde unter anderem folgenden Überprüfungen unterzogen:

- Überprüfung der Druckmessung vor den Turbinen durch die Auswertung der hydraulischen Verluste in der Druckleitung zwischen dem Oberwasserspiegel und dem Drucksensor,
- Kontrolle, dass der Oberwasserpegel während der SNM einen kritischen Wert nicht unterschritt,
- Überprüfung der Form der Wirkungsgradkurven bei der auf- und absteigenden Rampe,
- Überprüfung der Wirkungsgraddifferenzen zwischen der auf- und absteigenden Rampe.

Von jeder SNM, die die aufgeführten Überprüfungen bestanden hat, wurden die gewichteten Wirkungsgrade über die Zeit aufgetragen. So resultierte je eine Wirkungsgradhistorie pro MG über die Jahre.

4.3.2 Kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring

Die SNM bedingen eine Variation der Leistung einer MG gemäss einem vorgegebenen Ablauf und sind mit einem gewissen Aufwand für die Durchführung verbunden. Um Betriebseinschränkungen zu vermeiden und den Personalaufwand zu reduzieren, ist es wünschenswert, Wirkungsgrade aus den Leitsystemdaten, die standardmässig aufgezeichnet werden, laufend auszuwerten, d.h. kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring (Staubli und Abgottspon 2018).

Bei SNM wird die Leistung einer MG langsam verändert, um in quasi-stationären Verhältnissen, ähnlich wie bei traditionellen Wirkungsgradmessungen, zu messen. Im normalen Kraftwerksbetrieb hingegen sind oft keine solche quasi-stationären Zustände vorhanden, da die Betriebspunkte der MG dem Wasserdargebot und der Elektrizitätsnachfrage entsprechend häufig und rasch verstellt werden müssen. Um aus Leitsystemdaten während des normalen Kraftwerksbetriebs aussagekräftige Wirkungsgrade bestimmen zu können, müssen alle transienten Vorgänge herausgefiltert werden, was eine aufwändigere Signalverarbeitung bedingt. Danach werden die verbleibenden Messdaten geglättet, weiter gefiltert und letztlich mit einer automatisierten Nachbearbeitung aufbereitet.

Aufgrund der weniger reproduzierbaren Bedingungen ist die Messunsicherheit im Indexwirkungsgrad mit dem kontinuierlichen Wirkungsgradmonitoring höher als bei den SNM; hingegen ist die zeitliche Auflösung höher (Abgottspon *et al.* 2016b, 2018).

4.3.3 Neuartige frontbündige Drucksensoren

Für das Wirkungsgradmonitoring und gewisse Leittechnikfunktionen ist der Wasserdruck im Zulauf der Turbinen eine wichtige Messgrösse (Hochdruckmessebene). Im KW Fieschertal wurde in den Vorjahren festgestellt, dass diese Druckmesssignale zeitweise verfälscht sind. Es gab Perioden, in denen die Druckmesssignale unplausibel waren, in anderen Perioden waren sie versetzt, aber nicht stets um ein konstantes Mass oder einen konstanten Faktor. Gemäss Erfahrung der HSLU ist dies auch bei anderen Wasserkraftanlagen mit zeitweise stark schwebstoffhaltigem Wasser ein Problem.

Üblicherweise sind die Druckaufnehmer neben der Druckleitung installiert. In den dünnen Verbindungsleitungen (d_i < 10 mm) zwischen den Druckmessstellen am Umfang der Druckleitungen und den Sensoren, oder in den Sensoren selbst, kann es zu Feinsedimentablagerungen kommen, die trotz gelegentlicher Spülungen die Druckmessungen verfälschen. Weitere mögliche Gründe für verfälschte Druckmessungen sind die mangelnde Langzeitstabilität der Druckaufnehmer, Temperatureinflüsse und Störungen der Signalübertragung.

Um die Ursachen dieser Probleme besser zu verstehen und Gegenmassnahmen zu entwickeln, wurden Alternativen zur herkömmlichen Druckmessanordnung gesucht. Mit der Firma Keller Druckmesstechnik, Winterthur, wurde ein Drucksensor evaluiert und so angepasst, dass er direkt in einem Einzoll-Gewindeanschluss in der Wandung der Druckleitung eingebaut werden kann. Der Sensor wurde so geplant und eingeschraubt, dass sein wasserberührtes Ende mit der Innenseite der Rohrwandung bündig ist («frontbündiger» Einbau).

Zum Vergleich wurden auch fabrikneue herkömmliche Drucksensoren, die an einem Anschluss nicht direkt an der Druckleitung installiert werden, eingesetzt.

Im Frühsommer 2019 wurden die zusätzlichen Druckaufnehmer an den Zuleitungen zwischen den Kugelschiebern und den MG des KW Fieschertal installiert (Abbildung 44). Weiter wurde eine temporäre Datenerfassung (mit höherer Abtastrate als via Leitsystem verfügbar) für diese zusätzlichen Drucksensoren eingerichtet (Kabel, Messumformer, Analog-Digitalwandler, Mess-PC mit Internetzugriff). Nach einigen Monaten wurde festgestellt, dass die Signale bei der Datenerfassung durch unerwünschte Potentialdifferenzen verfälscht wurden. Deshalb wurden die Signale durch den Einbau von Trennverstärkern galvanisch getrennt.



Abbildung 44: Links herkömmliche Druckmessung mit Spülhahn, rechts frontbündiger Druckaufnehmer (Foto: HSLU).

4.4 Zeitliche Übersicht der durchgeführten Messungen

In Abbildung 45 sind die durchgeführten Messungen betreffend Turbinenabrasion und Wirkungsgradveränderungen über die neun untersuchten Jahre 2012–2020 für beide MG zusammengestellt. Weiter ist dargestellt, in welchen Jahren welches Laufrad im Einsatz war und welche Revisionsarbeiten an den Laufrädern und Düsen durchgeführt wurden. Die im KW Fieschertal vorhandenen Laufräder sind in Abschnitt 3.5 beschrieben.

Im Winter 2016/2017 wurde das Laufrad 1 (in MG 1) nicht nachbeschichtet, da bei der anderen MG aufgrund des Laufradwechsels in diesem Winter kein Nachbeschichten erforderlich war und der Aufwand für das Nachbeschichten einer einzelnen MG als zu hoch angesehen wurde. Unabhängig von der Anzahl der vor Ort zu beschichtenden Laufräder pro Winter fällt ein gewisser Grundaufwand für die temporären Installationen (Einrichtungen für das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen und das Abführen der Abluft via Unterwasserkanal) an.

Parallel zu den in Abbildung 45 dargestellten periodischen Messungen wurden in den Jahren 2012–2020 die Schwebstoffbelastung während jeder Schwebstoffsaison kontinuierlich gemessen und der Wirkungsgrad der beiden Turbinen ebenfalls kontinuierlich überwacht.

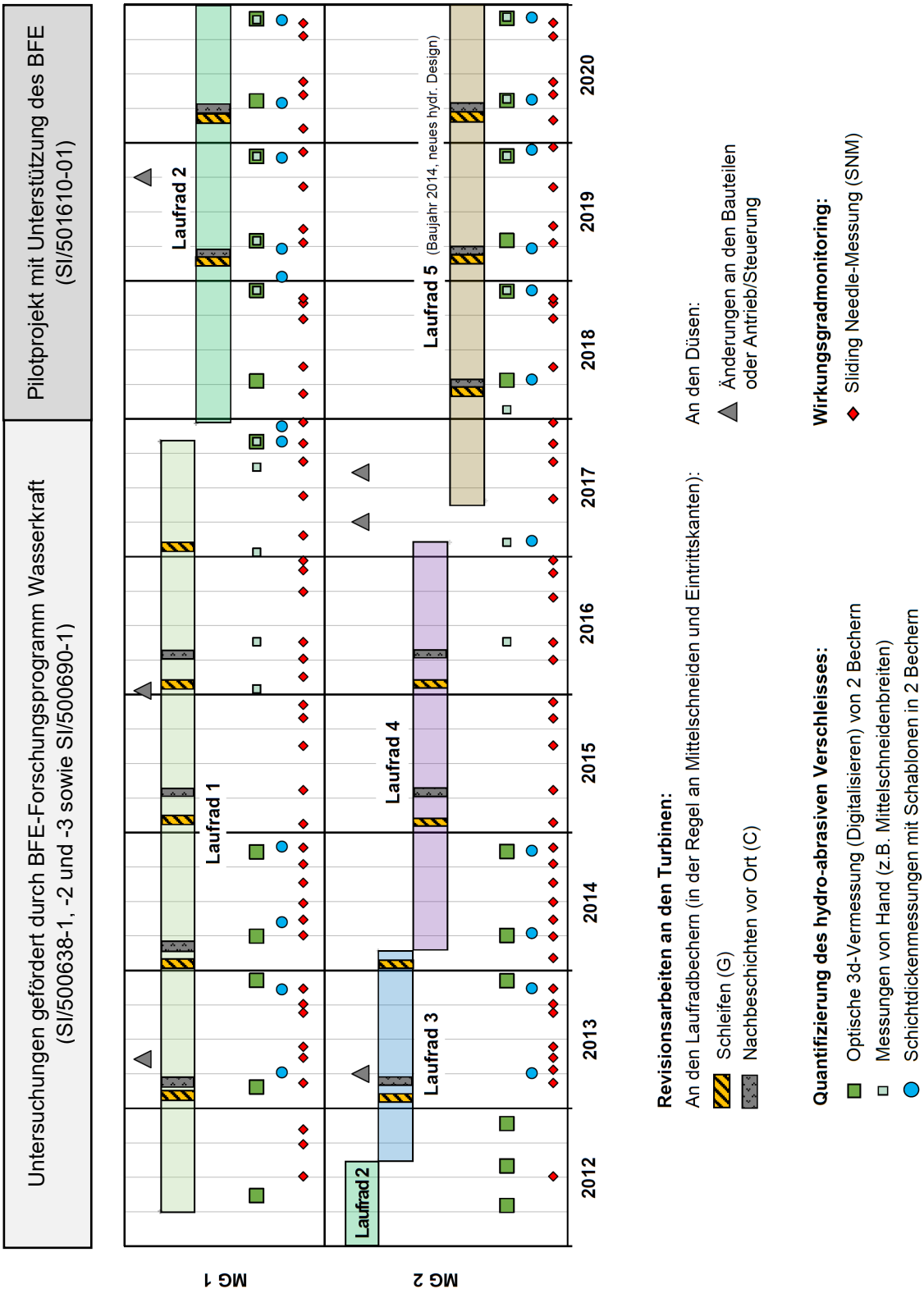


Abbildung 45: Zeitliche Übersicht über den Laufradeinsatz, die Revisionsarbeiten und die Messungen an den beiden Maschinen gruppen (MG) des KW Fieschertal (weitergeführt aus Felix 2017 und Abgottspon *et al.* 2018).

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Schwebstoffbelastung

Im Folgenden werden die Resultate des Schwebstoffmonitorings in der Schieberkammer vorgestellt, da dies die Hauptmessstelle für die Quantifizierung der Schwebstoffbelastung der Turbinen ist. Zuerst wird auf die Härte, Form und Dichte der Sedimentpartikel eingegangen, dann auf die variableren Parameter wie Schwebstoffkonzentration und Partikelgrösse.

5.1.1 Härte, Form und Dichte der Sedimentpartikel

Abbildung 46 zeigt die mineralogische Zusammensetzung (Massenprozente) von acht Feinsedimentproben aus dem KW Fieschertal, die im Tonmineralogie-Labor des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich mittels Rietveld-Röntgenbeugung untersucht wurden. Die Proben 1 bis 3 stammen von gepumpten Wasserproben aus der Schieberkammer vom 11.–27.08.2012. Die Probe 4 wurde 2011 von Ablagerungen aus dem Unterwasserkanal entnommen; es handelte sich also um etwas gröberes Material. Die Proben 5 bis 8 wurden vom 26.04.–08.06.2011 von Ablagerungen aus den Eimern bei den Trübungssonden im Maschinenhaus entnommen, stammen also von Wasser aus dem Unterwasserkanal (Abgottspon 2011).

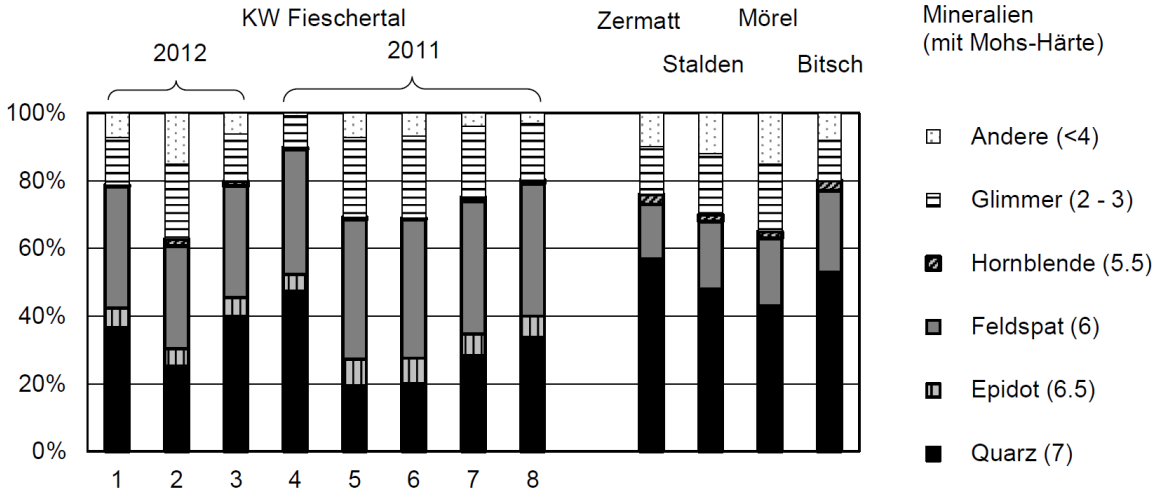


Abbildung 46: Mineralogische Zusammensetzung von 8 Sedimentproben aus dem Triebwasser des KW Fieschertal (Analysen: Abgottspon 2011 und Felix 2017) im Vergleich zu Resultaten von einigen anderen KW im Kanton Wallis (Krause & Grein 1996).

Die Mineralien sind der **Härte** nach geordnet dargestellt (unten die härtesten Anteile). Bezogen auf die Turbinenabrasion lassen sich drei Gruppen unterscheiden und entsprechende Kennwerte ableiten:

- Die Beschichtung hat eine Mohshärte von 6.5 gemäss Abschnitt 2.2.2. Die schwarz dargestellten Anteile (Quarz) sind härter und deshalb abrasiv für die Hartbeschichtung. Der Anteil der Mineralien mit Mohshärte > 6.5 variierte von 20 bis 47 % mit einem Mittelwert von 31 % (Standardabweichung 10 %). Dementsprechend beträgt im Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2013 / 2019) der Partikelhärtebeiwert $k_{hardness}$ = 0.31 für die Abrasion der Beschichtung.
- Der Turbinenstahl hat eine Mohshärte von 4.5 gemäss Abschnitt 2.2.2. Die grau und schwarz dargestellten Anteile (vor allem Quarz und Feldspat, mit etwas Hornblende und Epidot) sind

härter und können deshalb das Grundmaterial abtragen. Der Anteil der Mineralien mit Mohshärte > 4.5 variierte von 63 bis 90 % mit einem Mittelwert von 76 % (Standardabweichung 8 %). Im Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2013/2019) wurde für die Abrasion des Grundmaterials $k_{hardness} \approx 0.75$ eingesetzt (gerundet).

- Etwa ein Viertel der Sedimentmasse besteht aus Glimmern (Muskovit und Biotit) sowie anderen Mineralien mit Mohshärte < 4. Diese sind für die Turbinenabrasion nicht relevant.

Bei anderen alpinen Wasserkraftanlagen im Kanton Wallis betragen die Anteile der Mineralien, die für den Turbinenstahl abrasiv sind, 65 bis 80 % (Krause & Grein 1996). Der Wert von 76 % für das KW Fieschertal liegt auch in diesem für die Zentralalpen typischen Bereich.

Die **Form** der Partikel wurde mittels Elektronenmikroskop-Bildern charakterisiert (Abbildung 47). Es handelt sich um getrocknete Partikel aus einer Wasserprobe, die am 27.08.2012 in der Schieberkammer dem Triebwasser entnommen wurde (= Probe 3 der mineralogischen Analysen). Bei plättchenförmigen Partikeln handelt es sich typischerweise um Glimmer (Schichtsilikate), welche die Schwebstoffmessungen (insbesondere mit optischen Methoden) stark beeinflussen können. Für die Abrasion an Turbinen hingegen sind diese plättchenförmigen Partikel, wie erwähnt, nicht massgebend. Die übrigen Partikel waren kompakt bis länglich mit geringem Rundungsgrad, also kantig. Gemäss Abschnitt 2.2.2 wird der Einfluss der Partikelform auf die Abrasion mit dem Beiwert k_{shape} berücksichtigt. Durch visuellen Vergleich der Partikelbilder vom KW Fieschertal mit den Abbildungen in Anhang D der IEC 62364 (2013/2019) wurde der Beiwert $k_{shape} = 2$ für kantige Partikel gesetzt. Kantige Partikel sind für Gebirgsregionen typisch, da die Partikel noch nicht durch einen langen Transportweg gerundet werden konnten.

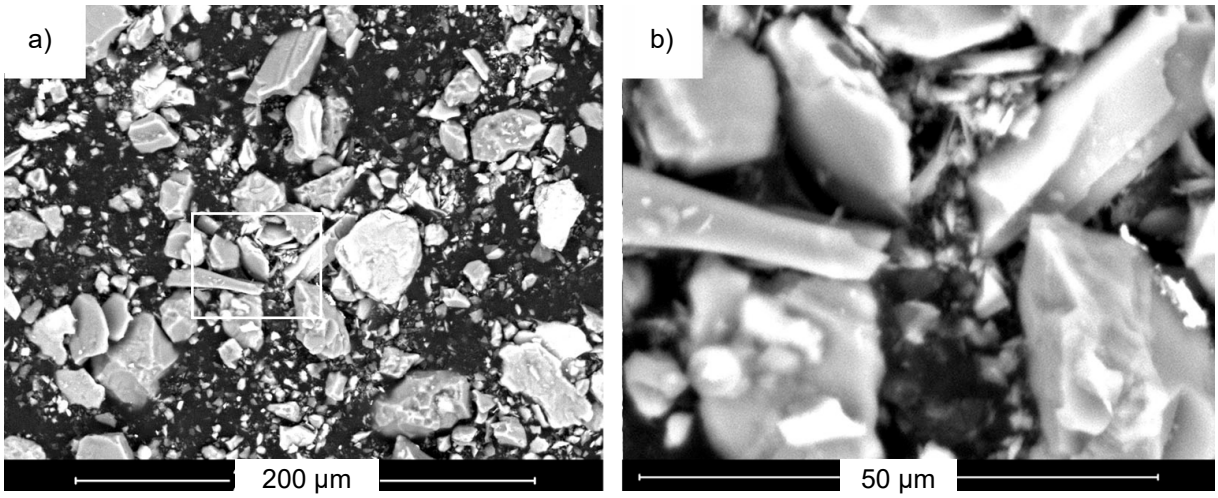


Abbildung 47: Sedimentpartikel aus einer Wasserprobe des KW Fieschertal; b) zeigt einen vergrösserten Ausschnitt aus a). (Felix 2017; Elektronenmikroskop-Bilder: Institut für Baustoffe, ETH Zürich).

Weiter wurde die **Feststoffdichte** von getrockneten Partikeln im Labor mit einem Helium-Pyknometer bestimmt. Als Mittelwert von 12 Proben (2012–2014) resultierte $\rho_s = 2.73$ g/cm^3. Die erweiterte Messunsicherheit von ±0.07 g/cm^3 entsprach nur 3 %. Der Wert von 2.73 g/cm^3 ist plausibel im Vergleich zu Literaturwerten, da Quarz eine Dichte von 2.65 g/cm^3 aufweist und die Dichten von beispielsweise Epidot und Glimmer etwas höher liegen. Die ermittelte Feststoffdichte wurde bei der Auswertung der CFDM- und der Druckmessdaten für die Umrechnung der Gemischdichte auf die *SSC* verwendet.

5.1.2 Schwebstoffkonzentrationen *SSC*

Wie in Abschnitt 4.1.7 erwähnt, wurden während der Schwebstoffsaisons mehrerer Jahre an der Wasserfassung, am Ende des Entsanders und in der Schieberkammer zahlreiche Wasserproben entnommen und im Labor ausgewertet. Abbildung 48 zeigt die mit der gravimetrischen Methode bestimmten *SSC* des Triebwassers in der Druckleitung im Lauf der Jahre. Wie erwartet, sind die *SSC* von Mitte November bis Mitte April tief (< 0.05 g/l). Der Rest des Jahres, mit hohen *SSC* vor allem im Juli und August, wird als Schwebstofftransportsaison - oder auch kurz als Schwebstoffsaison - bezeichnet.

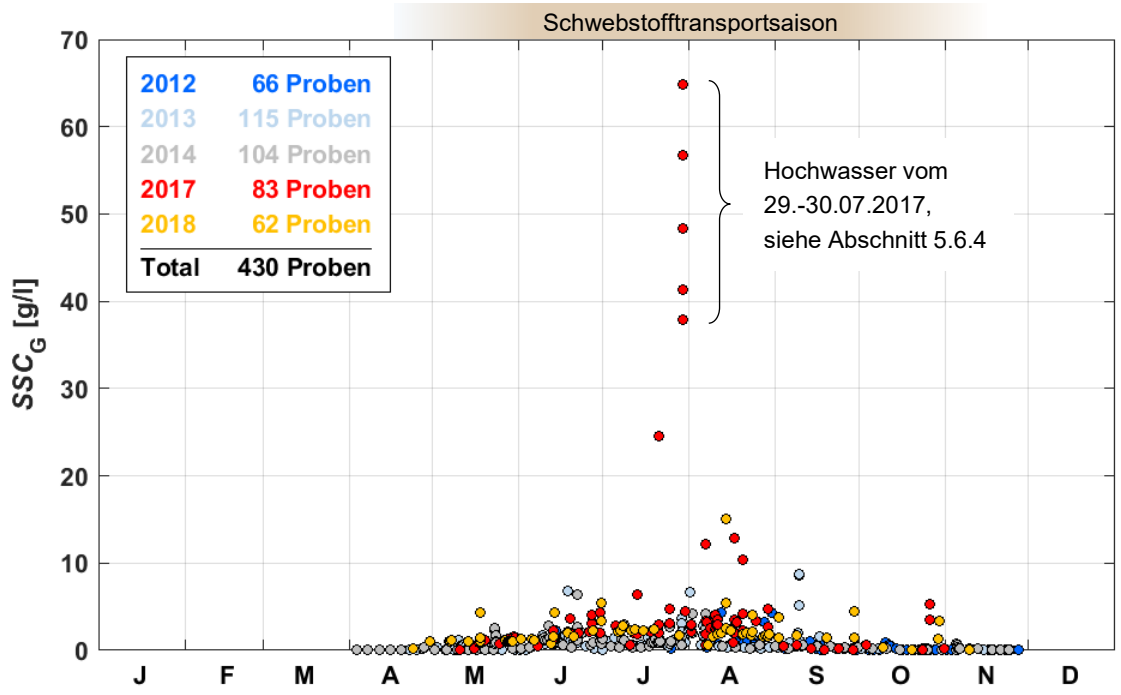


Abbildung 48: Schwebstoffkonzentrationen *SSC* von den Wasserproben (gravimetrische Methode) in der Schieberkammer (Messungen: VAW).

Nebst den gravimetrischen *SSC* von den Probenehmern mit geringer zeitlicher Auflösung lieferten die übrigen Messgeräte gemäss Tabelle 1 quasi-kontinuierliche *SSC*-Ganglinien (in der Regel mit minütlicher Auflösung). Wie in Abschnitt 4.1.8 erläutert, wurden die an einer Messstelle verfügbaren und plausiblen Messdaten zu durchgehenden, *best estimate*-*SSC*-Ganglinien zusammengestellt. Abbildung 49 zeigt diese für alle neun untersuchten Jahre.

Hohe *SSC* traten in der Schwebstoffsaison auf, welche beim Laufwasserkraftwerk Fieschertal den Monaten mit hohen Anteilen an der Jahreserzeugung (hellblaue Balken) entspricht. In Abbildung 49 sind weiter *SSC*-Spitzenwerte von vier Hochwasser- bzw. Schwebstofftransportereignissen eingekreist, auf welche in den Abschnitten 5.6.3 bis 5.6.6 näher eingegangen wird. Der Höchstwert von ca. 110 g/l wurde während des Hochwassers vom 29.–30.07.2017 gemessen. Weitere *SSC*-Spitzen in der Druckleitung resultierten vor allem aus betrieblichen Gründen (Resuspensions-Ereignisse, mit * markiert) wie im Abschnitt 5.1.4 erläutert wird.

In Abbildung 50 sind dieselben *SSC*-Daten im Bereich bis 12 g/l dargestellt. In der Schwebstoffsaison traten zahlreiche *SSC*-Spitzen von mehreren g/l auf. Um die volle Variation der *SSC* zu erfassen, sind kontinuierliche Messungen erforderlich.

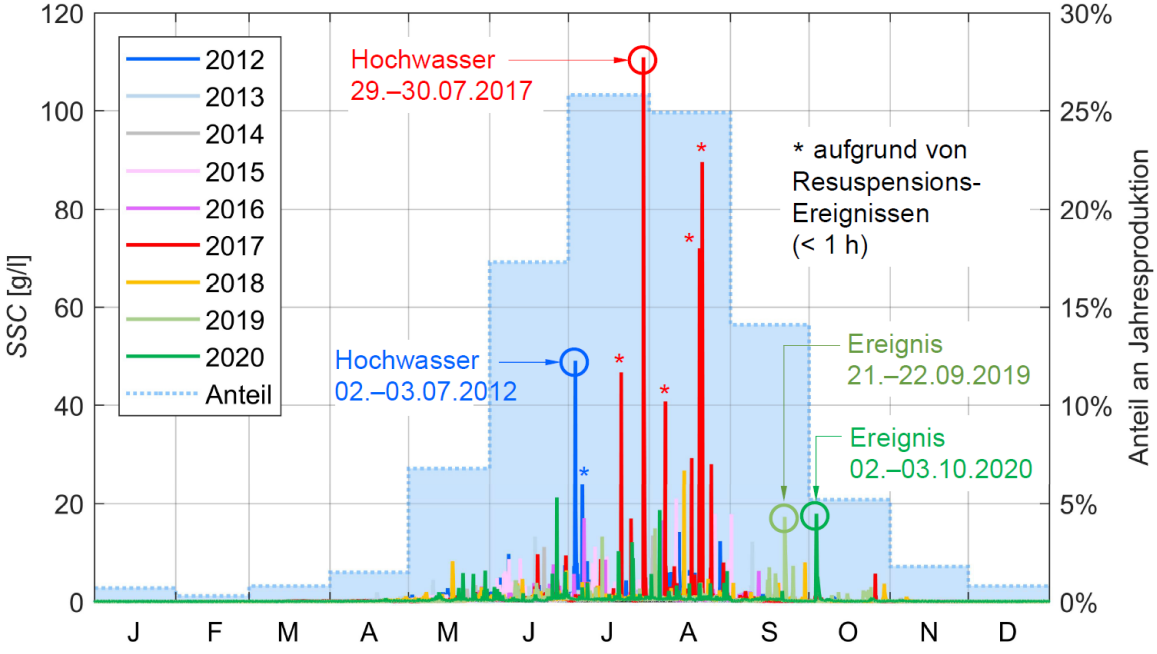


Abbildung 49: Schwebstoffkonzentrationen *SSC* in der Druckleitung im Lauf der Jahre (*best-estimate* aufgrund der Messungen mit verschiedenen Methoden in der Schieberkammer) sowie mittlere monatliche Anteile (hellblaue Balken) an der Jahresproduktion des KW Fieschertal (Betriebsdaten: gkw; Schwebstoffdaten und Auswertung: VAW).

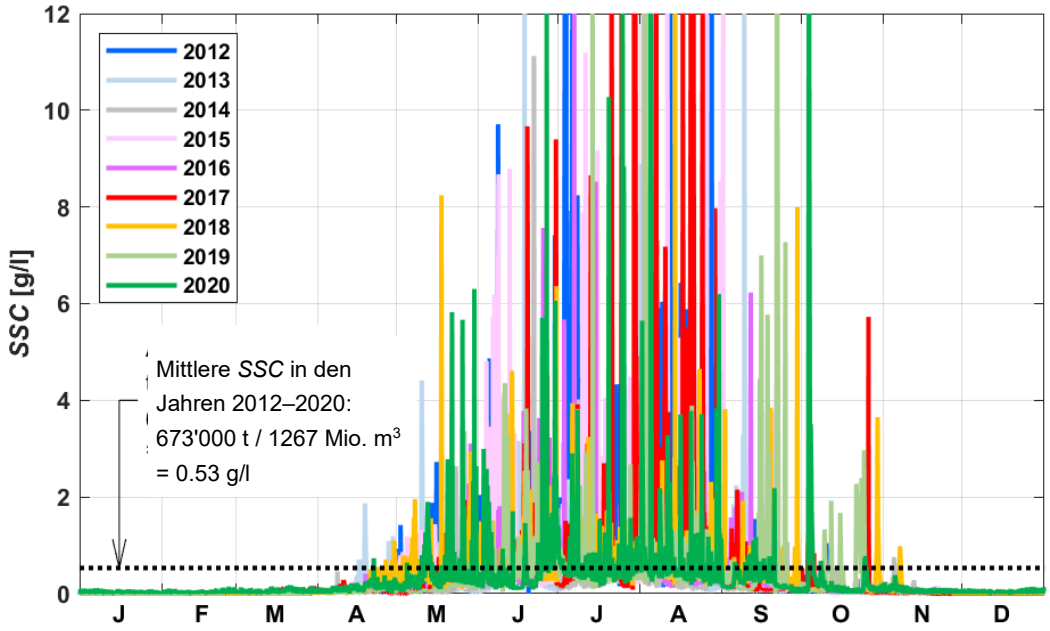


Abbildung 50: Wie vorherige Abbildung, aber Bereich der Schwebstoffkonzentrationen *SSC* bis 12 g/l (Auswertung: VAW).

Der Mittelwert der *SSC* resultiert aus der Sedimentfracht geteilt durch das turbinierte Volumen in den neun Jahren; diese Werte werden in Abschnitt 5.1.5 präsentiert. Die Dauerkurve der *SSC* wird im folgenden Abschnitt zusammen mit jener der d_{50} diskutiert.

5.1.3 Partikelgrössen (PSD)

Wie in Abschnitt 4.1.9 erwähnt, wurden aus den Messdaten des Laserdiffraktometers und ergänzenden Daten durchgehende Zeitreihen des Median-Partikeldurchmessers d_{50} in der Druckleitung über die neun Jahre zusammengestellt (Abbildung 51). Dieser liegt in der Regel im Bereich von Mittelsilt (6 bis 20 µm), nimmt aber während der Schwebstoffsaison allenfalls bei Hochwassern und vor allem während Resuspensions-Ereignissen im Speicherstollen (Abschnitt 5.1.4) vorübergehend bis in den Bereich von Feinsand (60 bis 200 µm) zu.

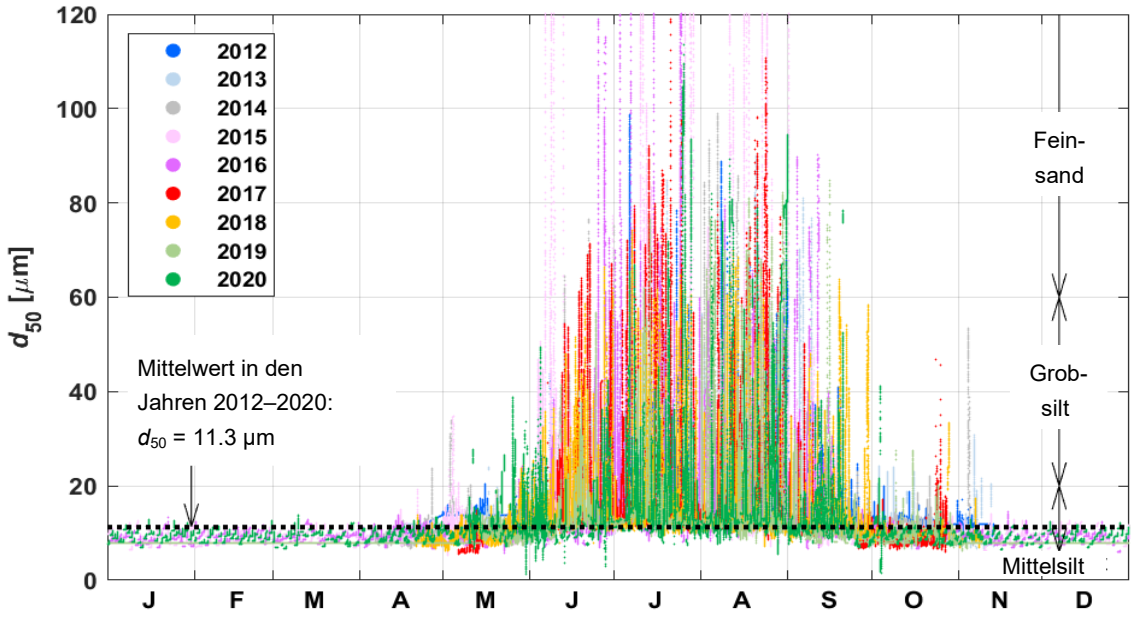


Abbildung 51: Median-Partikelgrösse d_{50} im Triebwasser des KW Fieschertal im Lauf der Jahre (Messungen und Auswertung: VAW).

Die Abbildung 52 zeigt die Dauerkurve des d_{50} (gestrichelte Linie, rechte vertikale Achse) zusammen mit der Dauerkurve der *SSC* (ausgezogene Linie, linke vertikale Achse) für die Periode 2012–2020. In der Abbildung 52a sind die Dauerkurven auf ein Jahr bezogen dargestellt (alle Werte). In der Abbildung 52b ist ein Detail davon mit den hohen Werten dargestellt, die im Mittel während nur einem Tag pro Jahr auftreten, wobei die vertikalen Achsen nun grössere Wertebereiche zeigen. An der oberen horizontalen Achse kann abgelesen werden, zu wieviel Prozent der Zeit eine gewisse *SSC* oder ein gewisser d_{50} erreicht bzw. überschritten wurde. An der unteren horizontalen Achse ist dieselbe Grösse als Anzahl Tage pro Jahr angegeben.

Die *SSC* war < 0.1 g/l während der Hälfte der Zeit (Winterhalbjahr). Der *SSC*-Mittelwert von 0.53 g/l wurde während ca. 45 Tagen/Jahr überschritten. Die *SSC* war > 10 g/l während nur ca. 4.5 h/Jahr. Da sich diese Werte auf die ganze Untersuchungsperiode von neun Jahren beziehen, können in einzelnen Jahren mit grösseren Hochwassern deutlich höhere *SSC* vorkommen (im Bereich kurzer Überschreitungsdauern von wenigen Tagen im Jahr).

Der d_{50} war < 10 µm während der Hälfte der Zeit (Winterhalbjahr). Der d_{50} lag im Bereich von Mittelsilt (20 bis 60 µm) während ca. 14 Tagen/Jahr und im Bereich von Feinsand (60 bis 200 µm) während gut 1 Tag/Jahr.

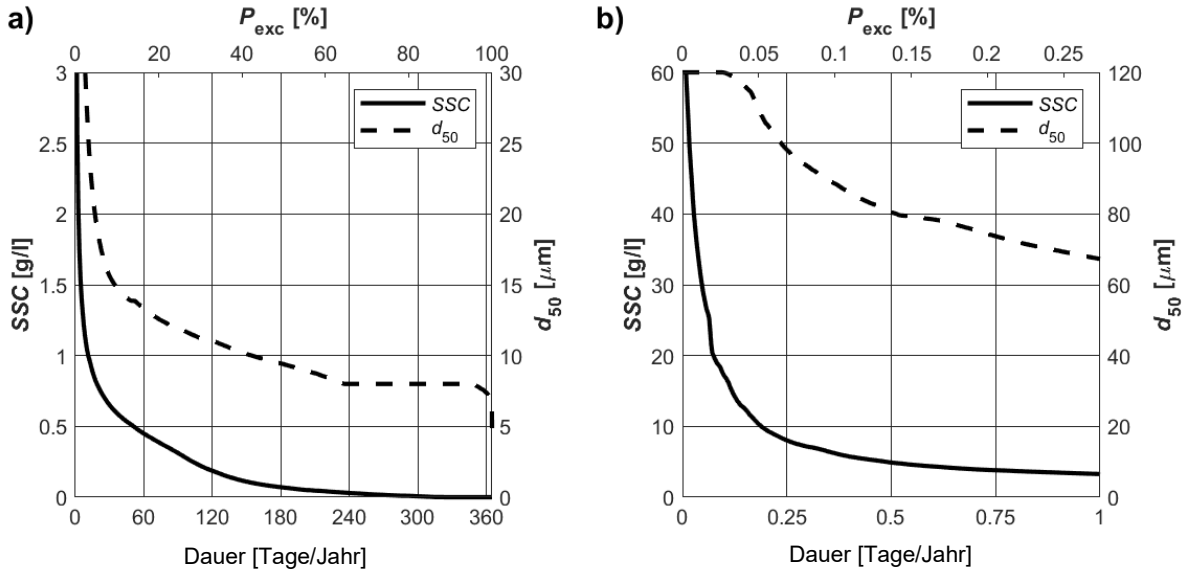


Abbildung 52: Dauerkurven der Schwebstoffkonzentrationen *SSC* und der Median-Partikelgrösse d_{50} im Triebwasser des KW Fieschertal 2012–2020, a) für ganzes Jahr und b) Detail während 1 Tag/Jahr (vertikalen Achsen sind auch anders skaliert; Auswertung: VAW).

5.1.4 Betriebliche Einflüsse auf die Schwebstoffbelastung im Triebwasser

In den beiden obigen Abschnitten ist ersichtlich, dass die *SSC* und d_{50} zeitweise stark zunehmen. Dafür ist das Wettergeschehen, mit Schnee- und Gletscherschmelze sowie insbesondere intensiven bzw. ergiebigen Niederschlägen, entscheidend. Die Auswertung der Schwebstoffmessungen zeigte aber auch, dass die Bewirtschaftung des Speicherstollens einen starken Einfluss auf die *SSC* und d_{50} haben kann. Wenn der Speicherstollen nach der sommerlichen Volllastzeit wieder als Tagesspeicher betrieben wird, nehmen bei einer Absenkung des Stollenpegels die Fliessgeschwindigkeit, die Sohlschubspannung und die Sedimenttransportkapazität zu und während des Sommers abgelagerte Partikel können resuspendiert werden. So werden bei tiefen Stollenpegeln mehr und gröbere Partikel transportiert als bei hohen Pegeln (Abbildung 53).

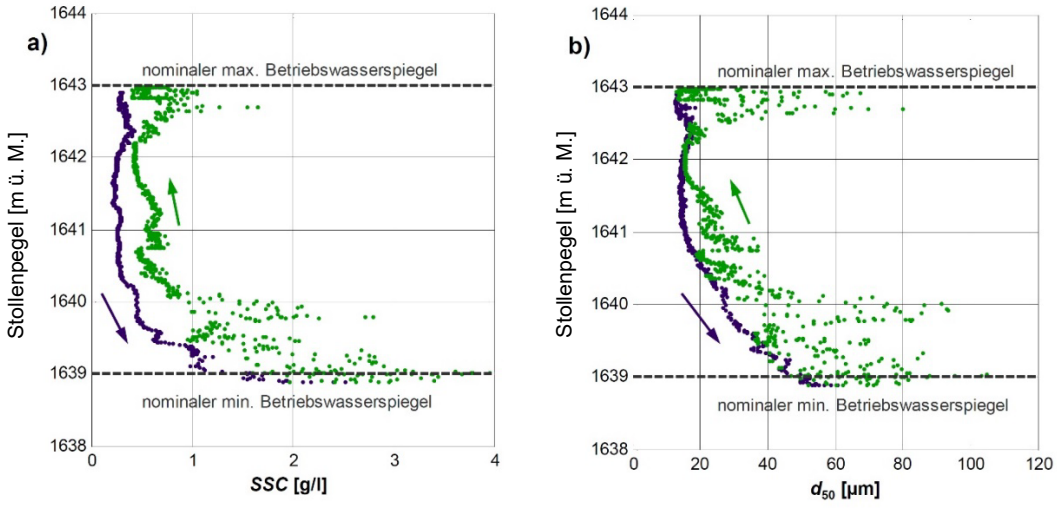


Abbildung 53: a) Schwebstoffkonzentration *SSC* und b) Median-Partikeldurchmesser d_{50} im Triebwasser des KW Fieschertal in Abhängigkeit des Stollenpegels, Beispiel des 10.08.2012; violette Punkte mit sinkendem Pegel, grüne mit steigendem Pegel (Felix *et al.* 2014a, ausgewertet mit Einbezug von Betriebsdaten der gkw).

Im Speicherstollen tritt also durch Absetz- und Resuspensionsvorgänge zeitweise eine Sortierung und Konzentrierung der Partikel auf (Felix 2014a und 2017). Dies wurde bereits früher vom Kraftwerksbetreibers und Abgottspon (2011) festgestellt. Diese Effekte führen dazu, dass die Turbinen vorübergehend deutlich stärker mit Feinsedimenten belastet werden und höhere Abrasionsraten resultieren als im Betrieb ohne tiefe Stollenpegel.

5.1.5 Schwebstoff- und Wasserfrachten in der Druckleitung

Basierend auf der Ganglinie der *best-estimate-SSC* in der Druckleitung (Abbildung 49) und der Ganglinie des Durchflusses in der Druckleitung wurde die Schwebstofftransportrate berechnet. Bei Volllastbetrieb und der mittleren *SSC* von 0.53 g/l werden in der Druckleitung ca. 8 kg Silt pro Sekunde transportiert, das sind gegen 700 t an einem typischen Sommertag.

Die Schwebstofftransportrate wurde über die Zeit zur Schwebstofffracht (*Suspended Sediment Load SSL*) integriert. In Abbildung 54 sind die jährlichen *SSL* in der Druckleitung im Lauf der Zeit für die Jahre 2012 bis 2020 dargestellt (in Tonnen, jeweils kumuliert seit Jahresbeginn).

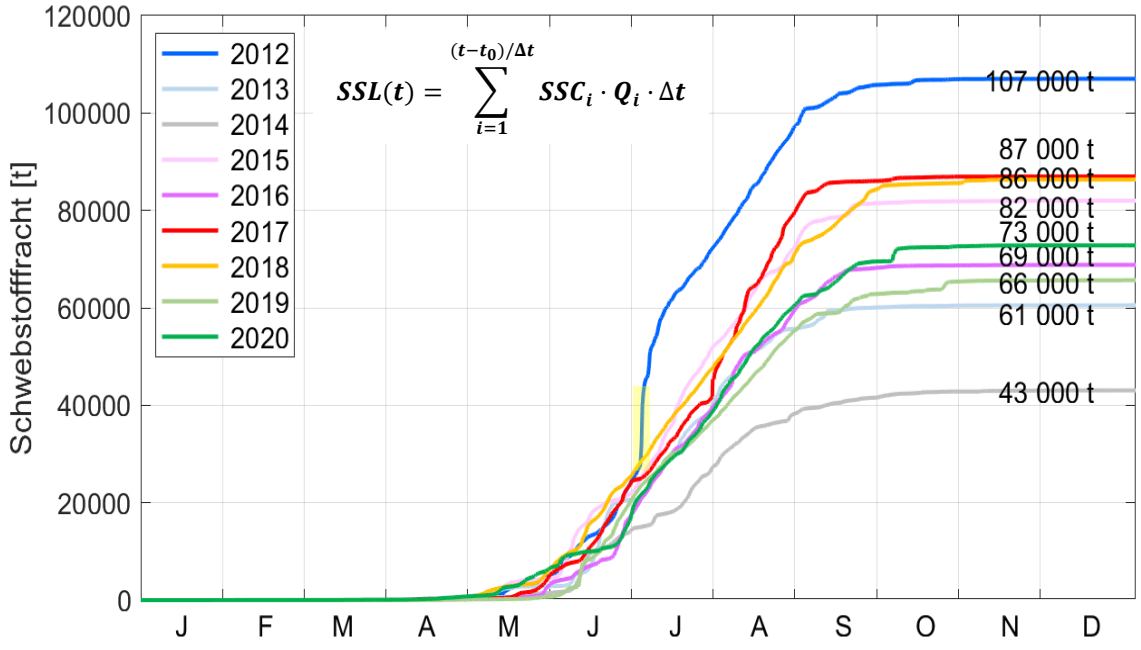


Abbildung 54: Jährliche Schwebstofffrachten (*Suspended Sediment Loads SSL*) in der Druckleitung des KW Fieschertal 2012 bis 2020; gelb hervorgehoben die hohe Schwebstofffracht infolge des Hochwassers 2012 mit durchgehendem Kraftwerksbetrieb (Auswertung VAW, mit Einbezug von Betriebsdaten der gkw).

Der Mittelwert der *SSL* über die neun Jahre betrug 75'000 t pro Jahr. Wäre diese Sedimentmenge auf der Strasse oder der Schiene zu transportieren, wären jedes Jahr gegen 4000 Lastwagenfahrten oder ein 16 km langer Güterzug erforderlich. Bezogen auf das Einzugsgebiet von 58.6 km^2 (Abschnitt 3.2) und mit einer Gesteinsdichte von 2.73 t/m^3 (Abschnitt 5.1.1) entsprechen die 75'000 t pro Jahr einem Felsabtrag von 0.47 mm/Jahr. Wittmann *et al.* (2007) schätzten die langfristige Abtragsrate (Denudation) in den kristallinen Zentralalpen auf 0.9 ±0.3 mm. Da nicht die ganze Sedimentfracht aus dem Einzugsgebiet durch die Druckleitung transportiert wird (Geschiebe, Schwebstoffe im Überwasser und Spülungen), ist der Wert der *SSL* in der Druckleitung plausibel.

Im Jahr 2014 war die *SSL* aussergewöhnlich tief (43'000 t). Im Jahr 2012 hingegen wurde die Kraftwerksanlage während eines grösseren Hochwasserereignisses anfangs Juli durchgehend betrieben, was zu einer starken Zunahme der *SSL* (gelbe Markierung) in jenen Tagen und den Monaten nach dem Ereignis führte, so dass eine ausserordentlich hohe *SSL* für jenes Jahr resultierte (107'000 t). Das erhöhte Schwebstoffaufkommen in den Monaten nach einem Hochwasserereignis ist auch im Jahr 2017 nach dem Ereignis Ende Juli zu sehen, auch wenn das Kraftwerk während des Grossteils des Ereignisses ausser Betrieb war. Auf diese beiden Ereignisse wird in Abschnitt 5.6.3 und Abschnitt 5.6.4 näher eingegangen.

Nebst starkem Schwebstofftransport infolge Hochwasser trat jeweils im Frühsommer eine Phase erhöhten Schwebstofftransports auf (steilere Abschnitte der Kurven im unteren Bereich der Abbildung 54). Dies wird folgendem Vorgang im Einzugsgebiet zugeschrieben: Auch im Winterhalbjahr wird am Gletscherbett Fels erodiert. Bei der Schneeschmelze und dem Beginn der Gletscherschmelze im Frühsommer werden vermutlich die entstandenen Feinsedimentpartikel vermehrt abtransportiert und gelangen ins Triebwasser.

Die Abbildung 55 zeigt die jährlichen *SSL* der beiden Turbinen in Funktion der turbinierten Volumina von 2012 bis 2020. Die turbinierten Volumina beziehen sich definitionsgemäss eigentlich auf das Wasser-Sediment-Gemisch; da aber der Sedimentanteil weniger als ein Promille ausmacht, können die turbinierten Volumina als Wasservolumina (*WV*) oder Wasserfrachten bezeichnet werden. Nebst den *SSL* und *WV*-Werten der einzelnen Jahre sind deren Mittelwerte eingetragen (horizontale und vertikale Linien mit grauem Schnittpunkt). An den geneigten Linien lassen sich *SSC* ablesen, da diese aus dem Verhältnis der *SSL* und *WV* resultieren. Die mittleren jährlichen *SSC* variierten fast so stark wie die *SSL*. Wie in Abbildung 50 angegeben, resultiert die mittlere *SSC* = 0.53 g/l über die neun Jahre aus dem Verhältnis der totalen *SSL* und *WV*. Der graue Schnittpunkt zeigt auch diese mittlere *SSC*.

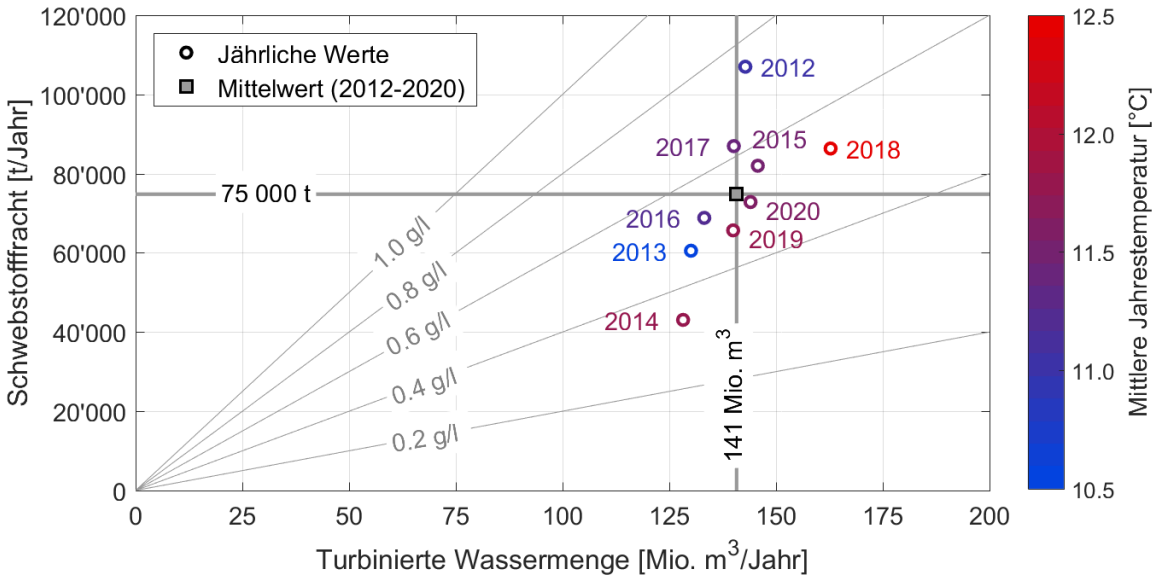


Abbildung 55: Jährliche Schwebstofffrachten (*SSL*) in Funktion der jährlich turbinierten Wasserfrachten (*WV*) im KW Fieschertal (ausgewertet von VAW mit Einbezug von Betriebsdaten der gkw). Die Farbskala zeigt die mittlere Jahres-Lufttemperatur in Sion (gemäss MeteoSchweiz). Die grauen geneigten Linien geben die mittlere Schwebstoffkonzentration an.

In Abbildung 55 zeigt die Farbe der Punkte (Farbskala am rechten Diagrammrand) die mittlere Referenz-Jahrestemperatur in Sitten/Sion im Mittelwallis, ca. 65 km westsüdwestlich von Fieschertal. Es fällt auf, dass die höchste Abflussmenge im Jahr 2018 zusammen mit der höchsten mittleren Jahrestemperatur auftrat. Als Hauptgrund dafür wird gesehen, dass in einem solchen wärmeren Jahr die Gletscher- und Firnschmelze stärker war und das Abflussvolumen vergrösserte. Weiter kann auch der leicht überdurchschnittliche Niederschlag im 2018 (Abbildung 86) zu einem vergrösserten Abfluss beigetragen haben, sofern dieser nicht in Form von Schnee im Einzugsgebiet zwischengespeichert wurde.

In Tabelle 6 sind die Kennwerte der *SSL*, *WV* und *SSC* zusammengestellt. Unter Annahme von Normalverteilungen wurden auch die unteren und oberen Grenzen der Bereiche angegeben, in denen die Werte mit 95 % Wahrscheinlichkeit liegen (± doppelte Standardabweichung). Die höchste und die tiefste *SSL* in den neun Jahren (107'000 t im Jahr 2012 bzw. 43'000 t im Jahr 2014) liegen 43 % über bzw. 42 % unter dem Mittelwert und innerhalb des 95 %-Vertrauensintervalls. Das höchste in den neun Jahren turbinierte Volumen von fast 163 Mio. m^3 im Jahr 2018 liegt etwas über dem 95 %-Vertrauensintervall und ist daher aussergewöhnlich. Die in den neun Jahren aufgetretenen mittleren jährlichen *SSC* liegen innerhalb des 95 %-Wertebereichs.

Die *SSL* variieren stärker als die turbinierten Volumina (Variationskoeffizienten 25 bzw. 7 %). Die unterschiedlichen jährlichen *SSL* können nicht allein mit der zugehörigen jährlichen *WV* erklärt werden, da auch die Niederschlagsintensität eine wichtige Rolle für den Sedimenttransport aus einem Einzugsgebiet spielt. Ein Einzelereignis wie im Jahr 2012 kann einen grossen Einfluss auf die jährliche *SSL* haben. Hinzu kommen betriebliche Gründe wie die Nichtverfügbarkeit von Turbinen oder der Energieableitung, welche z.B. im Jahr 2019 zu einer geringeren turbinierten Wasserfracht führten.

Tabelle 6: Kennwerte der turbinierten Sediment- und Wasserfrachten sowie der *SSC* im KW Fieschertal 2012-2020.

	SSL	*WV*	*SSC*
Mittelwert μ	75'000 t	141 Mio m^3	0.53 g/l
Standardabweichung σ	18'000 t	10 Mio m^3	0.11 g/l
Untere Bereichsgrenze ($\mu - 2\sigma$)	39'000 t	121 Mio m^3	0.31 g/l
Obere Bereichsgrenze ($\mu + 2\sigma$)	111'000 t	161 Mio m^3	0.75 g/l
Variationskoeffizient σ/μ	25 %	7 %	22 %

5.1.6 Schwebstofffrachten der einzelnen Turbinen

Mithilfe der *best-estimate SSC* von der Schieberkammer und der Betriebsdaten wurden die *SSL* der einzelnen MG berechnet. Dabei wurde angenommen, dass sich die *SSC* im Triebwasser der einzelnen MG (nach der Verzweigung der Druckleitung) nicht systematisch unterscheiden, d.h. gleich sind. In Abbildung 56 sind die jährlichen *SSL* in Funktion der Betriebsstunden für MG 1 und MG 2 dargestellt.

Auch bei den *SSL* der einzelnen MG sind die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Einflüsse von Hochwassern (2012 und 2017) oder geringe jährliche *SSL* (2014) zu erkennen. Die Unterschiede zwischen den beiden MG haben betriebliche Gründe (Zustand der Maschinen und Revisionen). Im Mittel wurden jährlich 37'500 Tonnen Feinsedimente durch jede Turbine transportiert. Dies geschah während etwa 3300 Betriebsstunden/Jahr, also während ca. 38 % der Stunden eines Jahres. Aufgrund des zeitweisen Teillastbetriebs ist dieser Wert höher als die 2500 volllast-äquivalenten Betriebsstunden gemäss Abschnitt 3.1. Am meisten Betriebsstunden erreichte die MG 2 im abflussreichen Jahr 2018.

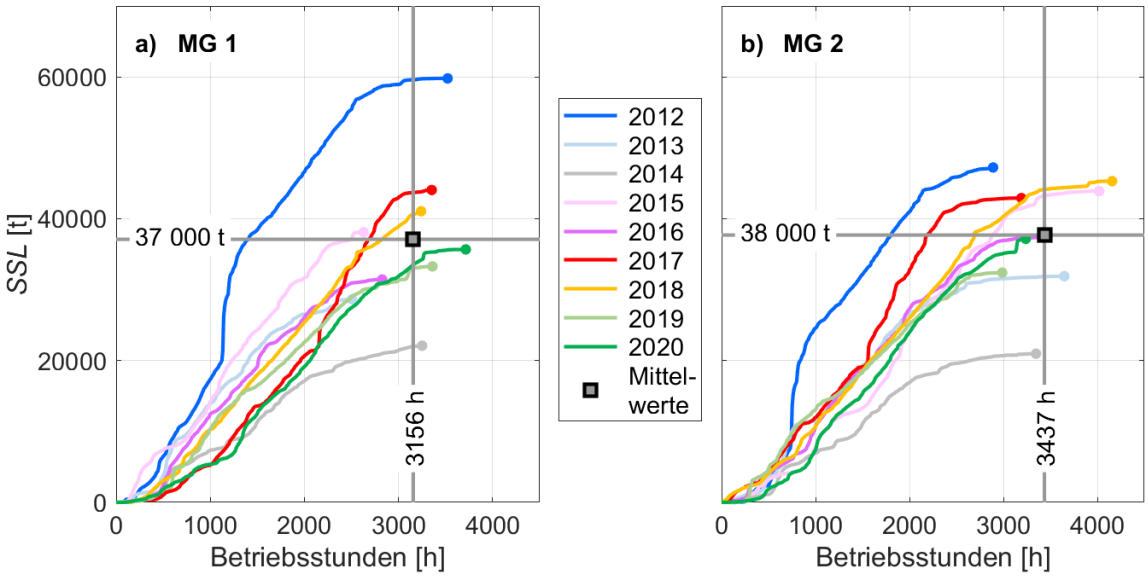


Abbildung 56: Jährliche Schwebstofffrachten der einzelnen Turbinen des KW Fieschertal in Funktion ihrer jährlichen Betriebsstunden (ausgewertet von VAW mit Einbezug von Betriebsdaten der gkw).

5.1.7 Particle Loads gemäss IEC 62364 (2013/2019)

Weiter wurden die so genannten *Particle Loads* pro Turbine gemäss IEC 62364 (2013/2019), entsprechend der Definition in Abschnitt 2.2.2, berechnet:

$$PL(t) = k_{\text{shape}}\, k_{\text{hardness}} \sum_{i=1}^{(t-t_0)/\Delta t} SSC_i\, k_{\text{size},i}\ \ \Delta t \qquad (9)$$

Dabei wurde der Beiwert für den Einfluss der Partikelgrösse k_{size} = d_{50} / 1000 µm in jedem Zeitschritt aus den d_{50}-Werten gemäss Abschnitt 5.1.3 berechnet. Über die Betriebsstunden gemittelt betrug k_{size} = 0.033. Der Beiwert für den Einfluss der Partikelform beträgt k_{shape} = 2 gemäss Abschnitt 5.1.1.

Bei beschichteten Laufrädern können an verschiedenen Stellen innerhalb eines Bechers gleichzeitig die Beschichtung und das Grundmaterial abradiert werden, nachdem die Beschichtung stellenweise über ihre ganze Dicke abgetragen wurde. Da die Abrasion des Grundmaterials als Grundfall angesehen wird und im KW Fieschertal für die grossen Laufradrevisionen massgebend ist, wurden die *Particle Loads* mit k_{hardness} = 0.75 berechnet (Abschnitt 5.1.1). Wenn ausschliesslich die Beschichtungsabrasion betrachtet wird, ist k_{hardness} = 0.31 zu verwenden und dementsprechend betragen die PL_b für die Beschichtungsabrasion nur 41 % (=0.31 / 0.75) der hier dargestellten PL_b für die Grundmaterialabrasion.

Ausgehend von den *Particle Loads* der einzelnen Turbinen wurden die *Particle Loads* pro Becher (PL_b) berechnet. Dabei wurden gemäss Abschnitt 2.2.2 die Anzahl Düsen pro Turbine (z_0 = 2) und die Anzahl Becher pro Laufrad (z_2 = 20) berücksichtigt, d.h. PL_b = 2/20 PL = 0.1 PL. Die jährlichen PL_b in Abbildung 57 haben ähnliche Verläufe wie die jährlichen *SSL* in Abbildung 56. Der Hauptgrund dafür ist, dass im KW Fieschertal die Turbinen während der Schwebstoffsaison oft mit Volllast betrieben werden. Abweichungen resultieren vor allem in Perioden, in denen Partikel turbiniert werden, die gröber sind als üblich.

Die hier berechneten PL_b-Werte für die Jahre 2012–2014 betragen 61 - 67 % (im Mittel 64 %) der entsprechenden Werte in Felix (2017). Um die Breite der Partikelgrössenverteilung zu berücksichtigen, unterschied Felix (2017) fünf Grössenklassen und berücksichtigte deren k_{size}-Faktoren (fraktionsweise Berechnung). In der vorliegenden Auswertung wurde jedoch k_{size} ausschliesslich mit d_{50} berechnet, da eine fraktionsweise Berechnung in der IEC-Richtlinie und Rai *et al.* (2020b) nicht erwähnt wird und im Hinblick auf die einfache Anwendbarkeit der Koeffizienten ein einheitliches Vorgehen angestrebt wurde.

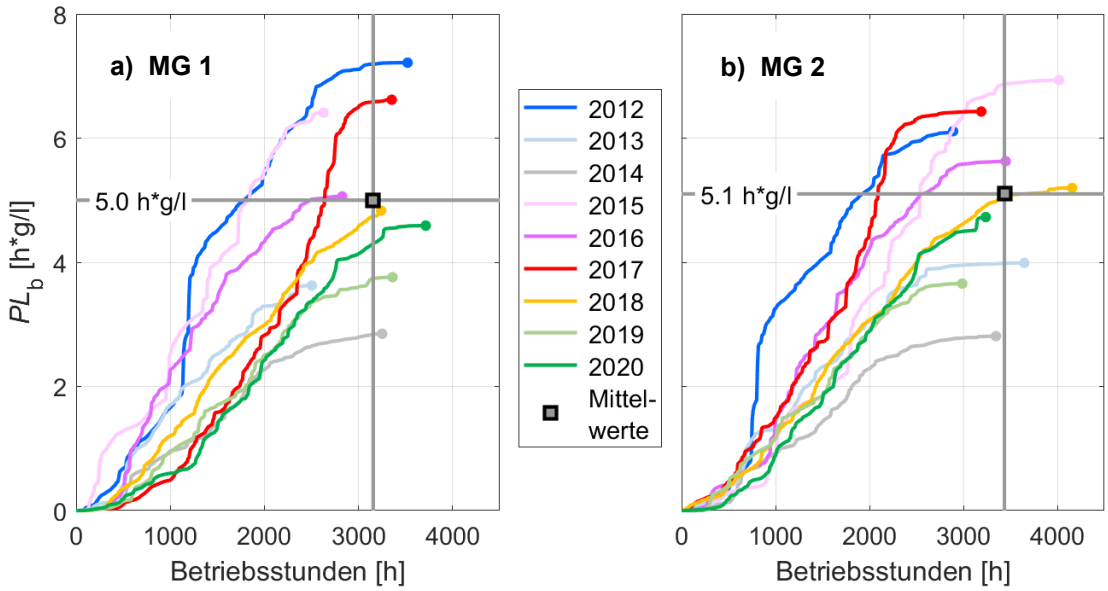


Abbildung 57: Jährliche *Particle Loads* der Becher der Peltonturbinen gemäss IEC 62364 (2013/2019) mit $k_{hardness}$ = 0.75 bezogen auf die Grundmaterialabrasion in Funktion der Betriebsstunden des KW Fieschertal (ausgewertet von VAW mit Betriebsdaten der gkw).

In Abbildung 58 sind die jährlichen *Particle Loads* pro Becher PL_b den entsprechenden jährlichen Schwebstofffrachten *SSL* für MG 1 und MG 2 in den Jahren von 2012 bis 2020 gegenübergestellt. Es zeigt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Grössen, wobei eine PL_b von 1 kg·h/m³ einer *SSL* von ca. 7'350 t entspricht.

Der Vorteil der PL_b-Werte besteht darin, dass sie die «Schwebstoffbelastung» unabhängig vom Durchfluss einer Turbine und deren Becher- und Düsenanzahl angeben und sich so zwischen Peltonturbinen unterschiedlicher Grösse und Bauart vergleichen lassen. *SSL*-Werte haben hingegen den Vorteil, dass sie anschaulich und besser verständlich sind.

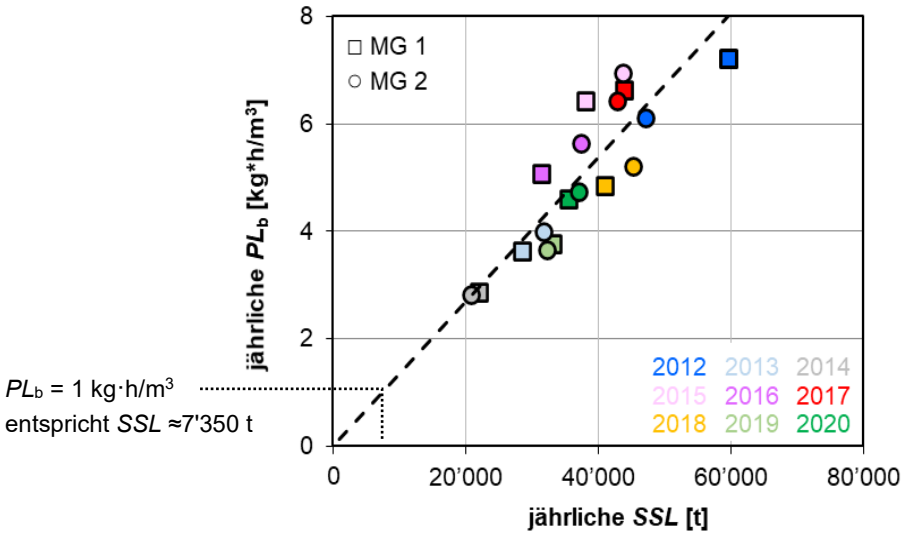


Abbildung 58: Jährliche *Particle Loads* der Becher PL_b in Funktion der jährlichen Schwebstofffrachten *SSL* der einzelnen Turbinen des KW Fieschertal (Auswertung: VAW).

5.1.8 Leitlinien für Schwebstoffmonitoring-Systeme an Wasserkraftanlagen

Aufgrund der Erfahrungen mit dem Messsystem im KW Fieschertal und den Resultaten des Schwebstoffmonitorings wurden die folgenden Leitlinien für den Entwurf und die Auswahl der Instrumente für ein Schwebstoffmonitoring-System an einer Wasserkraftanlage zusammengestellt.

