



Schlussbericht vom 28.02.2023

Optimierung von Hochdruck-Kleinwasserkraftanlagen an feinsedimentreichen Flüssen (OptiSed)

Fallstudie zu Entsandung und Turbinenabrasion am Kleinwasserkraftwerk Susasca



Fotos: © VAW, ETH Zürich (2018 - 2021). a) Wasserfassung des Kleinwasserkraftwerks Susasca, b) Blick in eine Entsanderkammer mit abgesenktem Wasserspiegel zu Beginn einer Spülung und c) erodierter Becher eines unbeschichteten Laufrads einer Pelonturbine.



ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie

Datum: 28.02.2023

Ort: Zürich

Subventionsgeberin:

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

Ko-Finanzierung:

Ouvra Electrica Susaca Susch SA (OESS)
La Rouvna 100
CH-7542 Susch
<http://www.oess-sa.ch/>

Subventionsempfängerin:

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

Autor/in:

Dr. David Felix, VAW bis Dez. 2021, david.felix@aquased.ch
Maximilian Kastinger, VAW ab Nov. 2020, kastinger@vaw.baug.ethz.ch
Nevin Cracknell, VAW ab Aug. 2021, cracknell@vaw.baug.ethz.ch
Sebastian Davidis, VAW bis Aug. 2021, sebastian.davidis@energieburo.ch
Yannick Marschall, VAW, marschall@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. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

BFE-Vertragsnummer: SI/501760-01

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



Zusammenfassung

Turbinen von alpinen Kleinwasserkraftanlagen (KWKW) mit einigen hundert Metern Fallhöhe ohne Kopfspeicher sind besonders von Hydroabrasiv-Verschleiss betroffen. Dadurch steigen die Unterhaltskosten, und die Elektrizitätsproduktion nimmt ab. In einer Fallstudie am KWKW Susasca bei Susch (GR) wurden das Sedimentaufkommen an der Wasserfassung, die Entsandung, die Turbinenabrasion, die Wirkungsgradveränderungen, sowie die betriebs- und energiewirtschaftlichen Auswirkungen der Sedimentbelastung und Optimierungsmassnahmen untersucht.

Die Messung von Fliessgeschwindigkeiten in den Entsanderkammern im Sommer 2019 zeigte, dass die Beruhigungsrechen nicht optimal ausgebildet waren. Daher wurden die Rechenstäbe verlängert. Eine erneute Messung im Sommer 2021 zeigte deutlich gleichmässigere Fliessgeschwindigkeiten, was die Absetzleistung des Entsanders begünstigt. Weiter wurde die Instrumentierung zur Messung der Sedimentniveaus in den Entsanderkammern verbessert, um bedarfsgerechte Spülungen (von Ferne) zu unterstützen.

In den Jahren 2019 - 2021 wurden die Konzentration der im Triebwasser enthaltenen Sedimentpartikel kontinuierlich gemessen sowie zeitweise auch deren Grössenverteilung und weitere Sedimenteigenschaften. In den Wintern wurde jeweils das Ausmass der Abrasion an den Turbinen quantifiziert und mit der Partikelbelastung korreliert. Weiter wurden die Änderungen der Turbinenwirkungsgrade seit der Inbetriebnahme des KWKW ausgewertet und mit der Abrasion korreliert. Die quantifizierten Zusammenhänge können als Grundlagen für Prognosen verwendet werden.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt dienen dem verbesserten Entwurf neuer alpiner KWKW und der Optimierung bestehender Anlagen hinsichtlich Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit.

Résumé

Les turbines des petites centrales hydroélectriques (PCH) alpines ayant une chute de quelques centaines de mètres et pas de possibilité de stockage d'eau sont particulièrement touchées par l'usure. L'abrasion augmente les coûts d'entretien et diminue la production d'électricité. Dans une étude de cas à la PCH Susasca près de Susch (GR), l'accumulation de sédiments à la prise d'eau, le dessablage, l'abrasion de la turbine, les changements de leurs rendements, ainsi que les effets opérationnels et énergétiques de la charge sédimentaire et les mesures d'optimisation ont été étudiés.

La mesure des vitesses d'écoulement dans les chambres du dessableur durant l'été 2019 a montré que les grilles de tranquillisation (redresseurs d'écoulement) n'étaient pas optimales. Les grilles ont donc été rallongées. Une deuxième mesure en été 2021 a montré des vitesses d'écoulement nettement plus homogènes, ce qui favorise la décantation. Par ailleurs, l'instrumentation permettant de mesurer les niveaux de sédiments dans les chambres du dessableur a été améliorée afin de favoriser des purges (à distance) adaptées aux besoins.

Entre 2019 et 2021, la concentration des particules sédimentaires contenues dans l'eau motrice a été mesurée en continu, de même que la répartition de leur taille (pendant quelques périodes) et d'autres propriétés des sédiments. Pendant les hivers, l'abrasion des turbines a été quantifiée et corrélée à la charge en particules. De plus, les réductions du rendement des turbines depuis la mise en service de la centrale ont été évaluées et mises en corrélation avec l'abrasion. Les corrélations quantifiées peuvent être utilisées comme bases pour des prévisions.

Les résultats du projet seront utilisés pour améliorer la conception des nouvelles PCH dans les Alpes et pour optimiser des PCH existantes en termes d'efficacité énergétique et de rentabilité.



Summary

Turbines of Alpine small hydropower plants (SHPP) with a head of several hundred metres and without headwater storage are particularly affected by hydro-abrasive erosion. This increases maintenance costs and reduces electricity production. In a case study at the SHPP Susasca near Susch (GR), the sediment yield at the water intake, the partial sediment exclusion at the sand trap, the turbine abrasion, the changes in turbine efficiency, as well as the economic and energetic effects of the sediment load and optimisation measures are investigated.

The measurement of flow velocities in the sand trap chambers in summer 2019 showed that the tranquilizing rakes were not optimally designed. Therefore, the rake bars were extended. A further measurement in summer 2021 showed a significantly more homogeneous flow velocity distribution, which favours the sediment settling. Furthermore, the instrumentation for measuring the sediment levels in the sand trap chambers was improved to support flushing as needed from remote.

In the years 2019 to 2021, the concentration of sediment particles contained in the turbine water was continuously measured, as well as their size distribution (for some periods) and other sediment properties. During the winters, the extent of abrasion on the turbines was quantified and correlated with the particle load. Furthermore, the changes of the turbine efficiencies since the commissioning of the SHPP were evaluated and correlated with the abrasion. The quantified correlations can be used as a basis for forecasts.

The findings of the project will serve to improve the design of new Alpine SHPP plants and to optimise existing ones regarding energetic and economic efficiency.

Wichtigste Erkenntnisse

- Bei Laufwasserkraftwerken mit Fallhöhen von mehreren hundert Metern an sedimentreichen Flüssen ist der hydro-abrasive Verschleiss an Turbinen ein nicht zu unterschätzender technischer und wirtschaftlicher Aspekt, insbesondere bei kleinen Pelton-Turbinen mit vier bis sechs Düsen.
- Eine Hartbeschichtung ist vorteilhaft, um die Turbinenabrasion und die Wirkungsgradabnahme zu verlangsamen, vorausgesetzt, dass gröbere Partikel wie Sand durch einen geeigneten Entwurf und einen angemessenen Betrieb der Bauwerke im Fassungsbereich vom Turbinenwasser ferngehalten werden und dass die dennoch auftretende lokale Erosion des Grundmaterials kein Grund für die vorzeitige Ausserbetriebnahme des Laufrads wird.
- Beruhigungsrechen am Einlauf von Sandfängen sollen über den gesamten Abflussquerschnitt einen ähnlichen Strömungswiderstand aufweisen, um ein möglichst homogenes Strömungsfeld zu erzeugen, das den Absetzvorgang begünstigt und damit den Eintrag von Feststoffen in das Triebwassersystem und den Turbinenverschleiss verringert.
- Die Überwachung des Wirkungsgrades der einzelnen Turbinen und die Bestimmung des optimalen Zeitpunkts für den Austausch von Laufrädern ist bei erhöhten Strompreisen von wirtschaftlicher Bedeutung und fördert die effiziente Nutzung des Wasserkraftpotenzials.

Conclusions principales

- Dans les centrales au fil de l'eau qui exploitent des chutes de plusieurs centaines de mètres sur des rivières chargées en sédiments, l'érosion des turbines est un aspect technique et économiquement important, en particulier pour les petites turbines Pelton avec quatre à six injecteurs.
- Un revêtement dur ralentit l'érosion de la turbine et les réductions de rendement, à condition que les particules plus grossières comme le sable soient exclues de l'eau motrice par une conception



et un fonctionnement adéquats des ouvrages de captage, et si l'érosion localisée du matériau de base inévitable ne devienne pas déterminante pour un remplacement précoce de la roue.

- Les grilles de tranquillisation (redresseurs d'écoulement) à l'entrée des dessableurs devraient provoquer une résistance à l'écoulement similaire sur toute la section d'écoulement pour produire un champ d'écoulement homogène qui est favorable au processus de décantation et réduit donc l'introduction de matières solides dans le système d'eau motrice et l'érosion des turbines.
- Avec les prix élevés de l'électricité, le contrôle de l'efficacité et le remplacement des roues en bon moment en fonction du déficit d'efficacité réel sont économiquement importants et favorisent l'utilisation efficace du potentiel hydroélectrique.

Key findings

- For run-of-river HPPs with heads of several hundred meters at sediment laden rivers, hydro-abrasive erosion is a technical and economic issue which should not be underestimated, particularly for small Pelton turbines with four to six nozzles.
- Hard-coating is beneficial to slow down the turbine erosion and efficiency reductions, provided that coarser particles such as sand are kept out of the power waterway by adequate design and operation of the headworks, and if the unavoidable local erosion of base material becomes not decisive to change the runner earlier.
- Tranquilizing rakes at the inflow of sand traps should cause similar flow resistance over the whole flow section to produce a homogeneous flow field which is favourable for the sediment settling process and hence reduces the sediment load in the power waterway and turbine erosion.
- With elevated electricity prices, efficiency monitoring and the optimal timing of runner replacements based on the actual efficiency deficit is economically important and fosters the efficient use of the hydropower potential.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Wichtigste Erkenntnisse.....	4
Conclusions principales.....	4
Key findings	5
Inhaltsverzeichnis	6
1 Ausgangslage	10
2 Zielsetzung	11
3 Theoretische Grundlagen.....	12
3.1 Turbinenabrasion.....	12
3.1.1 Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2019).....	12
3.1.2 Anpassungen am IEC-Abrasionsmodell gemäss Felix (2017).....	13
3.1.3 Abrasionsmasse gemäss Felix (2017)	14
3.1.4 Anpassung des IEC-Modells für Pelonturbinen gemäss Rai <i>et al.</i> (2020b).....	14
3.2 Wirkungsgradänderungen infolge Abrasion	17
3.3 Ausserbetriebnahme während hoher Schwebstoffbelastung.....	19
4 Wasserkraftanlage der Fallstudie	21
4.1 Lage und Layout.....	21
4.2 Einzugsgebiet	22
4.3 Bauwerke bei der Wasserfassung und Druckleitung	23
4.4 Maschinenhaus mit Pelonturbinen	25
4.5 Laufräder und Düsen.....	26
5 Vorgehen	27
5.1 Entsander	27
5.1.1 Änderung der Betriebsweise während Entsanderspülungen	27
5.1.2 Messkampagnen am Entsander.....	27
5.1.3 Anpassung der Beruhigungsrechen	29
5.1.4 Anpassung der Ultraschall-Sedimentniveau-Sonden (USNS)	30
5.1.5 Zusätzliche Sedimentniveau-Grenzstandssensoren.....	31
5.2 Schwebstoffbelastung	33
5.2.1 Übersicht über die Schwebstoff-Messeinrichtungen	33
5.2.2 Trübungssonde vor der Wasserfassung	34
5.2.3 Schwebstoff-Messeinrichtungen in der Entnahmekammer	35
5.2.4 CFDM im Betriebsraum	36



5.2.5	Laserdiffraktometer im Betriebsraum	38
5.2.6	Weitere Installationen im Betriebsraum für das Schwebstoffmonitoring	38
5.2.7	Niederschlags-Daten	39
5.2.8	Laboranalysen	39
5.3	Turbinenabrasion.....	40
5.3.1	Messkonzept	40
5.3.2	Zeitpunkte der Turbineninspektionen mit Fotos und Vermessungen.....	40
5.3.3	Definition von charakteristischen Abmessungen (Verschleissgrössen).....	40
5.3.4	Messung der Mittelschneidenbreite mit einer Schablone.....	42
5.3.5	Messungen an den Becherausschnitten und Messung der Bechertiefe	42
5.3.6	Messung der Becherwanddicke und Vergleich mit Becherprofil-Schablone.....	43
5.3.7	Bildbasierte Vermessung der Mittelschneiden und Becherausschnitte	43
5.3.8	Wägung von angelieferten oder ausgebauten Laufrädern.....	47
5.4	Turbinenwirkungsgrade	48
6	Resultate und Diskussion.....	49
6.1	Staubecken und Entsanderkammern	49
6.1.1	Anzahl und Dauern der Spülungen	49
6.1.2	Entsanderspülungen und Kraftwerksbetrieb	51
6.1.3	Ablagerungsprofile in den Entsanderkammern	53
6.1.4	Fliessgeschwindigkeiten in den Entsanderkammern	55
6.1.5	Schwebstoffkonzentrationsverteilung in Entsanderkammern	58
6.2	Schwebstoffbelastung	59
6.2.1	Mineralogische Zusammensetzung und Partikelhärte	59
6.2.2	Partikelform.....	60
6.2.3	Wasserproben	61
6.2.4	SSC von den Messwerten der Trübungssonden.....	62
6.2.5	SSC von den Messwerten des akustischen Sensors.....	63
6.2.6	SSC von den Messwerten des Coriolis Massestrom- und Dichtemessgeräts (CFDM)	64
6.2.7	Partikelgrössenverteilungen und SSC von Laserdiffraktometer.....	64
6.2.8	Partikelgrössen und typische SSC-Verläufe im Hochsommer	64
6.2.9	Schwebstoffkonzentrationen über drei Jahre	66
6.2.10	Schwebstoff-Frachten, turbinierte Wassermengen und mittlere SSC.....	68
6.2.11	Schwebstofftransport-Ereignisse.....	70
6.2.12	Particle Loads gemäss IEC 62364 (2019) und Schwebstofffrachten pro MG.....	72
6.3	Turbinenabrasion.....	75
6.3.1	Beschreibung der Abrasion an den Laufrädern.....	75
6.3.2	Abrasion an den Mittelschneiden	78
6.3.3	Abrasion an den Becherausschnitten.....	79
6.3.4	Abrasion an der Innenseite der Becherwände	80



6.3.5	Verschleissgrössen im Lauf der Jahre	80
6.3.6	Masseverlust der Laufräder infolge Abrasion.....	83
6.3.7	Abrasion an den Düsen	84
6.4	Abrasion je nach Partikelbelastung (IEC-Abrasionsmodell).....	85
6.4.1	Übersicht.....	85
6.4.2	Charakteristische Relativgeschwindigkeit	85
6.4.3	Bestimmung von Koeffizienten für das vereinfachte IEC-Abrasionsmodell	85
6.4.4	Vergleich mit Rai <i>et al.</i> (2020b) und Diskussion von Verbesserungsmöglichkeiten	87
6.4.5	Anwendung des Abrasionsmodells	88
6.5	Turbinenwirkungsgrad-Reduktionen	89
6.5.1	Reduktion der Volllast-Wirkungsgrade im Lauf der Zeit.....	89
6.5.2	Reduktion der Volllast-Wirkungsgrade in Funktion der Partikelbelastung	93
6.5.3	Reduktion des Volllast-Wirkungsgrades in Funktion von Verschleissgrössen.....	95
6.5.4	Reduktion des Wirkungsgrades über den gesamten Lastbereich.....	97
6.6	Wirtschaftlichkeit.....	98
6.6.1	Schwebstoffbedingte Turbinenkosten	98
6.6.2	Wirtschaftlichkeit einer Laufrad-Beschichtung	98
6.6.3	Wirtschaftlich optimaler Zeitpunkt für Laufradersatz	100
6.6.4	Temporäre Ausserbetriebsnahmen während hoher Partikelbelastung.....	102
7	Synthese.....	106
7.1.1	Einordnung der Studie.....	106
7.1.2	Schwebstoffmessungen in Echtzeit.....	106
7.1.3	Entsander	107
7.1.4	Turbinenabrasion.....	107
7.1.5	Wirkungsgradänderungen	108
7.1.6	Wirtschaftlichkeit.....	108
8	Schlussfolgerungen	109
Referenzen		110
Grundlagen		110
Arbeiten von Studierenden		112
Bisherige Publikationen aus diesem Projekt		112
Danksagung		113
Anhang (siehe folgende Seite)		



Anhang A: Schwebstoffbelastung.....	114
A1: Mikroskop-Bilder von Feinsedimentpartikeln	114
A2: Monatliche Sedimentfrachten und mittlere SSC	116
A3: Niederschlagshöhen und Sedimentfrachten	117
A4: Turbinierte Wasservolumen und Sedimentfrachten.....	118
A5: Schwebstofftransport-Ereignisse	119
A6: Resultate des Coriolis-Massenstrom- und Dichtemessgeräts (CFDM)	125
Anhang B: Turbinenabrasion.....	126
B1: Mittelschneiden-Breiten aus Schrägdraufsichten.....	126
B2: Mittelschneiden-Höhenreduktion aus Seitenansichten	128
B3: Becherwanddicken	130
Anhang C: Wirkungsgradabnahmen.....	132
C1: Wirkungsgradabnahmen bei Teil- bis Volllastbetrieb	132



1 Ausgangslage

Beim Entwurf und Betrieb von Wasserkraftanlagen ist der Umgang mit Sedimenten ein wichtiges Thema. Dieses gewinnt infolge des Gletscherrückgangs, der zunehmenden Variabilität des Niederschlags, umfangreicherer umweltrechtlicher Vorschriften und des steigenden Bedarfs an erneuerbarer Energie und deren Speichermöglichkeiten (Energiestrategie 2050) an Bedeutung.

In aktuell oder ehemals stark vergletscherten Einzugsgebieten können im Zufluss zu Wasserfassungen relativ viele Feinsedimentpartikel enthalten sein. Diese führen insbesondere bei Mittel- und Hochdruckanlagen ohne Speicherseen (Laufwasserkraftwerke) zu Turbinenabnutzung (IEC 62364 2019 und Felix 2017). Die Folgen sind Wirkungsgradabnahmen und Produktionsminderungen sowie erhöhte Unterhaltskosten. Bei fortgeschrittener Turbinenerosion kann die Verfügbarkeit der Anlage abnehmen und die Schäden können sicherheitsrelevant werden. Insbesondere Pelonturbinen von Kleinwasserkraftwerken mit vier bis sechs Düsen und relativ schmalen Bechern können stark von Hydroabrasiv-Verschleiss betroffen sein (Boes 2010). Dabei kann der Turbinenwirkungsgrad um mehrere Prozente abnehmen (Maldet 2008).

Um die negativen Auswirkungen der im Wasser mitgeführten gröberen und feineren Sedimente zu vermindern, werden typischerweise folgende Massnahmen ergriffen:

- Wasserfassungen so entwerfen und betreiben, dass bereits möglichst wenig grobe Sedimente (Kies und Sand) gefasst werden,
- Bau von Entsanderanlagen, in welchen sich typischerweise Partikel > 0.2 bis 0.3 mm absetzen sollen und in den Vorfluter zurückgespült werden (Ortmanns 2006, Paschmann 2018, Paschmann *et al.* 2022 und Vetsch *et al.* 2022),
- Ersatz bzw. Revision von Turbinenbauteilen zu geeigneten Zeitpunkten,
- Einsatz von beschichteten Turbinenbauteilen zur Erhöhung des Erosionswiderstands,
- Eventuell vorübergehende Ausserbetriebnahme bei hoher Schwebstoffbelastung.

Für Planer und Betreiber von solchen Anlagen ist es eine Herausforderung, eine geeignete Kombination von Massnahmen zu finden und diese über die Zeit zu optimieren. Insbesondere bei der Planung ist nicht klar, wieviel anteilmässig in die Fassungsbauwerke (Entsandung) investiert werden soll, oder ob erhöhte Betriebskosten (Revision oder Ersatz von Turbinenbauteilen) wirtschaftlicher sind. In der Schweiz und weltweit sind zwar viele Entsander in Betrieb, aber deren Absetzleistung und die nach dem Entsander im Triebwasser vorhandenen Partikelgrössen wurden nur in seltenen Fällen untersucht. Weiter sind bei kleineren Flüssen und Bächen Wasserfassungen mit so genannten Coanda-Rechen ein Thema (Lifa *et al.* 2022). Dies sind Feinrechen, mit denen zumindest Grobsandpartikel aus dem gefassten Wasser entfernt werden können. Es stellt sich die Frage, ob so auf Entsander verzichtet werden kann.

Abrasionsschäden an Peltonbechern lassen sich zwar mit Hartbeschichtungen verzögern, aber nicht vermeiden. Bei der Anwendung von Beschichtungen stellt sich weiter die Frage, ob die höheren Investitionskosten und der erhöhte Aufwand bei Revisionen wirtschaftlich gerechtfertigt werden können. Von Abrasion besonders betroffen sind die Mittelschneiden und Bechereintrittskanten, welche auch für den Wirkungsgrad relevant sind. Für beratende Ingenieure, Kraftwerksbetreiber und Turbinenhersteller besteht Bedarf an weiteren Untersuchungen und allgemein zugänglichen Publikationen zu Entsandern und Turbinenabrasion.



Die Sedimentabscheidung in Entsandern und der Hydroabrasiv-Verschleiss an Turbinenbauteilen können aufgrund von Massstabseffekten und vom Aufwand her nicht an physikalischen Modellen mit reduzierter Grösse im Labor untersucht werden. Numerische Simulationen sind für deren Kalibrierung bzw. Validierung auf Daten von Feldmessungen angewiesen bzw. befinden sich noch im Forschungsstadium. Daher sah das Projekt vor, Daten an einer bestehenden Hochdruck-Kleinwasserkraftanlage in der Schweiz, dem Kleinwasserkraftwerk Susasca, zu erheben. Da einzelne Messungen (Momentaufnahmen) oft kein verlässliches Bild geben, ist vorgesehen, die wichtigsten Grössen während zwei bis drei Jahren zu messen bzw. zu beobachten (Monitoring).

Das nachgeführte Terminprogramm in Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die Arbeiten in diesem Projekt. Insbesondere die Planung und Ausführung der baulichen Modifikation an den Beruhigungsrechen der Entsander erforderte mehr Zeit als ursprünglich angenommen. Daher wurde eine erneute Messung des Strömungsfeldes im Entsander (Erfolgskontrolle) erst im Sommer 2021 möglich.

	2018				2019				2020				2021				
	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4												
Planung und Installation der Schwebstoff-Messeinrichtungen																	
Messungen der Sedimentbelastung																	
Messkampagnen am Entsander			X	X											X		
Modifikation Beruhigungsrechen																	
Abrasion an Laufrädern vermessen																	
Wirkungsgradänderungen auswerten																	
Auswertungen und Berichterstattung																	

Abbildung 1: Terminprogramm des Forschungsprojekts.

2 Zielsetzung

Das vorliegende Projekt hatte folgende Ziele:

- Untersuchung der Strömung und der Sedimentabscheidung in Entsanderkammern eines Kleinwasserkraftwerks unter realen Betriebsbedingungen,
- Quantifizieren der Schwebstoffbelastung im Triebwasser, der Erosion an unbeschichteten und beschichteten Pelton-Laufrädern und der Wirkungsgradänderungen eines Kleinwasserkraftwerks über mehrere Jahre,
- Weiterentwicklung bzw. fallspezifisches Kalibrieren eines Erosionsmodells,
- Weiterentwicklung von Beziehungen zwischen Verschleissgrössen wie den Mittelschneidenbreiten und Wirkungsgradabnahmen,
- Empfehlungen für die Optimierung des Kraftwerksbetriebs bzw. des Unterhalts,
- entsprechende Auswertungen und Publikationen.



3 Theoretische Grundlagen

3.1 Turbinenabrasion

3.1.1 Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2019)

Gemäss der Richtlinie IEC 62364 (2019) kann die absolute Abtragsrate infolge hydro-abrasivem Verschleiss an hydraulischen Turbinen wie folgt abgeschätzt werden:

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

Δt Betriebsstunden [h];

Δd_e Abrasionstiefe [mm] während Δt ;

K_f Koeffizient zur Berücksichtigung der Anströmung [$\text{mm} \cdot \text{s}^x / (\text{kg} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{0.4-p})$];

RS Referenzabmessung (*Reference Size*) der Turbine [m],
für Peltonturbinen RS = innere Becherbreite B ;

p Exponent zur Berücksichtigung von krümmungsbedingten Einflüssen [-];

K_m Koeffizient 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*):

$$\text{Düse: } w_{inj} = \sqrt{2gh_n}$$

$$\text{Laufrad: } w_{run} = 0.5\sqrt{2gh_n}$$

mit Nettofallhöhe h_n [m] und Erdbeschleunigung g [m/s²];

x Exponent [-], gemäss IEC $x = 3.4$, Literaturwerte variieren zwischen 2 und 4;

SSC Schwebstoffkonzentration (*Suspended Sediment mass Concentration*) [g/l] = [kg/m³];

k_{size} Koeffizient zur Berücksichtigung der Partikelgrösse [-], gemäss IEC $k_{size} = d_{50} / 1000 \mu\text{m}$,
in der Literatur sind aber auch andere Funktionen vorhanden; d_{50} bezeichnet den Median-
Partikeldurchmesser, d.h. 50 % der Partikelmasse haben einen kleineren Durchmesser;

k_{shape} Koeffizient 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;

$k_{hardness}$ Koeffizient zur Berücksichtigung der Partikelhärté [-], gemäss IEC 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:

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



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 (2019) als Partikelbelastung (*Particle Load*, PL) bezeichnet, welche ein Mass für das Abrasionspotential seit t_0 darstellt. Allerdings enthält die Richtlinie IEC 62364 (2019) für Peltonturbinen keine numerischen Werte für die Konstanten K_f und p sowie generell keine genaueren Angaben für K_m im Fall von beschichteten Turbinenbauteilen. Der Abrasionsverlauf tritt zudem nur in einer Phase auf, und es wird nicht zwischen Abrasion der Be- schichtung und des Grundmaterials unterschieden.

3.1.2 Anpassungen am IEC-Abrasionsmodell gemäss Felix (2017)

Felix (2017) hat im Rahmen einer Studie an der Hochdruck-Laufwasserkraftanlage Fieschertal (VS) das IEC-Abrasionsmodell für die hartbeschichteten Becher der Peltonlaufräder kalibriert. Um zu berücksichtigen, dass die Abrasion in einem Peltonbecher nur während einem Bruchteil der Betriebszeit stattfindet, wurde die Partikelbelastung pro Becher PL_b eingeführt:

$$PL_b(t) = \frac{z_0}{z_2} PL(t) \quad (3)$$

$PL_b(t)$ Partikelbelastung pro Becher (*bucket*) [$\text{h}\cdot\text{g/l}$];

$PL(t)$ Totale Partikelbelastung gemäss Gl. (2) [$\text{h}\cdot\text{g/l}$];

z_0 Anzahl Düsen (konstant) [-];

z_2 Anzahl Becher (konstant) [-].

Das Verhältnis z_0/z_2 berücksichtigt, dass die Abrasionsrate mit der Anzahl Düsen zunimmt (mehr Becher 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 (2019) im Abschnitt 3.2 (*Reference model*) genannt und geht auf frühere Publikationen u.a. von Sulzer/Esscher-Wyss zurück.

Die Gl. (3) ist gültig, wenn beim Betrieb der Turbine immer alle Düsen geöffnet sind (z_0 konstant). Während dies beim KW Fieschertal zutrifft, sind beim KW Susasca ausserhalb der abflussreichen Zeiten weniger als vier Düsen in Betrieb. Daher ist für PL_b zu jedem Zeitpunkt die Anzahl offener Düsen (tatsächliche Anzahl Wasserstrahlen) zu berücksichtigen:

$$PL_b(t) = \sum_{i=1}^{(t-t_0)/\Delta t} \frac{n_{j,i}}{z_2} SSC_i k_{size,i} k_{shape,i} k_{hardness,i} \Delta t \quad (4)$$

n_j Anzahl Wasserstrahlen (*jets*), entspricht Anzahl Düsen in Betrieb [-];

Mit der vorhandenen Datengrundlage konnten nicht alle Einflussgrössen gesondert quantifiziert werden. Deshalb wurde ein zusammenfassender Parameter C_g eingeführt, welcher als Kalibrierkonstante des Abrasionsmodells dient:

$$C_g = \frac{K_f}{RS^p} K_m \quad (5)$$

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

$$d_e(t) = C_g w^3 PL_b(t) \quad (6)$$



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):

$$d_e(t) = C_g w^3 (PL_b(t) - PL_{b,0}) \quad \text{für } PL_b(t) > PL_{b,0} \quad (7)$$

3.1.3 Abrasionsmasse gemäss Felix (2017)

Felix (2017) definierte die geometrischen Größen und entsprechenden Abrasionsmasse gemäss Abbildung 2. Er bestimmte die C_g - und $w^3 \cdot PL_{b,0}$ -Werte aus dem vorherigen Abschnitt anhand der Messungen am KW Fieschertal in den Jahren 2012-2014 und 2018-2020 (Felix et al. 2021). Damit kann die Abrasion an vier Stellen eines Peltonbechers abgeschätzt werden.

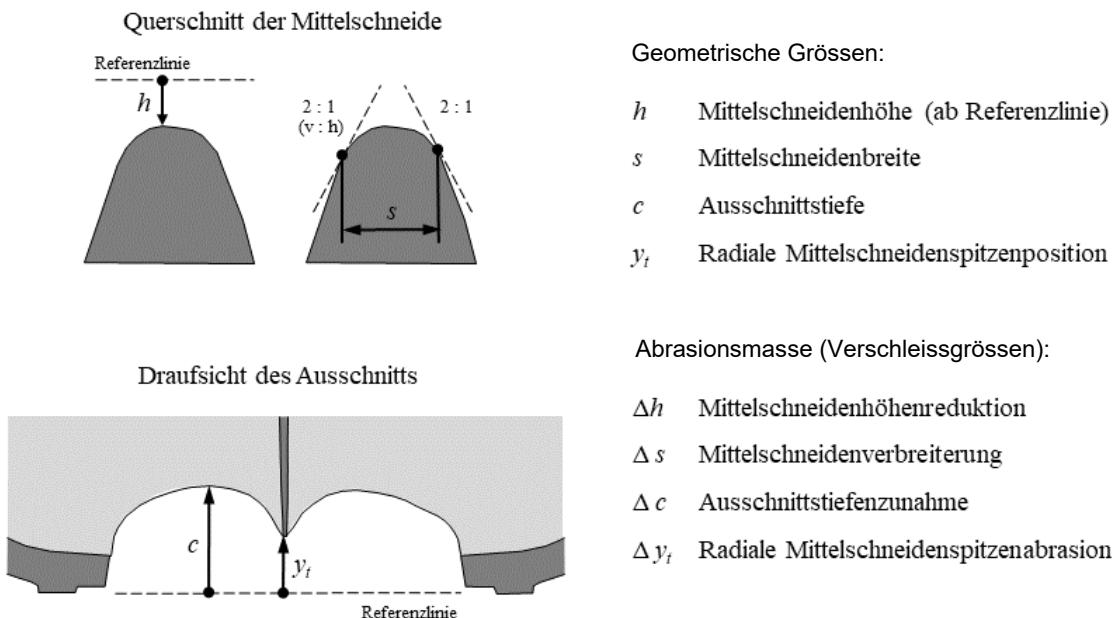


Abbildung 2: Definition der geometrischen Größen und Abrasionsmasse für Peltonbecher nach Felix (2017).

3.1.4 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 , ρ und K_m . Es wurden auch unbeschichtete Laufradbecher und Düsen untersucht. Da Turbinen unterschiedlicher Größe (RS) betrachtet wurden, konnte auch der Parameter ρ kalibriert werden.

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

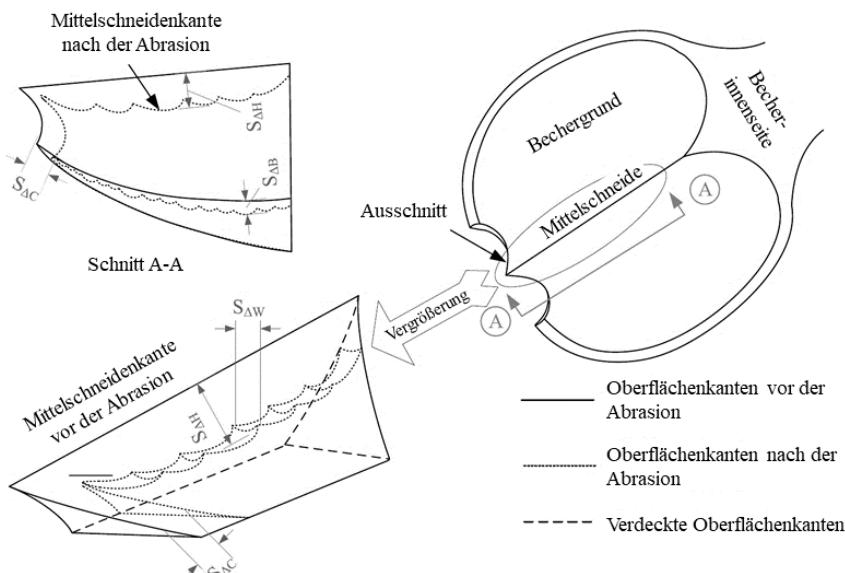


$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_T}{z_0 \cdot \pi \cdot \sqrt{2gh_n}}} \quad (8)$$

- d_s Strahldurchmesser am Austritt der Peltondüse [m];
 Q_T Turbinendurchfluss [m^3/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.

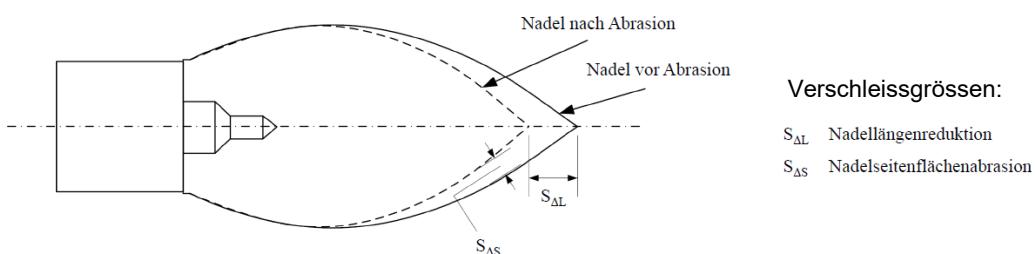
Die Parameter p und K_f wurden für die Abrasion an verschiedenen Stellen der Becher und Düsen kalibriert, die in Abbildung 3 und Abbildung 4 definiert sind. Die Höhenreduktion und die Verbreiterung der Mittelschneiden sind nicht genauer definiert als in Abbildung 2 und somit ähnlich wie in Felix (2017). 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.