Wie die grösseren Hochwasser in den Jahren 2012 und 2017 zeigten, können an Gebirgsflüssen hohe *SSC* (über 100 g/l) auftreten, welche die oberen Messbereichsgrenzen von Trübungssonden (bis 10 g/l für Siltpartikel) und der auf ADM beruhenden Methode (bis ca. 15 g/l) deutlich überschreiten. Mit einem Dichtemessgerät (CFDM), wie in der Schieberkammer und an der Wasserfassung installiert, können mittlere bis hohe *SSC* (> 0.5 g/l) gemessen werden. Dies wurde an der Fassung im Schwebstofftransport-Ereignis im Jahr 2020 und in der Schieberkammer mehrmals aufgezeigt. Für tiefe bis mittlere *SSC*, die für die Ermittlung von jährlichen Schwebstofffrachten auch relevant sind, sind Trübungssonden und akustische Messgeräte besser als ein CFDM geeignet, da sich bei tiefer bis mittlerer *SSC* die Dichte des Triebwassers zu wenig von der Klarwasserdichte unterscheidet. Falls keine jährlichen Schwebstofffrachten zu ermitteln sind, kann ein CFDM allein und ohne Kalibrierung ausreichend sein, um Warnungen zu geben, wenn die *SSC* die Abschalt-*SSC* (von mindestens mehreren g/l) überschreitet.

Bei Trübungssonden können zur Vermeidung von Messwertverfälschungen infolge von Ablagerungen (*fouling*) folgende Möglichkeiten ins Auge gefasst werden: hohe Strömungsexposition für genügende Selbstreinigung des Sondenkopfs an der Messstelle, automatische Reinigung (Wischer oder Druckluft) oder Verwendung eines Trübungsmessgeräts ohne wasserberührte optische Teile (z.B. Messung am frei fallenden Wasserstrahl).

Akustische Messgeräte bieten die Vorteile, dass sie auf Verschmutzung nicht empfindlich sind und sie (je nach Frequenz und Partikelgrössen) weniger sensitiv auf feinste Partikel sind als Trübungssonden (Agrawal et al. 2016). Letzteres ist bei der vorliegenden Anwendung ein Vorteil, da gröbere Partikel bei gleicher *SSC* mehr Abrasion verursachen und somit die Messung der gröberen Partikel wichtiger ist. Die akustische *SSC*-Messmethode basierend auf akustischen Durchflussmessungen bietet den Vorteil, dass keine weiteren Installationen erforderlich sind, sich der Messwert auf ein grösseres Wasservolumen bezieht als bei «Punktmessungen» von anderen Sensoren und praktisch kein Unterhalt erforderlich ist.

Um von indirekten *SSC*-Messmethoden (Trübung und Ultraschall) möglichst verlässliche *SSC* zu erhalten, ist es erforderlich, mindestens während einer Schwebstoffsaison Wasserproben zu entnehmen (von Hand oder mit automatischem Wasserprobennehmer) und die anschliessend im Labor gravimetrisch bestimmten *SSC* als Referenz zu verwenden. So werden die Eigenschaften der Partikel, die an der Messstelle vorhanden sind, über die Zeit gemittelt berücksichtigt.

Um die Wirtschaftlichkeit von vorübergehenden Kraftwerksabschaltungen während hoher Schwebstoffbelastungen anhand konkreter Ereignisse nachzuweisen, ist es erforderlich, auch hohe *SSC* zu messen. Wenn auf diesen Nachweis verzichtet wird und eine Abschalt-*SSC* anders ermittelt oder angenommen wird, ist die Instrumentierung so zu wählen, dass mindestens bis zur Abschalt-*SSC* zuverlässig gemessen werden kann. Bei Abschalt-*SSC* von deutlich unter 10 g/l, wie z.B. bei kleineren Peltonturbinen mit höherem spezifischem Verschleiss, können Trübungssonden oder eine akustische Methode ausreichen, wenn diese während mindestens 1 bis 2 Jahren (Schwebstoffsaisons) kalibriert wurden. Je nach zeitlicher Variabilität der Umrechnungsbeziehungen auf die *SSC* ist mit einer solchen eher kostengünstigen Instrumentierung eine erhöhte Messunsicherheit in Kauf zu nehmen.

Um den relevanten *SSC*-Messbereich abdecken zu können und die Verlässlichkeit der Messungen zu steigern, ist hingegen oft eine Kombination von Messgeräten erforderlich (inhomogen redundante

Instrumentierung). Die Instrumentierung kann auch durch Sedimentniveausensoren in Fassungsbecken, Entkiesern und Entsandern ergänzt werden. Weiter können auch Niederschlags- bzw. Abflussdaten bzw. -prognosen einbezogen werden.

Für die Auswahl von Messgeräten für das *SSC*-Monitoring an einer bestimmten Messstelle sind Informationen zu den auftretenden *SSC* eine wichtige Grundlage. Oft liegen diese Informationen aber nicht vor, bevor dort ein Messgerät in Betrieb ist. Falls keine Angaben von vergleichbaren Gewässern oder Anlagen verfügbar sind, ist eine Möglichkeit, das *SSC*-Monitoringsystem schrittweise zu realisieren, indem zuerst ein relativ kostengünstiger Sensor (z.B. Trübungssonde oder akustische Rückstreuung) installiert wird. Wenn sich dessen obere *SSC*-Messbereichsgrenze als ungenügend erweist, kann zusätzlich ein Dichtemessgerät (CFDM) installiert werden.

Für die wirtschaftliche Optimierung des Kraftwerksbetriebs hinsichtlich der Schwebstoffe und der Turbinenabrasion ist aus physikalischer Sicht auch die Grösse der Schwebstoffpartikel, die im Jahreslauf stark variieren kann, von Bedeutung. Mit Laserdiffraktometern lassen sich die Grössen von Silt- und Feinsandpartikeln bei tiefen bis mittleren *SSC* mit relativ hohem Aufwand (Gerätekosten, Unterhalt und Auswertung) messen. So lassen sich über einige Jahre Informationen über die Dynamik des Schwebstoffaufkommens gewinnen (Abbildung 53). Für Echtzeit-Messungen der Partikelgrössen auch bei mittleren und hohen *SSC* sind aber nach Kenntnis der Autoren bisher keine praxistauglichen Messsysteme auf dem Markt erhältlich, die sich für den Langzeiteinsatz an alpinen Wasserkraftanlagen (ausserhalb von Forschungs- und Entwicklungsprojekten) eignen. Daher wird empfohlen, vorerst ausschliesslich die *SSC* in Echtzeit zu messen, bis für die Partikelgrössenmessung weitere Methoden entwickelt sein werden.

Um Warnungen vor hohen *SSC* möglichst frühzeitig zu erhalten und die Wasserfassung rechtzeitig schliessen zu können, bevor ein grosser Anteil der Sedimentfracht eines Schwebstofftransport-Ereignisses in die Wasserkraftanlage gelangt, sind *SSC*-Messungen an Wasserfassungen oder weiter stromaufwärts nützlicher als Messungen entlang des Triebwasserwegs oder im Maschinenhaus. Für Wasserfassungen im Berggebiet ist das Einrichten von Messstationen stromaufwärts der Fassungen oft nicht möglich (z.B. Gletscher- oder Schuttbedeckung), zu gefährlich (Steinschlag, Rutschungen oder Lawinen), optisch oder ökologisch unerwünscht (falls bauliche Anlagen zu errichten wären) oder zu aufwändig (Zugang, Bauarbeiten im Bachbett, Stromversorgung, Datenkommunikation und Unterhalt). Daher sind Wasserfassungen in der Regel die wichtigsten Orte für die Installation von Schwebstoffmess-Instrumenten, die Alarme für die Ausserbetriebnahmen von Fassungen und Wasserkraftanlagen in Phasen hoher Schwebstoffbelastung auslösen sollen. Hingegen an tiefergelegenen Flüssen, an welchen stromaufwärts der Wasserfassungen bereits entsprechende Infrastruktur vorhanden ist, können Schwebstoffmonitoring-Systeme, welche eine längere Vorwarnzeit bieten, mit geringerem Aufwand implementiert werden.

5.2 Hydro-abrasiver Verschleiss

5.2.1 Inspektionen der Laufräder

An den beschichteten Peltonlaufrädern des KW Fieschertal wurde meist im Lauf einer Schwebstoffsaison die Hartbeschichtung auf den Mittelschneiden und an den Bechereintrittskanten stellenweise oder systematisch abgetragen. Nach dem lokalen Verlust der Beschichtung wird das weniger harte Grundmaterial mit einer höheren Abtragsrate erodiert, wodurch Geometrieveränderungen in der Grössenordnung von mehreren Millimetern auftreten können, welche sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirken. Abbildung 59a zeigt ein Beispiel mit fortgeschrittener, systematischer Abrasion der Mittelschneiden und der Bechereintrittskanten nach ausserordentlich hoher Schwebstoffbelastung (Frühling bis August 2012 inklusive Betrieb während des Hochwassers vom Juli 2012). Das Grundmaterial wird nicht mehr durch die Beschichtung geschützt (Abbildung 59c). Abbildung 60 zeigt Beispiele mit weniger fortgeschrittener Abrasion nach einer Schwebstoffsaison ohne grösseres Hochwasser.

Auf den Mittelschneiden werden anfangs abschnittsweise schmale Nuten erodiert, welche im Lauf der Schwebstoffsaison breiter werden, bis die Beschichtung im oberen Bereich der Flanken der Mittelschneiden abbricht (Abbildung 59b, Abbildung 60b). Dies führt zu lokal verstärktem Abtrag der Beschichtung im Nachlauf der gestörten Strömung (hellere Bereiche in Abbildung 60b). Die abschnittsweisen Schäden auf der Mittelschneide dehnen sich dann praktisch deren ganze Länge aus.

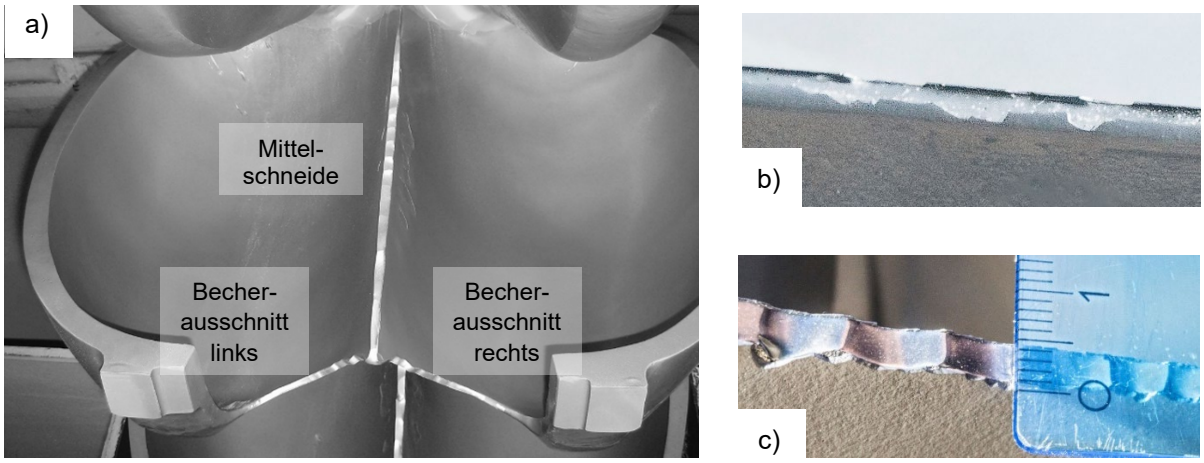


Abbildung 59: a) Beschichteter Becher eines Peltonlaufrads des KW Fieschertal mit systematischer Abrasion an den Mittelschneiden und Becherausschnitten (blankes Grundmaterial; Laufrad 2 im August 2012), b) Detail von typischen Schäden auf der Mittelschneide (Laufrad 3 im August 2013) und c) an der Bechereintrittskante (Laufrad 3 im Nov. 2013; Felix 2017).

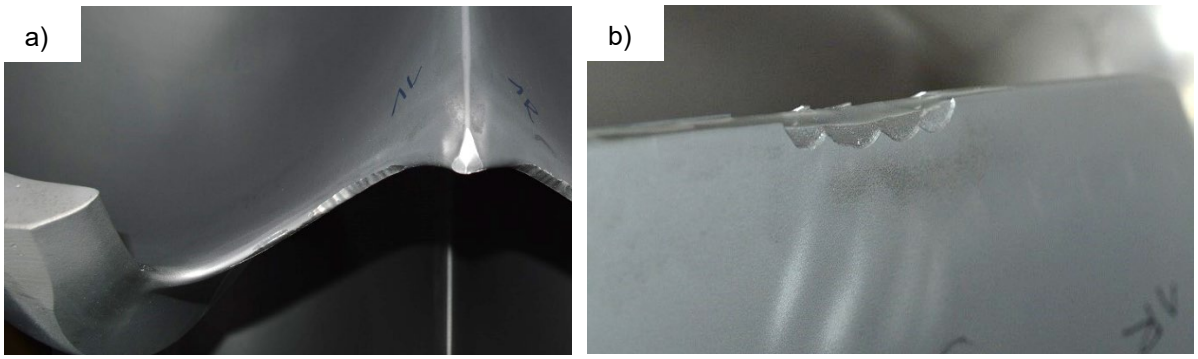


Abbildung 60: Lokale Verschleissschäden an a) den Bechereintrittskanten und b) der Mittelschneide des Bechers 1 des Laufrads 5 (MG 2) im KW Fieschertal infolge der Schwebstoffbelastung einer Saison in seinem zweiten Betriebsjahr (Fotos: VAW, 03.12.2018).

Weitere Fotos, welche die Entwicklung der Abrasionsschäden an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten sowie Folgeschäden zeigen, sind in den Anhängen A1 und A2 enthalten.

Die Becherinnenseiten blieben im Gegensatz zu den Mittelschneiden und den Bechereintrittskanten über eine Schwebstoffsaison in der Regel vollflächig beschichtet. Ausnahmsweise ging die Beschichtung während einer Schwebstoffsaison auch in den Bechern stellenweise verloren:

- an den Mittelschneidenflanken und im hinteren Bereich der Becher im Jahr 2012 mit Kraftwerksbetrieb während des relativ grossen Hochwassers;
- im Bechergrund von einigen Bechern beim neuen Laufrad 5 mit anderem hydraulischem Design während der ersten Einsatzjahre (laufende Geometrieoptimierungen);
- einzelne, kleine Stellen, an denen möglicherweise die Beschichtung nicht in der üblichen hohen Qualität aufgebracht werden konnte, oder an denen allenfalls grössere Festkörper wie sehr selten auftretende Steine aus dem oberen Triebwassersystem anprallten.

Der höhere Abrasionswiderstand der Beschichtung in den Bechern im Vergleich zu dem auf den Mittelschneiden und an den Bechereintrittskanten kann durch die verschiedenen Auftreffwinkel der Partikel und das spröde Materialverhalten der Beschichtung erklärt werden: In den Bechern treffen die Partikel unter kleinen Winkeln auf (schleifende Beanspruchung, Gleitverschleiss). Auf den Mittelschneiden und an den Bechereintrittskanten hingegen treffen die Partikel häufiger unter stumpfen Winkeln auf (Prallverschleiss). Spröde Materialien sind weniger widerstandsfähig gegen Prall- als gegen Gleitverschleiss (Abbildung 4b in Abschnitt 2.1.1).

5.2.2 Inspektionen der Düsen und weiterer Turbinenbauteile

Wie in Abschnitt 3.5 erwähnt, sind im KW Fieschertal Düsenmundstücke und -nadeln aus Stellit mit Hartbeschichtung im Einsatz (Abbildung 61). Die Bereiche der Düsennadeln, die vom Turbinengehäuse her sichtbar sind, wurden jeweils bei den Laufradinspektionen fotografiert und die abrasionsbedingte Verkürzung bzw. zunehmende Rundung der Kegelspitzen wurde gemessen. Da die Düsen während der Laufradinspektionen jeweils geschlossen waren, konnten die Düsenmundstücke nicht inspiziert werden.

Die Düsenmundstücke und -nadeln wurden bei der MG 1 im Januar 2016 und bei der MG 2 im März 2017 zusammen mit den entsprechenden Laufrädern ersetzt, weil dies vom Arbeitsablauf her vorteilhaft ist (weniger aufwändige Demontage der Düsen, wenn Teile ersetzt werden können, während kein Laufrad eingesetzt ist). Die Düsennadeln haben im Neuzustand einen Spitzenradius von ca. 1 mm (für die Beschichtung ist ein gewisser Minimalradius erforderlich). Während der Einsatzdauer der Düsenbauteile innerhalb der Untersuchungsdauer (2012–2020) wurde die Beschichtung nur im unmittelbaren Bereich der Nadelspitzen vollflächig abgetragen und es kam nur zu einer moderaten Vergrösserung des Spitzenradius bzw. einer leichten Abplattung (Abbildung 61b). Die maximale Verkürzung der Düsennadeln um 9 mm wurde bei der unteren Düse der MG 2 im Nov. 2020 gemessen. Es ist vorgesehen, die Düsenbauteile wiederum zusammen mit dem jeweiligen Laufrad zu ersetzen, was voraussichtlich wiederum nach etwa sechs Einsatzjahren aufgrund des Laufradzustands erforderlich sein wird.

a)



b)

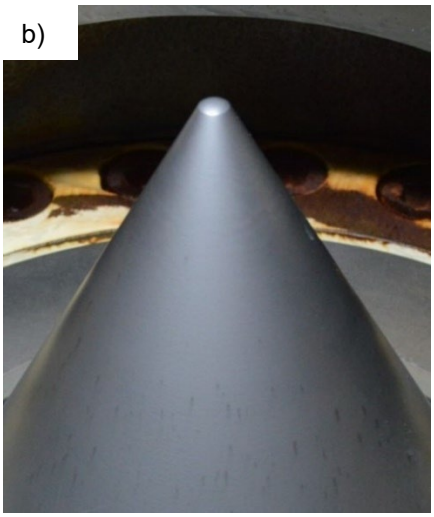


Abbildung 61: Untere Düsen im KW Fieschertal mit Düsennadel aus Stellit mit Hartbeschichtung a) in praktisch neuwertigem Zustand (MG 1, Nov. 2019) und b) mit moderater sichtbarer Abrasion an der Nadelspitze (MG 2 im April 2020; Fotos: VAW).

Die Aussenseiten der Strahlablenker und der Schutzdächer der unteren Düsen im Bereich nahe des Laufrads, sowie Teile des Zugangsrosts unter den Laufrädern, wurden in jeder Schwebstoffsaison stark erodiert. Diese unbeschichteten Bauteile aus Chromstahl bzw. Baustahl werden durch Wasser, das von den Laufradbechern umgelenkt wurde, abradiert. Auf den Strahlablenkern und Düsenschutzdächern bilden sich jeweils schuppige Oberflächenmuster (siehe Abbildung 120 im Anhang A3), wie in unbeschichteten Peltonbechern. Diese Bauteile wurden jeweils im Winter mit Schweissen und Schleifen wieder instandgestellt.

Es wird davon ausgegangen, dass die geringe Abrasion an den hochwertigen Düsenbauteilen und die Abrasionen der übrigen Turbinenbauteilen nebst den Laufrädern keinen nennenswerten Einfluss auf den Turbinenwirkungsgrad hatten.

5.2.3 Beispiele von der 3D-Vermessung der Laufradbecher

Ein Beispiel eines digitalen Modells von jeweils zwei Peltonbechern (Innen- und Aussenseiten) ist in der Abbildung 62a dargestellt. In Abbildung 62b, einem Detail im Bereich der Mittelschneidenspitze, ist die Dichte der Oberflächenpunkte zu sehen. Die Abbildung 63 und Abbildung 64 geben einen Eindruck von der hohen Auflösung der optischen Vermessung. Wie die blanke Stelle des Fotos links in der Abbildung 63 zeigt, kann auch der Materialabtrag im Bereich von Zehntelmillimetern detailgetreu erfasst werden.

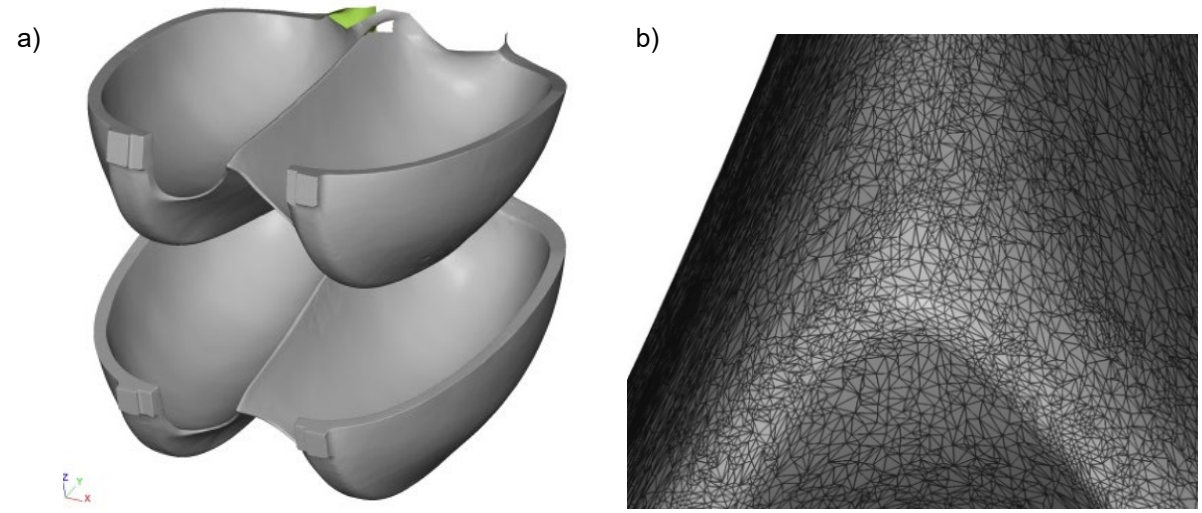


Abbildung 62: a) 3d-Modell von zwei Peltonbechern eines gebrauchten Laufrads und b) Detail des Oberflächenmodells im Bereich einer Mittelschneidenspitze (Messungen und Auswertung: HSLU).

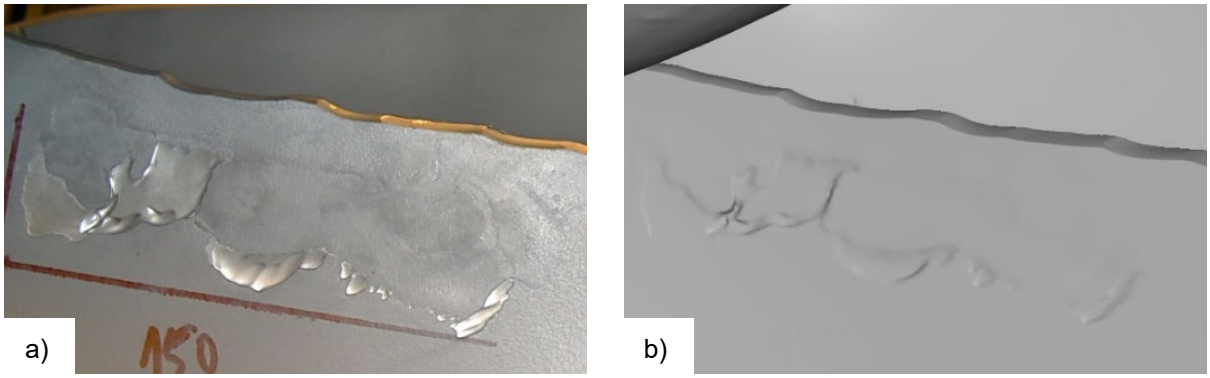


Abbildung 63: Stark abgenutzte Mittelschneide eines Peltonlaufrads mit stellenweisem Verlust der Beschichtung bzw. Nachbeschichtung und Folgeschäden: a) Foto und b) 3D-Modell (HSLU).

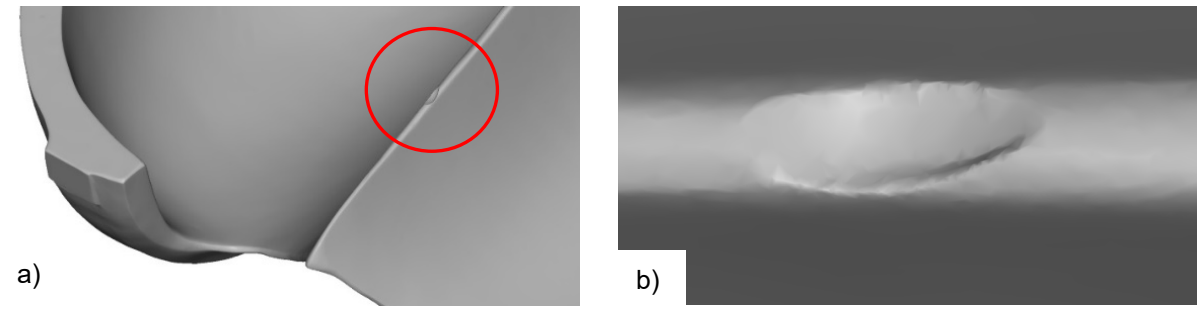


Abbildung 64: 3D-Modell eines Bechers mit einem lokalen Schaden auf der Mittelschneide: a) Übersicht und b) Detail (HSLU).

5.2.4 Abrasion an den Mittelschneiden gemäss 3D-Vermessungen

Die geometrischen Veränderungen der Mittelschneiden wurden zuerst in Längsschnitten in der Symmetrieebene des Laufrads untersucht. Für jedes eingesetzte Laufrad und jeden der vermessenen Becher wurde eine Abbildung erstellt; diese sind im Anhang B1 zusammengestellt. Damit die Höhenunterschiede der Mittelschneidenoberkanten im Laufe der Jahre besser sichtbar sind, wurde in der Höhe ein grösserer Massstab gewählt als in der Länge (leicht überhöhte Darstellung). Die Veränderungen der Mittelschneidenhöhen zwischen jeweils zwei Aufnahmezeitpunkten sind im oberen Teil der Abbildungen dargestellt. Die Folgenden zwei Abbildungen zeigen die Resultate der Becher Nr. 1 der beiden Laufräder, die während der Projektdauer in MG 1 im Einsatz waren.

Abbildung 65 zeigt die Auswertung des Laufrads 1, das im Jahr 2012 nach einer grossen Revision neuwertig in MG 1 eingebaut wurde und bis Ende 2017 im Einsatz war. Anfangs war die Oberkante der Mittelschneide gerade; durch den Verschleiss wurde sie wellig. Der Materialabtrag ist etwa auf halber Länge der Mittelschneide am ausgeprägtesten. In der Schwebstoffsaison 2012, mit Betrieb der Turbinen während eines grösseren Hochwassers (Abschnitt 5.6.3), wurde die Mittelschneidenhöhe um bis zu 6 mm reduziert (grüne gestrichelte Linie). In den folgenden zwei Jahren bis Ende 2014 mit eher geringen Schwebstofffrachten blieb die Geometrie der Mittelschneide praktisch unverändert. Am Ende der Schwebstoffsaison 2017, nach weiteren drei Betriebsjahren und Revisionsarbeiten vor Ort jeweils im Winter, war die Mittelschneidenoberkante bis zu weiteren 10 mm tiefer (schwarze gestrichelte Linie). In sechs Jahren wurde also die Mittelschneide um bis zu 16 mm abgetragen. Danach wurde das Laufrad einer grossen Revision unterzogen.

Seit dem Einbau des Laufrads 2 (ebenfalls nach grosser Revision) wurden bei den Messungen in den Jahren von 2018 bis 2020 nur geringe Abnutzungen an der Mittelschneide festgestellt (Abbildung 66). Etwa auf halber Mittelschneidenlänge wurde deren Höhe in den 3 Jahren um nur ca. 2 mm reduziert. Stellen, an denen die Beschichtung auf den Mittelschneiden erodiert wurde, wurden jeweils im Winter wieder beschichtet. So wurde, im Gegensatz zum Jahr 2012 mit dem Hochwasser, der Abtrag des Grundmaterials stark begrenzt.

Bei der MG 2 waren während der Projektdauer vier Laufräder im Einsatz (Abbildung 45), da zweimal ein zusätzlicher Laufradwechsel erforderlich wurde. In der Schwebstoffsaison 2012 mit dem grösseren Hochwasser wurde die Mittelschneidenhöhe am Laufrad 2 etwa gleich stark reduziert wie bei jenem der MG 1, obwohl Laufrad 2 nur bis anfangs August in Einsatz war (Abbildungen im Anhang B1). Dies kann damit erklärt werden, dass das Laufrad 2 vor der Saison 2012 nicht in neuwertigem Zustand war. In der Schwebstoffsaison 2013 wurde die Mittelschneidenhöhe nur um bis zu 2 mm reduziert. In den Schwebstoffsaisons 2014, 2018 und 2019 traten lokale Schäden an den Mittelschneiden mit moderaten Abrasionstiefen unter 3 mm auf. Im Jahr 2020 blieb die Beschichtung auf den Mittelschneiden praktisch vollflächig erhalten und es kam zu keiner nennenswerten Grundmaterialabrasion (wie bei MG 1 in den Jahren 2013 und 2014). Das Laufrad 5, das seit 2018 in MG 2 installiert war, weist ein anderes hydraulisches Design auf als die Laufräder 1 bis 4 der früheren Generation.

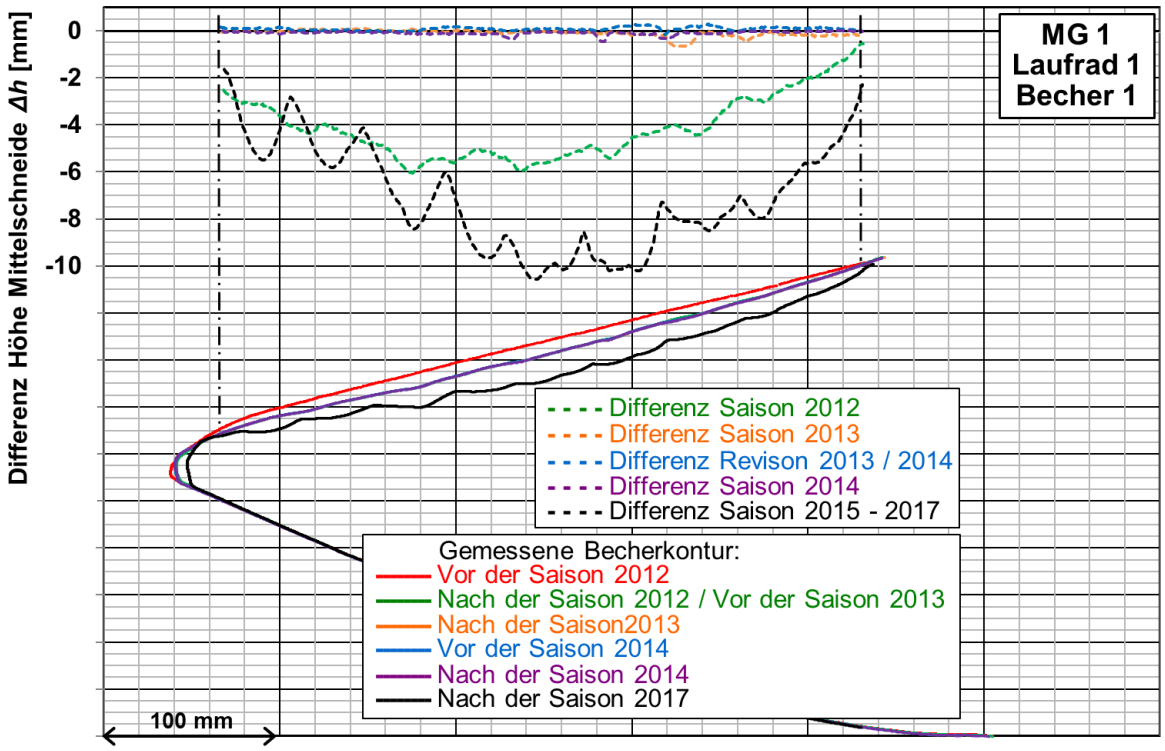


Abbildung 65: Längsschnitt durch die Mittelschneide des Bechers 1 des Laufrads 1, in MG 1 von 2012 bis 2017, mit Veränderungen der Mittelschneidenhöhe Δ*h* im oberen Teil der Abbildung (Messungen und Auswertung: HSLU).

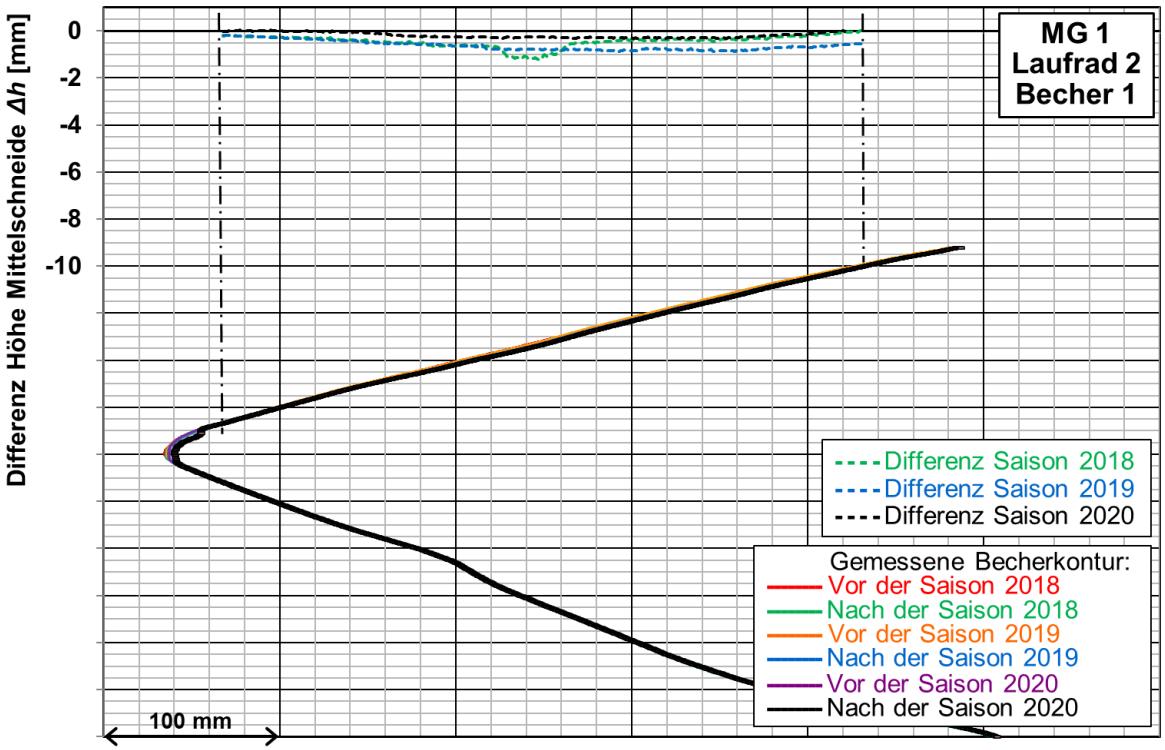


Abbildung 66: Wie Abbildung 65, aber für Laufrad 2 von 2018 bis 2020.

Aufgrund der geneigten Flanken der Mittelschneiden führt der Materialabtrag in deren Kronenbereich zu einer Verbreiterung der Mittelschneiden. Diese Verbreiterung ist ein Hauptgrund für die Abnahme des Turbinenwirkungsgrads mit fortschreitender Abnutzung.

Die Mittelschneidenbreiten wurden mit der Definition gemäss Abschnitt 2.2.2 für jeden vermessenen Becher und jedes Laufrad ausgewertet (Anhang B2). Die folgenden zwei Abbildungen zeigen wiederum die Resultate der Becher Nr. 1 der beiden Laufräder, die während der Projektdauer in MG 1 im Einsatz waren. Im unteren Bereich der Abbildung ist die Breite der Mittelschneide entlang deren Länge dargestellt. Im oberen Bereich sind wiederum die Differenzen der Mittelschneidenbreiten zwischen jeweils zwei Messzeitpunkten abgebildet.

Nach den grossen Revisionen der Laufräder 1 und 2 waren deren Mittelschneiden (anfangs 2012 bzw. 2018) ähnlich schmal. In den Jahren, in denen die Mittelschneidenhöhe markant abnahm (2012 und 2015–2017) ist auch eine markante Zunahme der Mittelschneidenbreite in einer Grössenordnung von je 2 bis 3 mm ersichtlich (grüne und schwarze gestrichelte Linien in Abbildung 67). In den übrigen Jahren traten keine nennenswerten Mittelschneidenverbreiterungen auf (Abbildung 68). Bei der MG 2 sind in den Jahren 2018 und 2019 wiederum die lokalen Schäden ersichtlich, welche zu einer entsprechenden lokalen Verbreiterung der Mittelschneide führten (Abbildungen im Anhang B2).

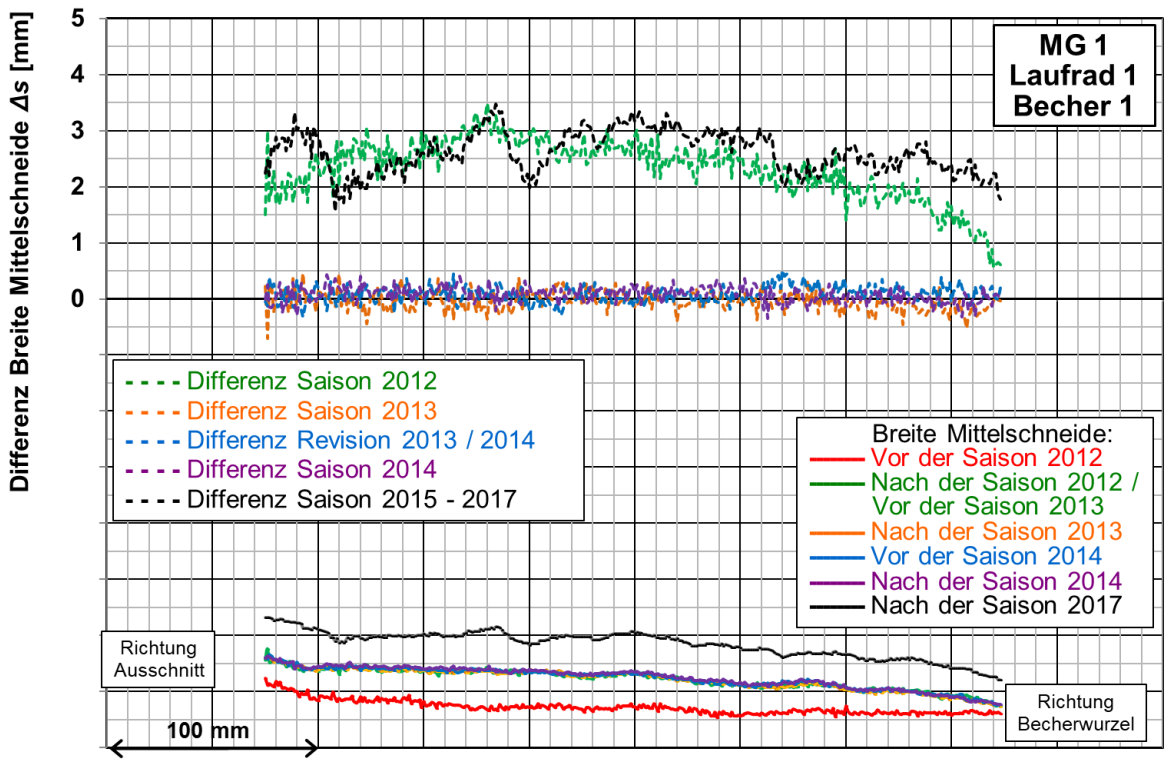


Abbildung 67: Mittelschneidenbreite *s* entlang der Mittelschneide vom Becher 1 des Laufrads 1, in MG 1 von 2012 bis 2017, mit Veränderungen der Mittelschneidenbreite Δ*s* im oberen Teil der Abbildung (Messungen und Auswertung: HSLU).

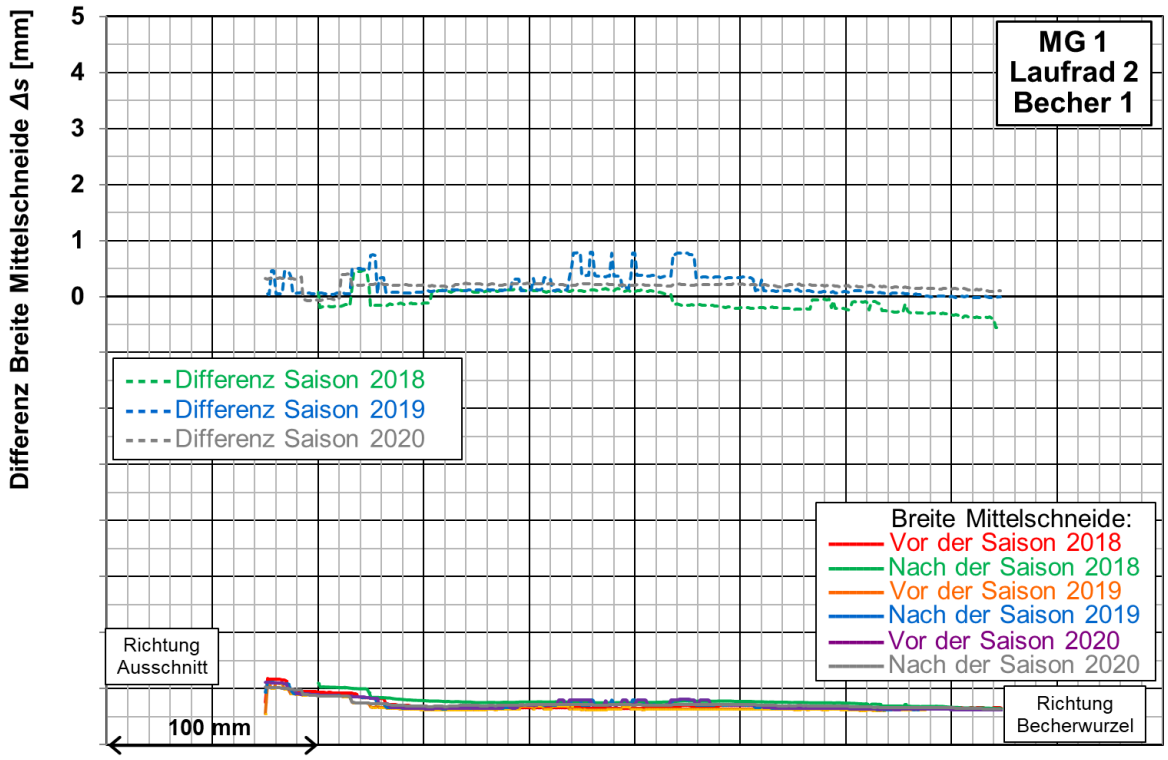


Abbildung 68: Wie Abbildung 67, aber für Laufrad 2 von 2018 bis 2020.

Die Veränderung der Höhe und der Breite der Mittelschneide kann auch kombiniert betrachtet werden. Dazu wurde auf etwa halber Länge der Mittelschneiden (bei y = 300 mm) eine Schnittebene quer zur Mittelschneide definiert. Abbildung 69 zeigt die Mittelschneidenquerschnitte im Vergleich. Die Achsen wurden mit der inneren Becherbreite B normiert. Bei den Laufrädern 1 bis 4 variiert die Neigung der Mittelschneidenflanken aufgrund deren Abnutzungs- und Revisionsgeschichte. Die Mittelschneide des Laufrads 5 wurde mit etwas weniger steilen Flanken entworfen.

Zu Beginn der Schwebstoffsaisons (im Neuzustand oder nach dem Schleifen und Beschichten) sind die Schneiden gerundet. In Schwebstoffsaisons ohne nennenswerte Abrasion blieb die gerundete Form erhalten. Im Anfangsstadium der Grundmaterialabrasion auf den Mittelschneiden entsteht eine schmale Nut, welche breiter wird. Dann brechen die «überstehenden» Beschichtungsränder an der einen oder später oft an beiden Flanken ab. In Jahren mit starker Abrasion resultierten abgeplattete Querschnitte mit beidseitig ausgeprägten Kanten. An solchen abgestumpften Schneiden kann es zu Strömungsablösungen kommen, die infolge Kavitation zu Sekundärschäden an den Flanken der Mittelschneiden führen können (Abbildung 63).

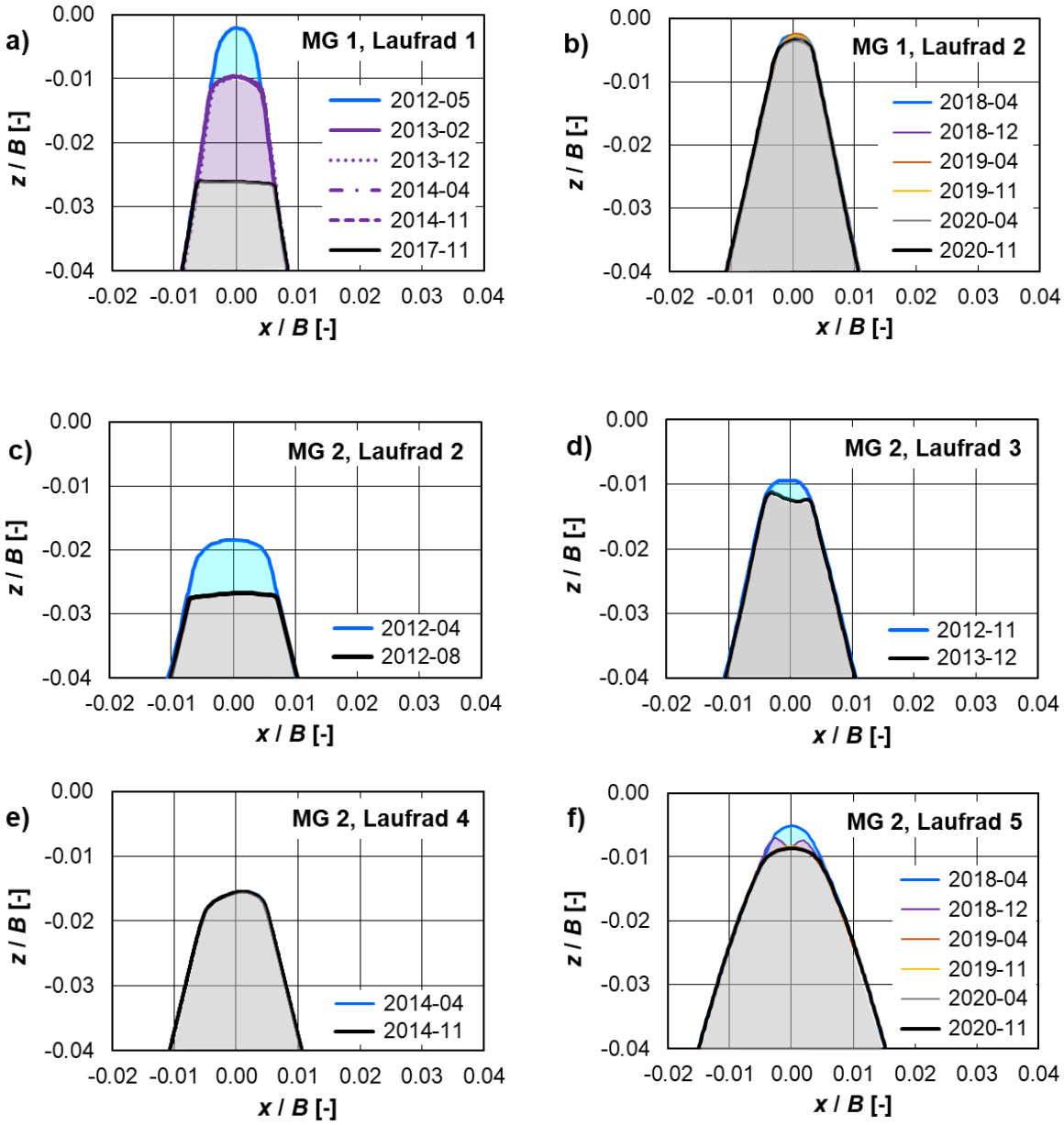


Abbildung 69: Querschnitte der Mittelschneiden der Becher Nr. 1 der Peltonlaufräder im KW Fieschertal von 2012 bis 2020; a) und b) MG 1, c) – f) MG 2 (Messungen und Auswertung: HSLU).

5.2.5 Abrasion an den Becherausschnitten gemäss 3D-Vermessungen

Während der Projektdauer wurden auch die Mittelschneidenspitzen und Bereiche der Becherausschnitte (Bechereintrittskanten) erodiert. Dabei nimmt der hydraulisch "wirksame" Laufraddurchmesser ab, währenddessen der Strahlkreisdurchmesser des Laufrads aufgrund der unveränderten Positionen der Düsen konstant bleibt. Es wird erwartet, dass sich diese zunehmende Abweichung nebst der Mittelschneidenverbreiterung auch negativ auf den Turbinenwirkungsgrad auswirkt.

Die folgenden Abbildungen zeigen im unteren Bereich die geometrischen Veränderungen an den Becherausschnitten und der Mittelschneidenspitze in der Draufsicht auf den Becher. Im oberen Bereich

der Abbildungen sind wiederum die Differenzen zwischen jeweils zwei Aufnahmezeitpunkten dargestellt. Die Abbildungen für alle Laufräder und die beiden vermessenen Becher sind im Anhang B3 zusammengestellt. Die Folgenden zwei Abbildungen zeigen wiederum die Resultate des Bechers 1 der beiden Laufräder, die während der Projektdauer in MG 1 im Einsatz waren.

Bei Laufrad 1 (Abbildung 70) nahmen die Becherausschnittstiefen in den Perioden, in denen auch die Mittelschneiden stark erodiert wurden (Jahr 2012 mit Hochwasser; 2015–2017 als letzte drei von sechs Betriebsjahren zwischen zwei grossen Revisionen) um je bis 9 mm zu. Die Ausschnitte wurden nicht an den Stellen der maximalen anfänglichen Ausschnittstiefen am meisten erodiert, sondern in den Kantenbereichen etwas näher zur Mittelschneidenspitze hin. Die Mittelschneidenspitze wurde im Jahr 2012 um 3 mm und in den Jahren 2015–2017 um weitere 7 mm «zurückversetzt».

Beim Laufrad 2 (Abbildung 71) nahmen im Jahr 2018 (erstes Betriebsjahr nach grosser Revision) die Ausschnittstiefen um bis 3 mm zu, während die Mittelschneiden kaum erodiert wurden. In den Jahren 2019 und 2020 trat auch an den Becherausschnitten keine nennenswerte Abrasion auf.

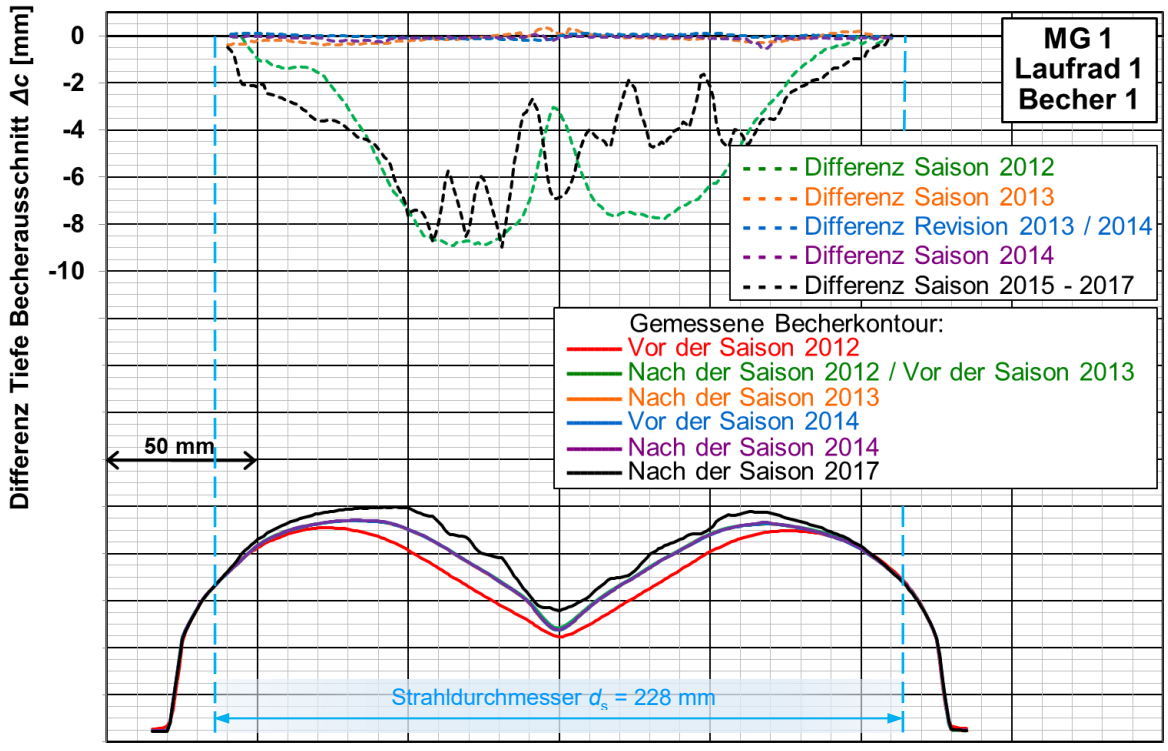


Abbildung 70: Draufsicht auf den Ausschnitt vom Becher 1 des Laufrads 1, in MG 1 von 2012 bis 2017, mit Darstellung der Veränderungen der Becherausschnittsgeometrie in radialer Richtung, d.h. der Vertiefung der Becherausschnitte Δc, im oberen Teil der Abbildung (Messungen und Auswertung: HSLU).

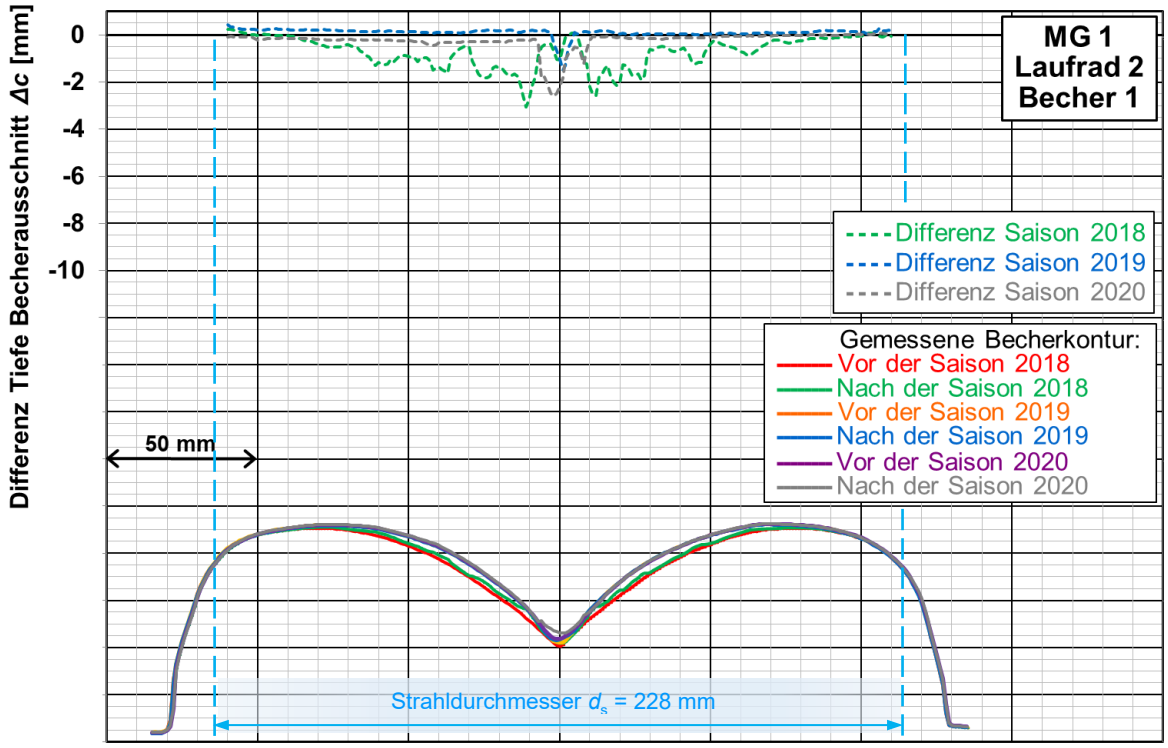


Abbildung 71: Wie Abbildung 70, aber für Laufrad 2 von 2018 bis 2020.

5.2.6 Abradierte Massen an den Mittelschneiden und Becherausschnitten

Wie in Abschnitt 4.2.4 erläutert, wurde auch ausgewertet, welche Volumina bzw. Massen an den Mittelschneiden bzw. Becherausschnitten abgetragen wurden. Die aufgrund der vorhandenen Vermessungen auswertbaren abradierten Massen sind in Tabelle 7 bzw. Tabelle 8 zusammengestellt. Wie bei den 2D-Auswertungen festgestellt, wurde in den Jahren 2012 sowie 2015–2017 viel Material erodiert und in anderen Jahren wenig. In einigen Schwebstoffsaisons mit wenig Verschleiss konnten keine abradierten Massen ausgewertet werden, da aufgrund der Messunsicherheit negative Differenzen resultierten, welche einer unplausiblen Massenzunahme entsprächen. Die negativen Differenzen wurden auf null gesetzt (in der Tabelle mit ≈0 gekennzeichnet). Bei der Berechnung der mittleren abradierte Massen pro Schwebstoffsaison wurden die über drei Schwebstoffsaisons (2015–2017) ermittelten Werte mit je dreimal einem Drittel ihres Werts berücksichtigt (in Wirklichkeit war die jährlich abradierte Masse nicht konstant, sondern nahm im Lauf der drei Jahre zu). Im Mittel wurde an den Becherausschnitten etwa gleich viel Material abgetragen wie an den Mittelschneiden.

Die abradierte Masse variiert teilweise markant zwischen den Bechern 1 und 2, weil z. B. an einem Becher die Beschichtung an einer Stelle abgetragen wurde und an einem anderen Becher nicht. Für die Ermittlung von abradierten Massen, die für alle Becher eines Laufrads bei geringem Verschleiss repräsentativ sind, wäre es wünschenswert, in zukünftigen Studien mehr als 2 der 20 Becher eines Laufrads zu vermessen. Bei starkem Verschleiss ist die relative Variation der abradierten Massen von Becher zu Becher an einem Laufrad geringer, da sich die anfangs zufällig auftretenden Schäden zu einem systematischeren Muster entwickeln.

Die Standardabweichungen der abradierte Massen pro Schwebstoffsaison sind etwa so gross wie der entsprechende Mittelwert. Ein Grund für die grosse Streuung ist die variable jährliche Schwebstoffbelastung, die über einem bestimmten Schwellenwert dazu führen kann, dass die Beschichtung an den

Mittelschneiden und Becherausschnitten zuerst stellenweise und dann systematisch abgetragen wird, worauf die Grundmaterialabrasion einsetzt. Ein weiterer Grund sind die unterschiedlichen Laufradzustände zu Beginn der Schwebstoffsaisons (Abnutzung und Revisionsarbeiten). Aus den folgenden zwei Gründen wären die abradierten Massen im Fall von Optimierungsmassnahmen im Jahr 2012 bei beiden MG und im Jahr 2017 bei MG 1 kleiner ausgefallen:

- Ausserbetriebnahme des Kraftwerks während des Hochwassers 2012 (Abschnitt 5.6.3) und
- Nachbeschichten oder bereits Ersetzen des Laufrads 1 im Winter 2016/2017 (Abschnitt 5.7.4).

Daher wird erwartet, dass die mittleren abradierten Massen in Zukunft mit entsprechenden Optimierungsmassnahmen eher tiefer liegen werden als die Mittelwerte in Tabelle 7 und Tabelle 8.

Tabelle 7: Abradierte Massen an Mittelschneiden der Peltonlaufräder des KW Fieschertal 2012–2020 (HSLU).

MG	Laufrad	Abradierte Massen [g] an den Mittelschneiden jeweils für Becher 1 und 2 in den Jahren								
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	1	49 ; 58	~0 ; 3	≈0 ; ≈0	163 ; 151					
1	2							11 ; 9	12 ; 4	9 ; 8
2	2	80 ; 79								
2	3		16 ; ≈0							
2	4			≈0 ; ≈0						
2	5							18 ; 48	≈0 ; ≈0	≈0 ; ≈0
über 2 x 15 Schwebstoffsaisons: Mittelwert 24 g, Standardabweichung 27 g										

Tabelle 8: Abradierte Massen an Becherausschnitten der Peltonlaufräder des KW Fieschertal 2012–2020 (HSLU).

MG	Laufrad	Abradierte Massen [g] an den Becherausschnitten und Mittelschneidenspitzen jeweils für Becher 1 und 2 in den Jahren								
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	1	71 ; 75	26 ; 22	6 ; 16	71 ; 104					
1	2							1 ; ≈0	≈0 ; ≈0	≈0 ; ≈0
2	2	73 ; 78								
2	3		39 ; -							
2	4			16 ; 9						
2	5							15 ; 30	≈0 ; ≈0	≈0 ; ≈0
über 2 x 15 Schwebstoffsaisons: Mittelwert 22 g, Standardabweichung 25 g										

Wenn die Mittelwerte der abradierten Massen an den Mittelschneiden und Becherausschnitten von 24 g + 22 g = 46 g pro Becher auf 20 Becher hochgerechnet werden, resultiert pro Laufrad ein mittlerer Masseverlust von 0.92 kg pro Schwebstoffsaison.

5.2.7 Historie charakteristischer Verschleissgrössen

Von den detaillierten Informationen zur Abrasion an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten gemäss den 3D-Vermessungen wurden zwei charakteristische Grössen definiert, die den Abnutzungszustand eines Laufrads zu einem gegebenen Zeitpunkt einfach beschreiben:

Für die Abrasion an den Mittelschneiden wurde die Mittelschneidenbreite als charakteristische Grösse gewählt, da diese für die Strömung im Becher und somit den Turbinenwirkungsgrad wichtiger ist als die Mittelschneidenhöhe. Weiter ist die Mittelschneidenhöhe nicht als separate Grösse erforderlich, da sie

aufgrund der Mittelschneidenquerschnittsform mit der Mittelschneidenbreite korreliert. Der charakteristische Wert der **Mittelschneidenbreite *s*** wurde als Mittelwert entlang der Mittelschneidenlänge im Bereich der verfügbaren Aufnahmen definiert.

Für die Abrasion an den Becherausschnitten wurde die Vertiefung in radialer Richtung (wie in den gezeigten Draufsichten auf die Becher) als charakteristische Grösse gewählt. Diese widerspiegelt auch die erwähnte Abnahme des hydraulisch «wirksamen» Laufraddurchmessers. Der charakteristische Wert der **Zunahme der Ausschnittstiefe *c*** wurde als Mittelwert über die Strahlbreite (228 mm gemäss Abschnitt 3.5 und Abbildung 70) definiert. Der Nullpunkt wurde so gesetzt, dass bei der ersten verfügbaren Vermessung eines eingebauten Laufrads $c = 0$ beträgt. Die in früheren Ansätzen (z.B. Hassler & Schnablegger 2006) verwendete radiale Position der Mittelschneidenspitze y_t wurde nicht separat betrachtet, da diese im Mittelwert von *c* enthalten ist.

Die charakteristischen Verschleissgrössen *s* und *c* wurden als Mittelwerte der beiden vermessenen Becher pro Laufrad bestimmt. Abbildung 72 zeigt, wie sich diese Grössen über die Projektdauer entwickelten.

Da die Mittelschneiden auch bei einem neuwertigen Laufrad nicht messerscharf sind, sondern im Querschnitt einen gewissen Minimalradius aufweisen, ist *s* stets > 0, während *c* für jedes eingesetzte Laufrad definitionsgemäss bei 0 beginnt. Die Zunahmen von *s*, also die Δ*s*, verlaufen in der Regel ähnlich wie die Δ*c*. Dabei ist Δ*c* meist etwas grösser als Δ*s,* da die Abrasion an den dünnen Ausschnittschneiden schneller voranschreitet als an den Mittelschneiden. Bei Laufrad 2 nahm *c* im Winter 2018/2019 zu während *s* leicht abnahm – beides als Auswirkungen des Schleifens. Aufgrund des Schleifens kann *s* vorübergehend abnehmen, wenn abgestumpfte Mittelschneiden in ihrem Querschnitt gerundet werden. Die Becherausschnittstiefen nehmen hingegen aufgrund des Schleifens stets zu.

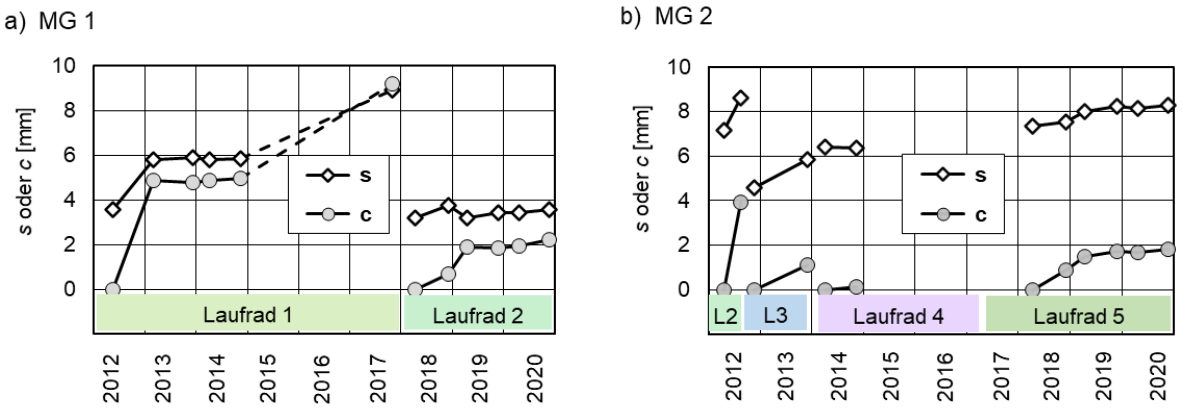


Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf der charakteristischen Verschleissgrössen (Mittelschneidenbreite *s* und Zunahme der Ausschnittstiefe *c*) aufgrund der verfügbaren 3D-Vermessungen an a) MG 1 und b) MG 2 des KW Fieschertal 2012–2020.

5.2.8 Schichtdickenverteilungen in den Laufradbechern

Wie in Abschnitt 4.2.6 erwähnt, wurden in den Jahren 2012–2014 sowie 2017/2018–2020 die Schichtdicken in den Bechern jeweils vor und nach der Schwebstoffsaison systematisch gemessen und analysiert. In Anhang C1 sind die Schichtdickenverteilungen in den Bechern 1 und 2 der fünf Laufräder im Lauf der Jahre dargestellt. Die gemäss Abschnitt 4.2.7 behandelten Messwerte wurden zwischen den Messpunkten der Schablonen (schwarze Kreissymbole) interpoliert auf einer Abwicklung der meist doppelt gekrümmten Becherinnenflächen in der Ebene dargestellt. Lokal sind Beschichtungsdicken von bis zu 800 µm vorhanden, da beim Nachbeschichten stellenweise Material auf die vorhandene Beschichtung aufgetragen wurde.