Verschleissgrößen:

- $S_{\Delta H}$ Mittelschneidenhöhenreduktion
 $S_{\Delta W}$ Mittelschneidenverbreiterung
 $S_{\Delta C}$ Ausschnittstiefenzunahme
 $S_{\Delta B}$ Bechergrundabrasion

Abbildung 3: Geometrische Definitionen der Verschleissgrößen für Laufradbecher von Peltonturbinen nach Rai et al. (2020b).



Verschleissgrößen:

- $S_{\Delta L}$ Nadellängenreduktion
 $S_{\Delta S}$ Nadelseitenflächenabrasion

Abbildung 4: 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 (2011) 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 d_e von den tatsächlichen abweichen können (Standardabweichung bis 35 %). Die Koeffizienten betreffend die Düsenneedle 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 und in Klammern gesetzt.

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

Bauteil	Anwendungsfall	p [-]	K_f [mm·s ^x /(kg·h·m ^{0.4-p})]	x [-]	Std.abw. von geschätzten d_e
Becher	Mittelschneidenhöhenreduktion $S_{\Delta H}$	1.15	$4.21 \cdot 10^{-6}$	3.0	24 %
	Mittelschneidenverbreiterung $S_{\Delta W}$	2.69	$0.68 \cdot 10^{-6}$	3.0	35 %
	Ausschnittstiefenzunahme $S_{\Delta C}$	1.11	$1.10 \cdot 10^{-6}$	3.4	30 %
	Bechergrundabrasion $S_{\Delta B}$	0.83	$1.06 \cdot 10^{-6}$	3.4	30 %
Düsen	Nadelseitenflächenabrasion $S_{\Delta S}$	5.10	$2.72 \cdot 10^{-12}$	3.4	28 %
	Nadellängenreduktion $S_{\Delta L}$	(1.51)	($4.47 \cdot 10^{-9}$)	3.4	18 %
	Einsatzringabrasion	4.31	$4.06 \cdot 10^{-12}$	3.4	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 Bebeschichtungsmaterialien 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). Weiter wurde die Grundmaterialabrasion von anfangs vollflächig beschichteten Turbinenbauteilen, d.h. die 2. Phase der Abrasion gemäss Felix (2017) nicht untersucht.

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

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 ₂ O ₃ -Beschichtung	0.57
13Cr-4Ni-Stahl mit WC-Co-Cr-Beschichtung	0.12



3.2 Wirkungsgradänderungen infolge Abrasion

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 Fluidelektroden ρ , der Erdbeschleunigung g , der Nettofallhöhe h_n und des Volumenstroms Q (auch Durchfluss genannt) berechnet werden:

$$\eta_{\text{Ma}} = \frac{P_{\text{Gen}}}{\rho g h_n Q} \quad (9)$$

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 Index-Wirkungsgrade, ausreichend.

Der Turbinenwirkungsgrad kann durch hydro-abrasiven Verschleiss und allfälliger Folgeschäden stark reduziert werden: Beim Pelton-Kraftwerk Dorferbach in den österreichischen Alpen mit einer Bruttofallhöhe von 686 m wurde an einem unbeschichteten Laufrad innerhalb von vier Monaten eine Wirkungsgradabnahme von mehr als 5 % festgestellt (Laufrad Nr. 1 in Abbildung 5). Andererseits kann der Turbinenwirkungsgrad durch geeignete Revisionsmassnahmen an den Turbinenbauteilen wieder erhöht werden.

Als wichtige Kenngröße für den Abnutzungsgrad einer Peltonturbine gilt die Mittelschneidenbreite s (Maldet 2008, Boes 2010). Für Turbinen mit unterschiedlich grossen Laufrädern kann diese 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 Vollast-Wirkungsgrad einer unbeschichteten Peltonturbine um etwa 1 % abnimmt, wenn die Mittelschneidenbreite auf 1 % der inneren Becherbreite zunimmt.

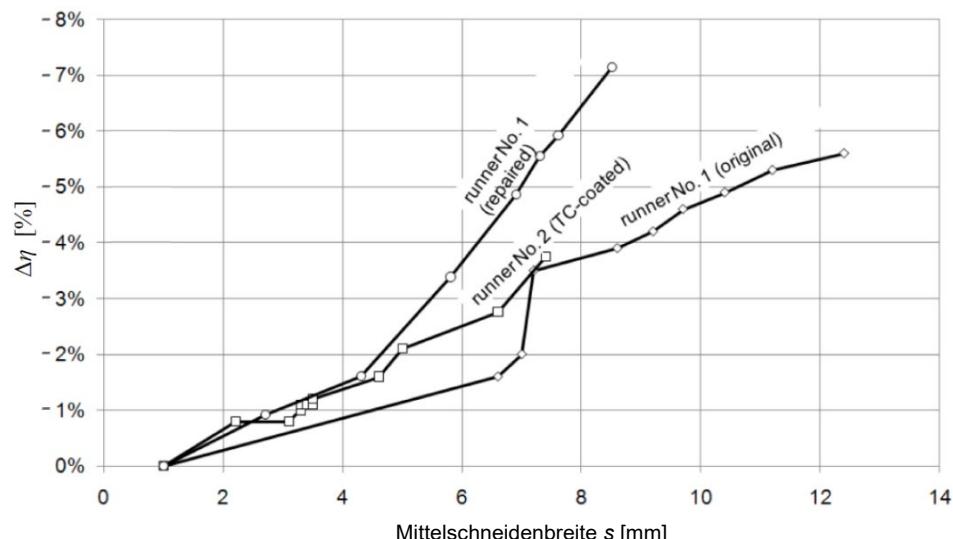


Abbildung 5: Absolute Wirkungsgradreduktionen von Peltonturbinen $\Delta\eta$ in Funktion der Mittelschneidenbreite s am KW Dorferbach (Maldet 2008).



Zhang (2016) schlug ein Gedankenmodell vor, um die progressive Wirkungsgradabnahme von Peltonturbinen mit zunehmender Mittelschneidenbreite aus obiger Abbildung zu erklären. Er postulierte, dass ein grösserer Anteil des Strahls nicht wie sonst zur Entwicklung des Drehmoments an der Laufwelle beitrage, wenn die Mittelschneidenbreite im Vergleich zum Strahldurchmesser zunimmt oder wenn bei Teillastbetrieb der Strahldurchmesser abnimmt (Abbildung 6).

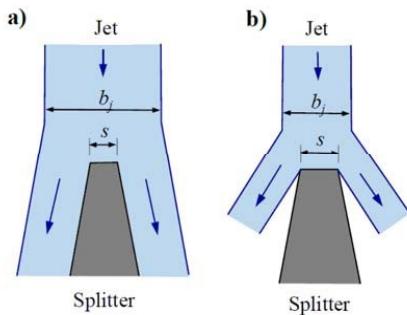


Abbildung 6: Modell der Strahlablösung an Mittelschneiden bei dünnerem Wasserstrahl bzw. breiterer Mittelschneide (Zhang 2016).

Nebst der Mittelschneidenverbreiterung beeinflussen auch Geometrieveränderungen im Bereich der Mittelschneidenspitze und der Bechereintrittskanten den Turbinenwirkungsgrad. Hassler & Schnablegger (2006) korrelierten die Wirkungsgradabnahme mit der radialen Position der Mittelschneidenspitze y_t (Abbildung 7). Sie normierten diese Grösse mit dem nominalen Strahldurchmesser beim Bemessungsdurchfluss. Da ein Peltonbecher normalerweise etwa dreimal so breit ist wie der nominale Strahldurchmesser, kann diese Grösse auch auf die innere Becherbreite bezogen werden (analog zu s/B).

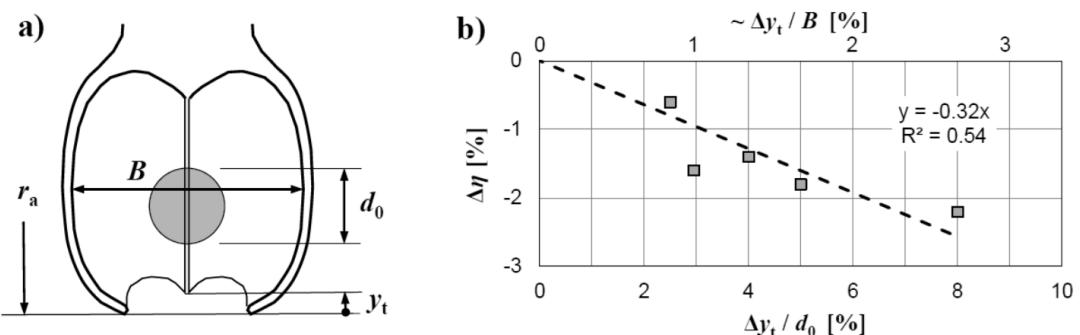


Abbildung 7: a) Definition der radialen Position der Mittelschneidenspitze y_t (*radial splitter tip position*) als Verschleisskenngrösse und b) gemessene Wirkungsgradabnahmen in Funktion dieser Verschleissgrösse normiert mit dem Strahldurchmesser (modifiziert nach Hassler und Schnablegger 2006, in Felix 2017).

Weiter haben Veränderungen der Rauheit im Becher einen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Bei unbeschichteten Laufrädern kann starke Wellen- oder Riffelbildung auftreten; bei beschichteten Laufrädern anfangs eine leichte Abnahme der Rauheit («Polier-Effekt»).

Schliesslich kann auch Abrasion an den Düsenbauteilen den Wirkungsgrad beeinflussen, wenn die Strahlqualität verschlechtert wird.

Betrachtet man die Wirkungsgradkurven über den Leistungsbereich einer Turbine von Teil- bis Volllast, wurde festgestellt, dass sich die Kurven infolge Abrasion nicht nur vertikal verschieben, sondern die Wirkungsgradabnahmen je nach Lastbereich unterschiedlich sein können (Abbildung 8).

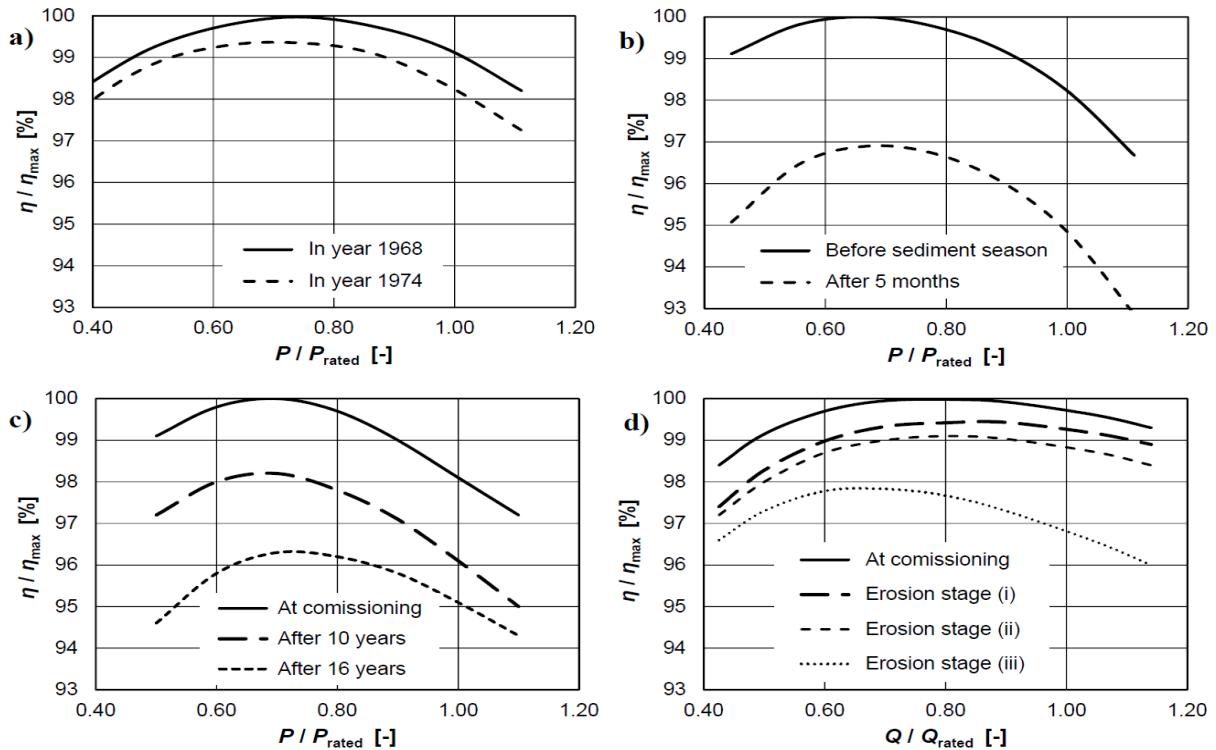


Abbildung 8: Teillast-Wirkungsgrade von Pelzturbinen mit zunehmender Abrasion a) gemäss Brekke *et al.* (2002), b) Strübin & Bussi (1988), c) Lazaro & Rossi (1995), und d) Cateni *et al.* (2008); zusammengestellt in Felix (2017).

In der Literatur sind kaum weitere quantitative oder allgemein anwendbare Angaben über die Zusammenhänge zwischen geometrischen Veränderungen an den Laufradbechern und Wirkungsgradreduktionen zu finden.

3.3 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»; Felix *et al.* 2022).

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 Verschleiss-schäden 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 Betrieboption 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 (Messsystem für Echtzeit-Schwebstoffmonitoring).
- Schwellenwert der SSC, ab welchem die Anlage ausser Betrieb genommen werden soll, im Folgenden «Abstell-SSC» genannt, ist bekannt.
- Technische Einrichtungen und Betriebsorganisation des Kraftwerksbetreibers (Leitsystem, Fernwirkanlagen und Pikettdienst).

In der Literatur sind nur wenige Angaben betreffend Abstell-SSC verfügbar, welche von 1.1 bis 15 g/l variieren (Tabelle 3). Oft wurden vereinfachende Annahmen getroffen, um erste Werte für die Abstell-SSC abzuschätzen, die dann im Lauf der Jahre aufgrund zunehmender Betriebsdaten verbessert werden können bzw. aufgrund der Marktentwicklung der Kosten (Ersatzteile und Revisionsarbeiten) und der Erlöse (Strompreis bzw. Einspeisetarif) zu aktualisieren sind.

Tabelle 3: Abstell-SSC gemäss Literatur für andere Kraftwerksanlagen mit Peltonturbinen und ihren Kenndaten, absteigend sortiert nach Fallhöhe, wobei h_B = Bruttofallhöhe, h_N = Nettofallhöhe und B = innere Becherbreite (Felix *et al.* 2022).

Wasser-Kraftwerk, Land	Turbinen-kenndaten	Becher-breite B	Schwebstoffkenndaten (Mineralogie und Partikelgrössen)	Ab-stell-SSC	Laufrad mit Hartbeschichtung	Quelle
Tala, Bhutan	6 x 170 MW $h_N = 819$ m, 5 Düsen	747 mm	Quarzgehalt 40 %, Feldspatgehalt 3 %, $d_{50} \approx 57$ µm	5.5 g/l	ja	Namgyal & Tandin (2021)
Dorferbach, Österreich	1 x 10 MW $h_B = 686$ m, 4 Düsen	228 mm	Quarzgehalt ~ 50 %, oft $12 \leq d_{50} \leq 60$ µm	1.1 g/l	Zuerst nein, dann ja	Boes (2010)
Fieschertal Schweiz	2 x 32 MW $h_B = 520$ m, 2 Düsen	650 mm	Quarzgehalt 31 %, Feldspatgehalt 41 %, $d_{50} \approx 11$ (bis 120) µm	10 g/l; 15 g/l	ja	Felix (2017); Abgottsporn <i>et al.</i> (2022a)
Basochhu Lower Stage, Bhutan	2 x 20 MW $h_N = 459$ m, 4 Düsen	580 mm	Quarzgehalt 45 %, Feldspatgehalt 5 %, $d_{50} \approx 140$ µm	1.7 g/l	nein	Namgyal & Tandin (2021)
Chhukha, Bhutan	4 x 84 MW $h_N = 435$ m, 6 Düsen	786 mm	Quarzgehalt 44 %, Feldspatgehalt 4 %, $d_{50} \approx 84$ µm	6.5 g/l	ja	Namgyal & Tandin (2021)
Basochhu Upper Stage, Bhutan	2 x 12 MW $h_N = 337$ m, 2 Düsen	570 mm	Quarzgehalt 46 %, Feldspatgehalt 7 %, $d_{50} \approx 190$ µm	1.4 g/l	nein	Namgyal & Tandin (2021)

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.



4 Wasserkraftanlage der Fallstudie

4.1 Lage und Layout

Das Wasserkraftwerk (KW) Susasca liegt im Unterengadin und nutzt einen Teil des Wasserkraftpotentials der Susasca zwischen der Wasserfassung *La Jenna* an der Flüela-Passstrasse und dem Inn (Abbildung 9). Die Anlage hat eine elektrische Leistung von gegen 6 MW; es handelt sich also gemäss heutiger Terminologie um ein mittelgrosses Kleinwasserkraftwerk. Die Anlage wird von der Ouvra Electrica Susaca Susch SA (OESS) betrieben.

Der erste Maschinensatz wurde im Jahr 2011, der zweite im 2015 in Betrieb genommen (zek 2016). Die Konzession läuft bis 2070. Seit dem Einbau der zweiten Maschine beträgt die nominelle Produktionserwartung 26 GWh/Jahr, wovon 21 GWh im Sommerhalbjahr (Statistik der Wasserkraftanlagen, BFE 2019). Damit sind jährlich ca. 4300 Vollast-äquivalente Betriebsstunden pro Maschine zu erwarten (= 26'000 MWh / ca. 6 MW), was ca. 49 % der Stunden eines Jahres entspricht.

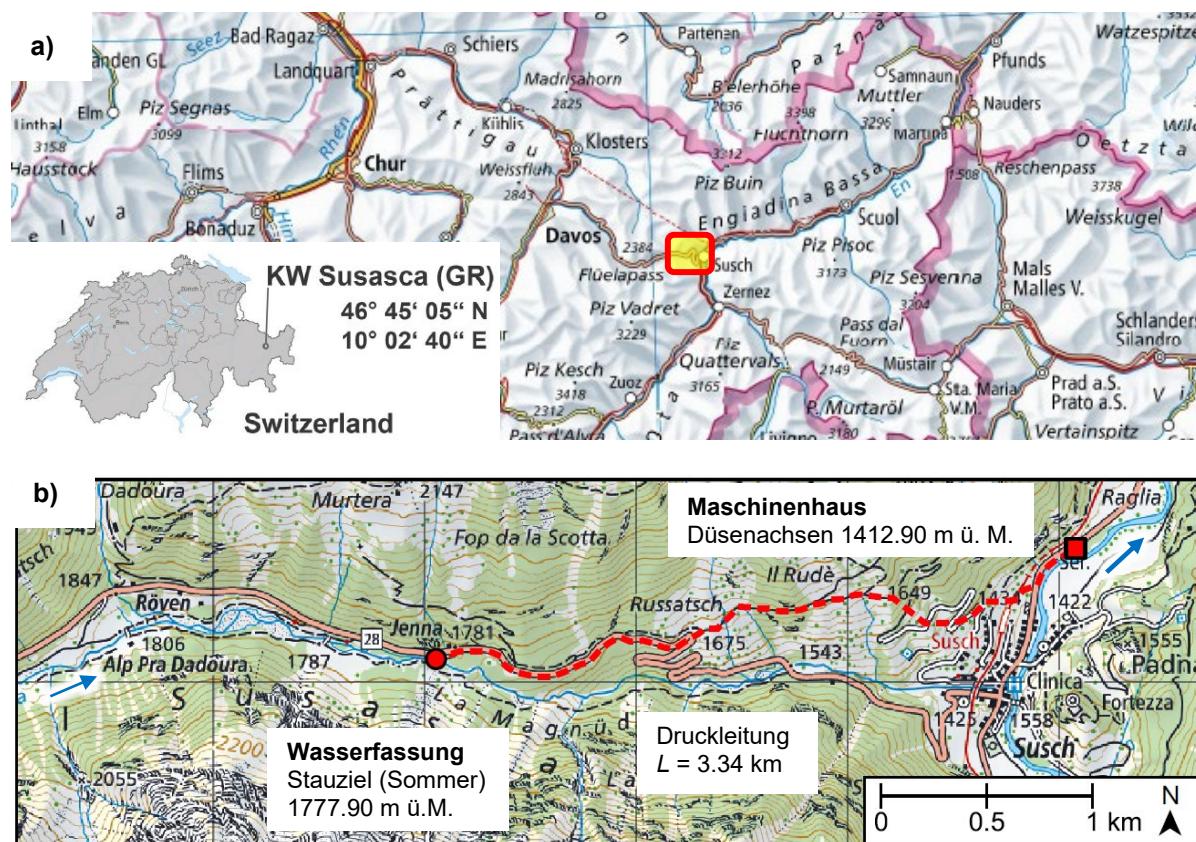


Abbildung 9: Lage des KW Susasca a) in der Übersichtskarte und b) in der Detailkarte (Bundesamt für Landestopographie via map.geo.admin.ch und Hydro-Solar Water Engineering AG).

Jede der beiden Pelton-Turbinen ist für einen Durchfluss von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ konzipiert, die Anlage hat also einen Ausbaudurchfluss von $Q_A = 2 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Bruttofallhöhe beträgt 365 m. Mit einem m^3 Wasser können ca. 0.8 kWh Elektrizität erzeugt werden. Abbildung 10 zeigt das schematische Längenprofil der Kraftwerksanlage. Da kein nennenswerter Speicher vorhanden ist, handelt es sich um ein Hochdruck-Laufwasserkraftwerk.

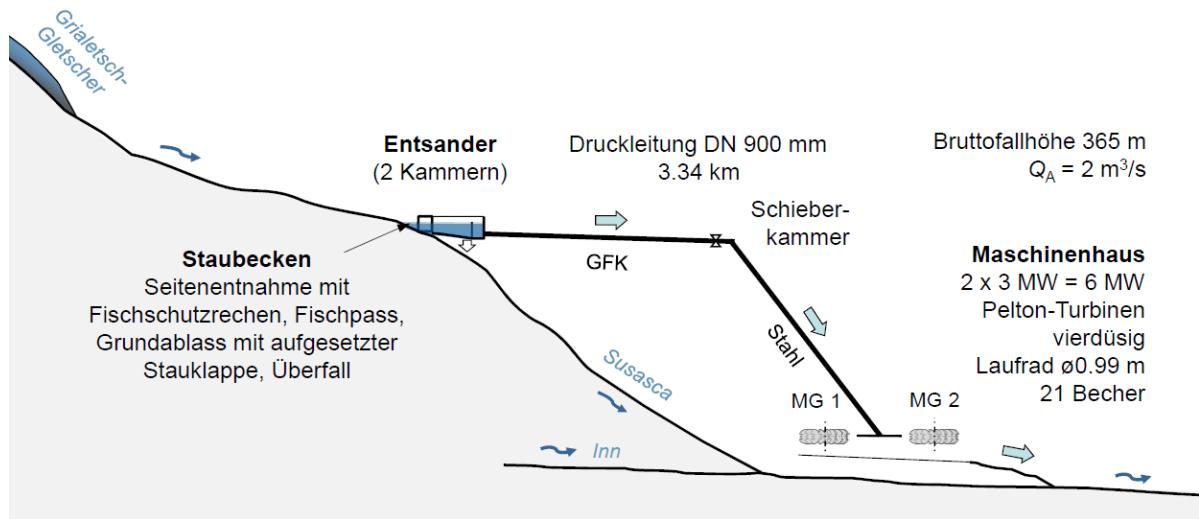


Abbildung 10: Schematisches Längenprofil des KW Susasca (Projekt: Hydro-Solar Water Engineering, zek 2011, zek 2016).

4.2 Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet der Susasca mit einer Fläche von 55.6 km^2 oberstrom der Wasserfassung erstreckt sich westwärts bis zum Flüela-Pass (Abbildung 12). Von Süden mündet die *Aua da Grialetsch* und von Norden die *Aua da Fless* in die Susasca. Im Einzugsgebiet befinden sich kleinere Gletscher, insbesondere im Süden der *Grialetsch-Gletscher*. Die Fläche der Gletscher im Einzugsgebiet betrug im Jahr 1850 gut 8 km^2 (15 % der Einzugsgebietsfläche), nahm im Jahr 1973 auf knapp 5 km^2 (9 %) ab, und betrug im Jahr 2016 noch ca. 2.4 km^2 (4.4 %; gemäss Datensätzen von GLAMOS 2021). Es handelt sich also um ein Einzugsgebiet mit aktuell geringem Vergletscherungsgrad und mehreren km^2 , die in den letzten Jahrzehnten eisfrei wurden. Daher können relativ grosse Mengen an Feinsediment durch Niederschlag leicht erodiert werden.

Die *Aua da Grialetsch* entspringt in einer hochalpinen Landschaft (Abbildung 11a) und führt im Hochsommer stark feinsumenthaltiges Wasser (Abbildung 11b). Im Bereich *Chant Blau*, 0.7 bis 1.3 km oberstrom der Wasserfassung, wurde vor der Errichtung des Kraftwerks Kies und Sand entnommen. In der Zwischenzeit stellte sich vermutlich ein neues dynamisches Gleichgewicht im Sedimenthaushalt dieser Schwemmebene ein, wobei dieses von Jahr zu Jahr je nach Hochwassern variieren kann.

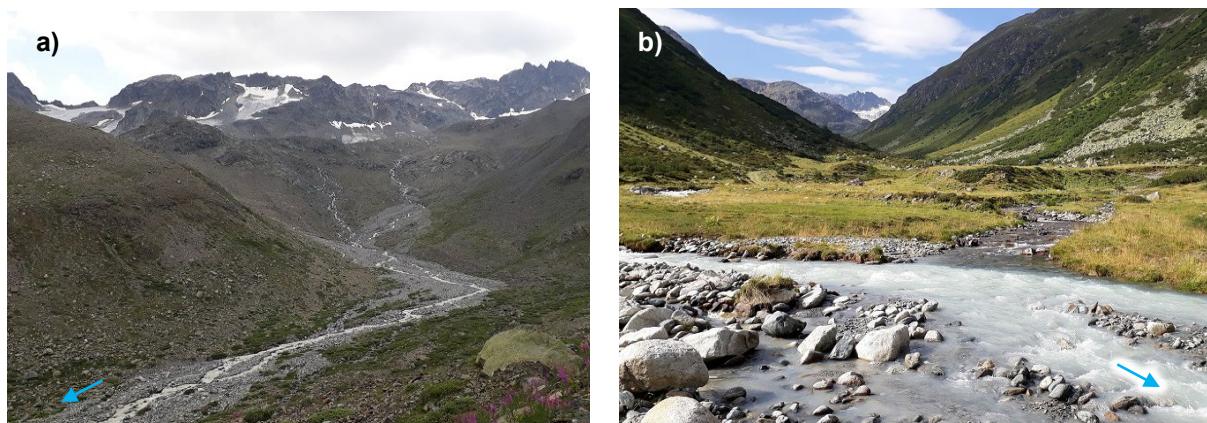


Abbildung 11: a) *Aua da Grialetsch* (aus dem teilweise vergletscherten Einzugsgebiet) und b) Susasca beim Zusammenfluss mit der *Aua da Grialetsch* ca. 4 km oberstrom der Wasseraufbereitung (08.08.2018, Fotos: VAW).

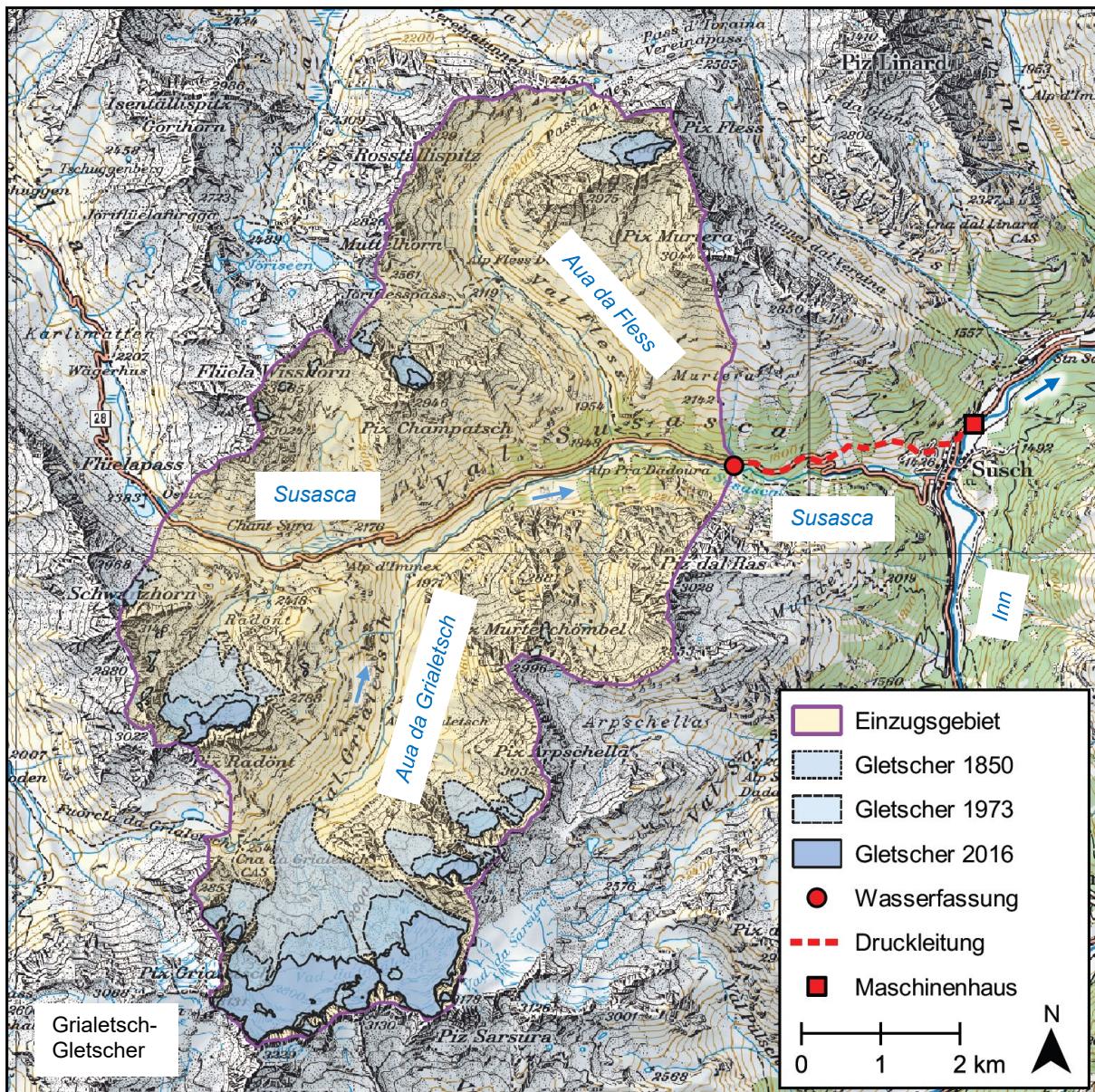


Abbildung 12: Einzugsgebiet und Lage des KW Susasca (Bundesamt für Landestopographie via geo.admin.ch; glamos.ch).

4.3 Bauwerke bei der Wasserfassung und Druckleitung

Vor der Wasserfassung befindet sich ein kleines Staubecken, welches durch ein festes Wehr mit Überfall abgeschlossen wird (Abbildung 13). Der Abfluss aus dem Becken wird mittels einer Spül schütze mit aufgesetzter Klappe (für die dynamische Restwasserabgabe) reguliert. Bei erhöhten Abflüssen im Sommer ist die Spül schütze in der Regel wochenlang leicht angehoben, um Geschiebe zusammen mit nicht fassbarem Wasser weiterzuleiten. Zum Spülen von Sedimentablagerungen im Staubecken wird dessen Wasserspiegel periodisch abgesenkt.



Am rechten Ufer befindet sich die Fischaufstiegshilfe (Schlitzpass), am linken Ufer die Wasserfassung. Diese ist als Seitenentnahme mit einer Kragschwelle über der Spülgasse ausgebildet. Am Einlauf befindet sich ein Horizontalrechen mit einem lichten Stababstand von 15 mm (für den Schutz der Fische) und eine Rechenreinigungsmaschine.

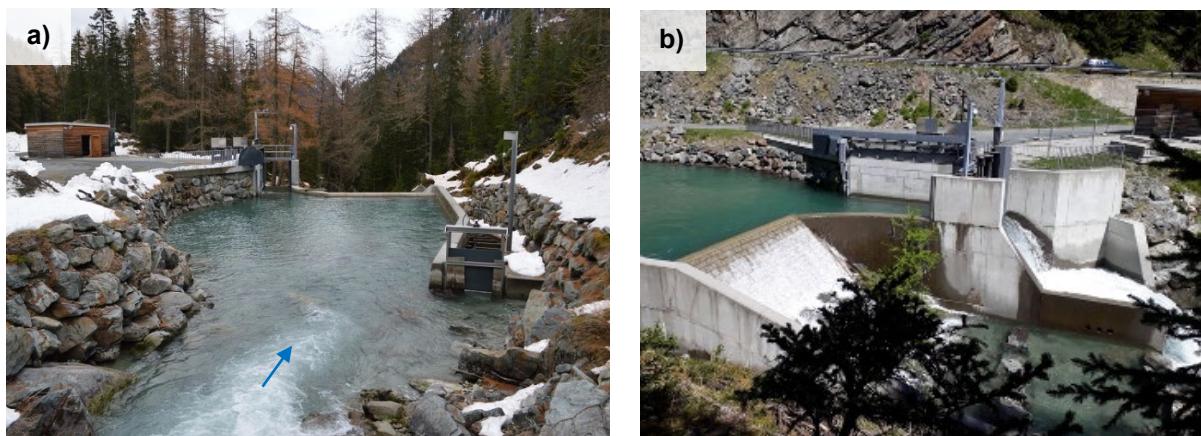


Abbildung 13: a) Blick auf die Bauwerke im Bereich der Wasserfassung des Kraftwerks Susasca mit dem Betriebsgebäude über der Entzanderanlage a) von der Brücke am Einlauf in das Staubecken (09.11.2018) und b) vom rechten Ufer auf die Luftseite des Wehrs (27.05.2020, Fotos: VAW).

Nach der Wasserfassung folgen zwei parallele Entzanderkammern, welche sich unter dem Vorplatz zwischen der Susasca und dem Betriebsgebäude befinden. Im Einlaufbereich der Kammern sind je drei Beruhigungsrechen installiert (Abbildung 14a). Zum Spülen einer Entzanderkammer wird jeweils der Wasserspiegel abgesenkt (Spülsystem Büchi, mit Spülrinne in Abbildung 14b). In jeder Kammer wird mit Ultraschall das Niveau der Sedimentablagerungen an einer Stelle gemessen.

Von beiden Entzanderkammern fliesst das Wasser im Normalbetrieb in die Entnahmekammer (auch Druckhaltekammer genannt) und von dort in einer Druckleitung DN 900 mm talauswärts. Nach einer akustischen Durchflussmessung verläuft die Druckleitung aus glasfaserverstärktem Kunststoff in einem ersten Abschnitt mit geringem Gefälle entlang der Passstrasse und durch Wiesen zur Apparatekammer, welche mit einer Drosselklappe mit Staupendel ausgerüstet ist. Von dort führt eine Druckleitung aus Stahl ins Dorf Susch hinab und weiter zum Maschinenhaus.