Abbildung 73 zeigt exemplarisch die Verteilung der gemessenen Schichtdicken im Becher 1 des Laufrads 2 (MG 1) im Dez. 2017 nach einer grossen Revision und etwa drei Jahre später im Nov. 2020. Im fabrikneuen Zustand oder nach grossen Revisionen gilt eine nominale Beschichtungsdicke von 300 µm als üblich, was auf etwa der halben Becherinnenfläche erfüllt ist (bläuliche Bereiche). Die tatsächlichen Schichtdicken variieren zwischen etwa 200 und 550 µm (Abbildung 73a). Beispielsweise am rechten Becherrand variierte die Schichtdicke um fünf Farbstufen von einem Messpunkt zum nächsten, also um mehr als 200 µm auf einer Distanz von nur 40°mm, d.h. um mehr als 50 µm pro 10 mm. Dies zeigt, wie wichtig das wiederholbare Platzieren der Sonde möglichst nah an den definierten Messpunkten ist, da offenbar auch bei Laufrädern, die direkt aus der grossen Revision beim Hersteller kommen, die Schichtdicken stark variieren können.

Der Vergleich mit dem Zustand nach drei Jahren in Abbildung 73b zeigt, dass die Schichtdicken etwas abgenommen haben, aber im ganzen Becher noch mindestens 150 µm betrugen.

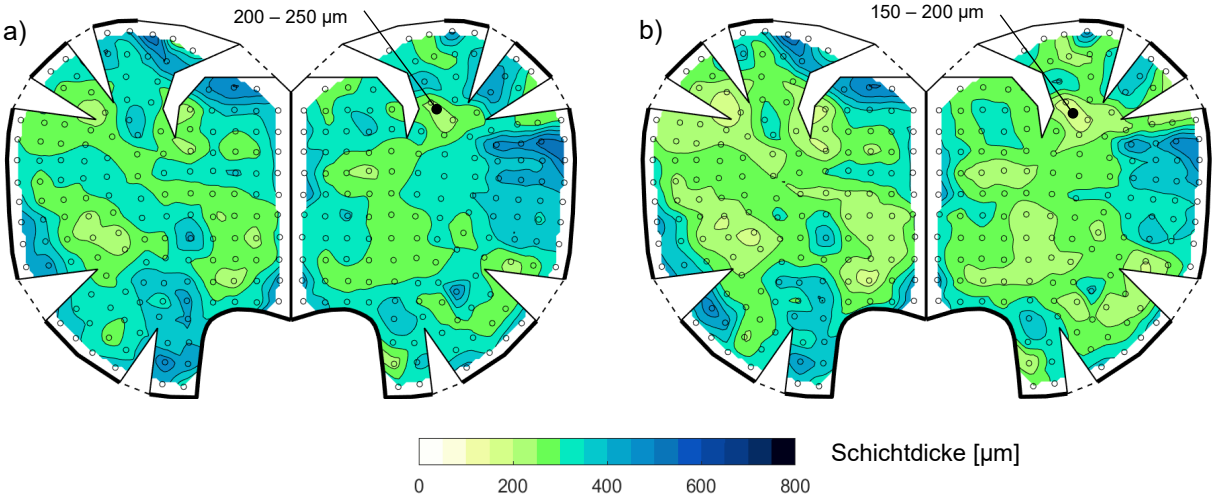


Abbildung 73: Gemessene Schichtdicken im Becher 1 des Laufrads 2 (MG 1) a) im Dez. 2017 nach grosser Revision (neuwertig) und b) im Nov. 2020 mit moderater Abnutzung nach 3 Schwebstoffsaisons und stellenweisem Nachbeschichten in zwei Wintern (am Projektende, Laufrad kann weitere Jahre betrieben werden) (Messungen und Auswertung: VAW).

5.2.9 Abrasion der Beschichtung in den Laufradbechern

Ausgehend von den Schichtdickenverteilungen bei den einzelnen Messterminen wurden drei Klassen von Veränderungen der Schichtdicken zwischen jeweils zwei Messterminen ausgewertet:

Die Abnahmen der Schichtdicke während einzelner Schwebstoffsaisons (Anhang C2) betrug oft bis 20 µm, ab und zu bis 50 µm, meist im hinteren Bereich des Bechergrunds. Lokal kamen auch höhere Werte vor, zum Teil auch wegen erhöhter Messunsicherheit im Bereich räumlich stark variierender Schichtdicken. Mit den oben erwähnten hohe Gradienten kann die Schichtdickendifferenz in solchen

Bereichen erheblich verfälscht werden, wenn die Folgemessung aufgrund der Lageungenauigkeit der Schablonen (Spiel) an einer um wenige mm neben dem ursprünglichen Messpunkt liegenden Stelle durchgeführt wird. So resultierten an einigen Stellen aus dem Vergleich der Messungen vor und nach der Schwebstoffsaison wider Erwarten negative Abrasionstiefen, was einer Zunahme der Schichtdicke entspräche. Diese unplausiblen Differenzen wurden bei der Interpolation der Abrasionstiefen über die Becherinnenflächen nicht berücksichtigt. Die Verteilungen der Abnahmen der Schichtdicke während einzelner Schwebstoffsaisons in Anhang D2 sind aufgrund der hohen Messunsicherheit nicht so aussagekräftig bzw. sind mit Vorsicht zu interpretieren.

Weiter wurden die Veränderungen der Schichtdicken während einzelner Winter ausgewertet (Anhang C3). In diesen Perioden ist die Schwebstoffbelastung vernachlässigbar und es werden normalerweise Revisionsarbeiten an den Bechern ausgeführt, d.h. in der Regel Nachbeschichten im oberen Bereich der Mittelschneidenflanken und in den Bereichen in der Nähe der Ausschnittskanten (Abbildung 8). Daher wurden in diesen Bereichen Zunahmen der Schichtdicken (negative Abrasionstiefen) und in den übrigen Bereichen keine Veränderung der Schichtdicken erwartet. Wider Erwarten resultierten im Winter stellenweise positive Abrasionstiefen. Mögliche Gründe dafür sind wiederum die Messunsicherheit oder tatsächlicher Materialabtrag durch stellenweises Schleifen/Polieren bzw. Sandstrahlen der Becher. Die Verteilungen der Veränderungen der Schichtdicken während einzelner Winter sagen wenig über die Nachbeschichtung aus, da nur wenige Messpunkte in den üblicherweise nachbeschichteten Bereichen liegen (keine Schichtdickenmessungen auf den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten möglich). In den Bereichen ohne Nachbeschichtung zeigen die Verteilungen eine hohe lokale Messunsicherheit von bis zu z.B. 50 µm an einzelnen Punkten.

Schliesslich wurden die räumlichen Verteilungen der Schichtdickenreduktionen über mehr als eine Schwebstoffsaison, von der ersten zur letzten verfügbaren Messung an jedem eingesetzten Laufrad, ausgewertet (Anhang C4). Bei diesen grösseren Schichtdickenreduktionen ist der relative Fehler geringer als bei diejenigen der einzelnen Schwebstoffsaisons, da die Messunsicherheit weniger ins Gewicht fällt. Daher sind die Resultate im Anhang C4 verlässlicher als diejenigen in den Anhängen C2 und C3. Da bei der Betrachtung von mehr als einer Schwebstoffsaison nicht nur der hydro-abrasive Verschleiss, sondern stellenweisen auch die Einflüsse von Reparaturen enthalten sind, treten meist positive und stellenweise negative Differenzen auf. Negative Differenzen sind in Bereichen mit Nachbeschichtung plausibel, andernfalls entstehen sie, wie erwähnt, aufgrund der Messunsicherheit in Bereichen mit starken räumlichen Schichtdickengradienten.

In Abbildung 74a wurden die negativen Differenzen, die als unplausibel eingestuft wurden, vor der Interpolation ausgeschlossen (im Gegensatz zu entsprechender Grafik in Abbildung 138 im Anhang C4). Abbildung 74a zeigt die Abnahme der Schichtdicken im Becher 1 des Laufrads 2 (MG 1) zwischen Dez. 2017 und Nov. 2020 (= positive Differenzen der beiden Schichtdickenverteilungen in Abbildung 73). Es sind Stellen bis zu 80 µm Abrasion während drei Schwebstoffsaisons sichtbar. Die Abrasionsrate betrug also lokal im zeitlichen Mittel bis 27 µm pro Schwebstoffsaison.

Noch deutlicher ist die Abnahme der Schichtdicken im Becher 2 des Laufrads 1 (MG 1) zwischen April 2013 und Okt. 2017 ersichtlich (Abbildung 74b). Es handelt sich dabei um jenes Laufrad, an welchem die Schichtdicken über den längsten Zeitraum (fünf Schwebstoffsaisons) untersucht werden konnten. Die stärkste Abrasion trat im Bechergrund auf (starke Strömungsumlenkung), insbesondere gegen die Becherwand neben dem Becherausschnitt und nahe zur Becherwurzel hin. Die maximale lokale Abnahme der Schichtdicke betrug ca. 100 µm, also im zeitlichen Mittel etwa 20 µm pro Schwebstoffsaison.

Durch die Verwendung von Schablonen für die möglichst wiederholbare Positionierung der Messpunkte wurde die Unsicherheit in der Bestimmung der Schichtdickendifferenzen gegenüber «Freihandmessungen» reduziert. In den Bereichen mit hohen Gradienten ist eine weitere Reduktion der Unsicherheit wünschenswert, lässt sich aber kaum mit vernünftigem Aufwand umsetzen.

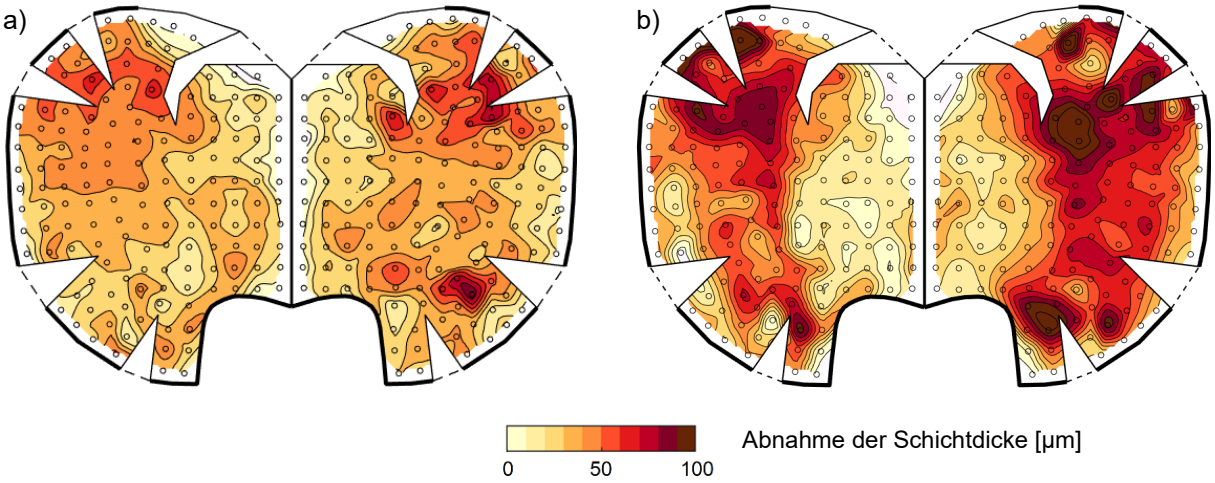


Abbildung 74: Reduktion der Schichtdicken a) im Becher 1 des Laufrads 2 (MG 1) zwischen den in Abbildung 73 angegebenen Zeitpunkten sowie b) Becher 2 des Laufrads 1 (MG 1) vom 04.04.2013 bis 31.10.2017 (Messungen und Auswertung: VAW).

Schliesslich wurden die Mittelwerte der Schichtdicken pro Becher und deren Abnahmen betrachtet, da diese verlässlicher sind als Abnahmen an einzelnen Messpunkten. In Tabelle 9 sind die über die Becherinnenflächen gemittelten Schichtdickenabnahmen in den Jahren von 2013 bis 2020 für beide MG zusammengestellt. Da vom Frühjahr 2015 bis im Frühjahr 2017 keine Schichtdickenmessungen vorliegen (Abbildung 45), konnten in diesem Zeitraum bei MG 1 nur eine Differenz über drei Schwebstoffsaisons und bei MG 2 wegen einem Laufradwechsel nur eine Differenz über zwei Schwebstoffsaisons ermittelt werden. Die mittleren Schichtdickenabnahmen pro Schwebstoffsaison von den Bechern Nr. 1 und Nr. 2 differierten oft nur um ±1 µm, im Ausnahmefall mit einer Nachbeschichtung im Grund eines Bechers um bis ±4 µm (Laufrad 5 im Jahr 2020). Es wurden wie erwartet keine systematischen Abweichungen der mittleren Abrasionstiefen zwischen den linken und rechten Becherhälften festgestellt.

Tabelle 9: Mittlere Schichtdickenabnahmen in den Laufradbechern des KW Fieschertal pro Schwebstoffsaison 2013–2020 (VAW).

Schwebstoff-saison	MG 1				MG 2			
	Laufrad	Becher 1 [µm]	Becher 2 [µm]	Mittelw. [µm]	Laufrad	Becher 1 [µm]	Becher 2 [µm]	Mittelw. [µm]
2013	1	11	10	10	3	6	7	6
2014		0	1	1	4	12	12	12
2015		35	33	34		11	12	11
2016								
2017					5	–	–	–
2018	2	14	9	12		15	16	15
2019		19	13	16		12	12	12
2020		4	6	5		4	12	8
Durchschnitt pro Schwebstoffsaison				9.7				9.3

Die durchschnittliche Abrasion der Beschichtung pro Schwebstoffsaison war für MG 1 und MG 2 ähnlich und betrug „nur“ ca. 10 µm. Die Beschichtung weist also, wie erwünscht, schon bei geringen Schichtdicken von wenigen Hundert Mikrometern einen hohen Abrasionswiderstand gegen die schleifende Beanspruchung durch feine Partikel (Silt) auf. Stellenweise war die Abrasionsrate (20 bis 27 µm pro Schwebstoffsaison in Abbildung 74) zwei- bis dreimal so hoch wie der Mittelwert von 10 µm pro Schwebstoffsaison. Die Standardabweichung der verfügbaren 2 x 5 Werte der über die beiden Becher gemittelten Abrasionsraten von einzelnen Schwebstoffsaisons betrug 4.7 µm. Bei einem Konfidenzniveau von 95 % wird die Unsicherheit der durchschnittlichen jährlichen Abrasionsrate auf ±10.4 µm geschätzt (erweiterte Standardabweichung des Mittelwerts, mit Student's t-Verteilungsfaktor 2.22 für 10 Werte). Das heisst, über die Becher gemittelt können in einer Schwebstoffsaison 0 bis 20 µm abgetragen werden, je nach Schwebstoffbelastung. In Jahren mit Kraftwerksbetrieb während eines grösseren Hochwassers wie im Jahr 2012, kann die Abrasion deutlich stärker sein. Damals wurden noch keine systematischen Schichtdickenmessungen durchgeführt, aber einzelne Messungen im Bechergrund zeigten, dass die Schichtdicke nach dem Ereignis auf bis ca. 50 µm abgenommen hatte.

Im KW Fieschertal sind die Laufräder aufgrund der Abrasion an den Mittelschneiden und Becherausschnitten nach etwa sechs Einsatzjahren einer grossen Revision zu unterziehen. In dieser Zeit sind also Abnahmen der Beschichtungsdicken auf den Becherinnenflächen von im Mittel 60 µm bzw. lokal bis 200 µm zu erwarten. Wenn nach einer grossen Revision, wie durch die Messungen in diesem Bericht festgestellt, eine Beschichtungsdicke von > 250 µm (im Mittel ≥ 300 µm) vorhanden ist, keine ausserordentlichen Schwebstoffbelastungen oder andere Phänomene wie Kavitation oder Tropfenschlagerosion auftreten und eine Beschichtungsdicke von lokal > 50 µm (im Mittel > 150 µm) als genügend angesehen wird, ist die Beschichtungsabrasion in den Laufradbechern in der Regel nicht massgebend. Hingegen ist die Abrasion der Beschichtung an den Mittelschneiden und Becherausschnitten von Bedeutung, wo die Beschichtung während der meisten Schwebstoffsaisons, zumindest stellenweise, über ihre ganze Dicke abgetragen wird. Zur Vermeidung von weiterer Abrasion des Grundmaterials wird dort eine Nachbeschichtung erforderlich.

In beiden Hälften eines Laufradbechers ist eine Fläche von 5.22 10^5 mm^2 beschichtet (Felix 2017). Die Beschichtung hat gemäss Literatur eine Dichte von 12 g/cm^3. Mit der mittleren Abrasionsrate der Beschichtung von 10 µm pro Schwebstoffsaison resultiert für einen Becher ein Masseverlust von 63 g und für ein Laufrad mit 20 Bechern ein Masseverlust von 1.25 kg pro Schwebstoffsaison. Das heisst, dass die von blossem Auge nicht sichtbare Abrasion der Beschichtung (über einen Teil ihrer ursprünglichen Dicke) in den Bechern zu einem etwas grösseren Massenverlust führt als die von Auge sichtbare, in der Regel während einer Schwebstofffsaison auftretende Grundmaterialabrasion an den Mittelschneiden und Becherausschnitten (0.92 kg/Schwebstofffsaison gemäss Abschnitt 5.2.6).

Die Abrasion an der Schichtdickenmesssonde betrug bis 1 bis 2 µm pro Messtermin, d.h. mit je einer Messung vor und nach der Schwebstoffsaison 2 bis 4 µm pro Jahr. Der Vergleich mit der mittleren jährlichen Abrasionsrate der Beschichtung in den Bechern von 10 µm pro Jahr zeigt, dass die Abrasion der Sonde nicht vernachlässigbar ist. Dies kann, wie in diesem Bericht beschrieben, mit einer unveränderten Kalibrierung, häufigen Vergleichsmessungen und einer Kompensation in der Auswertung berücksichtigt werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Schichtdickenmessgerät vor jedem Messtermin neu zu kalibrieren, wobei dann die Sondenabrasion nicht verfolgt werden kann und vermutlich mehr zufällige Fehler entstehen.

5.3 Wirkungsgradänderungen

5.3.1 Druckmessungen als Grundlage für das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring

In der Abbildung 75 ist eine Auswertung der Zeitreihen der im Abschnitt 4.3.3 erwähnten Druckmessungen dargestellt. Die schwarzen Punkte mit weniger als ±0.1 % Abweichung von der Nulllinie zeigen, dass der neuartige Druckaufnehmer ("Keller frontbündig") sehr ähnliche Signale liefert wie ein herkömmlicher Druckaufnehmer neben der Druckleitung ("Keller"). Weiter zeigt der quasi-horizontale Verlauf der schwarzen Punkte, dass es wie erwünscht keine nennenswerte Signaldrifts zwischen den beiden neu installierten Druckaufnehmern gibt. Die Druckaufnehmer, die schon früher im Kraftwerk vorhanden waren, zeigen deutlich grössere Abweichungen im Lauf der Zeit (hellbraune und hellviolette Punkte). Deren Abweichungen konnten zwar durch den Einbau von Elektronikkomponenten (zur galvanischen Trennung der Messsignale) deutlich verringert werden, aber die Signale dieser Druckaufnehmer sind weiterhin weniger "stabil" als die der neuen Druckaufnehmer. Dies ist insbesondere auch im Sommer 2020 ersichtlich.

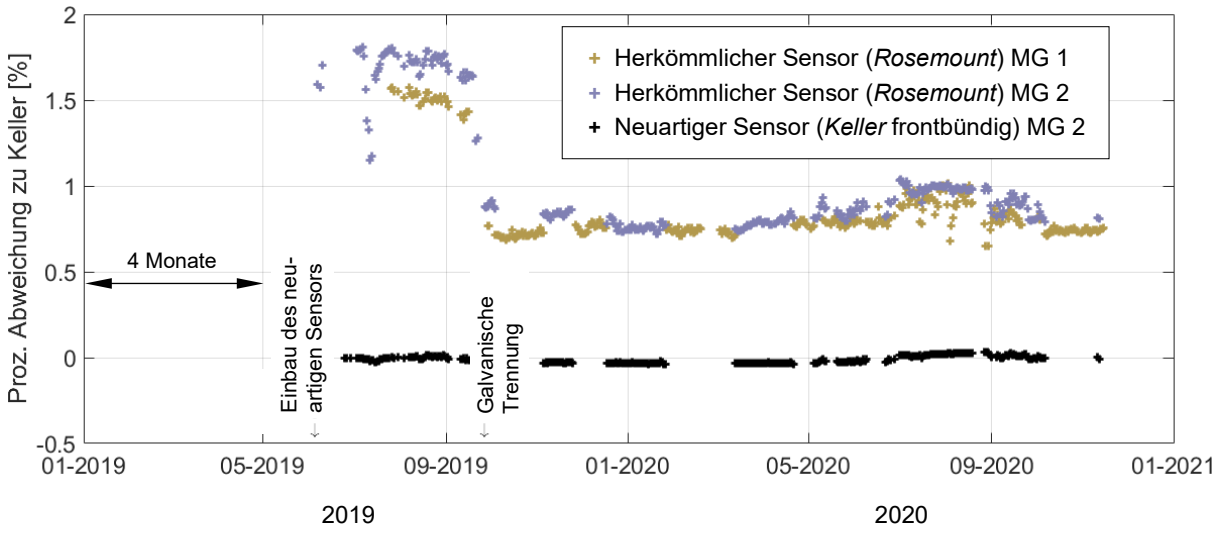


Abbildung 75: Zeitreihen der relativen Abweichungen ausgewählter Drucksignale oberwasserseitig der Turbinen des KW Fieschertal während zwei Jahren (Messungen und Auswertung: HSLU).

5.3.2 Wirkungsgradhistorie SNM

Die Abbildung 76 und Abbildung 77 zeigen die Wirkungsgradhistorie der *Sliding-Needle*-Messungen (SNM) für die MG 1 und MG 2 in den Jahren von 2012 bis 2020. Die Wirkungsgraddifferenzen sind absolute Prozentwerte, die auf den Wirkungsgrad bei der jeweils ersten SNM bezogen sind. In den Diagrammen ist am oberen Rand auch angegeben, welche Laufräder in welchen Zeiträumen in den MG eingebaut waren.

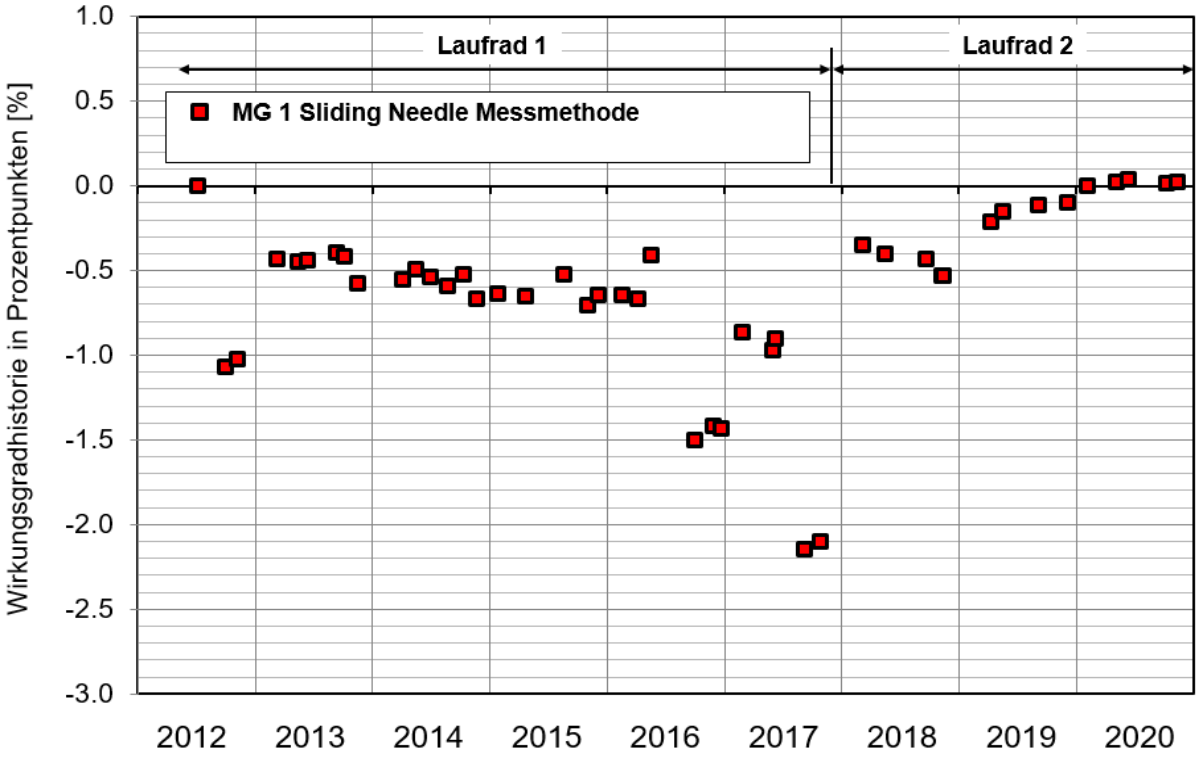


Abbildung 76: Wirkungsgradhistorie aufgrund der *Sliding Needle*-Messungen (SNM) der MG 1 des KW Fieschertal (Messungen: gkw und HSLU; Auswertung: HSLU).

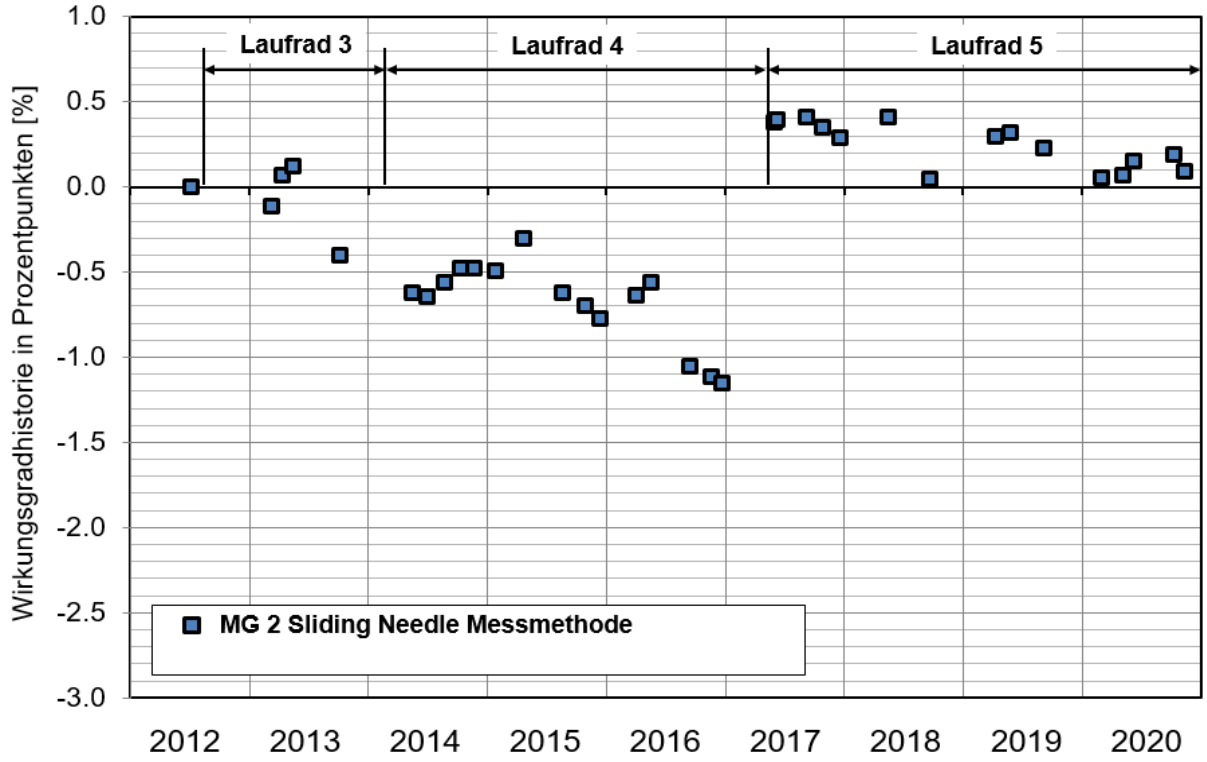


Abbildung 77: Wirkungsgradhistorie aufgrund der *Sliding Needle*-Messungen (SNM) der MG 2 des KW Fieschertal.

Bei MG 1 kam es in der zweiten Hälfte des Jahres 2012, im Nachgang zum Hochwasserereignis vom 02.–03.07.2012, wie bei Abbildung 43 beschrieben, zu einer Wirkungsgradreduktion von ca. 1.0 %. Durch die Revisionsarbeiten im Winter stieg der Wirkungsgrad um ca. 0.6 % an und blieb in den Jahren 2013–2015 nahezu konstant. In den Jahren 2016 und 2017, also im 5. und 6. Einsatzjahr des Laufrads 1 seit dessen grosser Revision, nahm der Wirkungsgrad um rund 1.0 % bzw. sogar ca. 1.3 % ab. Durch den Laufradwechsel im Winter 2017/2018 resultierte ein beträchtlicher Wiederanstieg im Wirkungsgradniveau von ungefähr 1.6 %. In den Jahren 2018–2020 nahm der Wirkungsgrad leicht zu. Ein wahrscheinlicher Grund dafür ist, dass die anfangs raue Hartbeschichtung in den Bechern durch das zeitweise feinsedimenthaltige Wasser «poliert» wird und durch die abnehmende Rauheit vor allem im Bechergrund geringere hydraulische Reibungsverluste resultieren. Ein weiterer möglicher Grund ist, dass das Schleifen (und Nachbeschichten) der Mittelschneiden und der Becherausschnitte zu hydraulischen Profilen mit vorübergehend höherem Wirkungsgrad führte.

Bei der MG 2 war in der neunjährigen Untersuchungsperiode ein Laufradwechsel mehr notwendig als bei MG 1. Dies lag daran, dass das Laufrad 3, wie in Abschnitt 4.4 erwähnt, aufgrund eines mechanischen Problems unabhängig vom hydro-abrasiven Verschleiss vorzeitig ersetzt werden musste. Das Laufrad 4, das kurzfristig eingesetzt werden musste, war seit dessen grosser Revision bereits 3 Jahre im Einsatz gewesen («nachgebrauchtes» Laufrad, nicht neuwertig revidiert). Durch diesen untypischen Laufradwechsel nahm der Wirkungsgrad ab. Das Laufrad 5 ist das Laufrad mit einem komplett neuen hydraulischen Profil (gegenüber den Laufrädern 1 bis 4 der früheren Generation). Der Laufradwechsel brachte einen Wirkungsgradgewinn in der Grössenordnung von 1.5 %.

5.3.3 Kontinuierliche Wirkungsgradhistorie

Die Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen die Resultate des kontinuierlichen Wirkungsgradmonitorings überlagert auf die im vorherigen Abschnitt gezeigten Resultate der SNM wieder über den gesamten Beobachtungszeitraum für MG 1 (oben) und MG 2 (unten). Neben der Laufradinformationen sind in den Diagrammen auch die durchgeführten Revisionsarbeiten mit folgenden Buchstaben angegeben:

Revisionen vor Ort:

G	(grinding)	Schleifen Mittelschneide und Ausschnitt
C	(re-coating)	Nachbeschichtung Mittelschneide und Ausschnitt

Wechsel von Turbinenbauteilen:

R	(runner)	Laufrad
N	(nozzle)	Düsenkomponenten

Das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring liefert Wirkungsgrade, die generell gut mit jenen von den SNM übereinstimmen. Die Abweichungen bewegen sich in der Grössenordnung von ±0.2 %.

Bei den SNM ist die zeitliche Auflösung nicht so hoch, da deren Durchführung mit einem gewissen Aufwand verbunden ist und diese im KW Fieschertal aufgrund der vorhandenen Instrumentierung nur im Einmaschinen-Betrieb durchgeführt werden können. Um Produktionsverluste in diesem Wasserkraftwerk (ohne grösseren Speicher) zu vermeiden, wurden die SNM vor allem ausserhalb der Volllast-Produktionszeit, d.h. vor Juni/Juli und nach August/September durchgeführt. Das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring ermöglicht hingegen eine höhere zeitliche Auflösung, was insbesondere während der Sommermonate interessant ist (z.B. MG 1 im Jahr 2016 und 2017); dafür ist die Unsicherheit in den Wirkungsgraddifferenzen grösser (Streuung der Punkte z.B. innerhalb einer Woche). Die beiden Methoden ergänzen einander.

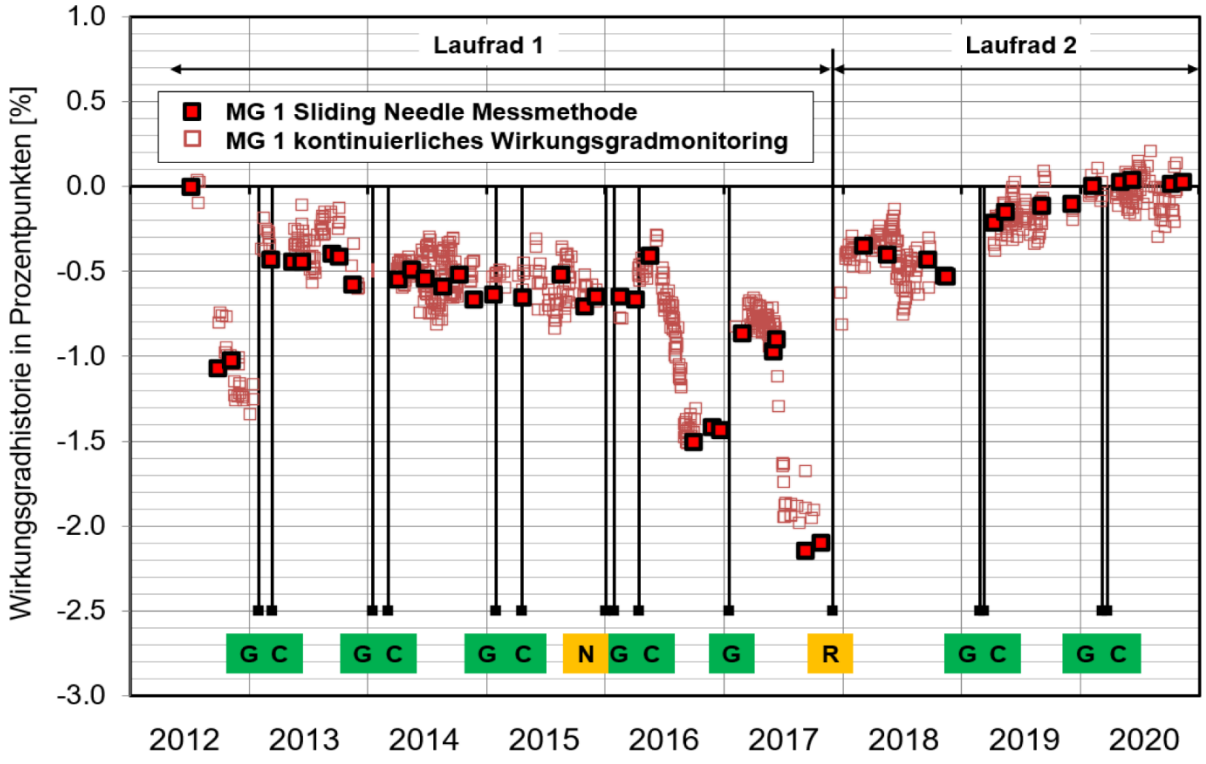


Abbildung 78: Kontinuierliche Wirkungsgradhistorie der MG 1 im Vergleich zur Historie der SNM (Betriebdaten und Messungen: gkw und HSLU; Auswertung: HSLU).

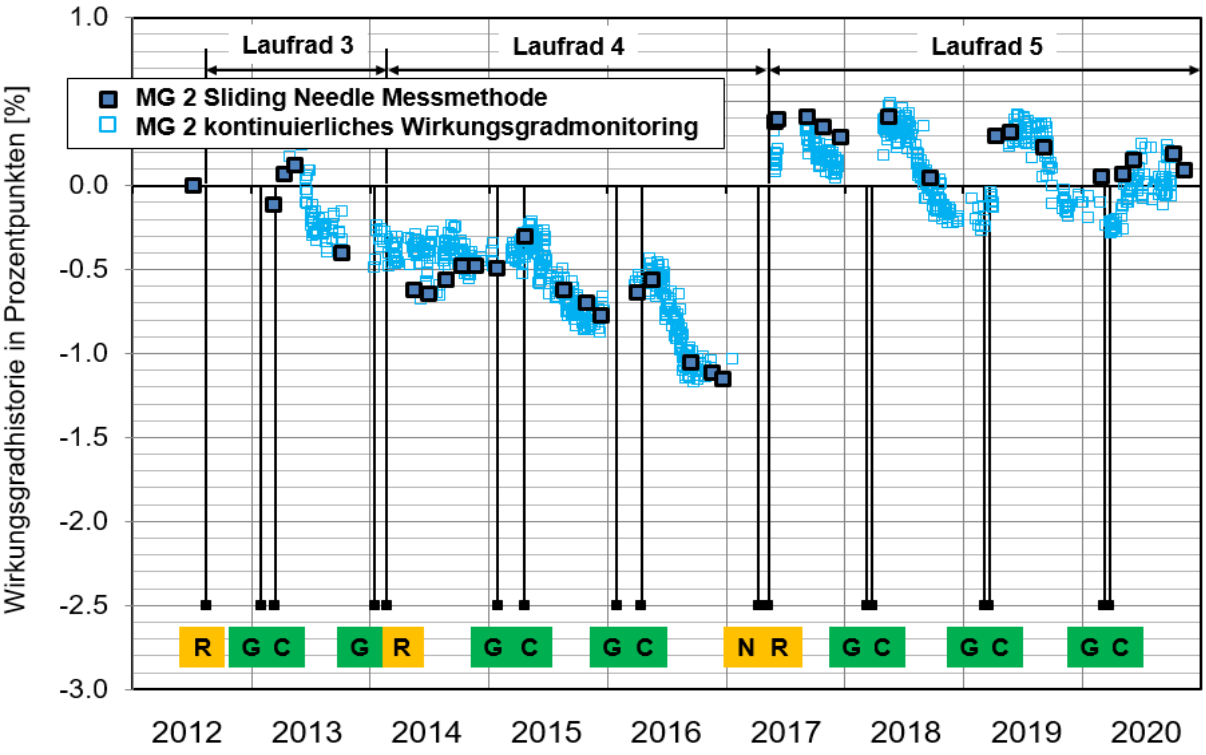


Abbildung 79: Kontinuierliche Wirkungsgradhistorie der MG 2 im Vergleich zur Historie der SNM.

Die gemessenen Wirkungsgradunterschiede im Prozentbereich sind wirtschaftlich relevant: Mit einer Jahresproduktion des KW Fieschertal von ca. 160 GWh entspricht eine Wirkungsgradreduktion von 0.5 % bis 1 % (wie im Mittel über mehrere Jahre vorgekommen) einem Produktionsverlust von 800 bis 1600 MWh/Jahr (beide Turbinen). Mit einem angenommenen Grosshandelspreis von 50 CHF/MWh entspricht dies Mindereinnahmen von 40 bis 80 kCHF/Jahr.

5.3.4 Wirkungsgradreduktion während einer Schwebstoffsaison

Die Wirkungsgradreduktion über eine Schwebstoffsaison (etwa Mitte April bis Ende Okt) wurde als Differenz der Wirkungsgrade gemäss den SNM vor und nach der jeweiligen Schwebstoffsaison ausgewertet. Bei MG 2 wurde in den Schwebstoffsaisons 2018 und 2019 auch der Verlauf des kontinuierlichen Monitorings herangezogen. Die absoluten Wirkungsgraddifferenzen über eine Schwebstoffsaison sind in Tabelle 10 zusammen mit den entsprechenden Betriebsstunden angegeben.

Tabelle 10: Absolute Wirkungsgraddifferenzen über die Schwebstoffsaison mit den entsprechenden Betriebsstunden für die MG 1 und 2 von 2012 bis 2020 (nachgeführt von Abgottspon *et al.* 2021, Auswertung: HSLU).
* bezeichnet die erweiterte Standardabweichung des Mittelwerts für ein Vertrauensintervall von 95 %.

Schwebstoff-saison	MG 1		MG 2	
	Betriebsstunden [h]	Wirkungsgrad-differenz $\Delta\eta$ [%]	Betriebsstunden [h]	Wirkungsgrd-differenz $\Delta\eta$ [%]
2012	1902	−1.05	-	-
2013	2096	−0.05	2979	−0.49
2014	3076	−0.13	3113	+0.14
2015	2515	−0.03	3737	−0.43
2016	2484	−1.01	3265	−0.57
2017	3143	−1.26	2859	−0.07
2018	3151	−0.18	3767	−0.55
2019	3326	+0.08	2761	−0.40
2020	3251	−0.01	2848	+0.03
Mittelwert MG	2772	−0.40 ± 0.41 %* (9 Werte)	3166	−0.29 ± 0.24 %* (8 Werte)
Mittelwert von beiden MG	2957 h mit −0.35 % ± 0.22 %* pro Schwebstoffsaison (17 Werte)			

Wirkungsgraddifferenzen kleiner als ±0.2 %, die in etwa der Hälfte der Fälle ermittelt wurden, liegen im Bereich der Reproduzierbarkeit der Messmethode (z. B. −0.13 % und +0.14 % im Jahr 2014). In diesen Fällen war die Schwebstoffbelastung kleiner als üblich und/oder die Laufräder waren vor der Schwebstoffsaison in gutem Zustand.

In anderen Fällen war die Schwebstoffbelastung höher und/oder die Geometrie der Laufräder vor der Saison wich stärker von der Soll-Geometrie ab, was zu systematischer Abrasion des Grundmaterials an den Mittelschneiden und Becherausschnitten führte. Wirkungsgraddifferenzen von etwa 1 bis 1.3 % wurden für die MG 1 in einem Jahr mit einem grossen Hochwasser (2012) und in den Jahren 2016 und 2017 vor der grossen Revision des Laufrades 1 ermittelt. Für die MG 2 kann aufgrund fehlender Daten und eines unerwarteten Laufradwechsels nach dem Hochwasser im Jahr 2012 keine Wirkungsgraddifferenz ermittelt werden. Die höchste bisher für die MG 2 ermittelte Wirkungsgradreduktion wurde im

Jahr 2016 festgestellt, d. h. im letzten Jahr vor dem Ausbau des Laufrades 4 für die grosse Revision beim Hersteller.

Die mittlere Wirkungsgraddifferenz über den Beobachtungszeitraum ist für die MG 2 geringer als für die MG 1, da für die MG 2 keine Daten für das Jahr 2012 mit dem Hochwasser vorliegen und es bei der MG 2 einen zusätzlichen Laufradwechsel gab, was zu mehr Jahren mit Laufrädern ohne ausgeprägten hydro-abrasiv Verschleiss führte.

Als Mittelwert veränderte sich der Wirkungsgrad im Durchschnitt um −0.35 % pro Schwebstoffsaison, während die Turbinen etwa 3000 Stunden betrieben wurden. Die Standardabweichung aller verfügbaren Wirkungsgraddifferenzen beträgt 0.43 %. Bei einem Konfidenzniveau von 95 % wird die Unsicherheit der durchschnittlichen Wirkungsgradänderung auf ±0.22 % geschätzt (erweiterte Standardabweichung des Mittelwerts, mit Student's t-Verteilungsfaktor 2.12 für 17 Werte). Es wurde keine klare Korrelation zwischen den Wirkungsgraddifferenzen und den Betriebsstunden gefunden, da der Turbinenverschleiss nicht allein von den Betriebsstunden abhängt, sondern vor allem von der variablen Schwebstoffbelastung, dem Widerstand der Beschichtung und dem Zustand der Laufräder vor einer Schwebstoffsaison.

5.3.5 Wirkungsgradänderungen infolge Revisionsarbeiten

Bei Reparatur von nur geringen lokalen Abrasionsschäden blieb der Wirkungsgrad praktisch konstant. Bei systematischem Schleifen von im Millimeterbereich sichtbar abgenutzten Mittelschneiden (und Nachbeschichten) nahm der Wirkungsgrad wie erwartet zu. Die Wirkungsgradzunahme infolge des Schleifens betrug im Mittel 0.43 %, wobei der positive Effekt des Schleifens auf den Wirkungsgrad vom Ausmass der Schädigung vor der Reparatur abhängt. Bei MG 2 konnte der Wirkungsgrad anfangs 2017 mit dem Auswechseln des abgenutzten, mehrmals revidierten, vierzigjährigen Laufrads (Baujahr 1977) durch ein fabrikneues Laufrad mit neuerem hydraulischem Design (Baujahr 2014) zusammen mit neuen Düsen um ca. 1.5 % gesteigert werden. Der Wirkungsgrad des neuwertigen Laufrads mit dem neuen hydraulischen Design lag ca. 0.3 % höher als der höchste Wirkungsgrad, der an dieser MG mit älteren Laufrädern in den Jahren 2012 bis 2016 gemessen wurde.

Die Wirkungsgraddifferenzen aufgrund von Revisionsarbeiten vor Ort (Schleifen und Nachbeschichtung) und/oder Wechsel von hydraulischen Komponenten der Turbinen (Laufräder und Düsen) wurden anhand der Wirkungsgrade der SNM vor und nach den jeweiligen Massnahmen ausgewertet. Für jede Art von Massnahme wurden die Wirkungsgraddifferenzen dieser Fälle gemittelt. Diese gemittelten absoluten Wirkungsgraddifferenzen als Folge der Massnahmen sind in der Tabelle 11 zusammen mit der Anzahl der Fälle pro MG aufgeführt. Die Abkürzungen für die Massnahmen entsprechen denjenigen, die im Abschnitt 5.3.3 definiert und in Abbildung 78 und Abbildung 79 eingetragen sind. Weiter wird die Unsicherheit der durchschnittlichen Wirkungsgraddifferenzen je Massnahme auf dem 95 %-Konfidenzniveau angegeben (erweiterte Standardabweichung des Mittelwerts mit Student's t-Verteilungsfaktor), wenn mindestens drei Werte verfügbar sind. Aufgrund betrieblicher und organisatorischer Gründe wurden an einer MG zwischen zwei SNM oft mehrere Massnahmen durchgeführt. Daher war es nicht immer möglich, die Auswirkungen einer einzelnen Massnahme zu unterscheiden.

Tabelle 11: Absolute Wirkungsgraddifferenzen für verschiedene Revisionen vor Ort und / oder Wechsel von Turbinenbauteilen von 2012 bis 2020 (nachgeführt von Abgottspon *et al.* 2021, Auswertung: HSLU).

Aktion	Mittl. Wirkungsgrad-differenz $\Delta\eta$ [%]	Erw. St.abw. des Mittelwerts [%] (95 % Vertauensintervall)	Anzahl Werte	
			MG 1	MG 2
G	+ 0.43	± 0.71	2	1
C	+ 0.13	± 0.19	2	2
R	+ 0.67	-	1	1
N	-	-	-	-
G + C	+ 0.12	± 0.11	4	4
G + N	+ 0.02	-	1	-
R + N	+ 1.52	-	-	1

Das Schleifen (G) verbesserte den Wirkungsgrad im Durchschnitt von drei Fällen um 0.43 %. Dieses Ergebnis ist signifikant, da es deutlich über der Reproduzierbarkeit der Wirkungsgraddifferenzen liegt. Die erweiterte Standardabweichung des Mittelwerts der Wirkungsgraddifferenz durch das Schleifen ist jedoch hoch, weil bisher nur drei Auswertefälle zur Verfügung stehen und weil das Ausmass des Schleifens stark variiert: Nach einer Schwebstoffsaison mit starkem Verschleiss gibt es mehr zu Schleifen und der Wirkungsgrad kann mehr zunehmen.

Nach der Nachbeschichtung der Mittelschneiden und der Becherausschnittskanten (C) vor Ort wurden im Durchschnitt von vier Fällen leicht höhere Wirkungsgrade (+0.13 %) ermittelt. Mögliche Gründe hierfür sind reale physikalische Strömungseffekte aufgrund der minimalen Veränderung der Geometrie bzw. die Reproduzierbarkeit der SNM.

Durch einen Laufradwechsel (R) erhöhte sich der Wirkungsgrad im Mittel um 0.67 % für zwei Fälle mit +1.56 % (MG 1) und −0.22 % (MG 2). Im ersten Fall wurde das seit sechs Jahren im Einsatz stehende Laufrad durch ein aus der Generalrevision zurückgekehrtes Laufrad ersetzt. Im zweiten Fall hingegen handelte es sich um den erwähnten untypischen Laufradwechsel, der kurzfristig aufgrund eines mechanischen Problems an einem Laufrad erforderlich wurde. Dabei wurde ein Laufrad, das seit seiner grossen Revision knapp zwei Jahre eingebaut war, durch ein Laufrad ersetzt, das seit seiner grossen Revision bereits drei Jahre im Einsatz stand.

Am KW Fieschertal war es von 2012 bis 2020 nicht möglich, die Auswirkung neuer Düsennadeln und -mundstücke (N) auf den Wirkungsgrad der Turbine zu messen, da die Düsenteile vorzugsweise in Verbindung mit anderen Revisionsarbeiten ersetzt werden.

Nach dem Schleifen und der Nachbeschichtung (G + C) bzw. Schleifen und neuen Düsen (G + N) wurden im Mittel von acht Fällen bzw. einem Fall nur sehr geringe Wirkungsgradsteigerungen (+0.12 bzw. +0.02 %) ermittelt. Dies steht im Gegensatz zu dem Ergebnis für das alleinige Schleifen (+0.43 %), welches als Mittelwert von drei anderen Fällen ausgewertet wurde. Es wird angenommen, dass der Umfang des Schleifens in den (G)-Fällen grösser war als in den (G + C)- und (G + N)-Fällen.

Schliesslich wurde in einem Fall eine Wirkungsgradsteigerung von +1.52 % für einen Laufrad- und Düsenwechsel (R + N) ermittelt. Dies entspricht dem ersten, typischen Fall des Laufradwechsels (R, bei MG 1 mit +1.56 %).

Die erweiterten Standardabweichungen vom Mittelwert der Wirkungsgraddifferenzen in der Tabelle 11 liegen in der gleichen Grössenordnung wie die Mittelwerte selbst, d. h. die Wirkungsgraddifferenzen sind indikativ (noch nicht signifikant). Mit zusätzlichen Daten im Laufe der Zeit wird sich die Unsicherheit der Wirkungsgraddifferenzen verringern und die Prognosen verlässlicher werden.

5.4 Turbinenabrasion je nach Schwebstoffbelastung

5.4.1 Abrasion an Mittelschneiden und Ausschnitten der Laufradbecher

Die in Abbildung 72 dargestellten Zeitreihen der gemessenen Mittelschneidenbreiten *s* und der Becherausschnittstiefen *c* in den Jahren 2012–2014 und 2018–2020 wurden zusammen mit den *Particle Loads* pro Becher (Abschnitt 5.1.7) ausgewertet. Da die Laufradbecher im KW Fieschertal in der Regel zu Beginn der Schwebstoffsaisons vollflächig beschichtet sind (entweder neues Laufrad, nach grosser Revision oder mit Nachbeschichtung), wurden die Geometrieänderungen und Schwebstoffbelastungen jeweils pro Schwebstoffsaison betrachtet.

In Abbildung 80 sind die Δ*s* und Δ*c* von beiden MG in Funktion des «Abrasionspotentials» pro Schwebstoffsaison dargestellt. Das «Abrasionspotential» ist das Produkt aus der *Particle Load* pro Becher PL_b und der dritten Potenz der charakteristischen Relativgeschwindigkeit *w* zwischen der Strömung und dem Laufrad. Weil im «Abrasionspotential» die Fallhöhe berücksichtigt ist, ist diese Grösse besser von Anlage zu Anlage vergleichbar als die *Particle Load*. Auf der oberen horizontalen Achse sind die entsprechenden Schwebstofffrachten *SSL* näherungsweise angegeben (spezifisch für Turbinen wie im KW Fieschertal). Auf der rechten vertikalen Achse sind die Verschleissgrössen jeweils mit der inneren Becherbreite *B* normiert. Insbesondere Δ*s*/*B* ist für die Abschätzung der Wirkungsgradreduktion von Bedeutung, wie im Abschnitt 5.5 gezeigt wird.

Die Δ*s* und Δ*c* betrugen in der Regel < 2 mm pro Schwebstoffsaison. Eine Ausnahme bildet das Jahr 2012, in welchem für Δ*c* deutlich grössere Werte bis zu 5 mm auftraten. In beiden Diagrammen können die zwei Phasen der Abrasion gemäss Abschnitt 2.2.2 unterschieden werden: Bis *SSL* ≈ 23'000 t bzw. $w^3 \cdot PL_{b,0} \approx 0.38 \cdot 10^6$ h·g/l·m³/s³ wird vor allem die Hartbeschichtung der Laufradbecher abgetragen und die Geometrieänderungen sind gering (< 0.2 mm, oranger Bereich). Anschliessend folgt die Abrasion des Grundmaterials in der Grössenordnung von Millimetern (roter Bereich, 2. Phase der Abrasion). Die 23'000 t bzw. $0.38 \cdot 10^6$ h·g/l·m³/s³ stammen aus Abbildung 80a. Diese Werte für die Mittelschneiden sind tiefer als jene für die Becherausschnitte und wurden daher als massgebend angesehen. Die Punkte der Messwerte streuen unter anderem deshalb, weil die Laufradbecher aufgrund ihrer Revisionsgeschichte zu Beginn der Schwebstoffsaisons nicht stets denselben Zustand aufwiesen und der Verlust der Beschichtung an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten nicht stets nach derselben *Particle Load* begann, weil die lokalen Schäden in der Beschichtung anfangs zufällig auftreten.

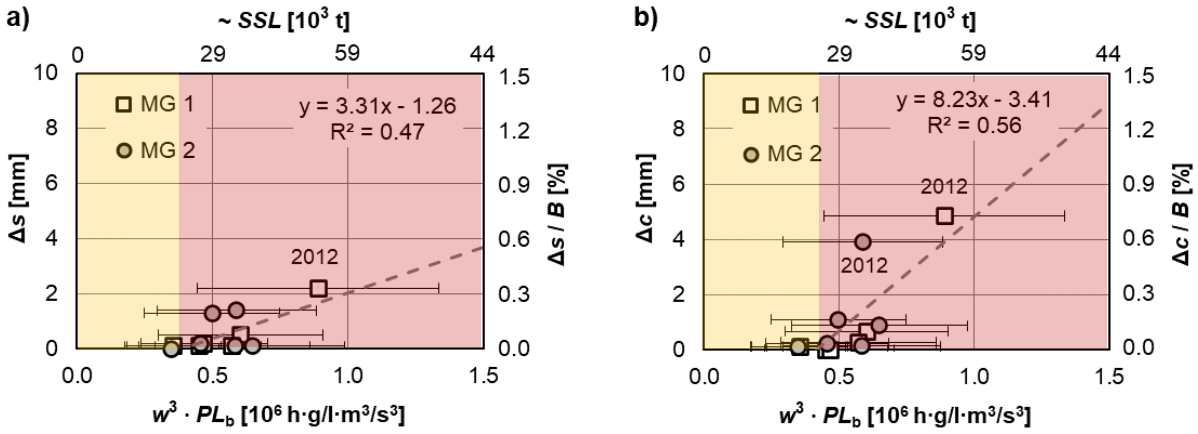


Abbildung 80: Zunahme der a) Breite der Mittelschneide Δ*s* und b) Tiefe der Becherausschnitte Δ*c* der Laufradbecher der MG 1 (leere Symbole) und der MG 2 (grau gefüllte Symbole) des KW Fieschertal in den Schwebstoffsaisons 2012–2014 und 2018–2020 in Funktion der Relativgeschwindigkeit *w* und der *Particle Load* eines Bechers PL_b (mit $k_{hardness}$ = 0.75 bezogen auf die Grundmaterialabrasion) gemäss IEC 62364 (2013/2019) bzw. der ungefähren Schwebstofffrachten (*SSL*) (Auswertung: VAW und HSLU).

In die Δs- und Δc-Punkte wurde je eine Trendlinie gelegt (gestrichelte Geraden). Die Steigung der Trendlinien entspricht dem Parameter C_g in der Gleichung (6) und gibt an, wie «rasch» die Grundmaterial-Abrasion voranschreitet. Der Wert von $w^3 \cdot PL_{b,0}$ wurde als Distanz vom Ursprung bis zum Punkt, an dem die Trendlinie $\Delta s = 0$ schneidet, bestimmt (x-Achsenabschnitt). Der Ausdruck $w^3 \cdot PL_{b,0}$ bezeichnet das «Abrasionspotential» bis zum Beginn der systematischen Abrasion des Grundmaterials an den Mittelschneiden bzw. Bechereintrittskanten (2. Phase der Abrasion). Es wird darauf hingewiesen, dass auch schon bei $PL_b \leq PL_{b,0}$ die Beschichtung an einzelnen Stellen im Becher vollständig abgetragen werden kann (zufällig auftretende lokale Beschichtungsschäden) und lokale Beschichtungsreparaturen erforderlich werden können.

Die Werte für $w^3 \cdot PL_{b,0}$ sind aufgrund der Gruppe der Punkte mit geringem Verschleiss (< 0.5 mm) relativ zuverlässig bestimmt. Die Steigung der Trendlinien C_g konnten hingegen weniger zuverlässig bestimmt werden (R^2-Werte nur ca. 0.5), da sie von wenigen Punkten, vor allem aus dem Jahr 2012 mit den Kraftwerksbetrieb während des grösseren Hochwassers, abhängen.

Der Schwellenwert $PL_{b,0}$ 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 *Particle Load* sei (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die vorliegende Weiterentwicklung des IEC-Abrasionsmodells berücksichtigt hingegen den zweiphasigen Abrasionsverlauf von beschichteten Peltonbechern. Die in Abbildung 80 dargestellten Trendlinien beziehen sich auf beschichtete Peltonbecher, die jeweils vor Beginn der Belastungsperiode vollflächig beschichtet bzw. nachbeschichtet sind. Die Trendlinien können auch verwendet werden, um die Verbreiterung der Mittelschneiden und die Vertiefung der Becherausschnitte für andere Kraftwerke näherungsweise abzuschätzen. Dies wird im Abschnitt 5.4.5 am Beispiel der Mittelschneidenbreite auf graphische und rechnerische Weise aufgezeigt.

Wie bei der Streuung der Punkte in Abbildung 80 erwähnt, sind gewisse Einflussfaktoren, wie der Zustand des Laufrads vor Beginn einer Belastungsperiode oder das anfangs zufällige Auftreten des lokalen Beschichtungsverlusts an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten, im IEC-Abrasionsmodell und auch in der vorliegenden Weiterentwicklung nicht berücksichtigt.

5.4.2 Abrasion an Mittelschneiden und Ausschnitten – Vergleich mit Felix (2017)

In diesem Abschnitt werden der Versatz und die Steigung der Trendlinie aus Abbildung 80a) bzw. b), d.h. die Werte der Koeffizienten $w^3 \cdot PL_{b,0}$ und C_g für die Mittelschneidenverbreiterung und die Becherausschnittsvertiefung in der Gleichung (6) mit den entsprechenden Werte gemäss Felix (2017) verglichen (Tabelle 12).

In Felix (2017) wurden die Daten von den ersten drei Projektjahren (2012–2014) ausgewertet und die Trendlinien beruhten auf je 6 Datenpunkten (2 MG während je 3 Schwebstoffsaisons). In der vorliegenden Studie kamen von den Jahren 2018–2020 weitere 6 Datenpunkte hinzu, wodurch die Datenbasis verdoppelt wurde.

Bei der Hälfte bis zwei Drittel der Punkte betrug der Verschleiss weniger als 0.3 mm pro Saison. Mit den zusätzlichen Punkten konnte gegenüber Felix (2017) vor allem das Abrasionspotential bis zum Beginn der systematischen Grundmaterialabrasion verlässlicher quantifiziert werden. Für die Bestimmung der Geradensteigung, d.h. des C_g-Werts in der zweiten Phase der Abrasion, trugen die zusätzlichen Punkte gegenüber Felix (2017) wenig bei. Diese Datenlage (wenige Punkte mit grossem Verschleiss) resultiert aus der optimierten Betriebs- und Instandhaltungsstrategie des KW Fieschertal, in welcher mittels der Ausserbetriebnahmen während Hochwassern und des Nachbeschichtens in der Regel nach jeder Schwebstoffsaison eine ausgeprägte Grundmaterialabrasion vermieden wird.

Tabelle 12: Vergleich der Parameter des angepassten IEC-Abrasionsmodells gemäss der vorliegenden Studie und Felix (2017).

	$w^3 \cdot PL_{b,0}$ Abrasionspotential bis zum Beginn der systematischen Grundmaterialabrasion [h·g/l·m³/s³]			$C_g = \frac{K_f}{RS^p} K_m$ Gl. (4) Koeffizient für Abrasionsrate (2. Phase) [mm/(h·g/l·m³/s³)]		
	Felix (2017)	Vorliegende Studie	Verhältnis	Felix (2017)	Vorliegende Studie	Verhältnis
Verbreiterung der Mittelschneiden Δs	$0.50 \cdot 10^6$	$0.38 \cdot 10^6$	0.76	$3.4 \cdot 10^{-6}$	$3.3 \cdot 10^{-6}$	0.97
Vertiefung der Becherausschnitte Δc	$0.51 \cdot 10^6$	$0.41 \cdot 10^6$	0.80	$11.0 \cdot 10^{-6}$	$8.2 \cdot 10^{-6}$	0.75

Die Parameter $w^3 \cdot PL_{b,0}$ und C_g gemäss der vorliegenden Studie betragen 76 bis 97 % der entsprechenden Werte in Felix (2017). Gründe für die etwas kleineren Werte sind:

- Wie in Abschnitt 5.1.7 erwähnt, betragen die hier berechneten PL_b-Werte ca. 64 % der entsprechenden Werte in Felix (2017), da hier auf eine fraktionsweise Betrachtung verzichtet wurde.
- Die Mittelschneidenverbreiterung Δs wurde in Felix (2017) als Mittelwert über den mittleren Drittel der Mittelschneidenlänge bestimmt (Δs_{centr}). In der vorliegenden Studie hingegen wurde Δs über praktisch die ganze Mittelschneidenlänge (soweit aufgrund der vorhandenen Messpunkte auswertbar) bestimmt. Dadurch betragen die Δs in der vorliegenden Auswertung nur 73 - 87 % (im Mittel 77 %) der Werte in Felix (2017).
- Die Becherausschnittsvertiefung Δc wurde in Felix (2017) als gerundeter Maximalwert in den beiden Ausschnitten bestimmt (Δc_{max}). In der vorliegenden Studie hingegen wurde Δc über die nominale Strahlbreite gemittelt. Dadurch betragen die Δc in der vorliegenden Auswertung nur 28 - 56 % (im Mittel 45 %) der Werte in Felix (2017).

Neben den kleineren Werten für PL_b und Δs bzw. Δc bewirken die zusätzlichen Punkte gegenüber Felix (2017) Veränderungen des Versatzes und der Steigung der Trendlinien.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den Daten der zusätzlichen Messjahre und einigen Präzisierungen zu den Definitionen bzw. der Berechnungsweise der *Particle Loads* und der Verschleissgrössen kleinere Abweichungen (3 bis 24 %) gegenüber Felix (2017) resultierten, aber die Grössenordnung der Parameter bestätigt wurde. Weil aber vor allem Datenpunkte mit kleinen bzw. vernachlässigbaren Δs bzw. Δc dazu kamen, sind die $w^3 \cdot PL_{b,0}$-Werte verlässlicher als die C_g-Werte.

5.4.3 Abrasion an Mittelschneiden und Ausschnitten – Vergleich mit Rai *et al.* (2020b)

Weiter wurden die Koeffizienten C_g (Steigungen der Trendlinien in Abbildung 80) mit den entsprechenden Angaben gemäss Rai *et al.* (2020b) verglichen. Zu diesem Zweck wurden die Parameter K_f und p für die Mittelschneidenverbreiterung und die Becherausschnittsvertiefung aus Tabelle 1 im Abschnitt 2.2.4 mit der Referenzgrösse RS, d.h. der inneren Becherbreite von B = 0.65 m für das KW Fieschertal, in C_g-Werte gemäss Gl. (4) umgerechnet. Dabei wurde K_m = 1 für die Abrasion des Grundmaterials eingesetzt.

Wie im Abschnitt 2.2.4 erwähnt, verwendeten Rai *et al.* (2020b) für den Exponenten der Relativgeschwindigkeit x = 3 bei den Mittelschneiden und x = 3.4 an den übrigen Stellen von Peltonturbinen.

Die in der vorliegenden Studie bestimmten Werte beziehen sich auf x = 3. Um den C_g-Wert für die Becherausschnitte gemäss Rai *et al.* (2020b) mit dem in dieser Studie ermittelten Wert vergleichen zu können, wurde ihr C_g-Wert mit dem Verhältnis $w^{3.4} / w^3 = w^{0.4}$ multipliziert. Mit einer Relativgeschwindigkeit von w = 50 m/s im KW Fieschertal beträgt der Umrechnungsfaktor $w^{0.4}$ = 4.78. So haben alle C_g-Werte in Tabelle 13 dieselbe Einheit.

Tabelle 13: Vergleich der Parameter des angepassten IEC-Abrasionsmodells gemäss Rai *et al.* (2020b) und der vorliegenden Studie.