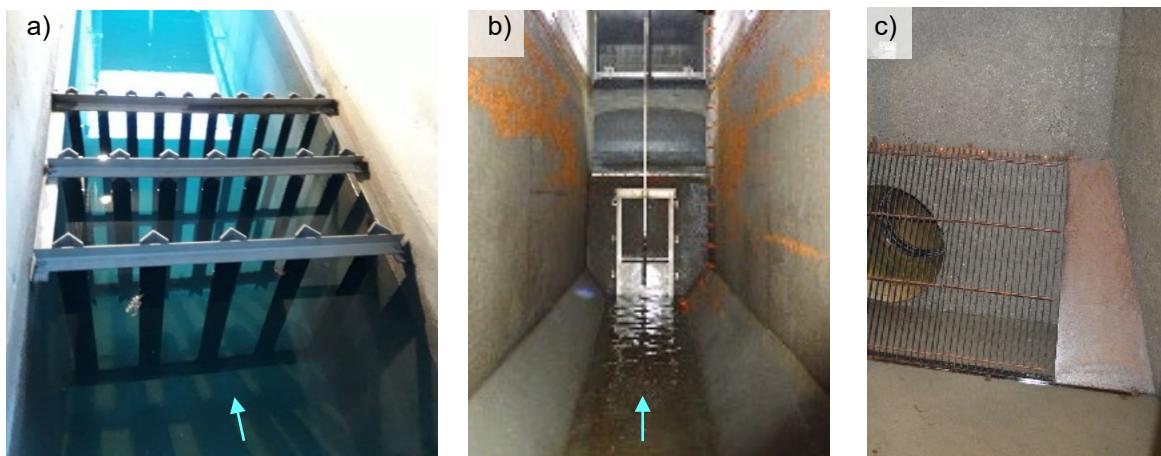


Abbildung 14: a) Dreireihiger Beruhigungsrechen aus vertikalen Winkelstahlprofilen am Einlauf der Entzanderkammern, b) Entzanderkammer mit Spülrinne und Spülauflaufschütze sowie c) Entnahmekammer mit Einlauf in die Druckleitung (Fotos: VAW).



4.4 Maschinenhaus mit Peltonturbinen

Im Maschinenhaus (Abbildung 15a) befinden sich zwei vertikalachsige Peltonturbinen und Generatoren mit je ca. 3 MW Nennleistung (Abbildung 15b). Die Nenndrehzahl der Maschinengruppen (MG) beträgt 1000 Umdrehungen pro Minute. An den Zuleitungen zu den einzelnen MG ist je eine magnetisch-induktive Durchflussmessung (DN 450 mm) und ein Kugelschieber vorhanden. Ober- und unterwasserseitig der Kugelschieber wird der Wasserdruk gemessen.

Die Peltonturbinen haben vier Düsen (Abbildung 15c). Das Triebwasser fliesst durch die entsprechenden Unterwasserkanäle in ein naturnahes Gerinne, durch welches es in den Inn gelangt.



Abbildung 15: a) Zentrale des KW Susasca mit Unterwasserkanal zum Inn (09.11.2018), b) Blick auf die zwei Maschinengruppen, c) Blick von unten an ein Pelton-Laufrad und vier Düsen mit Strahlablenkern sowie d) abgenutzte ausgebauten Laufräder (Fotos VAW).

Die Laufräder und Düsen können bei Stillstand der entsprechenden MG vom Unterwasserkanal her inspiziert werden. Im Winter ist dies ohne Betriebseinschränkungen jeweils an einer MG möglich, während die andere in Betrieb ist.



4.5 Laufräder und Düsen

Im KW Susasca ist in jeder der zwei MG ein Laufrad eingesetzt. Die Laufräder haben einen Aussen-durchmesser von 986 mm und einen Strahlkreisdurchmesser von 770 mm. Sie wiegen rund 350 kg. Die 21 Becher weisen eine innere Breite von 210 mm auf.

Aufgrund des ausgeprägten hydro-abrasiven Verschleisses mussten die Laufräder beider MG bereits nach drei bis vier Betriebsjahren ersetzt werden. Drei abgenutzte Laufräder, die ausgebaut wurden, waren (mindestens) während der Projektdauer in der Maschinenhalle vorhanden (Abbildung 15d). Von diesen Laufrädern konnte der Endzustand vermessen werden.

Die Innenseiten der Becher von drei der bisher insgesamt fünf Laufräder sind mit einer Hartbeschichtung versehen, die mit Heissflammspritzen im Werk aufgebracht wurde. Dabei werden Wolframkarbid-Partikel (Keramik) in einer Kobalt-Chrom-Legierung (Metall) appliziert. Während der Projektdauer (2019 bis 2021) waren zum Vergleich ein unbeschichtetes und ein beschichtetes Laufrad im Einsatz (Abbildung 16).

Die Düsenmundstücke haben einen Durchmesser von 80 mm. Für die kegelförmigen Düsenadeln und die Düsenmundstücke wurden in den ersten Betriebsjahren Bauteile aus Chromnickelstahl eingesetzt. Damit diese Bauteile weniger oft ausgetauscht werden müssen, wurden diese im März 2019 bei MG 1 und im November 2021 bei MG 2 durch solche aus einer besonders abrasionsbeständigen Legierung auf der Basis von hauptsächlich Kobalt und Chrom («Stellite») ersetzt.

An den Laufrädern und Düsenbauteilen wurden sowohl im eingebauten wie auch im ausgebauten Zustand keine Revisionsarbeiten durchgeführt (z.B. kein Schleifen an den Bechern, kein Aufschweißen an erodierten Stellen). Dies ist bei relativ kleinen Laufrädern und Düsen wie im vorliegenden Fall – im Gegensatz zu grösseren Laufrädern – üblich.

In den Düsen, vor allem an den Halterungen der innenliegenden Düsenhydraulik, lagerten sich zeitweise Holzstücke bzw. feine Lärchenäste an, welche periodisch manuell entfernt wurden.

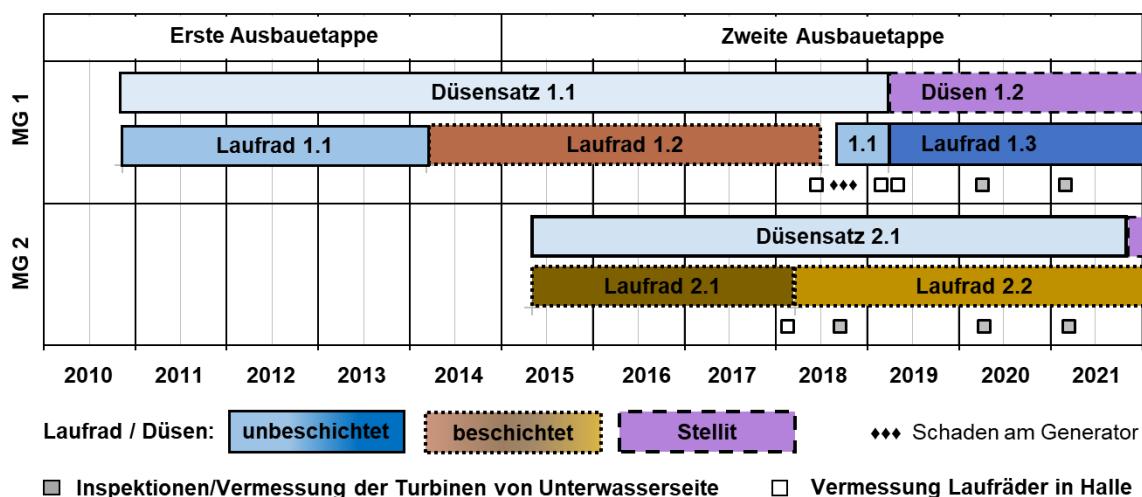


Abbildung 16: Zeitstrahl mit den eingesetzten Turbinenbauteilen der beiden Maschinengruppen (MG) des KW Susasca seit dessen Inbetriebnahme und Inspektionen bzw. Vermessungen der Turbinen.



5 Vorgehen

5.1 Entsander

5.1.1 Änderung der Betriebsweise während Entsanderspülungen

Mit dem bestehenden Spülsystem ist es erforderlich, den Wasserspiegel in der zu spülenden Kammer vollständig abzusenken, um genügend Schleppkraft an der Sohle zu erzeugen (Spülung mit schiesendem Freispiegelabfluss). Daher steht die zu spülende Kammer während des Spülvorgangs nicht für den Durchfluss des Triebwassers zur Verfügung.

Mittels Analyse von Betriebsdaten wurde festgestellt, dass manchmal während des Spülens einer Entsanderkammer das Kraftwerk mit derselben Leistung wie vor und nach der Spülung betrieben wurde. Mit dieser einfachen Praxis werden Produktionsausfälle während der Spülungen vermieden und der Kraftwerksbetrieb wird nicht beeinträchtigt. Jedoch wird die nicht gespülte Kammer während der Spülung der anderen Kammer mit dem doppelten Durchfluss beaufschlagt. So verdoppelt sich vorübergehend die Fliessgeschwindigkeit; sie liegt dann deutlich über dem bei der Bemessung des Entsanders angenommen Wert. Dabei ist zu erwarten, dass sich

- Schwebstoffpartikel mit Durchmessern über dem Entwurfgrenzkorn ($d = 0.3 \text{ mm}$) wegen der erhöhten Fliessgeschwindigkeit nicht absetzen und
- bereits abgelagerte Sedimentpartikel, bis $d = 0.6 \text{ mm}$ gemäss rechnerischer Abschätzung, resuspendiert, d.h. wieder aufgewirbelt und mittransportiert werden.

So gelangen während des Spülens einer Kammer mehr und gröbere Sedimentpartikel als üblich in die Entnahmekammer und weiter in das Triebwasser und durch die Turbinen.

Aufgrund dieser Auswertung und angesichts des beobachteten generell hohen Turbinenverschleisses am KW Susasca wurde ab Frühling 2019 vermehrt darauf geachtet, während der Entsanderspülungen das Kraftwerk nur mit halber Leistung zu betreiben, um die vorübergehende «Überlastung» einer Kammer während der Spülung der anderen Kammer zu vermeiden. Das war bereits im ursprünglichen Betriebskonzept des Entsanders so vorgesehen, aber war in den ersten Betriebsjahren nicht relevant, da nur eine von zwei Turbinen installiert war während schon beide Entsanderkammern bestanden.

5.1.2 Messkampagnen am Entsander

Um die hydraulischen Verhältnisse und die Wirksamkeit des Entsanders zu untersuchen und anschliessend zu verbessern, wurden im Jahr 2019 zwei Messkampagnen durchgeführt: die erste fand vom 9. bis 10. Juli, die zweite vom 3. bis 4. September statt. Es wurden zwei Messkampagnen durchgeführt, um bei unterschiedlichen Randbedingungen zu messen (z.B. unterschiedlicher natürlicher Zufluss) bzw. die Wiederholbarkeit der Messungen zu untersuchen. Auf Grund der Ergebnisse dieser beiden Messkampagnen wurden die Beruhigungsrechen im Einlaufbereich der beiden Entsanderkammern angepasst (Abschnitt 5.1.3). Um den Effekt dieser Anpassungen auf die Strömung in den Kammern zu untersuchen, wurde von 27. bis 28. Juli 2021 eine dritte Messkampagne mit derselben Methode wie 2019 durchgeführt.

Die hydraulischen Verhältnisse in den beiden Entsanderkammern wurden durch Messung der Fliessgeschwindigkeit in fünf Querschnitten entlang der Kammern untersucht (Abbildung 17). Da seit den Messkampagnen 2019 zusätzliche Einbauten (Halterungen für Ultraschall- und Vibrations-Sedimentniveausonden) installiert worden waren, konnten 2021 die Querschnitte 1 und 2 nicht genau an der gleichen Position aufgenommen werden. Angesichts der Beckenlänge wird dies jedoch als vernachlässigbar angesehen. Nebst den Fliessgeschwindigkeiten wurde auch die Trübung an mehreren Punkten



pro Querschnitt gemessen. Bei den ersten beiden Kampagnen wurde versuchsweise auch eine Ultraschall-Sedimentniveausonde (USNS) verwendet, um die Distanz bis zu den Sedimentablagerungen zu messen. Weiter wurden mit einer *Van Dorn*-Flasche Wasserproben auf unterschiedlichen Tiefen entnommen und mit einem *Van Veen*-Sedimentgreifer unter Wasser oberflächennahe Proben der Sedimentablagerungen gewonnen.

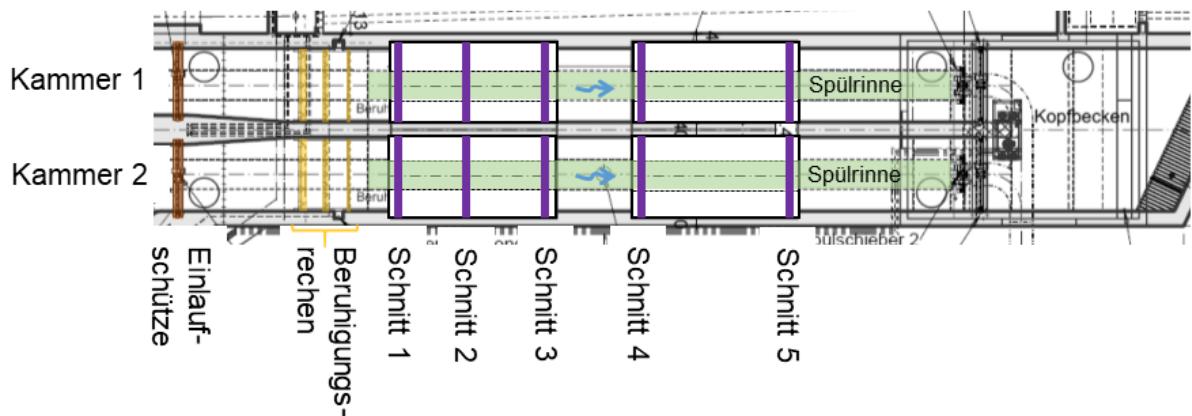


Abbildung 17: Grundriss des Entsanders mit den fünf Messquerschnitten in jeder Kammer (Plangrundlage: Hydro-Solar 2016).

Die Messsonden wurden an zwei Fachwerkträgern befestigt, um an jedem Punkt des Messrasters pro Querschnitt zu messen. Der erste Fachwerkträger wurde horizontal über eine Kammer gelegt und von Querschnitt zu Querschnitt in Längsrichtung des Entsanders verschoben. Der zweite Fachwerkträger wurde mit einem Rollwagen vertikal am ersten Träger aufgehängt und liess sich in Querrichtung verschieben. Am vertikalen Fachwerkträger war ein mit einem Stellmotor ausfahrbbares Aluprofil befestigt, an welchem die Messsonden angebracht sind (Abbildung 18a). Für die Messung der Fliessgeschwindigkeiten wurden vier *Acoustic Doppler Velocimetry*-Sonden (ADV) verwendet und im Abstand von 30 cm angeordnet (Abbildung 18b). Weiter wurden eine Trübungssonde und eine USNS an die Haltestange montiert.

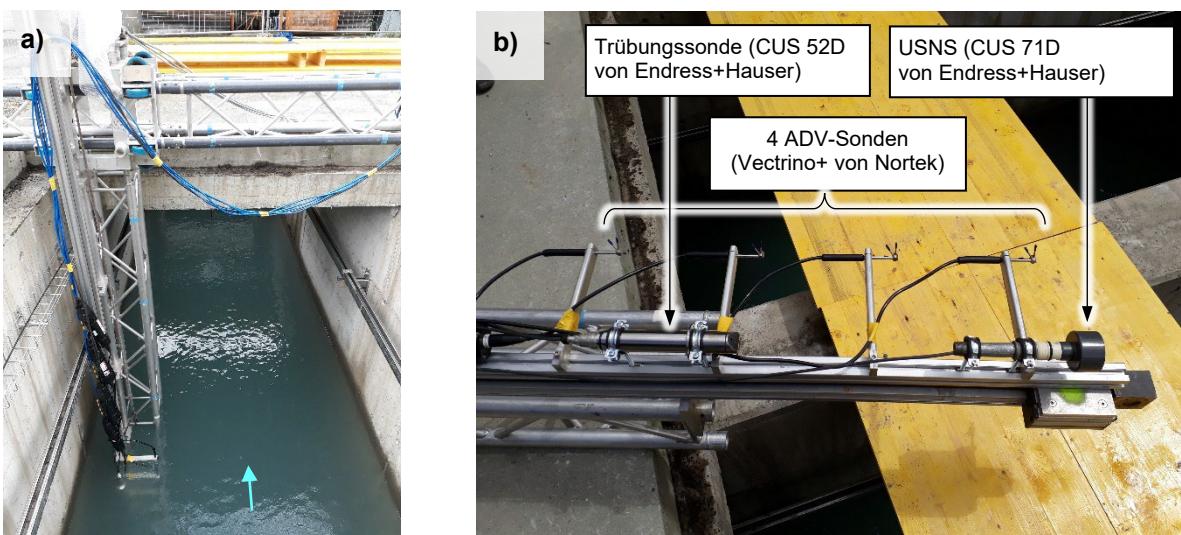


Abbildung 18: a) Horizontaler und vertikaler Fachwerkträger für die Positionierung der Sonden (b) in den Messquerschnitten in den Entsanderkammern (08.07.2019, Fotos: VAW).



In den Querschnitten wurden die Fliessgeschwindigkeiten in einem horizontalen Abstand von 0.20 bis 0.25 m und in einem vertikalen Abstand von 0.30 m gemessen. Bedingt durch den Aufbau der Messeinrichtung konnte auf der linken Seite erst ab einem Randabstand von 0.55 m gemessen werden. Ausserdem wurde bei den untersten Messpunkten ein gewisser Abstand zur Sohle eingehalten. Da die Kammern ein Längsgefälle aufweisen, konnten in Schnitt 4 und 5 seitlich an zusätzlichen Punkten im Bereich der Vouten gemessen werden. In der Regel wurden in jedem Querschnitt die Fliessgeschwindigkeiten an ca. 70 Punkten gemessen. Im Schnitt 1 konnten 2021 aufgrund von seit 2019 installierten Einbauten lediglich ca. 40 Messpunkten über eine reduzierte Breite aufgenommen werden.

An jedem Punkt wurden die Fliessgeschwindigkeiten während 90 Sekunden mit einer Frequenz von 100 Hz gemessen (wie in Paschmann 2018). Daraus resultiert ein Arbeitsaufwand von etwa einem Tag pro Kammer. Jeweils vor der ersten Messung des Tages wurden die Entsanderkammern gespült, sodass die durchflossene Querschnittsfläche bekannt ist und die Resultate miteinander verglichen werden können.

5.1.3 Anpassung der Beruhigungsrechen

In den Entsanderkammern wurde anhand der Messkampagnen 2019 eine sohlnahe Strömungskonzentration (Abschnitt 6.1.4) festgestellt, welche für die Sedimentabscheidewirkung des Entsanders ungünstig ist. Es wurde vermutet, dass diese unerwünschte Strömungskonzentration durch den ca. 0.3 m hohen Zwischenraum zwischen der Sohle und den Unterkanten der Stäbe der bestehenden Beruhigungsrechen entstand. Um im gesamten Abflussquerschnitt einen ähnlichen Fliesswiderstand zu erzeugen, wurde vorgeschlagen, diesen Zwischenraum zu verkleinern, indem die Rechenstäbe verlängert werden (Abbildung 19). Da am Einlauf der Wasserfassung ein Feinrechen mit einem lichten Stababstand von 15 mm vorhanden ist, werden im Bereich der Beruhigungsrechen keine Steine oder Grobkies-Komponenten erwartet. Daher wurde ein Zwischenraum von 0.05 m zwischen der Sohle und der Unterkante der verlängerten Stäbe für den Sedimenttransport unter den Rechen als genügend gross angesehen. Weiter wird bei abgesenktem Kammerwasserspiegel der Spülwasserzufluss (schiessende Strömung unter der um wenige cm angehobenen Einlaufschütze) durch die verlängerten Rechenstäbe nicht unzulässig abgebremst.

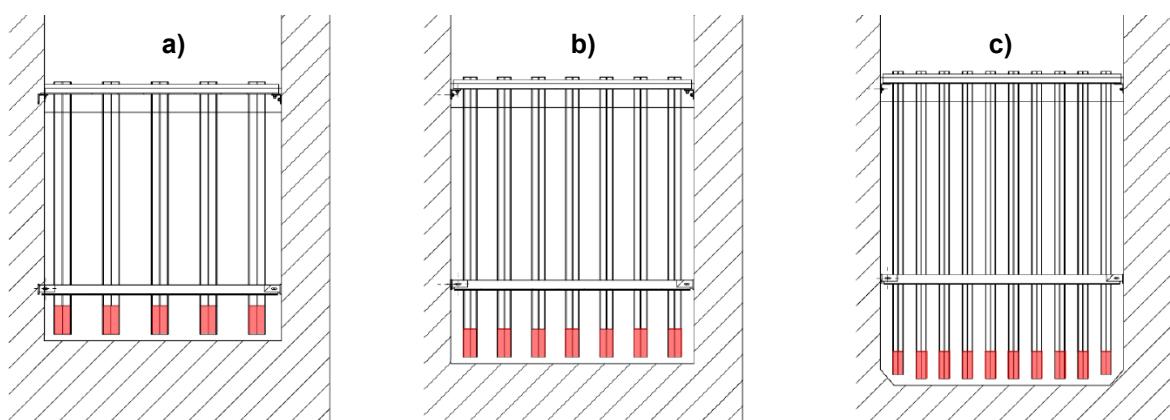


Abbildung 19: Querschnitte durch die Entsanderkammer beim a) ersten, b) zweiten und c) dritten Beruhigungsrechen; die in diesem Projekt vorgeschlagene und ausgeführte Verlängerung der Rechenstäbe nach unten ist rot hinterlegt dargestellt (Plangrundlage: Hydro-Solar 2016).



5.1.4 Anpassung der Ultraschall-Sedimentniveau-Sonden (USNS)

In jeder der beiden Entsanderkammern war seit Inbetriebnahme der Anlagen, d.h. schon vor dem Beginn des Forschungsprojekts, eine Ultraschall-Sedimentniveau-Sonde (USNS) vorhanden (CUS 71D von Endress+Hauser). Die USNS befanden sich in Kammer 1 bei ca. 50 % und in Kammer 2 bei ca. 40 % der Entsanderlänge (Abbildung 20). Sie waren jeweils bei halber Kammerbreite (in der Symmetrieebene des Kammerquerschnitts) auf 3.0 m über der Sohle der Kammern montiert. Der Betriebswasserspiegel liegt über den Sonden.

Die USNS senden Ultraschallpulse (650 kHz) nach unten und empfangen – wenn die Sonden im Wasser eingetaucht sind – deren Echo. Im zugehörigen Messumformer wird mit der Schallgeschwindigkeit im Wasser (bei einer angenommenen Temperatur) und dem Laufzeitverfahren die Distanz von der Sondenunterkante bis auf die Sohle bzw. Oberfläche von Sedimentablagerungen berechnet. Wenn die Distanz vom Sensor zum Grund des Wasserkörpers gross und das Wasser stark schwebstoffhaltig und/oder die Sedimentoberfläche locker bzw. uneben ist, kann es vorkommen, dass die Echosignale zu unklar sind und nicht ausgewertet werden können. Seit Inbetriebnahme dieser Sonden lieferten sie keine zuverlässigen und zeitweise keine plausiblen Messwerte, so dass die Sonden dem Kraftwerksbetrieb nicht dienlich waren. Die Entsanderspülungen wurden lediglich nach festen Zeitintervallen bzw. nach Erfahrung und nicht unbedingt bedarfsgerecht ausgelöst.

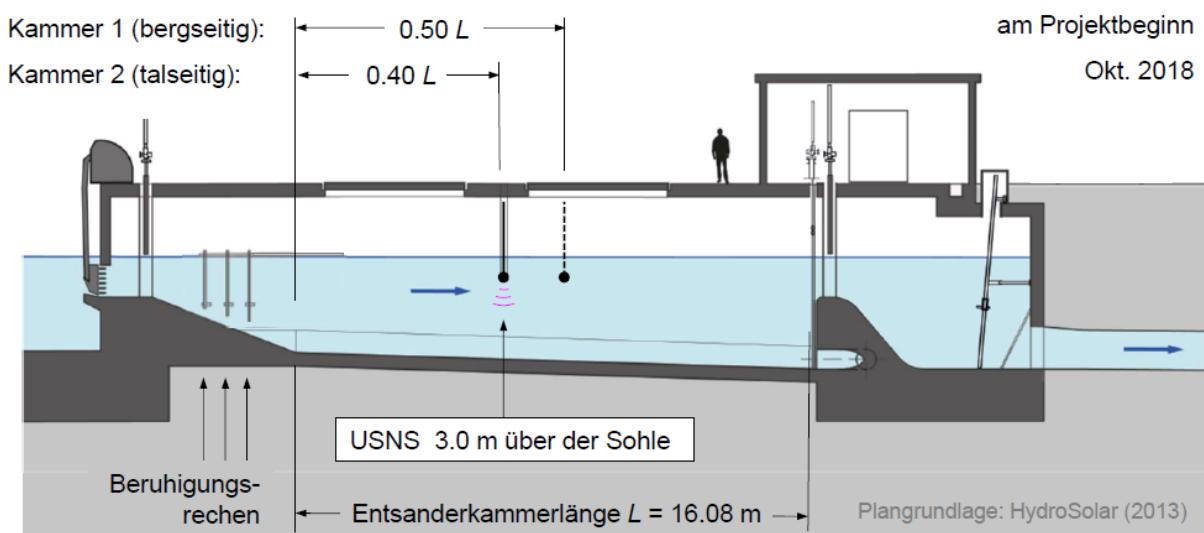


Abbildung 20: Längsschnitt durch die talseitige Kammer 2 des Entsanders mit Lage der bestehenden Ultraschall-Sedimentniveausonde (USNS) zu Beginn des Projekts (wie bei Inbetriebnahme der Anlage); gestrichelt die Sonde in der bergseitigen Kammer 1.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine weitere solche USNS beschafft und im Sommer 2019 in der bergseitigen Entsanderkammer versuchsweise an einem Holzgerüst, bei ca. 30 % der Entsanderlänge (im Bereich der ersten Luke in der Entsanderabdeckung), lediglich 1.4 m über der Sohle installiert. Die Distanz von 1.4 m wurde gewählt, damit einerseits die Ultraschallsignale eine weniger lange Strecke im Wasser zurücklegen müssen als bei der vorbestehenden Anordnung (3.0 m) und andererseits noch ein Messbereich vorhanden ist, der die Auslösung von Alarmen für die Entsanderspülungen bei einer vorgesehenen maximalen Ablagerungsmächtigkeit von 1.0 m ermöglicht.

Im November 2019 wurden verschiedene Einstellungen am Messumformer der dritten, versuchsweise installierten USNS getestet und die Messungen mit neuen Einstellungen im Jahr 2020 weitergeführt. Diese Messungen erschienen plausibler, so dass die neuen Einstellungen und die Distanz von 1.4 m über der Sohle als Verbesserung angesehen wurden. Die neuen Einstellungen wurden im Sommer



2020 für die beiden vorbestehenden USNS übernommen. Weiter wurden im Spätherbst 2020 verlängerte Halterungen erstellt, um die beiden Sonden tiefer zu montieren (ebenfalls auf 1.4 m über der Sohle). Die dritte USNS wurde im Sommer 2021 nach abgeschlossenen Tests entfernt.

Zum rechtzeitigen Spülen der Entsanderkammern wurde angestrebt, die Sonden entlang der Entsanderkammer dort zu installieren, wo die höchsten Sedimentablagerungen zu erwarten sind.

Die Mächtigkeit der Sedimentablagerungen variiert in der Regel über die Kammerlänge. Beim KW Susasca wurde in der Schwebstofftransportsaison oft ein Hochpunkt («Haufen») wenig unterstrom des Kammeranfangs beobachtet. Drobir (1981) und Kammerlander *et al.* (2017) berichten aufgrund von Beobachtungen in Entsandern, in denen die Ablagerungen auch Kies enthalten, dass mit Ausbaudurchfluss der Hochpunkt der Ablagerungen bei ca. 25 % der Entsanderlänge liege. Durch die Verlängerung der Beruhigungsrechen (Abschnitt 5.1.3) nahm die Turbulenz im Sohlbereich beim Einlauf in die Kammern ab, was die Sedimentation begünstigt. So wurde erwartet, dass sich die maximale Sedimentablagerungshöhe näher bei den Beruhigungsrechen einstellt als bisher. Daher wurde im Spätherbst 2020 die beiden bestehenden USNS so gegen die Fliessrichtung verschoben, dass sie in beiden Kammern bei ca. 20 % der Entsanderlänge lagen.

Am 16. und 17. 06.2021 beobachteten VAW-Mitarbeiter vor Ort erstmals ein hohes Sandaufkommen seit der Verlängerung der Beruhigungsrechen im vorherigen Winter. Es wurde festgestellt, dass der Hochpunkt der Sedimentablagerungen (Abbildung 44) noch näher am Kammeranfang lag, als erwartet. Daher wurden die USNS im Spätherbst 2021, d.h. am Ende des Projekts, in beiden Kammern weiter gegen die Fliessrichtung verschoben und bei ca. 6 % der Entsanderlänge montiert (Abbildung 21).

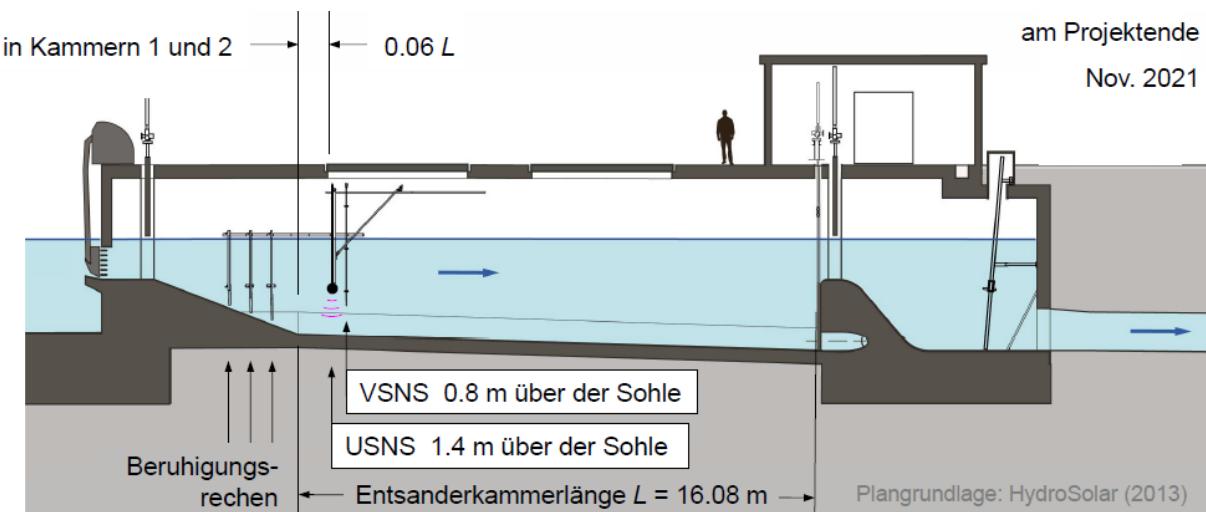


Abbildung 21: Längsschnitt durch die talseitige Kammer 2 des Entsanders mit angepasster Lage der Ultraschall-Sedimentniveausonde (USNS) am Ende des Projekts (Sonde in bergseitiger Kammer 1 an derselben Stelle) als Verbesserung gegenüber der Lage in Abbildung 20; ergänzt mit Vibrations-Sedimentniveau-Grenzstandssensor (VSNS) gemäss folgendem Abschnitt.

5.1.5 Zusätzliche Sedimentniveau-Grenzstandssensoren

Um die Messwerte der USNS überprüfen zu können bzw. um die Zuverlässigkeit der Spülalarme zu steigern, wurde in jeder Entsanderkammer zusätzlich ein Sedimentniveau-Grenzstandssensor, der nach dem Vibrationsprinzip funktioniert, installiert (VSNS). Es handelt sich um das Modell *Soliphant T FTM21* von Endress+Hauser (Abbildung 22). Der vordere Bereich der Sonde wird elektronisch in eine leichte seitliche Schwingung versetzt. Falls der Stab von Feststoffen (z.B. Sand) umgeben ist, wird die Schwingung stärker gedämpft als in Luft oder in Wasser. So gibt der Sensor an, ob Sedimentablagerungen seine Höhenlage erreicht haben oder nicht (binäres Signal).



Solche Sensoren werden häufig zur Überwachung von Füllständen von Schüttgüter-Tanks in der Prozessindustrie eingesetzt. Mit diesem Sensor kann im Gegensatz zu den Ultraschall-Sedimentniveau-sonden das Anwachsen der Sedimentablagerungen nicht kontinuierlich überwacht werden. Vorteile des Grenzstandssensors sind sein einfaches Funktionsprinzip und die geringe Fehleranfälligkeit.

Die Unterkante des Schwingstabs wurde auf 0.8 m über der Sohle montiert, um einen Alarm zu erhalten, bevor die Sedimentablagerungen in der Achse der Kammer eine Mächtigkeit von 1.0 m erreichten (Abbildung 22).

Um das Verkeilen von Sedimentkörnern zwischen der Wand und dem Schwingstab zu vermeiden, wurde dieser mit einem Abstand von gut 20 cm von der Wand montiert. Da bei anderen Grenzstands-sensoren für Schüttgüter, die als Schwinggabeln ausgebildet sind, Kieskörner in der Gabel stecken bleiben können, wurde hier ein Modell mit einem Schwingstab gewählt. Da die VSNS in den Entsanderkammern durch den Fischschutzrechen am Einlauf der Wasserfassung vor grobem Treibgut und Steinen geschützt sein sollten, wurde auf einen Anprallschutz der Schwingstäbe verzichtet, auch um das Verklemmen von Festmaterial rund um die Schwingstäbe zu vermeiden.

Die VSNS wurden in Längsrichtung des Entanders gesehen so nahe wie möglich bei den USNS montiert. Um Platz für die Halterungen zu haben, wurden die VSNS ca. 0.3 m unterstrom der USNS angeordnet (Abbildung 21).