	Einfluss der Bauteilgrösse $1/RS^P = RS^{-P}$ gemäss Rai *et al.* (2020b) für RS = 0.65 m	$C_g = \frac{K_f}{RS^p} K_m$ Gl. (4) [mm/(h·g/l·m³/s³)]		Faktor zwischen den C_g-Werten beider Studien
		Rai *et al.* (2020b), mit Einfluss der Bauteilgrösse und bezogen auf w^3, für Grundmaterialabrasion	Vorliegende Studie mit RS = 0.65 m, anfangs beschichtet, für Grundmaterialabrasion	
Verbreiterung der Mittelschneiden Δs	$0.65^{-2.69}$ = 3.2	$0.68 \cdot 10^{-6} \cdot 3.2 = 2.1 \cdot 10^{-6}$	$3.3 \cdot 10^{-6}$	≈1.6
Vertiefung der Becherausschnitte Δc	$0.65^{-1.11}$ =1.6	$4.78 \cdot 1.1 \cdot 10^{-6} \cdot 1.6 = 8.4 \cdot 10^{-6}$	$8.2 \cdot 10^{-6}$	≈1.0

Die C_g-Werte der beiden Studien differieren für die Verbreiterung der Mittelschneiden um den Faktor 1.6 und stimmen für die Vertiefung der Becherausschnitte gut überein. Mögliche Gründe für Abweichungen der Resultate zwischen den beiden Studien sind:

- Der Verschleiss an den Mittelschneiden und den Bechereintrittskanten hängt vom Entwurf der Peltonbecher bzw. den Revisionsarbeiten ab. Daher sind die Δs und Δc nicht stets proportional. Wenn beispielsweise die Bechereintrittskanten scharf bzw. dünn sind, während die Mittelschneiden nicht auf höchste Wirkungsgrade optimiert, sondern eher «robust» ausgebildet wurden, nimmt die Ausschnittstiefe deutlich mehr zu, als die Mittelschneide verbreitert wird.
- Weil bei der Mehrheit der Datenpunkte in der vorliegenden Studie die Δs bzw. Δc vernachlässigbar sind, weisen die C_g-Werte eine beträchtliche Unsicherheit auf.
- In der vorliegenden Studie wurden Δs und Δc wie erwähnt als Mittelwerte entlang der Mittelschneiden bzw. über die Strahlbreite bestimmt, sind also kleiner als die lokalen Maxima. Rai *et al.* (2020b) beschreiben die Verschleissmasse nicht genauer als in Abbildung 6. Unter der Annahme, dass sie lokale Maximalwerte verwendeten, wären in der vorliegenden Studie tiefere C_g-Werte als bei Rai *et al.* (2020b) zu erwarten; in Tabelle 13 ist aber für die Mittelschneidenbreite das Gegenteil der Fall und bei den Becherausschnitten ist der erwartete Unterschied nicht ersichtlich.
- Der C_g-Wert für die Mittelschneidenverbreiterung von Rai *et al.* (2020b) gilt mit K_m = 1 für unbeschichtete Becher, während sich der C_g-Wert aus dieser Studie auf die zweite Phase der Abrasion an anfangs beschichteten Bechern bezieht. Es wird davon ausgegangen, dass die an den Flanken vorhandene Beschichtung auch dann noch den Verschleiss an der Schneide mindert, wenn die Beschichtung auf den Mittelschneidenoberkanten abgetragen ist. Daher ist zu erwarten, dass in der vorliegenden Studie ein kleinerer C_g-Wert für die Mittelschneidenverbreiterung als bei Rai *et al.* (2020b) resultieren würde; in Tabelle 13 ist aber das Gegenteil der Fall.

– Der Einfluss des Exponenten der Geschwindigkeit x = 3.4 bzw. 3 macht bei einer Fallhöhe wie im KW Fieschertal einen Faktor von fast 5 aus. Es ist also wichtig, einen physikalisch möglichst zutreffenden und vergleichbaren x-Wert zu verwenden.

– Der Faktor für die Bauteilgrösse RS^{-p} differiert mit den p-Werten gemäss Rai *et al.* (2020b) bei einer Becherbreite wie im KW Fieschertal um einen Faktor 2 zwischen der Mittelschneidenverbreiterung und der Becherausschnittsvertiefung (zweite Spalte in Tabelle 13). Für die verlässlichere Quantifizierung des Einflusses der Bauteilgrösse sind weitere standardisierte Messungen an Turbinen mit heute üblichen Entwürfen, aber unterschiedlichen Abmessungen wünschenswert.

Für die verbesserte Kalibrierung eines Abrasionsmodells für Peltonturbinen beliebiger Grösse, mit möglicherweise deutlich unterschiedlichen hydraulischen Entwürfen und allfälliger Beschichtung, sind also weitere Untersuchungen erforderlich. Bis zum Vorliegen neuerer Resultate kann mit der vorliegenden Studie und derjenigen von Rai *et al.* (2020b) die Grössenordnung der Abrasion an Peltonbauteilen rechnerisch abgeschätzt werden. Dabei ist die Unsicherheit geringer, wenn die Turbine, an welcher die Abrasion abgeschätzt werden soll, ähnlich ist wie die Turbine, von der die Referenzdaten stammen.

5.4.4 Abrasion der Beschichtung in den Laufradbechern

In Abbildung 81 sind die über die Becherinnenflächen gemittelten Abnahmen der Beschichtungsdicke (*Coating Thickness*) ΔCT für beide MG und die Zeiträume gemäss Tabelle 9 wiederum in Funktion der entsprechenden «Abrasionspotentiale» $w^3 \cdot PL_b$ (untere horizontale Achse) bzw. der entsprechenden näherungsweisen Schwebstofffrachten SSL dargestellt (obere Abszisse). Da es in Abbildung 81 ausschliesslich um die Abrasion der Beschichtung geht, wurden die $w^3 \cdot PL_b$-Werte basierend auf $k_{hardness}$ = 0.31 verwendet (Abschnitt 5.1.7). In der vorhergehenden Abbildung 80 hingegen ging es um die Abrasion von sowohl Grundmaterial und Beschichtung – daher wurden dort die höheren $w^3 \cdot PL_b$-Werte basierend auf $k_{hardness}$ = 0.75 verwendet.

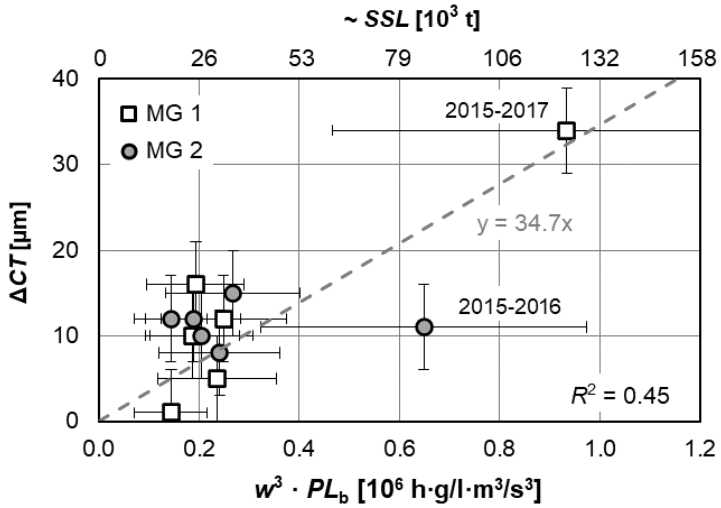


Abbildung 81: Mittlere Abnahme der Beschichtungsdicke ΔCT in den Laufradbechern der MG 1 (leere Symbole) und MG 2 (grau gefüllte Symbole) des KW Fieschertal von 2013 bis 2020 gemäss Tabelle 9 in Funktion der Relativgeschwindigkeit w und der *Particle Load* eines Bechers PL_b (mit $k_{hardness}$ = 0.31 bezogen auf die Beschichtung) gemäss IEC 62364 (2013/2019) bzw. den ungefähren Schwebstofffrachten (SSL) (Auswertung: VAW).

Wie in Abschnitt 5.2.9 beschrieben, sind die über die Becherinnenflächen gemittelten Abtragsraten der Beschichtung von ca. 10 µm pro Schwebstoffsaison im Vergleich zu den nominalen bzw. tatsächlich

anfänglich vorhandenen minimalen Beschichtungsdicken (250 bzw. 300 µm) klein. Auch unter Berücksichtigung, dass die Beschichtungsabrasion in den Bechern stellenweise zwei- bis dreimal so hoch sein kann wie der hier betrachtete Mittelwert und eine gewisse Mindestschichtdicke erforderlich ist, ist die Beschichtung in den Laufradbechern des KW Fieschertal in der Regel für gut sechs Jahre ausreichend. Daher ist die Beschichtungsabrasion in den Bechern in der Regel nicht massgebend gegenüber der Abrasion an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten und den dadurch verursachten Sekundärschäden.

5.4.5 Anwendungsbeispiel zur Abschätzung der Mittelschneidenverbreiterung

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie das IEC-Abrasionsmodell (Abschnitt 2.2.2) mit den Anpassungen gemäss Felix (2017, Abschnitt 2.2.3) und die in dieser Studie gefundenen Kalibrierkoeffizienten (Abschnitt 5.4.1) für die Abschätzung der Mittelschneidenverbreiterung Δs von beschichteten Peltonbechern angewendet werden kann. Um zu sehen, wie gut die Vorhersage aufgrund des Modells zu den gemessenen Werten passt, wird einerseits das KW Fieschertal betrachtet. Andererseits wird ein fiktives Kraftwerk betrachtet, das eine um 50 % grössere (= anderthalbfache) Nettofallhöhe h_n hat, um deren Einfluss auf die Abrasion zu veranschaulichen. In beiden Beispielen wird eine jährliche *Particle Load* je Becher von PL_b = 5 h·g/l angenommen, was der typischen Schwebstoffbelastung des KW Fieschertal entspricht (Abbildung 57). Alle *Particle Loads* in diesem Beispiel sind, wie in Abbildung 80, auf die Abrasion des Grundmaterials bezogen, d.h. wurden mit $k_{hardness}$ = Massenanteil der Partikel mit Mohshärte > 4.5 berechnet.

In der Tabelle 14 sind die Annahmen und Berechnungsresultate zusammengestellt. Da die charakteristische Relativgeschwindigkeit zwischen der Strömung und einem Peltonlaufrad w proportional zu $h_n^{0.5}$ ist, nimmt w bei der anderthalbfachen Fallhöhe nur um 22 % zu. Weil die Abrasion an Peltonlaufrädern etwa mit der 3. Potenz von w zunimmt, wirkt sich die Vergrösserung der Fallhöhe aber überproportional mit $h_n^{1.5}$ aus (Zunahme um 84 %).

Die Werte für C_g und $w^3 \cdot PL_{b,0}$·stammen von der Trendlinie aus Abbildung 80a bzw. aus Tabelle 12. Es wird angenommen, dass diese Kalibrierparameter des Modells von Anlage zu Anlage übertragbar sind. Der $w^3 \cdot PL_{b,0}$-Wert wird durch w^3 geteilt, um $PL_{b,0}$ zu erhalten – das ist die Schwebstoffbelastung in der 1. Phase der Abrasion. Bei der grösseren Fallhöhe ist $PL_{b,0}$ kleiner, d.h. bereits nach einer kleineren Schwebstoffbelastung wird die Beschichtung an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten systematisch abgetragen. Die Schwebstoffbelastung in der 2. Phase der Abrasion, $PL_b - PL_{b,0}$, ergibt sich jeweils als Differenz der gesamten Schwebstoffbelastung (5.0 h·g/l) zu der vorher berechneten $PL_{b,0}$.

Für die rechnerische Abschätzung der Mittelschneidenverbreiterung Δs wird Gl. (6) verwendet, d.h. das Produkt von C_g, w^3 und $(PL_b - PL_{b,0})$ berechnet. Für Verhältnisse wie im KW Fieschertal resultiert Δs =0.8 mm. Dieser Wert kann auch an der Trendlinie in Abbildung 80a abgelesen werden bei $w^3 \cdot PL_b$ = 5.0 h·g/l · 125'000 m³/s³ = 0.62 ·10⁶ h·g/l·m³/s³. Bei diesem Abrasionspotential kamen aufgrund bisher nicht untersuchter Einflüsse und der Messunsicherheit Δs von 0 bis ca. 1.5 mm vor.

Bei der anderthalbfachen Fallhöhe resultiert mit Gl. (6) Δs = 2.5 mm. Auch dieser Wert kann an der Trendlinie aus Abbildung 80a abgelesen werden, aber nun beim höheren Abrasionspotential von $w^3 \cdot PL_b$ = 5.0 h·g/l · 229'221 m³/s³ = 1.15·10⁶ h·g/l·m³/s³. In diesem Beispiel ist also mit der anderthalbfachen Fallhöhe eine gut dreifache Verbreiterung der Mittelschneiden zu erwarten, weil die Beschichtung an den massgebenden Stellen «rascher» abgetragen wird und dementsprechend die Abrasion mehr im Grundmaterial fortschreitet. Wenn die Mittelschneiden anfangs z.B. 3 mm breit waren, werden am Ende der Belastungsperiode Mittelschneidenbreiten von 3.8 mm bzw. bei der anderthalbfachen Fallhöhe 5.5 mm erwartet.

Bei unbeschichteten Peltonturbinen – und bei beschichteten Peltonturbinen in der ersten oder der zweiten Abrasionsphase – ist die Abrasion, wie oben beschrieben, grundsätzlich proportional zu $h_n^{1.5}$. Sämtliche andere Parameter nebst der Fallhöhe gehen gemäss Gl. (2) linear ein. So resultiert beispielsweise durch eine Verdoppelung der *SSC*, der Partikelgrösse oder der Betriebsstunden die doppelte Abrasionstiefe. Wenn aber bei beschichteten Turbinenbauteilen die Beschichtung im Lauf der Belastungsperiode stellenweise verloren geht und das Grundmaterial abgetragen wird (Abrasion in mehr als einer Phase), kommen – wie im Beispiel aufgezeigt – weitere nicht-lineare Effekte hinzu.

Tabelle 14: Abschätzung der Mittelschneidenverbreiterung Δs in beschichteten Peltonbechern für zwei Kraftwerke mit unterschiedlichen Nettofallhöhen und ansonsten gleichen Bedingungen.

	Kraftwerk 1, wie KW Fieschertal	Kraftwerk 2, mit 50 % grösserer Fallhöhe	Faktor [-]
Nettofallhöhe h_n [m]	509	764	1.5
Char. Relativgeschw. Laufrad $w = 0.5 \cdot (2\, g\, h_n)^{0.5}$ [m/s]	50.0	61.2	$1.22 = 1.5^{0.5}$
w^3 (proportional zu Abrasion) [m^3/s^3]	125'000	229'221	$1.84 = 1.5^{1.5}$
Particle Load je Becher PL_b [h·g/l]	5.00		1
Steigung der Trendlinie C_g [mm/(h·g/l·m^3/s^3)]	$3.3 \cdot 10^{-6}$		1
x-Achsenabschnitt der Trendlinie $w^3 \cdot PL_{b,0}$ [h·g/l·m^3/s^3]	$0.38 \cdot 10^6$		1
Belastung in 1. Phase der Abrasion $PL_{b,0}$ [h·g/l]	3.05	1.66	0.54
Belastung in 2. Phase der Abrasion $PL_b - PL_{b,0}$ [h·g/l]	1.95	3.34	1.71
Mittelschneidenverbreiterung Δs gemäss Gl. (6) [mm]	0.8	2.5	≈3.1
Mittelschneidenbreite am Anfang s_0 [mm]	3.0		1
Mittelschneidenbreite am Ende $s = s_0 + \Delta s$ [mm]	3.8	5.5	≈1.5

5.5 Wirkungsgradreduktion je nach Schwebstoffbelastung und Abrasion

In Abbildung 82 sind die Wirkungsgraddifferenzen pro Schwebstoffsaison in Funktion der Schwebstofffracht ("Schwebstoffbelastung") pro MG in den entsprechenden Perioden dargestellt. Es sind sowohl die Punkte der MG 1 (rot) als auch der MG 2 (blau) eingetragen. Von beiden MG konnten insgesamt 17 Schwebstoffsaisons ausgewertet werden.

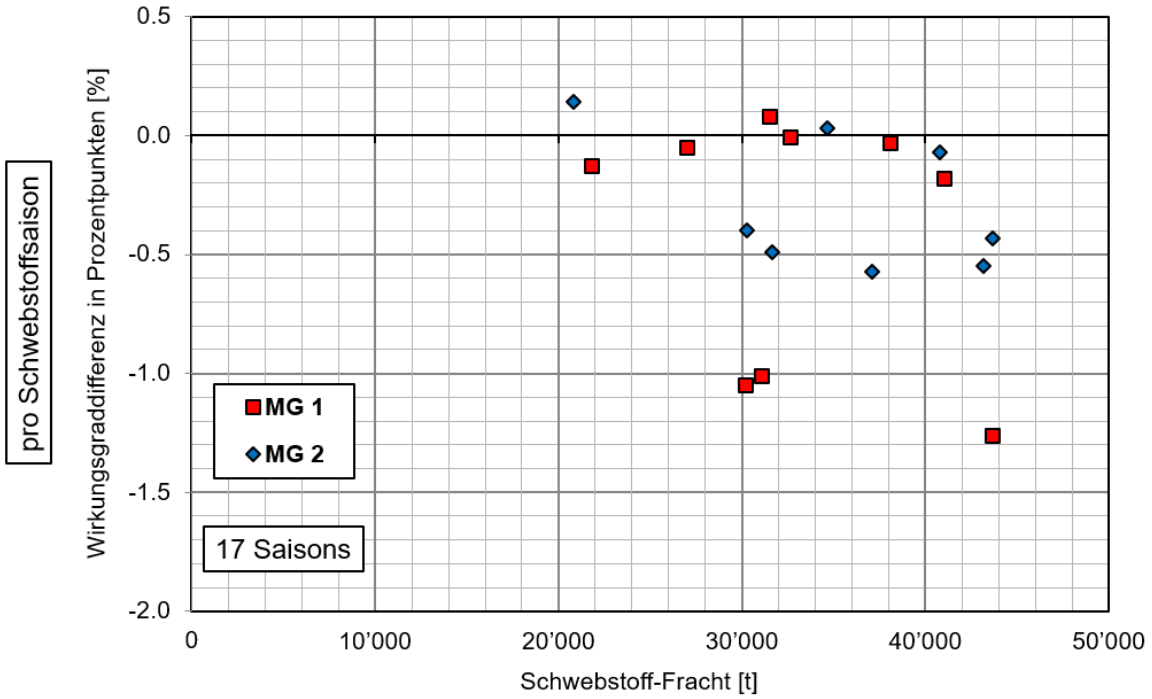


Abbildung 82: Wirkungsgradreduktionen in Funktion der Schwebstoffbelastung jeweils pro Schwebstoffsaison (Auswertung: HSLU).

Es wurde erwartet, dass hohe Schwebstofffrachten ausgeprägte Abrasion verursachen und der Wirkungsgrad dementsprechend stärker abnimmt. Ein solcher Trend ist knapp zu erkennen, allerdings mit einer grossen Streuung. Bei einer Schwebstofffracht von beispielsweise ca. 30'000 t pro Maschine und Schwebstoffsaison resultierte einerseits mehrmals keine Wirkungsgradreduktion (0 %) und andererseits mehrmals eine Wirkungsgradreduktion von 1 %. Das zeigt, dass es im KW Fieschertal nicht möglich ist, mit ausreichend kleiner Unsicherheit von der jährlichen Schwebstofffracht direkt auf die zugehörige Wirkungsgradreduktion zu schliessen, da die Bedingungen in der Realität und über mehrere Jahre gesehen zu variabel sind. Als Hauptgrund wird der unterschiedliche Zustand der Laufradbecher jeweils vor der Schwebstoffsaison gesehen (neuwertig direkt nach grosser Revision, ein- oder mehrmals vor Ort in Stand gestellt, oder ausnahmsweise ohne Revision im Winter).

In Abbildung 83 sind die Wirkungsgraddefizite über die Jahre in Funktion der relativen Mittelschneidenbreite s/B dargestellt. Diese dimensionslose Grösse widerspiegelt den Abnutzungszustand eines Laufrads. Für die fünf Laufräder, die in den Jahren 2012–2020 im KW Fieschertal im Einsatz waren, waren die Wirkungsgradänderungen in Funktion von s/B wie folgt:

- Für das Laufrad 4 liegen keine Informationen über die Mittelschneidenbreite vor, da an diesem Laufrad keine 3d-Vermessungen durchgeführt wurden.
- Beim Laufrad 2 gab es keine oder nur minime Änderungen der Mittelschneidenbreite und es resultierten keine signifikanten Wirkungsgradänderungen.

– Beim Laufrad 5 mit dem neuen hydraulischen Design war bereits von Anfang an eine breitere Mittelschneide als bei den anderen Laufrädern der früheren Generation vorhanden. Beim neuen Laufrad-Design wurde offenbar die Robustheit gegenüber hydro-abrasivem Verschleiss höher gewichtet als der Spitzenwirkungsgrad im Neuzustand. Im Lauf der vier Jahre, während denen dieses Laufrad in der Untersuchungsperiode im Einsatz war, gab es eine geringfügige Mittelschneidenverbreiterung während der Wirkungsgrad leicht abnahm. Die Datengrundlage ist aber noch zu wenig aussagekräftig.

– Für die Laufräder 1 und 3 ist hingegen ein klarer Trend ersichtlich. Es resultierte für diesen Laufradtyp eine Wirkungsgradabnahme, die etwa der doppelten relativen Mittelschneidenverbreiterung entspricht (beide Grössen in % ausgedrückt).

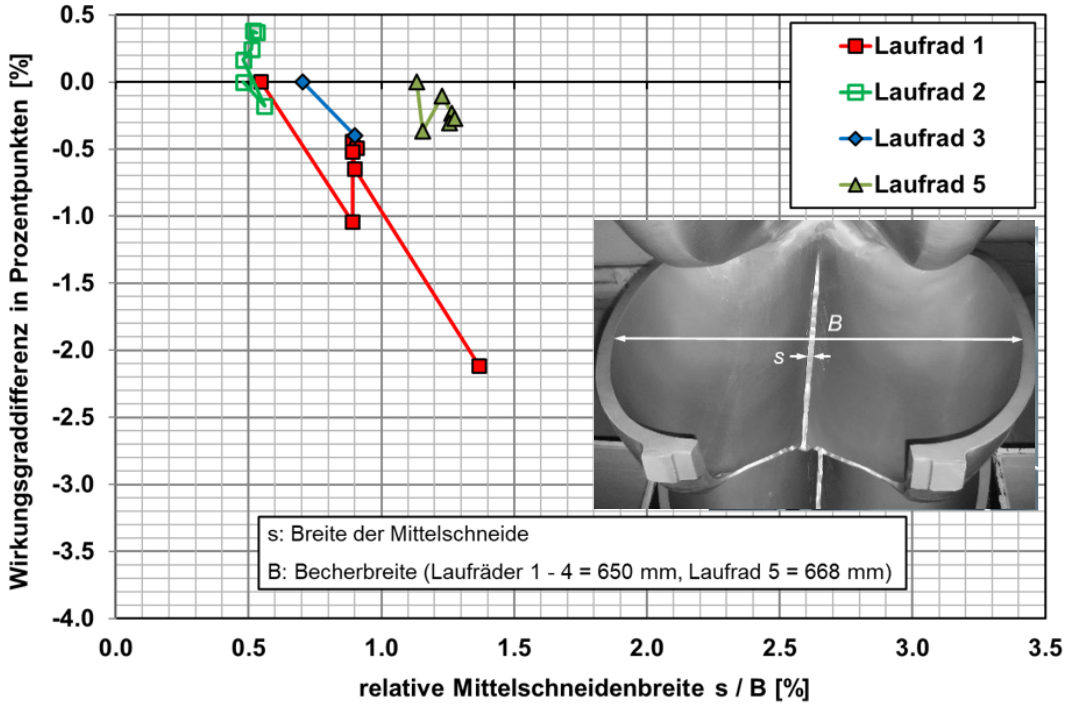


Abbildung 83: Wirkungsgradveränderungen in Funktion der relativen Mittelschneidenbreite für das KW Fieschertal (aufgrund der verfügbaren Daten aus den 3d-Vermessungen 2012–2020; Auswertung: HSLU).

In Abbildung 84 ist der Trend der Laufräder 1 und 3 des KW Fieschertal (violette Linie) zusammen mit Resultaten des KW Dorferbach (unbeschichtete und beschichtete Laufräder, schwarze Linie) und der bisher in der Literatur beschriebenen Grössenordnung («Faustformel» gemäss Brekke *et al.* 2002, Abschnitt 2.3, grüne Linie) aufgeführt. Im KW Dorferbach (innere Becherbreite B = 228 mm) sind die Laufräder bedeutend kleiner und die Becher nur etwa ein Drittel so breit wie im KW Fieschertal (B = 650 mm). Aufgrund der Normierung der Mittelschneidenbreite mit der Becherbreite können die Steigungen der Trendlinien dennoch verglichen werden. Für die Laufräder der älteren Generation im KW Fieschertal war die Wirkungsgradreduktion grösser als im Durchschnitt im KW Dorferbach und etwa doppelt so gross, wie gemäss der «Faustformel» von Brekke zu erwarten war. Es liegen demnach beträchtliche Unterschiede für eine Prognose vor.

Um den Zusammenhang zwischen der relativen Mittelschneidenbreite (und allenfalls weiteren normierten Verschleissgrössen) und der Wirkungsgradreduktion zuverlässiger bestimmen zu können, sind

anlagespezifische Messungen, weitere Untersuchungen an anderen Kraftwerksanlagen und systematische Untersuchungen im Labor mit entsprechender Klassifizierung bzw. Parametrisierung der Einflussgrössen erforderlich.

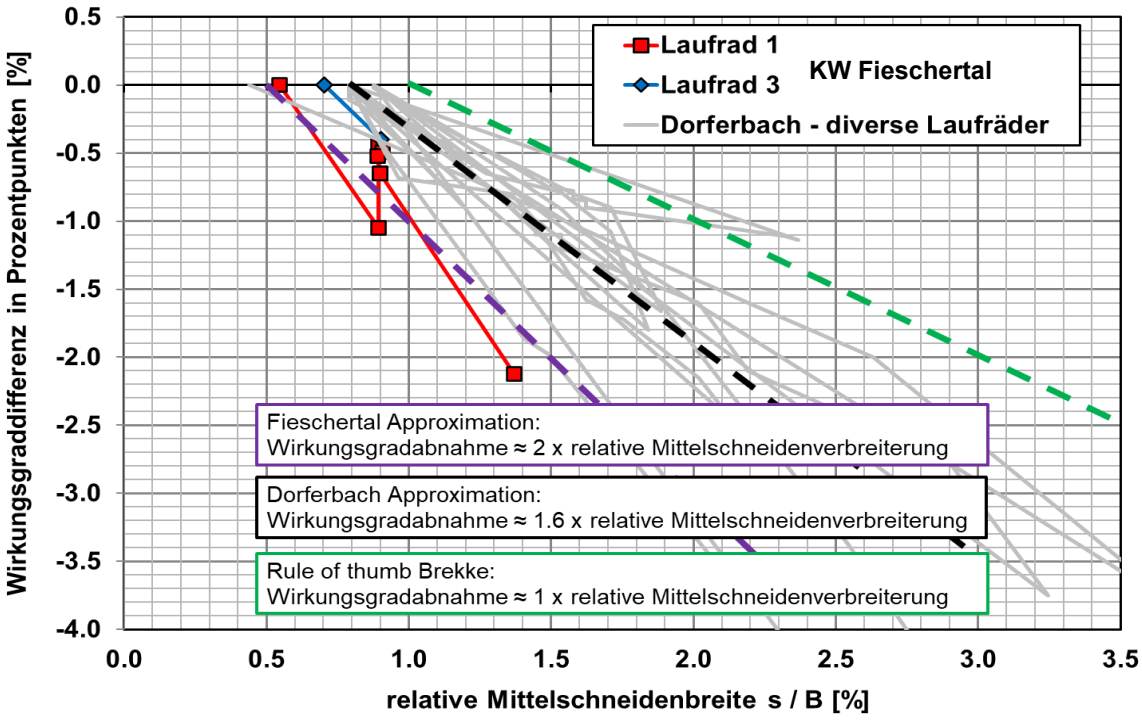


Abbildung 84: Wirkungsgradreduktion in Funktion der Turbinenabrasion des KW Fieschertal (Auswertung: HSLU) im Vergleich zum KW Dorferbach (Maldet 2008 und weitere Daten der TIWAG in Felix 2017) und der von Brekke *et al.* (2002) beschriebenen Grössenordnung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei beschichteten Turbinen mit individueller Revisionsgeschichte keine klare Korrelation zwischen der jährlichen Schwebstoffbelastung und der Wirkungsgradreduktion besteht, wenn in einigen Jahren die Abrasion im Millimeterbereich ins Grundmaterial fortschreitet und in anderen nicht. Hingegen ist zwischen einer Verschleissgrösse wie der relativen Mittelschneidenbreite und der Wirkungsgradreduktion ein klarerer Zusammenhang zu erkennen. Daher wird empfohlen, für die Prognostizierung von verschleissbedingten Wirkungsgradänderungen in folgenden Schritten vorzugehen, wobei vorerst die Mittelschneidenbreite als charakteristische Verschleissgrösse verwendet wird:

1) Ermitteln der Mittelschneidenbreite und des Bauteilzustands (insb. allfällige lokale Schäden an Beschichtung) durch Inspektion/ Vermessung vor der zu untersuchenden Belastungsperiode (im einfachsten Fall «neuwertig», d.h. planmässige Geometrie und vollflächig beschichtet).
2) Abschätzung der Mittelschneidenverbreiterung aufgrund der Partikelbelastung (gemäss angepasstem IEC-Abrasionsmodell) und des Bauteilzustands vor der Belastungsperiode, d.h. ggf. Berücksichtigung der zwei Phasen der Abrasion (Beschichtung und Grundmaterial).
3) Prognose der Mittelschneidenbreite nach der Belastungsperiode (= vorherige Breite plus Verbreiterung) und Normierung mit der inneren Becherbreite.
4) Abschätzung der Wirkungsgradreduktion aufgrund der relativen Mittelschneidenbreiten vor und nach der Belastungsperiode.

5.6 Ausserbetriebnahmen während Schwebstofftransportereignissen

5.6.1 Grundsätzliches

Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, besteht eine Möglichkeit zur Optimierung des Betriebs von Laufwasserkraftanlagen in deren vorübergehender Ausserbetriebnahme in Phasen mit ausserordentlich hohem Sedimentaufkommen. Für die Umsetzung dieser Betriebsoption stellt sich die Frage, wie hoch der Schwellenwert, die so genannte Abschalt-*SSC*, gewählt werden soll. Dies wird im nächsten Abschnitt aufgrund der Daten von 2012–2014 beschrieben.

Die so festgelegte Abschalt-*SSC* wurde seit 2016 angewandt. In den Abschnitten 5.6.3 bis 5.6.6 wird aufgezeigt, wie sich dies in vier grösseren Schwebstofftransport-Ereignissen auf die Sedimentbelastung der Turbinen, die Produktion und die Wirtschaftlichkeit auswirkte.

Zum Schluss des Projekts wurde der Wert der Abschalt-*SSC* aufgrund der längeren Datenbasis der Jahre 2012–2020 aktualisiert und mit zusätzlichen Überlegungen ergänzt (Abschnitt 5.6.8).

5.6.2 Abschätzung der Abschalt-*SSC* aufgrund der Daten 2012–2014

Für die rechnerische Abschätzung der Abschalt-*SSC* wurde ein Vorgehen vorgeschlagen, das auf betriebswirtschaftlichen Überlegungen beruht. Im Folgenden wird dies am Beispiel des KW Fieschertal aufgrund der Daten der ersten drei Projektjahre von 2012 bis 2014 aufgezeigt (Abgottspon *et al.* 2016a):

- Die durch Feinsedimente verursachten Reparatur- und Ersatzinvestitionskosten an beiden Maschinen wurden auf etwa 300 kCHF pro Jahr geschätzt. Dazu kommen Ertragsausfälle wegen Erzeugungsverlusten in der Grössenordnung von 30 kCHF pro Jahr.
- Aufgrund der Daten von 2013 und 2014 wurde die typische jährliche Schwebstofffracht auf ca. 50'000 t geschätzt (die hohe Fracht des Jahres 2012 mit dem grösseren Hochwasser wurde nicht berücksichtigt). Mit der vereinfachenden Annahme, dass die durch Feinsedimente verursachten Kosten proportional zur Schwebstofffracht sind, ergeben sich damit spezifische Kosten pro Tonne Feinsediment von 330 kCHF / 50'000 t ≈ 6.6 CHF/t (0.66 Rp/kg).
- Im Normalfall mit *SSC* = 0.5 g/l resultieren durch Feinsedimente verursachte spezifische Kosten von 0.33 Rp/m^3 Wasser.
- Im KW Fieschertal können mit 1 m^3 Wasser etwa 1.2 kWh Strom erzeugt werden (Arbeitswert ≈ 1.2 kWh/m^3 gemäss Abschnitt 3.1). Im Normalfall betragen also die durch Feinsedimente verursachten Kosten 0.33 Rp/m^3 / 1.2 kWh/m^3 = 0.28 Rp/kWh = 2.8 CHF/MWh.
- Bei einer 20-mal höheren Konzentration sind diese spezifischen Kosten entsprechend höher und erreichen den damals angenommenen Strompreis von 55 CHF/MWh (Abbildung 85).

So wurde die Abschalt-*SSC* vorerst auf 10 g/l geschätzt (spätere Aktualisierung siehe Abschnitt 5.6.8). Die *SSC* von 10 g/l wird im Mittel an lediglich ca. 4 h pro Jahr überschritten (Abbildung 52b). Da in einigen Jahren keine solche Ereignisse vorkommen, kann in Jahren mit grösseren Hochwassern *SSC* > 10 g/l während eines halben bis ganzen Tages pro Jahr vorkommen.

Die Abschalt-*SSC* ist anlagespezifisch, da der Wert von vielen Faktoren abhängt (u.a. Fallhöhe; Typ, Bauart und Grösse der Turbine und deren spezifische Drehzahl; Eigenschaften der Sedimentpartikel, Material und Beschichtung der wasserberührten Turbinenbauteile). Gemäss den wenigen auffindbaren Literaturangaben liegen Abschalt-*SSC* bei andern Wasserkraftanlagen im Bereich von 1.1 g/l bis 10 g/l (Tabelle 3 in Abschnitt 2.4). Die Abschalt-*SSC* im vorliegenden Fall liegt also am oberen Rand des bisher in der Literatur beschriebenen Abschalt-*SSC*.

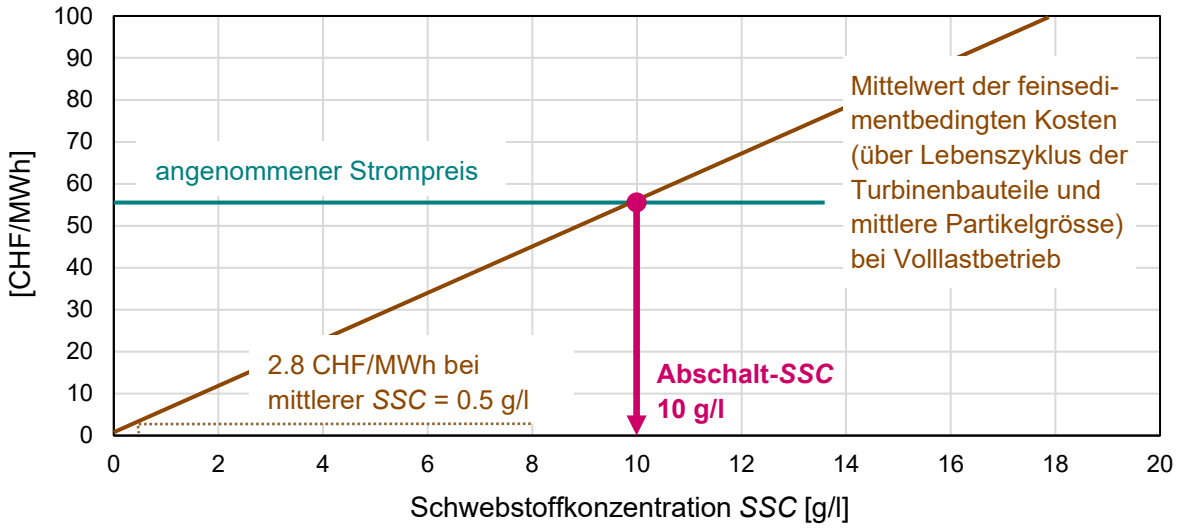


Abbildung 85: Bestimmung des Schwellenwerts der Schwebstoffkonzentration für die vorübergehende Ausserbetriebnahme zur Vermeidung von übermässigem Turbinenverschleiss aus betriebswirtschaftlichen Überlegungen (Abschalt-*SSC*) für das KW Fieschertal aufgrund der Daten der Jahre 2012–2014 (Datengrundlage für Revisionskosten: gkw; Auswertung VAW und HSLU).

Beim KW Fieschertal ist also seit 2016 vorgesehen, dass die Fassung ausgeleitet (geschlossen) und der Turbinenbetrieb anschliessend vorübergehend eingestellt wird, wenn die *SSC* im Triebwasser aus äusseren Gründen 10 g/l während mehr als 15 Minuten überschreitet. In früheren Jahrzehnten wurde die Anlage bei Unwettern auch schon ausser Betrieb genommen, aber aufgrund situativer Entscheide ohne Echtzeit-Messung der Schwebstoffbelastung. Es wurde nun formuliert, dass der diensthabende Mitarbeiter (Pikett) befugt ist, selbständig das Schliessen der Fassung auszulösen und anschliessend die Turbinen ausser Betrieb zu nehmen, wenn die oben genannte Abschalt-Bedingung erfüllt ist. Die vorübergehende Abschaltung soll wenn möglich mit der *Dispatching*-Abteilung des stromabnehmenden Energieversorgungsunternehmens abgesprochen werden.

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.

Falls die *SSC* in der Druckleitung 10 g/l aus betrieblichen Gründen überschreitet, also wegen einem Resuspensions-Ereignis im Speicherstollen, ist die Anlage nicht abzuschalten, da diese *SSC*-Spitzen zwar zum Teil sehr hoch (mehrere 10 g/l), aber in der Regel kurz sind (oft 5 bis 15 Minuten, seltener bis 1 h). Der Weitertransport und das Turbinieren von Feinsedimenten, die sich in der zweiten Hälfte des Speicherstollens ablagerten, lässt sich über Monate und Jahre auch nicht vermeiden, da das Nutzvolumen und die betriebliche Flexibilität erhalten und nicht durch anwachsende Sedimentablagerungen reduziert werden sollen.

In den Jahren 2012–2020 traten vier grössere Sedimenttransport-Ereignisse auf, die in den folgenden vier Abschnitten beschrieben werden. Gründe für diese Ereignisse waren einerseits Regen (in warmem oder kaltem Wetter oder nach Gewitter) und andererseits vermutlich ein Prozess im Gletscher. Beim ersten Ereignis, das das grösste Hochwasser im Untersuchungszeitraum war, wurden die Turbinen durchgehend betrieben. Bei den weiteren drei Ereignissen, wurden die Turbinen hingegen vorübergehend ausser Betrieb genommen und bei zwei Ereignissen wurde auch die Wasserfassung geschlossen. Bei jedem Ereignis wird auch aufgezeigt und besprochen, was die Konsequenzen gewesen wären, wenn bezüglich Weiterbetrieb bzw. Ausserbetriebnahmen der Turbinen und der Wasserfassung anders entschieden worden wäre, um im Nachhinein die Wirtschaftlichkeit zu verbessern (Szenarien).

Im Abschnitt 5.6.7 werden die Kennzahlen der vier Ereignisse zusammengefasst und Bilanz gezogen.

5.6.3 Hochwasser vom 02.–03.07.2012 mit durchgehendem Kraftwerksbetrieb

Vom Montag, 2. bis Dienstag, 3. Juli 2012 führte das Wysswasser als Folge eines ergiebigen Starkregens ausgeprägtes Hochwasser (Felix 2017). Eine starke, langanhaltende Südströmung («Genua-Tief») führte feuchte Luft gegen den Alpensüdhang, wodurch es in den südlichen Walliser Alpen bis zur Grimsel- und Gotthardregion zu ergiebigen Niederschlägen kam.

Von der Niederschlagsmessstation (MeteoSchweiz) im Dorf Fieschertal (1095 m ü. M.) sind seit 1990 tägliche Summen verfügbar, ab 09.02.2016 auch Zehnminutensummen. Bezüglich dem in diesem Abschnitt beschriebenen Hochwasserereignis wurden in den 3 · 24 h vom 30.06. bis 03.07. (jeweils um 06:40 Uhr) 19 mm, 49 mm und 51 mm = 119 mm Niederschlag aufgezeichnet (hervorgehoben in Abbildung 86). Dies entspricht 11 % der mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 1052 mm im hier untersuchten Zeitraum 2012–2020. Ein Niederschlag von 119 mm in 3 Tagen tritt in der Region häufiger als alle 10 Jahre auf (MeteoSchweiz 2020b, Extremwertstatistik der Station Binn). Speziell an diesem Ereignis war jedoch, dass die Schneefallgrenze auf 3500 m ü. M. stieg, so dass der Grossteil des Niederschlags direkt abflusswirksam war und zusätzlich Schmelzwasser anfiel.

Der Abfluss im Wysswasser während des Ereignisses 2012 ist nicht genau bekannt, da erst im Jahr 2013 Pegelsonden am Steg über der Wasserfassung installiert wurden, um den natürlichen Zufluss zu messen. Aufgrund von Beobachtungen des Abflusses im Dorf Fieschertal und von Sandablagerungen auf dem Widerlager der Wasserfassung wurde der Spitzenabfluss grob auf 70–90 m^3/s geschätzt.

Im Oberlauf der Rhone (Rotten) trat bei Reckingen (Obergoms, ca. 9 km nordöstlich von Fieschertal) eine 30-jährliche Abflussspitze auf; stromabwärts in Brig (ca. 17 km südwestlich von Fieschertal) eine 10-jährliche Abflussspitze (BAFU 2012). Im Oberwallis wurden an diesen beiden sowie an drei weiteren Abflussmessstationen neue Höchstwerte für den Abfluss im Monat Juli registriert. Die Wiederkehrperiode des Hochwassers am Wysswasser wird auf ca. 20 Jahre geschätzt. Bei Grengiols (ca. 7 km südwestlich von Fieschertal) überschwemmte der Milibach wegen hohem Sedimentaufkommen die Strasse (BAFU 2020).

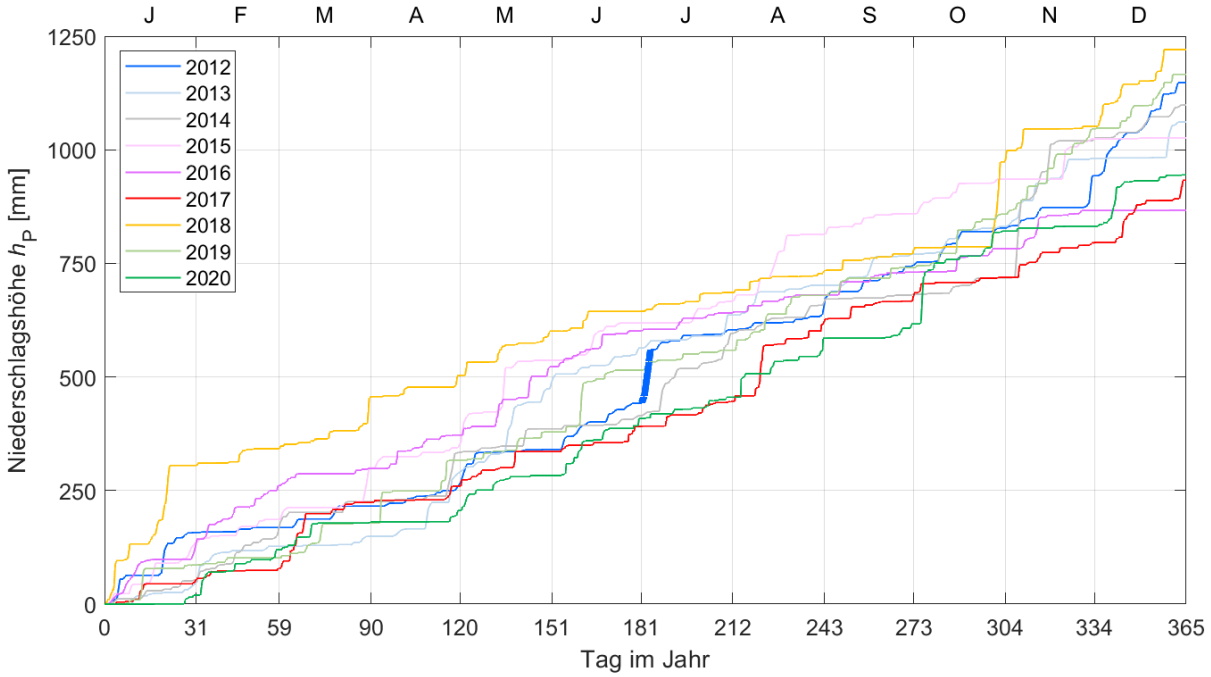


Abbildung 86: Niederschlagshöhen h_P der Messstation Fieschertal für die Jahre 2012–2020, jeweils kumuliert seit Jahresbeginn, die dicke blaue Linie markiert den Niederschlag, der zum Hochwasser 2012 führte (Daten: MeteoSchweiz).

Abbildung 88a zeigt, dass beim KW Fieschertal der Zufluss vom Entsander in den Speicherstollen am Morgen des 02.07. über den Ausbauabfluss zunahm. Vermutlich nahm dann der natürliche Zufluss weiter zu, aber der Zufluss in die Kraftwerksanlage wurde durch teilweises Schliessen der Fassung etwa auf den Ausbauabfluss beschränkt. Im Lauf des Hochwassers, insbesondere in der Nacht auf den 03.07. wurde viel Sediment in die Anlage eingetragen, weshalb der Entsander wiederholt gespült wurde, was zur Variation in Q_1 (schwarze Linie in Abbildung 88a) führte. Die Kraftwerksanlage wurde während des ganzen Hochwassers durchgehend mit Ausbauabfluss betrieben (blaue Linie).

Die *SSC* am Einlauf in die Druckleitung (in der Schieberkammer) überstieg 1 g/l am frühen Morgen des 02.07. und 10 g/l um 15:10 Uhr (Abbildung 88b). Dann stieg die *SSC* um etwa 20 Uhr weiter auf fast 50 g/l. Eine solche Konzentration ist als hoch einzustufen, auch im Vergleich zu *SSC* an Wasserkraftanlagen im Himalaya und in den Anden, die stark von hydro-abrasivem Verschleiss betroffen sind (Sidhu 1999 und Winkler *et al.* 2011b berichteten von *SSC* bis 70 g/l). Weniger als 1 Tag nach dem Beginn des Ereignisses nahm die *SSC* unter 5 g/l ab. Abbildung 87 zeigt Wasserproben mit entsprechenden Trübungen vor, während und nach dem Hochwasserereignis. *SSC* bis ca. 15 g/l konnten mit der akustischen Methode gemessen werden. Da im Jahr 2012 noch kein CFDM im KW Fieschertal installiert war, wurden höhere *SSC* aufgrund der im Maschinenhaus oberwasserseitig der Turbinen gemessenen Drücke und weiterer Leitsystemdaten berechnet (Abschnitt 4.1.8).

Über die *SSC* im Zufluss (Wysswasser) und am Ende des Entsanders liegen für das Ereignis 2012 keine Daten vor, da die entsprechenden Messgeräte erst in den Jahren 2013/2014 installiert wurden.

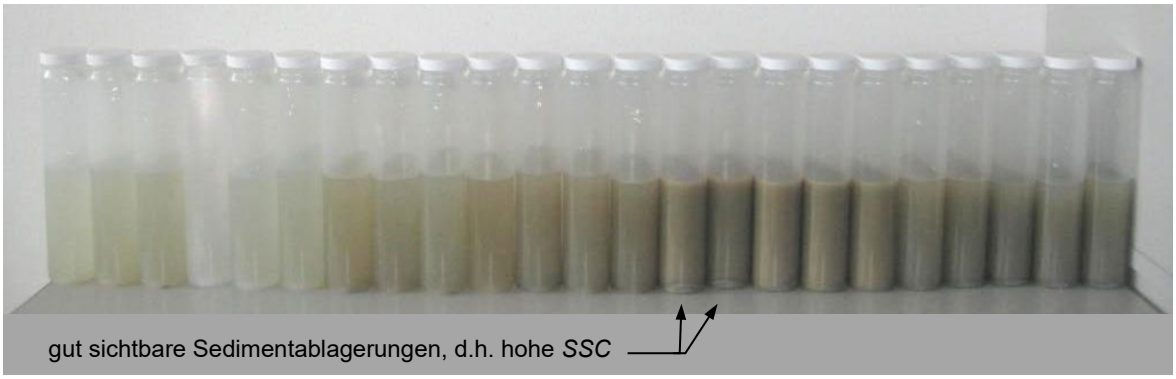


Abbildung 87: Wasserproben des turbinierten Wassers des KW Fieschertal vor, während und nach dem Hochwasser vom 02.–03.07.2012 mit einer Wiederkehrperiode von ca. 20 Jahren (Foto: VAW).

Der Speicherstollen war zu Beginn des Ereignisses, wie im Sommerbetrieb üblich, bis auf den nominalen Pegelstand gefüllt (Abbildung 88c). In den Nachtstunden, als die *SSC* am höchsten war und vermutlich auch der Spitzenabfluss auftrat, floss etwas Wasser aus dem Speicherstollen über den dafür vorgesehenen Überlauf (Spülfenster) ins Wysswasser zurück. Bei abklingendem Hochwasser sank der Pegel im Speicherstollen leicht, bis vermutlich die Einlaufschütze an der Fassung wieder mehr geöffnet wurde.

Der Variation der *SSC* entsprechend, nahm die turbinierte Sedimentfracht *SSL* um ca. 20 Uhr am stärksten zu (Abbildung 88d, kumuliert seit Beginn des Ereignisses). Während des Hochwassers wurden innerhalb 39 h ca. 17'000 t Schwebstoffe turbiniert, was 16 % der Jahresfracht von 2012 (107'000 t) oder 23 % der durchschnittlichen Jahresfracht von 75'000 t (gemittelt über die betrachteten neun Jahre, vgl. Abschnitt 5.1.5) entspricht.

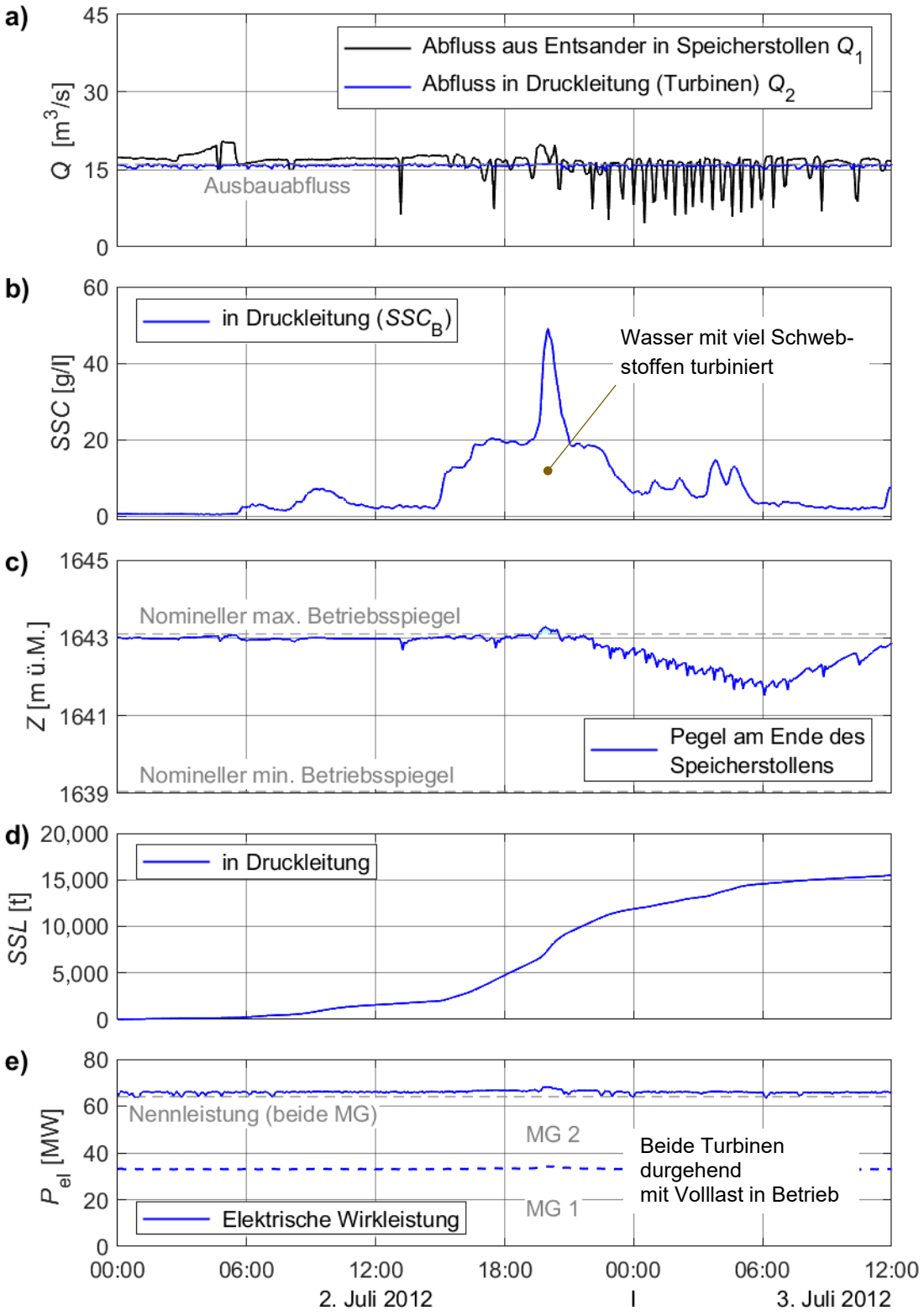


Abbildung 88: Ganglinien während des Hochwassers vom 2.–3. Juli 2012 beim KW Fieschertal: a) Abfluss vom Entsander in den Speicherstollen Q_1 und in der Druckleitung Q_2; b) *SSC* am Beginn der Druckleitung (nach Felix *et al.* 2016c); c) Pegel am Ende des Speicherstollens; d) *SSL* in der Druckleitung; e) elektrische Wirkleistung beider MG (Betriebsdaten: gkw; Auswertung: VAW).

Die Kraftwerksanlage wurde während des ganzen Hochwassers durchgehend mit Volllast betrieben (beide MG, Abbildung 88e). Die leichte Zunahme der Leistung in der Phase der stark erhöhten *SSC* (> 20 g/l) bei konstantem Abfluss ist auf die erhöhte Dichte des Arbeitsmediums der Turbinen zurückzuführen. Diese leichte Mehrproduktion bringt aber hohe feinsedimentbedingte Kosten mit sich und ist daher aus wirtschaftlicher Sicht nicht empfehlenswert.

Aufgrund der hohen *SSC* und des durchgehenden Betriebs während des Hochwassers wurde das Laufrad einer Turbine, das seit seiner grossen Revision bereits drei Jahre im Einsatz war, lokal so stark erodiert, dass es im Sommer ausgewechselt werden musste. Dies führte zu einem Betriebsunterbruch von 17 h und zu einem Erzeugungsausfall von gut 500 MWh, was ca. 0.3 % der Jahresproduktion entspricht. Mit einem angenommenen Stromgrosshandelspreis von 50 CHF/MWh entspricht dies einer Ertragseinbusse von ca. 30 kCHF. Das Laufrad der anderen Turbine, das im Jahr 2012 nach einer grossen Revision eingesetzt worden war, konnte bis im Winter weiterbetrieben werden und wurde dann vor Ort ohne Erzeugungsausfall revidiert.

In Abbildung 89 ist dargestellt, wie das Szenario im Fall des Hochwassers vom Juli 2012 ausgesehen hätte, wen die in Abschnitt 5.6.2 beschriebenen Regeln, die im Nachgang zum Ereignis formuliert wurden, bereits angewendet worden wären.

Während der Ausserbetriebnahme von 16 h wären 13'000 t Feinsedimente weniger durch die Turbinen geleitet worden, das entspricht 12 % der turbinierten Jahresfracht von 2012 oder etwa 17 % der turbinierten mittleren Jahresfracht (2012–2020). Wenn die Fassung während des Hochwassers ausgeleitet worden wäre, wären zudem deutlich weniger Feinsedimente in das System eingetragen worden. Dadurch wäre auch die Schwebstoffbelastung in den Wochen nach dem Ereignis geringer ausgefallen, da die während des Hochwassers im Speicherstollen abgelagerten Feinsedimente anschliessend infolge Resuspension turbiniert wurden (Abgottspon *et al.* 2016a). Der Sedimenteintrag in die Anlage durch das Hochwasser 2012 lässt sich nicht genauer bestimmen, da damals noch keine Schwebstoffmessgeräte im Fassungsbereich installiert waren. Der durch das Ereignis verursachte Sedimenteintrag war mindestens so hoch wie die turbinierte *SSL* während des Hochwassers (17'000 t) und während des ersten Resuspensions-Ereignisses (4000 t) zwei Tage nach dem Hochwasser. Es wird geschätzt, dass der Sedimenteintrag ins System mit einer Ausserbetriebnahme um ca. 13'000 t / 21'000 t ≈ 60 % reduziert worden wäre.

Die Ertragseinbussen infolge des vorübergehenden Einstellens des Kraftwerksbetriebes während des Hochwassers vom Juli 2012 und die dadurch vermiedenen Kosten wurden vereinfacht abgeschätzt (Tabelle 15). In Summe wäre eine vorübergehende Ausserbetriebnahme bei diesem Ereignis deutlich wirtschaftlich gewesen. Die Daten für eine solche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung standen aber im Sommer 2012 (quasi zu Beginn des Forschungsprojekts) noch nicht zur Verfügung.

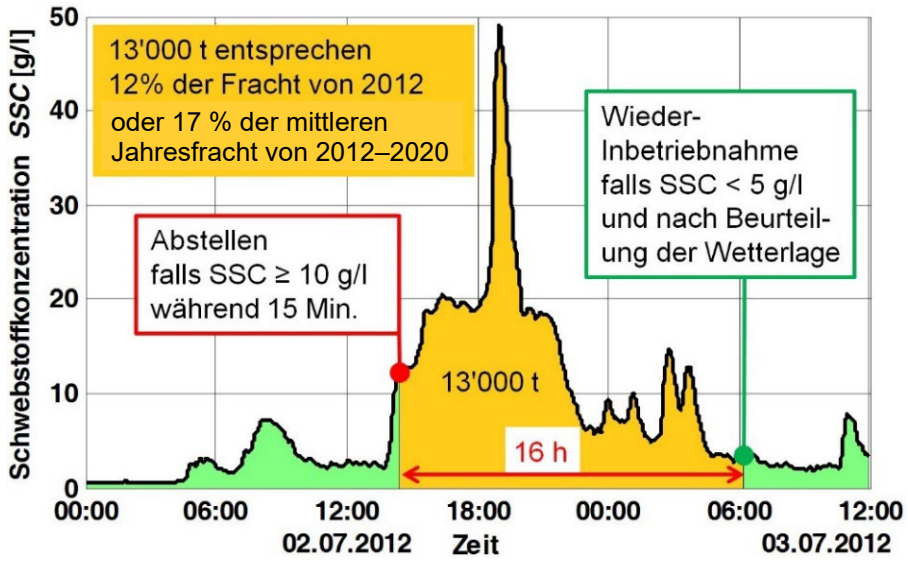


Abbildung 89: Ganglinie der Schwebstoffkonzentration *SSC* in der Druckleitung des KW Fieschertal während des Hochwassers Anfang Juli 2012, mit Szenario für das vorübergehende Einstellen des Turbinierens mit Abschalt-*SSC* = 10 g/l ermittelt aufgrund der ersten drei Untersuchungsjahre (modifiziert nach Abgottspon *et al.* 2016a, Felix 2017).

Tabelle 15: Wirtschaftliches Potential einer vorübergehenden Ausserbetriebnahme des KW Fieschertal am Beispiel des Hochwasserereignisses vom Juli 2012 mit einer Wiederkehrperiode von etwa 20 Jahren (Abgottspon *et al.* 2016a, Felix 2017).

Erzeugungsverlust während ca. 16 h Stillstand in Volllastzeit (64 MW, Annahme ca. 50 CHF/MWh)	− 60 kCHF
vermiedene Reparaturkosten für beide MG (grobe Schätzung, speziell für dieses Ereignis)	+ 200 kCHF
vermiedener Produktionsausfall infolge weniger reduziertem Wirkungsgrad (Schätzung)	+ 30 kCHF
vermiedener Erzeugungsverlust für Laufradwechsel während Volllastzeit (1 MG, 17 h)	+ 30 kCHF
Strafgebühr / Pönale für starke Abweichung der Produktion vom angemeldeten Sollwert	evtl.
Total (ohne allfällige Pönale)	**+ 200 kCHF**

5.6.4 Hochwasser vom 29.–30.07.2017 mit Kraftwerks-Ausserbetriebnahme

Vom Samstag, 29. auf Sonntag, 30.07.2017 trat am Wysswasser ein Hochwasserereignis als Folge eines abendlichen Sommergewitters auf (Felix *et al.* 2021). MeteoSchweiz (2017) berichtete von starken lokalen Gewittern an jenem Abend (insbesondere mit Murgängen im Unterengadin) sowie von hochsommerlichen Temperaturen und Gewittern seit gut einer Woche vor dem Ereignis. Kamerabilder von der Wasserfassung (Abbildung 90) geben einen Eindruck über den Regen, den erhöhten Abfluss und die starke Wassertrübung bei diesem Ereignis.

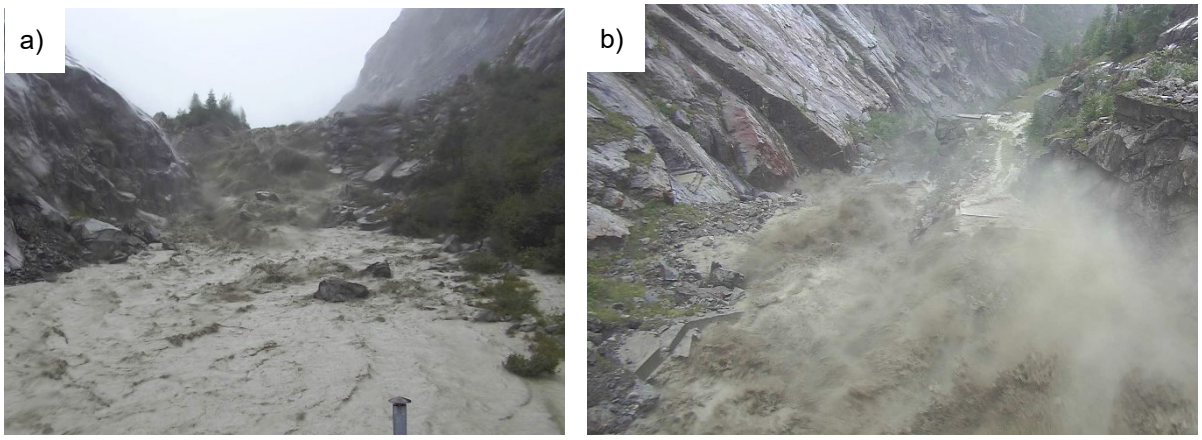


Abbildung 90: Blick a) flussaufwärts und b) flussabwärts der Wasserfassung des KW Fieschertal während des Hochwassers vom 29. Juli 2017 (19:43 und 19:50 Uhr, Fotos: gkw).

Bei der Messstation im Dorf Fieschertal wurde überraschenderweise praktisch kein Niederschlag registriert (Abbildung 91a). Gemäss Beobachtungen der gkw-Mitarbeiter fiel in Bellwald (wenig östlich des Dorfs Fieschertal) ebenfalls praktisch kein Regen, während westlich des Fieschergletschers, in seinem vorderen Bereich, intensiver Regen zu einem lokalen Schaden an einer Wasserleitung führte. Nach dem Ereignis waren auf dem Gletscher Abflussspuren sichtbar. Während des Ereignisses floss also auch ein beträchtlicher Anteil auf der Gletscheroberfläche ab. Es handelte sich also um einen lokalen Starkregen.

Der Abfluss im Wysswasser erreichte gegen 20 Uhr etwa 38 m^3/s, was lediglich etwa dem doppelten Ausbauabfluss der Fassung entspricht (Abbildung 91b). Dieser Spitzenabfluss war deutlich kleiner als jener im Jahr 2012, welcher auf 70 - 90 m^3/s geschätzt wurde. Auch das Abflussvolumen des Ereignisses 2017 war deutlich kleiner als jenes von 2012. Wie für Hochwasser nach Gewittern üblich, nahm der Abfluss rasch ab und unterschritt am Morgen des Folgetags wieder den Ausbauabfluss der Wasserfassung. Am 29.–30.07.2017 wurde an der Rhone in Brig (ca. 20 km südöstlich von Fieschertal, inklusive des Abflusses aus dem Wysswasser) kein ausserordentlich hoher Abfluss gemessen (< 100 m^3/s, entspricht weniger als einem einjährlichen Hochwasser). Es handelte sich also um einen sehr lokalen Niederschlag.

Bei MeteoSchweiz können Warnungen vor Sturm, Niederschlag, Gewitter und weitere Wetterphänomene für ein bestimmtes Gebiet (Postzeitzahl) kostenlos abonniert werden. Während solche Warnungen für gewisse meteorologischen Gefahren recht zuverlässig sind, ist die Vorhersage vor lokalen Gewittern äusserst schwierig. In diesem Ereignis wurde keine Gewitterwarnung ausgegeben. Daher sind eigene Messungen des Zuflusses und der *SSC* für den Betrieb einer Kraftwerksanlage wichtig.

Die *SSC* stieg um ca. 18:30 Uhr im Fassungsbereich markant an, also bereits bevor der Abfluss zunahm (Abbildung 92a). Nach gut einer Stunde (19:40 Uhr) erreichte sehr stark schwebstoffhaltiges Wasser die Schieberkammer am Ende des Speicherstollens (Abbildung 92b).

Die *SSC* in Abbildung 92a, die während der Hauptphase des Hochwassers an der Fassung und im Entsander basierend auf Trübungsmessdaten bestimmt wurden, sind im Vergleich zu den gravimetrisch bestimmten *SSC* (Flaschenproben) und zu den in der Schieberkammer gemessenen *SSC* (Abbildung 92b) zu tief. Mit den Trübungssonden an der Wasserfassung und im Entsander (Tab. 1) können *SSC* bis ca. 10 g/l gemessen werden. Steigt die *SSC* weiter an, nimmt deren Signal wegen Überschreitung der oberen Messbereichsgrenze nicht mehr zu bzw. nimmt ab (wegen Mehrfachstreuung, Voichick *et al.* 2018). Die *SSC* basierend auf Trübung sind dann ungültig (gepunktete schwarze Linie und gestrichelte graue Linie in Abbildung 92a). Bei *SSC* über ca. 10 g/l lieferten ausschliesslich die Messmethoden basierend auf Dichte (CFDM) bzw. Druck (*SSC* berechnet aus Leitsystemdaten) gültige *SSC*-Werte.

Die *SSC*-Spitzenwerte von ca. 110 g/l (im Entsander und in der Schieberkammer) waren mehr als doppelt so hoch wie im Hochwasser 2012 (ca. 50 g/l). Abbildung 93 zeigt, wie trüb das Wasser war und dass so viel Sedimentpartikel vorhanden waren, dass sich auf dem Boden der Probeflaschen mehrere Millimeter hohe Ablagerungen bildeten. Die *SSC*-Ganglinie am Ende des Entsanders wurde im Zeitbereich der ungültigen Trübungsmesswerte aufgrund der vorhandenen gravimetrischen *SSC* geschätzt. Für die Berechnung der *SSL* im Wysswasser wurde im Zeitbereich der ungültigen Trübungsmesswerte mangels anderer Daten angenommen, dass die *SSC* im Wysswasser näherungsweise derjenigen am Ende des Entsanders entspreche.

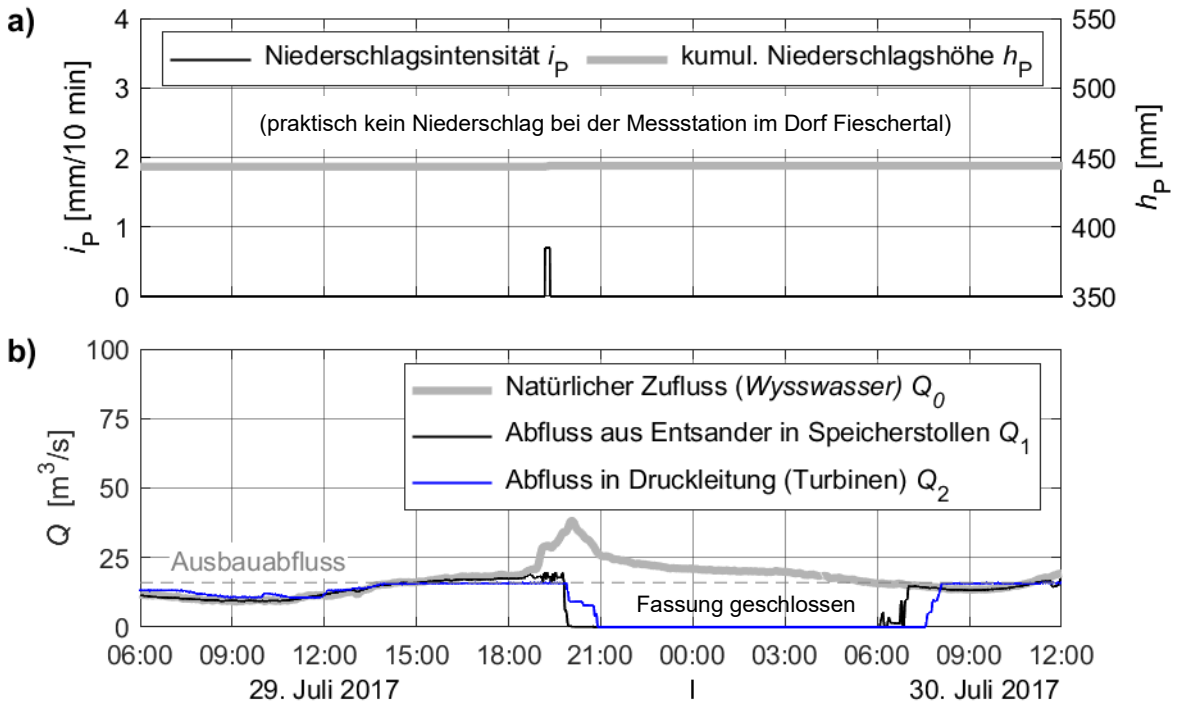


Abbildung 91: Ganglinien während des Hochwassers 29.–30. Juli 2017 beim KW Fieschertal: a) Niederschlagsintensität i_P und kumulierte Niederschlagshöhe seit Jahresbeginn h_P (Daten: MeteoSchweiz); b) Zufluss zur Wasserfassung Q_0, Abfluss vom Entsander in den Speicherstollen Q_1 und Abfluss in der Druckleitung Q_2 (Betriebsdaten: gkw).

Im Gegensatz zum Hochwasser 2012 wurde beim Hochwasser 2017 der Kraftwerksbetrieb – wie seit 2016 geplant – vorübergehend eingestellt. Die Wasserfassung wurde gegen 20 Uhr geschlossen, nachdem der Pikettmitarbeiter via Kamera die Situation an der Fassung gesehen hatte (Abbildung 90). Da unklar war, wie sich das Ereignis entwickeln wird, wurden beide Turbinen vorerst während gut einer Stunde mit halber Leistung betrieben. Dabei wurde Wasser mit sehr hohen *SSC* (50 bis 110 g/l) turbiniert (rote Fläche in Abbildung 92b).

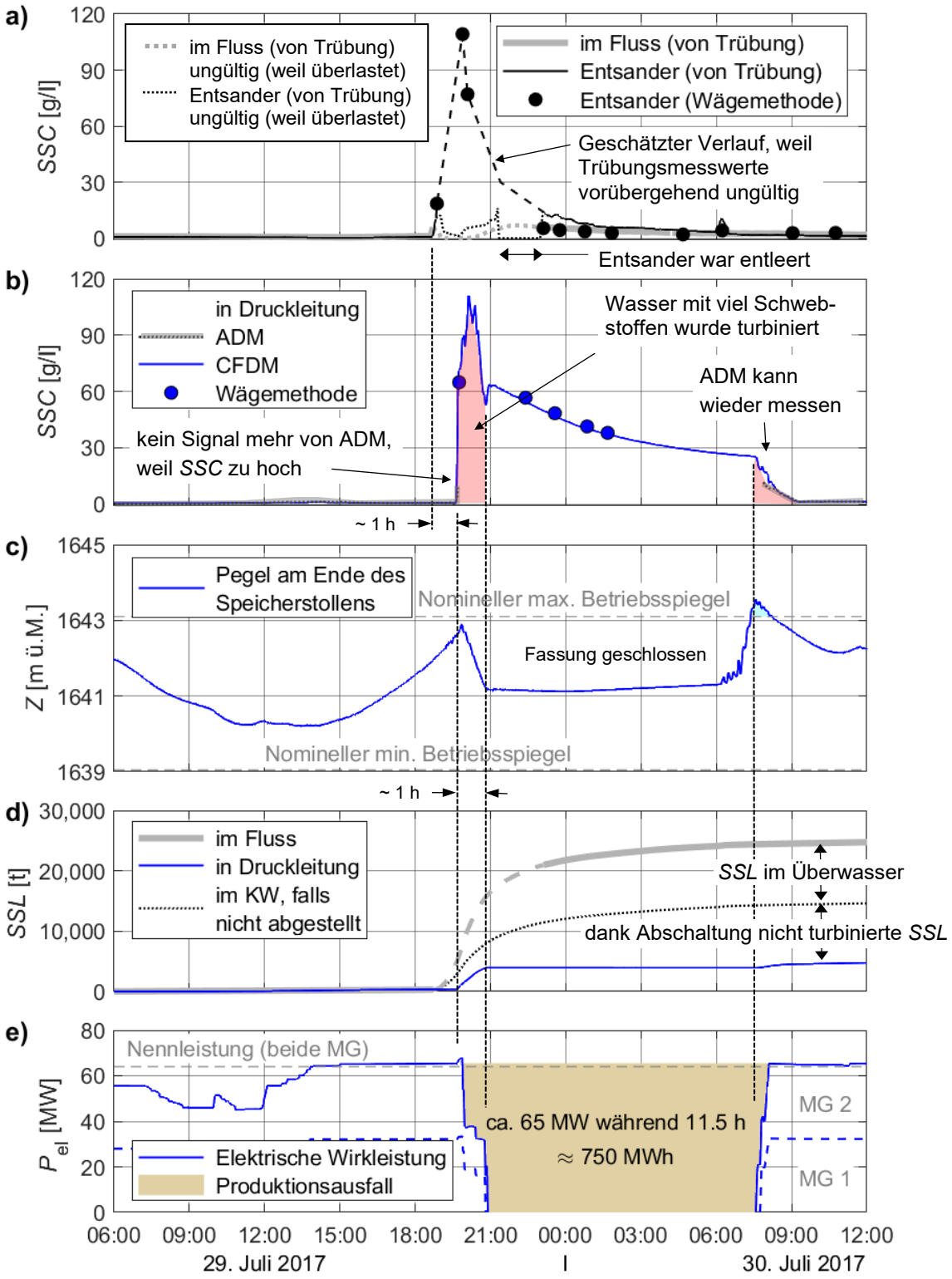


Abbildung 92: Ganglinien während des Hochwasserers 29.–30. Juli 2017 beim KW Fieschertal (Fortsetzung): a) *SSC* im Zufluss zur Wasserfassung und am Ende des Entsanders; b) *SSC* am Beginn der Druckleitung in der Schieberkammer; c) Pegel am Ende des Speicherstollens; d) *SSL* im Zufluss und in der Druckleitung; e) elektrische Wirkleistung beider MG (Betriebsdaten: gkw, Auswertung: VAW).

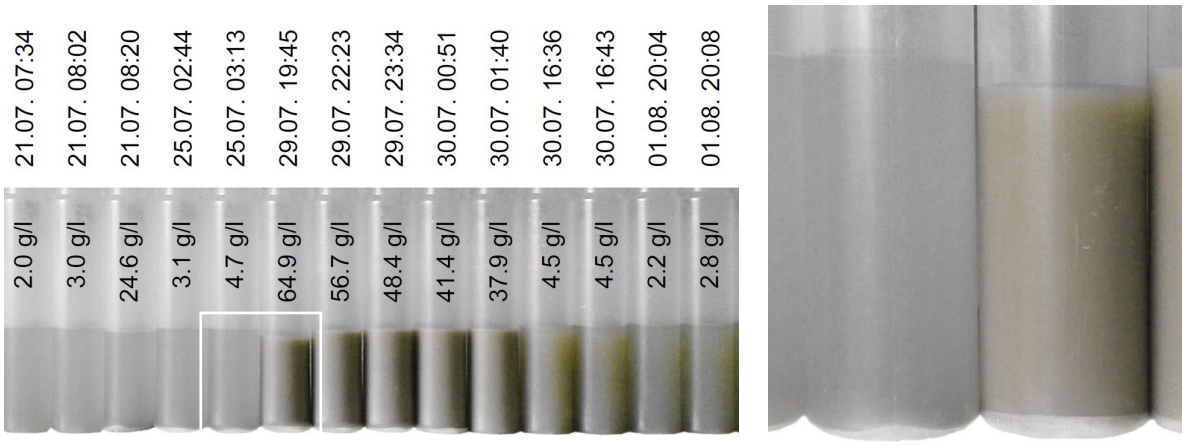


Abbildung 93: Wasserproben des turbinierten Wassers des KW Fieschertal a) vor, während und nach dem Hochwasserereignis vom 29.-30. Juli 2017, b) Detail von je einer Probe vor und während des Hochwassers mit Sedimentablagerungen (Fotos: VAW).

Gegen 21 Uhr wurden beide Turbinen ausser Betrieb genommen (Abbildung 92e). Der Kraftwerksbetreiber informierte das stromabnehmende Energieversorgungsunternehmen über das laufende Hochwasser und schätzte, dass die Anlage am nächsten Morgen wieder in Betrieb genommen werden kann, was so vereinbart wurde. Die angemeldete Produktion wird in der Regel konservativ geschätzt, da eine gewisse Unsicherheit unvermeidbar ist und das stromabnehmende Energieversorgungsunternehmen bevorzugt, wenn die effektive Produktion die angemeldete übertrifft.

Über Nacht blieb der Speicherstollen halb gefüllt (Abbildung 92c) und die *SSC* im stehenden Wasser (gemessen am Druckleitungseinlauf am Ende des Stollens) nahm nur langsam von ca. 60 auf 25 g/l ab. Die *SSC* im Fluss nahm hingegen schon vor Mitternacht auf unter 10 g/l ab. Um die Turbinenabrasion zu reduzieren, wäre sinnvoll, das stark sedimenthaltige Wasser aus dem Speicherstollen ins Wasswasser weiterzuleiten. Dies ist aber nicht kurzfristig durchführbar, da Stollenspülungen mindestens einige Tage im Voraus der kantonalen Fachstelle und den Unterliegerkraftwerken zu melden sind. Daher erscheint wichtig, die Fassung bei einem Ereignis mit hohen *SSC* möglichst früh zu schliessen. Dies bedingt entsprechende Instrumentierung und Alarme an der Fassung - oder weiter stromaufwärts, falls von den Naturgefahren und der Infrastruktur her möglich.

Ab 6 Uhr am folgenden Morgen wurde wieder Wasser von der Fassung in den Speicherstollen geleitet (Anstieg der blauen Q_1-Linie in Abbildung 91b), wodurch der Speicherstollen gefüllt wurde, bis er leicht am Stollenfenster überlief (hellblaue Füllfläche in Abbildung 92c).

Da der Strompreis in der Frühe jenes Sommer-Sonntagmorgens relativ tief war, wurden die Turbinen erst gegen 8 Uhr wieder voll in Betrieb gesetzt, als die *SSC* im Fluss auf wenige g/l abgeklungen war und zusätzliche Mitarbeiter verfügbar waren, um auch die Kühlwasser-Entsandungsanlagen der beiden MG wieder in Gang zu bringen. Die *SSC* im Triebwasser betrug bei der Wiederinbetriebnahme der ersten Maschinengruppe ca. 25 g/l und sank bis 9 Uhr auf wenige g/l ab.

Während des Hochwassers wurden rund 25'000 t Feinsediment zur Fassung transportiert (graue Linie in Abbildung 92d). Davon wurden etwa 10'400 t mit dem Überwasser (Anteil des Abflusses, der den Ausbauabfluss überschreitet) über das Wehr transportiert. Ohne Ausserbetriebnahme der Anlage wären daher etwa 25'000 t − 10'400 t = 14'600 t ins Kraftwerkssystem gelangt.

Vom Beginn des Ereignisses bis zur Schliessung der Fassung gelangten schätzungsweise 4'500 t Feinsediment in die Anlage (erster Anstieg der schwarzen, gepunkteten Linie in Abbildung 92d); von der Wiederinbetriebnahme bis zum Ende des Ereignisses weitere 400 t. Somit wurden während des

Ereignisses 4'500 + 400 t = 4'900 t in die Anlage eingetragen. Durch die Schliessung der Wasserfassung konnte also ein Eintrag von 14'600 – 4'900 t = 9'700 t Feinsediment in die Anlage verhindert werden (Abbildung 91d), was 66 % des potenziellen Eintrags (14'600 t) entspricht.

In der Druckleitung wurden vom Beginn des Ereignisses bis zur Ausserbetriebnahme der Anlage sowie von deren Wiederinbetriebnahme bis zum Ende des Ereignisses 3'900 + 800 t = 4'700 t Feinsediment transportiert (blaue Linie in Abbildung 92d). Die Differenz vom ca. 200 t zum Sedimenteintrag (4'900 t) lagerte sich vermutlich während des Ereignisses im Speicherstollen ab und wurde in den darauffolgenden Wochen turbiniert.

Der Produktionsausfall der beiden MG während der knapp 12 Stunden betrug ca. 750 MWh (braune Fläche in Abbildung 92e), was etwa 0.5 % der Jahresproduktion entspricht. Der Stromgrosshandelspreis war in jener Wochenend-Nacht im Sommer ausgesprochen tief (ca. 5 bis 35 CHF/MWh). Um typischere Verhältnisse für eine Sommernacht (auch in späteren Jahren) abzubilden, wurden 40 CHF/MWh angenommen (immer noch tiefer als die üblichen 50 CHF/MWh). Damit wurde entgangene Einnahmen von 30 kCHF abgeschätzt.

Mit durchschnittlichen spezifischen feinsedimentbedingten Kosten von ca. 6 CHF/t (Abschnitt 5.6.2) und einem vermiedenen Sedimenteintrag von 9'700 t wird geschätzt, dass Kosten von rund 58 kCHF vermieden wurden. Daraus folgt, dass die durchgeführte Ausserbetriebnahme bei diesem Schwebstofftransportereignis 2017 wirtschaftlich war (geschätzter Vorteil von ca. 28 kCHF).

Im Folgenden wird betrachtet, wie ein optimiertes Abschalt-Szenario hätte ablaufen können:

Der Sedimenteintrag in die Druckleitung und somit die *SSL* der beiden Turbinen hätte um weitere ca. 3'000 t reduziert werden können, wenn die Wasserfassung geschlossen worden wäre, sobald das Abschaltkriterium (*SSC* ≥ 10 g/l während 15 min) bei der Fassung erfüllt war. Dies war um 19:00 Uhr der Fall, also rund 1 h vor der tatsächlichen Schliessung der Wasserfassung. Die Wasserfassung wurde nicht früher geschlossen, weil im Jahr 2017 lediglich die Messwerte des CFDM in der Schieberkammer Alarm auslösten (die Messwerte des CFDM an der Wasserfassung waren noch nicht im Leitsystem integriert). Weiter hatte der Pikettmitarbeiter an jenem Abend mit Gewittern in der Region auch noch andere Alarme, auch von anderen Anlagen, zu bearbeiten.

Mit der früheren Ausserbetriebnahme wären weitere 3'000 t Feinsediment von der Anlage ferngehalten worden. Somit wäre ein Sedimenteintrag von total 12'700 t in die Anlage vermieden worden, was 87 % des potentiellen Eintrags entspricht. Folglich wäre es möglich gewesen, mit einer früheren Ausserbetriebnahme total 76 kCHF an feinsedimentbedingten Kosten zu verhindern.

Das Kriterium für die Wiederinbetriebnahme (*SSC* < 5 g/l und Ende des Ereignisses absehbar) ist bei der Wasserfassung schon um 02:00 Uhr erfüllt gewesen. Wenn in jener Wochenend-Nacht zusätzliches Personal für die Wiederinbetriebnahme der Anlage (wieder in Gang bringen der Kühlwasser-Entsandungsanlagen) verfügbar gewesen wäre und die Wiederinbetriebnahme nicht auf den nächsten Morgen angemeldet worden wäre, hätte die Produktion also rund 6 h früher wieder aufgenommen werden können.

Zusammen mit der früheren Abschaltung wäre die Stillstandszeit der Turbinen im optimierten Szenario von 11.5 auf 7 h verkürzt worden, wodurch die Produktionsverluste von etwa 30 auf etwa 18 kCHF reduziert worden wären. Im Vergleich zu vermiedenen Kosten von 76 kCHF könnte mit der Ausserbetriebnahme ein wirtschaftlicher Vorteil von bis zu 58°kCHF resultiert haben (im besten Fall, mit vereinfachenden Annahmen). Im optimierten Abschalt-Szenario wäre der wirtschaftliche Vorteil um rund 30 kCHF höher und somit fast doppelt so gross ausgefallen als bei der tatsächlichen Abschaltung.

5.6.5 Schwebstofftransportereignis vom 21.–22.09.2019 mit Kraftwerks-Ausserbetriebnahme

Am Samstag, 21. und Sonntag, 22.09.2019 kam es am Wysswasser zu einem relativ seltenen Schwebstofftransport-Ereignis, das nicht durch Regen verursacht wurde (Abbildung 94a). Gemäss MeteoSchweiz (2019) herrschte dann eine schwache Südföhnlage, mit eher trübem Wetter und unbedeutenden Niederschlägen (< 10 mm) in der Südschweiz, während es in der Nordschweiz sonnig war.

Am Nachmittag des 21.09. lag der Zufluss zur Wasserfassung in einem für diese Jahres- und Tageszeit üblichen Bereich. Um ca. 17 Uhr nahm der Zufluss plötzlich ab (graue Linie in Abbildung 94b), verharrte während etwa zwei Stunden auf lediglich ca. 3 m³/s und nahm dann rasch wieder auf einen üblichen Wert zu. Da der Zufluss den Ausbauabfluss der Fassung (16 m³/s) nicht überschritt, folgte der Abfluss vom Entsander in den Speicherstollen dem Zufluss (schwarze Linie in Abbildung 94b).

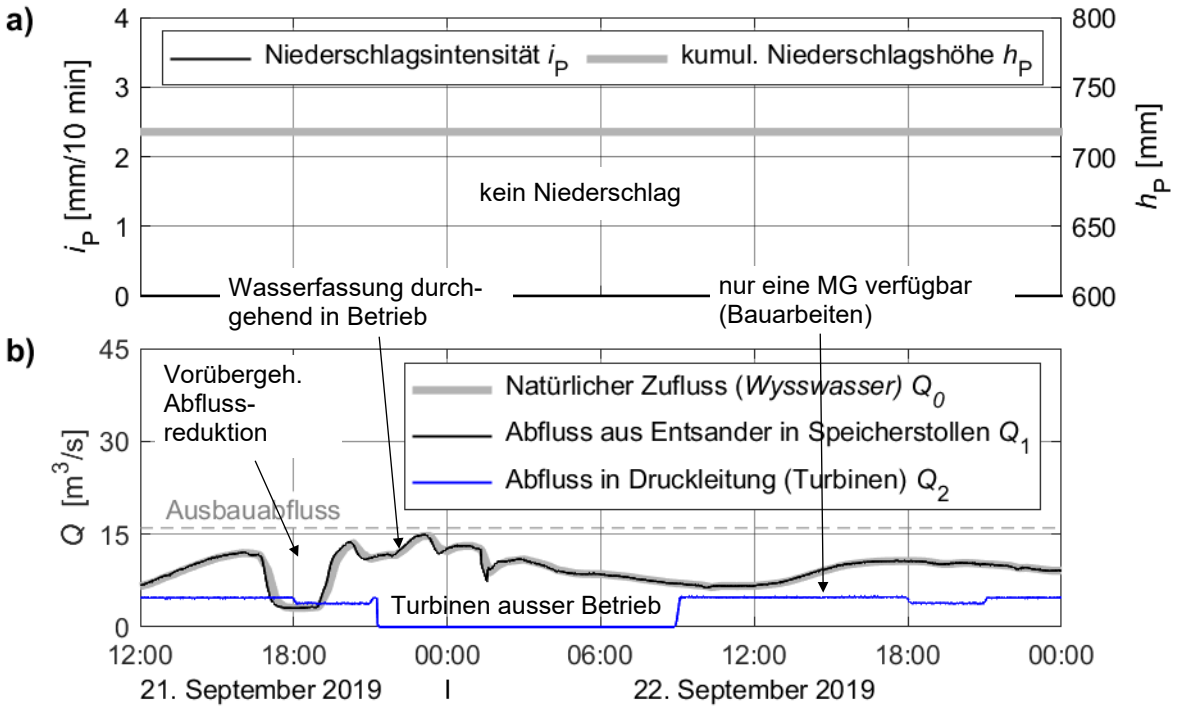


Abbildung 94: Ganglinien während des Schwebstofftransport-Ereignisses 21.–22. September 2019 beim KW Fieschertal: a) Niederschlagsintensität i_P und kumulierte Niederschlagshöhe seit Jahresbeginn h_P (Daten: MeteoSchweiz); b) Zufluss zur Wasserfassung Q_0, Abfluss in den Speicherstollen Q_1 und Abfluss in der Druckleitung Q_2 (Betriebsdaten: gkw).

Da die Energieableitung im Herbst 2019 wegen Bauarbeiten an der regionalen Hochspannungsleitung eingeschränkt war, war die elektrische Leistung im KW Fieschertal während des Ereignisses auf 20 MW beschränkt (Abbildung 96e) und es konnten maximal ca. 5 m³/s turbiniert werden (blaue Linie in Abbildung 94b). Dafür war der Teillastbetrieb einer MG (MG 2) ausreichend. Das nicht turbinierbare Wasser überlief (bereits seit vor dem Ereignis) am Stollenfenster (Abbildung 96c) und gelangte so in den Fluss zurück. Als vor und nach 18 Uhr nur 3 m³/s zuflossen und 5 m³/s turbiniert wurden, sank der Stollenpegel vorübergehend leicht unter die Überfallkante ab.

Um 19:15 Uhr stiegen die *SSC* an der Wasserfassung und am Ende des Entsanders stark an; gemäss Wasserproben auf mindestens 10 g/l (Abbildung 96a). Wie beim vorherigen Ereignis erläutert, liefern die Trübungssonden über etwa 10 g/l keine gültigen Messwerte mehr (gepunktete schwarze Linie und gestrichelte graue Linie in Abbildung 96a). Aufgrund der verfügbaren Informationen (gravimetrische

SSC an der Fassung und im Entsander, Verlauf von *SSC*-Ganglinien anderer Ereignisse und der gemessenen Spitzen-*SSC* in der Schieberkammer) wurde der in Abbildung 96a grau gestrichelte Verlauf der *SSC* an der Wasserfassung geschätzt. Abbildung 95 zeigt Wasserproben vom Ende des Entsanders vor, während und nach dem hier beschriebenen Ereignis. Die Probe mit der höchsten *SSC* (10.2 g/l) dieser Serie stammt vom 21.09. um 19:26 Uhr während des Ereignisses.



Abbildung 95: Wasserproben vom Ende des Entsanders des KW Fieschertal vom 20.08.–01.10.2019 (Foto: VAW).

Um 20:45 Uhr, also eineinhalb Stunden nach dem Anstieg der *SSC* im Fluss, nahm die *SSC* in der Schieberkammer sehr rasch auf über 10 g/l zu und stieg weiter auf ca. 17 g/l (Abbildung 96b). Die *SSC*-Messwerte in diesem hohen Bereich stammen vom CFDM in der Schieberkammer. Die Auswertung der Druckmessdaten aus dem Maschinenhaus als zweite, unabhängige Methode bestätigt ähnlich hohe *SSC* im Triebwasser in der Druckleitung.

Es wird vermutet, dass die vorübergehende Reduktion des Zuflusses und der darauffolgende steile *SSC*-Anstieg im Flusswasser (ohne Regen) durch einen rasch ablaufenden Prozess im Gletscher ausgelöst wurde. Mögliche Ursachen sind Veränderung der Abflusskanäle oder das Auslaufen einer «Wassertasche» im bzw. unter dem Gletschereis, oder allenfalls eine Rutschung. Vorübergehende Reduktionen des Abflusses aus dem Gletscher, teils mit anschliessend schwallartigem Abfluss, der für die Unterlieger gefährlich sein kann, wurden vom Kraftwerksbetreiber bereits früher beobachtet. Früher wurden jedoch der Zufluss zur Wasserfassung und die *SSC* nicht gemessen. Es wurde nicht erwartet, dass bei Zuflüssen im Bereich des Ausbaudurchflusses der Anlage *SSC* über 10 g/l auftreten.

Um 21:15 Uhr, d.h. eine halbe Stunde nachdem die *SSC* in der Schieberkammer 10 g/l überschritt, wurden die Turbinen ausser Betrieb genommen (Abbildung 96e), wodurch das Wasser in der Druckleitung nicht mehr floss (Abbildung 94b). Im Gegensatz zum Hochwasserereignis 2017 wurde die Wasserfassung nicht geschlossen und stark feinsedimenthaltiges Wasser gelangte in den Speicherstollen. Nachdem der Stollen wieder gefüllt worden war, überlief Wasser (bis ca. 15 m^3/s während des Stillstands der Turbinen; Abbildung 96c) an seinem Überlauf beim Stollenfenster.

Es wird geschätzt, dass während des Ereignisses ca. 3'400 t Feinsedimente zur Fassung und ins Kraftwerkssystem gelangten (graue Linie in Abbildung 96d). In der halben Stunde vor der Ausserbetriebnahme der Turbinen wurden diese mit hoher *SSC* belastet (rote Fläche in Abbildung 96b). Dabei wurden ca. 100 t Feinsediment turbiniert (erster Anstieg der blauen Linie in Abbildung 96d).

In der Nacht setzte sich ein Teil der Feinsedimentpartikel im stehenden Wasser ab und die *SSC* nahm auf 7 g/l ab (Abbildung 96b). Im Fluss und am Ende des Entsanders war die *SSC* schon seit Mitternacht wieder unter 5 g/l gesunken (Abbildung 96a).

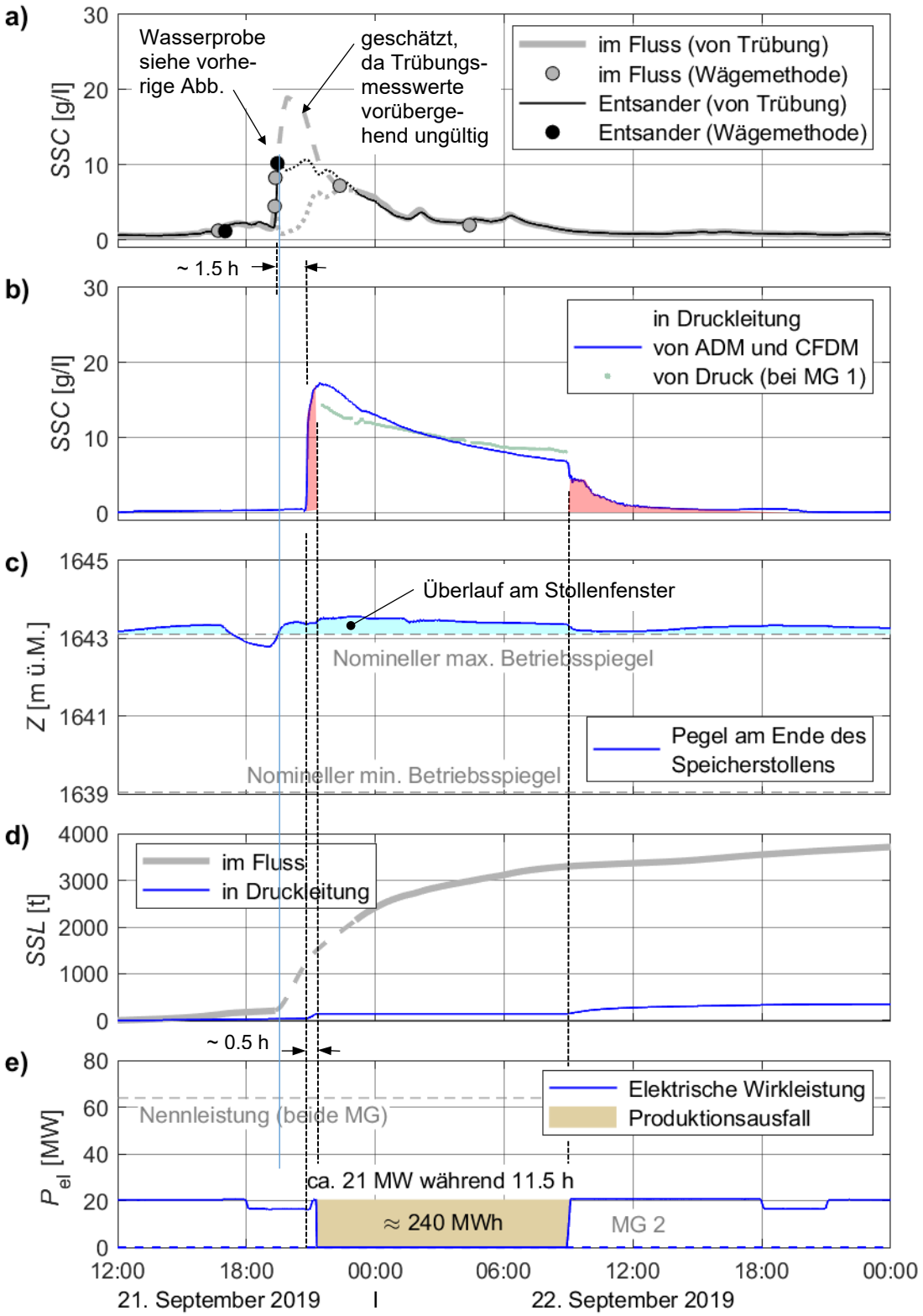


Abbildung 96: Ganglinien während des Schwebstofftransport-Ereignisses 21.–22.09.2019 beim KW Fieschertal (Fortsetzung): a) *SSC* im Zufluss zur Wasserfassung und am Ende des Entsanders; b) *SSC* am Beginn der Druckleitung in der Schieberkammer; c) Pegel am Ende des Speicherstollens; d) *SSL* im Zufluss und in der Druckleitung; e) Wirkleistung beider MG (Betriebsdaten: gkw; Auswertung: VAW).

Um 9:00 Uhr des nächsten Tages wurde die MG 2 wieder in Betrieb genommen (Abbildung 96e). Die andere MG blieb wegen der damals eingeschränkten Energieableitungskapazität weiter ausser Betrieb. Die *SSC* im Triebwasser war anfänglich mit 5 g/l noch relativ hoch und klang im Lauf des Nachmittags auf übliche Werte ab (Abbildung 96c). Dabei wurden knapp 200 t Feinsediment turbiniert (zweiter Anstieg der blauen Linie in Abbildung 96d).

Vom Feinsedimenteintrag von 3'400 t während dieses Ereignisses blieb der Grossteil in Schwebe und verliess das Kraftwerkssystem via Überlauf (schätzungsweise 1'900 t), ein beträchtlicher Teil davon setzte sich im Speicherstollen ab (schätzungsweise 1'200 t) und nur ein kleinerer Teil (100 t+ 200 t = 300 t) wurde während des Ereignisses turbiniert. Die Ablagerungen aus dem Speicherstollen wurden vermutlich in den Wochen und Monaten nach dem Ereignis infolge gelegentlicher Resuspension turbiniert, so dass wegen diesem Ereignis total etwa 1'500 t turbiniert wurden.

Der Produktionsausfall während des Stillstands von 11.5 h betrug ca. 240 MWh (braune Fläche in Abbildung 96e), was 0.15 % der nominellen Jahresproduktion entspricht. Da der Stillstand wie beim Ereignis 2017 von Samstag auf Sonntag, vor allem nachts war, wurde wiederum ein eher tiefer Stromgrosshandelspreis von 40 CHF/MWh angenommen. Damit entgingen dem Kraftwerk Einnahmen von rund 10 kCHF.

Wäre die MG 2 während des Ereignisses nicht ausser Betrieb genommen worden, wäre weniger Wasser überlaufen. In diesem Fall wird die *SSL* im Überlaufwasser auf 1'500 t geschätzt. Vom Sedimenteintrag ins System (3'400 t) wäre somit der Rest, d.h. etwa 1900 t, während oder nach dem Ereignis turbiniert worden. Mit dem vorübergehenden Unterbruch des eingeschränkten Turbinenbetriebs konnte die *SSL* der Turbinen lediglich um ca. 1'900 t - 1'500 t = 400 t reduziert werden. Dies entspricht nur 12 % der *SSL* im Zufluss während diesem Ereignis (3'400 t).

Die spezifischen feinsedimentbedingten Kosten von ca. 6 CHF/t (Abschnitt 5.6.2) beziehen sich auf Volllastbetrieb. Bei Teillastbetrieb ist dieser Wert umgekehrt proportional höher, d.h. im vorliegenden Fall mit 63 %-Teillastbetrieb (20 von 32 MW) werden die spezifischen feinsedimentbedingten Kosten auf ca. 10 CHF/t geschätzt. Somit konnten mit der durchgeführten Ausserbetriebnahme feinsedimentbedingte Kosten von ca.4 kCHF vermieden wurden.

Angesichts der Mindereinnahmen von ca. 10 kCHF während des Stillstands war die durchgeführte Abschaltung nicht wirtschaftlich (geschätzter Verlust 6 kCHF). Bei diesem Ereignis war speziell, dass die Kraftwerksleistung wegen Bauarbeiten beschränkt war und dass die Fassung nicht geschlossen worden war, was zu einem relativ grossen Sedimenteintrag ins System führte, der vermutlich in den Wochen und Monaten nach dem eigentlichen Ereignis gelegentlich turbiniert wurde.

Im Folgenden wird betrachtet, wie ein optimiertes Abschalt-Szenario hätte ablaufen können:

Für dieses optimierte Szenario wird nun davon ausgegangen, dass die damals ausnahmsweise vorhandene Beschränkung der Kraftwerksleistung nicht vorhanden gewesen wäre, d.h. beide MG hätten, falls vom Wasserdargebot angebracht, mit Volllast betrieben werden können.

Um die *SSL* der Turbinen während und auch nach dem Ereignis möglichst gering zu halten, wäre es wünschenswert gewesen, die Wasserfassung möglichst rasch nach dem starken *SSC*-Anstieg im Flusswasser zu schliessen. An der Wasserfassung war das Kriterium der Ausserbetriebnahme (> 10 g/l während 15 Minuten) um ca. 21:00 Uhr erfüllt. Bis dann kamen lediglich ca. 300 t Feinsediment an der Wasserfassung an (graue Linie in Abbildung 96d). Da der Zufluss den Ausbauabfluss nicht überschritt, gab es kein Überlaufwasser und diese 300 t gelangten bis dahin in die Anlage.

Das Kriterium der Wiederinbetriebnahme (< 5 g/l und Ende des Ereignisses absehbar) war an der Wasserfassung um ca. 02:00 Uhr erfüllt (Abbildung 96a). Bis dann kamen an der Fassung ca. 2'500°t Feinsediment an (weitere Ablesung an grauer Linie in Abbildung 96d). Die Differenz zu den 300 t, d.h. bis 2'200 t hätten durch das frühestmögliche Schliessen der Fassung von der Anlage ferngehalten werden können. Dies bedingt die verlässliche Messung hoher *SSC* bereits an der Wasserfassung, Alarme und die Verfügbarkeit von zusätzlichem Personal für die Wiederinbetriebnahme auch während der Nachtstunden des Wochenendes.

Mit spezifischen Feinsedimentkosten von ca. 6 CHF/t (gemäss Abschnitt 5.6.2, im optimierten Szenario mit Volllastbetrieb) hätte mit dem Schliessen der Wasserfassung von 21:00 bis 02:00 Uhr Kosten von gut 13 kCHF vermieden werden können.

Während des Stillstands von ebenfalls 5 h wären ca. 320 MWh nicht produziert worden, was 0.2 % der nominellen Jahresproduktion entspricht. Mit einem angenommen Stromgrosshandelspreis von wiederum 40 CHF/MWh entgingen dem Kraftwerk Einnahmen von knapp 13 kCHF. Damit wäre die vorübergehende Ausserbetriebnahme bei diesem Ereignis im besten Fall knapp wirtschaftlich gewesen.

5.6.6 Schwebstofftransportereignis vom 02.–03.10.2020 mit Kraftwerks-Ausserbetriebnahme

Am Mittag des Freitags, 02.10.2020 begann ein ergiebiger Niederschlag, als an der Ostflanke eines Sturmtiefs feuchte, milde Luft aus dem westlichen Mittelmeerraum u.a. in die Schweizer Alpen strömte (MeteoSchweiz 2020a). Die Schneefallgrenze sank bis ca. 1500 m ü. M. Die Abbildung 98a zeigt, dass bei der Messtation Fieschertal innerhalb von 24 h eine Niederschlagshöhe von ca. 100 mm aufgezeichnet wurde, was 10 % der mittleren jährlichen Niederschlagssumme der Periode 2012–2020 entspricht. Eine solche Tagessumme trat in der Region lediglich alle 10 bis 30 Jahre auf (MeteoSchweiz 2020).

Infolge des Niederschlags nahm der Zufluss zur Wasserfassung am Nachmittag des 02.10. von einem für diese Jahreszeit üblichen Wert von ca. 3 m^3/s langsam zu und erreichte am Folgetag um 10:20 Uhr etwa den Ausbauabfluss der Wasserfassung (16 m^3/s, graue Linie in Abbildung 98b). Innerhalb eines Tages nahm der Zufluss wieder kontinuierlich ab. Da Zuflüsse bis zum Ausbauabfluss im Sommer oft vorkommen, handelt es sich jedoch nicht um ein grosses Hochwasser-Ereignis. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Einzugsgebiet der Grossteil des ergiebigen Niederschlags als Schnee fiel und wenig abflusswirksam war. Hingegen kam es in den französischen Seealpen und in Norditalien zu teils verwüstenden Hochwassern. In Brig führte die Rhone ein Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von ca. 25 Jahren.

Etwa 8 h nach dem Beginn des Regens trat um etwa 20:30 Uhr, dem langsamen Anstieg des Abflusses überlagert, an der Wasserfassung ein kleiner Schwall auf (Spitze in der grauen Linie in Abbildung 98b). Dieser kann durch einen Gletscherprozess (vgl. Ereignis 2019) oder durch eine vorübergehend höhere Niederschlagsintensität verursacht worden sein.

Die Schwebstoffkonzentration *SSC* im Fluss bei der Wasserfassung stieg am 02.10. um 18:30 Uhr über 1 g/l (Abbildung 98c). Dieser Zeitpunkt wird als Beginn des Schwebstofftransportereignisses betrachtet. Dementsprechend war das Ereignis am 04.10. um 09:00 Uhr zu Ende, als die *SSC* bei der Wasserfassung unter 1 g/l abnahm. Das Ereignis dauerte also etwa 1.5 Tage. Interessanterweise nahm die *SSC* schon ca. 1.5 h vor dem Auftreten des kleinen Schwalls auf über 1 g/l zu. Abbildung 97 zeigt die hohe Trübung der Wasserproben bei der Wasserfassung während des Ereignisses im Vergleich zu den üblichen Verhältnissen davor und danach.

Jene *SSC*-Werte, die basierend auf den Trübungsmessungen bei der Wasserfassung und dem Entsander bestimmt wurden (hellgraue und schwarze Linien in Abbildung 98c), liegen im Vergleich zu den

entsprechenden gravimetrischen Referenzkonzentrationen von den Wasserproben (hellgraue und schwarze Punkte in Abbildung 98c) während des Grossteils des Ereignisses unplausibel tief. Dies wird wie bei den Ereignissen 2017 und 2019 damit erklärt, dass in diesem Zeitraum die Wassertrübung die obere Messbereichsgrenze der Trübungssonden überschritt. Im Vergleich zu den gravimetrischen Messungen lieferte für *SSC* > 6 g/l ausschliesslich das CFDM bei der Wasserfassung plausible Daten (dunkelgraue Linie in Abbildung 98c). Nach mehreren schrittweisen Verbesserungen der Wasserzuleitung zu diesem Messgerät (inkl. Einlauf auf der Wehrschwelle) bewährte sich das CFDM nun erstmals zum Messen hoher *SSC* während eines Sedimenttransportereignisses.

Etwas mehr als eine Stunde nach dem Anstieg der *SSC* bei der Wasserfassung erreichte das Wasser mit hoher *SSC* um ca. 19:50 Uhr den Einlauf der Druckleitung in der Schieberkammer (blaue Linie in Abbildung 98c). Die *SSC* stieg sowohl bei der Wasserfassung als auch in der Schieberkammer auf rund 17 g/l an. Es wurde nicht erwartet, dass so hohe *SSC* noch im Herbst auftreten, wenn in grossen Teilen des Einzugsgebiets bereits Schnee fällt.

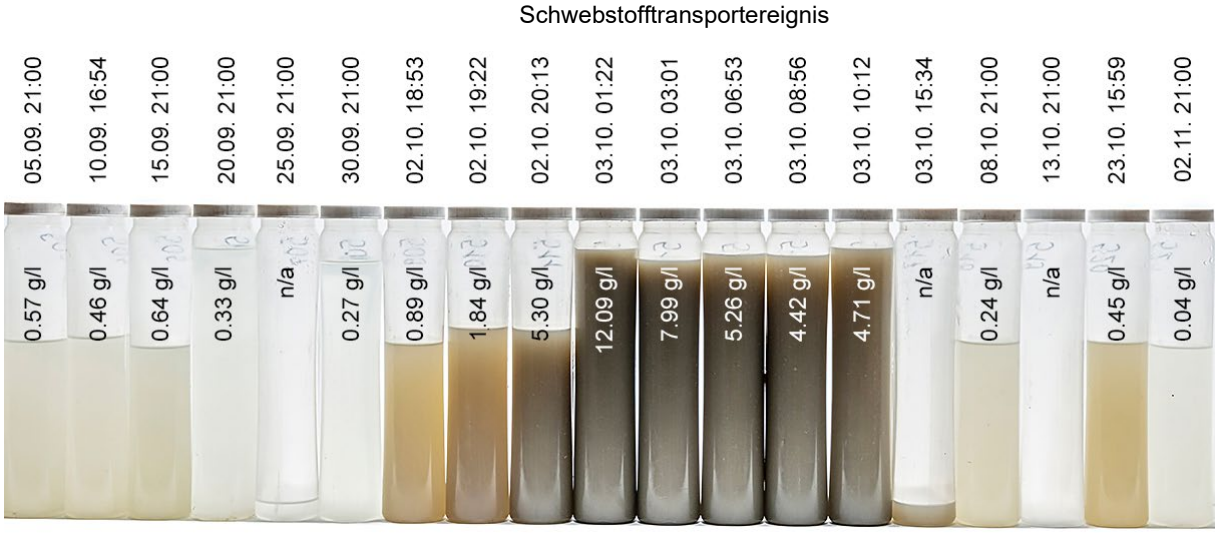


Abbildung 97: Wasserproben von der Wasserfassung des KW Fieschertal im Herbst 2020 mit jeweiligen *SSC* (Foto: VAW).

Bei diesem Ereignis wurde das Kraftwerk vorübergehend ausser Betrieb genommen. Die Wasserfassung wurde am 3.10. gegen 00:30 Uhr geschlossen (plötzlicher Abfall der schwarzen Q_1-Linie in Abbildung 98b). Praktisch gleichzeitig wurden beide MG abgestellt und blieben rund 15 h ausser Betrieb (Abbildung 98e). In diesem Zeitraum floss ein geringer Abfluss durch den Speicherstollen, um vermutlich Feinsedimente, die vorher eingetragen wurden, durch das Stollenfenster weiterzuleiten (horizontale schwarze Q_1-Linie bei etwa 3 m^3/s in Abbildung 98b). Es waren keine Entkieser- oder Entsanderspülungen erforderlich. Am Vormittag des 03.10. wurde die Fassung für etwa 20 Minuten geöffnet, wodurch der Speicherstollen etwa zu einem Viertel gefüllt wurde. Die *SSC* im stehenden Wasser, gemessen am Beginn der Druckleitung in der Schieberkammer, nahm nur langsam von etwa 17 auf 3 g/l ab, mit einem kurzen Wiederanstieg auf 5 g/l infolge der temporären Öffnung der Fassung. Die *SSC* im Wysswasser nahm etwa gleich langsam ab (Abbildung 98c).

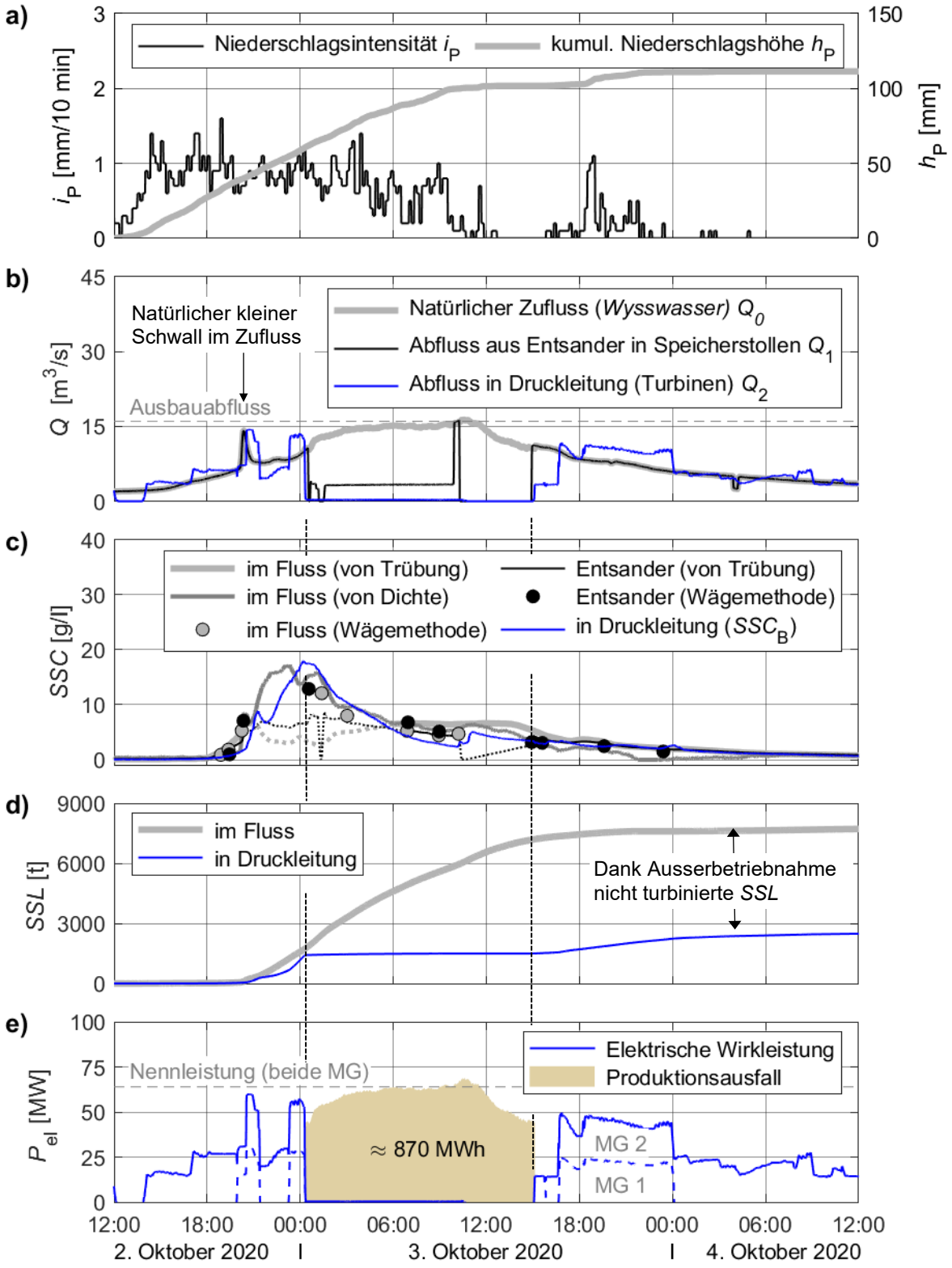


Abbildung 98: Ganglinien während des Schwebstofftransport-Ereignisses 2.–4. Oktober 2020 beim KW Fieschertal: a) Niederschlagsintensität i_P und kumulierte Niederschlagshöhe während des Ereignisses h_P (Daten: MeteoSchweiz); b) Zufluss zur Wasserfassung Q_0, Abfluss in den Speicherstollen Q_1 und Abfluss in der Druckleitung Q_2; c) *SSC* bei der Fassung, im Entsander und am Beginn der Druckleitung; d) *SSL* im Zufluss und in der Druckleitung; e) elektrische Wirkleistung beider MG (Betriebsdaten: gkw; Auswertung: VAW).

Um 15:00 Uhr wurde die Wasserfassung wieder geöffnet (Anstieg von Q_1 in Abbildung 98b). Zuerst wurde die MG 1 in Betrieb genommen und 50 Minuten bei etwa der halben Nennleistung betrieben (Abbildung 98e). Anschliessend wurde sie wieder abgestellt. Dann wurde mit der MG 2 gleich vorgegangen. Die Wiederinbetriebnahme der Maschinen war weniger aufwändig als nach den grösseren Ereignissen 2012 und 2017, bei denen die Anlagen für die Kühlwasserentsandung so verstopft gewesen waren, dass einige Teile vorübergehend demontiert werden mussten. Während beide MG einzeln in Betrieb waren, füllte sich der Speicherstollen bis zum maximalen nominalen Betriebswasserspiegel. Um 16:40 Uhr wurden beide MG wieder bis auf Weiteres in Betrieb genommen. Zu diesem Zeitpunkt waren die *SSC* bei der Wasserfassung und im Triebwasser auf etwa 3 g/l gesunken.

Während des Ereignisses wurden im Wysswasser etwa 7'700 t Feinsediment transportiert (graue Linie in Abbildung 98d). In den etwa 6 h vom Beginn des Ereignisses bis zum Schliessen der Fassung wurden etwa 1'900 t ins Kraftwerkssystem eingetragen (graue Linie in Abbildung 98d). Zwischen der Wiederöffnung der Fassung um 15:00 Uhr des 03.10. und dem Ende des Ereignisses am 04.10. um 09:00 Uhr wurden rund 500 t in die Anlage transportiert. Durch die temporäre Schliessung der Wasserfassung konnte also ein Feinsedimenteintrag von rund 7'700 − 1'900 − 500 t = 5'300 t in die Anlage verhindert werden (Abbildung 98d). Das entspricht 69 % der Fracht des Ereignisses (7'700 t).

Von den 1'900 t, die bis vor dem Schliessen der Fassung in die Anlage transportiert wurden, gelangte der Grossteil (1'400 t) noch vor der Ausserbetriebnahme der Turbinen durch die Druckleitung (erster Anstieg der blauen Linie in Abbildung 98d). Von deren Wiederinbetriebnahme bis zum Ende des Ereignisses wurden weitere 900 t turbiniert (zweiter Anstieg der blauen Linie in Abbildung 98d). Von den 1'900 + 500 t = 2'400 t, die ins Kraftwerkssystem gelangten, wurden also während des Ereignisses 1'400 + 900 t = 2'300 t turbiniert. Der Rest (ca. 100 t) lagerte sich im Entsander und im Speicherstollen ab. Die Ablagerungen aus dem Speicherstollen wurden vermutlich in den Wochen nach dem Ereignis turbiniert.

Der Produktionsverlust durch die temporäre Ausserbetriebnahme betrug etwa 870 MWh (braune Fläche in Abbildung 98e), was rund 0.5 % der nominellen Jahresproduktion entspricht. Bei einem angenommenen Stromgrosshandelspreis von 50 CHF/MWh wurden Umsatzeinbussen von 43 kCHF abgeschätzt.

Mit einem Teillastbetrieb von ca. 85 % während des Ereignisses wurden die spezifischen feinsedimentbedingten Kosten auf ca. 7 CHF/t geschätzt. Der vermiedene Sedimenteintrag von 5'200 t entsprach somit vermiedenen Kosten von rund 36 kCHF. Daraus folgt, dass die durchgeführte Ausserbetriebnahme bei diesem Ereignis 2020 nicht wirtschaftlich war (geschätzter Verlust von 7 kCHF). Als der Entscheid zur Ausserbetriebnahme gefällt wurde, war jedoch noch nicht bekannt, wie sich das Ereignis bezüglich des Abflusses und der *SSC* entwickeln würde.

Im Folgenden wird betrachtet, wie ein optimiertes Abschalt-Szenario hätte ablaufen können:

Der Sedimenteintrag in die Druckleitung und somit die *SSL* der beiden Turbinen hätten um weitere 1'100 t reduziert werden können, wenn die Wasserfassung geschlossen worden wäre, sobald das Abschaltkriterium (*SSC* ≥ 10 g/l während 15 min) bei der Fassung erfüllt war. Dies war um 21:30 Uhr der Fall, also rund 3 h vor der tatsächlichen Schliessung der Wasserfassung. Die Fassung wurde nicht früher geschlossen, weil die hohe *SSC* zwar gemessen wurde, aber der automatische Alarm im Leitsystem noch nicht implementiert war.

Die individuelle Wiederinbetriebnahme der MG nach dem Betriebsunterbruch begann etwa dann, als die *SSC* bei der Fassung unter 5 g/l abnahm. Der Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme entsprach also etwa dem nach dem Ereignis 2012 vorgeschlagenen Kriterium (5 g/l).

Mit der früheren Ausserbetriebnahme wären weitere 1'100 t Feinsediment von der Anlage ferngehalten worden, so dass ein Sedimenteintrag von total 6'300 t in die Anlage vermieden worden wäre. Dies entspricht 82 % der *SSL* im Fluss während dieses Ereignisses. Mit der früheren Ausserbetriebnahme wären die vermiedenen feinsedimentbedingte Kosten (7 CHF/t) um 8 kCHF auf 44 kCHF erhöht worden. Jedoch hätte das frühere Abschalten der Turbinen auch zu zusätzlichen Produktionsverlusten von rund 100 MWh geführt, was weiteren Umsatzeinbussen von 5 kCHF entspräche. Die totalen Umsatzeinbussen hätten folglich rund 48 kCHF betragen. Im Vergleich zu den vermiedenen Kosten von 44 kCHF wäre also auch das optimierte Abschalt-Szenario im Ereignis 2020 nicht wirtschaftlich gewesen, ausser wenn der Strompreis etwas höher gewesen wäre.

5.6.7 Zusammenfassung der Schwebstofftransportereignisse

Die in den Abschnitten 5.6.3 bis 5.6.6 beschriebenen Schwebstofftransport-Ereignisse von 2012 bis 2020 sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Es sind jeweils die Kennwerte für das tatsächlich stattgefundene Ereignis («Realität») und ein Szenario mit optimierter Ausserbetriebnahme der Fassung und der Turbinen («Optimiert») angegeben. Die Optimierung fand im Nachhinein statt, als der Ablauf der jeweiligen Ereignisse bekannt war. Zwei der vier Ereignisse fanden am Wochenende statt und bei den anderen waren Einsätze in den Nachtstunden von Werktagen erforderlich, was die Bedeutung des Pikettdienstes und von automatischen Alarmen unterstreicht.

Die tatsächlichen und optimierten Ausserbetriebnahmen dauerten 5 bis 18 h. Bei einem typischen Abschaltereignis infolge eines Sommergewitters ist in der Regel weniger als 12 h ausreichend. Mit den Ausserbetriebnahmen konnten oft mehr als zwei Drittel der potenziellen Sedimentfracht eines Ereignisses von der Anlage und somit von den Turbinen ferngehalten werden.

Bei den ersten beiden Ereignissen mit *SSC*-Spitzen von 50 bis 110 g/l waren die vorübergehenden Ausserbetriebnahmen deutlich wirtschaftlich, insbesondere beim 20-jährlichen Hochwasser. Hingegen beim dritten und vierten Ereignis, mit Spitzenabflüssen lediglich im Bereich des Ausbauabflusses des Kraftwerks, waren die vorübergehenden Ausserbetriebnahmen leicht unwirtschaftlich, vor allem weil die *SSC* an der Wasserfassung den Schwellenwert von ca. 10 g/l nicht so deutlich überschritt und die Ausserbetriebnahme beim vierten Ereignis länger dauerte als wegen eines Gewitters.

Da zum Zeitpunkt des Entscheids einer Ausserbetriebnahme nicht bekannt ist, wie das Ereignis genau ablaufen wird, sind vereinzelt auch leicht unwirtschaftliche Ausserbetriebnahmen in Kauf zu nehmen. Mit gelegentlich deutlich wirtschaftlichen Ausserbetriebnahmen zusammen wird dennoch eine positive Bilanz erwartet.

Tabelle 16: Zusammenstellung der Kenndaten der vier grösseren Schwebstofftransport-Ereignisse in den Jahren 2012–2020 (mit Abschalt-*SSC* = 10 g/l und feinsedimentbedingten Kosten von 6.6 CHF/t ermittelt aufgrund der ersten drei Projektjahre 2012–2014).

Datum (Wochentage) Ereignis (Typ bzw. Grund)	max. SSC [g/l]	max. Q [m^3/s]	Realität bzw. Szenario	Still- stand [h]	Anteil vermiedene Fracht	Vermiedene Kosten [kCHF]	Prod. Verlust [kCHF]	Vorteil [kCHF]
02./03.07.2012 (Mo/Di) 20-jährl. Hochwasser (Regen und Tauwetter)	50	~90	Realität	–	–	–	–	–
			Optimiert	16	60 %	260	60	200
29./30.07.2017 (Sa/So) Hochwasser (Gewitter)	110	38	Realität	11	66 %	58	30	28
			Optimiert	7	87 %	76	18	58
21./22.09.2019 (Sa/So) Gletscher-Prozess	~20	14	Realität	12	12 %	4	10	−6
			Optimiert	5	88 %	13	13	~ 0
02./03.10.2020 (Fr/Sa) Regen und Schnee	17	16	Realität	15	69 %	36	43	−7
			Optimiert	18	82 %	44	48	−4

Wie die Abbildung 99 zeigt, nahm im Hochwasserereignis 2012 ohne Kraftwerksabschaltung die *SSL* der Turbinen innert kurzer Zeit stark zu. Solche ausserordentlichen Schwebstoffbelastungen wurde in den folgenden Schwebstofftransportereignissen mit Kraftwerksabschaltungen vermieden.

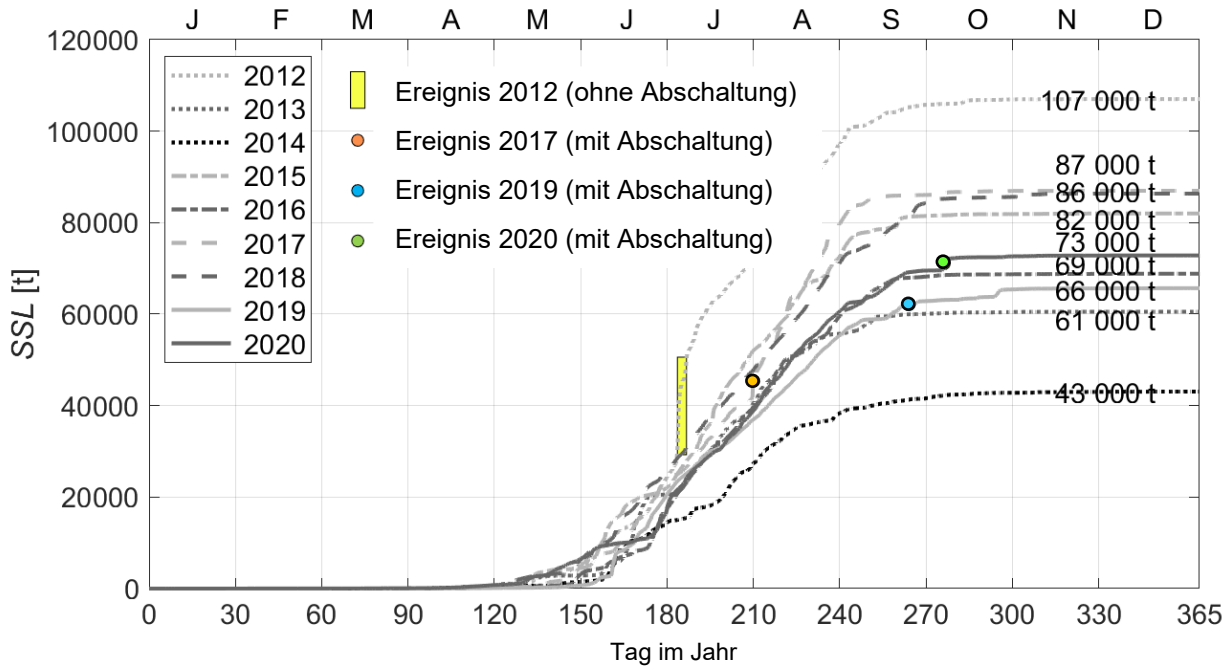


Abbildung 99: Jährliche Schwebstoff-Frachten in der Druckleitung des KW Fieschertal mit den vier bedeutendsten Sedimenttransportereignissen (mit und ohne Kraftwerksabschaltungen) in den Jahren 2012–2020 (Auswertung: VAW).

5.6.8 Abschätzung der Abschalt-*SSC* aufgrund der Daten 2012–2020 und weiteren Aspekten

In Abschnitt 5.6.2 wurde beschrieben, wie feinsedimentbedingte Kosten von 6.6 CHF/t und eine Abschalt-*SSC* von 10 g/l aufgrund der Daten 2012–2014 bestimmt wurden. Diese Berechnungen wurden zum Ende des Projekts aufgrund einer längeren Datenreihe von 2012–2020 (neun Jahre) und unter Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte wie folgt aktualisiert.

Die mittleren jährlichen feinsedimentbedingten Kosten im KW Fieschertal wurden aufgrund der Kostenangaben des Kraftwerksbetreibers berechnet (Tabelle 17). Beispielsweise bezüglich der Laufräder wurden die Kosten (Fremdkosten und Arbeit des Kraftwerksbetreibers) für die kleinen und grossen Revisionen angerechnet. Die Beschaffungskosten der Laufräder wurde nicht angerechnet, da auch ohne Sedimentbelastung alle paar Jahrzehnte neue Laufräder und Reservelaufräder erforderlich sind (aufgrund von Ermüdung oder Verfügbarkeit von neuen hydraulischen Designs). Über die entsprechenden Abschreibungsdauern der Revisionsarbeiten (z.B. 6 Jahre für eine grosse Laufradrevision) wurde ein kalkulatorischer Zinssatz von 3 % angenommen. Von den wirkungsgradbedingten Mindereinnahmen (34 kCHF/Jahr für beide MG gemäss Abschnitt 5.7.1) wurde nur ein Teil angerechnet, da auch ohne spezielle Sedimentbelastung, mit längeren Revisionsintervallen, zu akzeptieren wäre, dass der Wirkungsgrad im zeitlichen Mittel nicht stets dem Wirkungsgrad von neuwertigen Laufrädern mit der aktuell verfügbaren Besttechnologie entspricht. Die mittleren jährlichen feinsedimentbedingten Kosten für die neun Jahre wurden nun etwas tiefer geschätzt als für die ersten drei Projektjahre.

Nebst den absoluten Kosten sind diese auch als Anteil des nominellen Werts der jährlichen Produktion ausgedrückt. Letzterer wurde mit der mittleren jährlichen Produktion von 160 GWh/Jahr (Abschnitt 5.7) und einem angenommenen Stromgrosshandelspreis von 50 CHF/MWh auf 8 Mio. CHF geschätzt.

Tabelle 17: Mittlere jährliche feinsedimentbedingte Kosten im KW Fieschertal (für beide MG) 2012–2020 (modifiziert von Abgottspon *et al.* 2016; Datengrundlage: gkw).

	Kosten kCHF/Jahr	in % des nominellen Werts der jährlichen Produktion
Kosten für Revisionen bzw. Ersatz	**260**	3.2
- Laufräder	180	
- Düsen und Düsenschutzdächer, Teile im Gehäuse	50	
- Anteil Entsander-Spülsystem und Druckleitung	30	
Mindereinnahmen durch Produktionseinbussen	**30**	0.4
- infolge zusätzlicher Wirkungsgradreduktion	10	
- infolge Stollenspülungen oder selten erforderlichen Laufradwechseln mit Produktionsverlust	20	
Total	**290**	3.6

Im Mittel wurden jährlich 75'000 t Feinsediment durch die Druckleitung des KW Fieschertal, d.h. durch die beiden MG, transportiert (Abschnitt 5.1.5). Dieser Wert für die neun Jahre ist 50 % höher als aufgrund der Jahre 2013 und 2014 geschätzt wurde (die *SSL* des Jahres 2012 wurde damals im Mittelwert nicht berücksichtigt, da diese hohe *SSL* mit einem ca. 20-jährlichen Hochwasser zustande kam).