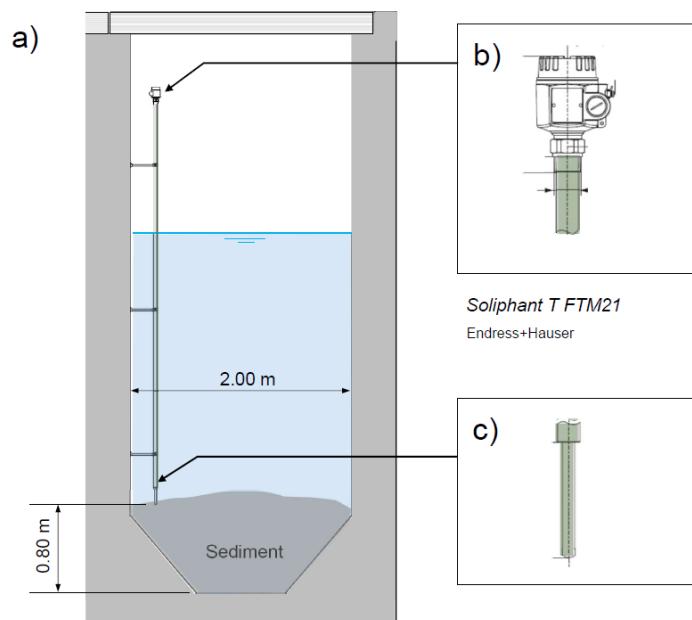


Abbildung 22: a) Querschnitt durch eine Entsanderkammer mit dem Vibrations-Sedimentniveau-Grenzstandssensor (VSNS) zum Anzeigen, dass eine Entanderspülung fällig ist; mit Details von b) Messumformer und c) Schwingstab am unteren Ende der Stange.



5.2 Schwebstoffbelastung

5.2.1 Übersicht über die Schwebstoff-Messeinrichtungen

Die in der Tabelle 4 aufgeführten Instrumente für das Schwebstoff-Monitoring und das Zubehör für deren Installation wurden im Winter 2018/2019 vorbereitet. Sobald es die Schneeverhältnisse an der Flüela-Passstrasse erlaubten, wurden diese Instrumente im Mai 2019 an der Wasserfassung des Kraftwerks Susasca installiert. Die Lagen der beiden Messstellen sind in Abbildung 23 dargestellt.

Tabelle 4: Schwebstoffmessgeräte am KW Susasca. SSC = Schwebstoffkonzentration, PSD = Partikelgrößenverteilung

Messstelle	Instrument	Modell, Hersteller	Parameter und Messbereich	Einsatzperiode
1) vor dem Einlaufrechen, im Bach	Trübungssonde mit Druckluftreinigung	CUS 51D, Endress+Hauser	tiefe bis mittlere SSC	seit Mai 2019
2) in der Entnahmekammer (nach Entsander, vor dem Einlauf in die Druckleitung) (CFDM, Laserdiffraktometer und Wasserprobennehmer im darüberliegenden Raum, mittels Pumpen)	Trübungssonde mit Druckluftreinigung	Akustischer Sensor (8 MHz backscatter)	tiefe und mittlere SSC	(über das Forschungsprojekt hinaus)
	Coriolis-Massestrom- und Dichtemessgerät (CFDM)	Promass F500 DN15, Endress+Hauser	Mittlere bis hohe SSC	Mai 2019 - Nov. 2021
	Laserdiffraktometer	LISST-StreamSide bzw. LISST-100x, Sequoia Scientific	Tiefe SSC und PSD	2019 bzw. 2020-2021
	Automatischer Wasserprobennehmer	ISCO 3700, ISCO-Teledyne	tiefe bis hohe SSC	2019-2021

Der automatische Wasserprobennehmer war befristet im Einsatz, um Wasserproben zu pumpen. Von diesen wurden im Labor die SSC bestimmt, welche als Referenz für die übrigen Instrumente dienten, welche die SSC kontinuierlich und indirekt messen. Die Auswahl dieser Instrumente beruhte auf folgenden Überlegungen:

- Trübungssonden sind in Kläranlagen und in der Prozessindustrie weit verbreitet (Standard) und auch in einigen Wasserkraftanlagen im Einsatz. Sie sind aber anfällig auf Verschmutzung und sind am sensitivsten auf feinste Partikel (Ton und Feinsilt), welche ein geringes Abrasionspotential aufweisen und daher für die Turbinenabrasion eigentlich weniger relevant sind.
- Als Alternative zu Trübungssonden wurde vor einigen Jahren der akustische SSC-Sensor LISST-ABS entwickelt. Akustische Sensoren sind nicht anfällig auf Verschmutzung. Seine relativ hohe Frequenz von 8 MHz wurde gewählt, damit der Sensor auf Feinsand am sensitivsten ist und sein Signal möglichst wenig von der Partikelgröße abhängt (Agrawal *et al.* 2016). Er ist an Wasserkraftanlagen bisher wenig verbreitet im Einsatz.
- Übliche Trübungssonden können mit Siltpartikeln wie am KW Fieschertal SSC bis ca. 6 g/l messen (Abgottsporn *et al.* 2022a). Daher können sie bei Hochwasser, also wenn die SSC-Messung für den Kraftwerksbetrieb von besonderem Interesse ist, überlastet sein. Sie zeigen dann nicht den Wert der oberen Messbereichsgrenze oder eine Fehlermeldung an, sondern ihr Signal nimmt aufgrund von Mehrfachstreuung ab und kann null erreichen (Voichick *et al.* 2018).
- Deshalb wurden am KW Fieschertal zusätzlich je ein Coriolis-Massestrom- und Dichtemessgerät (CFDM) in der Schieberkammer und an der Wasserfassung eingesetzt, welche als einzige Instru-



ment auch SSC bis 20 oder 100 g/l messen können (Abgottsporn *et al.* 2022a). Mit dem stets kalten Wasser mit kaum organischem Material war die Betriebserfahrung mit den CFDM am KW Fieschertal positiv. Um mittlere bis hohe SSC auch am KW Susasca messen zu können, wurde daher auch dieses Gerät eingesetzt.

- Für die Turbinenabrasion ist nebst der SSC die Partikelgrösse eine wichtige Grösse, die je nach Wasserführung und Jahreszeit ändern kann. Für die Messung von Partikelgrößenverteilungen (*Particle size distributions PSD*) in fein aufgelösten Größenklassen werden Laserdiffraktometer eingesetzt. Mit einem *LISST-100x*, welches in der Schwebstoffpartikelforschung weltweit verbreitet eingesetzt wird, konnten am KW Fieschertal die PSD an der Druckleitung und ihre zeitliche Variation detailliert gemessen werden, wenn die SSC unter wenigen g/l lag. Da ein Laserdiffraktometer relativ kosten- und unterhaltsintensiv ist, wurde es nur für die Zeit des Forschungsprojekts am KW Susasca vorgesehen. Ein Laserdiffraktometer mit einer etwas anderen Bauart und geringeren Kosten, *LISST-StreamSide*, wurde während eines Jahres als Alternative getestet.

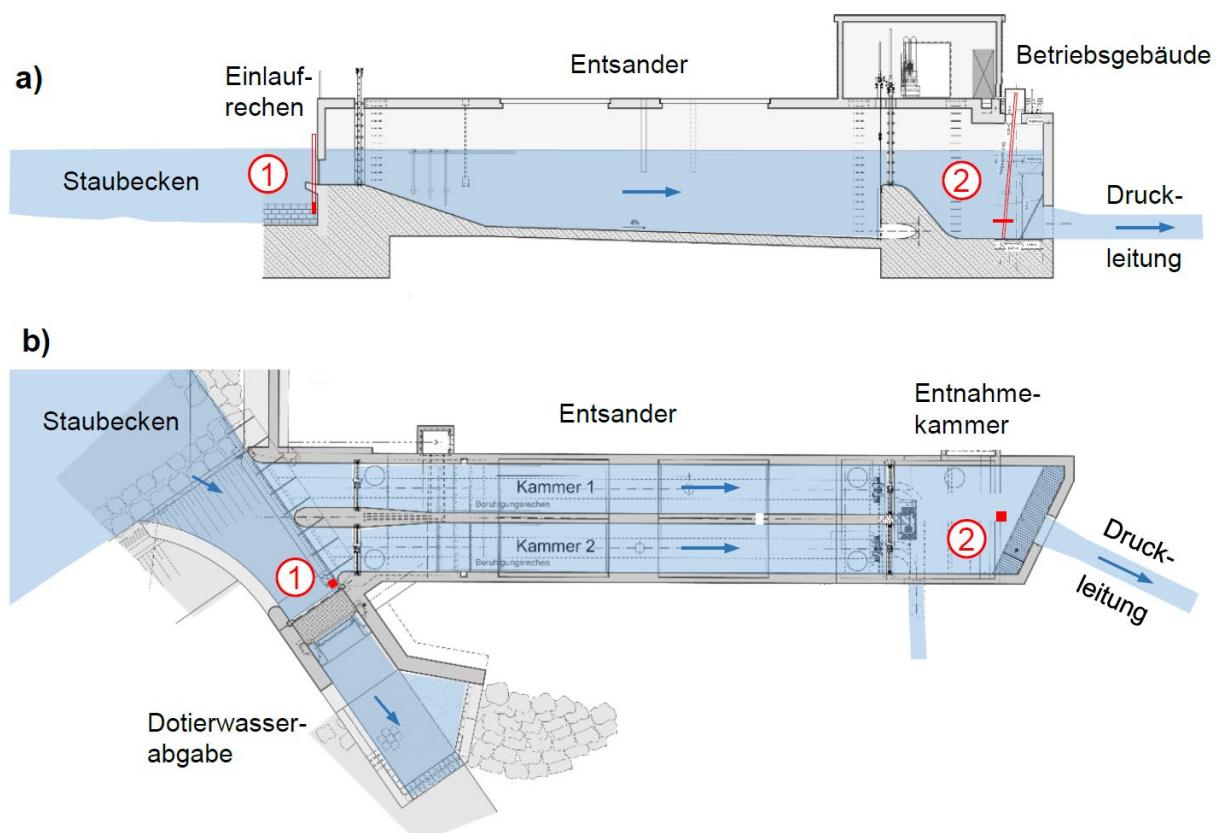


Abbildung 23: a) Längsschnitt und b) Grundriss der Wasserfassung des KW Susasca mit Lage der beiden Schwebstoff-Messstellen (Plangrundlage: Hydro-Solar 2016).

5.2.2 Trübungssonde vor der Wasserfassung

Eine Trübungssonde wurde in der Susasca ausserhalb der Wasserfassung zwischen dem Einlaufrechen und den Grundablass installiert. Diese Sonde hat die Aufgabe, auch dann Informationen zur SSC des Bachwassers zu liefern, wenn die Wasserfassung vorübergehend geschlossen wird (z.B. während Hochwasser).

Zum Schutz der Sonde vor Geschiebe und Schwemmmholz wurde die Sonde in einem gelochten Schutzrohr an der Wand montiert (Abbildung 24a). Die Sonde befindet sich ca. 0.7 m über der Sohle und ca. 0.5 m unterhalb der Kragschwelle der Wasserfassung. Die Trübungssonde ist mit einer automatischen Druckluftreinigung ausgerüstet, um Verfälschungen der Messwerte durch Verschmutzung der Optik (Ablagerungen, Biofilmbildung etc.) zu vermeiden.

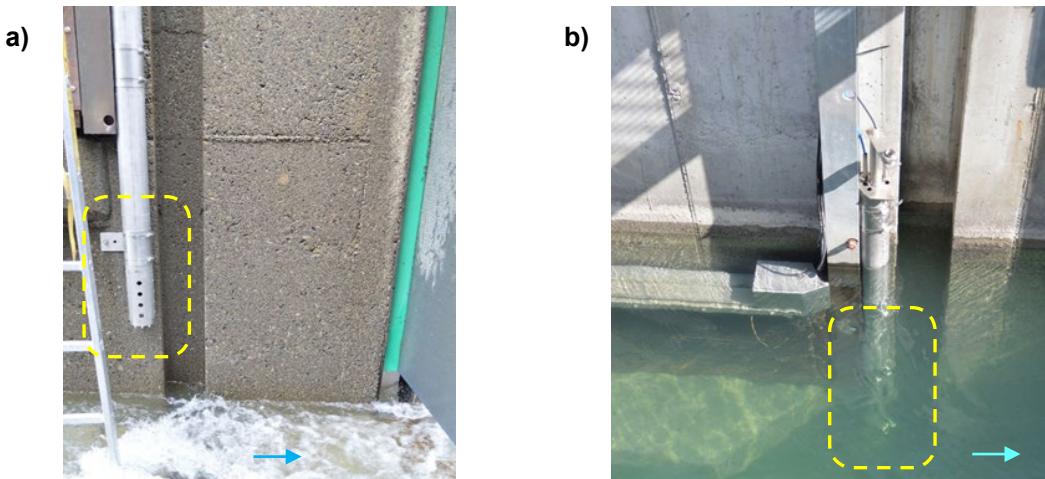


Abbildung 24: a) Trübungssonde in der Susasca in gelochtem Schutzrohr oberwasserseitig des Grundablasses während der Montage bei entleertem Staubecken (30.04.2019) und b) mit üblichem Wasserspiegel im Staubecken (30.04.2019, Fotos: VAW).

5.2.3 Schwebstoff-Messeinrichtungen in der Entnahmekammer

In der Entnahmekammer wurden die Schwebstoff-Messgeräte so montiert, dass sie auf einem Messschlitten mit einem Zugseil entlang eines Stahlträgers vertikal verschoben werden können (siehe oben rechts in Abbildung 23, sowie in Abbildung 25). Der Messschlitten ist über einen Schacht ausserhalb des Betriebsgebäudes erreichbar. Diese Konstruktion wurde gewählt, damit die Messgeräte auch während dem Kraftwerksbetrieb (ohne Entleerung der Entnahmekammer) gewartet und nötigenfalls ersetzt werden können.

Normalerweise befinden sich die Messgeräte ca. 0.7 m über der Sohle der Entnahmekammer. Diese Höhenlage entspricht der Achse des Einlaufs in die Druckleitung. Bei gröberen Sedimentpartikeln wie Grobsilt und Feinsand kann die SSC in Bodennähe höher sein als weiter oben in der Wassersäule. Während Messkampagnen vor Ort kann die vertikale Position des Schlittens in 0.5 m-Schritten verändert werden, sodass die SSC auf verschiedenen Höhen in der Entnahmekammer gemessen werden kann.

Auf dem Messschlitten wurden eine Trübungssonde (gleiches Modell wie im Staubecken), der akustische Sensor LISST-ABS, der Einlauf des Ansaugschlauchs des automatischen Wasserprobennehmers und eine Tauchpumpe (500 W) angebracht (Abbildung 26). Diese versorgt das CFDM und das Laserdiffraktometer, welche sich im Betriebsraum oberhalb der Entnahmekammer befinden, via einen Schlauch mit Wasser. Nachdem sich ein 1/2"-Schlauch (Innendurchmesser $d_i = 16 \text{ mm}$) wegen Lärchennadeln im ersten Herbst als zu verstopfungsanfällig erwies, wurde ein 3/4"-Schlauch verwendet ($d_i = 20 \text{ mm}$). Nachdem das gepumpte Wasser das CFDM bzw. das Laserdiffraktometer durchflossen hat, wurde es in die Entnahmekammer zurückgeleitet.



An der Wand der Entnahmekammer wurde ein Schwimmerschalter montiert, der im Falle einer Entleerung der Entnahmekammer die Stromzufuhr zur Pumpe unterbricht, um sie vor Beschädigung zu schützen (Trockenlaufschutz). Die Tauchpumpe war innerhalb der drei Jahre mehrmals defekt, vermutlich auch wegen Abrasion durch schwebstoffhaltiges Wasser, und musste ersetzt werden.

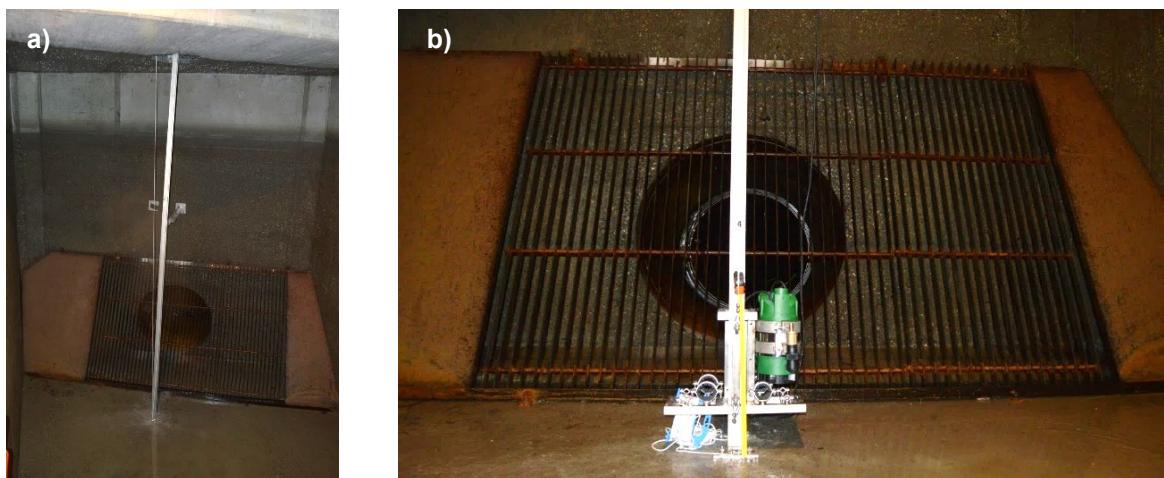


Abbildung 25: a) Stahlträger, welcher als Führungsschiene für den Messschlitten in der Entnahmekammer montiert wurde und b) Messschlitten in der tiefsten Position (0.2 m über der Sohle) noch ohne Messgeräte (30.04.2019, Fotos: VAW).

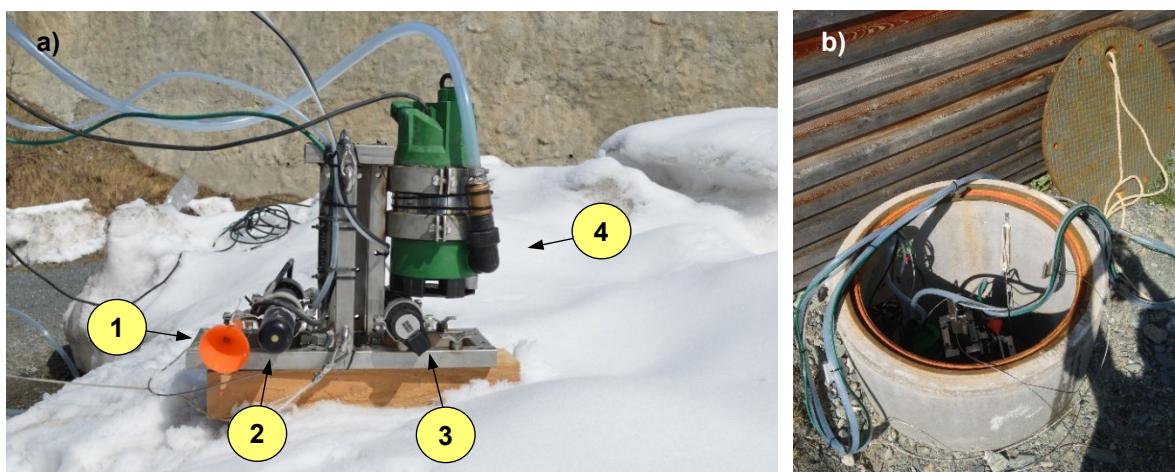


Abbildung 26: a) Messschlitten (vor dem Absenken in den Schacht) mit Einlauf des Ansaugschlauchs für den automatischen Wasserprobennehmer (1), dem akustischen SSC-Sensor (2), der Trübungssonde (3) und der Tauchpumpe (4) zur Speisung des CFDM und des Laserdiffraktometers und b) Schacht neben dem Betriebsgebäude am oberen Ende der Führungsschiene des Messschlittens (14.05.2019, Fotos VAW).

5.2.4 CFDM im Betriebsraum

Im Betriebsraum über der Entnahmekammer wurde das CFDM an die Wand montiert (Abbildung 27a). Um Sandablagerungen in den Messrohren im CFDM zu vermeiden, wurde es vertikal montiert. Der Durchfluss betrug ca. 0.3 l/s, was sich für ein CFDM mit derselben Nennweite (DN15) und ebenfalls einem $\frac{3}{4}$ -Schlauch im KW Fieschertal bewährte (Felix *et al.* 2022).



Am KW Susasca führte organisches Material wie Lärchenadeln und Blätter am Einlauf des CFDM für häufige Verstopfungen im ersten Jahr. Daher wurde eine automatische Rückspülung eingerichtet (Abbildung 27b). Im Normalbetrieb wurde das CFDM von unten nach oben durchflossen. Im Spülbetrieb wurde das CFDM in die andere Richtung durchflossen und allfälliges Spülgut, das sich vor dem Einlauf in die Messrohre des CFDM ansammelte, wurde ohne Passage des Laserdiffaktometers in die Entnahmekammer zurückgespült. Die Steuerung der Rückspülung wurde so programmiert, dass sie routinemässig einmal pro Tag und bei Unterschreiten eines bestimmten Durchflusses ausgelöst wurde. So waren Verstopfungen im CFDM kein Grund mehr, vor Ort zu intervenieren.

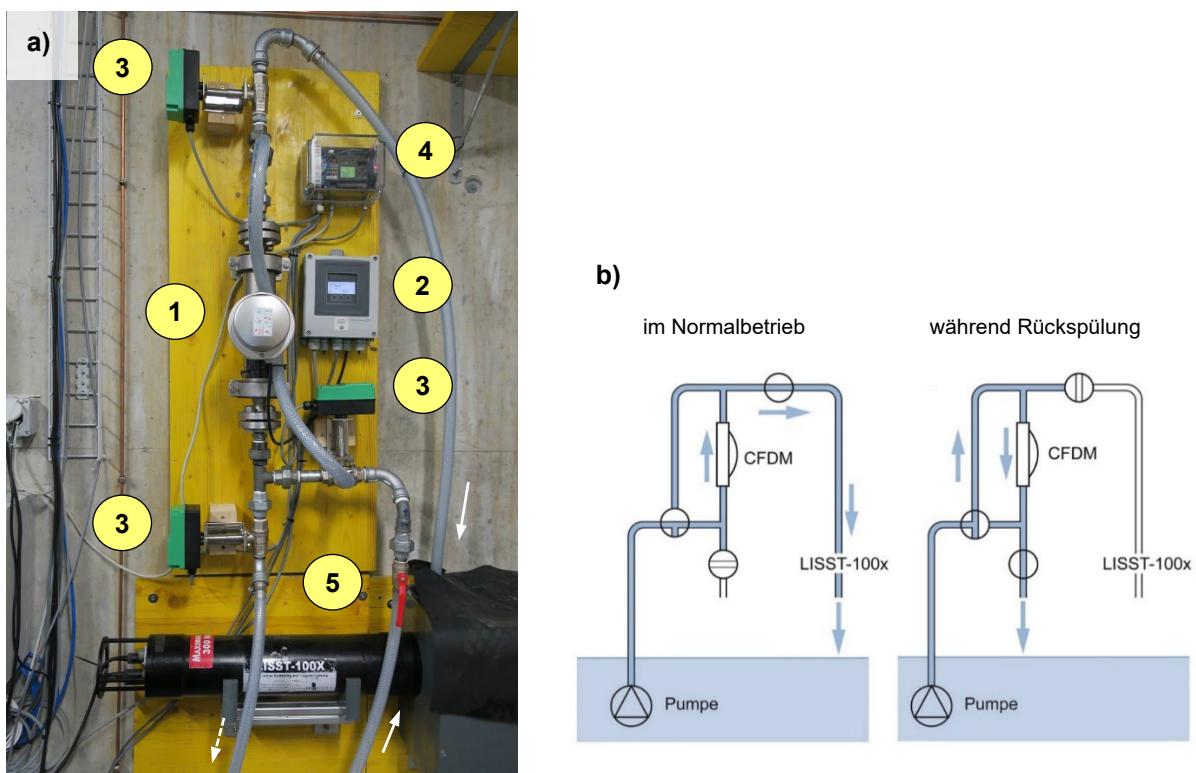


Abbildung 27: a) Dichtemessgerät CFDM (1) mit Messumformer (2) und drei motorbetriebenen Kugelhähnen (3) mit ihrer Steuerung (4), oberhalb des Laserdiffaktometers LISST-100x (5) im Betriebsraum an der Wasserfassung des KW Susasca im Sommer 2020, b) Schema der automatischen Rückspülung für das Dichtemessgerät CFDM (Foto und Schema: VAW).

Im Lauf des Projekts lag das Signal der Gemischdichte auch bei fast klarem Wasser um mehrere g/l über der erwarteten Dichte. Mögliche Gründe dafür sind Abrasion oder Ablagerungen in den Messrohren oder Bedingungen am Einsatzort, die von denen bei der Werkskalibrierung abweichen. Weiter wies das Dichtesignal im Sommer einen starken Tagesgang und variable Versätze auf, der nicht mit der SSC-Variation erklärt werden konnten und auf unkompenzierte Temperatureffekte und allenfalls zeitweise Ablagerungen hindeuteten. Die Lufttemperatur im Betriebsraum nahm an Sommertagen deutlich stärker zu als die Temperatur des Wassers. Um Einflüsse solcher Temperaturdifferenzen möglichst zu reduzieren, wurde das CFDM inkl. Rückspülseinrichtung in einen wärmegedämmten Kasten eingebaut und die Schlauchzuleitung im Betriebsraum mit Wärmedämmung umgeben. Diese Massnahme führte aber nicht dazu, dass von den CFDM-Signalen stets eine plausible SSC ausgewertet werden konnte. Da die technische Ursache dafür nicht gefunden werden konnte, wurde das CFDM am Projektende rückgebaut.



5.2.5 Laserdiffraktometer im Betriebsraum

Zur kontinuierlichen Messung der Partikelgrösse im Triebwasser war in den Jahren 2020 bis 2021 ein Laserdiffraktometer (*LISST-100x*) installiert (Nr. 5 in Abbildung 27a). Es ersetzte das *LISST-StreamSide*, welches sich im Jahr 2019 nicht bewährte, u.a. weil dessen Zuleitungsschläuche mit einem Innen Durchmesser von nur 6 mm durch organisches Material oft verstopft wurden. Auch ohne organisches Material bewährte sich das *LISST-StreamSide* am KW Fieschertal für den Einsatz über mehrere Monate nicht (Felix et al. 2022) und der Hersteller hat es unterdessen aus seinem Sortiment genommen. Am Projektende wurde das Laserdiffraktometer deinstalliert, weil dessen Einsatz für die Dauer des Forschungsprojekts geplant war.

5.2.6 Weitere Installationen im Betriebsraum für das Schwebstoffmonitoring

Im Betriebsraum war von 2019 bis 2021 ein automatischer Wasserprobennehmer aufgestellt (Nr. 2 in Abbildung 28b). Er wurde über ein Signalkabel vom Messrechner her gesteuert. Periodisch wurden die bis zu 24 gefüllten Wasserprobenflaschen abgeholt und durch einen Satz leerer Flaschen ersetzt.

Die beiden Trübungssonden wurden an ihren Messumformer angeschlossen (Abbildung 28a). Am Messumformer wurde definiert, dass die Sonden alle 12 h während einigen Sekunden mit Druckluft aus einem Kompressor gereinigt werden. Die Analogsignale der Trübungssonden, des akustischen Sensors und des CFDM wurden an einen Datenerfassungsschrank angeschlossen. In diesem Schrank befand sich ein Analog-Digital-Wandlermodul an einem Messrechner mit Internetverbindung. Die Daten werden im Minutenakt abgespeichert. Weiter wurde das *LISST-100x* an den Messrechner angeschlossen. So konnten ohne Präsenz vor Ort erstens die Entnahme von Wasserproben ausgelöst und zweitens die Messgeräte überwacht werden.

Am Ende des Forschungsprojekts im November 2021 wurde die temporäre Datenerfassung entfernt. Die Signale der beiden Trübungssonden und des akustischen Sensors wurden ins Kraftwerksleitsystem integriert.

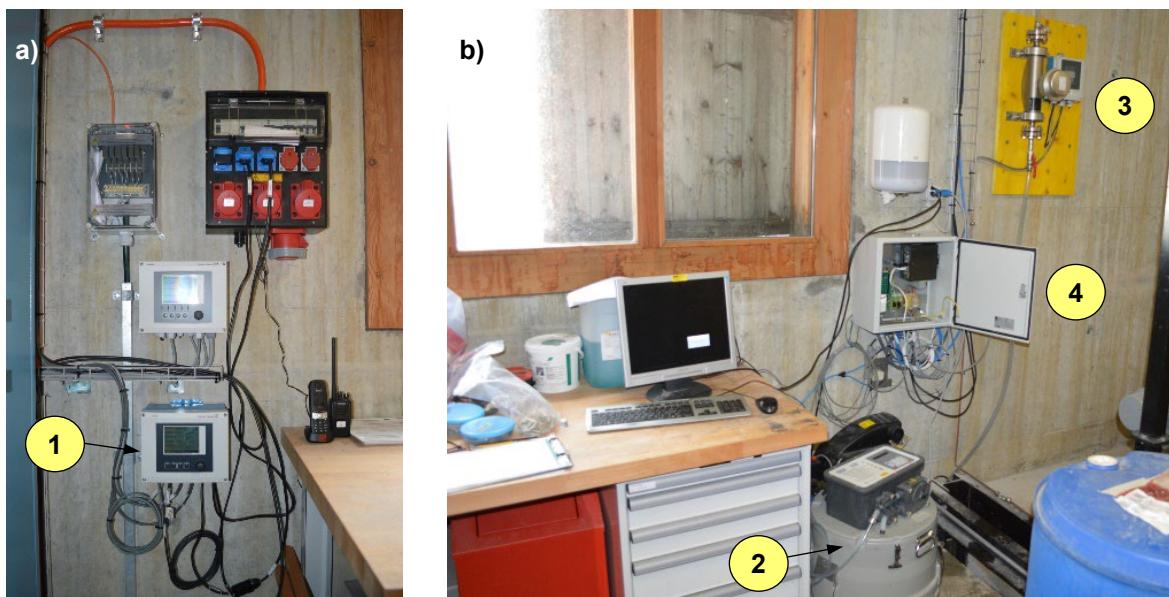


Abbildung 28: a) Messumformer für die Trübungssonden (1) und b) automatischer Wasserprobennehmer (2), Dichtemessgerät (3) und temporärer Datenerfassungsschrank (4) im Betriebsraum über der Entnahmekammer (14.05.2019, vor dem Bau der automatischen Rückspülung für das CFDM und der Installation des Laserdiffraktometers; Fotos: VAW).



5.2.7 Niederschlags-Daten

Um zu untersuchen, ob erhöhte SSC in der Susasca und im Kraftwerksystem durch Regen erklärt oder vorhergesagt werden können, wurde die Niederschlagsdaten der Bodenmessstation Susch in die Auswertungen miteinbezogen. Diese Messtation befindet sich am Inn nordöstlich von Susch, nahe dem Maschinenhaus des KW Susasca, auf 1416 m ü. M. (Meteoschweiz 2022). Heutzutage sind Niederschlagshöhen mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten erhältlich.

5.2.8 Laboranalysen

Von den Wasserproben, die aus der Entnahmekammer gepumpt worden waren, wurde im Labor die SSC mit der Wägemethode bestimmt. Da vor allem erhöhte SSC ($>0.1 \text{ g/l}$) von Interesse waren, wurde das Wasser der gesamten Probe verdunsten gelassen (statt Filtrieren). Die Masse der ehemals im Wasser gelösten Mineralien, welche sich in der Probenschale nach der Ofentrocknung absetzten, wurden bei der Bestimmung der SSC in Abzug gebracht. Von Wasserproben ohne sichtbare Trübung, die vor und nach der Schwebstoffsaison entnommen wurden, wurde ein mittlere Konzentration der gelösten Stoffe von 0.05 g/l bestimmt. Die Bestimmung der SSC mittels Wägung wird auch als gravimetrische Methode bezeichnet; daher werden die so bestimmten Schwebstoffkonzentrationen als SSC_G abgekürzt. Diese dienten als Referenz für die Umrechnung der Signale der Messgeräte für indirekte Messungen der Schwebstoffkonzentration (Trübung und akustische Rückstreuung).

Für die qualitative Bestimmung der Partikelform wurden von den Rückständen aus fünf ausgewählten Wasserproben Elektronenmikroskop-Bilder am Institut für Baustoffe (IfB) der ETH Zürich erstellt. Für jede Probe wurden Bilder bei 200-, 400- und 1000-facher Vergrösserung erstellt.

Von den Rückständen aus drei ausgewählten Wasserproben wurde im Tonmineralogielabor am Institut für Geotechnik der ETH Zürich eine quantitative mineralogische Analyse mittels Röntgenbeugung (*X-ray diffraction XRD*) durchgeführt.



5.3 Turbinenabrasion

5.3.1 Messkonzept

Um die Abrasion an den Turbinenbauteilen zu quantifizieren, werden geometrische Größen über die Jahre wiederholt gemessen. Aus den Differenzen wird das Ausmass des Verschleisses bestimmt.

Die Düsenadeln konnten im geschlossenen Zustand von der Unterwasserseite fotografiert werden. Der Fokus der Untersuchung lag aber auf den beschichteten und unbeschichteten Laufradbechern.

Aus Kostengründen war keine vollflächige wiederholte 3d-Vermessung von Bechern vorgesehen. Daraum wurden ausgewählte Größen von Hand mit einfachen Instrumenten gemessen und ergänzend dazu wurde ein Verfahren entwickelt, das auf der Auswertung von systematischen Fotografien beruht.

Auf die Messung von Schichtdicken wurde verzichtet, weil die flächige Abrasion der Beschichtung in den Becherhälften nicht als massgebend angesehen wurde gegenüber der lokalen Abrasion der Beschichtung über ihre gesamte Dicke an exponierten Stellen wie den Mittelschneiden und den Becher-eintrittskanten sowie an möglichen weiteren Stellen im Becher (Sekundärschäden oder vereinzelte untypische Schäden). Die Untersuchungen konzentrieren sich demnach auf die Abrasion des Grundmaterials an den Laufradbechern im Bereich von mindestens 0.5 mm, die auch von Auge sichtbar ist.

5.3.2 Zeitpunkte der Turbineninspektionen mit Fotos und Vermessungen

Die Laufräder und Düsen der beiden MG wurden zu den in Tabelle 5 aufgelisteten Zeitpunkten inspiert, fotografiert und vermessen. Die Inspektionsdaten sind auch in der zeitlichen Übersicht in Abbildung 16 eingetragen. Die Inspektionen erfolgten im Winterhalbjahr, wenn eine MG ohne Produktionsausfall des Kraftwerks stillstehen kann. Dank separater Unterwasserkänele der beiden MG ist der Zutritt ins Turbinengehäuse einer MG von der Unterwasserseite her möglich, während die andere MG in Betrieb ist. Beim neuen Laufrad für MG 1 war es möglich, dieses im März 2019 bereits vor dem Einbau in der Maschinenhalle zu fotografieren und zu vermessen. Weiter wurden die drei ausgebauten abgenutzten Laufräder ebenfalls in der Maschinenhalle fotografiert und vermessen.

Tabelle 5: Zeitpunkte der Turbineninspektionen bzw. -vermessungen der VAW am KW Susasca während der Projektdauer.

Winter	MG 1 unbeschichtetes Laufrad 1.3		MG 2 Beschichtetes Laufrad 2.2	
	Datum	Laufrad im Einsatz seit	Datum	Laufrad im Einsatz seit
2018/2019	13.-14.03.2019	0 Jahre	11.09.2018	1 Jahre
2019/2020	01.-02.04.2020	1 Jahre	06.-07.04.2020	2 Jahre
2020/2021	23.-24.02.2021	2 Jahre	10.-11.03.2021	3 Jahre

5.3.3 Definition von charakteristischen Abmessungen (Verschleissgrößen)

Um die Abrasion an den Laufradbechern über die Jahre zu quantifizieren, wurden die fünf charakteristischen Abmessungen gemäss Abbildung 29 gewählt, welche infolge des Verschleisses über die Zeit variieren und so den Abnutzungszustand eines Laufrads charakterisieren.