Somit betragen die mittleren spezifischen feinsedimentbedingten Kosten 290 kCHF / 75'000 t ≈ 3.9 CHF/t. Dieser aktualisierte Wert für die neun Jahre ist tiefer als der Wert von 6.6 CHF/t für die ersten drei Projektjahre.

Bei der durchschnittlichen *SSC* von 0.53 g/l (Abschnitt 5.1.5) resultieren feinsedimentbedingte Kosten von 0.21 Rp./m^3, was mit einem Arbeitswert von 1.2 kWh/m^3 zu 0.17 Rp./kWh = 1.7 CHF/MWh führt. Wenn die *SSC* etwa 30-mal höher ist, also bei 15 g/l, erreichen die feinsedimentbedingten Kosten den angenommenen Stromgrosshandelspreis von 50 CHF/MWh (Abbildung 100). Bei diesem Strompreis liegt die Abschalt-*SSC* bei etwa 15 g/l, also 50 % höher als aufgrund der ersten drei Projektjahre geschätzt wurde (Abschnitt 5.6.2). Die *SSC* von 15 g/l wird im Mittel an lediglich ca. 3 h pro Jahr überschritten (Abbildung 52b). In einigen Jahren kommen keine solche Ereignisse vor. In anderen Jahren, mit grösseren Hochwassern, können daher *SSC* > 15 g/l während eines halben bis ganzen Tages pro Jahr vorkommen.

Die 15 g/l können auch erhalten werden, indem die mittlere *SSC* von 0.53 g/l durch den Anteil der feinsedimentbedingten Kosten am nominellen Wert der Jahresproduktion von 0.036 (= 3.6 % unten rechts in Tabelle 17) geteilt werden. Diesem kurzen Rechenweg liegt die Überlegung zugrunde, dass bei der Abschalt-*SSC* die feinsedimentbedingten Kosten so hoch sind, dass sie den nominalen Einnahmen entsprechen.

Bisher sind in der Literatur keine so hohen Werte dokumentiert; für grosse Peltonanlagen waren keine publizierten Abschalt-*SSC* auffindbar (Tabelle 3 in Abschnitt 2.4). Die eher hohe Abschalt-*SSC* des KW Fieschertal wird bisher so erklärt: Die grossen, hartbeschichteten Laufräder mit der über Jahre optimierten Praxis der kleinen und grossen Revisionen (inkl. Nachbeschichten vor Ort) nehmen mit den meist recht feinen Schwebstoffen (v.a. Mittelsilt aus Gletscherschliff und Ablagerung von gröberen Partikeln im wachsenden Gletschervorfeld) offenbar relativ wenig Schaden, insbesondere im Vergleich zu kleineren Anlagen mit schmaleren Bechern, mehr Düsen und gröberen Partikeln (Sand).

Im Folgenden werden zusätzliche Faktoren diskutiert, welche die Abschalt-*SSC* beeinflussen:

Bei Strompreisen unter 50 CHF/MWh, wie in den vergangenen Jahren während der schwebstoffbedingten Ausserbetriebnahmen im Sommer in den Nachtstunden insbesondere am Wochenende vorgekommen, ist die wirtschaftliche Abschalt-*SSC* tiefer. Falls Sedimentransportereignisse in Zeiten höherer Strompreise vorkommen, ist hingegen eine höhere Abschalt-*SSC* wirtschaftlich. Um die Variation des Strompreises zu berücksichtigen, kann die Information über den aktuellen Strompreis in Kraftwerksleitsysteme neuerer Generation laufend eingespeist und die Schwellenwerte für die Alarme entsprechend dynamisch angepasst werden. Im Fall des KW Fieschertal wird die Strompreisvariation vorerst qualitativ berücksichtigt, wie bei der Wiederinbetriebnahme nach der Abschaltung im Jahr 2017.

Ein weiterer zeitlich variabler Einflussfaktor auf die Abschalt-*SSC* ist die Partikelgrösse. Aufgrund der höheren Abflüsse können bei Hochwassern grundsätzlich gröbere Partikel zur Fassung gelangen. Da gröbere Partikel zu höheren Abrasionsraten führen (Faktor k_{size} in Abschnitt 2.2.2), sind die feinsedimentbedingten Kosten höher, wenn die Partikel im Triebwasser gröber sind als im zeitlichen Mittel. In solchen Phasen sind tiefere Abschalt-*SSC* wirtschaftlich (Abbildung 100). Um den Einfluss der Partikelgrösse zu berücksichtigen, müsste diese in Echtzeit an der Wasserfassung gemessen werden. Da aber bisher kein Messsystem bekannt ist, mit dem die Partikelgrössenverteilung bzw. ein aussagekräftiger Kennwert der mittleren Partikelgrösse (d_{50} oder besser d_m) im relevanten *SSC*-Bereich (über ca. 10 g/l) laufend und zuverlässig auch unter Hochwasserbedingungen gemessen werden könnte, kann dieser Einfluss bisher nur qualitativ berücksichtigt werden.

Weiter beeinflusst auch die Betriebslast der Turbinen die Abschalt-*SSC*. Die berechneten feinsedimentbedingten Kosten beziehen sich auf Volllastbetrieb, wie im Sommer üblicherweise vorhanden. Da die Abrasionsrate gemäss dem IEC-Modell von der *SSC* (und nicht der *SSL*) abhängt, schreitet die Abrasion bei Teillast so schnell voran wie bei Volllast. Bei Teillastbetrieb ist aber die turbinierte *SSL* und die Produktion geringer. So sind die Abrasionskosten auf eine geringere Sedimentmenge und weniger kWh umzulegen, was zu höheren spezifischen feinsedimentbedingten Kosten führt. Daher ist Teillastbetrieb bei hohen *SSC* grundsätzlich zu vermeiden. Wie die Ereignisse von 2019 und 2020 zeigten, können aber erhöhte *SSC* auch dann vorkommen, wenn aufgrund des Wasserdargebots kein dauernder Volllastbetrieb möglich ist (Zufluss < Ausbauabfluss). Bei Teillastbetrieb verschiebt sich also die Abschalt-*SSC* in Abbildung 100 zu tieferen Werten (nach links).

Schliesslich kann bei der Abschalt-*SSC* auch noch die Restnutzungsdauer der Turbinenbauteile berücksichtigt werden. So kann beispielsweise bei einem Laufrad, das im kommenden Winter aus anderen Gründen ausser Betrieb genommen werden wird, eine starke Abrasion durch ein Hochwasser im Sommer und somit eine höhere Abschalt-*SSC* toleriert werden. Dies setzt voraus, dass noch andere Turbinen zur Verfügung stehen, mit denen nach dem Ende der Volllastzeit (im Herbst und Winter) das weniger schwebstoffbelastete Wasser mit zufriedenstellenden Wirkungsgraden turbiniert werden kann. Die Restnutzungsdauer ist also nur dann für die Abschalt-*SSC* relevant, wenn die Restnutzungsdauer der Turbinenbauteile bis zu deren grossen Revisionen oder Ersatz kurz sind (typischerweise < 1 Jahr).

Aus den genannten Gründen (variable Strompreise und Partikelgrössen, allfälliger Teillastbetrieb und kurze Restnutzungsdauern der Turbinenbauteile) können Abschalt-*SSC* über und unter dem für das KW Fieschertal ermittelten Richtwert von 15 g/l wirtschaftlich sein (rotes Band in Abbildung 100).

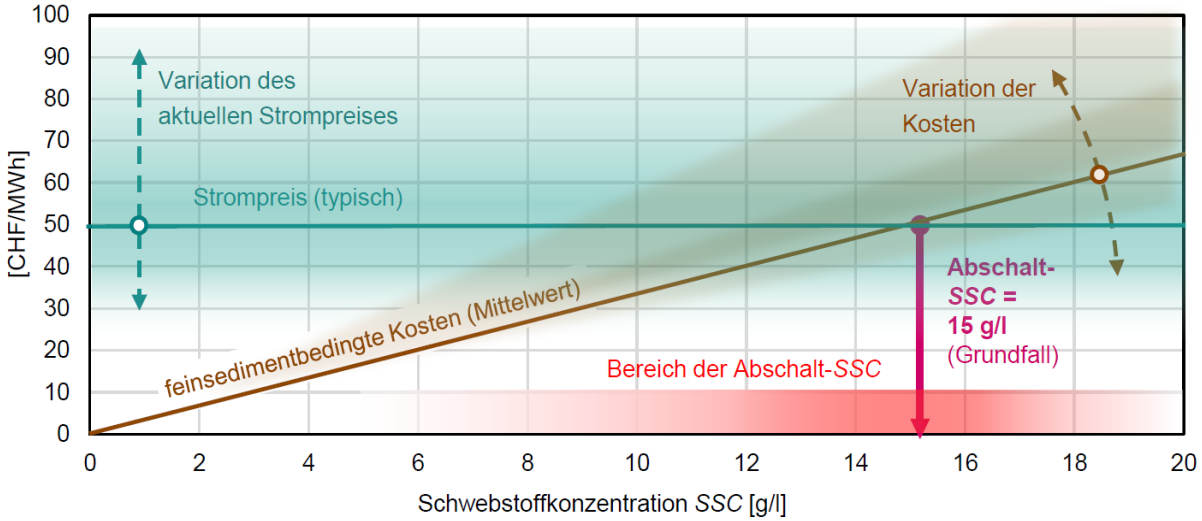


Abbildung 100: Bestimmung der Abschalt-*SSC* für das KW Fieschertal aufgrund der erweiterten Datenbasis (2012–2020) und Variationsbereich infolge der Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte (Datengrundlage für Revisionskosten: gkw).

5.6.9 Anwendung der neuen Abschalt-*SSC*

Im Leitsystem des KW Fieschertal wurden im Jahr 2015 folgende Warnungen bzw. Alarme bezüglich dem *SSC*-Signal des CFDM in der Schieberkammer definiert:

- Falls 8 g/l während mehr als 30 Minuten überschritten: «*SSC* Schieberkammer hoch»,
- Falls 12 g/l während mehr als 10 Minuten überschritten: «*SSC* Schieberkammer sehr hoch»,

Zum Schluss des Projekts wurde vorgeschlagen, zusätzlich das *SSC*-Signal des CFDM an der Wasserfassung mit folgenden Warnungen bzw. Alarmen zu belegen:

- Falls 4 g/l während mehr als 5 Minuten überschritten: Alarm «*SSC* Wasserfassung erhöht»
- Falls 8 g/l während mehr als 5 Minuten überschritten: Alarm «*SSC* Wasserfassung hoch»
- Falls 15 g/l während mehr als 5 Minuten überschritten: Alarm «*SSC* Wasserfassung sehr hoch»

So kann der diensthabende Mitarbeiter die Situation verfolgen und die Wasserfassung schliessen, wobei er zusätzlich folgenden Punkte berücksichtigen kann:

- Weitere *SSC*-Messwerte (an anderen Messstellen und Instrumenten, sofern verfügbar),
- Bilder der Überwachungskamera bei der Wasserfassung,
- Wetter- und Abflussdaten bzw. -Prognosen,
- Erfahrung mit dem Wettergeschehen in der Region und dem Betrieb des KW Fieschertal,
- Betriebszustand von anderen Wasserkraftanlagen in der Region und Prioritäten,
- Rücksprache mit dem *Dispatching* des stromabnehmenden Energieversorgungsunternehmens,
- Aktueller Strompreis,
- Verfügbarkeit von weiterem Personal für die Wiederinbetriebnahme.

Im Fall des KW Fieschertal können die Turbinen im Volllastbetrieb 0.5 bis 1 h nach dem Schliessen der Wasserfassung ausser Betrieb genommen werden, wenn der Speicherstollen anfangs vollständig gefüllt war und der Grossteil seines Nutzvolumens zur Verfügung steht (keine hohen Sedimentablagerungen).

Die Zeitdauer vom Moment der *SSC*-Schwellenwertüberschreitung (*SSC* > Abschalt-*SSC*) bis zum Schliessen der Fassung wurde von 15 Minuten (Abbildung 89) auf 5 Minuten verkürzt, damit auch bei rasch zunehmenden *SSC* nur ein möglichst geringer Anteil der Schwebstofffracht in die Anlage gelangt.

In Abschnitt 5.6.2 wurde vorgeschlagen, die Kraftwerksanlage wieder in Betrieb zu nehmen, wenn die *SSC* unter 5 g/l, d.h. die Hälfte der damals geschätzten Abschalt-*SSC* von 10 g/l gesunken ist. Mit der zum Schluss des Projekts geschätzten Abschalt-*SSC* von 15 g/l wird dementsprechend die Wiederinbetriebnahme bei 0.5 · 15 g/l = 7.5 g/l angesetzt.

Im Folgenden wird diskutiert, wie die Stillstandszeiten des KW Fieschertal in den vier Ereignissen, die in den Abschnitten 5.6.3 bis 5.6.6 beschrieben wurden, mit der typischen Abschalt-*SSC* von 15 g/l (statt 10 g/l) verkürzt worden wären:

- Im Ereignis 2012 (mehrgipflige *SSC*-Ganglinie mit Spitze von 50 g/l nach Regen mit Tauwetter) hätte der Betriebsunterbruch lediglich ca. 8 statt 16 h gedauert.
- Im Ereignis 2017 (steil ansteigende, eingipflige *SSC*-Ganglinie mit Spitze von 110 g/l nach Gewitter) wären die Turbinen ca. 6.5 h stillgestanden (Abbildung 101), d.h. nur unwesentlich kürzer als die 7 h im Szenario gemäss Abschnitt 5.6.4.
- Im Ereignis 2019 (steil ansteigende, eingipflige *SSC*-Ganglinie mit Spitze von ca. 19 g/l, vermutlich wegen eines Prozesses im Gletscher oder am Gletscherbett) hätte der Betriebsunterbruch lediglich ca. 3.5 statt 5 h gedauert.
- Im Ereignis 2020 (weniger schnell ansteigende, mehrgipflige *SSC*-Ganglinie mit Spitze von 17 g/l und langsamem Abklingen, nach Regen und Schneefall) hätte der Betriebsunterbruch ca. 8 statt 18 h gedauert.

Im Ereignis 2017, dem Ereignis infolge eines Sommergewitters, hätte die Erhöhung der Abschalt-*SSC* von 10 auf 15 g/l zu keiner nennenswerten Verkürzung der Stillstandszeit geführt. Hingegen bei den andern drei Ereignissen mit weniger schnell ansteigenden bzw. abfallenden *SSC*-Ganglinien oder mit moderaten *SSC*-Spitzen wären die Stillstands-Zeiten zum Teil nennenswert verkürzt worden.

Falls nach einer Abschaltung die *SSC* nur langsam von der Abschalt-*SSC* auf die halbe Abschalt-*SSC* abnimmt, wie z.B. im vergleichsweise kleinen Schwebstofftransportereignis vom Oktober 2020 während etwa 12 h (Abbildung 98), kann die Anlage bereits vor dem Unterschreiten der halben Abschalt-*SSC* wieder in Betrieb genommen werden.

Bei einem erhöhten Strompreis (> 70 CHF/MWh) hätte das KW Fieschertal in den Ereignissen 2019 und 2020 durchgehend wirtschaftlich betrieben werden können (aufgetretene *SSC* hätten die erhöhte Abschalt-*SSC* von 20 g/l nicht überschritten).

Wie in Abbildung 101c ersichtlich, hätten im Hochwasser 2017 mit der mittleren Abschalt-*SSC* von 15 g/l etwa 12'000 t Feinsediment von der Anlage ferngehalten werden können, was ca. 82 % der Schwebstofffracht des Ereignisses entspricht. Das ist wie erwartet etwas weniger als die 87 % im Szenario mit der damaligen Abschalt-*SSC* von 10 g/l (Abschnitt 5.6.4). Mit dem erhöhten Wert für die Abschalt-*SSC* von 15 g/l und feinsedimentbedingten Kosten von 3.9 CHF/t wären Kosten von ca. 47 kCHF vermieden worden, während der Produktionsausfall auf 6 h · 64 MW · 40 CHF / MWh ≈ 17 kCHF geschätzt wird. Das heisst, auch mit den Abschalt-Kriterien und den spezifischen Kosten, die zum Ende des Projekts ermittelt wurden, wäre eine Ausserbetriebnahme des KW Fieschertal im Hochwasser 2017 deutlich wirtschaftlich gewesen (Vorteil von ca. 30 kCHF gegenüber durchgehendem Betrieb).

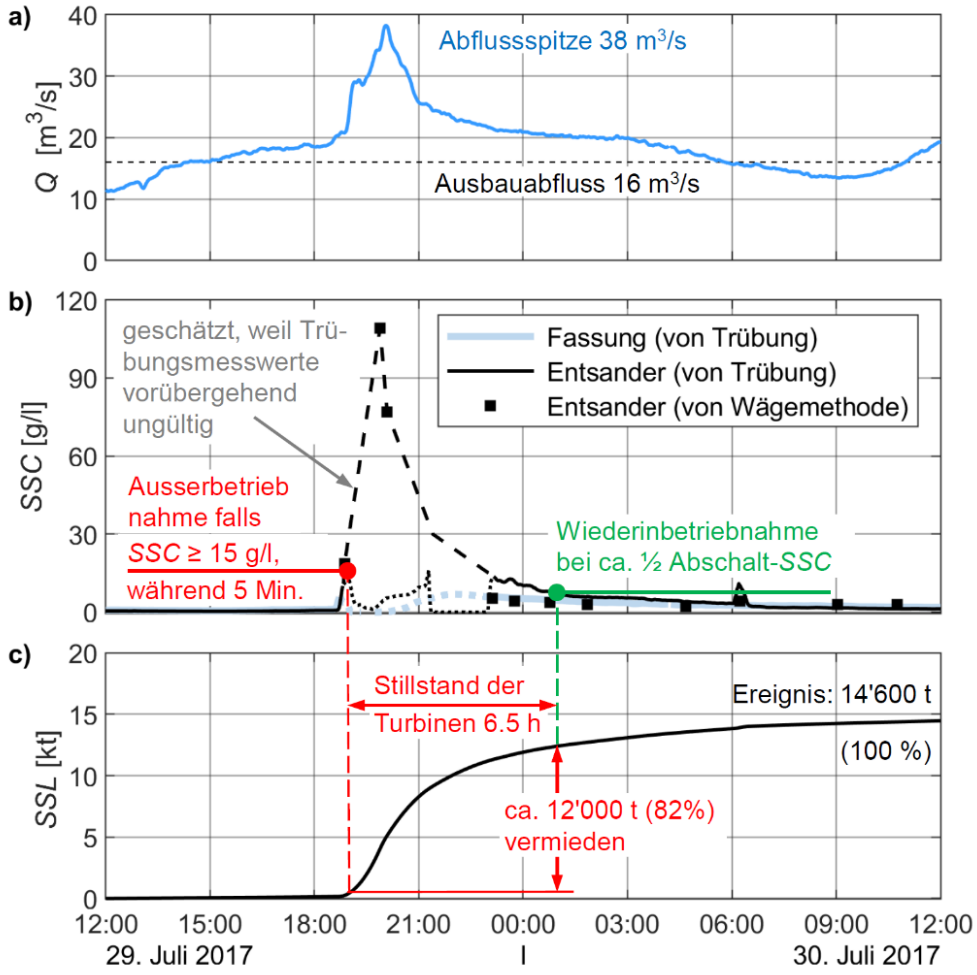


Abbildung 101: a) Zufluss *Q* zur Wasserfassung, b) Schwebstoffkonzentrationen *SSC* bei den Fassungsbauwerken und c) potentielle Schwebstofffracht *SSL* im KW Fieschertal während des Hochwassers vom 29.–30.07.2017, mit Szenario (rot) für optimierte Ausserbetriebnahme mit Abschalt-*SSC* = 15 g/l ermittelt aufgrund der Daten 2012–2020 (Betriebsdaten: gkw; Auswertung: VAW).
Die tatsächlich durchgeführte Ausserbetriebnahme (später und länger) ist in Abbildung 92 dargestellt.

5.7 Wirtschaftlichkeit von Revisionsmassnahmen

Im KW Fieschertal ist die Wirkungsgradhistorie jeder MG vom Jahr 2012 bis 2020 lückenlos bekannt (Abschnitt 5.3.3). Dies erlaubt, die Produktionseinbussen und Mindereinnahmen infolge Wirkungsgradreduktionen zu berechnen. Dann wird untersucht, welches Wirkungsgraddefizit jeweils im Folgejahr zu erwarten ist. Zusammen mit den Kosten der Instandhaltungs- oder Erneuerungsmassnahmen lässt sich die Wirtschaftlichkeit von Revisionsmassnahmen im Rückblick untersuchen. So kann abgewogen werden, in welchem Winter eine grosse Laufradrevision eingeleitet werden soll.

5.7.1 Produktionseinbussen und Mindereinnahmen infolge Wirkungsgradreduktionen

Abbildung 102 zeigt die monatlichen Produktionen der beiden MG (Mittelwerte über den Untersuchungszeitraum). Die Unterschiede zwischen den beiden MG resultierten durch temporäre Nichtverfügbarkeiten bzw. Einschränkungen wegen Bauarbeiten oder zeitweisen Priorisierungen einer MG und sind nicht weiter von Bedeutung. Jede der beiden MG produzierte etwa 80 GWh/Jahr.

Bei diesem alpinen Hochdruck-Laufwasserkraftwerk erfolgt der Grossteil der Produktion wie erwartet in den Sommermonaten. Im Juli und im August wurden je mehr als ein Viertel der Jahresproduktion erzielt. Im Schnitt entfiel 92 % der Jahresproduktion auf das Sommerhalbjahr (April bis September, gemäss Definition in der Schweizer Elektrizitätsstatistik). Es ist also wichtig, dass die MG im Sommerhalbjahr möglichst uneingeschränkt zur Verfügung stehen. Im Winterhalbjahr hingegen sind Revisionen ohne Produktionsverluste durchführbar, da eine MG für mehrere Monate ausser Betrieb gehen kann.

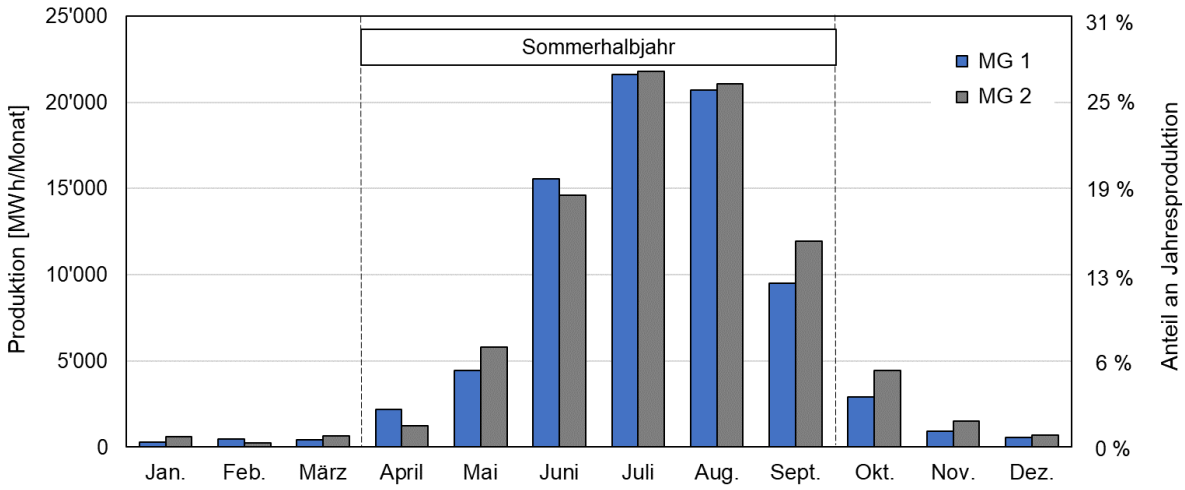


Abbildung 102: Verteilung der Produktion des KW Fieschertal im Jahreslauf (Mittelwerte 2012–2020; Betriebsdaten: gkw).

Die Wirkungsgradhistorien der MG 1 und 2 sind im Abschnitt 5.3.3 in der Abbildung 78 und Abbildung 79 dargestellt. Die Differenz zwischen dem (in der Regel anfänglichen) Referenzwirkungsgrad und dem zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhandenen Wirkungsgrad wird als Wirkungsgraddefizit bezeichnet. Bei jeder MG wurde der Wirkungsgrad gemäss der ersten SNM als Referenzwirkungsgrad verwendet. Seitdem bei der MG 2 im April 2017 das Laufrad 5 der neuen Laufradgeneration eingesetzt worden war, wurde dessen anfänglicher Wirkungsgrad (ca. 0.4 % höher) als Referenzwirkungsgrad bei der MG 2 verwendet.

Aus dem Verlauf des Wirkungsgraddefizits und der typischen monatlichen Produktionen aus der vorherigen Abbildung wurden die Historien der monatlichen Produktionsverluste berechnet. Mit einem angenommenen Grosshandelspreis von 50 CHF/MWh wurden die entsprechenden Mindereinnahmen berechnet. Diese kann man auch als «Kosten» der Produktionsverluste bezeichnen.

In der folgenden Abbildung 103 sind diese Mindereinnahmen infolge der aufgetretenen Wirkungsgradreduktionen für die MG 1 und MG 2 kumuliert über den Untersuchungszeitraum dargestellt. Ein fast horizontaler Kurvenverlauf resultiert jeweils im Winter, da die Produktion dann unbedeutend ist. Im Sommer hingegen resultieren aufgrund der grossen Produktion steile Anstiege, falls auch das Wirkungsgraddefizit durch den zunehmenden Verschleiss angewachsen ist. Dies war beispielsweise bei der MG 1 im Jahr 2017 der Fall. Mit dem stark abgenutzten Laufrad 1, das dann im sechsten Einsatzjahr seit seiner grossen Revision war, betrug das Wirkungsgraddefizit im Mittel jenes Jahres etwa 1.4 %. So resultierten über die Schwebstoffsaison 2017 Mindereinnahmen von 57 kCHF.

Über die betrachteten neun Jahre gingen also infolge von reduzierten Wirkungsgraden für die MG 1 etwa 190 kCHF und für die MG 2 etwa 120 kCHF verloren. Dies entspricht im Mittel wirkungsgradbedingten Umsatzeinbussen von ca. 17 kCHF/Jahr pro MG.

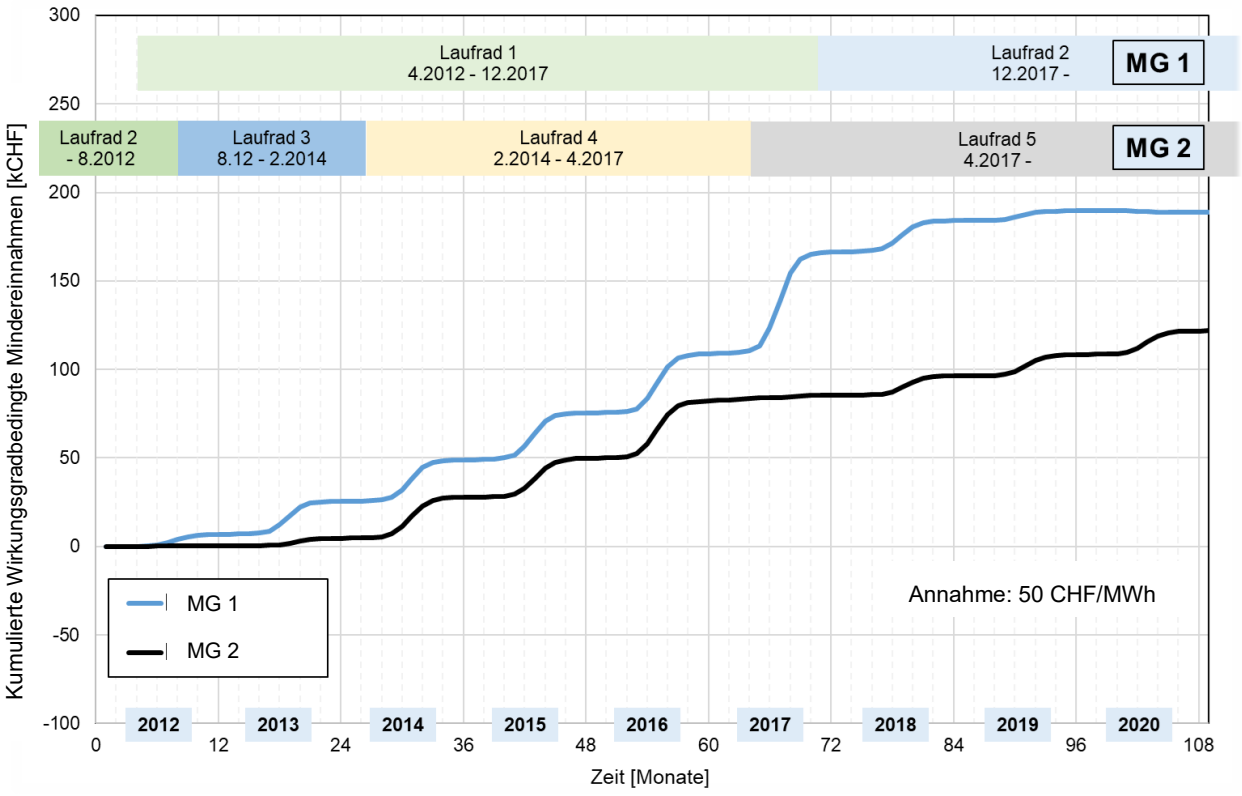


Abbildung 103: Kumulierte Mindereinnahmen infolge reduzierten Wirkungsgraden für MG 1 und 2 im KW Fieschertal 2012–2020 (Auswertung: HSLU).

Für jedes Jahr und jede MG wurde das mittlere Wirkungsgraddefizit über die Schwebstoffsaison bestimmt. Näherungsweise wurde dafür der Mittelwert aus den Ablesungen in den Wirkungsgradhistorien zum Beginn und Ende der Schwebstoffsaison verwendet.

In der Abbildung 104 sind die jährlichen Mindereinnahmen in Funktion des Wirkungsgraddefizits über eine Schwebstoffsaison dargestellt. Die Datenpunkte folgen wie erwartet einem linearen Zusammenhang (jährliche Mindereinnahme = jährliche Produktion · mittleres Wirkungsgraddefizit · Strompreis). Die leichte Streuung der Punkte ergibt sich daraus, dass sich das Wirkungsgraddefizit nicht in jedem Jahr gleichartig und der monatlichen Produktion entsprechend über die Schwebstoffsaison entwickelte. Weiter ist auch der Einfluss eines 20 % höheren oder tieferen Strompreises dargestellt. Für Wirtschaftlichkeitsüberlegungen zu zukünftigen Revisionsarbeiten sind die aktuellen Strompreise zu verwenden.

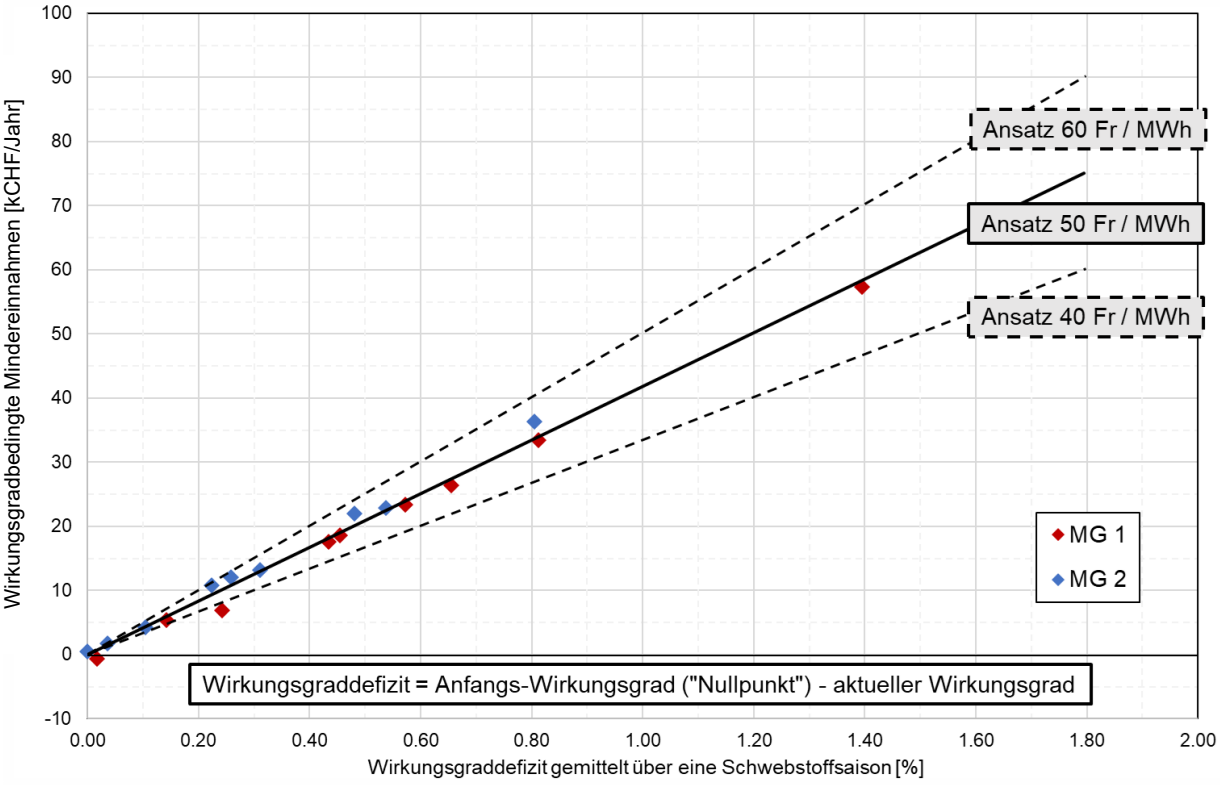


Abbildung 104: Jährliche Mindereinnahmen für die MG 1 und 2 im KW Fieschertal je nach mittlerem Wirkungsgraddefizit 2012–2020 (Auswertung HSLU).

5.7.2 Schätzung des Wirkungsgraddefizits für das kommende Jahr

Um jeweils am Ende einer Schwebstoffsaison betriebswirtschaftlich abwägen zu können, welche Revisionsarbeiten an den Laufrädern durchgeführt werden sollen, ist es erforderlich, das Wirkungsgraddefizit am Ende der kommenden Schwebstoffsaison abzuschätzen. Im Fall der Revision vor Ort spielen das aktuelle Wirkungsgradniveau, die Wirkungsgradverbesserung durch das Schleifen und Nachbeschichten (Massnahmen «G» oder «G+C» in der Tabelle 11) und die zu erwartende Wirkungsgradreduktion in der kommenden Schwebstoffsaison eine Rolle. Die letzteren beiden Elemente hängen vom aktuellen Wirkungsgradniveau ab (das Schleifen verbessert den Wirkungsgrad mehr, wenn die Mittelschneiden ausgeprägt stumpf waren; und aufgrund der progressiven Schädigung ist bei einem abgenutzten Laufrad über ein Jahr eine grössere Wirkungsgradabnahme als bei einem neuwertigen zu

erwarten). Um diese teilweise gekoppelten Effekte zu berücksichtigen, wurde für beide MG der Wirkungsgrad am Ende eines Jahres in Funktion des Werts am Ende des Vorjahrs aus den Wirkungsgradhistorien (Abbildung 78 und Abbildung 79) ausgewertet. So resultierte die Abbildung 105. Wiederum stammen die roten Datenpunkte von der MG 1 und die blauen von der MG 2. Bei den Datenpunkten ist angegeben, auf welche Jahre und Vorjahre sie sich beziehen. Ein Ablesebeispiel: Für den Punkt «15 / 16» bei der MG 2 war am Ende der Schwebstoffsaison 2015 ein Wert von −0.7 % in der Historie. Nach einem vorübergehenden Anstieg infolge der Revisionsarbeiten vor Ort sank dieser Wert bis zum Ende der darauffolgenden Schwebstoffsaison auf −1.1 %.

In Abbildung 105 würden alle Punkte auf der 1:1-Linie liegen, wenn die Wirkungsgrade über ein Jahr unverändert blieben. Die meisten Punkte liegen wie erwartet unter der 1:1-Linie, da der Wirkungsgrad am Ende der nächsten Schwebstoffsaison üblicherweise tiefer ist (mit Ausnahme der bei der Wirkungsgradhistorien diskutierten möglichen positiven Auswirkungen der Rauheitsreduktion in den Bechern und des Schleifens). Es wurde näherungsweise eine lineare Trendlinie eingetragen, welche steiler verläuft als die 1:1-Linie, was einen progressiven Schadensverlauf widerspiegelt.

Dieser Trend wurde nun dazu verwendet, aufgrund des Wirkungsgraddefizits am Ende der betrachteten Schwebstoffsaison das Wirkungsgraddefizit am Ende der kommenden Schwebstoffsaison zu prognostizieren. Nebst einer «mittleren» Linie sind auch die Linien für die «optimistischen» und «pessimistischen» Erwartungswerte im Diagramm angedeutet.

Wenn also im KW Fieschertal die Wirkungsgradhistorie am Ende einer Schwebstoffsaison einen Wert von beispielsweise −1 % aufweist und die üblichen Revisionsarbeiten vor Ort durchgeführt werden, kann am Ende der kommenden Schwebstoffsaison ein Wert von −1.45 ±0.4 % erwartet werden.

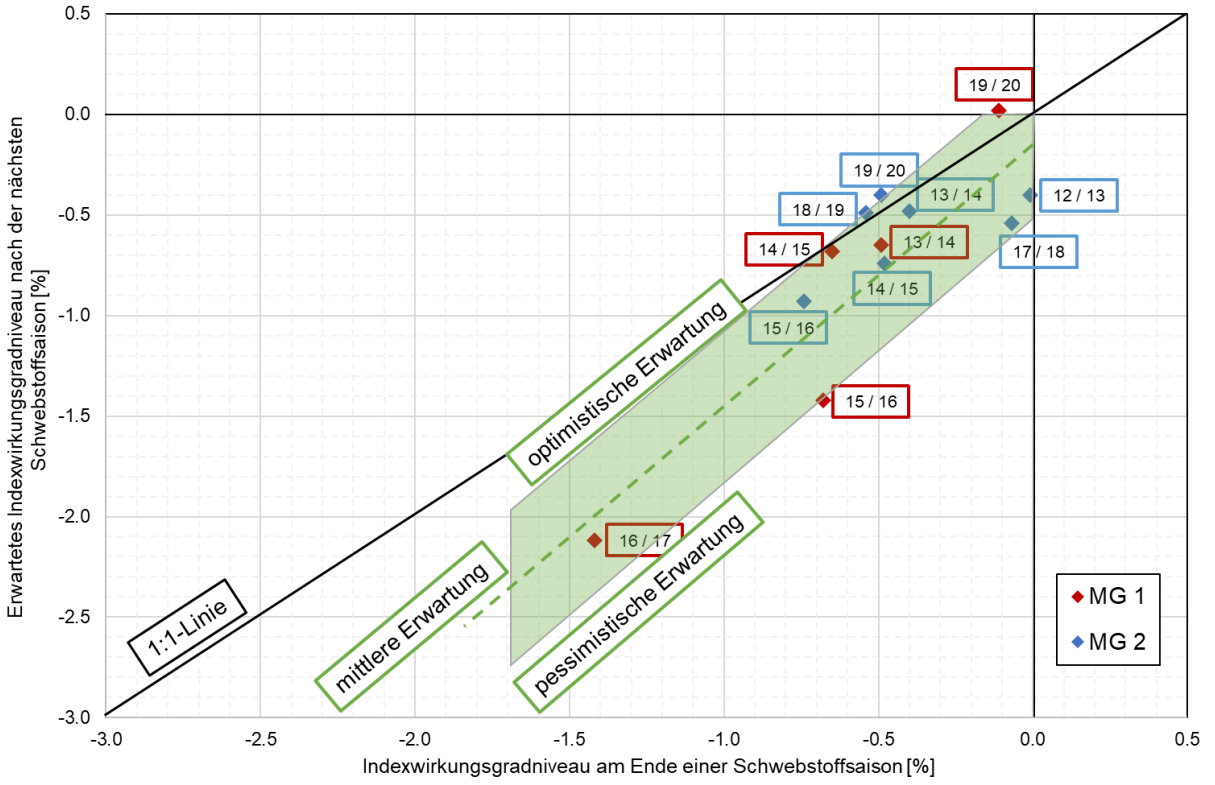


Abbildung 105: Erwartetes Indexwirkungsgradniveau nach der nächsten Schwebstoffsaison in Funktion des Indexwirkungsgradniveaus am Ende der betrachteten Schwebstoffsasion, ausgewertete Datenpunkte vom KW Fieschertal 2012–2020 (Auswertung: HSLU).

5.7.3 Typische Kosten und Intervalle von kleinen und grossen Revisionen

Im KW Fieschertal hat es sich bewährt, die Laufradbecher vor Ort durch Schleifen und Nachbeschichten revidieren zu lassen, falls die Beschichtung lokal so beschädigt wurde, dass stellenweise das blanke Grundmaterial sichtbar ist. Solche kleinen Revisionen sind in der Regel in jedem Winter erforderlich, ausser in Jahren mit aussergewöhnlich geringer Schwebstofffracht wie im Jahr 2014. Durch das Nachbeschichten wird normalerweise die weitere Abrasion des Grundmaterials in der nächsten Schwebstoffsaison weitgehend vermieden. Das Schleifen ist Voraussetzung für das Nachbeschichten und kann die Wirkungsgradabnahme von der vorherigen Schwebstoffsaison teilweise kompensieren. Solche Laufradrevisionen vor Ort können in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren durchgeführt werden. Dabei entfernt sich aber die Geometrie der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten zunehmend von der ursprünglichen Geometrie.

Schliesslich wird eine grosse, externe Revision erforderlich, bei der die ursprüngliche Geometrie u.a. durch Aufschweissen wiederhergestellt wird (Abschnitt 2.2.6). Dafür muss das Laufrad ausgebaut und eine neuwertiges eingebaut werden (Laufradwechsel). Im KW Fieschertal ist ein Laufradwechsel alle etwa sechs Jahre erforderlich. Die Einsatzdauer eines Laufrads seit seiner vorherigen grossen Revision hängt aber von der tatsächlichen Schwebstoffbelastung und weiteren Faktoren ab.

Eine kleine Revision kostete etwa 5 % des Anschaffungspreises eines neuen Laufrads, wenn beide MG im selben Winter nachzubeschichten waren. Darin sind auch die Kosten für Revisionsarbeiten an weiteren Komponenten im Turbinengehäuse wie Düsenschutzdächer und Strahlablenker enthalten. Eine grosse Revision kostete im Mittel etwa 40 % des Neupreises eines Laufrads. Da die grossen Revisionen einen bedeutenden Kostenfaktor darstellen, wurde der betriebswirtschaftlich optimale Zeitpunkt eines Laufradwechsels, der in der Regel eine grosse Revision auslöst, untersucht.

5.7.4 Untersuchung des optimalen Zeitpunkts für einen Laufradwechsel

Je länger das Intervall zwischen den grossen Revisionen ist, desto kleiner werden die dadurch verursachten jährlichen Kosten (Annuität). Andererseits nimmt der Wirkungsgrad progressiv ab. Dementsprechend nehmen die Produktionseinbussen und Mindereinnahmen immer stärker zu. Für den Kraftwerksbetreiber stellt sich daher jeweils am Ende einer Schwebstoffsaison die Frage, ob im Winter

- das Laufrad gewechselt (Variante A) oder
- lediglich die üblichen Revisionsarbeiten vor Ort durchgeführt werden sollen (Variante B).

Diese Frage wurde aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen an einem Beispiel untersucht, nämlich im Spätherbst 2016 für das Laufrad 1 in der MG 1. Das Laufrad war dann seit seiner grossen Revision während bereits während fünf Schwebstoffsaisons im Einsatz. Das Wirkungsgraddefizit betrug zu diesem Zeitpunkt −1.4 %, wie der gelb markierte Punkt auf der schwarzen Linie in Abbildung 106 zeigt. Bei dieser Linie handelt es sich um die Ausgleichskurve der Wirkungsgradhistorie aus Abbildung 78.

In der Variante B wird das Laufrad ein Jahr später für die grosse Revision ausgebaut. Variante B wurde ausgeführt (Realität), die Variante A wurde als Alternative untersucht (Szenario).

Für das Jahr nach dem betrachteten Zeitpunkt wurden folgende Wirkungsgrade erwartet:

- Variante A: Ein neuwertiges Laufrad hat anfangs kein Wirkungsgraddefizit (0 %). Gemäss der Abbildung 105 wird geschätzt, dass das Wirkungsgraddefizit am Ende der nächsten Schwebstoffsaison 0.15 % (mittlere Erwartung) bis 0.5 % (pessimistische Erwartung) betrage. Weiter ist die mittlere Wirkungsgradabnahme von 0.35 % pro Schwebstoffsaison (Tabelle 10; Mittelwert aller 17 bisher vorliegenden Werte, auch von nicht neuwertigen Laufrädern) bekannt. Das Wirkungsgraddefizit am Ende der Schwebstoffsaison wurde auf ca. 0.35 % geschätzt (blaue gestrichelte Linie in Abbildung 106).

– Variante B: Mit den Revisionsarbeiten vor Ort wird eine Wirkungsgradsteigerung von 0.12 % gemäss Tabelle 11 erwartet (Mittelwert von bisher 8 Fällen mit Schleifen + Nachbeschichten «G + C»). Ausgehend vom Wert der Wirkungsgradhistorie zum Betrachtungszeitpunkt (−1.4 %) wurde also zu Beginn der kommenden Schwebstoffsaison ein Wirkungsgraddefizit von ca. −1.3 % geschätzt (rote gestrichelte Linie in Abbildung 106). Das Wirkungsgraddefizit am Ende der folgenden Schwebstoffsaison (Spätherbst 2017) wurde wiederum ausgehend von den −1.4 % mit der mittleren Trendlinie in Abbildung 105 auf ca. −2.0 % geschätzt.

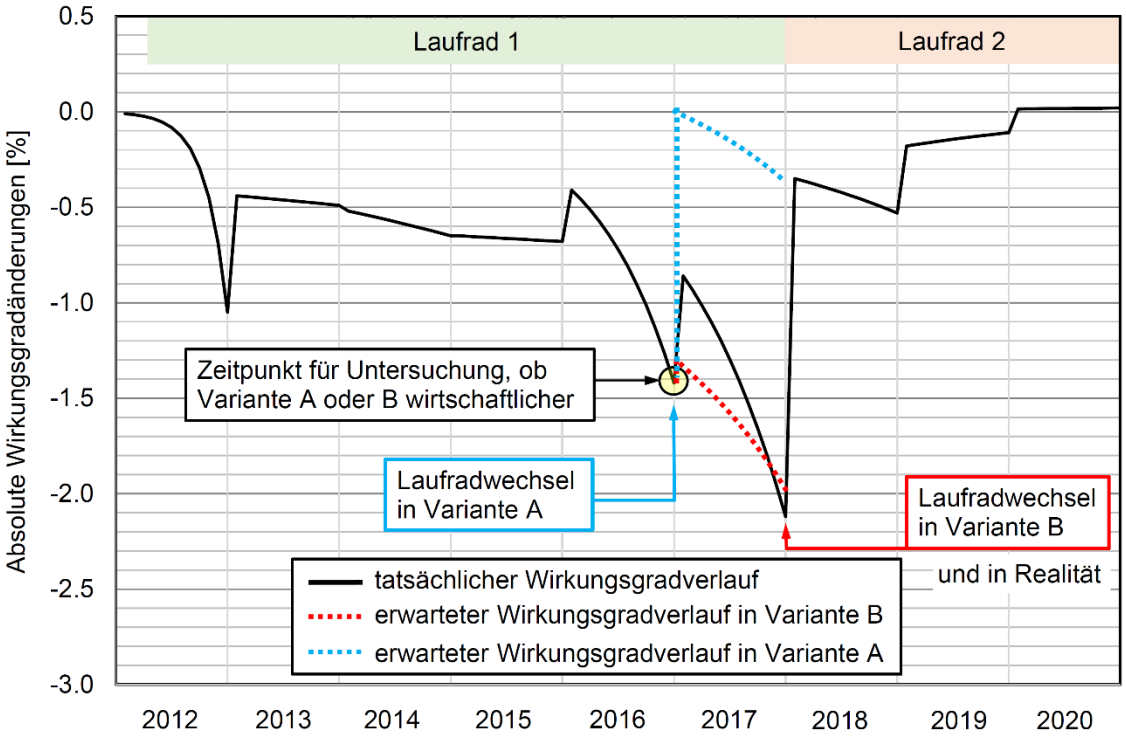


Abbildung 106: Wirkungsgradhistorie der MG 1 mit erwarteten Wirkungsgradverläufen je nach Zeitpunkt des Laufradwechsels (Auswertung Wirkungsgradhistorie: HSLU).

In der Tabelle 18 werden die erwarteten Kosten der beiden Varianten bis zum Beginn der übernächsten Schwebstoffsaison betrachtet, also vom Spätherbst 2016 bis im Frühjahr 2018 (Abbildung 107). So kommen auch in der Variante B die Kosten einer grossen Revision vor.

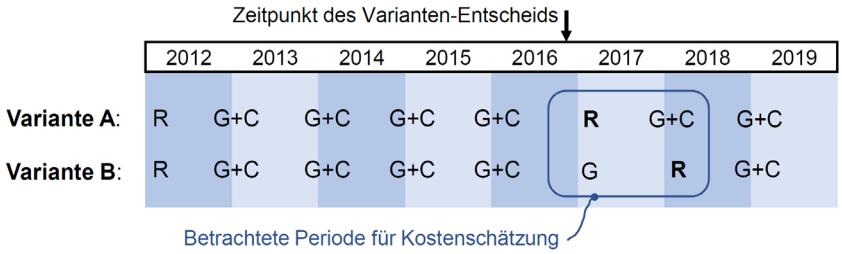


Abbildung 107: Schema der beiden Varianten für Laufradwechsel der MG 1 des KW Fieschertal zu zwei Zeitpunkten (R bezeichnet Laufradwechsel mit anschliessender grosser Laufradrevision beim Hersteller, G steht für Schleifen und C für Nachbeschichten vor Ort).

Die Kosten für eine grosse Revision (R) werden auf die Anzahl Einsatzjahre eines Laufrads zwischen seinen grossen Revisionen abgeschrieben. In der Variante A können diese Kosten auf fünf Jahre abgeschrieben werden, in der Variante B auf sechs Jahre. Da die Düsenbauteile aus praktischen Gründen mit den Laufrädern zusammen ersetzt werden, sind die Düsenbauteile ebenfalls auf 5 bzw. 6 Jahre abzuschreiben. Wenn die grosse Laufradrevision ein Jahr später ausgeführt werden kann (Variante B), werden Kosten von ca. 11 kCHF gespart.

Wie in Abschnitt 4.4 erwähnt, wurde im Winter 2016/2017 bei MG 1 ausnahmsweise auf das Nachbeschichten verzichtet, da bei der anderen MG aufgrund eines Laufradwechsels keine Revisionsarbeiten vor Ort erforderlich waren und der Aufwand für das Nachbeschichten einer einzelnen MG als zu gross angesehen wurde. Im betrachteten Zeitraum fallen also für die Revisionen vor Ort in Variante A (Schleifen und Nachbeschichten in Abbildung 107) etwas höhere Kosten an als in Variante B (nur Schleifen).

Nebst den Revisionskosten sind auch die Mindereinnahmen infolge des Produktionsverlusts wegen reduziertem Wirkungsgrad zu beachten:

- Variante A: Es wurde ein Wirkungsgraddefizit von lediglich ca. 0.18 % im Mittel über das Jahr erwartet (Mittelwert von 0 % und −0.35 %, blaue gestrichelte Linie in Abbildung 106). Bei einem angenommenen Strompreis von 50 CHF/MWh resultieren damit gemäss Ablesung in der Abbildung 104 Mindereinnahmen von ca. 7 kCHF.
- Variante B: Es wurde ein Wirkungsgraddefizit von ca. 1.65 % im Mittel über das Jahr erwartet (Mittelwert von −1.3 % und −2.0 %, rote gestrichelte Linie in Abbildung 106). Dies führt gemäss Ablesung in der Abbildung 104 zu erheblichen Mindereinnahmen von ca. 68 kCHF.

In Summe ist die Variante A um ca. 30 kCHF bzw. ca. 23 % wirtschaftlicher als die Variante B. Dies hätte zur Empfehlung geführt, den Laufradwechsel im Winter 2016/2017 durchzuführen. In der Realität und ohne Kenntnis der unterdessen vorliegenden Auswertungen wurde das Laufrad jedoch erst ein Jahr später (im Winter 2017/2018) ausgewechselt.

Tabelle 18: Kostenvergleich für zwei Laufrad-Revisionsvarianten im KW Fieschertal (MG 1, Spätherbst 2016 bis Frühjahr 2018).

Kostenelement	Variante A Laufradwechsel im betrachteten Winter	Variante B Laufradwechsel im nächsten Winter	Bemerkungen
Annuität für grosse Laufradrevision und Ersatz der Düsenbauteile	79 kCHF	68 kCHF	Variante B etwas günstiger, weil Amortisationsdauer ein Jahr länger
Revisionsarbeiten vor Ort	46 kCHF	26 kCHF	Variante B etwas günstiger (ohne Nachbeschichten)
Wirkungsgradbedingte Mindereinnahmen	7 kCHF	68 kCHF	Variante A ist vorteilhaft, weil Turbine wieder deutlich effizienter
Total	132 kCHF	162 kCHF	Variante A ist um ca. 30 kCHF wirtschaftlicher

Im Nachhinein konnte der erwartete und der tatsächliche Wirkungsgradverlauf verglichen werden (rote gestrichelte und schwarz ausgezogene Linie in Abbildung 106). Durch das Schleifen der Mittelschneiden und der Ausschnitte im Winter 2016/2017 nahm der Wirkungsgrad deutlich stärker zu als aufgrund des mittleren Erfahrungswerts erwartet wurde. Aber in der Schwebstoffsaison 2017 nahm der Wirkungsgrad rasch stark ab und sank etwa auf das erwartete Niveau. Die Prognose des Wirkungsgrads am Ende der kommenden Schwebstoffsaison war also realistisch und hätte die Wahl der wirtschaftlicheren Variante ermöglicht.

5.7.5 Bemerkungen zum optimalen Zeitpunkt für einen Laufradwechsel

Dieselbe Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wie in Abschnitt 5.7.4 wurde auch für ein Jahr früher (Ende 2015) durchgeführt, nachdem das Laufrad während vier Schwebstoffsaisons im Einsatz gewesen war und das Wirkungsgraddefizit 0.65 % betrug. Zu jenem Zeitpunkt konnte der Laufradwechsel aber noch nicht wirtschaftlich gerechtfertigt werden, da diese Revisionskosten bis damals aufgrund der um ein Jahr kürzeren Abschreibungsdauer höher gewesen wären und die wirkungsgradbedingten Mindereinnahmen noch nicht so bedeutend waren wie ein Jahr später.

Die Betrachtung der Revisionsentscheide zu den beiden Zeitpunkten zeigt, dass im Fall des KW Fieschertal der Laufradwechsel ab einem Wirkungsgraddefizit unter 0.7 % wirtschaftlich interessant werden kann. Bei höheren Strompreisen wird die Wirtschaftlichkeit noch stärker durch wirkungsgradbedingte Mindereinnahmen beeinflusst. Es wird empfohlen, die realen Strompreise zu berücksichtigen.

Nebst den Strompreisen und den Informationen über die Revisionskosten sind die Wirkungsgradhistorien – nachgeführt bis zum Zeitpunkt des Revisionsentscheids – die unentbehrliche Grundlage, um Revisionsentscheide fundiert fällen zu können. Erstens geben sie das aktuelle Wirkungsgraddefizit an, welches u.a. für die Berechnung der erwarteten wirkungsgradbedingten Mindereinnahmen erforderlich ist. Und zweitens können aus den Wirkungsgradhistorien typische Werte und deren Bandbreite für jährliche Wirkungsgradabnahmen oder bestimmte Revisionsarbeiten ermittelt werden, welche für die Prognose der wirtschaftlichen Auswirkungen von Revisionsmassnahmen nützlich sind.

Für die Planung von Revisionsarbeiten oder den Ersatz von Turbinenbauteilen sind nebst dem hydroabrasiven Verschleiss und seiner Auswirkungen ggf. weitere Aspekte wie Ermüdung der Bauteile, die Verfügbarkeit von Personal und Dienstleistern, Beschaffungsstrategien oder andere anstehende Arbeiten am Kraftwerkspark zu berücksichtigen.

Die betriebswirtschaftliche Optimierung des Laufradeinsatzes ist auch aus energiewirtschaftlicher Sicht zu begrüssen. Wenn das Laufrad im dargestellten Beispiel ein Jahr früher ausgewechselt worden wäre, wären in diesem Jahr etwa $(1.65 - 0.15\ \%) \cdot 80\ \text{GWh/a} \approx 1.2\ \text{GWh}$ mehr produziert worden, womit etwa 300 Haushalte hätten versorgt werden können (Annahme: 4000 kWh/Jahr und pro Haushalt gemäss Abschnitt 1.1).

6 Wissenstransfer

6.1 Fachtagung 2015 in Horw

Am 30.09.2015 wurde in Horw an der Hochschule Luzern die erste Tagung zum Thematik „*Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Pelton-Turbinen*“ durchgeführt. Die Tagung wurde von der HSLU und der VAW mit Unterstützung des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbands organisiert.

Den Schwerpunkt der Tagung bildete das in diesem Bericht beschriebene Forschungsprojekt mit den Ergebnissen, die bis 2015 vorlagen. Die Tagung wurde durch Beiträge von Referenten aus der Praxis ergänzt: So berichtete beispielsweise Ing. Rainer Maldet über die Erfahrungen der TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG betreffend Turbinenabrasion am Kraftwerk Dorferbach in Österreich. Insbesondere die praxisnahen Monitoring-Methoden, die Möglichkeit der Betriebsoptimierung durch vorübergehende Ausserbetriebnahmen während aussergewöhnlich hohem Schwebstoffaufkommen (Gewittern), sowie die gesamthafte Betrachtung des Feinsedimentmanagements an Wasserkraftanlagen stiessen auf reges Interesse. Im Foyer vor dem Vortragssaal hatten die Tagungsteilnehmer weiter die Möglichkeit, sich an Ständen der Industriepartner zu Messtechnik, Beschichtungen und Ingenieurdienstleistungen zu informieren.

An der Tagung nahmen etwa 70 Vertreter von Kraftwerksbetreibern, Turbinen- und Messgeräteherstellern, Ingenieurbüros sowie von Hochschulen teil (Abbildung 108). Die Teilnehmer kamen vorwiegend aus dem deutschsprachigen Alpenraum (Schweiz, Österreich, Deutschland, Italien). Wie die positiven Rückmeldungen zeigten, entsprach die Tagung einem Bedürfnis der beteiligten Fachleute.

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).

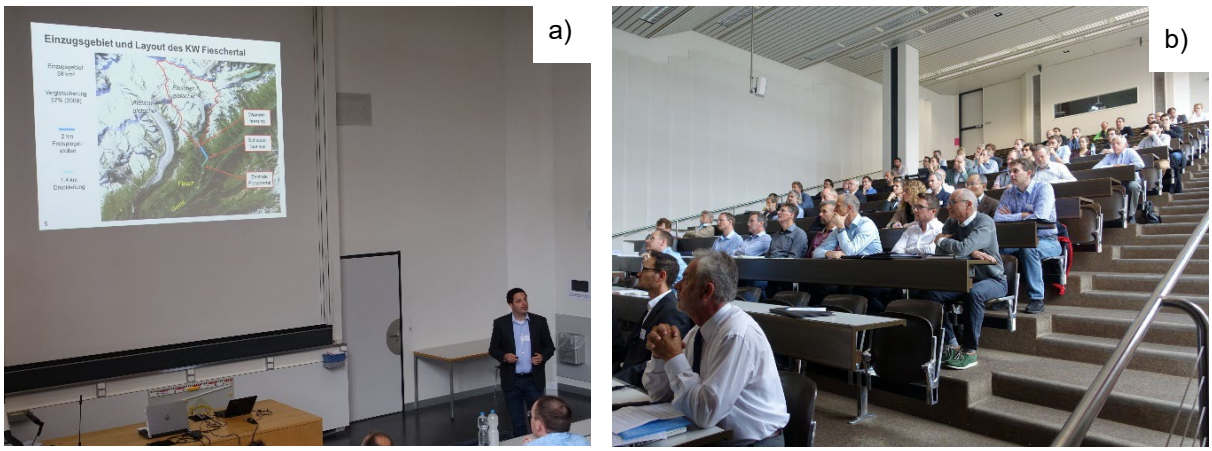


Abbildung 108: Fachtagung „*Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen von Peltonturbinen*“ vom 30.09.2015 in Horw: a) A. Abgottspon erläuterte die Untersuchungen am KW Fieschertal und b) Teilnehmer (Fotos: HSLU).

6.2 Workshop 2016 in Grenoble

Im Rahmen des "*28th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*" führten die VAW und die HSLU am 06.07.2016 in Grenoble den Workshop "*Dealing with hydro-abrasive erosion at high-head hydropower plants*" durch. Dieser englischsprachige Anlass war auf internationale Teilnehmer ausgerichtet. Grenoble ist ein geschichtsträchtiger Ort für die Elektrizitätserzeugung aus Wasserkraft; am Ende des 19. Jahrhunderts wurde dort der Begriff "*La Houille Blanche*" ("weisse Kohle") geprägt. Im Workshop wurden der hydro-abrasive Verschleiss an Peltonturbinen und Druckleitungen einerseits anhand der Studie am KW Fieschertal und andererseits anhand internationaler Beiträge besprochen.

Die VAW (Prof. Dr. Robert Boes, Dr. Ismail Albayrak und David Felix) und die HSLU (Prof. Dr. T. Staubli, Prof. Dr. P. Gruber und André Abgottspon) wirkten an folgenden sieben Konferenzbeiträgen mit, die einen Bezug zu dem in diesem Bericht behandelten Forschungsprojekt haben (siehe Abschnitt 9.1):

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

Der Workshop wurde von etwa 50 Ingenieuren und Wissenschaftlern u.a. aus Indien, USA, Norwegen, Deutschland und Frankreich besucht (Abbildung 109). Die Tagungsbeiträge wurden zusätzlich zur Open-Access-Publikation in einer VAW-Mitteilung (VAW 2016) zusammengestellt, welche ebenfalls online frei verfügbar und für «Praktiker» einfacher auffindbar ist.



Abbildung 109: Eindrücke vom Workshop über hydro-abrasiven Verschleiss an Hochdruckwasserkraftanlagen vom 06.07.2016 in Grenoble: Prof. Dr. Robert Boes moderiert die Diskussion mit den internationalen Teilnehmern (Fotos: VAW).

6.3 Fachtagung 2021 in Naters

Am 26.08.2021 führten die VAW und die HSLU die Fachtagung "*Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Pelton-Turbinen*" im World Nature Forum in Naters bei Brig durch (Abbildung 110). Der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband unterstützte die Tagung (wie im Jahr 2015) als Medienpartner. Der Veranstaltungsort wurde nicht zufällig gewählt, befinden sich doch im Kanton Wallis mit seiner imposanten Bergwelt zahlreiche Mittel- und Hochdruck-Wasserkraftanlagen mit diesem Turbinentyp. Schwerpunkt der Tagung bildeten die neueren Ergebnisse aus der Studie im KW Fieschertal seit den vorhergehenden Tagungen. Speziell wurde auf verschiedene Messmethoden zum Schwebstoffmonitoring und zur Quantifizierung der Abrasion an den Laufradbechern eingegangen.

An folgenden Tagungsbeiträgen waren Mitarbeiter der beiden Hochschulen beteiligt:

- Umgang mit Sedimenten an Wasserkraftanlagen (Prof. Dr. Robert Boes, VAW);
- Hydro-abrasiver Verschleiss an Turbinen (Prof. Dr. Thomas Staubli und Prof. Dr. Ernesto Casartelli, HSLU);
- Übersicht und Beschreibung des KW Fieschertal (Dr. David Felix, VAW);
- Schwebstoffmessungen und Sedimentfrachten (Dr. David Felix, VAW);
- Verschleiss an den Peltonbechern (Martin von Burg, HSLU);
- Abschätzung der Turbinenabrasion (Dr. David Felix, VAW);
- Wirkungsgradänderungen (André Abgottspon, HSLU);
- Ausserbetriebnahmen während Hochwasser (Prof. Dr. Robert Boes, VAW);
- Wirtschaftlichkeitsüberlegungen (André Abgottspon, HSLU).



Abbildung 110: Fachtagung vom 26.08.2021 in Naters, u.a. mit Vorträgen von Prof. Dr. Robert Boes, Prof. Dr. Thomas Staubli, Prof. Dr. Ernesto Casartelli, Dr. David Felix, André Abgottspon und Martin von Burg (von oben links nach unten rechts, Fotos: VAW).

Die Tagung wurde von 82 Personen aus der Schweiz, Österreich, Deutschland und Italien besucht. Unter den Teilnehmern waren vor allem Ingenieure und Wissenschaftler von Kraftwerksbetreibern, Ingenieurbüros, Turbinen- und Messgeräteherstellern sowie Hochschulen. In der Diskussion im Anschluss an die Vorträge berichteten einige Kraftwerksbetreiber über Erfahrungen im Umgang mit Sedimenten und Turbinenabrasion an ihren Anlagen.

Die Teilnehmer schätzten die unkomplizierte Möglichkeit des Wissensaustauschs an einer solchen eintägigen Tagung, die einen klar definierten fachlichen Fokus aufwies und dank der Durchführung im Wallis für viele Interessierte mit relativ geringem Aufwand besucht werden konnte. Für den Wissensaustausch mit der Praxis sind solche Tagungen, die in einer Landessprache durchgeführt werden, eine wichtige Ergänzung zu den international ausgerichteten Tagungen auf Englisch.



Abbildung 111: Fachtagung vom 26.08.2021 in Naters: Prof. Dr. Robert Boes diskutiert die Möglichkeit der vorübergehenden Ausserbetriebnahme von Hochdruck-Laufwasserkraftanlagen zur Vermeidung von übermässigem Turbinenverschleiss (Foto: VAW).