Die Abrasion im Bechergrund Δf und die Abnahme der Becherwanddicke Δe sind in der Regel nur bei unbeschichteten Bechern von Bedeutung. Die übrigen Masse, die sich auf geometrische Veränderungen der Mittelschneiden und der Becherausschnitte beziehen, sind auch für beschichtete Becher relevant.



<p>a) Koordinatensystem in Becher</p> <p>Draufsicht:</p> <p>Seitenansicht:</p> <p>gemäss Abgottpon et al. (2013)</p>	<p>b) Mittelschneidenbreite s</p> <p>gemessen mit v-förmiger Schablone bei $y = 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140$ mm (entlang der Schneide 7 Werte pro Becher). Mittelwert von Bechern 1 bis 10</p>
<p>c) Becherausschnittstiefe c</p> <p>gemessen wurde der maximale Wert c je im linken und rechten Ausschnitt, d.h. 2 Werte pro Becher. Mittelwert von Bechern 1 bis 10</p>	<p>d) Radiale Position der Mittelschneidenspitze y_t</p> <p>Abstand vom Laufrad-Aussendurchmesser in radialer Richtung y bis zur Mittelschneidenspitze. 1 Wert pro Becher. Mittelwert von Bechern 1 bis 10</p>
<p>e) Bechertiefe f</p> <p>maximale Tiefe von Oberkante Becherrand bis in Bechergrund einer Becherhälfte, d.h. lokales Ma- ximum ggf. in Wellental. in linker und rechter Becherhälfte, d.h. 2 Werte pro Becher. Mittelwert von Bechern 1 bis 10</p>	<p>f) Becherwanddicke e (am Rand oben)</p> <p>Laufrad- Aussen- durchmesser</p> <p>$y = 0 \text{ mm}$ $y = 17 \text{ mm}$ $y = 53 \text{ mm}$ $y = 97 \text{ mm}$ $y = 139 \text{ mm}$ $y = 183 \text{ mm}$</p> <p>(Schablone 2) (Schablone 3) (Schablone 4) (Schablone 5)</p> <p>Becherwanddicke an Messstellen 1 bis 5, am linken oder rechten Becherrand, d.h. 2×5 Werte pro Becher. pro Messstelle Mittelwerte von Bechern 1 bis 10</p>

Abbildung 29: Definition des lokalen Koordinatensystems im Becher und von Verschleisskenngrößen an den Laufradbechern von Pelton turbinen (die y -Positionen der Messstellen e_1 bis e_5 sind spezifisch für die Laufradgröße wie am KW Susasca).



5.3.4 Messung der Mittelschneidenbreite mit einer Schablone

Bei unbeschichteten Laufrädern wird die Oberkante der Mittelschneiden im Querschnitt gesehen oft fast horizontal abgetragen. In solchen Verhältnissen, mit klaren Kanten beidseits des abgeplatteten Bereichs, lässt sich die Mittelschneidenbreite an einer bestimmten Stelle entlang der Mittelschneide mit einem Messschieber (in der Schweiz auch Schieblehre oder Schublehre genannt) bestimmen.

Es kann jedoch im Neuzustand, durch die Abrasion oder nach Revisionsarbeiten (Schleifen) vorkommen, dass die Mittelschneidenkrone im Querschnitt gerundet ist. Bei abgenutzten, anfänglich beschichteten Laufrädern können Beschichtungsräder allenfalls einseitig vorstehen und der Querschnitt der Mittelschneidenkrone kann stark asymmetrisch sein. Damit die Mittelschneidenbreite stets klar definiert ist, schlugen Abgottspont *et al.* (2013) eine Definition mit zwei Tangenten mit einer Neigung von 2:1 vor (Abbildung 2 im Abschnitt 3.1.3). Diese Definition kann verwendet werden, wenn der aktuelle Mittelschneidenquerschnitt bekannt ist (z.B. bei der Auswertung von 3d-Scans).

Für eine Messung der Mittelschneidenbreite mit einfachen Mitteln wurde hier eine v-förmige Schablone mit 2:1-geneigten Flanken angefertigt (Abbildung 30). Im Querschnitt gesehen, wird die Mittelschneidenbreite s auf der Höhe der Mittelschneidenoberkante zwischen den Flanken der Schablone mit einer Auflösung von 0.5 mm abgelesen (Abbildung 29b).

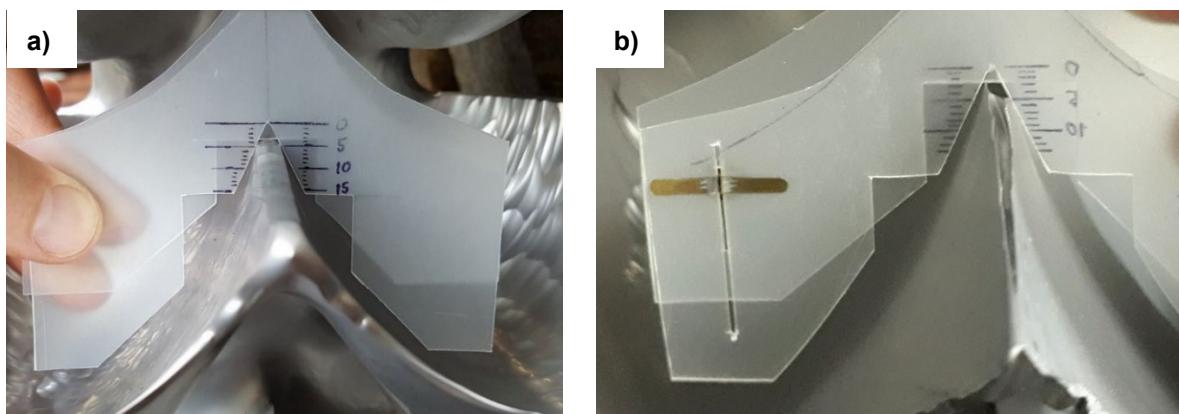


Abbildung 30: Messung der Mittelschneidenbreite s mit einer Schablone mit 2:1-geneigten Flanken a) an einem unbeschichteten Laufrad und b) an einem beschichteten Laufrad mit asymmetrisch abgerundetem Mittelschneidenquerschnitt (Fotos: VAW).

5.3.5 Messungen an den Becherausschnitten und Messung der Bechertiefe

Die Becherausschnittstiefe c und die radiale Position der Mittelschneidenspitze y_t wurden an einem Massstab mit einer Auflösung von 0.5 mm abgelesen. Entsprechend der Definition in Abbildung 29c) und d) wurde eine Holzlatte, die an den ebenen Flächen vorne an den Bechern hingehalten wurde, als Bezugsebene verwendet (Abbildung 31a).

Die Bechertiefe e gemäss der Definition in Abbildung 29e wurde mit einer Hilfskonstruktion bestimmt. Diese besteht aus einer Holzlatte, an welcher ein höhenverstellbarer Stift befestigt ist. Die Holzlatte wurde auf den Becherrändern aufgelegt (Abbildung 31b) und der Abstich bis zur tiefsten Stelle jeder Becherhälfte gemessen.

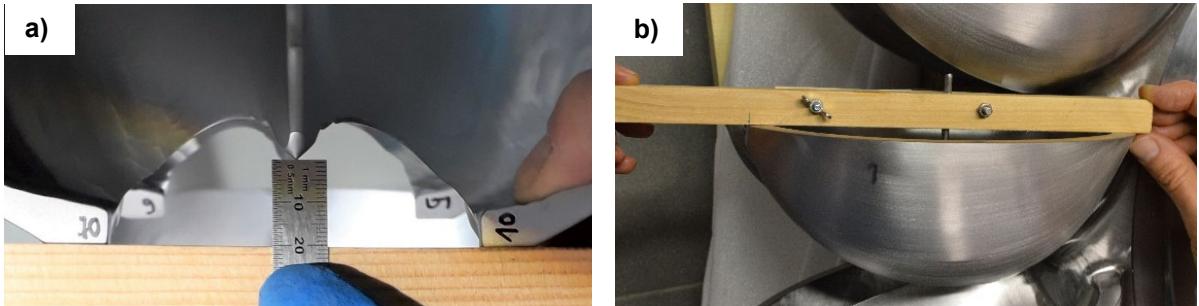


Abbildung 31: a) Messung der radialen Position der Mittelschneidenspitze y_t und b) Messung der Becherhöhe f zur Bestimmung der Abrasion im Bechergrund an einem unbeschichteten Laufrad (Fotos: VAW).

5.3.6 Messung der Becherwanddicke und Vergleich mit Becherprofil-Schablone

An der linken und der rechten Becherwand wurde deren Dicke im Bereich der Becheroberkante an fünf Stellen gemäss Abbildung 29f mit einem Dickenmass (Abbildung 32a) gemessen. Aufgrund der Neigung der Becherwand ist die sichtbare Breite am Becherrand etwas grösser als die Wanddicke. Daher wurde diese senkrecht zur Innenfläche gemessen, wobei der Punkt auf der Becherinnenseite etwa 3 mm unterhalb der Becheroberkante lag. (bzw. an Messstelle 5 wegen der eingeschränkten Platzverhältnisse mit einem kleinen Messschieber)

Weiter wurde das Profil der Becherinnenseite im Hauptquerschnitt des Bechers mit den Schablonen verglichen, die beim Bau der Anlage vom Turbinenhersteller mitgeliefert wurden (Abbildung 32b). Es ist eine Abrasion im Bechergrund und eine Welligkeit von einigen mm ersichtlich; die Distanz von einem Wellenkamm zum nächsten beträgt ca. 2 bis 3 cm.

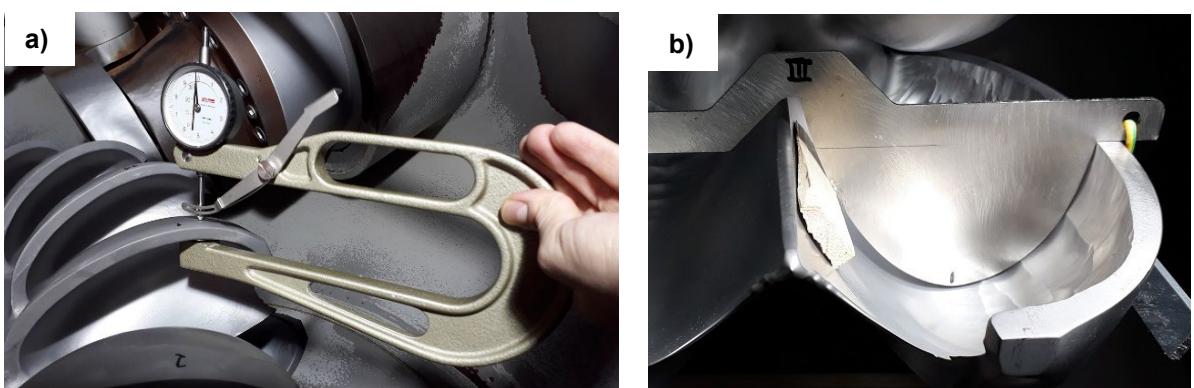


Abbildung 32: a) Dickenmass für die Messung der Becherwanddicke und b) Vergleich der inneren Becherkontur mit Schablone des Laufradherstellers (MG 1, 24.02.2021) (Fotos: VAW).

5.3.7 Bildbasierte Vermessung der Mittelschneiden und Becherausschnitte

Um mit geringen Kosten die Entwicklung der Abrasion an Peltonbechern mit höherer räumlicher Auflösung als mit Messungen an einigen Punkten zu überwachen, wurde eine bildbasierte Methode zur Vermessung der Mittelschneiden und Becherausschnitte entwickelt. Mit der wiederholten Anwendung dieses Verfahrens in vier standardisierten Ansichten konnte das Ausmass der Abrasion in diesen wichtigen Bereichen des Bechers über die Jahre quantifiziert werden.

Als erstes wurde im Jahr 2019 begonnen, systematische Fotos der Laufradbecher in der Seitenansicht (*splitter side views, ssV*) zu erstellen, um daraus das **Längsprofil der Mittelschneideoberkante** zu extrahieren. Dafür wurde eine Halterung angefertigt, mit welcher die Kamera in jeweils der gleichen



Position und Ausrichtung bezogen auf jeden Becher platziert werden konnte. Um den Größenbezug auf dem Foto herzustellen, wurde ein Massstab über der Mittelschneide, in die Symmetrieebene des Laufrads, befestigt. Die Unterkante des Massstabs diente gleichzeitig als Höhenbezug, da die Halterungen des Massstabs vorne und hinten auf den Becherrändern aufgelegt wurden, welche nicht von Abrasion betroffen sind. Die Halterung wurde so konzipiert, dass sie sowohl an ausgebauten wie auch an eingebauten Laufrädern anwendbar ist.

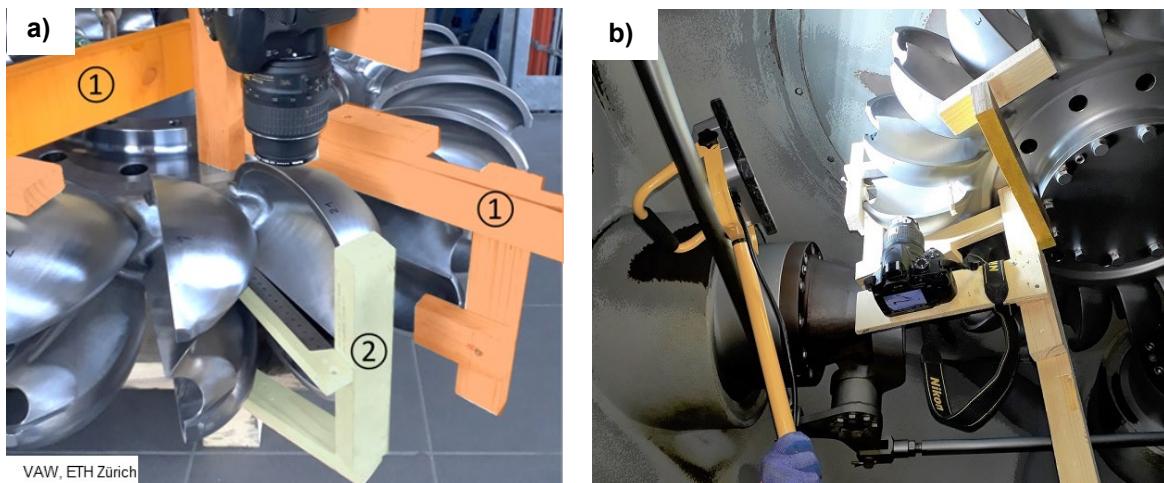


Abbildung 33: Einrichtung zur bildbasierten Vermessung des Mittelschneidenprofils a) an einem ausgebauten Laufrad mit (1) Kamera-Halterung und (2) Referenz-Massstab (Marschall *et al.* 2019) und b) an einem eingebauten Laufrad (Fotos: VAW).

In der Bildauswertung (mit der frei verfügbaren Software *Python*) wurden pro Foto eines Bechers zwei Punkte markiert, aus welcher die Orientierung und die Skalierung (in der Ebene der Mittelschneide) berechnet wurden. Nach Korrektur der Helligkeit bzw. des Kontrasts wurde mittels Kantenerkennung (*edge detection*) das Längsprofil der Mittelschneidenoberkante extrahiert (Abbildung 34).

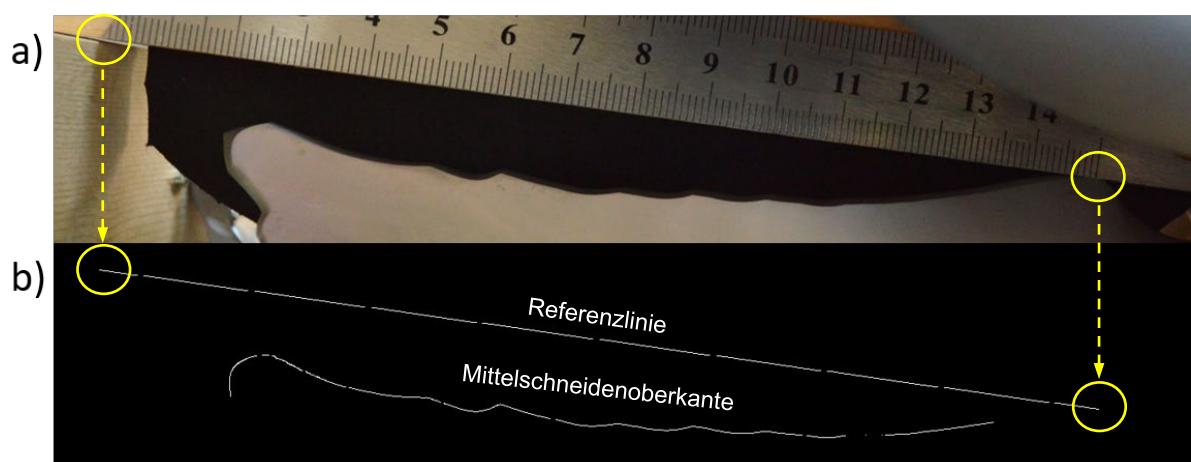


Abbildung 34: Beispiel eines Fotos der Mittelschneide in der Seitenansicht und Erkennung der Mittelschneidenoberkante mit zwei Referenzpunkten für Größe und Orientierung (Marschall *et al.* 2019, Foto: VAW).

Im Jahr 2020 wurde ein ähnliches Verfahren entwickelt, mit welchem die **Mittelschneidenbreite** entlang ihrer gesamten Länge aus systematischen Fotos extrahiert werden kann (Cracknell 2020). Für



die Auswertung wäre eine Draufsicht senkrecht über dem Becher ideal. Da dies wegen dem benachbarten Becher nicht möglich ist, wurde mit Schrägdraufsichten gearbeitet (*splitter oblique top view, stv*). Mit einer weiteren Halterung, an der auch Massstäbe als Größenreferenz angebracht sind, wurde die Kamera in der Symmetrieebene des Laufrads so platziert, dass die Mittelschneide auf ihrer ganzen Länge auf der Fotografie sichtbar ist (Abbildung 35).

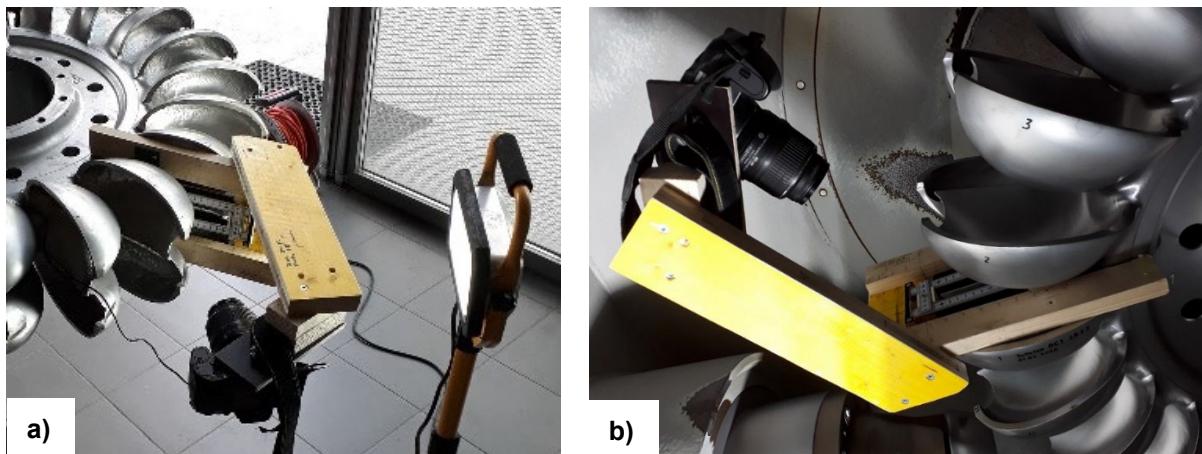


Abbildung 35: Einrichtung zur bildbasierten Vermessung der Mittelschneidenbreite aus der Schrägdraufsicht a) einem ausgebauten Laufrad in der Maschinenhalle und b) an einem installierten Laufrad im Turbinengehäuse (Fotos: VAW).

Von den systematischen Fotos der Schrägdraufsichten auf die Mittelschneiden wurden ihre Kanten aus dem Bild extrahiert (Abbildung 36). Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Distanzen vom Brennpunkt der Kamera zu den interessierenden Bildpunkten von der Mittelschneidenspitze bis an ihr hinteres Ende war es erforderlich, die perspektivische Bildverzerrung zu korrigieren. Dazu dienten die beiden Massstäbe, die links und rechts der Mittelschneide in relevanter Höhenlage angebracht wurden.

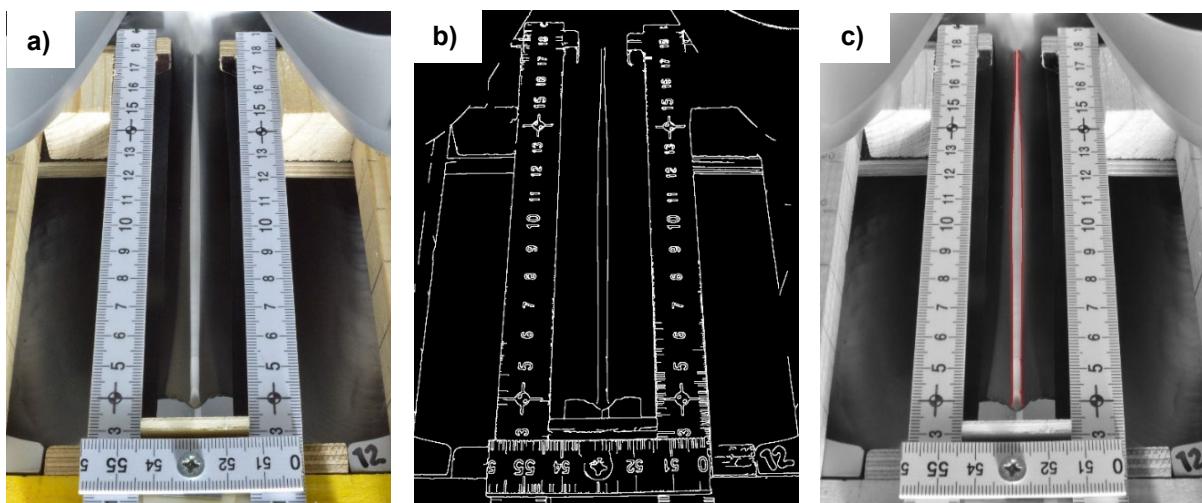


Abbildung 36: a) Beispiel eines Schrägdraufsichts-Fotos der Mittelschneide, b) Kantenerkennung mit Referenz-Massstäben für die Umrechnung von Bildpixeln in Millimeter und c) detektierte Mittelschneidenkanten rot im Foto eingetragen (Cracknell 2020, Fotos: VAW).

Nach ähnlichem Prinzip wurden zwei weitere Kamerahalterungen und Bildauswertungsprozeduren entwickelt, um die Geometrie der Becherausschnittskanten (inklusive der Mittelschneidenspitze) in der Draufsicht (*cut-out top view, cot*) und in der Frontansicht (*cut-out front view, cof*) zu extrahieren. Da bei



diesen zwei Ansichten die relevanten Punkte auf den Becherausschnittskanten in stark unterschiedlichen Distanzen zum Kamerabrennpunkt liegen und die Verzerrungen nicht kompensiert wurden, sind die erkannten Linien in den äusseren Bildbereichen weniger genau als in der Bildmitte sowie weniger genau als die Mittelschneidenhöhen und -breiten.

Abbildung 37 zeigt Beispiele von systematischen Fotos aus den vier Ansichten im Winter 2020/2021:

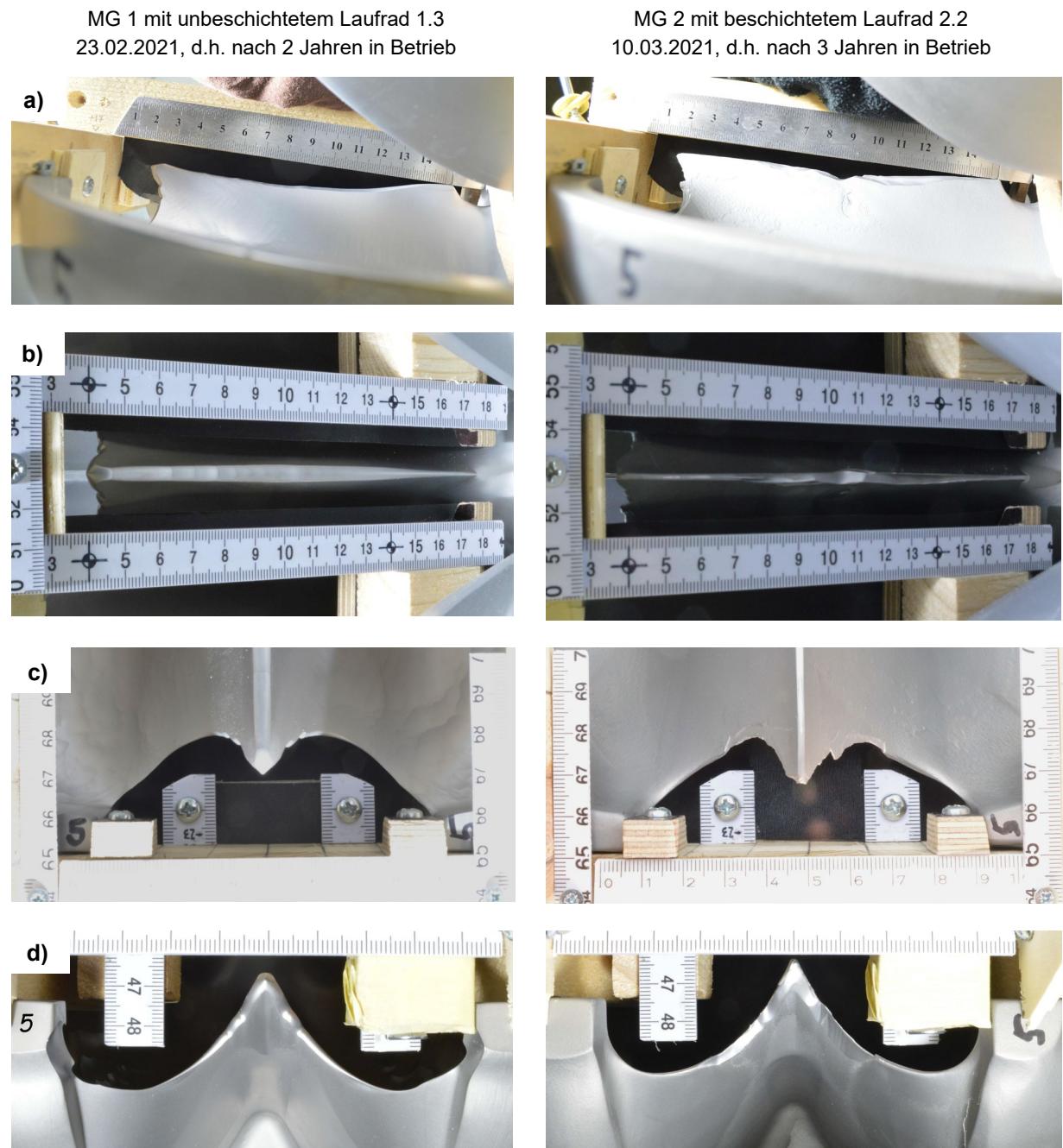


Abbildung 37: Beispiele von systematischen Fotos der teilweise abgenutzten Laufradbecher (je Nr. 5) in MG 1 (links) und MG 2 (rechts) des KW Susasca im Feb./März 2021: a) Seiten- und b) Schrägdraufsicht der Mittelschneiden sowie c) Drauf- und d) Frontansicht der Becherausschnitte (Fotos: VAW).



Bei den eingebauten Laufrädern können die Kamerahalterungen für die Mittelschneiden-Schrägdraufsichten sowie die Drauf- und Frontansichten der Becherausschnitte nur in den Bereichen zwischen den Düsen auf die Becher aufgesetzt werden, da bei den Düsen kein Platz vorhanden ist. Da beim KW Susasca das Laufrad einer stillstehenden MG nicht gedreht werden kann (keine entsprechende Steuerung der Lagerölpumpe vorhanden), können in diesen drei Ansichten lediglich etwa 8 von 21 Bechern fotografiert werden (zufällige Auswahl je nach Stillstandposition des Laufrads). Anhand des Mittelwerts über 8 Becher kann die Abrasion ausreichend genau bestimmt werden. Die Seitenansichten der Mittelschneiden können von allen Bechern aufgenommen werden, da die dafür verwendete Kamerahalterung auch im Bereich der Düsen angebracht werden kann. Um bei der Inspektion eines eingebauten Laufrads die 21 + 3 x 8 systematischen Fotos aufzunehmen, waren nach dem Einrichten des Zugangs und der Beleuchtung jeweils etwa ca. 5 Arbeitsstunden einer Person erforderlich.

Bei den ausgebauten Laufrädern, die mit dem Hallenkran in günstige Arbeitsposition gebracht werden konnten, war das Erstellen der systematischen Fotos weniger aufwändig als im Turbinengehäuse: Nach dem Einrichten konnten die 4 Serien à 21 Fotos pro Laufrad in ca. 2 Stunden erstellt werden.

5.3.8 Wägung von angelieferten oder ausgebauten Laufrädern

Der Massenverlust eines Turbinenlaufrads infolge Abrasion über seine gesamte Lebensdauer kann durch Wägung vor seinem Einbau und nach seinem Ausbau bestimmt werden.

Zu diesem Zweck wurden das im März 2019 neu angelieferte, unbeschichtete Laufrad und die in der Maschinenhalle vorhandenen ausgebauten, abgenutzten Laufräder (ein unbeschichtetes und zwei beschichtete) an einer Kranwaage mit einer Auflösung von 0.1 kg gewogen.

Wenn in Zukunft ein Laufrad ausgebaut wird, kann es erneut gewogen werden und sein Masseverlust durch Vergleich mit der anfänglichen Messung bestimmt werden. Durch erneute Wägung eines bereits früher gewogenen abgenutzten Laufrads (sofern noch im Maschinenhaus vorhanden) kann die Langzeitstabilität der Kranwaage überprüft werden.



5.4 Turbinenwirkungsgrade

Aufgrund von Betriebsdaten, die aus dem Leitsystem exportiert worden waren, wurden die Index-Wirkungsgrade der einzelnen MG über die Jahre ausgewertet.

Der Wirkungsgrad wird aufgrund des Turbinendurchflusses, der Nettofallhöhe und der elektrischen Leistung einer MG bestimmt.

- Der Durchfluss jeder Turbine wird im Maschinenhaus an in ihrer Zuleitung (DN 450) magnetisch-induktiv gemessen. Die Summe der Turbinendurchflüsse wurde aufgrund des Messprinzips als zuverlässiger eingestuft als der nahe an der Wasserfassung gemessene Durchfluss in der Druckleitung (Messung nach dem akustischen Laufzeitverfahren mit 4 Pfaden und aussenliegenden Schallwandlern an GFK-Leitung DN 900).
- Die Nettofallhöhe hängt vom Oberwasserpegel in der Entnahmekammer und den Energieverlusten in der Druckleitung bis zur jeweiligen Turbine ab. Die Drücke, die ober- und unterwasserseitig des Kugelschiebers vor jeder Turbine gemessen werden, wurden verwendet, um die Verluste in Funktion des Durchflusses in quasi-stationären Zuständen zu bestimmen (Abbildung 38). Dabei wurden drei Betriebszustände unterschieden (MG1 oder MG 2 einzeln, oder beide MG gleichzeitig mit ähnlichem Durchfluss in Betrieb). Mit solchen Verlustkurven konnte die Nettofallhöhe berechnet werden, auch wenn Druckdaten zeitweise unplausibel waren, z.B. aufgrund von möglicherweise teilweiser Verstopfung der Sensoren durch Feinsedimente.
- Für die elektrische Leistung einer MG wurde deren Wirkleistung am Generator eingesetzt.

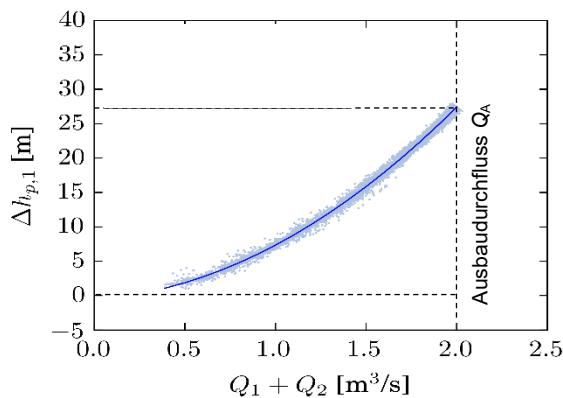


Abbildung 38: Beispiel von gemessenen Druckverlusten zwischen der Entnahmekammer und der Oberwasserseite von MG 1 des KW Susasca im Zweimaschinenbetrieb im Jahr 2020 (Punkte) mit quadratischer Ausgleichskurve (Leitsystemdaten: OESS; Auswertung: VAW).

Die Wirkungsgrade variieren je nach Durchflussmenge (Teillastwirkungsgradkurven). Um die Veränderung der Wirkungsgrade infolge des hydro-abrasiven Verschleisses im Lauf der Jahre untersuchen zu können, wurden vor allem die Wirkungsgrade bei Vollast betrachtet. Um mehr auswertbare Datenpunkte zu erhalten und angesichts des eher flachen Verlaufs der Teillast-Wirkungsgrad-Kurve im Bereich des Ausbaudurchflusses (Anhang C1), wurde für diese Klassierung die untere Grenze bei 90 % des Ausbaudurchflusses pro MG, also bei $Q \geq 0.9 Q_A = 0.9 \cdot 1.0 \text{ m}^3/\text{s} = 0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ angesetzt und dieser Bereich als «Quasi-Volllastbetrieb» einer MG bezeichnet.



6 Resultate und Diskussion

6.1 Staubecken und Entsanderkammern

6.1.1 Anzahl und Dauern der Spülungen

Im Staubecken und in den Entsanderkammern lagern sich Sedimente ab, die periodisch gespült werden (Abbildung 39). Aufgrund von Leitsystemdaten wurde ausgewertet, wann, wie oft und wie lange das Staubecken oder eine der beiden Kammern gespült wurden. Dafür wurden die Ganglinien der Wasserstände im Staubecken bzw. in einer Kammer, des Öffnungsgrads des Grundablassschutzes und des Durchflusses in der Druckleitung betrachtet. Für die Spülung einer Kammer muss ihr Wasserspiegel abgesenkt werden. Aus dem Staubecken kann zwar unter der teilweise angehobenen Grundablassschütze bei Normalstau etwas Geschiebe weitergeleitet werden, aber für das Ausspülen von Sedimentablagerungen ist es erforderlich, den Stau durch Öffnen des Grundablasses zu legen. Dann kann kein Wasser mehr gefasst werden und der Turbinierbetrieb wird unterbrochen.



Abbildung 39: a) Stark verlandetes Staubecken nach dem Hochwasser 2014 (Foto: OESS) und b) Blick von oben in eine Entsanderkammer auf den Hochpunkt der Sedimentablagerungen (09.07.2019, Foto: VAW) jeweils am Beginn einer Spülung.

Eine Spülung wurde detektiert, wenn der entsprechende Wasserspiegel im Staubecken oder in einer Entsanderkammer einen Schwellenwert unterschritt. Für die Auswertung standen Leitsystemdaten von August 2011 (d.h. ca. 9 Monate nach Inbetriebnahme) bis Oktober 2021 (Zeitpunkt der Auswertung vor dem Projektende) zur Verfügung. Für jede detektierte Spülung wurden die Ganglinien visuell beurteilt. Ein Ereignis wurde *nicht* als Spülung klassiert, wenn eines der folgenden Kriterien zutraf:

Entsander:

- die Pegel in beiden Kammern sind gleichzeitig abgesenkt.
- Kammern sind länger als zwei Stunden leer (Staubeckenspülung oder Revision).

Staubecken:

- Pegel ist kürzer als 30 Minuten oder länger als 24 Stunden abgesenkt (Revision)
- Grundablassschütz ist nicht geöffnet

Entsanderkammern und Staubecken:

- Fehlende/ungültige Messwerte
- Wasserspiegellagen und Durchfluss in der Druckleitung sind inkonsistent.



Ein Teil der Spülungen konnte durch Einträge im Betriebsjournal bestätigt werden; es wurden jedoch nicht alle Spülungen im Betriebsjournal eingetragen. Die Entsanderkammern wurden wie erwartet öfter gespült als das Staubecken. Wenn das Staubecken gespült wurde, wurden in der Regel auch die Kammern gespült, was aber aus den Betriebsdaten nicht immer ersichtlich war. Es ist also möglich, dass die Kammern einige Male mehr gespült wurden als aufgrund der Betriebsdaten detektiert werden konnte.

In Abbildung 40 sind die Anzahl Spülungen pro Monat in den Jahren von 2011 bis 2021 der beiden Entsanderkammern und des Staubeckens dargestellt (im ersten und letzten Jahr waren die Daten unvollständig). Die drei Diagramme bestätigen, dass vor allem im Sommer und vereinzelt bis im Herbst gespült wurde, wenn das Sedimentaufkommen aufgrund von Schneeschmelze, Regenereignissen und Gletscherschmelze erhöht ist. Im Winter und Frühjahr hingegen wurde praktisch nie gespült (Schneedecke bzw. Eis). Außerdem wurde in den untersuchten Jahren nicht gleich oft gespült. In der ersten Sedimentsaison (Daten ab August 2011) wurden keine Entsanderspülungen detektiert.

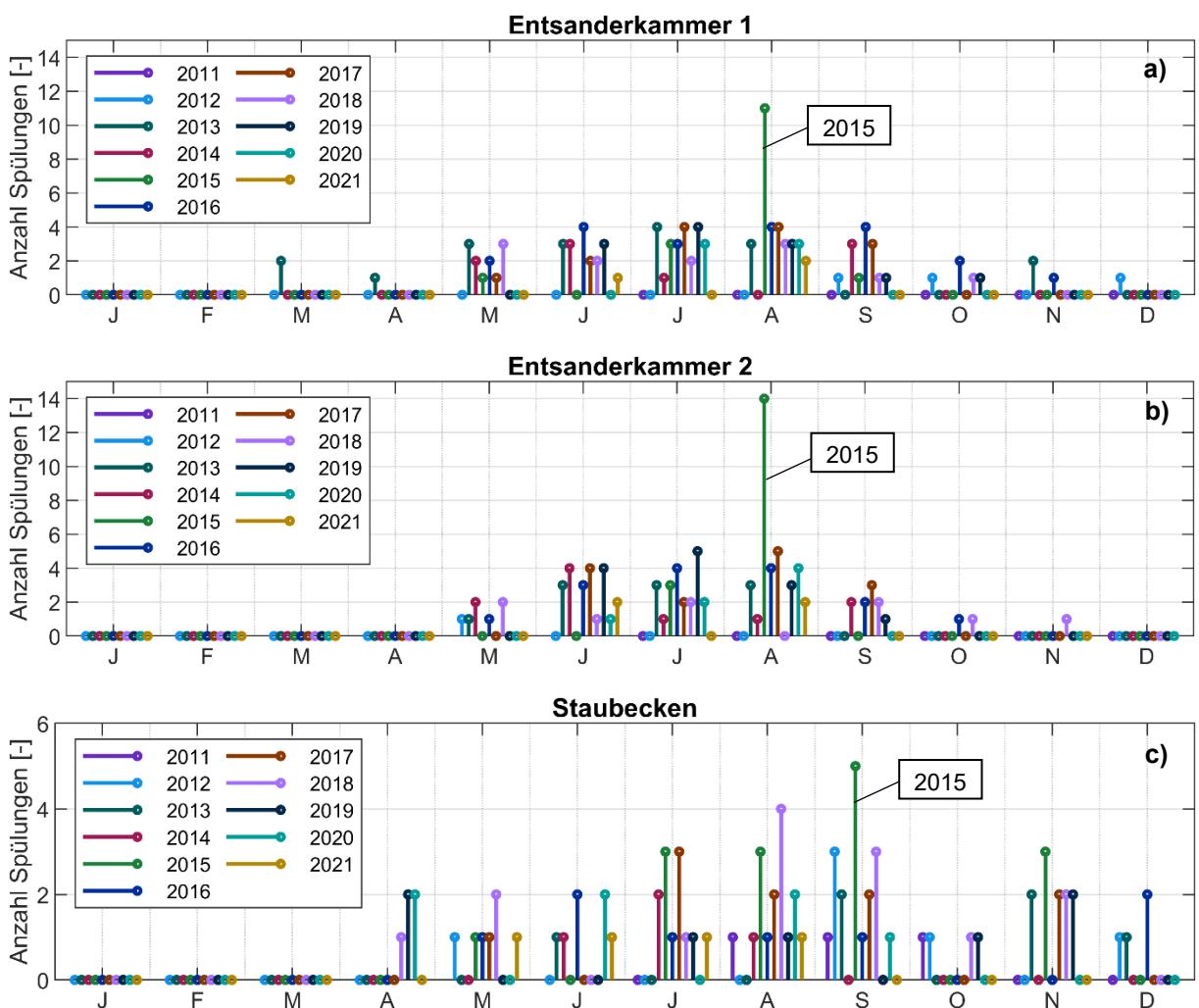


Abbildung 40: Anzahl Spülungen der Entsanderkammern (a und b) und des Staubeckens (c) pro Monat in den Jahren 2011 bis 2021.



Die Entsanderkammern und das Staubecken wurden im Sommer in der Regel bis viermal pro Monat (also im Schnitt maximal wöchentlich) gespült. Im Jahr 2015, mit einem Hochwasserereignis, wurden die Kammern ausnahmsweise bis 11- bzw. 14-mal pro Monat (im August) gespült.

Bezinge *et al.* (1989) berichten von bis zu 10 Entsanderspülungen pro Woche im Sommer in den Walliser Alpen. Laut Boes (2010) muss am KW Dorferbach, das unterstrom eines grossen Gletschers liegt, bei einem Entsander mit zwei parallelen Kammern, die abwechselungsweise gespült werden, zeitweise so oft gespült werden, dass ein Spülvorgang direkt auf den anderen folgt und bei noch starkerem Sedimentaufkommen das Kraftwerk ausser Betrieb genommen werden muss. Im Vergleich zu solch hochalpinen Verhältnissen sind also am KW Susasca deutlich weniger Spülungen erforderlich.

Die Spülung einer Entsanderkammer dauerte oft 15 bis 35 Minuten, die Spülung des Staubeckens oft 0.5 bis gegen 1.5 Stunden (Abbildung 41). Die Spülung einer Entsanderkammer dauert somit im Vergleich zu Spülsystemen, die keine Wasserspiegelabsenkung erfordern, relativ lange. Dies hat jedoch den Vorteil, dass die Sedimentkonzentrationen in der Restwasserstrecke weniger hoch ausfallen. Die Spülung des Staubeckens lässt sich kaum schneller durchführen, da das Erodieren der Ablagerungen eine gewisse Zeit erfordert.

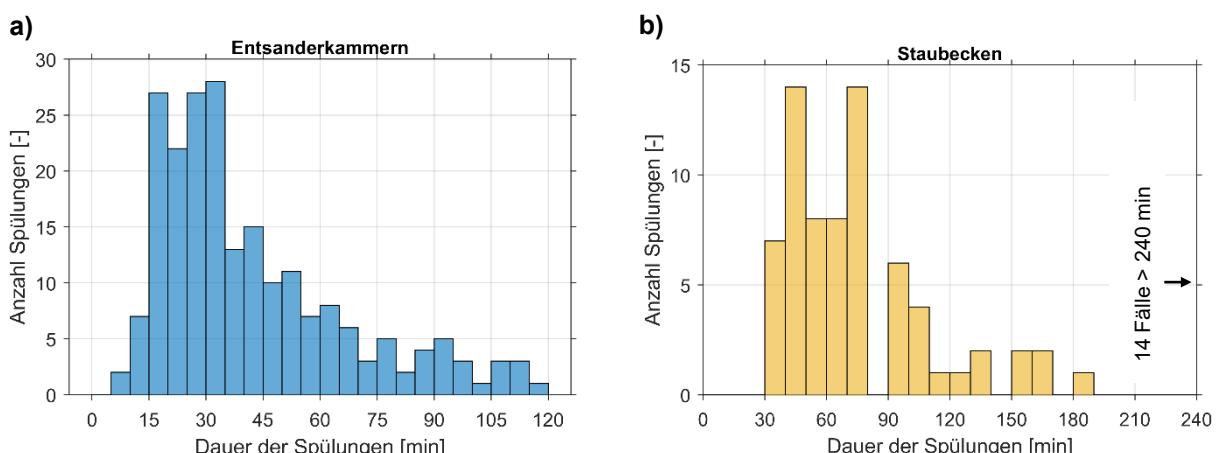


Abbildung 41: Verteilungen der Spüldauern von a) den Entsanderkammern und b) des Staubeckens in den Jahren 2011-2021.

6.1.2 Entsanderspülungen und Kraftwerksbetrieb

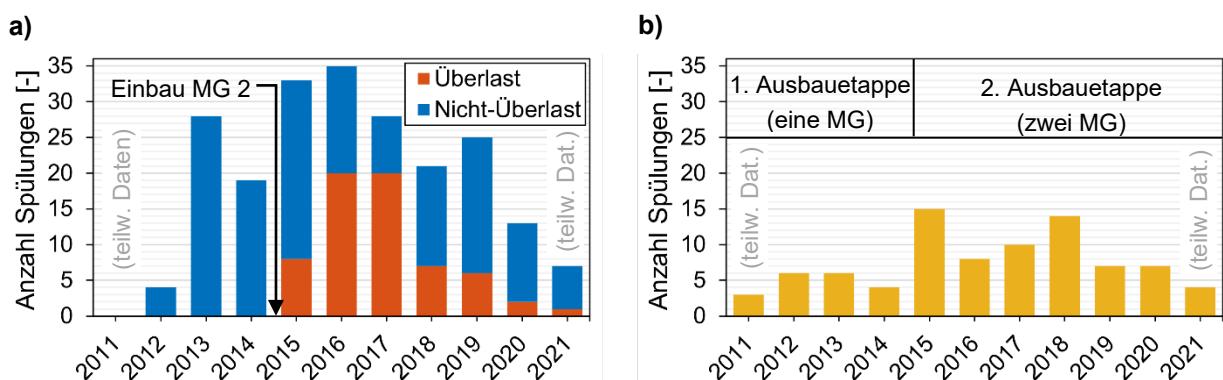
Um den Entsander mit dem vorhandenen Spülsystem nicht zu «überlasten», soll der Durchfluss in der Druckleitung während der Spülung einer der beiden Entsanderkammern maximal dem halben Bemessungsdurchfluss der Kraftwerksanlage entsprechen. Das heisst, dass der Turbinendurchfluss im Sommer während der Entsanderspülungen vorübergehend auf die Hälfte des Ausbaudurchflusses reduziert werden soll. Dafür waren regeltechnische und organisatorische Anpassungen erforderlich.

Um zu untersuchen, wie oft eine Entsanderkammer in den vergangenen Jahren mit Überlast betrieben worden war, wurde aufgrund der Leitsystemdaten der durchschnittliche Durchfluss in der Druckleitung während der Entsanderspülungen berechnet. Eine Spülung wurde als «mit Überlast» klassiert, wenn der Durchfluss in der Druckleitung während der Spülung im Mittel die Ausbaudurchfluss einer Kammer um 15 % überschritt.



Abbildung 42a zeigt die jährliche Anzahl der Entsanderkammer-Spülungen (Summe beider Kammern) der Jahre 2011 bis 2021 (wie bei den Beckenspülungen), unterteilt in «Überlast»- und «Nicht-Überlast»-Betrieb. In der ersten Ausbauetappe (bis 2014) bestand nur eine Maschinengruppe, während dem der Entsander schon zwei Kammern aufwies. Während der Spülung einer Kammer wurde also ihr Ausbaudurchfluss auch beim Vollastbetrieb der Kraftwerksanlage nicht überschritten. Ab 2015 hingegen konnte ein «Überlast»-Betrieb einer Entsanderkammer auftreten. In den Jahren 2016 und 2017 trat dies in mehr als der Hälfte der Fälle auf, etwa zehnmal pro Jahr in jeder Kammer. In den folgenden Jahren wurde der Überlastbetrieb durch eine angepasste Betriebsweise (Abschnitt 5.1.1) reduziert.

In Abbildung 42b sind die jährliche Anzahl der Staubeckenspülungen zum Vergleich mit jenen der beiden Entsanderkammern (Abbildung 42a) dargestellt. Die Anzahl der Staubeckenspülungen korreliert nicht genau mit der Anzahl der Entsanderspülungen. Mögliche Gründe für die Abweichungen sind unterschiedliche Anteile an gröberem und feinerem Sediment sowie diverse Anpassungen der Betriebsweise der Fassungsbauwerke.



Wenn die Entsanderkammern nicht mit Überlast gespült worden wären, hätte dies zu einem Mindererlös geführt, der wie folgt abgeschätzt wurde:

- Dauer der Spülung einer Kammer $\frac{1}{2}$ Stunde (konservative Annahme)
- Halbe Kraftwerksleistung ca. 3 MW (konservative Annahme)
- Minderproduktion 1.5 MWh/Spülung einer Kammer
- Mindererlös (mit Annahme 120 CHF/MWh) 180 CHF pro Spülung einer Kammer

Mit $8 + 20 + 20 + 7 + 6 + 2 + 1 = 64$ Spülungen bei Überlast in den Jahren 2015 bis 2021 gemäss Abbildung 42a entspricht dies einem Mindererlös von 11.5 kCHF in den 7 Jahren, also 1.6 kCHF/Jahr im Mittel, oder 3.6 kCHF/Jahr in den Jahren 2016 und 2017 mit den meisten Überlast-Spülungen.

Um zu beurteilen, ob das Vermeiden des Überlastbetriebs des Entanders wirtschaftlich ist, ist der obige Mindererlös den vermiedenen abrasionsbedingten Turbinenkosten gegenüberzustellen. Letztere sind aber aus den folgenden Gründen schwierig abzuschätzen:

- Es ist nicht bekannt, welche Sedimentmasse hätte vermieden werden können (tatsächliche Höhe und Partikelgrößen der Sedimentablagerungen in den Kammern).
- Die Auswirkungen des Überlastbetriebs lassen sich an den Turbinen nicht gesondert beobachten; daher wären rechnerische Abschätzungen der zusätzlichen Abrasion erforderlich.



- Gröbere Partikel, die während Resuspensionseignissen ins Triebwasser gelangen können, verursachen eine höhere Abrasion. Der Einfluss der Partikelgrösse auf die Abrasionsrate ist in der Forschung aber nicht abschliessend geklärt: Während im IEC-Abrasionsmodell vereinfachend von einem linearen Einfluss ausgegangen wird (k_{size} in Abschnitt 3.1.1), geben DWA (2006) allgemein bzw. Winkler *et al.* (2011) spezifisch für unbeschichtete Peltonmittelschneiden an, dass Partikel mit Durchmessern > 20 µm bzw. > 80 µm deutlich abrasiver sind. Bei hartbeschichteten Laufrädern verursachen gröbere Partikel wie Mittelsand vermutlich noch grössere Abrasionsschäden als bei unbeschichteten Laufrädern.
- Es wird davon ausgegangen, dass es wirtschaftlich ist, Mindererlöse in der Grössenordnung von wenigen kCHF/Jahr gemäss obenstehender Abschätzung in Kauf zu nehmen, um das Risiko einer zusätzlichen Belastung der Turbinen durch Partikel, die größer sein können als das übliche Bemessungskorn von Entsandern von Hochdruck-Wasserkraftanlagen, und entsprechende Folgekosten zu vermeiden. Mit dem Vermeiden des Überlastbetriebs wird die mögliche Sedimentabscheidewirkung der Entsanders bestmöglich genutzt, was zur Amortisation der baulichen Investition in den Entsander beiträgt.

6.1.3 Ablagerungsprofile in den Entsanderkammern

Für die Platzierung von Sedimentniveausonden und die Abschätzung von gespülten Sedimentvolumina ist die Verteilung der Sedimentablagerungshöhe entlang der Entsanderkammern relevant.

Abbildung 43 zeigt eine der wenigen in der Literatur auffindbaren diesbezüglichen Informationen. Die Ablagerungsprofile A, B und C wurden bei 72 %, 89 % und 98 % des Ausbaudurchflusses in einem älteren Entsander an einem Gebirgsbach (ohne Beruhigungsrechen) im Anschluss an ein Tirolerwehr aufgenommen. Demnach sind bei Ausbaudurchfluss (Kurve C) die höchsten Ablagerungen bei einem Viertel der Beckenlänge (0.25 L) zu erwarten. Dies konnte im vorliegenden Fall vor einer Spülung am 09.07.2019 (vor Anpassung der Beruhigungsrechen) auch beobachtet werden.

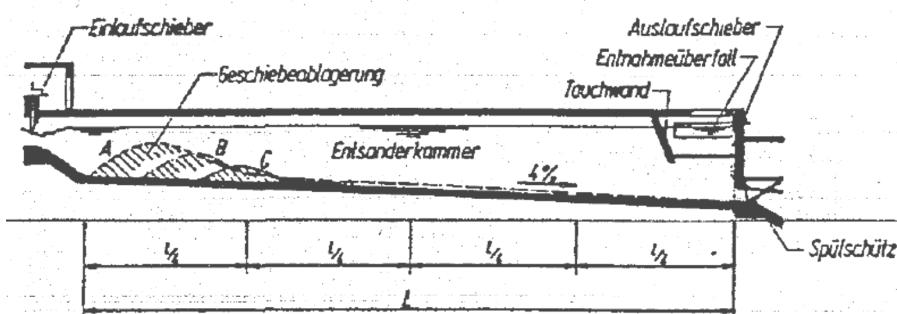


Abbildung 43: Sedimentablagerungen in Entsanderkammer am Pitzbach (gemäss Hofer 1979 / TIWAG, in Drobir 1981)

Weiter gibt Hofer (1987) ein Beispiel eines Ablagerungsprofiles mit einem Hochpunkt bei ca. 0.13 L aus dem Entsander am Pitzbach, einem Gebirgsbach mit hoher Sedimentfracht im Ötztal. Die Ablagerungsprofile und die relative Lage ihres Hochpunkts variiert u.a. je nach Anlagenentwurf, dem Durchfluss im Vergleich zum Ausbaudurchfluss, der Partikelgrösse und den Spülungen.

Im Entsander des KW Susasca wurden im Mai bis Juni mit erhöhten Abflüssen während der Schneeschmelze eher gröbere Partikel (Kies und Grobsand) beobachtet, ab Ende Juli und im August mit Gletscherschmelze hingegen feineres Material (Mittelsand). In Phasen, in denen der Durchfluss den Ausbauwert nicht erreicht und noch ein gewisser Sedimenttransport stattfindet (Herbst und Spätherbst), können sich auch geringere Mengen an Partikeln, die feiner sind als das Bemessungskorn (0.3 mm), im Entsander absetzen (zuweilen kohäsive Ablagerungen, mit viel Lärchennadeln).



Während sich grobe Partikel nahe des Kammerbeginns absetzen, lagern sich feinere Partikel gleichmässiger über die Kammlänge ab. Die grössten Partikel werden bei Sohlentnahmen (Tirolerwehre) ohne vorgeschalteten Entkieser erwartet. Im vorliegenden Fall ist die maximale Partikelgrösse durch den Fischschutzrechen auf 15 mm beschränkt. In der Regel wird deutlich feineres Material in Suspension in die Kammern eingetragen, ausser wenn die Sedimentablagerungen im Staubecken bei Hochwasser oder überfälliger Beckenspülung die Kragschwelle erreichen bzw. überschreiten und im in der Susasca Kies transportiert wird. Im Gegensatz zu Entsanderkammer 2 ist dies bei Kammer 1 (bergseitig) eher der Fall, da sich deren Einlauf weiter weg vom Grundablass des Staubeckens und oberstrom der eigentlichen Spülgasse befindet, was das Freihalten der Kragschwelle erschwert.

Am KW Susasca wurden fünfmal die Sedimentablagerungshöhen in den Achsen beiden Entsanderkammern mittels Loten (Absenken eines Gewichts an einem Massband, oder mit Stangen) bestimmt, als VAW-Mitarbeiter auch wegen anderen Messungen vor Ort waren:

- am 27.05., 06.08. und 24.8.2020, d.h. vor Anpassung der Beruhigungsrechen, und
- am 17.06. und 26.07.2021, d.h. nach Anpassung der Beruhigungsrechen

Bei zwei Messungen waren die Ablagerungen wegen geringem Sedimentaufkommen seit der vorhergehenden Spülung unbedeutend (<0.1 m). Am 26.07.2021 war die Ablagerung am Anfang der Kammer 1 etwa 0.5 m hoch und nahm zum Kammerende hin auf 0.1 m ab. Die Resultate der zwei anderen Messungen, mit bedeutenden Ablagerungen, sind in Abbildung 44 für Kammer 1 dargestellt. In dieser Kammer wurden höhere Sedimentablagerungen gemessen, vermutlich wegen der bereits erwähnten grösseren Distanz ihres Einlaufs zum Grundablass des Staubeckens. Vor der Anpassung der Beruhigungsrechen lag der Hochpunkt der Ablagerungen wie aufgrund der Literatur erwartet bei ca. 0.25 L, danach näher am Kammeranfang bzw. unmittelbar im Anschluss an den dritten Beruhigungsrechen.

Bei der Messung vom 17.06.2021, also nach Anpassung der Beruhigungsrechen und mit den Sedimentniveausonden noch nicht in derselben Lage wie am Projektende, waren die Ablagerungen bis 2.2 m hoch. Im darüber verbleibenden Abflussquerschnitt mit einer Wassertiefe von nur 0.9 m nahm die mittlere Fliessgeschwindigkeit bei Ausbaudurchfluss auf etwa 0.5 m/s zu. Dies ist deutlich höher als die sonst üblichen rund 0.2 m/s im vollen Kammerquerschnitt. Durch diese Strömungsbeschleunigung und die verstärkte Turbulenz nach der Engstelle wird die Absetzleistung des Entsanders stark reduziert. Die maximale Höhe des Sedimenthaufens stellt sich aufgrund eines Gleichgewichts zwischen Sedimentation und Erosion ein. Bei andauernd hohem Durchfluss und weniger Sedimentzufuhr kann der Haufen auch ohne Spülung teilweise abgetragen bzw. etwas in Fliessrichtung verfrachtet werden.

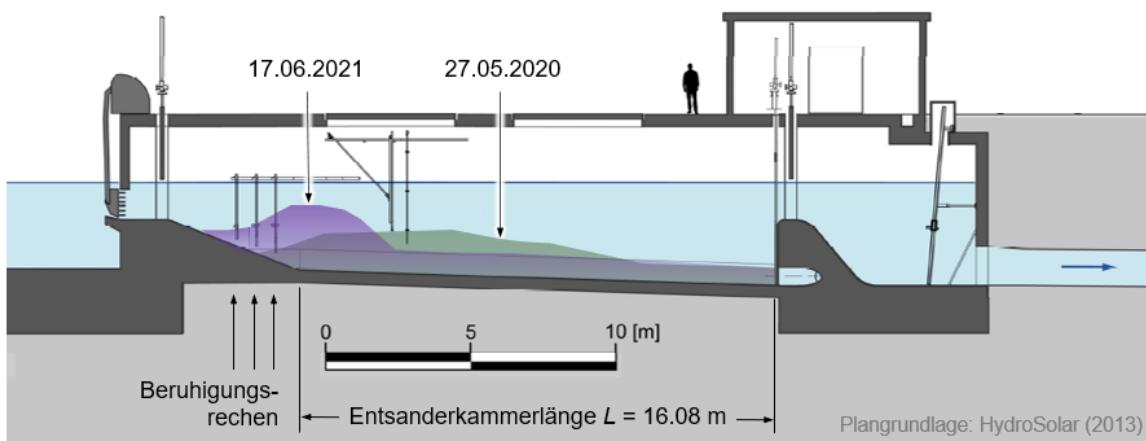


Abbildung 44: Gemessene Längsprofile der Sedimentablagerungshöhen in der Entsanderkammer 1 (bergseitige Kammer).



Mit den USNS und VSNS in den dargestellten Lagen (vom Nov. 2020 bis Nov. 2021), angepassten Beruhigungsrechen und offenbar hoher Kies- und Sandzufuhr wurde der Bedarf für Entsanderspülungen zu spät detektiert. Um den Bedarf an Spülungen wie geplant ab einer Ablagerungshöhe von 1.0 m anzudecken, wurden die USNS und VSNS am Projektende weiter in Richtung des Kammeranfangs verschoben (Abschnitt 5.1.4).

6.1.4 Fliessgeschwindigkeiten in den Entsanderkammern

Da die Abflussbedingungen während der Messkampagne im Juli 2021 (nach Verlängerung der Beruhigungsrechen) mit jenen vom Juli 2019 übereinstimmen (beide Kammern wurden bei Vollastbetrieb untersucht), werden im Folgenden diese Messdaten für die Erfolgskontrolle der Beruhigungsrechenverlängerung verglichen.

Abbildung 45 zeigt die Verteilung und Grösse der Fliessgeschwindigkeiten in Längsrichtung v_x in der Entsanderkammer 1 in den Schnitten 1, 3 und 5 (Abbildung 17), jeweils für die Messkampagne vom Juli 2019 (oben) und Juli 2021 (unten). Wie erwähnt, konnte im Schnitt 1 im Jahr 2021 aufgrund zusätzlicher Einbauten nur über eine reduzierte Breite gemessen werden. Die nachfolgenden Erkenntnisse aufgrund der hier dargestellten Resultate für die Entsanderkammer 1 sind auch für die Kammer 2 gültig.

Im Juli 2019, vor Verlängerung der Beruhigungsrechen, waren die Fliessgeschwindigkeiten sehr ungleichmässig verteilt und betrugen in Sohlennähe bis 0.6 m/s im Schnitt 1 wenige Meter unterstrom der Beruhigungsrechen (Abbildung 45a). Auch im Schnitt 5 (gegen das Beckenende) floss das Wasser in Sohlennähe mit einer erhöhten Geschwindigkeit von 0.3 m/s. Bei erhöhten Geschwindigkeiten können auch gröbere Partikel in Schwebefluss bleiben oder wieder aufgewirbelt (resuspendiert) werden.

Diese sohlennahe Strömungskonzentration (Tauchstrahl) entstand dadurch, dass zwischen der Sohle und der Unterkante der Beruhigungsrechen am Kammerreinlauf ein vertikaler Abstand von ca. 0.3 m vorhanden war. In diesem Bereich war der Fliesswiderstand geringer als im Bereich mit den vertikalen Rechenstäben. Auf Grund dieser Erkenntnisse erfolgte die in Abschnitt 5.1.3 beschriebene Verlängerung der Beruhigungsrechen.

Im Vergleich dazu sind die Geschwindigkeitsfelder nach Verlängerung der Beruhigungsrechen deutlich gleichmässiger und die Fliessgeschwindigkeiten geringer (Abbildung 45b). Die maximale Geschwindigkeit liegt im Schnitt 1 bei rund 0.3 m/s und sinkt im Schnitt 5 auf rund 0.2 m/s ab. Dies liegt im Bereich der für Entsander typischen mittleren Fliessgeschwindigkeiten um 0.2 m/s.

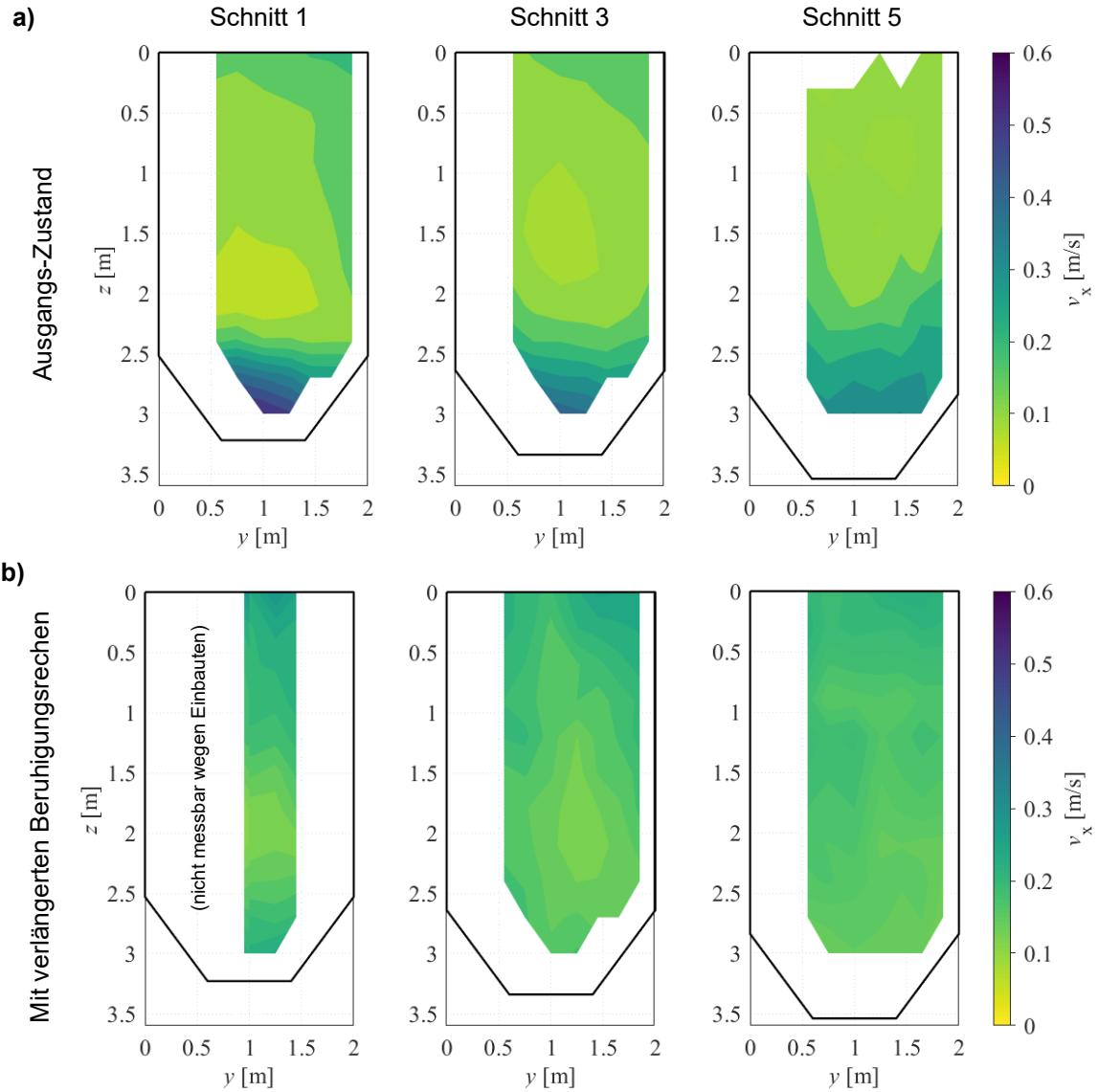


Abbildung 45: Fliessgeschwindigkeiten in Längsrichtung v_x in der Entsanderkammer 1 im Schnitt 1, 3 und 5 jeweils bei Ausbaudurchfluss während der Messkampagne vom a) Juli 2019 (Ausgangs-Zustand) und b) Juli 2021 (nach Verlängerung der Beruhigungsrechen).

Abbildung 46 zeigt die über die Breite gemittelten Fliessgeschwindigkeiten in Längsrichtung v_x in der Entsanderkammer 1 in den Schnitten 1 bis 5, jeweils für die Messkampagne vom Juli 2019 (Ausgangs-Zustand) und Juli 2021 (mit verlängerten Beruhigungsrechen). Der horizontale Abstand von der Schnittlinie bis zum jeweiligen Punkt des Fliessgeschwindigkeitsprofils zeigt die Grösse der Fliessgeschwindigkeit in Längsrichtung (siehe auch Farben an der Skala rechts).

Wiederum ist zu sehen, dass die Verlängerung der Beruhigungsrechen zu einer gleichmässigeren Strömung und zu tieferen maximalen Fliessgeschwindigkeiten in der Entsanderkammer führte und dass insbesondere der ausgeprägte Tauchstrahl nicht mehr vorhanden ist.

Ein möglicher Grund für die leichte Zunahme der Längs-Fliessgeschwindigkeit zum Wasserspiegel hin in den Messungen von 2021 ist, dass die Beruhigungsrechen im Sommer leicht überströmt werden,

weil der Betriebswasserspiegel im Sommer etwas höher liegt als beim Entwurf der Beruhigungsrechen vorgesehen. Es wird davon ausgegangen, dass dies keine weiteren Massnahmen erfordert.

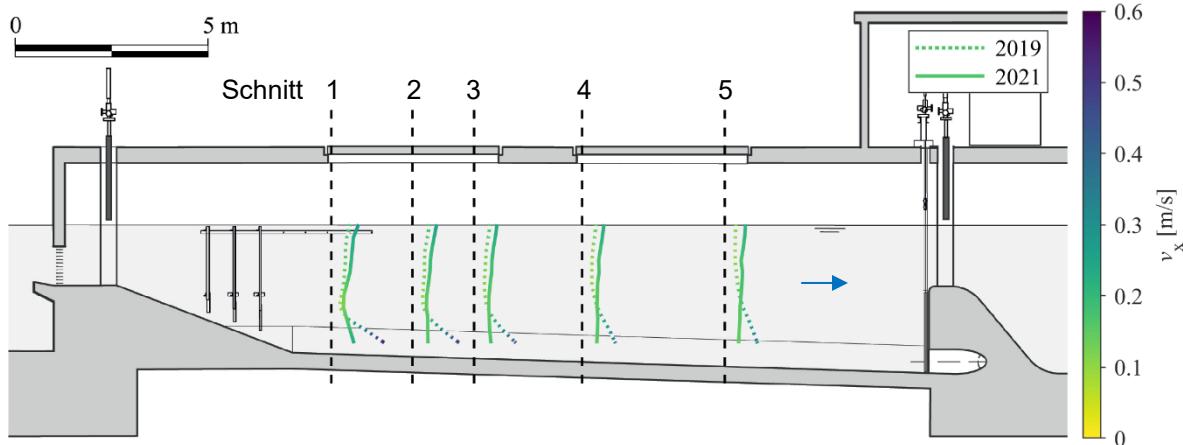


Abbildung 46: Fliessgeschwindigkeiten in Längsrichtung v_x in der Entsanderkammer 1 in den Schnitten 1 bis 5 jeweils bei Ausbau-durchfluss während der Messkampagne vom Juli 2019 (Ausgangs-Zustand) und Juli 2021 (mit verlängerten Beruhigungsrechen).