7 Erkenntnisse und Folgerungen

7.1 Schwebstoffmonitoring

In den Jahren 2012–2020 betrug die *SSC* im Triebwasser des KW Fieschertal im Mittel 0.53 g/l. Die *SSC* stieg im Sommer vor allem infolge von Regenereignissen ab und zu auf mehrere g/l. Infolge von Resuspensions-Ereignissen in der Übergangszeit überschritt sie mehrmals pro Jahr ca. 10 g/l und erreichte 50 g/l bzw. 110 g/l in zwei Hochwassern. Die Medianpartikelgrösse betrug im Mittel 11 µm (im Bereich von Mittelsilt) und stieg während Resuspensions-Ereignissen bis über 100 µm (im Bereich von Feinsand). Die jährlichen Schwebstofffrachten in der Druckleitung betrugen bis ±43 % des Mittelwerts der neun Jahre. Da die turbinierten Wasservolumina weniger variierten, waren die mittleren *SSC* pro Jahr unterschiedlich.

Wie z.B. das Schwebstofftransport-Ereignis 2019 zeigte, treten hohe *SSC* (> 10 g/l) nicht stets bei hohen Zuflüssen auf und es ist kaum möglich, hohe *SSC* aufgrund der Betrachtung von Bildern von Überwachungskameras stets zuverlässig zu erkennen. Daher sind Einrichtungen für die *SSC*-Messung in Echtzeit und automatische Alarme empfehlenswert.

Für möglichst frühzeitige Alarme sind Schwebstoffmessungen an Wasserfassungen, oder falls möglich weiter stromaufwärts, am nützlichsten. Um den relevanten *SSC*-Messbereich abzudecken und eine ausreichende Zuverlässigkeit zu erreichen, sind oft Kombinationen von Messgeräten und standortspezifische Kalibrierungen erforderlich, wie in Abschnitt 5.1.8 näher beschrieben. Mit den durch die Kraftwerksabschaltungen netto vermiedenen Kosten (Tabelle 16) kann ein Schwebstoffmonitoringsystem, das Investitionen von einigen 10 kCHF erfordert, für eine Anlage wie das KW Fieschertal wirtschaftlich gerechtfertigt werden.

Da grössere Hochwasser und andere bedeutende Schwebstofftransport-Ereignisse nicht häufig vorkommen und die jährlichen Schwebstofffrachten beträchtlich variieren können, sind Messungen über mehrere Jahre erforderlich, um ein vollständiges Bild über das Sedimentaufkommen und das Verhalten der Kraftwerksanlage inklusive ihrem Monitoringsystem zu erhalten (zuverlässige Mittelwerte und einige seltene Ereignisse).

7.2 Monitoring der Turbinenabrasion

Die räumlich verteilte, gut reproduzierbare Messung der Beschichtungsdicken in Peltonbechern mit Schablonen und Kompensation der Sondenabrasion stellt nach Kenntnis der Autoren eine Neuerung dar. Für das routinemässige Laufradmanagement kann der Messaufwand reduziert werden, indem die Beschichtungsdicke nur an ausgewählten Stellen im Becher mit mehr Abrasion, d.h. tendenziell im Bechergrund, überwacht wird. Auf den Mittelschneiden und an den Bechereintrittskanten, an denen die Beschichtungsabrasion kritisch ist, ist das verwendete Schichtdickenmessgerät nicht anwendbar. Die Kenntnis der verbleibenden Schichtdicken in diesen Bereichen ist aber in der Regel auch nicht erforderlich, um über Reparaturarbeiten zu entscheiden.

In Jahren ohne ausserordentliche Schwebstoffbelastung war die Abrasion der Beschichtung in den Bechern unwesentlich. Massgebend war der lokale Verlust der Beschichtung an den Mittelschneiden und Bechereintrittskanten, der zu Abrasion des Grundmaterials führte.

Die Abrasion des Grundmaterials an den Laufradbechern 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

von Wasserkraftanlagen aufgrund des grossen Aufwands weniger geeignet. Charakteristische Grössen für den Abnutzungszustand von Laufradbechern, wie die Mittelschneidenbreite und die Becherausschnittstiefe, lassen sich mit entsprechenden Schablonen und Massstäben mit geringerem Aufwand näherungsweise bestimmen.

Je nach jährlichen Schwebstofffrachten und Laufradzuständen vor der Schwebstoffsaison konnte die Bandbreite von starker Abnutzung (wie in den Jahren 2012 mit Hochwasser oder in den Jahren 2016 und 2017 bei MG 1 ohne Nachbeschichtung) bis zu fast keiner Abnutzung (wie im Jahr 2014) beobachtet werden. Über die Jahre konnte so eingeordnet werden, was «übliche» Abnutzungserscheinungen sind.

Die moderate Abrasion an den hochwertigen Düsenbauteilen erforderte kein detailliertes Monitoring des Zustands der Düsen.

7.3 Wirkungsgradmonitoring

Bei Indexwirkungsgradmessungen nach dem *Sliding-Needle*-Verfahren (SNM) wird die Leistung einer MG während einer halben Stunde von Teil- auf Volllast erhöht und in einer weiteren halben Stunde wieder allmählich reduziert. Im KW Fieschertal sind aufgrund der vorhandenen Instrumentierung (akustische Volumenstrommessung in der Druckleitung und nicht bei jeder MG) die SNM im Einmaschinenbetrieb durchzuführen (Stillstand der anderen MG). Um Produktionsverluste zu vermeiden, werden die SNM ausserhalb der Volllastzeit, d.h. vor Mitte Juni und nach Mitte August durchgeführt.

Die SNM weisen eine genügende Reproduzierbarkeit auf. Im KW Fieschertal ist das Messverfahren im Kraftwerksleitsystem implementiert worden und ermöglicht so dem Betreiber, ohne Anwesenheit eines externen Ingenieurs periodische Messungen durchzuführen. Es wird empfohlen, die Messungen durch einen Spezialisten auswerten und beurteilen zu lassen. Weiter wird empfohlen, ein so genanntes Expertensystem aufzubauen, welches kontinuierliche Plausibilitätsüberprüfungen der Messdaten beinhaltet.

Um die zeitliche Auflösung des Wirkungsgradmonitorings zu erhöhen, wurde eine Methode für das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring entwickelt. Dabei werden Betriebsdaten zusammen mit den Ergebnissen aus den periodisch durchgeführten SNM ausgewertet. Zur Reduktion der Streuung der laufend berechneten Indexwirkungsgrade wurden Mittelungs- und Filterverfahren sowie ein *steady-state*-Detektor eingesetzt. Die entwickelte Methode für das kontinuierliche Wirkungsgradmonitoring kann in einem Kraftwerksleitsystem implementiert werden, um Informationen zur Wirkungsgradentwicklung quasi in Echtzeit (z.B. täglich) zur Verfügung zu stellen.

Ein neuartiger Druckaufnehmer, der frontbündig direkt in die Druckleitung eingebaut werden kann, liefert auch während der Schwebstoffsaisons driftfreie Messdaten, die die Nettofallhöhe angeben. Solche Sensoren tragen dazu bei, den Turbinenwirkungsgrad bei Wasserkraftanlagen mit erhöhter *SSC* zuverlässiger zu überwachen.

Mit dem kontinuierlichen Wirkungsgradmonitoring sind nun auch Informationen über die Wirkungsgradentwicklung in den Sommermonaten verfügbar, in welchen zur Vermeidung von Produktionsverlusten keine SNM durchgeführt werden und aufgrund der hohen Sedimentbelastung die grössten Wirkungsgradabnahmen auftreten.

In den Jahren 2012–2020 wurden Wirkungsgradabnahmen infolge hydro-abrasivem Verschleiss von bis zu 2.1 % gegenüber dem Zustand mit einem neuwertigen Laufrad gemessen. Im Mittel nahm der Wirkungsgrad um 0.35 % pro Schwebstoffsaison ab. Andererseits führte das Schleifen von abgestumpften Mittelschneiden und Bechereintrittskanten (Revisionsmassnahme vor Ort) zu Wirkungsgradzunahmen von bis zu ca. 0.7 % und im Mittel 0.43 %.

Um Produktionsverluste zu vermeiden, konnte die Turbinenabrasion lediglich mit geringer zeitlicher Auflösung, d.h. meist nur vor und nach den Schwebstoffsaisons, gemessen werden. Mit kontinuierlichem Monitoring der Turbinenwirkungsgrade kann auch während des Turbinenbetriebs auf nennenswerte, unerwünschte Veränderungen geschlossen werden. In solchen Fällen kann dann bedarfsgerecht eine Turbineninspektion bzw. -vermessung vorgenommen werden.

7.4 Vorhersage der Turbinenabrasion

Durch die Ermittlung der *Particle Load* pro Becher und der Verbreiterung der Mittelschneiden bzw. der Vertiefung der Becherausschnitte wurde das analytische Abrasionsmodell (Berechnungsformel) gemäss IEC 62364 (2013/2019) für beschichtete Becher von Peltonlaufrädern angepasst und kalibriert. Nach Kenntnis der Autoren waren vor Felix *et al.* (2016d) für diese Anwendung keine Werte der Modellparameter in der Literatur verfügbar. Nun ist es mit den Gleichungen (2) bis (6) und den Werten in Abbildung 80 und Abbildung 81 möglich, für beschichtete Peltonturbinen folgendes abzuschätzen:

- Schwellenwert der *Particle Load* pro Becher $PL_{b,0}$, bis zu welchem keine systematische Abrasion des Grundmaterials an Mittelschneiden und Bechereintrittskanten zu erwarten ist;
- Verbreiterung der Mittelschneiden Δs oder Vertiefung der Becherausschnitte Δc infolge des Anteils von PL_b, der $PL_{b,0}$ übersteigt (d.h. infolge systematischer Abrasion des Grundmaterials);
- Mittlere Abnahme der Schichtdicke in den Bechern; lokal bis dreimal so viel (in der Regel nicht massgebend gegenüber der Abrasion an Mittelschneiden und Bechereintrittskanten);
- *Particle Load PL*, welche mit hochwertigen Düsenbauteilen wie im KW Fieschertal mindestens turbiniert werden kann, bis diese zu ersetzen sind.

Die ersten beiden Anwendungen sind im Beispiel im Abschnitt 5.4.5 aufgezeigt. Die *Particle Loads* lassen sich für eine bestimmte Turbine in Schwebstofffrachten oder Betriebsstunden umrechnen. Es wird darauf hingewiesen, dass auch schon bei $PL_b \leq PL_{b,0}$ die Beschichtung an einzelnen Stellen im Becher vollständig abgetragen werden kann (zufällig auftretende lokale Beschichtungsschäden).

Weil bei der Mehrheit der Datenpunkte die Δs bzw. Δc vernachlässigbar sind, sind die $PL_{b,0}$-Werte verlässlicher bestimmt als die C_g-Werte für die Abrasion des Grundmaterials. Für die Vertiefung der Becherausschnitte wurde eine recht gute Übereinstimmung des C_g-Werts aus der vorliegenden Studie mit den Parametern nach Rai *et al.* (2020b) festgestellt; für die Mittelschneidenverbreiterung resultierte ein 60 % höherer Wert als bei Rai *et al.* (2020b).

Auch wenn im vorliegenden Bericht die Datenbasis gegenüber Felix (2017) verdoppelt werden konnte, ist das Modell noch mit erheblicher Unsicherheit behaftet, da die Kalibrierung bisher nur auf Daten von zwei baugleichen Turbinen beruht. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse des KW Fieschertal auf andere Kraftwerke konnte im Rahmen dieser Studie nicht nachgewiesen und der Einfluss der Turbinengrösse nicht untersucht werden, da ausschliesslich an einem Kraftwerk gemessen wurde.

Die Messungen zeigten, dass die Abrasionstiefen im Lauf einer Schwebstoffsaison zusätzlich zu den im IEC-Modell berücksichtigten Parameter von der Geometrie der Mittelschneiden und Bechereintrittskanten vor der Schwebstoffsaison sowie vom allfälligen lokalen Verlust der Beschichtung abhängt. Im Fall von stumpfen Schneiden wird infolge von Sekundärschäden mehr Material abgetragen, d.h. der Schaden entwickelt sich in Realität progressiv.

Die quantitative Vorhersage von Abrasion ist aufgrund der zahlreichen Einflussgrössen und ihrer vielseitigen Abhängigkeiten herausfordernd. Darum sind Betriebserfahrungen und Messungen an Referenzanlagen weiterhin wichtig für Abrasionsprognosen. Auch in diesem Fall ist das IEC-Modell nützlich,

da es aufzeigt, wie Verschleissgrössen von einer Referenzanlage näherungsweise auf die zu untersuchende Anlage umgerechnet werden können.

7.5 Vorhersage von Wirkungsgradänderungen

Wie bereits bekannt war, gehen Verbreiterungen der Mittelschneiden mit Wirkungsgradreduktionen einher. Dieser Zusammenhang wurde auch für das KW Fieschertal ermittelt (Abbildung 84). Da die Mittelschneidenbreite auf die innere Becherbreite bezogen wurde, wird erwartet, dass sich Wirkungsgradreduktionen für ebenfalls beschichtete Laufräder mit ähnlichem Entwurf auch mit anderen Becherbreiten näherungsweise vorhersagen lassen.

Um Wirkungsgradreduktionen abzuschätzen, wird empfohlen, zuerst die Verbreiterung der Mittelschneiden gemäss dem vorherigen Abschnitt zu schätzen und dann die Abbildung 84 anzuwenden.

Eine direkte Abschätzung von Wirkungsgradreduktionen aus Betriebsstunden, Schwebstofffrachten oder *Particle Loads* (ohne Bestimmung der relativen Mittelschneidenbreite) wird nicht empfohlen, da die entsprechenden Korrelationen zumindest für beschichtete Turbinen mit starker Sedimentbelastung (d.h. lokale Grundmaterialabrasion kann nicht ausgeschlossen werden) zu unsicher sind.

7.6 Wirtschaftlichkeitsüberlegungen

Das Monitoring der Schwebstoffbelastung, der Turbinenabrasion und der Turbinenwirkungsgrade dient als Grundlage für wirtschaftliche Optimierungen sowie für die Formulierung und Überprüfung der Einhaltung von Spezifikationen und Garantien bezüglich der Turbinenbauteile.

Aus der mittleren jährlichen Sedimentfracht in der Druckleitung und den mittleren jährlichen Kosten, die durch Feinsedimente in der Anlage verursacht wurden (Revisionsarbeiten, Ersatzinvestitionen und Produktionseinbussen), wurden spezifische feinsedimentbedingte Kosten von 3.9 CHF/t ermittelt. Dieser Wert hängt u.a. von der Grösse der Turbinen ab.

Beim KW Fieschertal beziehen sich die feinsedimentbedingten Kosten auf den Volllastbetrieb, da die Sedimentfracht im Sommer anfällt. Würden die Turbinen bei sedimenthaltigem Wasser mit Teillast betrieben, resultierten höhere feinsedimentbedingten Kosten pro kWh als bei Volllast, weil gemäss IEC-Modell bei Teillast dieselbe Abrasionsrate erwartet wird wie bei Volllast, jedoch die feinsedimentbedingten Kosten auf weniger kWh «verteilt» werden. Aus wirtschaftlichen Überlegungen sind also Turbinen bei hohen *SSC* entweder mit Volllast zu betreiben oder ganz ausser Betrieb zu nehmen (Teillastbetrieb vermeiden).

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Revisionsarbeiten ist am wichtigsten, den Zeitpunkt für Laufradwechsel möglichst gut zu wählen. Im KW Fieschertal ist eine grossen Laufradrevision erfahrungsgemäss nach etwa sechs Einsatzjahren angebracht; dies kann je nach Schwebstofffrachten und Revisionsarbeiten variieren. Wie aufgezeigt, kann der Zeitpunkt für eine grosse Laufradrevision vor allem aufgrund der Wirkungsgradhistorie wirtschaftlich begründet werden.

7.7 Ausserbetriebnahmen während ausserordentlicher Schwebstoffbelastung

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 vorteilhafter gewesen wäre, den Turbinenbetrieb 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.

Beim Hochwasser vom 29.–30. Juli 2017 wurde die Fassung geschlossen und der Turbinenbetrieb während rund 12 h eingestellt. Im Gegensatz zu 2012 konnten beide Laufräder bis zum Ende der Schwebstoffsaison weiterbetrieben werden. Ein etwas früheres Schliessen der Fassung wäre vorteilhaft gewesen, um den Schwebstoffeintrag ins System weiter zu reduzieren. Dies bedingt, dass auch hohe *SSC* an der Wasserfassung gemessen werden können, weshalb dort auch ein CFDM installiert wurde.

Die Methodik für die rechnerische Abschätzung der Abschalt-*SSC* wurde ausgearbeitet und am Beispiel des KW Fieschertal beschrieben. Aufgrund der feinsedimentbedingten Kosten über neun Jahre (2012-2020) wurde eine Abschalt-*SSC* von 15 g/l geschätzt. Dieser Wert bezieht sich auf mittlere Verhältnisse und kann je nach Strompreis, Partikelgrössen und Resteinsatzdauer der Turbinenbauteile variieren. Bisher waren in der Literatur lediglich tiefere Werte für Abschalt-*SSC* dokumentiert.

Eine Automatisierung von Kraftwerksabschaltungen würde erlauben, die Sedimentbelastung am meisten zu reduzieren, weil nach dem Überschreiten der Abschalt-*SSC* keine Zeit für die Reaktion und Abklärungen des Betriebspersonals «verloren» ginge. Bei einem grossen Wasserkraftwerk wie dem KW Fieschertal wurde aber bewusst auf automatische Abschaltungen verzichtet, um Produktionsausfälle infolge von allfälligen Fehlmessungen zu vermeiden. Dies erlaubt, auch die erfahrungsbasierte Beurteilung des Kraftwerksbetreibers einzubringen und vorübergehende Ausserbetriebnahmen möglichst mit dem stromabnehmenden Energieversorgungsunternehmen zu koordinieren.

7.8 Gesamtbetrachtung

Am KW Fieschertal konnte eine detaillierte Messreihe der Schwebstoffbelastung, Turbinenabrasion und Wirkungsgradänderungen von zwei grossen, beschichteten Peltonturbinen über neun Jahre zusammengestellt und analysiert werden. Zur Reduktion der Unsicherheiten wurden mehrere Messmethoden, insbesondere für die Messung der SSC, kombiniert. In der Literatur war eine vergleichbare Untersuchung bisher nicht verfügbar.

Die Durchführung einer mehrjährigen Messkampagne an einer Prototyp-Anlage ist mit erheblichem Aufwand verbunden und die Sedimentbelastung ist nicht kontrollierbar, sondern hängt von unvorhersehbaren Starkniederschlägen ab. Dennoch erscheinen solche Studien lohnenswert, da ein Kraftwerksbetreiber in der Regel eine solche Studie ohne Beteiligung von Hochschulen und Forschungsförderungsmitteln nicht durchführen könnte, und die am Prototyp erhobenen Messdaten nicht durch numerische Simulation oder Versuche an physikalischen Modellen (Laborversuche) gewonnen werden können. Das KW Fieschertal eignet sich von den natürlichen Bedingungen und vom Anlagenlayout her sehr 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, Turbinenabrasion und Wirkungsgradmonitoring aus.

Peltonturbinen sind für die Elektrizitätsproduktion in der Schweiz und in anderen Ländern mit ausgeprägtem Relief (grossen Höhenunterschieden) besonders wichtig. Dieses Forschungsprojekt trägt dazu bei, dass Wasserkraftanlagen mit Peltonturbinen hinsichtlich des Feinsedimenttransports und seiner Auswirkungen besser betrieben werden können, was nicht nur aus betriebswirtschaftlicher, sondern auch aus energiewirtschaftlicher Sicht von Bedeutung ist.

7.9 Fazit

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die **Messung der Schwebstoffkonzentration** mit geeigneter Instrumentierung ist die Grundlage dafür, rechtzeitig und zuverlässig Alarme auszulösen, um Wasserkraftanlagen während hoher Schwebstoffbelastung vorübergehend ausser Betrieb zu nehmen und **Turbinen vor übermässigem hydro-abrasivem Verschleiss zu schützen.**
- Ein ebenfalls kontinuierliches **Echtzeit-Monitoring der Partikelgrössen** ist wünschenswert, jedoch mit der während der Projektdauer verfügbaren Messtechnik bei hohen Schwebstoffkonzentrationen (einige g/l bis mehrere 10 g/l) **nicht** zuverlässig und mit vertretbarem Aufwand möglich.
- Das **kontinuierliche Monitoring**, insbesondere der Turbinenwirkungsgrade und der Schwebstoffkonzentration, ist die wichtigste Grundlage für die betriebs- und energiewirtschaftliche Optimierung des Wasserkraftanlagenbetriebs an sedimentführenden Fliessgewässern.
- Methoden für die rechnerische Abschätzung der **Abschalt-Schwebstoffkonzentration** und des **optimalen Zeitpunkts** für grosse **Revisionen** von Peltonlaufrädern wurden ausgearbeitet.
- **Modelle für die Prognostizierung der Abrasion und der Wirkungsgradreduktionen** von hartbeschichteten Peltonlaufrädern wurden weiterentwickelt und kalibriert.
- Zur Reduktion der Unsicherheiten werden **weitere Untersuchungen** empfohlen.

8 Ausblick

8.1 Empfehlungen für weitere Forschungsprojekte

Weitere Studien, ähnlich dem hier beschriebenen Projekt, sind an anderen Wasserkraftanlagen mit Peltonturbinen (z.B. mit anderen Becherbreiten) wünschenswert, um die Datenbasis zu erweitern und die Unsicherheit in den Berechnungsmodellen zu reduzieren. Ergänzend dazu sind Laboruntersuchungen erforderlich, in denen ausgewählte Parameter systematisch und einzeln variiert werden können.

Es wurde weiterer Forschungsbedarf insbesondere in den folgenden Bereichen erkannt:

- Echtzeit-Messung der Partikelgrössen auch bei mittleren und hohen *SSC*;
- Einfluss der Partikelgrösse auf die Abrasionsrate (in Laborversuchen) und entsprechende Anpassung des k_{size}-Beiwerts im IEC-Modell;
- Ermittlung von feinsedimentbedingten Kosten und Abschalt-*SSC* an weiteren Wasserkraftanlagen mit und ohne Beschichtung der Turbinenbauteile (Feldstudien);
- Zusammenhang zwischen abrasionsbedingten Geometrie- und Rauheitsänderungen und Wirkungsgradreduktionen von Peltonturbinen (in Laborversuchen und Feldstudien).

Weitere Bereiche mit Forschungsbedarf sind in Felix (2017, Kapitel 10.3) aufgelistet. Daten aus Feld- und Laboruntersuchungen können für die Entwicklung, Kalibrierung und Validierung von numerischen Modellen verwendet werden. Numerische Simulationen z.B. der Abrasion sind aber immer noch sehr aufwändig und in der Praxis für Ingenieure, die für Turbinen in Wasserkraftanlagen verantwortlich sind, kaum zugänglich. Daher sind weiterhin einfach anwendbare analytische Ansätze (wie im IEC-Modell) bzw. Diagramme (wie z.B. für die Abschätzung von Wirkungsgradreduktionen) wünschenswert.

8.2 Praktische Umsetzung und Anwendbarkeit

Zahlreiche Erkenntnisse aus dem Projekt lassen sich auf andere Wasserkraftanlagen anwenden: das Monitoring der Schwebstoffe, der Turbinenabrasion und ihrer Wirkungsgrade oder die aufgezeigten Methoden für die Abschätzung der Abschalt-*SSC* und der optimalen Revisionszeitpunkte. Um auf die Eigenheiten der entsprechenden Einzugsgebiete, Kraftwerksanlagen und Messstellen einzugehen, sind fallweise Überlegungen und Anpassungen erforderlich.

Das systematische Schliessen von Fassungen bei Überschreiten eines *SSC*-Schwellenwerts kann nicht nur bei Laufwasserkraftwerken, sondern auch bei Wasserfassungen von Speicherkraftwerken angewandt werden (z.B. an Überleitungen zu Stauseen oder Bachfassungen am Triebwassersystem).

Weiter sind die Erkenntnisse aus diesem Projekt auch für Speicherwasserkraftwerke, die bisher nicht von Turbinenabrasion betroffen waren, relevant, da das Thema „Feinsedimentweitergabe aus Stauanlagen über den Triebwasserweg“ zukünftig an Bedeutung gewinnt. Um die Nutzvolumen von Speichern zu erhalten, ist es langfristig unumgänglich, Sedimente aus Stauanlagen weiterzuleiten. Spülungen und weitere Entlandungsmassnahmen haben ihre Grenzen (technische Machbarkeit, Ökologie und Wirtschaftlichkeit) und stossen teilweise auf geringe Akzeptanz. Wenn Feinsedimente kontrolliert über den Triebwasserweg weitergeleitet werden, sind die Konzentrationen im Unterwasser im Gegensatz zu seltenen Stauraumspülungen moderat und das Schwebstofftransportregime kann jenem vor dem Bau der Stauanlagen angeglichen werden, was ökologische Vorteile bringt (Felix *et al.* 2017a, b). Nachteilig, aber meist technisch lösbar, ist die verstärkte Sedimentbelastung der Turbinen. Für die Abschätzung der zu erwartenden Turbinenabrasion und Wirkungsgradreduktionen, und für die Wahl

geeigneter Gegenmassnahmen wie Beschichtungen, separaten Kühlwassersystemen, sowie Grenzkonzentrationen und –partikelgrössen sind verbesserte Kenntnisse über den hydro-abrasiven Verschleiss, wie aus diesem Projekt, erforderlich. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit können die spezifischen feinsedimentbedingten Kosten für die Turbinenpassage (CHF/t) wie aufgezeigt ermittelt und mit den spezifischen Kosten von anderen Optionen des Sedimentmanagements verglichen werden.

Mit verbesserten Kenntnissen über den hydro-abrasiven Verschleiss lassen sich Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen bezüglich des Umgangs mit Feinsedimenten besser betreiben, was zur Steigerung ihrer Wirtschaftlichkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit beiträgt. Dies unterstützt auch die Umsetzung der «Energiestrategie 2050» der Schweiz, in welcher der Wasserkraft für die Erzeugung und vor allem die Speicherung von elektrischer Energie eine tragende Rolle zukommt.

9 Referenzen

9.1 Publikationen aus dem Projekt

Aus dem vorliegenden BFE-Pilotprojekt inklusive seiner Vorgängerprojekte (im Rahmen des Forschungsprogramms Wasserkraft des BFE) gingen zahlreiche Publikationen hervor. Der Fachartikel von Abgottspon *et al.* (2016a) gibt einen Überblick auf Deutsch über das Forschungsprojekt und dessen Resultate aufgrund der Messungen der Jahre 2012–2014:

https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=wel-004%3A2016%3A108%3A%3A27&referrer=search#27

Die Grundlagen, Methoden und Resultate (ebenfalls aufgrund der Messungen der Jahre 2012–2014) sind in der Dissertation von Felix (2017) im Detail auf Englisch beschrieben und in der ETH-Bibliothek sowie als VAW-Mitteilung frei verfügbar:

https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/161430
http://www.vaw.ethz.ch/das-institut/vaw-mitteilungen/2010-2019.html

Weitere Informationen können den übrigen, meist englischsprachigen Artikeln entnommen werden, die im Folgenden nach Erscheinungsjahr und alphabetisch nach Erstautor aufgelistet sind:

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 Peltonturbinen 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. Conf. "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. (2015a). **Field measurements of suspended sediment using several methods**. *36th IAHR World Congress*, Den Haag, Niederlande.

Felix D., Abgottspon A., Albayrak I., Boes R., Staubli T. (2015b). **Monitoring der Abnutzung an Bechern von Peltonturbinen mittels 3d-Digitalisierungen und Schichtdickenmessungen**. *Schlussbericht* vom 27.11.2015 an das BFE. VAW der ETH Zürich und Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Hydromaschinen der Hochschule Luzern (HSLU). 33 Seiten. https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=34167

2016

Abgottspon A., Felix D., Boes R., Staubli T. (2016a). **Schwebstoffe, hydro-abrasiver Verschleiss und Wirkungsgradänderungen an Peltonturbinen - Ein Forschungsprojekt am KW Fieschertal**. *Wasser Energie Luft* 108(1): 9-24.

Abgottspon 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 und *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122008.

Felix D., Albayrak I., Abgottspon 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 und *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122001.

Felix D., Albayrak I., Abgottspon 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 und *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122006.

Felix D., Albayrak I., Abgottspon 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 und *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122007.

Felix D., Abgottspon 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 und *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122009.

Felix D., Albayrak I., Abgottspon 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 und *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122011.

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 und *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122003.

VAW (2016). **International Workshop: Dealing with hydro-abrasive erosion at high-head hydropower plants**. 06.07.2016 in Grenoble, France. *VAW-Mitteilungen* 237 (R. Boes, Ed.) Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Schweiz. https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/2010-2019.html

2017

Felix D. (2017). **Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines**. *VAW-Mitteilungen* 238 (R. Boes, Ed.) und *Diss.* 24145, ETH Zürich, Schweiz. https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2010-2019/238.pdf und https://doi.org/10.3929/ethz-b-000161430.

Felix D., Albayrak I., Boes R. (2017a). **Weiterleitung von Feinsedimenten via Triebwasser als Massnahme gegen die Stauraumverlandung**. *Wasser Energie Luft* 109(2): 85-90.

Felix D., Albayrak I., Boes R.M., Abgottspon A. (2017b). **Sediment transport through the power waterway and hydro-abrasive erosion on turbines**. *Proc. Hydro Conference*, Seville, Spain: paper no. 27.07.

2018

Abgottspon A., Staubli T., Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2018). **Measuring techniques to cope with hydro-abrasive erosion of turbines**. *Proc.* 12th Intl. Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHEM 2018), Beijing, China.

Felix D., Albayrak I., Boes R. (2018). **In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry**. *International Journal of Sediment Research*, 33: 3-17.

Felix D., Albayrak I., Boes R.M., Abgottspon A., Staubli T. (2018b). **Dealing with Pelton turbine erosion based on systematic monitoring**. *Hydropower & Dams*, 25(5), 84-92.

Felix D., Albayrak I., Boes R.M. (2018c). **Real-time suspended sediment measurements at hydropower plant Fieschertal using LISST and Coriolis Flow- and Density Meter (CFDM)**. *Proc.* 6th Particles in Europe Conference, Lissabon, Portugal.

2019

Felix D., Albayrak I., Boes R.M., Gruber P., Abgottspon A. (2019). **Using acoustic discharge measurement (ADM) installations for suspended sediment monitoring in channels, tunnels and penstocks**. *Proc.* Hydro Conference, Porto, Portugal: paper no. 32.03.

2020

Felix D., Abgottspon A., Albayrak I., Staubli T., Gruber P., Boes R. (2020). **Schwebstoffmonitoring in Echtzeit**. *Bulletin SEV/VSE* 2/2020, 41-44.

2021

Abgottspon A., von Burg M., Staubli T., Felix D. (2021). **Analysis of hydro-abrasive erosion and efficiency changes measured on the coated Pelton turbines of HPP Fieschertal**. *Proc.* 30th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems 2020, Lausanne (online 22.-25.03.2021): paper no. 60204; *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 774 012030.

Felix D., Abgottspon A., Albayrak I., Boes R. (2021). **Temporary shutdowns of the high-head run-of-river HPP Fieschertal to prevent excessive turbine erosion during floods**. *Proc.* 30th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems 2020, Lausanne (online 22.-25.03.2021): paper no. 60208; *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 774 012029.

2022

Abgottspon A., Felix D., Staubli T., Boes R. (2022). **Betriebs- und Unterhaltsoptimierung von beschichteten Peltonturbinen mit hydro-abrasivem Verschleiss – Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt am KW Fieschertal**. *Wasser Energie Luft* 114(2): 105-117.

Die aus dem Forschungsprojekt hervorgegangenen Fachartikel, die seit dem Jahr 2012 bis im Juni 2022 publiziert wurden, sind als Beilage zum vorliegenden Schlussbericht in einer pdf-Datei zusammengestellt (349 Seiten).

9.2 Studentenarbeiten

Im Zusammenhang mit dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden unter anderem die in Tabelle 19 aufgelisteten Studentenarbeiten durchgeführt. So gewannen 25 Studierende der ETH Zürich und der HSLU einen vertieften Einblick in die Themen des Schwebstoff- und Wirkungsgradmonitorings und der Turbinenabrasion. Die Berichte dieser Studentenarbeiten sind unveröffentlicht, aber die wichtigen Resultate wurden in den vorliegenden Schlussbericht und publizierte Fachartikel integriert.

Tabelle 19: Durchgeführte Studentenarbeiten im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt am KW Fieschertal 2012–2020.

Bachelorarbeiten:			
Loosli R.	2014	Abfluss und Schwebstofftransport vom Fieschergletscher im Jahr 2013	VAW, ETH Zürich
Bickle F., Hunziker D.	2018	Sedimentbilanzierung unterstrom des Fieschergletschers	VAW, ETH Zürich
Ackermann R., Grubenmann F.	2019	Sedimentbilanzierung unterstrom des Fieschergletschers	VAW, ETH Zürich
Malt V.	2020	Schwebstoffmonitoring an Wasserkraftanlagen mittels Trübung und akustischer Rückstreuung	VAW, ETH Zürich
Semesterarbeiten (Projektarbeiten an der ETH bzw. sogenannte Industrieprojekte an der HSLU):			
Humbel T.	2013	Variation des Schwebstoffgehalts im Triebwasser des KW Fieschertal infolge Speicherstollenbewirtschaftung	VAW, ETH Zürich
Moretti G., Schmieder S.	2014	Schwebstoffmonitoring mittels Coriolis-Dichtemessung	VAW, ETH Zürich
Schaller D., Scheurer L.	2014	Sedimentbilanzierung unterstrom des Fieschergletschers	VAW, ETH Zürich
Ibric S., Ramisberger M.	2014	Kombinierte Methoden für das Schwebstoffmonitoring an Wasserkraftanlagen	VAW, ETH Zürich
Bemetz V.	2016	Schwebstoffe im Wasser des Kraftwerks Fieschertal (2015–2016)	VAW, ETH Zürich
Schärer C.	2017	Laboruntersuchung von Messinstrumenten für das Echt-zeit-Schwebstoffmonitoring	VAW, ETH Zürich
Feigenwinter L., Zeugin T.	2018	Laboruntersuchung von Messgeräten für das Echtzeit-Schwebstoffmonitoring	VAW, ETH Zürich
Müller N.	2013	Abrasion in Peltonturbinen	HSLU T&A
Willi P.	2014	Kontinuierliches Wirkungsgradmonitoring	HSLU T&A
Fleischli B.	2015	Turbine efficiency monitoring	HSLU T&A
Masterarbeiten:			
Grüninger P.	2013	Schwebstofftransport im Jahr 2012 am Wasserkraftwerk Fieschertal	VAW, ETH Zürich
Meister J.	2014	Schwebstoffe im Triebwasser des Wasserkraftwerks Fieschertal im Jahr 2013	VAW, ETH Zürich
Sigrist L.	2019	Laboruntersuchung von Messgeräten für das Echtzeit-Schwebstoffmonitoring	VAW, ETH Zürich
Eugster M.	2019	Schwebstoffe im Wasser des Kraftwerks Fieschertal im Jahr 2018	VAW, ETH Zürich
Bühler F.	2020	Suspended sediment load at the hydropower plant Fieschertal in the year 2019	VAW, ETH Zürich

9.3 Literatur

Der vorliegende Schlussbericht nimmt Bezug auf folgende Publikationen ausserhalb des Forschungsprojekts am KW Fieschertal. Die aus dem Forschungsprojekt hervorgegangenen Publikationen sind in Abschnitt 9.1 aufgelistet.

Abgottspon A. (2011). **Messung abrasiver Partikel in Wasserkraftanlagen**. *Master Thesis* (unpubliziert), Competence Center Fluid Mechanics and Hydro Machines, Hochschule Luzern.

Abgottspon A. & Staubli T. (2008). **Index Tests of a Francis Unit using the Sliding Gate Method**. *Proc.* 7th Intl. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurements (IGHEM), 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

Agrawal Y., Slade W., Pottsmith C., Dana D. (2016). **Technologies and experience with monitoring sediments for protecting turbines from abrasion**. *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 49, 122005.

Arora N., Kumar A., Singal, S.K. (2022). **Technological advancement in measurements of suspended sediment and hydraulic turbine erosion**. *Measurement*, 110700.

BAFU (2012). **Hochwasserereignis vom 2./3. Juli 2012**. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/dossiers/hochwasserereignis-vom-2--3--juli-2012.html

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.

BFE (2019). **Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz**. https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/geoinformation/geodaten/wasser/statistik-der-wasserkraftanlagen.html

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 Peltonturbine**. *Wasser Energie Luft*, 102(2): 101-107.

Bozic H., Hassler P., Schnablegger W. (2004). **Prüfung und Bewertung von Peltonlaufrädern – unter besonderer Bedachtnahme auf den Trend zu geschmiedeten Laufrädern**. *Proc.* Jahrestagung der deutschen, österreichischen und schweizerischen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Salzburg, Austria. CD herausgegeben durch DGZfP, Berlin.

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 (IGHEM)*, 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.

Elkvik M. (2013). **Sediment erosion in Francis turbines**. *PhD thesis*, NTNU, Trondheim, Norway.

Espinoza A.M. (2016). **Managing Sediment in Peru's Pativilca River Basin** [HPP Cahua]. *Hydro Review Worldwide* 24(4): 24–29.

Glamos (2021). **Glacier Monitoring Network Switzerland**. https://www.glamos.ch

Grab M., Mattea E., Bauder A., Huss M., Rabenstein L., Hodel E., Linsbauer A., Langhammer L., Schmid L., Church G., Hellmann S., Délèze K., Schaer P., Lathion P., Farinotti D., Maurer H. (2021). **Ice thickness distribution of all Swiss glaciers based on extended ground-penetrating radar data and glaciological modeling**. *Journal of Glaciology*, 67(266), 1074-1092.

Gummer J.H. (2009). **Combating Silt Erosion in Hydraulic Turbines**. *Hydro Review Worldwide*, 17(1).

Guo B., Xiao Y., Rai A.K., Zhang J., Liang Q. (2020). **Sediment-laden flow and erosion modeling in a Pelton turbine injector**. *Renewable Energy,* 162: 30-42,

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.

Helmut Fischer AG (2012): **Datenblätter** und **Schulungsunterlagen zu Schichtdickenmessgerät Deltascope FMP30**. helmut-fischer.com.

IEC 62364 (2013 bzw. 2019). **Guide for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis, and Pelton turbines**. 1. bzw. 2. Ausgabe. Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC), 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.

MeteoSchweiz (2017). **Nach sonnigem Vormittag gewitterhaft.** MeteoSchweiz-Blog vom 30.07.2017. https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/aktuell/meteoschweiz-blog/meteoschweiz-blog-suche.subpage.html/de/data/blogs/2017/7/nach-sonnigem-vormittag-gewitterhaft.html

MeteoSchweiz (2019). **Verhaltener Föhn.** MeteoSchweiz-Blog vom 22.09.2019. https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/aktuell/meteoschweiz-blog/meteoschweiz-blog-suche.subpage.html/de/data/blogs/2019/9/verhaltener-foehn.html

MeteoSchweiz (2020a). **Extreme Wetterlage.** MeteoSchweiz-Blog vom 03.10.2020. https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/aktuell/meteoschweiz-blog/meteoschweiz-blog-suche.subpage.html/de/data/blogs/2020/10/extreme-wetterlage.html

MeteoSchweiz (2020b). **Extremwertanalysen (Version 2020). Standardperiode 1961 – 2020**. https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/extremwertanalysen/standardperiode.html

Namgyal L. und Tandin T. (2021). **Hydropower plant operation optimization based on sediment erosion**. *Journal of the Bhutan Ecological Society*, Issue 4, 80-95. https://bes.org.bt/issues/issue-4/

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.

Padhy M.K. und Saini R.P. (2011). **Study of silt erosion on performance of a Pelton turbine**. *Energy*, 36(1): 141–147.

Pradhan P.M.S. (2004). **Improving sediment handling in the Himalayas**. *Proc.* Workshop on Optimal Sediment Handling (OSH) Research, October 2004, Nepal.

Preece C. & Macmillan N.H. (1977). **Erosion**. *Annual Review of Materials Science* 7: 95–121.

Rai A.K., Kumar A. (2015): **Continuous measurement of suspended sediment concentration: Technological advancement and future outlook**. *Measurement*, 76: 209-227.

Rai A.K., Kumar A., Staubli T. (2017). **Hydro-abrasive erosion in Pelton buckets: Classification and field study**. *Wear*, 392–393, 8-20.

Rai A.K., Kumar A., Staubli T. (2020a). **Effect of concentration and size of sediments on hydro-abrasive erosion of Pelton turbine**. *Renewable Energy*, 145: 893-902.

Rai A.K., Kumar A., Staubli T., Xiao Y. (2020b). **Interpretation and application of the hydro-abrasive erosion model from IEC 62364** (2013) for Pelton turbines. *Renewable Energy* 160: 396-408.

Rai A.K., Kumar A., Xiao Y., Guo B., Staubli T., Arora N. (2021). **Analysis and visualization of progressive erosion in Pelton buckets**. *IOP Conf. Series: Earth and Environ. Science* 774, 012105.

Sidhu S.S. (1999). **Experience of coating and successful field tests of coated guide vanes at Baira Siul HEP**. In Varma C.V.J, Naidu B.S.K., Rao A.R.G (eds.), *Proc.* 1st Intl. Conf. on Silting Problems in Hydro Power Plants, New Delhi, India (paper no. 28). Rotterdam/Brookfield: Balkema.

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.

Smeltzer C.E., Gulden M.E., Compton W.A. (1970). **Mechanisms of Metal Removal by Impacting Dust Particles**. *J. Basic Engineering* 92(3), 639-652.

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.

Staubli T. und Abgottspon A. (2018). **Efficiency monitoring in the hydropower plant of Filisur**. *Proc. 20th International Seminar on Hydropower Plants*, Doujak E. (Ed.), Wien, Österreich: 633-639.

Steinbichler Optotechnik GmbH (2012): **Datenblatt und Qualitätsurkunde zu Comet L3D 5M**. www.steinbichler.de. Siehe unterdessen unter https://www.zeiss.de

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.

Truffer B., Küttel M., Meier J. (2009). **Wasserfassung Titer der GKW – Entsanderabzüge System HSR in grossen Entsanderanlagen**. *Wasser Energie Luft* 101(3): 207-208.

Voichick N., Topping D.J., Griffiths R.E. (2018). **False low turbidity readings from optical probes during high suspended-sediment concentrations**. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(3): 1767–1773.

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. (2011a). **Understanding hydro-abrasive erosion**, *Proc. Hydro 2011 Conference,* Prag, Tschechische Republik: 2.05

Winkler K., Dekumbis R., Uppal A. (2011b). **Coating Minimizes Operational Losses at Nathpa Jhakri in India**. *Hydro Review Worldwide* 19(1).

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 Environ. Science*, 22: 052022.

Wittmann H., von Blanckenburg F., Kruesmann T., Norton K.P., Kubik P.W. (2007). **Relation between rock uplift and denudation from cosmogenic nuclides in river sediment in the Central Alps of Switzerland**. *Journal of Geophysical Research* 112: F04010.

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. (2009): **Freistrahlturbinen, Hydrodynamik und Auslegung**. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg.

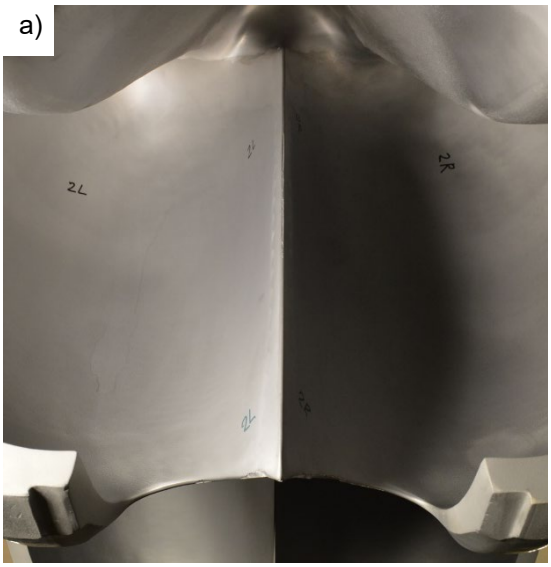
Zhang Z. (2016). **Pelton turbines**. Springer; Berlin, Heidelberg, New York.

Anhang

A Fotodokumentation

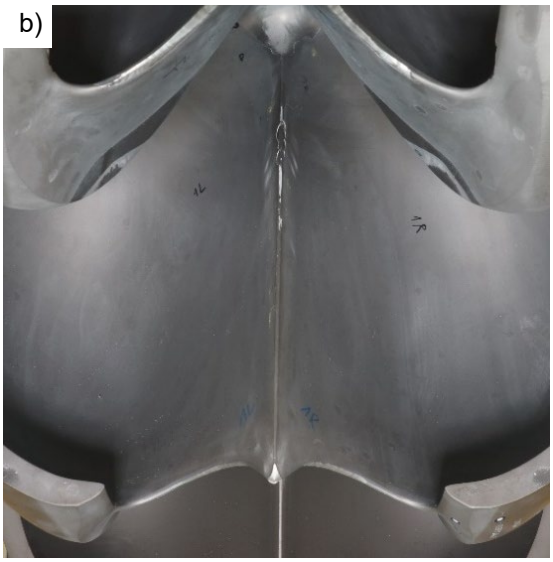
A1 Abrasionsschäden an den Mittelschneiden

a)



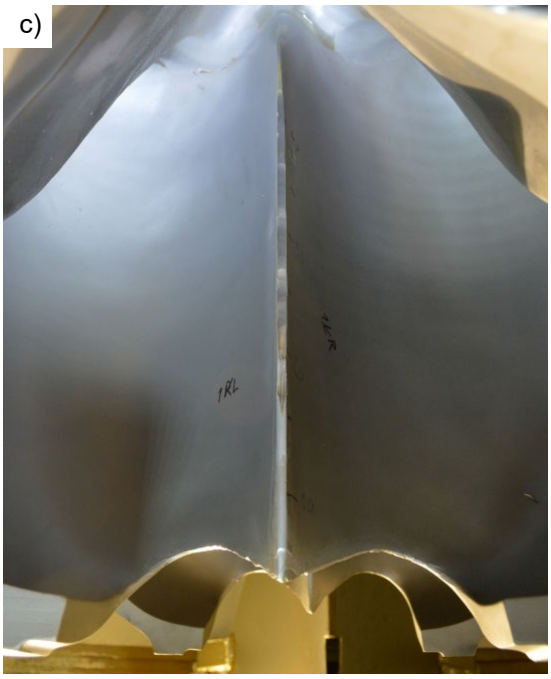
Laufrad 2 (MG 1), Becher 2, Dez. 2018, nach 1 Schwebstoffsaison seit grosser Revision

b)



Laufrad 5 (MG 2), Becher 1, Dez. 2018, nach 2 Schwebstoffsaisons seit Einbau des neuen Laufrads

c)



Laufrad 4 (MG 2), Becher 1, Januar 2017 nach 3 Schwebstoffsaisons, 2 x Schleifen und 2 x Nachbeschichten seit mittelgrosser Revision; wurde so in grosse Revision gegeben

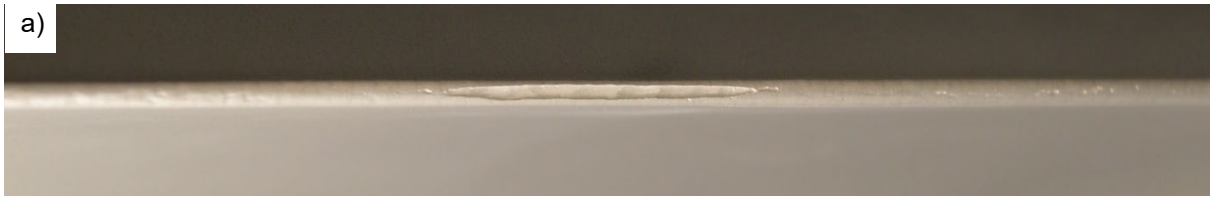
d)



Laufrad 1 (MG 1), Becher 1, Nov 2017, nach 6 Schwebstoffsaison, 5 x Schleifen und 4 x Nachbeschichten seit grosser Revision; wurde so in nächste grosse Revision gegeben

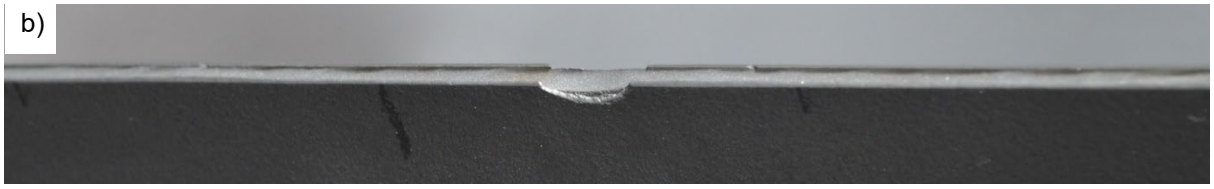
Abbildung 112: Schrägansicht in abgenutzte Laufradbecher des KW Fieschertal, nach Abnutzungsgrad geordnet (Fotos: VAW).

a)



Laufrad 2 (MG 1), Becher 1, Dez. 2018, nach 1 Schwebstoffsaison seit grosser Revision

b)



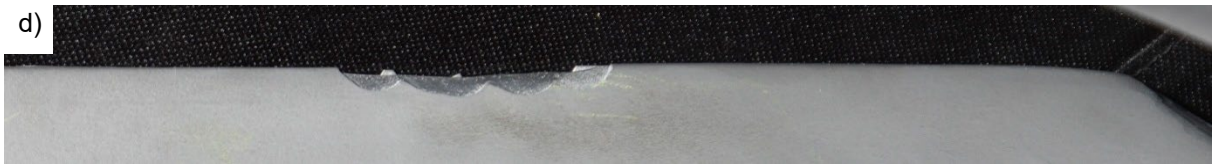
Laufrad 2 (MG 1), Becher 7, Dez. 2018, nach 1 Schwebstoffsaison seit grosser Revision

c)



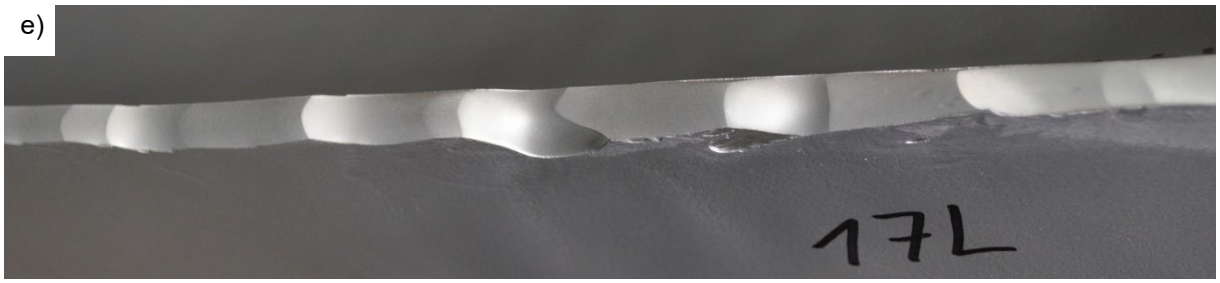
Laufrad 2 (MG 1), Becher 17, Dez. 2018, nach 1 Schwebstoffsaison seit grosser Revision

d)



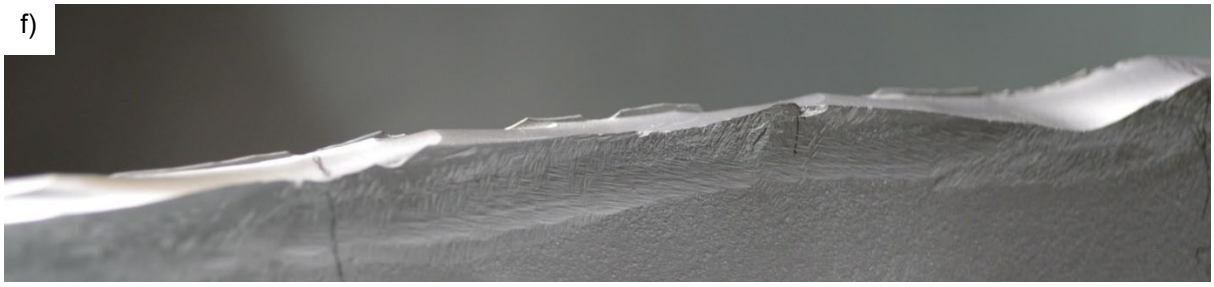
Laufrad 5 (MG 2), Becher 1, Dez. 2018, nach 2 Schwebstoffsaisons seit Einsatz des neuen Laufrads

e)



Laufrad 1 (MG 1), Becher 17, Nov. 2017, nach 6 Schwebstoffsaisons, 5 x Schleifen und 4 x Nachbeschichten seit grosser Revision; wurde so in nächste grosse Revision gegeben

f)



Laufrad 1 (MG 1), Becher 1, Nov. 2017, Einsatzdauer und Revisionen siehe e)

Abbildung 113: Abrasionsschäden an Mittelschneiden, nach Abnutzungsgrad bzw. Laufrad geordnet (Fotos: VAW).

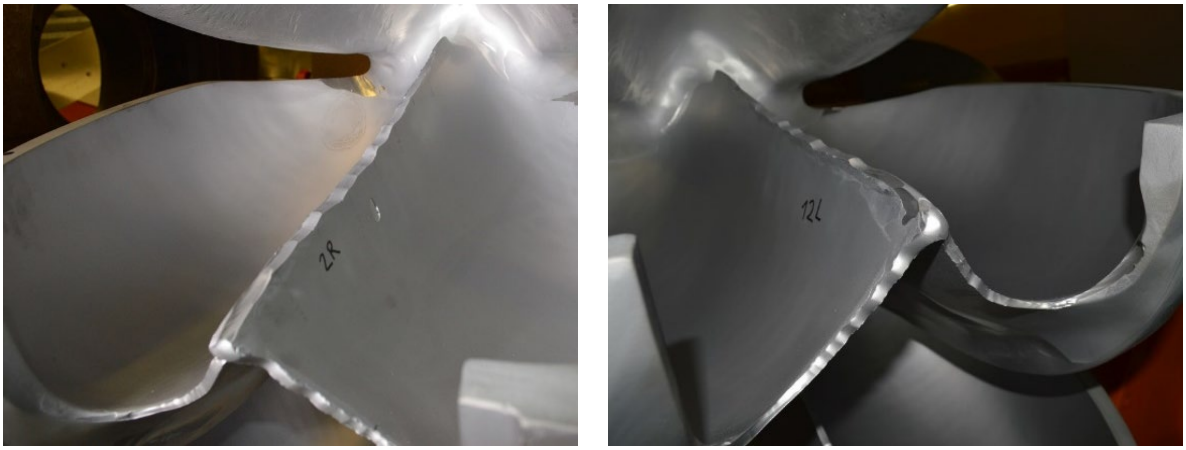


Abbildung 114: Laufrad 1 (MG 1), Nov. 2017, mit breiten und welligen Mittelschneiden und Bechereintrittskanten infolge Abrasion des Grundmaterials nach 6 Schwebstoffsaisons, 5 x Schleifen und 4 x Nachbeschichten seit grosser Revision; wurde so in nächste grosse Revision gegeben (Fotos: VAW).

a)



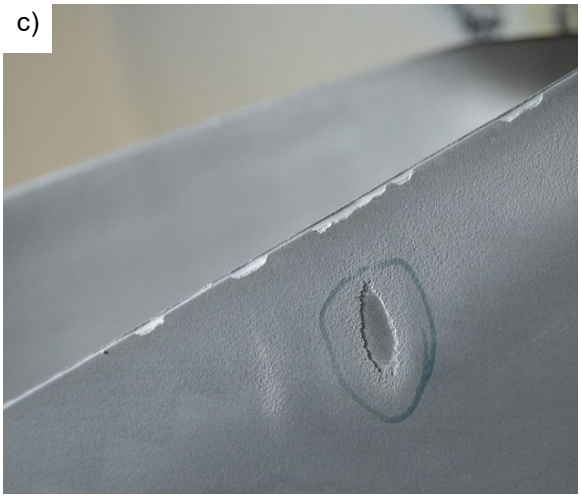
Laufrad 5 (MG 2), Becher 1, Nov. 2019, nach 3 Schwebstoffsaisons seit Einsatz des neuen Laufrads

b)



Laufrad 1 (MG 1), Becher 1, Nov. 2017, Einsatzdauer und Revisionen wie in Abbildung 114

c)



Laufrad 2 (MG 1), Becher 17, Dez. 2018, nach 1 Schwebstoffsaison seit grosser Revision

d)

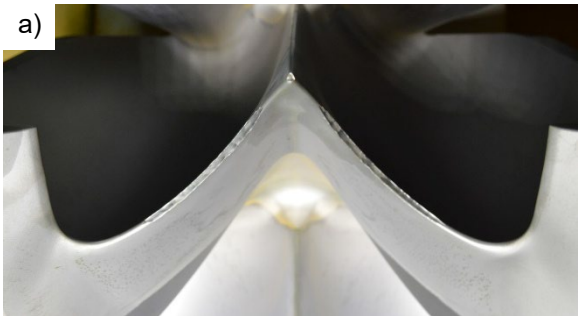


Laufrad 1 (MG 1), Becher 1, Nov. 2017, Einsatzdauer und Revisionen wie in Abbildung 114

Abbildung 115: Abrasionsschäden an den Mittelschneiden mit Sekundärschäden a), c) und d) an ihren Flanken oder b) an anderen Stellen im Becher (Fotos: VAW).

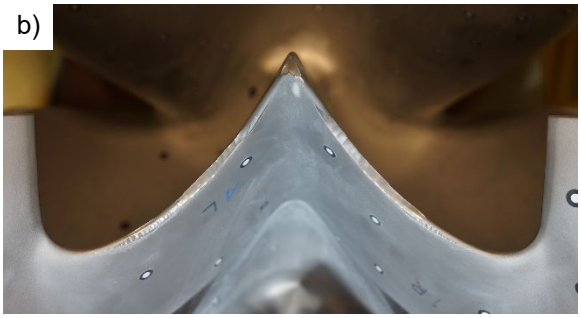
A2 Abrasionsschäden an den Bechereintrittskanten und Mittelschneidenspitzen

a)



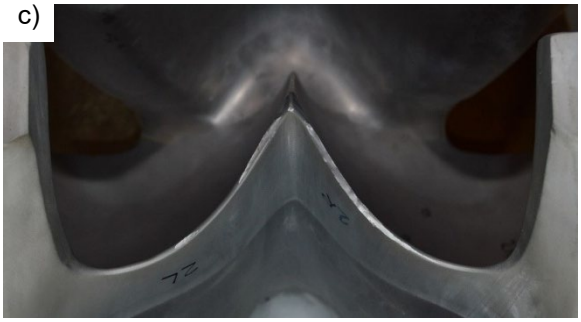
Laufrad 5 (MG 2), Becher 1, Januar 2018
nach 1 Schwebstoffsaison (noch ohne Revisionsarbeiten vor Ort) seit Einsatz des neuen Laufrads

b)



Laufrad 5 (MG 2), Becher 1, Dez. 201 8
nach 2 Schwebstoffsaisons, 1 x Schleifen und
1 x Nachbeschichten seit Einsatz des neuen Laufrads

c)



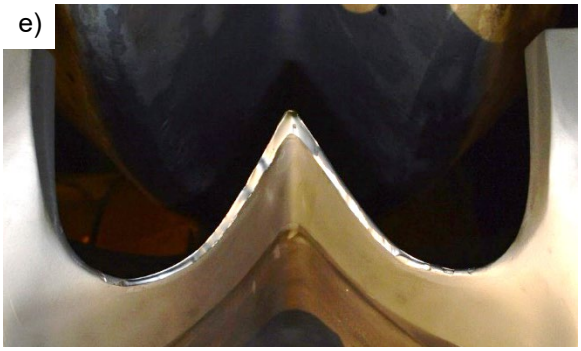
Laufrad 2 (MG 1), Becher 2, Januar 2019
nach 1 Schwebstoffsaison seit grosser Revision

d)



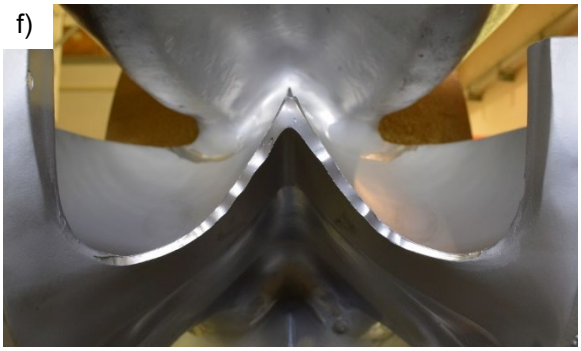
Laufrad 4 (MG 2), Becher 1, Januar 2017
nach 3 Schwebstoffsaisons, 2 x Schleifen und
2 x Nachbeschichten seit mittelgrosser Revision,
wurde so in grosse Revision gegeben

e)



Laufrad 1 (MG 1), Becher 1, Januar 2017
nach 5 Schwebstoffsaisons, 4 x Schleifen und
4 x Nachbeschichten seit grosser Revision

f)



Laufrad 1 (MG 1), Becher 1, Nov. 2017
nach 6 Schwebstoffsaisons, 5 x Schleifen und
4 x Nachbeschichten seit grosser Revision,
wurde so in grosse Revision gegeben

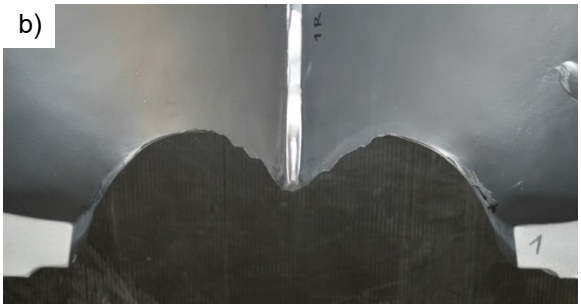
Abbildung 116: Frontansichten an Laufradbecher des KW Fieschertal mit Abrasionsschäden an den Bechereintrittskanten, nach Abnutzungsgrad bzw. Laufrad geordnet (Fotos: VAW).

a)



Laufrad 5 (MG 2), Becher 1, Dez. 2018
nach 2 Schwebstoffsaisons, 1 x Schleifen und
1 x Nachbeschichten seit Einsatz des neuen Laufrads

b)



Laufrad 1 (MG 1), Becher 1, Nov. 2017
nach 6 Schwebstoffsaisons, 5 x Schleifen und
4 x Nachbeschichten seit grosser Revision

Abbildung 117: Draufsichten auf die Bechereintrittskanten der Becher aus Abbildung 116b) und f) (Fotos: VAW).

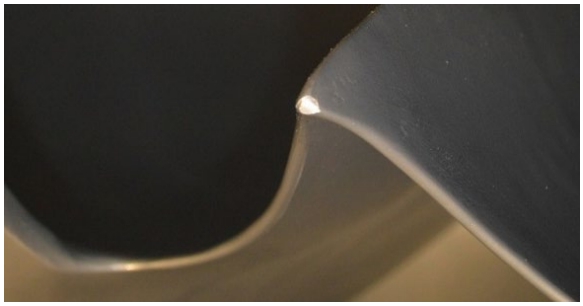




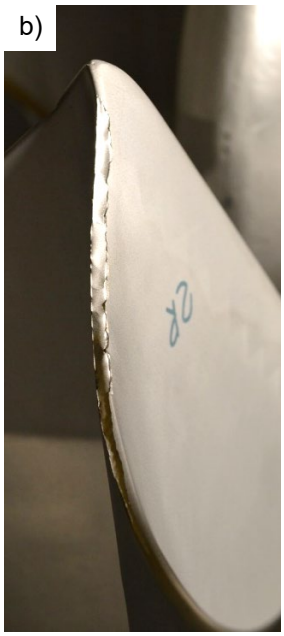
Abbildung 118: Zunehmende Abrasion an der Mittelschneidenspitze a) im August und b) am Ende der Schwebstoffsaison 2019 (Laufrad 2 in MG 1, Becher 1; Fotos: VAW).

a)



Laufrad 2 (MG 1),
Becher 2, linker Ausschnitt
Dez. 2018

b)



Laufrad 2 (MG 1),
Becher 2, rechter Ausschnitt,
Dez. 2018

c)



Laufrad 5 (MG 2),
Becher 2, linker Ausschnitt,
Jan. 2018

d)



Laufrad 5 (MG 2),
Becher 1, linker Ausschnitt,
Dez. 2018

Abbildung 119: Abrasionsschäden an den Bechereintrittskanten mit stellenweisem Verlust der Beschichtung, Abbrechen der Beschichtungsränder und Abrasion des Grundmaterials (Fotos: VAW).

A3 Weitere Bauteile im Turbinengehäuse



Abbildung 120: Abrasion am Schutzdach der unteren Düse und am Strahlablenker der MG 1 im Dezember 2018 vor den Wiederinstandstellungsarbeiten im Winter (Foto: VAW).



Abbildung 121: Detail der Abrasion am Schutzdach der unteren Düse aus Abbildung 120 (Foto: VAW).

B 3D-Vermessungen der Mittelschneiden und Becherausschnitte

B1 Mittelschneidenhöhen

Schema mit eingesetzten Laufrädern von 2012 bis 2020 und Zeitpunkten der Vermessungen siehe Abbildung 45.