Die Auswertung der Geschwindigkeitsmessdaten zeigt zudem, dass der Durchfluss in beiden Entsanderkammern – wie bei der Projektierung vorgesehen – ähnlich ist ($\pm 10\%$). Die Anströmsituation verursacht also in den beiden untersuchten Zuständen keine signifikanten Unterschiede im Durchfluss.

Neben den Fliessgeschwindigkeiten in Längsrichtung, wurden auch jeweils jene in Querrichtung und vertikaler Richtung erfasst und zwischen den Messkampagnen verglichen. Durch die Verlängerung der Beruhigungsrechen ergeben sich diesbezüglich keine signifikanten Änderungen und es treten weiterhin keine starken Quer- und Vertikalströmungen auf. Dies gilt ebenfalls für die Entsanderkammer 2.

Aufgrund der gleichmässigeren Strömungsverteilung mit der damit einhergehenden Reduktion der maximalen Fliessgeschwindigkeiten und der verringerten Turbulenzen ist zu erwarten, dass mit der Verlängerung der Beruhigungsrechen die Sedimentation begünstigt, allfällige Resuspension reduziert und somit die Sedimentabscheide-Effizienz des Entanders gesteigert wird.

Nach der Verlängerung der Beruhigungsrechen wurde im Sommerhalbjahr 2021 beobachtet, dass sich der Hochpunkt der Sedimentablagerungen näher zum Kammeranfang verschob. Dies bedeutet, dass die Strömung bereits auf kürzerer Strecke nach dem Einlauf so beruhigt ist, dass sich Sedimentpartikel, die vom Staubecken in die Kammern gelangen, absetzen können. Mit der Verlängerung der Beruhigungsrechen nahm also die für den Absetzvorgang wirksame Kammlänge zu.

Während Entanderspülungen im Juli 2021 wurde beobachtet, dass sich die ausgeführte Verlängerung der Beruhigungsrechen nicht negativ auf die Spülbarkeit des Entanders auswirkt.



6.1.5 Schwebstoffkonzentrationsverteilung in Entsanderkammern

Während der ersten und dritten Fliessgeschwindigkeits-Messkampagne am Entsander wurden am Anfang und gegen Ende der Entsanderkammer 2 auf verschiedenen Tiefen Wasserproben entnommen (Abbildung 47). Da es sich bei den Proben der ersten Messkampagne um fast klares Wasser handelte, wurde von diesen Proben der beiden Kampagnen im Labor die SSC mittels Filtrieren (statt Verdampfen des Wassers) und Wägen bestimmt. Weiter wurde die SSC vor dem Druckleitungseinlauf zu den entsprechenden Zeitpunkten aufgrund der Messwerte der dort installierten Trübungssonde und deren Umrechnungsbeziehung (Abbildung 52) bestimmt.

Bei der ersten Entsander-Messkampagne war das Wasser recht klar mit geringer SSC (< 0.014 g/l). Mit den offenbar sehr feinen Partikeln nahm die SSC vom Beginn der Entsanderkammer bis zum Einlauf in die Druckleitung nicht ab; die Messunsicherheit beträgt wenige mg/l (Abbildung 47a).

Bei der dritten Entsander-Messkampagne (Abbildung 47b), mit Regen, waren die SSC deutlich höher als bei der ersten, insbesondere nahe der Sohle am Einlauf. Wie erwartet nahm die SSC mit der Wassertiefe zu und über die Entsanderlänge ab. Für die Bestimmung der mittleren Abscheide-Effizienz des Entsanders über die Schwebstoffaison wären weitere SSC-Messungen über die Wassertiefe und vor allem zu weiteren Zeitpunkten mit ausgeprägtem Sedimentaufkommen wünschenswert.

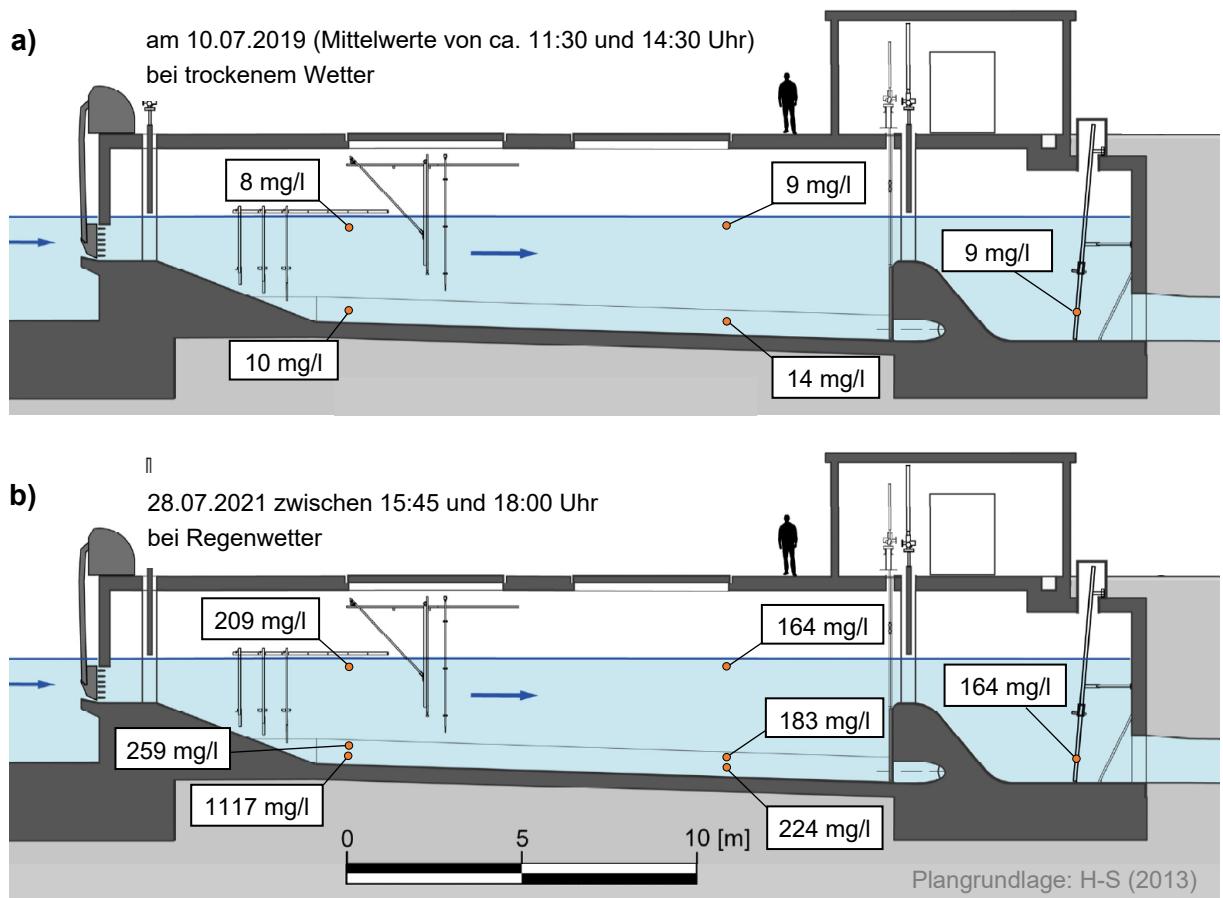


Abbildung 47: Verteilung der Schwebstoffkonzentration SSC gemäss Wasserproben aus der Entsanderkammer 2 und basierend auf Trübungsmessung in der Entnahmekammer zu zwei Zeitpunkten ohne und mit Regen.

6.2 Schwebstoffbelastung

6.2.1 Mineralogische Zusammensetzung und Partikelhärte

In Tabelle 6 und Abbildung 48 sind die Resultate der mineralogischen Untersuchung von drei Feinsedimentproben aus dem Triebwasser des KW Susasca vom Sommer 2020 zusammengestellt. Die Mineralien sind nach ihrer Mohshärte geordnet. Chlorit und Muskovit sind Glimmerarten; Plagioklas ist eine Art von Feldspat. Der organische Anteil wurde nicht ermittelt, wird aber als klein eingeschätzt. Die Proben weisen eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung auf.

Tabelle 6: Mineralogische Zusammensetzung der Sedimentproben vom KW Susasca (Institut für Geotechnik, ETH Zürich, März 2021)

Mineral (Mohshärte)	Massenanteil [%]				
	Einzelproben			Gesamt	
	31.07.2020	11.08.2020	29.08.2020	Mittelw.	Stdabw.
Smektit (1)	-	-	5.2	5	-
Chlorit (2-2.5)	18	13	13.1	15	3
Illit (2)	8.4	5.7	5.0	6	2
Muskovit (2-3)	15.2	12.8	16.4	15	2
Calcit (3)	1.8	0.6	0.5	1	1
Fluorapatit (5)	1.4	0.6	0.6	1	0
Hornblende (5.5-6)	7.4	8.2	6.8	7	1
Kalifeldspat (6)	15.4	13.6	12.2	14	2
Plagioklas (6-6.5)	16.4	22.4	20.1	20	3
Quarz (7)	16	23.1	20.1	20	4
Massenanteil mit Mohshärte > 4.5	57	68	60	61	6
Massenanteil mit Mohshärte > 6.5	16	23	20	20	4

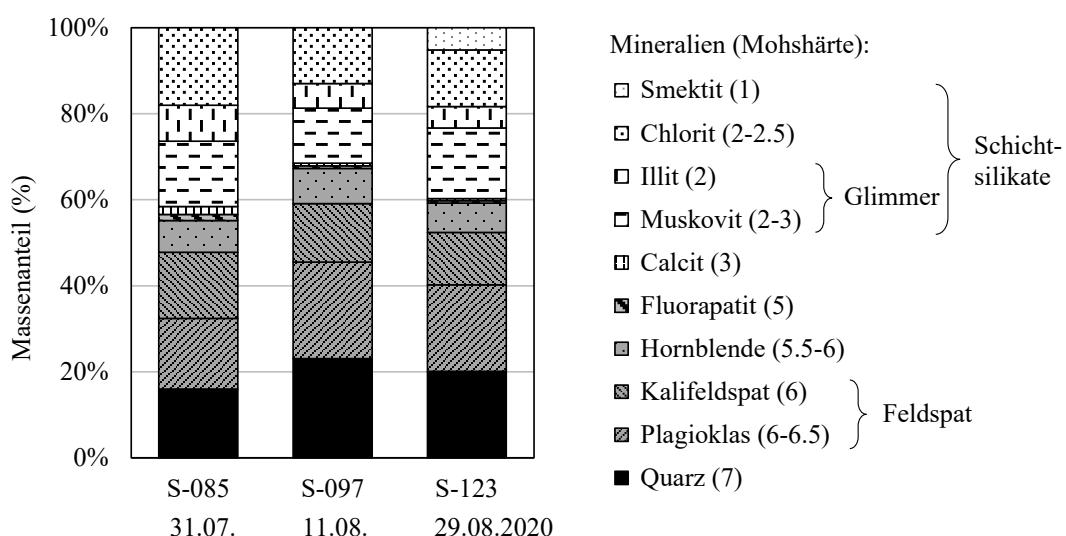


Abbildung 48: Mineralogische Zusammensetzung der Schwebstoffpartikel aus dem Triebwasser des KW Susasca. Die grauen bzw. schwarzen Füllflächen stehen für Mineralien mit Mohshärte > 4.5 bzw. > 6.5, die für unbeschichtete bzw. beschichtete Turbinenbauteile abrasiv sind (Institut für Geotechnik, ETH Zürich)



Gemäss Uetz (1986, in Ortmanns 2006) verursachen diejenigen Partikel nennenswerten Verschleiss, die härter sind als das Material, das deren Schleif- und Anprallwirkung ausgesetzt ist. Gängigen Turbinenmaterialien werden üblicherweise die folgenden Mohshärten zugeordnet:

- Martensitischer Turbinenstahl (13 % Chrom, 4 % Nickel): Mohshärte 4.5
- Hartbeschichtung (Wolframkarbid in Kobalt-Chrom-Matrix): Mohshärte 6.5

In Abbildung 48 sind die entsprechenden Massenanteile der abrasiven Mineralien durch graue und schwarze Füllflächen gekennzeichnet. Der Massenanteil mit Mohshärte > 4.5 (Quarz, Feldspat und Hornblende, schwarz und grau) beträgt im Mittel über die drei Proben 61 %, während dies für Mohshärte > 6.5 (Quarz, schwarz) 20 % sind. Für das Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2019) ergeben sich somit $k_{\text{hardness}} = 0.61$ für **unbeschichtete** und $k_{\text{hardness}} = 0.20$ für **beschichtete** Turbinenbauteile.

Ein Wert von $k_{\text{hardness}} = 0.61$ für unbeschichtete Turbinenbauteile liegt im Vergleich zu anderen Kraftwerken in den Zentralalpen im unteren Bereich (nach Härte geordnet):

- Mörel, Wallis, CH (Krause & Grein 1996 in Felix 2017): $k_{\text{hardness}} = 0.65$
- Stalden, Wallis, CH (Krause & Grein 1996 in Felix 2017): $k_{\text{hardness}} = 0.70$
- Fieschertal, Wallis, CH (Felix 2017): $k_{\text{hardness}} = 0.75$
- Zermatt, Wallis, CH (Krause & Grein 1996, in Felix 2017): $k_{\text{hardness}} = 0.76$
- Bitsch, Wallis, CH (Krause & Grein 1996, in Felix 2017): $k_{\text{hardness}} = 0.80$

Das heisst, die Partikel aus dem Einzugsgebiet des KW Susasca sind nicht als ausserordentlich abrasiv zu bezeichnen, aber dennoch typisch für Verhältnisse in den Zentralalpen (nicht Voralpen mit Kalk).

6.2.2 Partikelform

Abbildung 49 zeigt zwei Beispiele von Mikroskop-Bildern von gröberen und feineren Partikeln aus dem Triebwasser des KW Susasca im Sommer. Rechts unten an jedem Bild ist eine Grössenreferenz angegeben. Die gröberen Partikel (Feinsand) sind wie erwartet kleiner als das typische Bemessungskorn des Entsanders (300 µm). Die feineren Partikel liegen im Größenbereich von Silt (<63 µm). Weitere Mikroskop-Bilder sind in Anhang A1 enthalten.

Bei plättchenförmigen Partikeln handelt es sich typischerweise um Glimmer (Schichtsilikate), welche aufgrund ihrer geringen Härte (Mohshärte < 3) nicht abrasiv und deshalb nicht massgebend sind.

Durch visuellen Vergleich der Formen der nicht-plättchenförmigen Partikel im vorliegenden Fall und den Abbildungen in Anhang D der IEC 62364 (2019) werden die Partikel als kantig bzw. eckig klassifiziert. Daraus folgt $k_{\text{shape}} = 2.0$ für das IEC-Abrasionsmodell. Nicht gerundete Partikel sind typisch für das Gebirge, da die Sedimentpartikel seit ihrer Erosion lediglich über relativ kurze Strecken transportiert wurden.

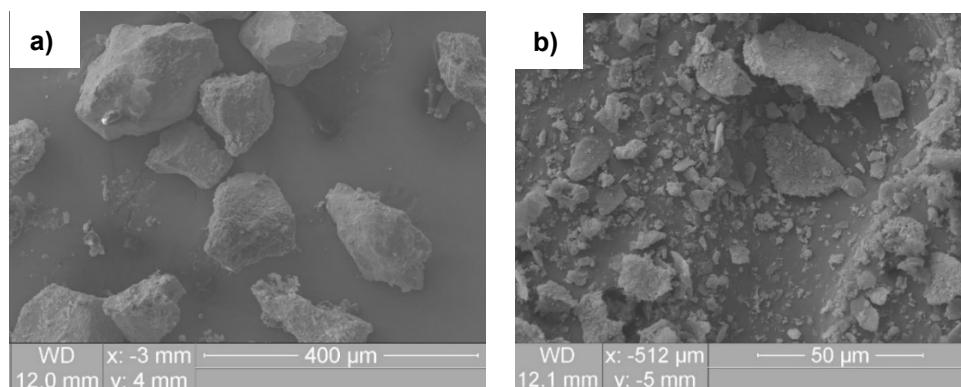


Abbildung 49: Elektronenmikroskop-Bilder von Partikeln aus dem Triebwasser a) Feinsand vom 01.07.2020 um 20:05 Uhr (bei 0.10 g/l, Probe S-069b) und b) Silt vom 31.07.2020 um 17:34 Uhr (bei 0.37 g/l, Probe S-084, starker vergrössert) (IfB, ETH Zürich).



6.2.3 Wasserproben

Abbildung 50 zeigt die im Labor mit der Wägemethode bestimmten SSC von 198 Wasserproben, welche während der Schwebstofftransportsaison der Jahre 2019 bis 2021 vom Einlauf in die Druckleitung mit dem automatischen Probenehmer entnommen wurden. Die Probenahme wurde nach einem festen Zeitintervall (5 Tage) sowie beim Überschreiten von drei Schwellenwerten der an der Probenahmestelle gemessenen Trübung (300 bis 500 je nach Saison, 1000 und 3000 FNU) ausgelöst.

Bei vielen Proben lag die SSC unter 0.2 g/l. Während Niederschlagsereignissen vor allem im August wurden hohe Werte bis 5.5 g/l gemessen. Da die SSC an einem Bergbach wie der Susasca innert Stunden oder sogar Minuten stark ändern kann, sind 50 bis 70 Proben pro Jahr ungenügend, um die SSC verlässlich zu erfassen und es sind kontinuierliche Messmethoden erforderlich.

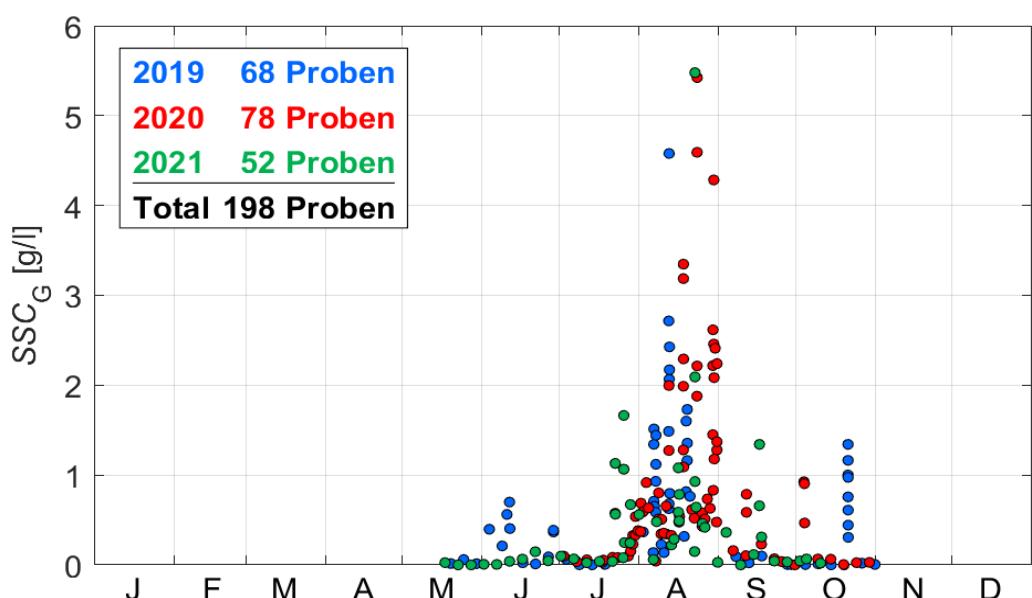


Abbildung 50: Schwebstoffkonzentration SSC_G am Einlauf in die Druckleitung des KW Susasca gemäss Laboranalysen von Wasserproben mit der Wägemethode (gravimetrische SSC).

Abbildung 51 zeigt ein Beispiel einer Serie von 24 Wasserproben vom August 2020 mit starker Wassertrübung während Regenereignissen.



Abbildung 51: Serie von 24 Wasserproben aus dem Triebwasser des KW Susasca vom 06.-22.08.2020 (aus der Entnamekammer gepumpt, Feinsedimentpartikel durch Schütteln resuspendiert; Foto: VAW).



6.2.4 SSC von den Messwerten der Trübungssonden

In Abbildung 52 sind die Referenz-SSC von den Wasserproben über die drei Jahre den gleichzeitig in der Entnahmekammer gemessenen Trübungswerten gegenübergestellt. Das Verhältnis der beiden Größen, d.h. die Steigung einer Geraden aus dem Ursprung, wird auch als spezifische Trübung bezeichnet und hängt nebst der Partikelform vor allem von den Partikelgrößen ab. Die Streuung der Messpunkte wird daher vor allem der Variation der Partikelgrößen im Lauf der Zeit zugeschrieben. Trübungssonden sind am empfindlichsten auf die feinsten Partikel, weil diese die grösste spezifische Querschnittsfläche haben. Wenn nebst Silt zusätzlich Sandpartikel im Wasser vorhanden sind, nimmt die Trübung kaum zu. Bei breiten Partikelgrößenverteilungen oder bi-modalen Mischungen, die bei natürlichen Schwebstoffen vorkommen, ist die spezifische Trübung daher nicht alleine vom Median-Partikeldurchmesser d_{50} abhängig.

Eine lineare Regression über alle Punkte ergab eine spezifische Trübung von 756 FNU je g/l. Für die Schwebstoffe am KW Fieschertal (Granit und Gneiss der Zentralalpen) ermittelte Felix (2017) im Mittel ca. 600 FNU je g/l für vorwiegend Mittelsiltpartikel, wobei für Grobsilt tiefere Werte (200 FNU je g/l) und für Mittel- bis Feinsilt höhere Werte (bis 200 FNU je g/l) vorkamen. Die spezifischen Trübungen am KW Susasca liegen also in einem ähnlichen Bereich wie am KW Fieschertal.

Die Farbe der Punkte gibt den Monat im Jahr an. Die violetten Punkte liegen unterhalb der Ausgleichsgeraden und deuten so auf leicht gröbere Partikel im Oktober hin. Nebst dieser Tendenz ist keine klare Saisonalität der Partikelgröße zu erkennen. In anderen Einzugsgebieten mit grösserem Gletscheranteil wurden z.B. während der Gletscherschmelze tendenziell feinere Partikel, die unter dem Gletscher erodiert werden, gemessen als während der Schneeschmelze.

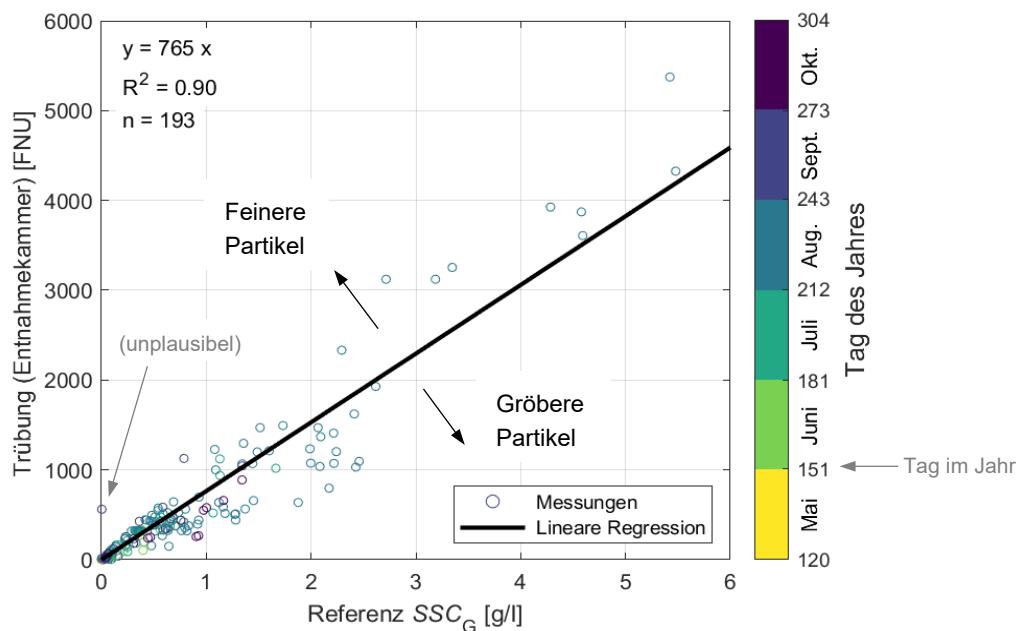


Abbildung 52: Messwerte der Trübungssonde in der Entnahmekammer des KW Susasca in Funktion der Referenz-SSC von den Wasserproben 2019-2021, mit linearer Regression für Umrechnungsbeziehung (über alle Punkte, im Mittel über die Schwebstoffssaison).

Die Ganglinien der gemessenen Trübungen wurden mit der Umrechnungsbeziehung gemäss Abbildung 52 in SSC umgerechnet. Da keine Wasserproben aus dem Staubecken entnommen wurden, wurde diese Umrechnungsbeziehung, die von der Messstelle in der Entnahmekammer stammt, auch für die Trübungssonde am Staubecken verwendet.

6.2.5 SSC von den Messwerten des akustischen Sensors

In Analogie zu Abbildung 52 zeigt Abbildung 53 die Referenz-SSC im Vergleich zu den Messwerten des akustischen SSC-Sensors (*LISST-ABS*). Diese Messwerte beziehen sich auf eine standardisierte Partikel sorte (Glaskügelchen mit einem Durchmesser zwischen 63 und 90 µm), die im Labor des Sensorherstellers bei der Kalibrierung des Sensors verwendet wurde.

Die Messpunkte des akustischen SSC-Sensors streuen deutlich stärker als diejenigen der Trübungssonde. Der Hersteller des akustischen Sensors wählte dessen Frequenz (8 MHz) so, dass der Sensor Feinsand zwischen 100 und 200 µm am besten detektiert (Agrawal *et al.* 2016). Mit Einkornmaterial nimmt die Sensitivität sowohl für feinere und gröbere Partikel ab. Die Sensitivität sollte laut Hersteller weniger stark variieren als bei einer Trübungssonde. Die stärkere Streuung der Punkte des akustischen Sensors deutet darauf hin, dass der Feinsand-Anteil mehr variierte als die Konzentration der feinen Partikel, welche von der Trübungssonde vorwiegend gemessen wird.

Die violetten Punkte (Oktober) bilden wiederum eine Gruppe. Eine ähnliche Gruppe oberhalb der Ausgleichsgeraden bilden die hellgrünen Punkte für Juni. Unterhalb der Ausgleichsgeraden ist im Bereich der $SSC_G < 1 \text{ g/l}$ eine Häufung von Punkten zu erkennen, die vorwiegend vom August stammen und die feinsten Schwebstoffpartikel repräsentieren könnten.

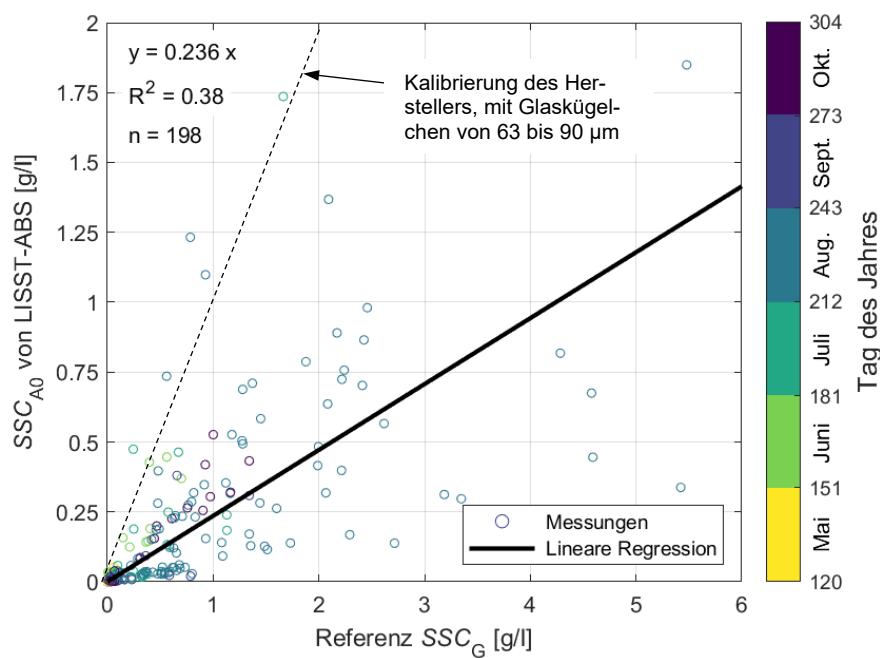


Abbildung 53: Messwerte des akustischen SSC-Sensors (unkalibrierte SSC) in der Entnahmekammer des KW Susasca in Funktion der Referenz-SSC von den Wasserproben 2019-2021, mit linearer Regression für Skalierungsfaktor (im Mittel über die Schwebstoffaison).

Die Ganglinien der «unkalibrierten SSC» des akustischen SSC-Sensors wurden mit dem Faktor gemäss Abbildung 53 skaliert.



6.2.6 SSC von den Messwerten des Coriolis Massestrom- und Dichtemessgeräts (CFDM)

Aus den Signalen des CFDM an diesem Standort liessen sich nur zeitweise plausible SSC-Ganglinien berechnen. Davon sind in Anhang A6 Beispiele während drei Ereignissen mit erhöhten SSC und Spitzenwerten zwischen 4 und 8 g/l dargestellt. Die SSC vom CFDM weist einen ähnlichen Verlauf wie die SSC der Trübungssonde und der Referenz-SSC auf und bestätigt, dass in Schwebstofftransportereignissen die SSC mehrere g/l erreichte.

6.2.7 Partikelgrößenverteilungen und SSC von Laserdiffraktometer

Vom Jahr 2019, als das *LISST-StreamSide* installiert war, sind keine verwendbaren Laserdiffraktometer-Messdaten vorhanden. Von den Jahren 2020 und 2021, in denen das *LISST-100x* installiert war, sind zeitweise plausible Messdaten vorhanden. Gründe für teils längere Datenlücken während der Schwebstoffsaison waren der mehrmalige Ausfall der Pumpe, Verstopfungen der Zuleitung, organisches Material, Biofilmbildung oder Sedimentablagerungen im optischen Pfad des Messgeräts oder störende Einflüsse von Luft in der gepumpten Zuleitung. Die folgende Abbildung zeigt u.a. ein Beispiel von plausiblen Daten des *LISST-100x*.

Die SSC-Ganglinie des Laserdiffraktometers wurde, in Perioden mit verwendbaren Messdaten, aus den aufgezeichneten Volumenkonzentrationen mit Erfahrungswerten vom KW Fieschertal berechnet (Feststoffdichte 2.73 g/cm³ und Korrekturfaktor $f_c = 1.9$ gemäss Felix 2017). Da vom Laserdiffraktometer am KW Susasca keine plausiblen Messdaten über längere Perioden vorhanden waren, und der Hauptzweck des Laserdiffraktometers in der Messung der Partikelgrößenverteilung (PSD) besteht, wurde kein Korrekturfaktor für die SSC-Werte des Laserdiffraktometers spezifisch für das Einzugsgebiet der Susasca bzw. diese Messstelle bestimmt.

6.2.8 Partikelgrößen und typische SSC-Verläufe im Hochsommer

Abbildung 54 zeigt Ganglinien des Median-Partikeldurchmessers d_{50} und der SSC im Triebwasser während zehn Hochsommertagen ohne nennenswerte Regenereignisse. Wie in dieser Jahreszeit für teilweise vergletscherte Gebiete typisch, ist eine starker Tagesgang zu erkennen:

- in der ersten Tageshälfte ist die SSC (sehr) tief und es sind gröbere Partikel vorhanden (d_{50} im Bereich von Grobsilt, selten Feinsand).
- In der zweiten Tageshälfte steigt die SSC bis die Abendstunden oft auf ca. 0.5 g/l an und es sind feinere Partikel vorhanden (d_{50} im Bereich von Mittelsilt), vermutlich transportiert durch Schmelzwasser aus Eis und Firn aus hohen Lagen.

Abbildung 54b zeigt weiter, wie sich die verschiedenen Instrumente zur SSC-Messung im Hochsommer typischerweise verhielten. Die beiden Trübungssonden (Staubecken und Druckleitungseinlauf) geben ähnliche SSC an, weil bei erhöhten Trübungen relativ feine Partikel vorhanden sind, welche sich im Entsander nicht absetzen. Die SSC der Trübungssonden stimmen gut mit den Referenz-SSC (grüne Punkte) überein, weil die Umrechnung von der Trübung auf SSC vor allem auf Referenz-SSC basiert, bei welchen feine Partikel wie in diesen Hochsommertagen vorhanden waren.

Die SSC-Ganglinien, die vom Laserdiffraktometer (*LISST-100x*) und vom akustischen Sensor (*LISST-ABS*) stammen, haben ähnliche Verläufe wie die SSC von den Trübungssonden, aber mit etwa nur halb so hohen Werten. Die Skalierung des Signals des akustischen Sensors basiert auf dem Mittelwert aller Messpunkte, was offenbar mit den in dieser Jahreszeit jeweils in der zweiten Tageshälfte vorhandenen feinen Partikeln zu einer Unterschätzung der SSC führt.

Die SSC des Laserdiffraktometers weicht von den Referenz-SSC ab, weil für die Korrekturfaktoren wie oben erwähnt Erfahrungswerte verwendet wurden, die nicht spezifisch für das KW Susasca bestimmt wurden.