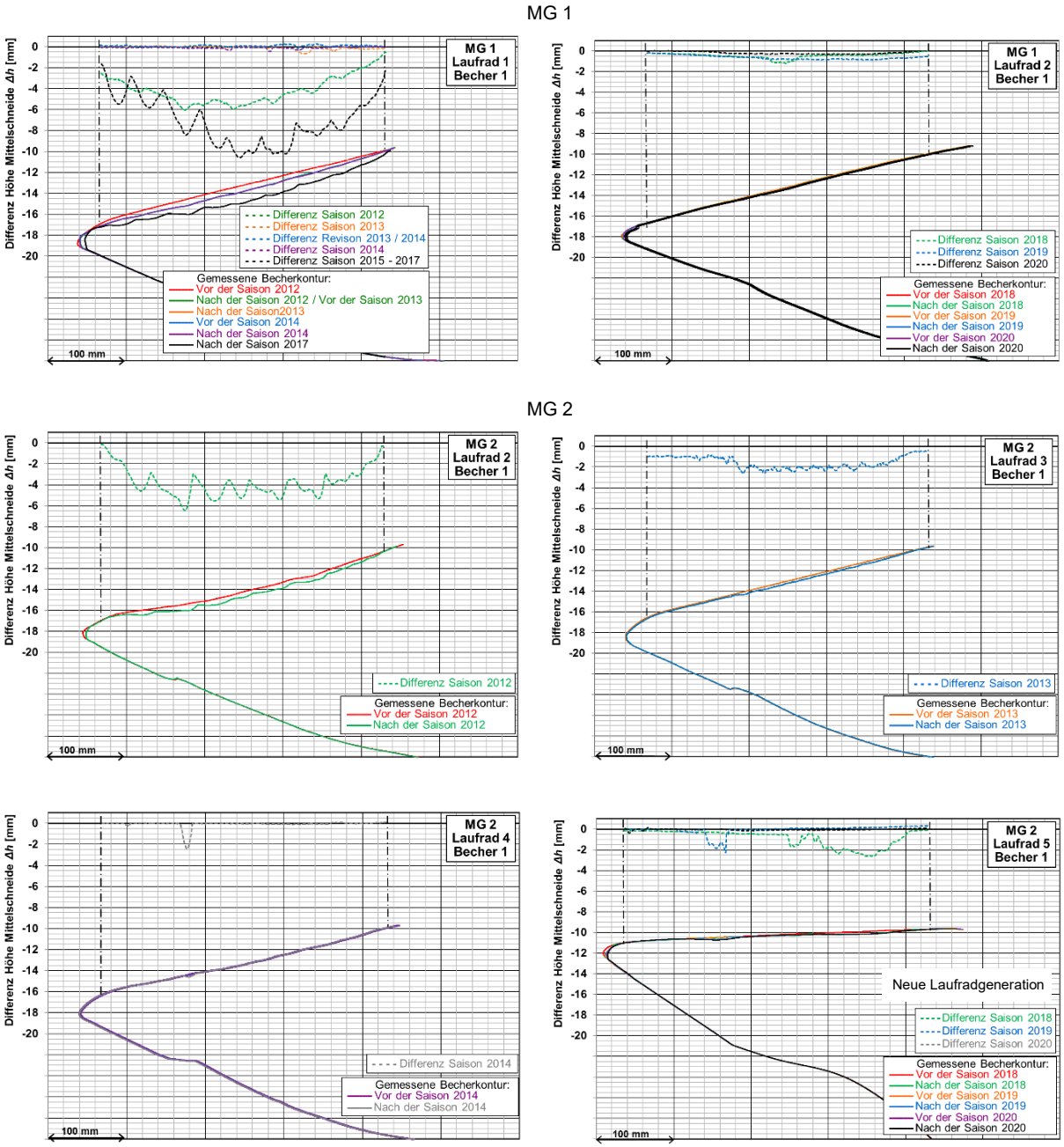


Abbildung 122: Längsschnitte durch die Mittelschneiden der Becher Nr. 1 der Laufräder des KW Fieschertal von 2012 bis 2020 mit Darstellung der Veränderungen der Mittelschneidenhöhe im oberen Teil der Abbildungen (Messungen und Auswertung: HSLU).

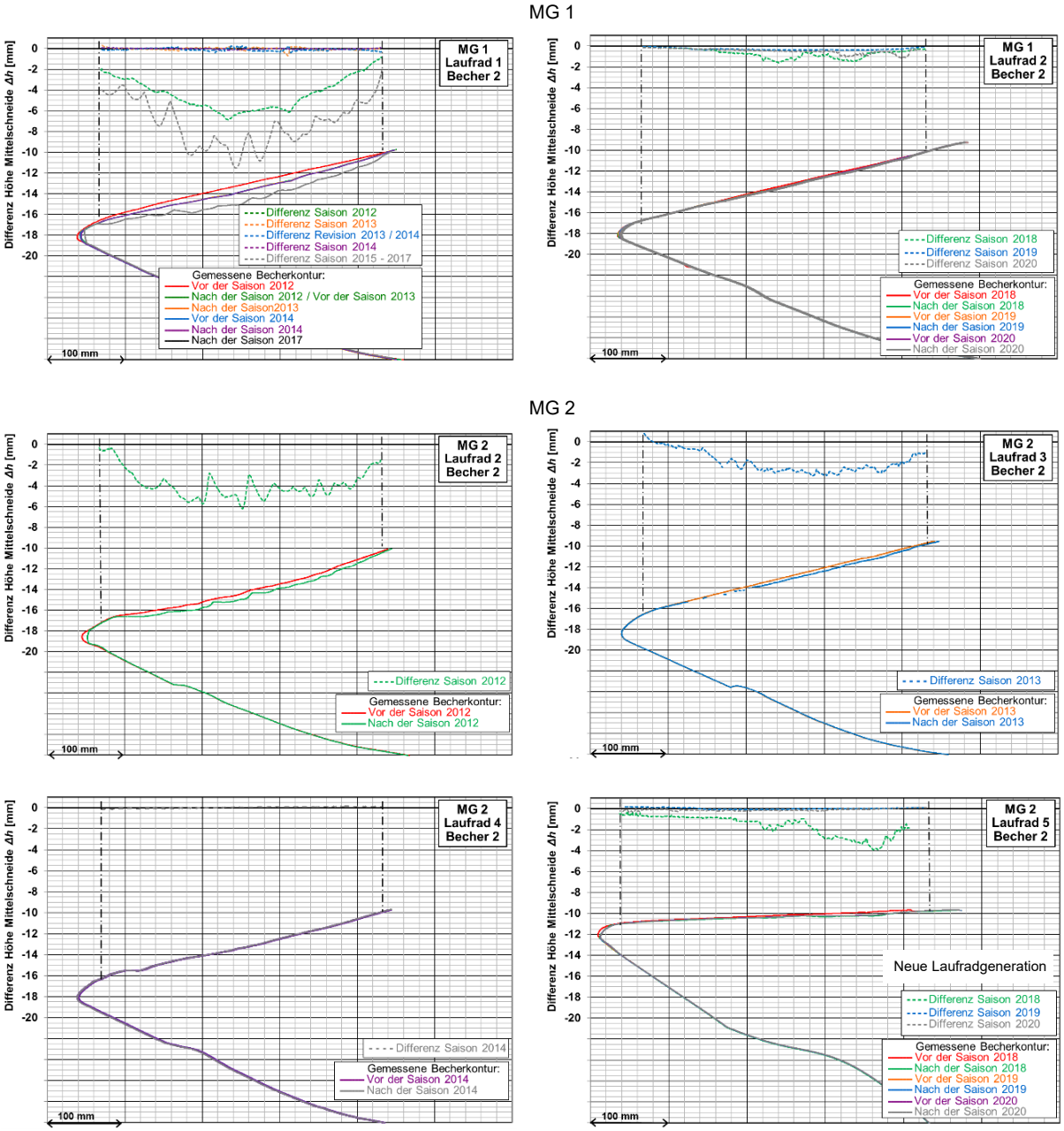


Abbildung 123: wie Abbildung 122, aber Becher Nr. 2.

B2 Mittelschneidenbreiten

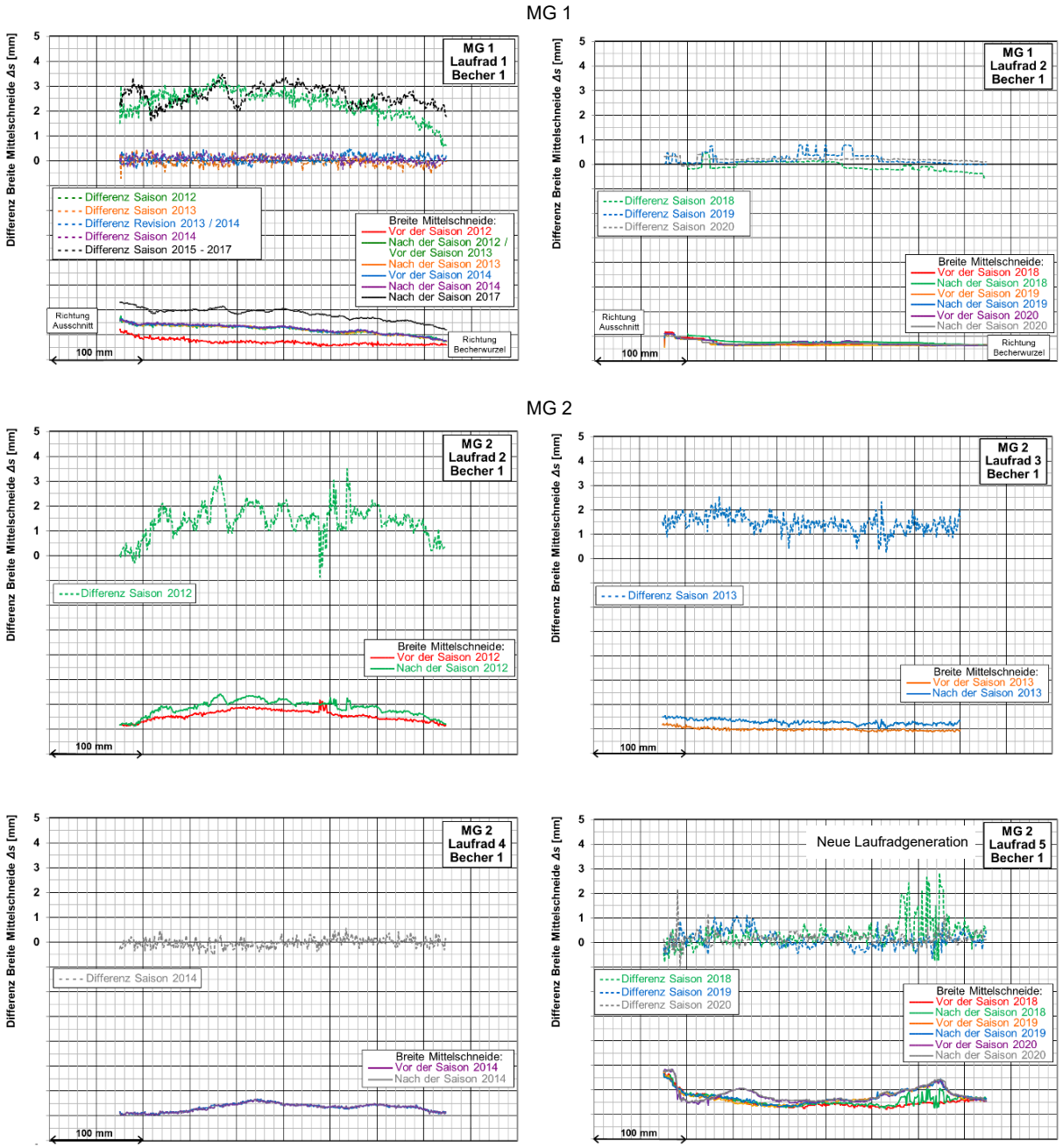


Abbildung 124: Mittelschneidenbreiten der Becher Nr. 1 der Laufräder des KW Fieschertal von 2012 bis 2020 mit Darstellung der Veränderungen der Mittelschneidenbreite im oberen Teil der Abbildungen (Messungen und Auswertung: HSLU).

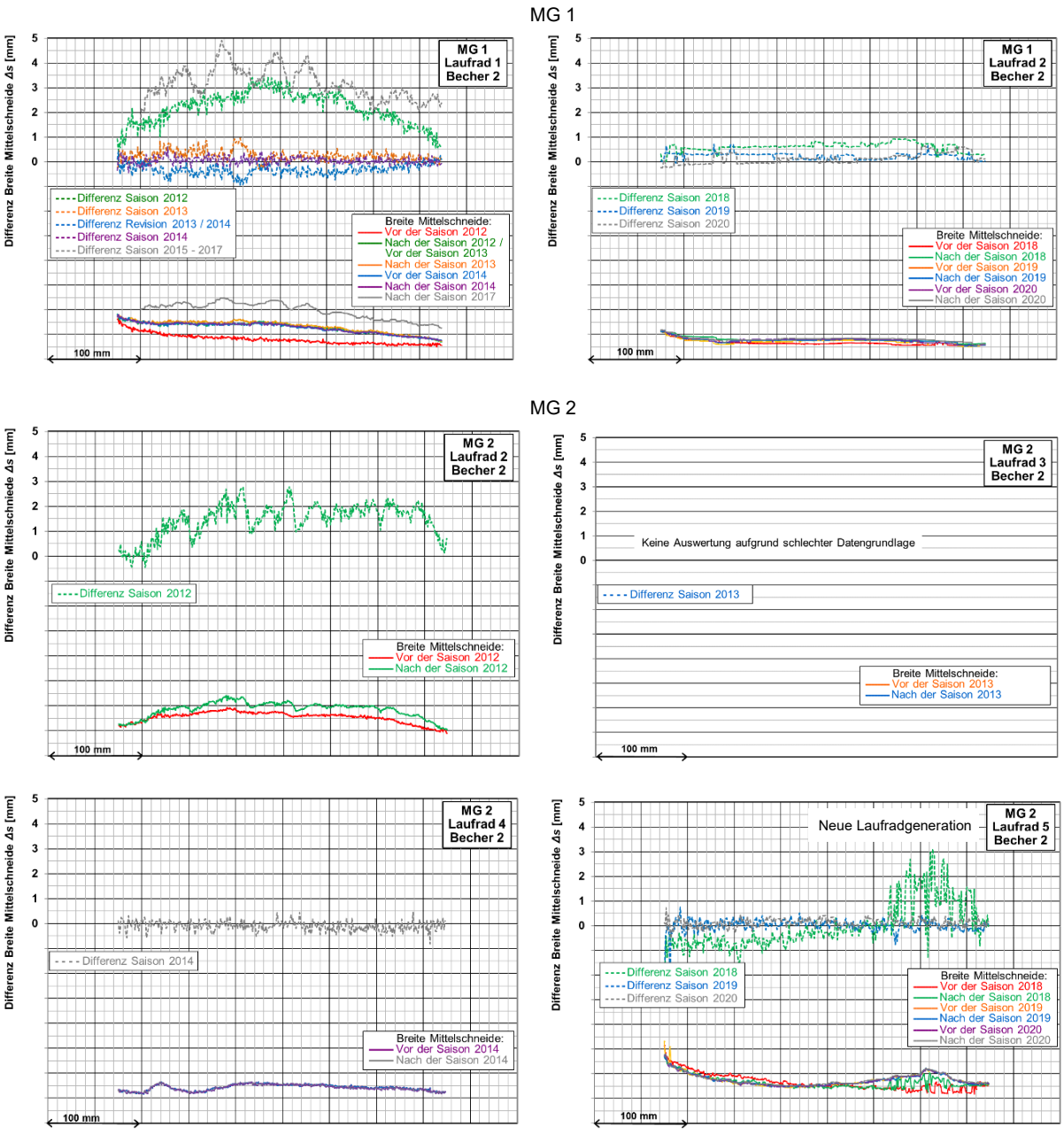


Abbildung 125: wie Abbildung 124, aber Becher Nr. 2.

B3 Becherausschnittstiefen (Draufsicht)

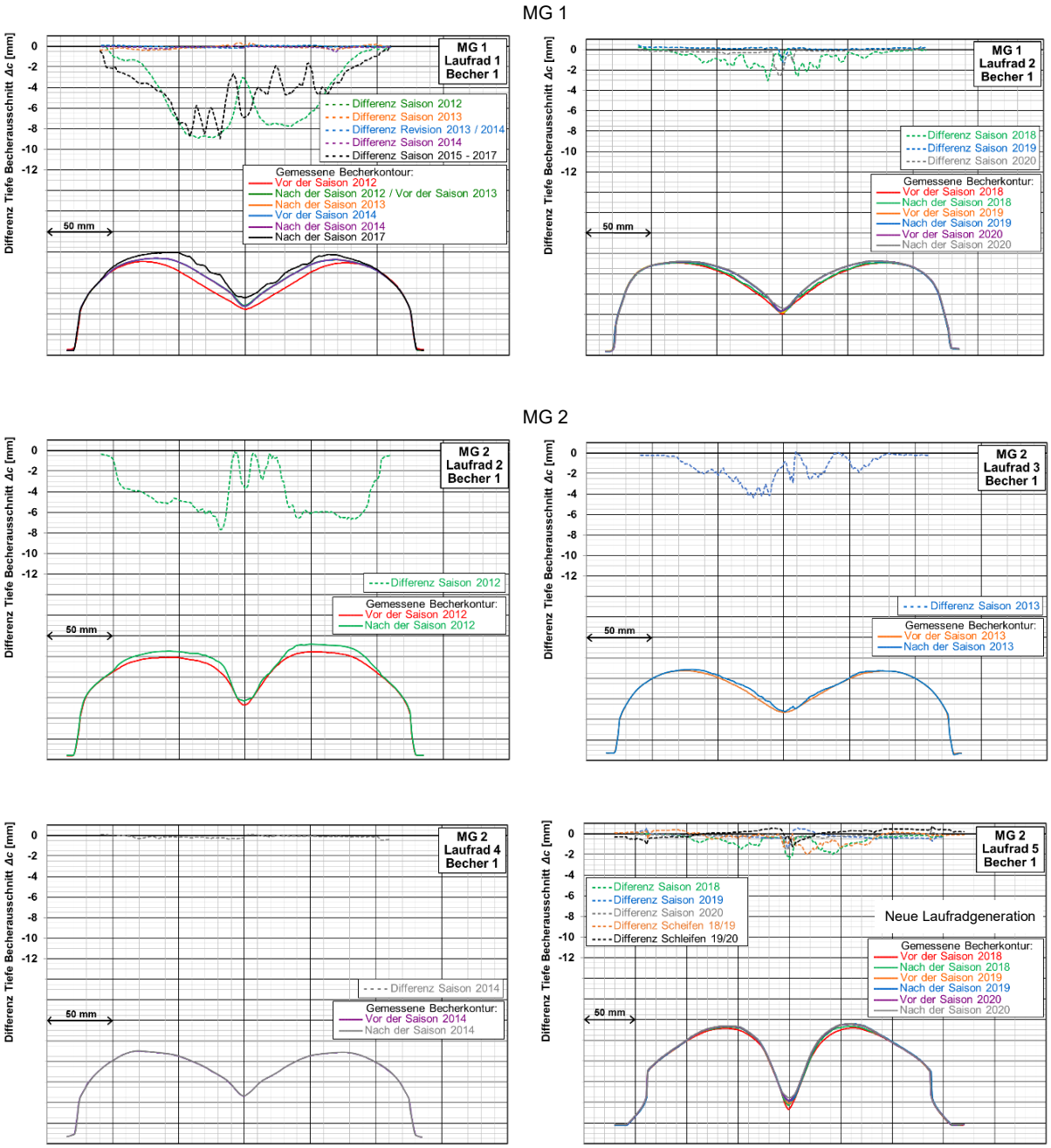


Abbildung 126: Becherausschnitte (Draufsicht) der Becher Nr. 1 der Laufräder des KW Fieschertal von 2012 bis 2020 mit Darstellung der Veränderungen der Ausschnittkanten im oberen Teil der Abbildungen (Messungen und Auswertung: HSLU).

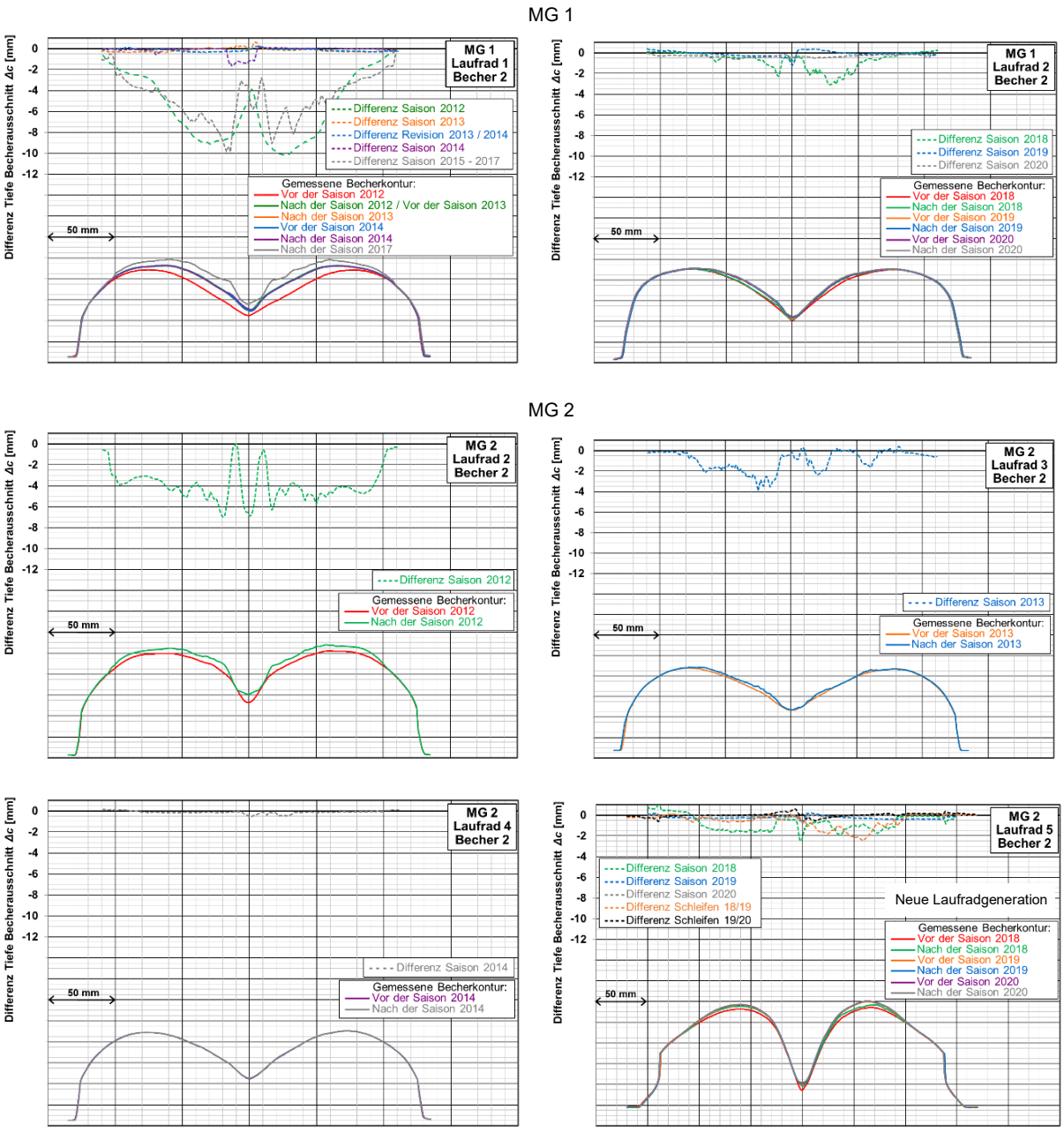


Abbildung 127: wie Abbildung 126, aber Becher Nr. 2.

C Schichtdickenmessungen in den Laufradbechern

C1 Verteilungen der Schichtdicken

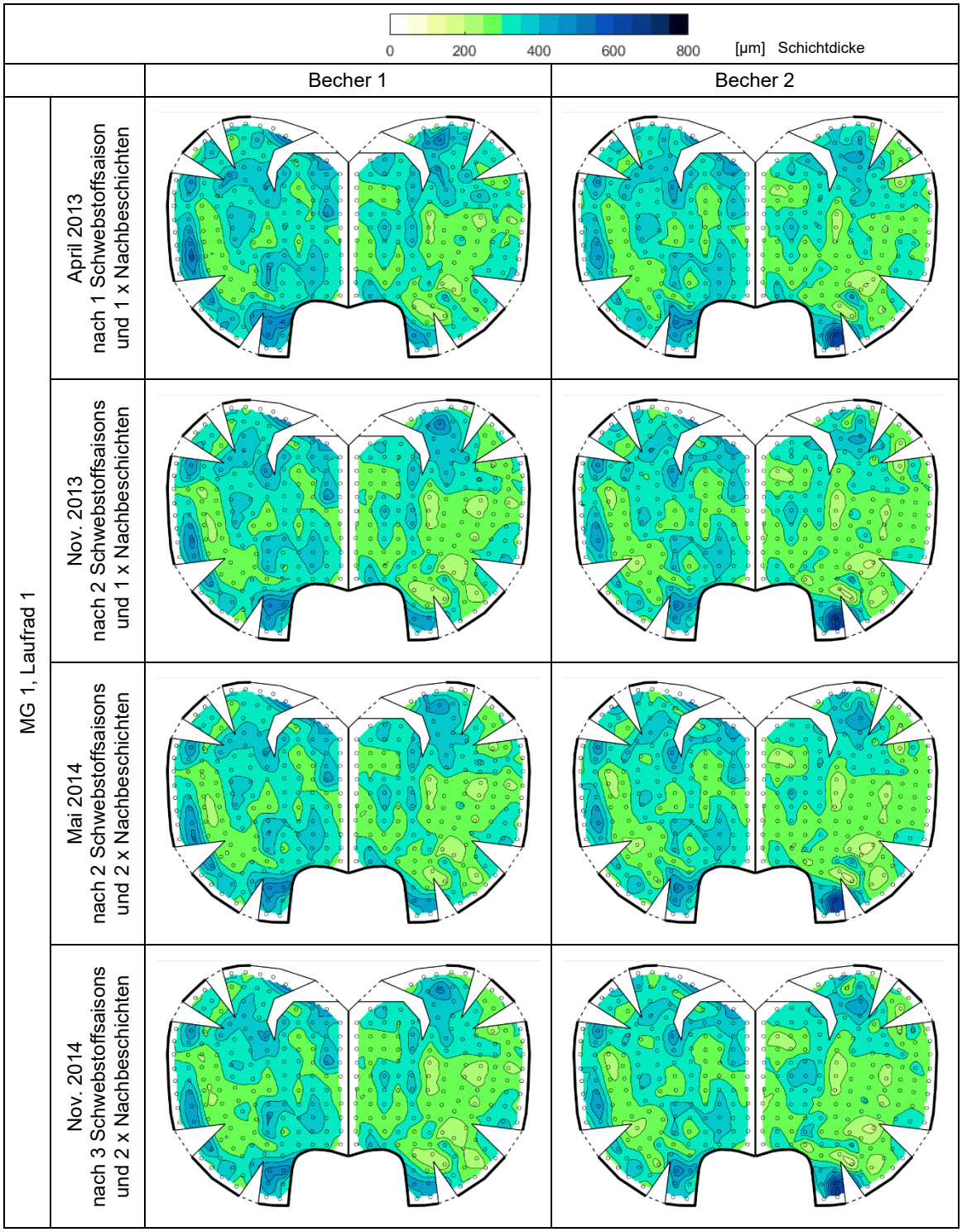


Abbildung 128: Verteilungen der gemessenen Schichtdicken in den Bechern Nr. 1 (linke Spalte) und Nr. 2 (rechte Spalte) des KW Fieschertal; geordnet nach MG, Laufrad und Datum (siehe Beschriftung links der Grafiken; Messungen und Auswertung: VAW).
Die Anzahl Schwebstoffsaisons und Nachbeschichtungen beziehen sich auf die Einsatzdauer seit der grossen Revision des Laufrads.

Schema mit eingesetzten Laufrädern von 2012 bis 2020 und Zeitpunkten der Vermessungen siehe Abbildung 45.

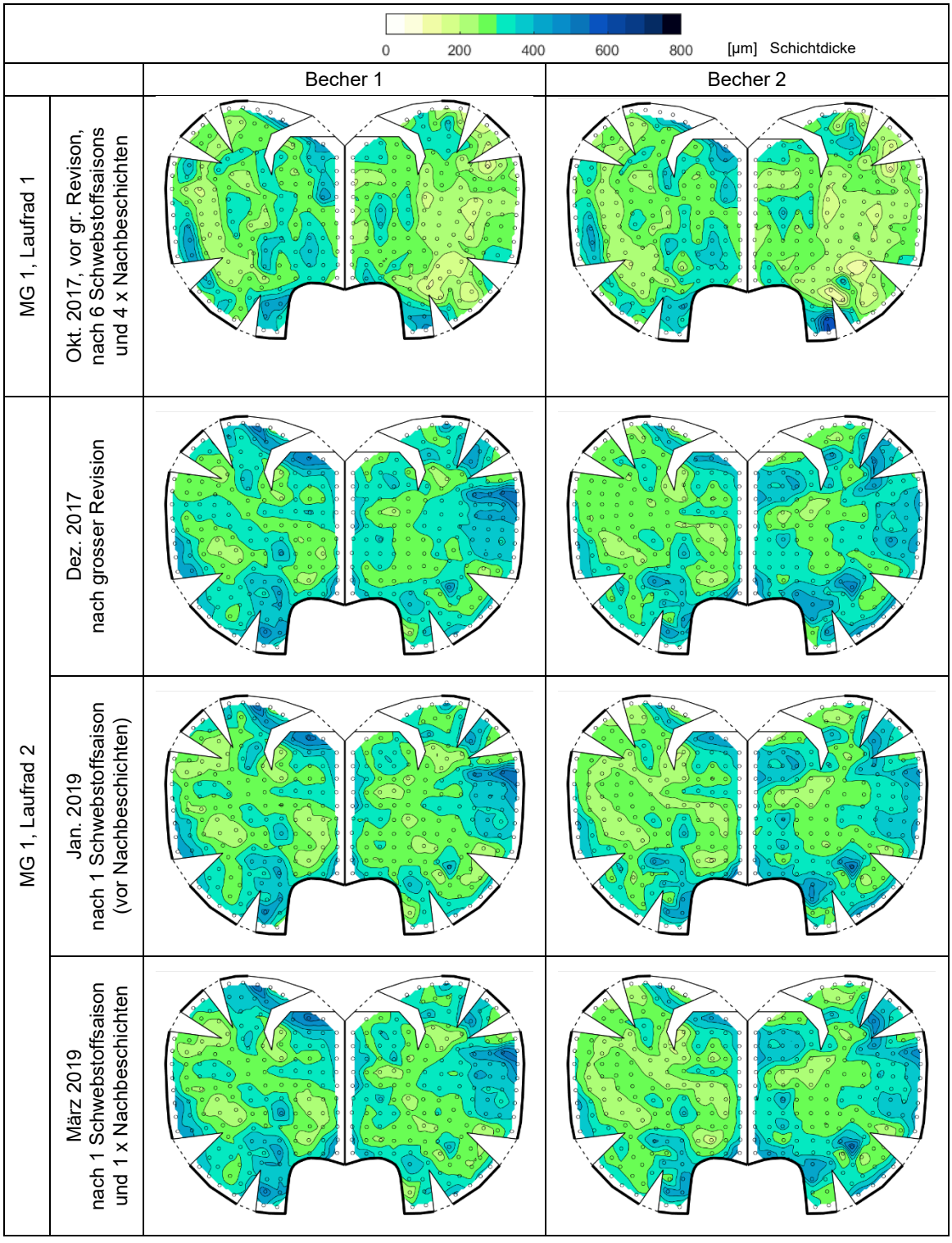


Abbildung 129: Fortsetzung von Abbildung 128.

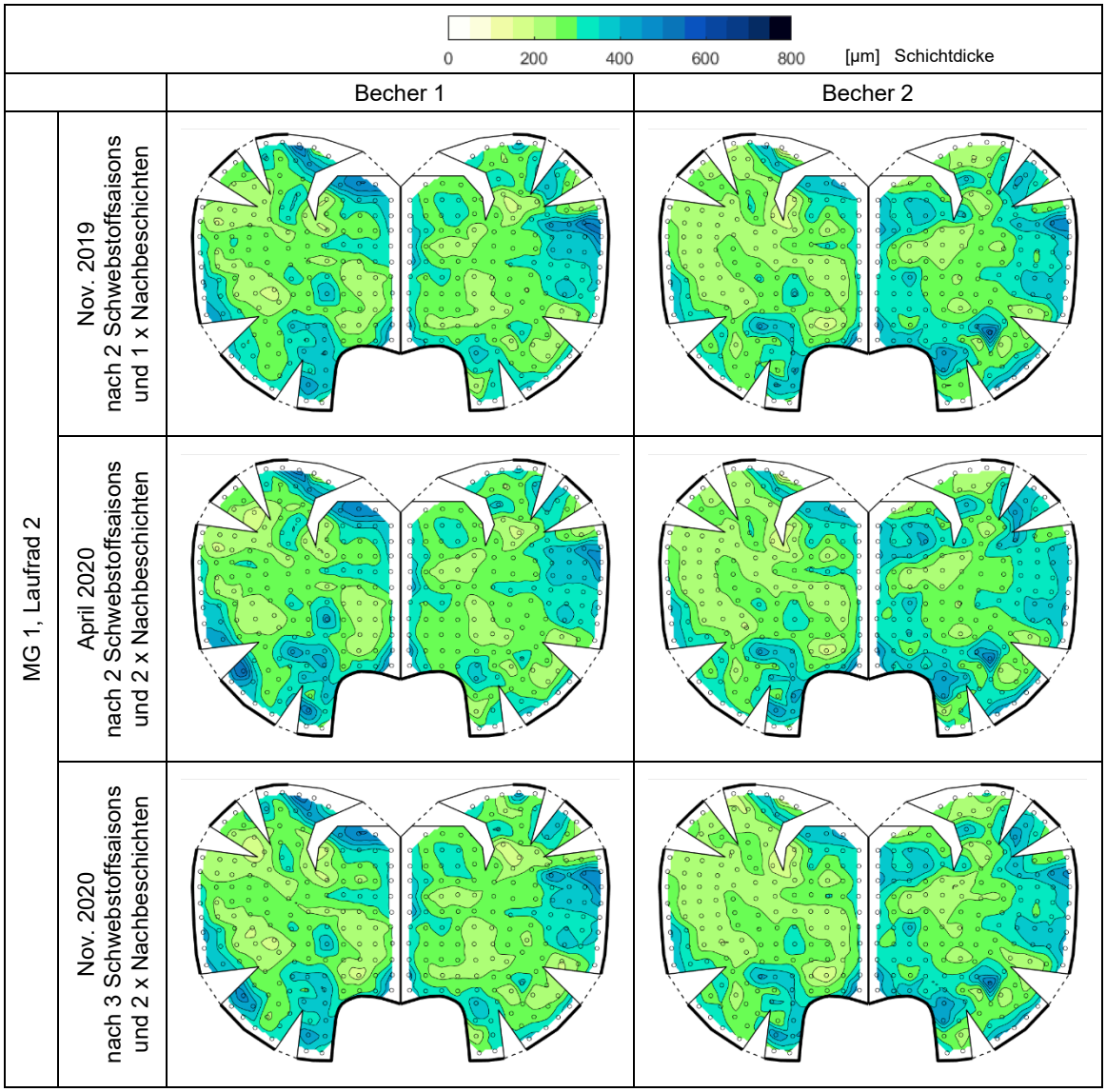


Abbildung 130: Fortsetzung von Abbildung 128.

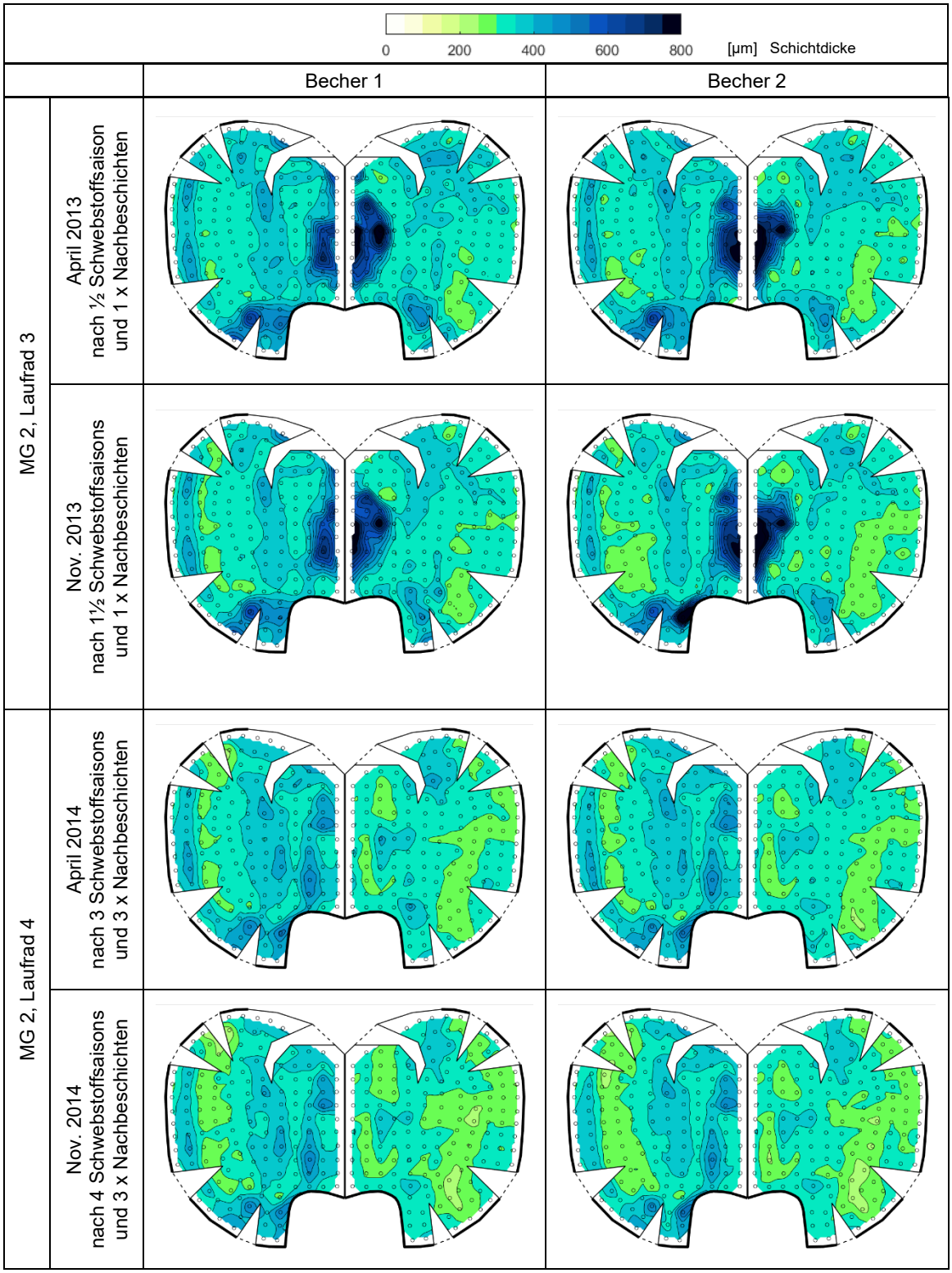


Abbildung 131: Fortsetzung von Abbildung 128.

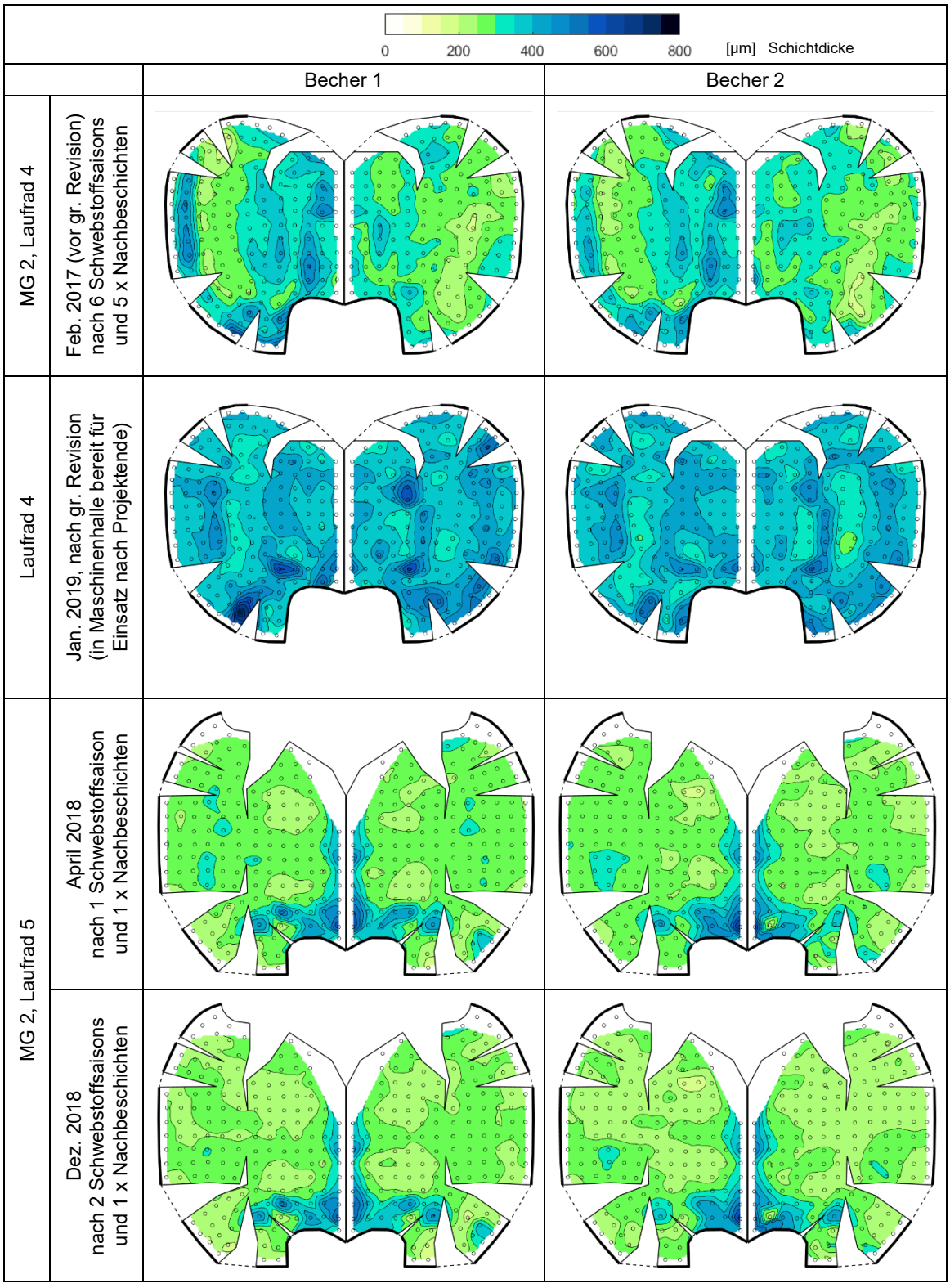


Abbildung 132: Fortsetzung von Abbildung 128.

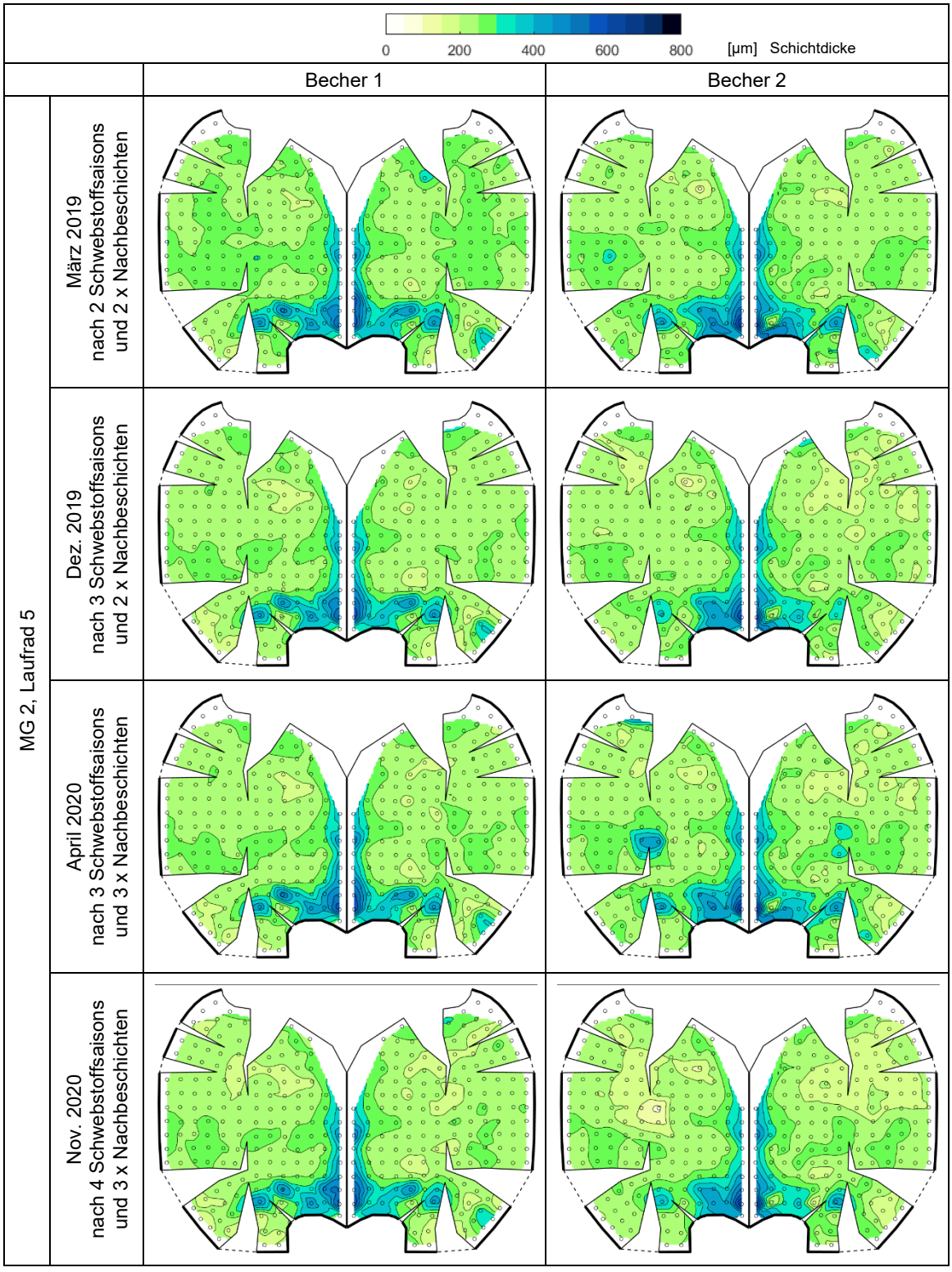


Abbildung 133: Fortsetzung von Abbildung 128.

C2 Schichtdickenreduktionen (Abrasion) über jeweils eine Schwebstoffsaison

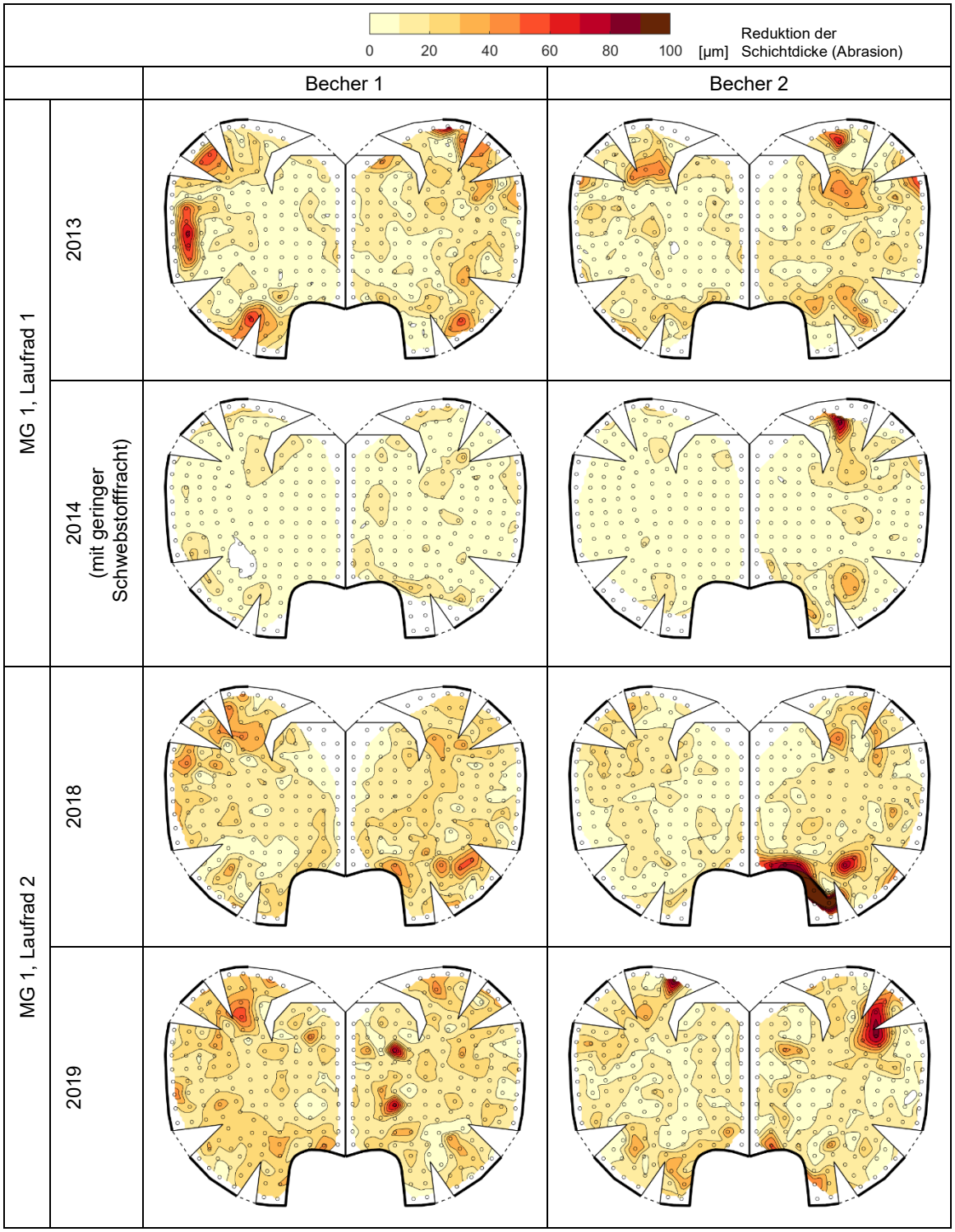


Abbildung 134: Verteilungen der Schichtdickenreduktionen (zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten) in den Bechern Nr. 1 (linke Spalte) und Nr. 2 (rechte Spalte) des KW Fieschertal; geordnet nach MG, Laufrad und Datum (siehe Beschriftung links; Messungen und Auswertung: VAW). Aufgrund der relativ grossen Messunsicherheit sind diese Schichtdickendifferenzen über einzelne Schwebstoffsaisons weniger verlässlich als jene über mehrere Jahre im Anhang C4.

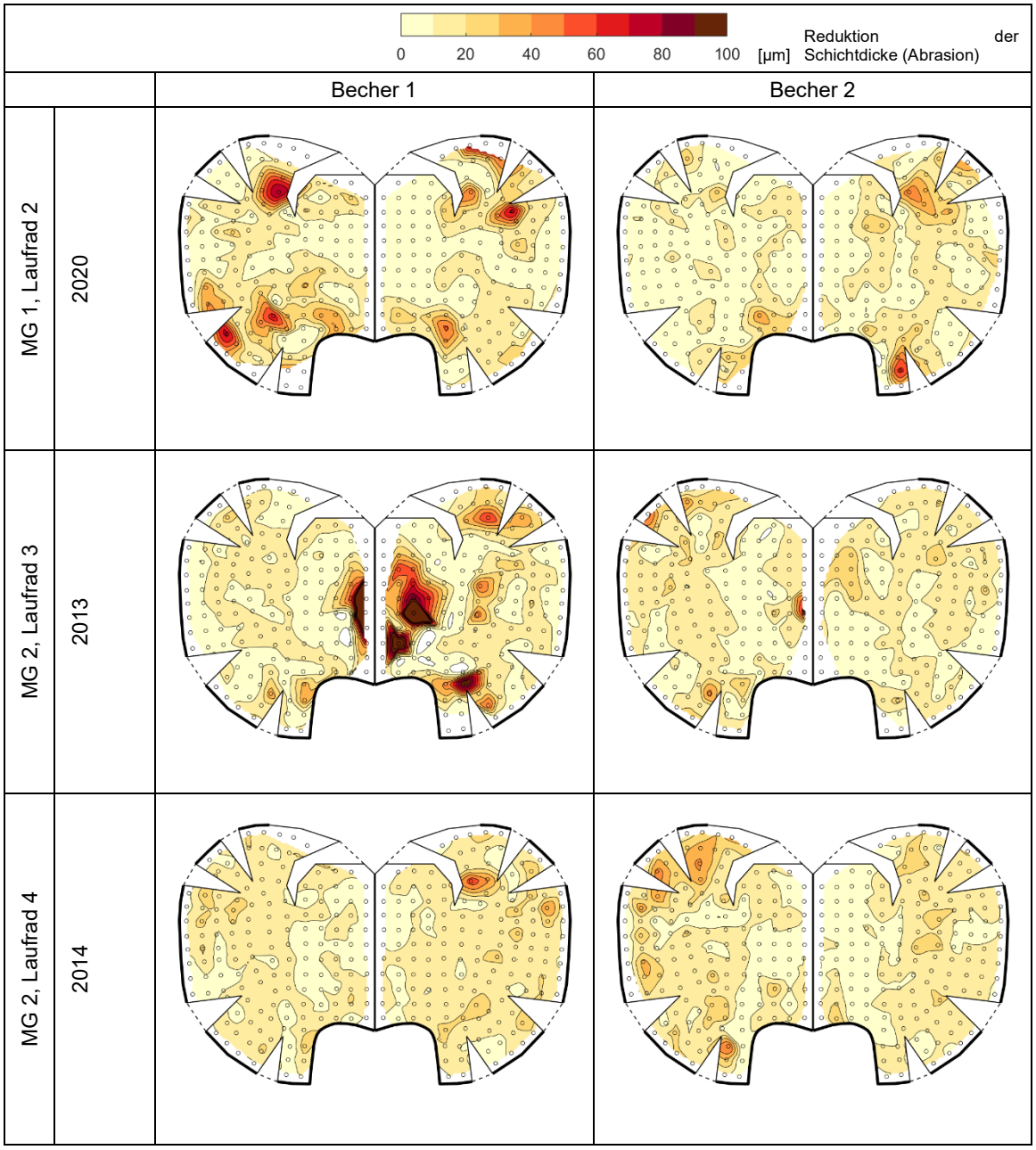


Abbildung 135: Fortsetzung von Abbildung 134.

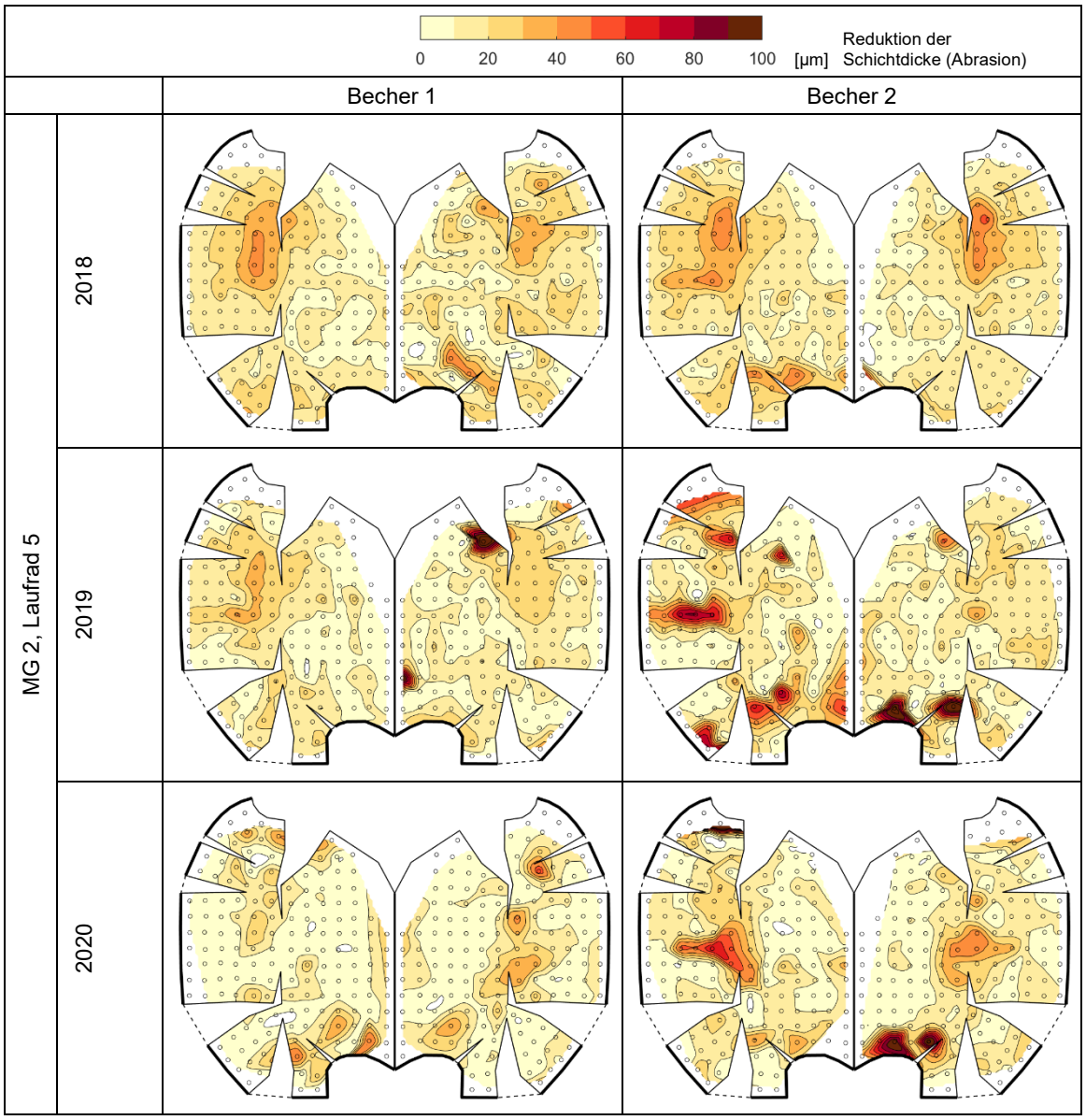


Abbildung 136: Fortsetzung von Abbildung 134.

C3 Schichtdickenveränderungen infolge Nachbeschichtens bzw. Messunsicherheit

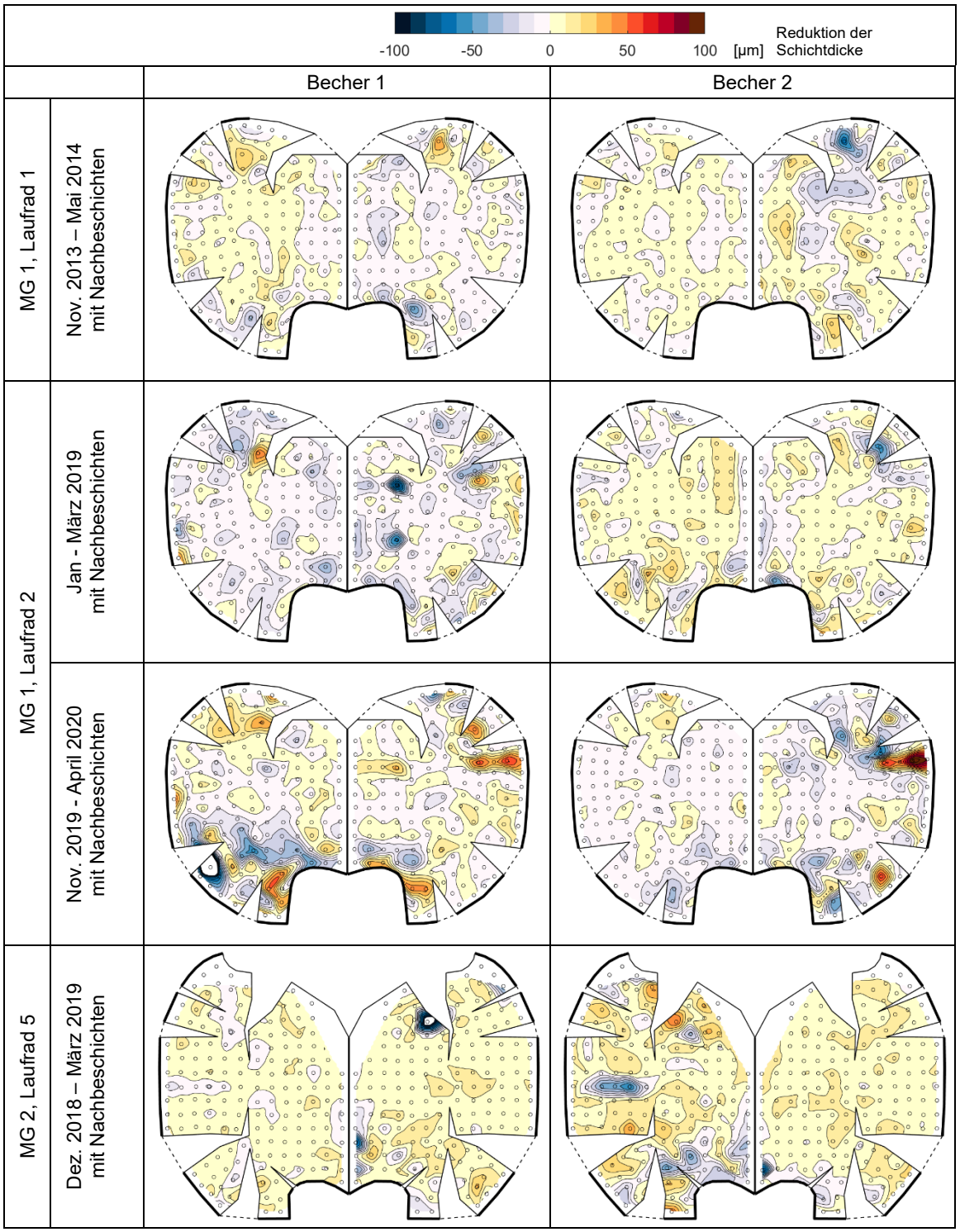


Abbildung 137: Verteilungen der Schichtdickendifferenzen vor und nach den Revisionsarbeiten im Winter in den Bechern Nr. 1 (linke Spalte) und Nr. 2 (rechte Spalte) des KW Fieschertal; geordnet nach MG, Laufrad und Datum (siehe Beschriftung links der Grafiken; Messungen und Auswertung: VAW).
Negative Differenzen (weiss bis blau) zeigen wie erwartet eine stellenweise Zunahme der Schichtdicke (infolge Nachbeschichtens). Möglich Gründe für positive Differenzen (gelb-orange-rot-braun) sind Messunsicherheit oder Schleifen/Polieren bzw. Sandstrahlen.

C4 Schichtdickenveränderungen über mehrere Schwebstoffsaisons mit Nachbeschichten

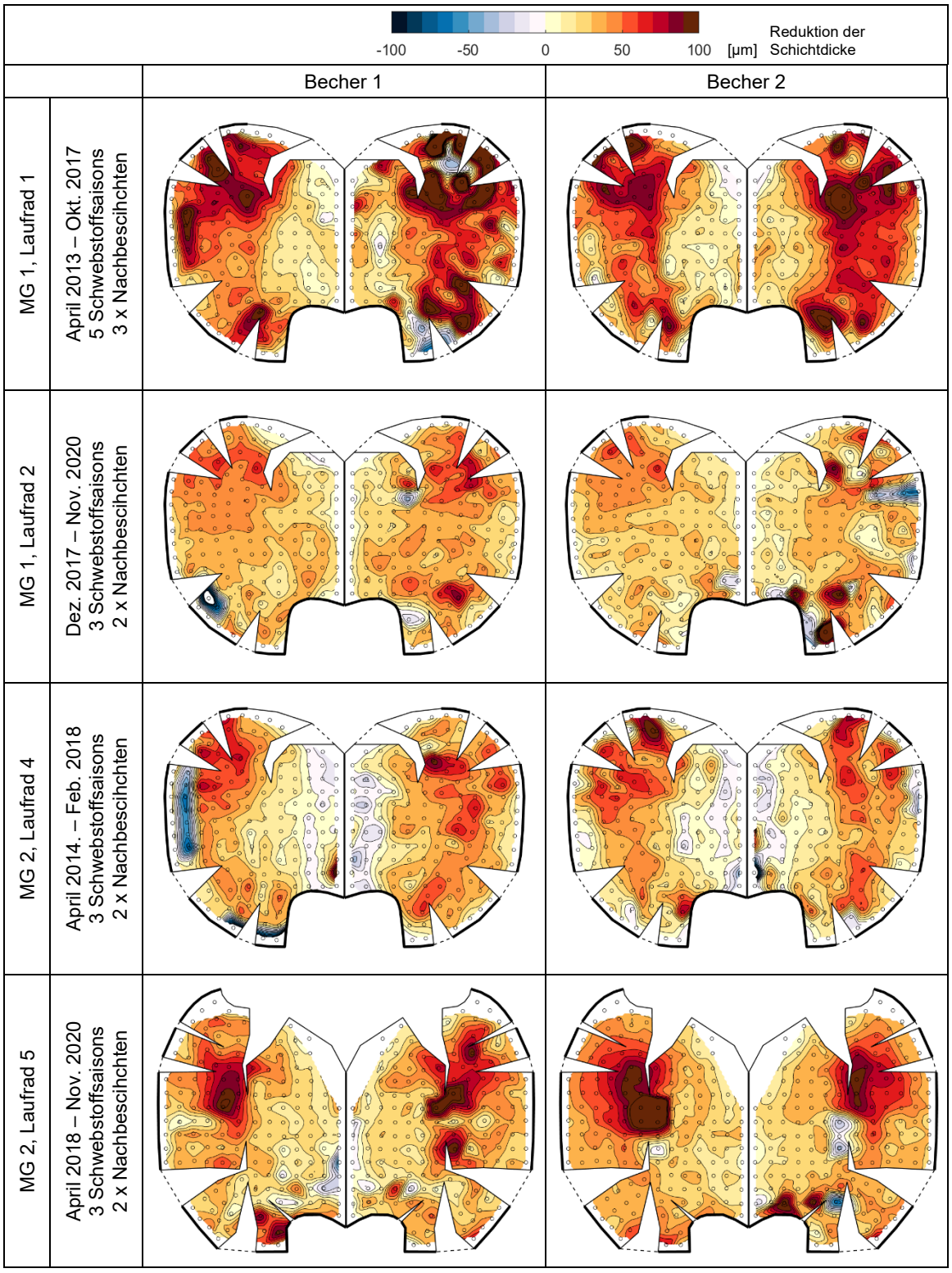


Abbildung 138: Verteilungen der Schichtdickenreduktionen in den Bechern Nr. 1 (linke Spalte) und Nr. 2 (rechte Spalte) zwischen erster und letzter Messung an jedem eingesetzten Laufrad des KW Fieschertal (Messungen und Auswertung: VAW). Schichtdicken-reduktionen am Laufrad 3 mit nur zwei Messungen (vor und nach einer einzelnen Schwebstoffsaison) siehe Abbildung 135.