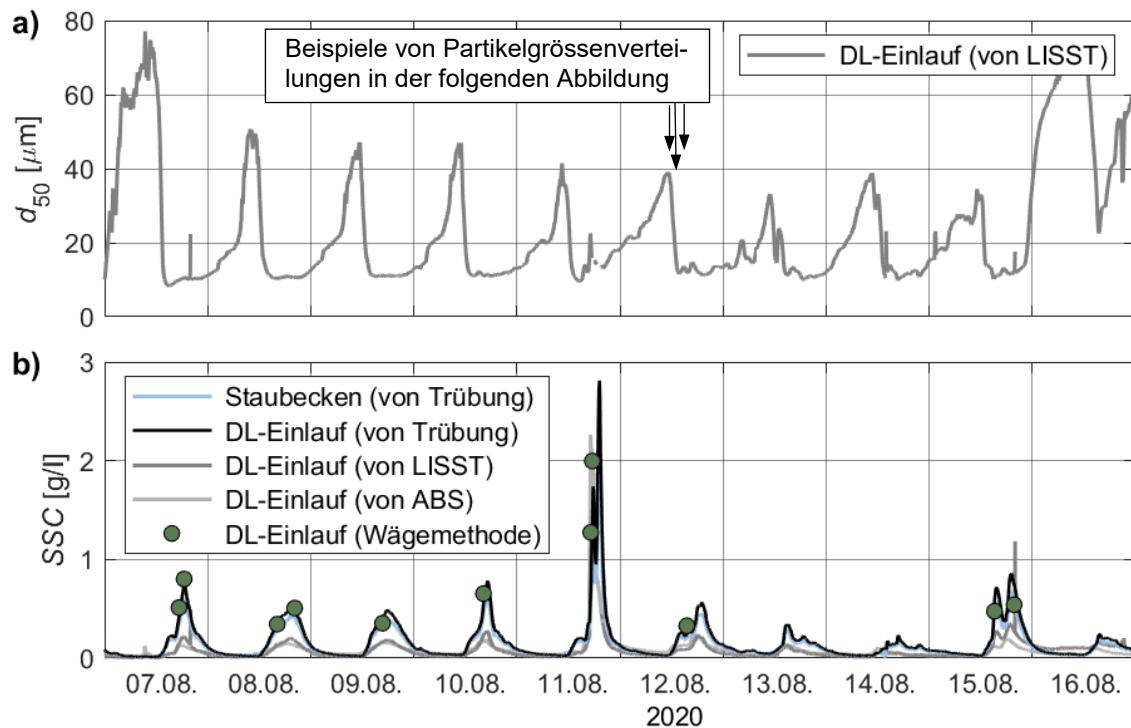


Abbildung 54: Ganglinien der a) Median-Partikelgrösse d_{50} (gemessen mit LISST-100x) und b) der Schwebstoffkonzentration SSC im Triebwasser des KW Susasca während 10 Tagen im Hochsommer 2020.

Insgesamt zeigen die ähnlichen Verläufe der SSC von den Trübungssonden, dem akustischen Sensor und dem Laserdiffraktometer, dass die Messgeräte grundsätzlich funktionieren, aber je nach vorhandenen Partikelgrößen und verwendeten Kalibrier- bzw. Umrechnungsfaktoren unterschiedliche absolute SSC-Werte resultieren.

Abbildung 55 zeigt Beispiele von PSD, die am 12.08.2020 zur Mittagszeit gemessen wurden, während d_{50} abnahm und die SSC anstieg. Während d_{50} zwischen 12 und 35 μm lag, waren gleichzeitig Partikel in der Größenklasse von Feinsilt (wenige μm) bis Feinsand (bis ca. 100 μm) vorhanden. Ein Mass für die Breite einer PSD ist ihre geometrische Standardabweichung σ_g , auch Stufung genannt (Definition siehe Abbildung 55). Die drei PSD weisen σ_g -Werte zwischen 2.5 und 2.9 auf. Gemäss Merkus (2009) gelten PSD mit σ_g zwischen 2 und 3.2 als breit bzw. weit. Solche weitgestuften PSD sind für die SSC-Messung eine Herausforderung, weil die Messinstrumente zum Teil unterschiedlich stark auf die gleichzeitig vorhandenen Silt- und Sandpartikel reagieren. Für die Turbinenabrasion sind vor allem die größeren Partikel relevant.

Aufgrund der verfügbaren Informationen zur Partikelgrösse wurde d_{50} für die Schwebstoffe in der Druckleitung zu 20 μm angenommen (konstant). Für das Abrasionsmodell nach IEC 62364 (2019) ergibt sich somit $k_{size} = 20 \mu\text{m} / 1000 \mu\text{m} = 0.02$.

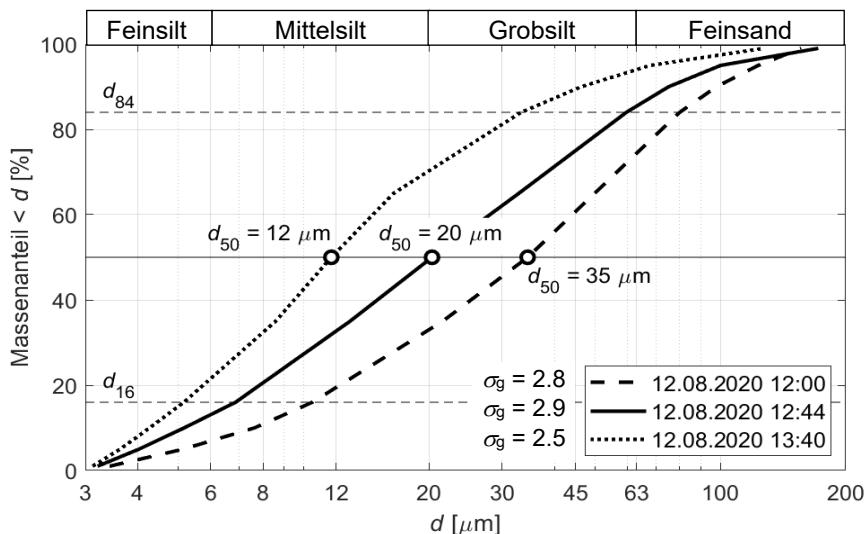


Abbildung 55: Beispiele von Partikelgrößenverteilungen im Triebwasser des KW Susasca im Hochsommer 2020 (gemessen mit dem Laserdiffraktometer L/SST-100x) mit der Kennzahl σ_g , die angibt, dass es sich hier um weitgestufte Partikelgrößenverteilungen handelt.

6.2.9 Schwebstoffkonzentrationen über drei Jahre

Die SSC aufgrund der Trübungsmessungen in der Entnahmekammer über die drei untersuchten Jahre sind in Abbildung 56 zusammengestellt. Den Messwerten von diesem Instrument wurde der Vorzug gegeben, da die Messwerte des L/SST-ABS zeitweise fraglich, und die Messwerte des CFDM und des Laserdiffraktometers über längere Perioden wegen Verstopfungen, Verschmutzungen und unerwünschten Temperatureinflüssen unbrauchbar waren.

SSC-Spitzen traten von Ende Mai bis Anfangs November auf (Schwebstofftransportsaison), also in der Periode, in welcher Niederschlag in der Regel als Regen fällt und das Einzugsgebiet mehrheitlich schneefrei ist. In den Monaten Juli bis September traten Phasen von mehreren Tagen mit erhöhter Trübung bzw. SSC auf, vermutlich infolge der Gletscherschmelze.

Die Messwerte von Trübungssonden ähnlicher Bauart können unzuverlässig bzw. ungültig sein, wenn die Konzentration von Siltpartikeln 6 g/l überschreitet (Abgottsporn *et al.* 2022a). Bei höheren SSC nimmt das Signal von solchen Trübungssonden infolge Mehrfachstreuung im Extremfall bis auf null ab. Daher ist es möglich, dass die tatsächlichen SSC-Spitzenwerte höher waren als in Abbildung 56 aufgrund der Trübungsmessungen ermittelt.

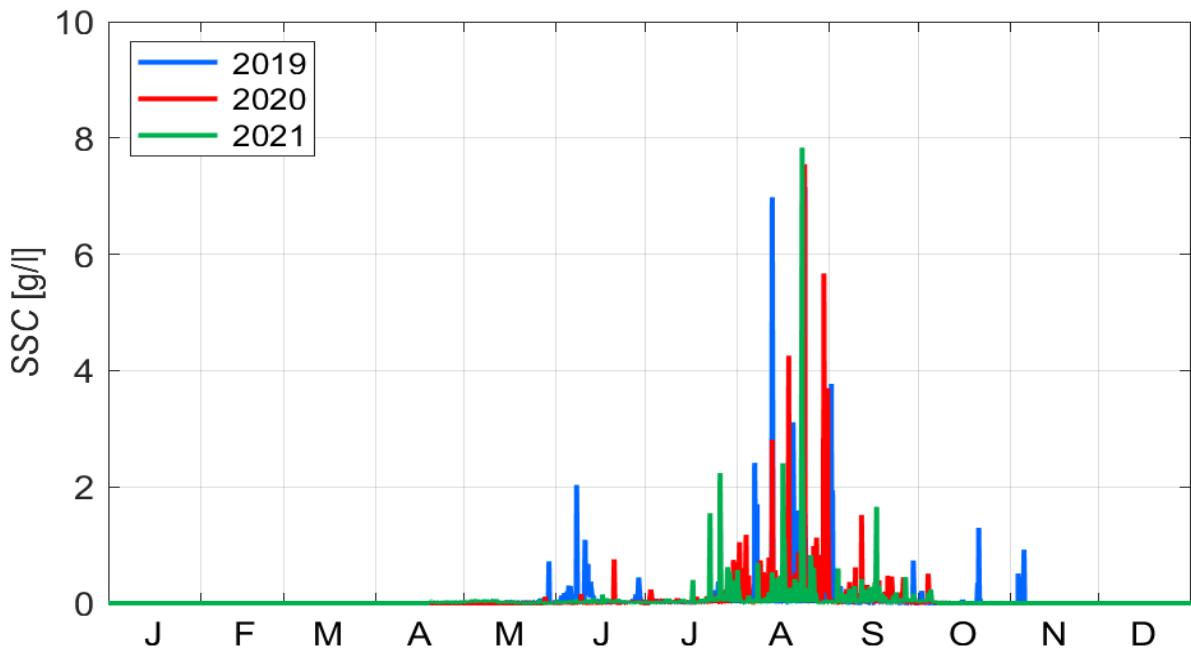


Abbildung 56: Schwebstoffkonzentration SSC (aufgrund Trübung) in der Druckleitung des KW Susasca im Jahreslauf.

Abbildung 57 zeigt die Dauerkurven der SSC, d.h. die sortierten Werte aus Abbildung 56, in den einzelnen Jahren und für die Periode der drei untersuchten Jahre. Unterhalb der Diagramme ist die Überschreitungsdauer in Tagen/Jahr und oberhalb die Überschreitungswahrscheinlichkeit (*Probability of Exceedance*, P_{exc}) in Prozent angegeben.

Während mehr als der Hälfte des Jahres ist das Wasser praktisch klar. Im Mittel über die drei Jahre überschritt die SSC in der Druckleitung 1, 2 bzw. 4 g/l lediglich an ca. 21, 7 bzw. 2.5 h/Jahr.

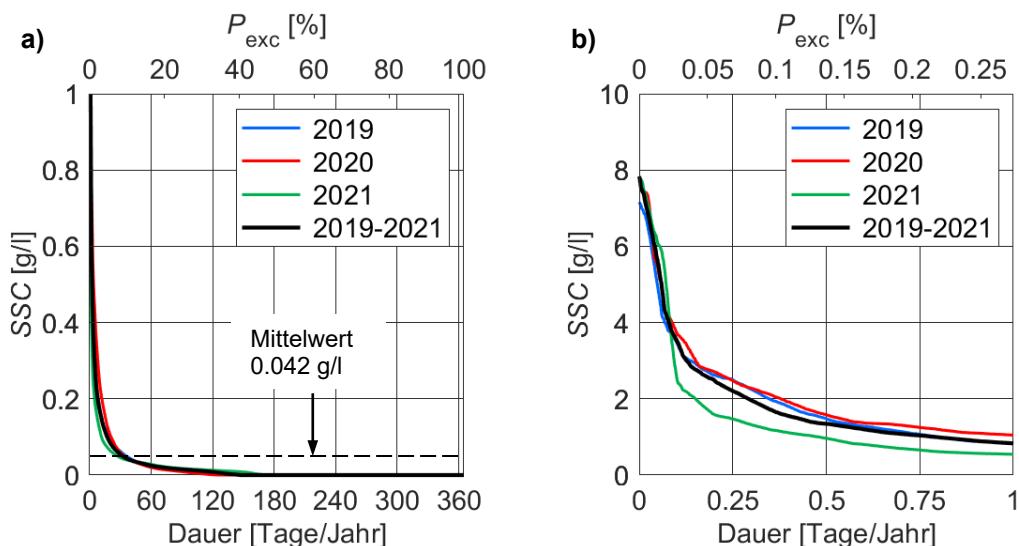


Abbildung 57: Dauerkurven der Schwebstoffkonzentration SSC (aufgrund der Trübung) in der Druckleitung des KW Susasca;
a) ganzes Jahr und b) Detail während 1 Tag/Jahr (Detail aus a) mit anderer Skalierung der Achsen).



6.2.10 Schwebstoff-Frachten, turbinierte Wassermengen und mittlere SSC

Basierend auf den minütlichen Werten der SSC (Abbildung 56) und des Durchflusses in der Druckleitung wurde die Schwebstoff-Transportrate berechnet und über die Zeit seit Beginn des entsprechenden Jahres zur turbinierten Schwebstofffracht (*Suspended Sediment Load SSL*) aufsummiert (Abbildung 58).

Der Feinsedimenttransport fand vor allem zwischen Ende Juli und anfangs September statt (jeweils eher kurze und späte Phase mit Gletscherschmelze vor allem im August). Der Beginn des Feinsedimenttransports variierte in den einzelnen Jahren je nach Schneeschmelze um bis zu zwei Monate (von Ende April bis Ende Juni). In den drei Jahren fanden keine grösseren Hochwasser (Unwetter) statt. Die jährlichen Schwebstofffrachten variierten bis 22 % um den Mittelwert. Der Mittelwert über bisher lediglich drei Messjahre ist mit relativ hoher Unsicherheit behaftet, da einzelne Hochwasserereignisse einen grossen Einfluss haben können.

Die monatlichen Schwebstofffrachten sind in Abbildung 88 in Anhang A2 dargestellt. Die Fracht im August ist etwa viermal so gross wie jene im Juli oder September (jeweils Mittelwerte über die drei Jahre). Die Fracht im Juni variiert von Jahr zu Jahr je nach dem Zeitpunkt der Schneeschmelze. Die August-Fracht war im Jahr 2021 nur halb so gross wie ihr bisheriger Höchstwert im Jahr 2020. Da das turbinierte Abflussvolumen nicht so stark variierte, war die mittlere SSC im Jahr 2020 besonders hoch.

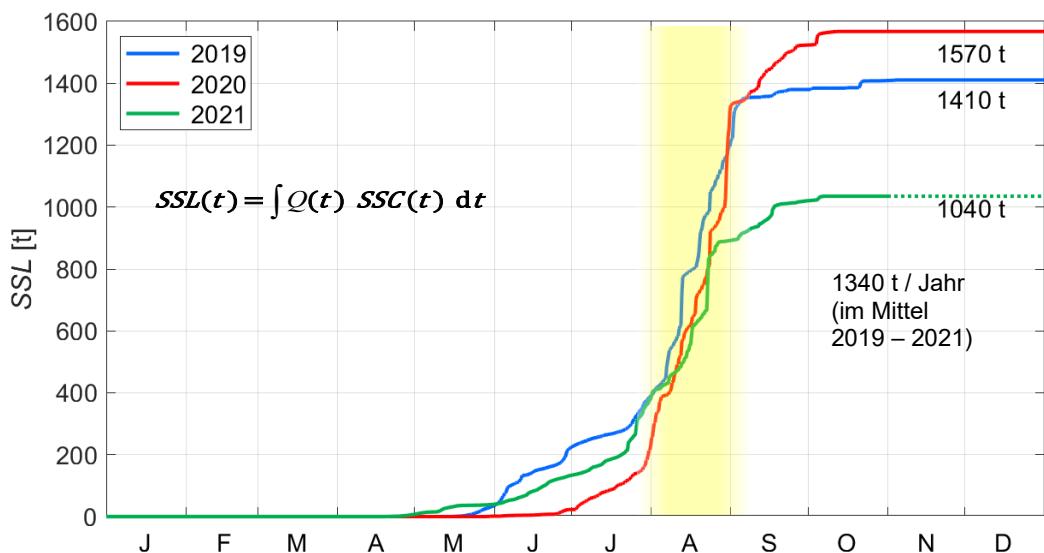


Abbildung 58: Schwebstofffrachten SSL in der Druckleitung des KW Susasca, jeweils kumuliert seit Jahresbeginn.

In Abbildung 59 wurden die jährlichen Schwebstofffrachten dem jährlichen Abflussvolumen in der Druckleitung (und somit der beiden Turbinen) gegenübergestellt. Da höhere Schwebstofffrachten mit höheren Abflüssen einhergingen, war die mittlere SSC in allen drei untersuchten Jahren ähnlich. Im Mittel über die untersuchte Periode wurden pro Jahr 1340 t Feinsediment in 32 Mio. m³ Wasser turbiert, was einer mittleren SSC von 0.042 g/l entspricht. Dieser Mittelwert ist auch in Abbildung 57 eingetragen.

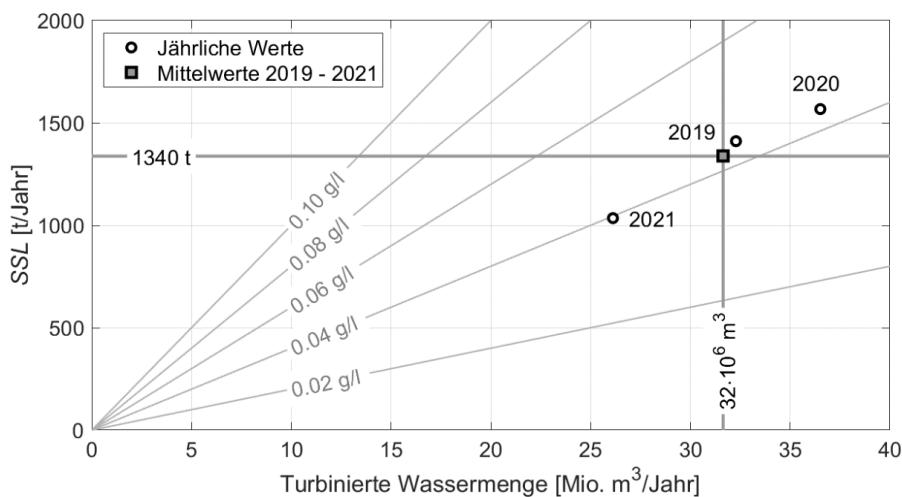


Abbildung 59: Jährliche turbinierte Schwebstofffrachten SSL (aufgrund Trübung) und Wassermengen am KW Susasca (beide MG) mit deren Mittelwerten 2019-2021.

Die mittleren monatlichen SSL und SSC sind in Abbildung 88 und Abbildung 89 in Anhang A2 dargestellt. Im Juli und September entspricht die mittlere SSC etwa der jährlichen mittleren SSC. Im August war die mittlere SSC gut dreimal so hoch (jeweils Mittelwerte während der drei untersuchten Jahre).



6.2.11 Schwebstofftransport-Ereignisse

Ausgehend von den SSC-Spitzen > 4 g/l in Abbildung 56 wurden Schwebstofftransport-Ereignisse identifiziert: drei im Jahr 2019, drei im Jahr 2020 und eines im Jahr 2021. Zu diesen sieben Ereignissen, die meist nur wenige Stunden dauerten, sind detaillierte weitere Informationen in den Anhängen A3 bis A5 enthalten.

Die Abbildung 60b-d zeigen, wie stark getrübt der Zufluss zum Staubecken bei drei Ereignissen im August 2020 aussah im Vergleich zum sonst nur leicht getrübten Wasser (Abbildung 60a).

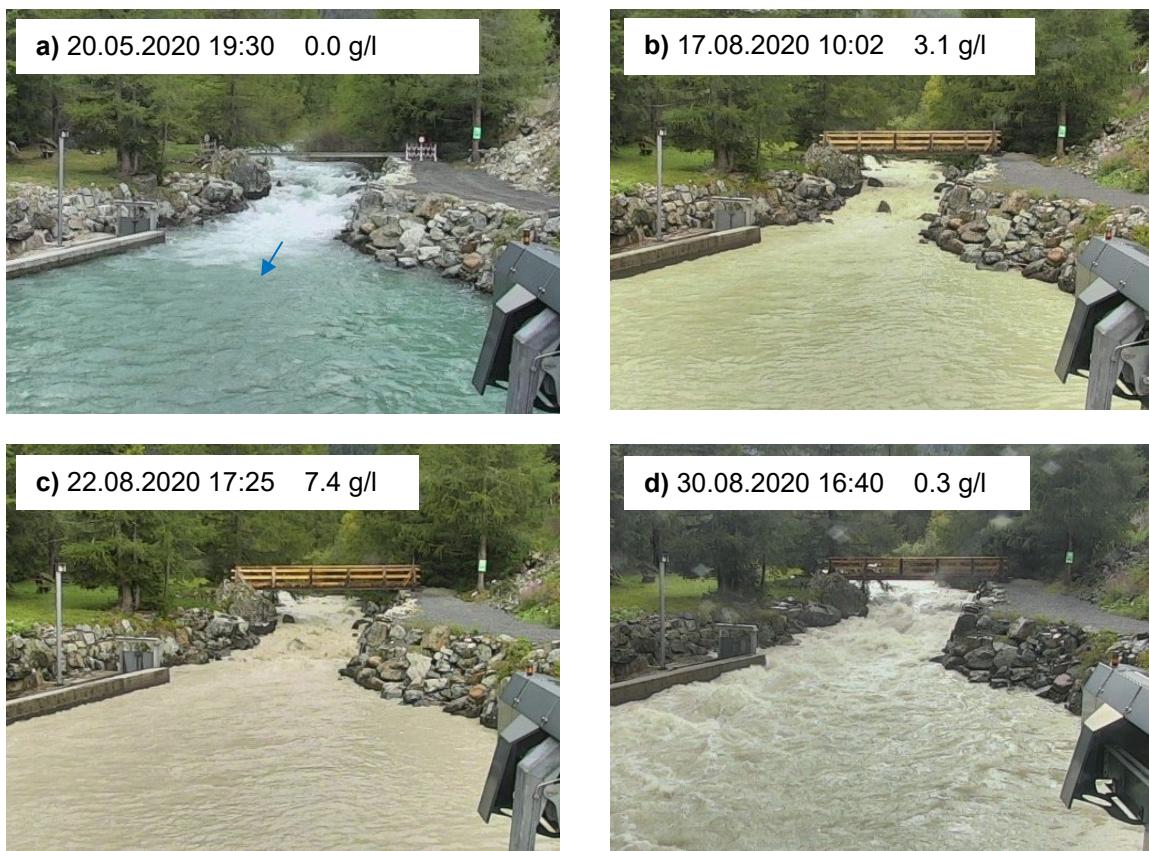


Abbildung 60: Blick auf den Zufluss zur Wasserfassung des KW Susasca a) bei geringer Wassertrübung im Mai und b) - d) während drei Schwebstofftransportereignissen infolge Regens im August 2020 (Fotos: Webcam OESS, ausgelöst durch VAW). Die SSC-Werte stammen von Trübungsmessungen in der Enthaltmekammer 3 Minuten später.

In Abbildung 90 in Anhang A3 wurde untersucht, ob hohe SSC bzw. starke Zunahmen der SSL innerhalb von Stunden oder wenigen Tagen durch ergiebigen Niederschlag bei der nächstgelegenen Messstation in Susch erklärt werden können:

- Beim Ereignis um den 29.08.2020 wurden über zwei Tage ca. 100 mm Regen gemessen, was 14 % der jährlichen Niederschlagshöhe (734 mm als Mittelwert von 2019 bis 2021) entspricht. Ein solches Niederschlagsereignis ist im Unterengadin nur alle ca. 20 Jahre zu erwarten (Statistik der nächstgelegenen Station mit einer ausreichend langen Messreihe in Scoul; Meteoschweiz 2021). Obwohl es sich also um ein eher seltenes Niederschlagsereignis handelte, war die SSC-Spitze nicht höher als bei den anderen sechs Ereignissen. Die SSL nahm während diesem Ereignis (über zwei Tage) am stärksten zu, nämlich um ca. 300 t, was



22 % der mittleren jährlichen **SSL** entspricht. Bei den anderen Ereignissen entsprachen die **SSL** 11 %, 7 % und viermal < 1% der mittleren jährlichen **SSL**.

- Bei den anderen sechs Ereignissen wurden Niederschlagshöhen registriert, die weniger als 2 % des Jahresniederschlags entsprechen, was nicht aussergewöhnlich ist.

Weiter wurde die Niederschlagsintensität bei den sieben Ereignissen betrachtet (jeweils oberstes Diagramm im Anhang A5).

- Beim Ereignis vom 22.08.2020 wurde die höchste Niederschlagsintensität von 8 mm pro 10 Minuten gemessen. Ein solches Niederschlagsereignis ist im Unterengadin etwa alle 7 Jahre zu erwarten (Station Scoul; Meteoschweiz 2021). Die resultierende **SSC**-Spitze war nur die zweithöchste der sieben Ereignisse.
- Bei den anderen sechs Sedimenttransportereignissen lagen die Niederschlagsintensitäten < 2 mm pro 10 Minuten, was nicht aussergewöhnlich ist.

Für hohe **SSC** sind eine hohe Niederschlagsintensität verbunden mit einer nennenswerten Niederschlagshöhe pro Ereignis und weitere hydrologische Parameter massgebend. Weiter ist der Niederschlag insbesondere im Alpenraum räumlich sehr variabel. Daher kann aufgrund der Messwerte in Susch nicht auf Starkniederschläge in Teilen des Einzugsgebiets des KW Susasca geschlossen werden. Auch mit räumlich verteilten Niederschlagsdaten (Radar) und Gewitterwarnungen in Meteo-Apps sind hohe **SSC** schwierig vorherzusagen. Daher ist die Messung der **SSC** am Gewässer in Echtzeit wichtig.

In Abbildung 91 in Anhang A4 sind für jedes der drei untersuchten Jahre die **SSL** in Funktion des turbinierten Wasservolumens seit Jahresbeginn dargestellt. Die Anfangszeitpunkte der sieben Schwebstofftransport-Ereignisse sind als Punkte auf diesen Linien dargestellt. Steile bis quasi-vertikale Linienabschnitte im Anschluss an einen Punkt bedeuten hohe **SSC**, die bis etwa hundertmal so hoch sind wie im Jahresmittel (0.042 g/l). Auch in dieser Darstellung fällt die hohe **SSL** im August 2020 auf – damals traten drei Schwebstofftransport-Ereignisse in nur zwei Wochen auf.

Im Anhang A5 sind für die 7 Ereignisse jeweils folgende Zeitreihen dargestellt (sofern vorhanden):

- a) Niederschlagsintensität und -höhe in Susch,
- b) Überfallhöhe am Wehr und Öffnungshöhe des Grundablasses,
- c) die **SSC** an der Wasserfassung und in der Entnahmekammer,
- d) die Sedimentablagerungshöhen in der hangseitigen Entsanderkammer und die **SSL** in der Druckleitung sowie
- e) die elektrischen Leistungen der MG.

Aus der Analyse dieser Ereignisse können folgende Aussagen gemacht werden:

- **SSC**-Spitzen an der Wasserfassung treten etwa 3.5 bis 4 h nach der maximalen, in Susch aufgezeichneten, Niederschlagsintensität auf.
- Beim Ereignis mit dem ergiebigen Regen um den 29.08.2020 wurde die Grundablass-Schütze am höchsten angehoben (bis 1.5 m), d.h. es trat dann der grösste Zufluss der untersuchten drei Jahre auf. In der Entsanderkammer 1 wuchsen die Sedimentablagerungen um 1.0 m während gut 2 Tagen, d.h. es wurde dann auch am meisten Sand transportiert.



- In kürzeren Schwebstofftransportereignissen von wenigen Stunden wurde die Grundablass-Schütze weniger oder gar nicht angehoben, und die Ablagerungshöhe im Entsander nahm kaum zu, d.h. der Abfluss lag zwar über dem Ausbauwert, aber war nicht ausserordentlich, und es wurde wenig Sand transportiert.
- Insgesamt handelte es sich bei den 7 Ereignissen in den Jahren 2019-2021 um keine grösseren Hochwasser, z.B. im Gegensatz zu jenem von 2014 (Abbildung 39a), bei welchem das Staubecken mit Sand und Kies praktisch gefüllt wurde.

In den Abbildungen in Anhang A5 sind weiter Flächen und Linien mit hellbrauner Farbe dargestellt. Diese beziehen sich auf simulierte Kraftwerks-Ausserbetriebsnahmen während hoher SSC, auf welche im Abschnitt 6.6.4 eingegangen wird.

6.2.12 Particle Loads gemäss IEC 62364 (2019) und Schwebstofffrachten pro MG

Schliesslich wurde die Partikelbelastung (*Particle Load*) pro Laufrad-Becher PL_b gemäss Gleichung (4) aus Abschnitt 3.1.1 berechnet. Dabei wurden zu jedem Zeitschritt die Anzahl der in Betrieb stehenden Düsen ($n_j = 1, 2, 3$ oder 4) und die SSC gemäss Abschnitt 6.2.9 verwendet. Als konstante Parameterwerte wurden $z_2 = 21$ für die Anzahl Becher pro Laufrad berücksichtigt sowie für die Partikeleigenschaften:

- $k_{size} = 0.02$ gemäss Abschnitt 6.2.8
- $k_{shape} = 2.0$ gemäss Abschnitt 6.2.2
- $k_{hardness} = 0.61$ gemäss Abschnitt 6.2.1 für das Turbinengrundmaterial (Grundfall).

Abbildung 61 zeigt die jährlichen Partikelbelastungen pro Becher PL_b für jede MG in Funktion ihrer jährlichen Betriebsstunden. Da zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht alle Leitsystemdaten verfügbar waren, wurden die Betriebsstunden im November und Dezember 2021 aufgrund der Vorjahre geschätzt (grün gestrichelte Linie).

Die jährlichen Betriebsstunden variieren je nach Verfügbarkeit (Revisionsarbeiten) und dem Einsatz beiden MG ausserhalb den Volllastbetriebszeiten des Kraftwerks (bevorzugter Betrieb der MG mit dem höheren Wirkungsgrad und langjähriger Ausgleich der Betriebsstunden wegen Ermüdung und Verschleiss. Die horizontalen und flach geneigten Linienabschnitte am Anfang und gegen das Ende eines Kalenderjahres stellen die Betriebsphasen mit praktisch klarem Wasser und allenfalls Teillastbetrieb dar. Die steilen Linienabschnitte stellen den Betrieb mit erhöhten SSC und meist Volllastbetrieb, vor allem im Spätsommer, dar.

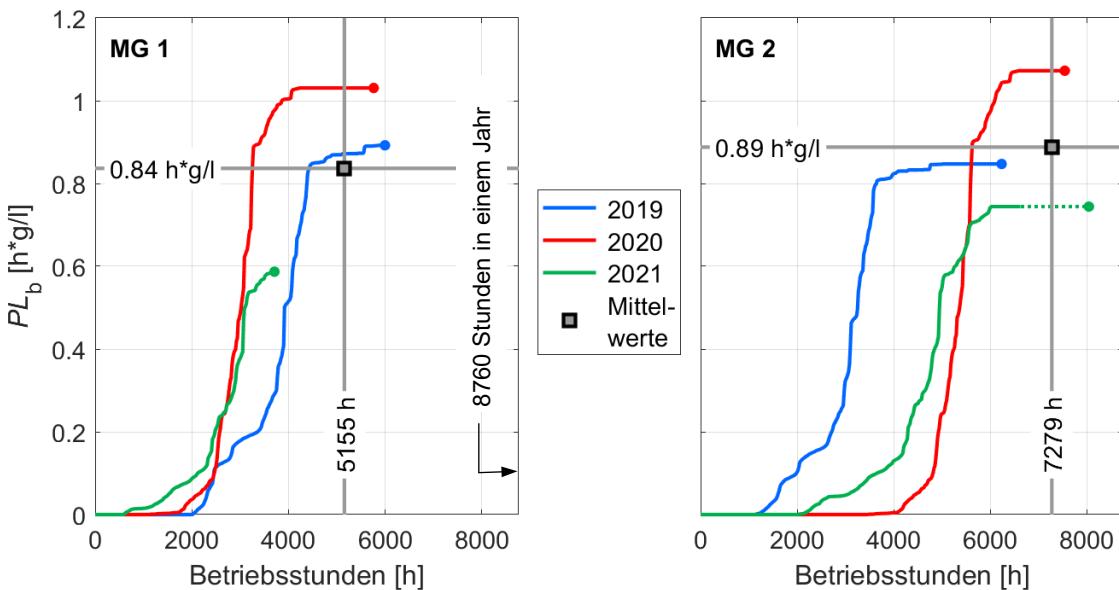


Abbildung 61: Partikelbelastungen pro Becher PL_b (bezogen auf das Turbinen-Grundmaterial) der MG 1 (links) und der MG 2 (rechts) des KW Susasca in Funktion von deren Betriebsstunden.

In Abbildung 62 wurden die jährlichen Partikelbelastung pro Becher PL_b den jährlichen Schwebstofffrachten pro MG gegenübergestellt und eine Trendlinie bestimmt. Die beiden Größen sind näherungsweise proportional. Gründe für die leichten Abweichungen der Punkte von der Trendlinie sind, dass die MG während der Schwebstofftransportsaison nicht immer mit Ausbaudurchfluss und allen Düsen betrieben werden.

Während die SSL von Anlagenkennwerten wie dem Bemessungsdurchfluss abhängig ist und sich auf eine MG bezieht, handelt es sich bei der PL_b um eine normierte Größe für die Schwebstoffbelastung eines Bechers, welche von Anlage zu Anlage übertragbar sein sollte, wenn auch die Nettofallhöhe berücksichtigt wird (Abschnitt 6.4.3).

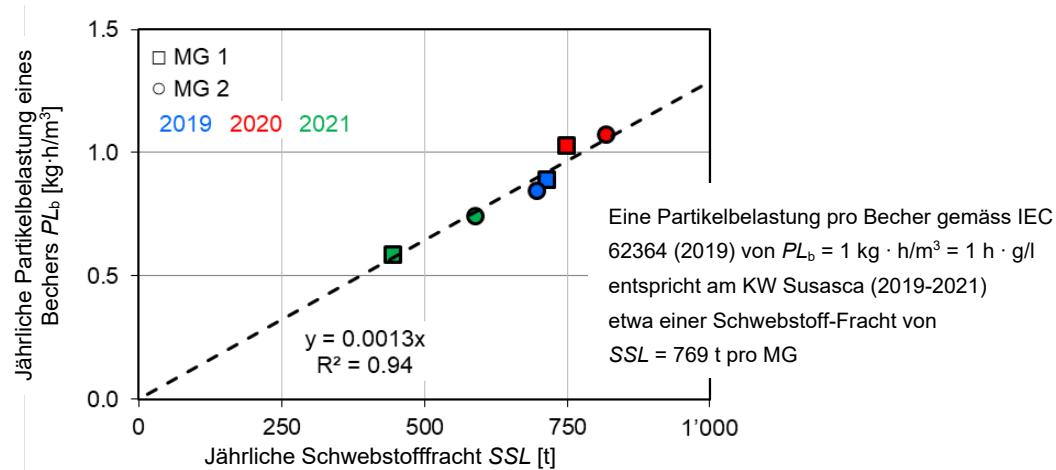


Abbildung 62: Vergleich der jährlichen Partikelbelastung pro Becher PL_b mit den jährlichen Schwebstoff-Frachten pro MG.



Zum Schluss des Abschnitts über die Schwebstoff-Resultate sind die Partikelbelastungen pro Becher PL_b und die Schwebstoff-Frachten SSL für jede MG, aufgeteilt nach Kalendermonat, in Abbildung 63 dargestellt.

Auch die monatlichen SSL und PL_b sind näherungsweise proportional. Wie erwartet, sind die Sedimentbelastungen der beiden MG im mehrjährigen Mittel ähnlich. Auch in dieser Darstellungsart sind die hohe Feinsedimentbelastung der Turbinen im August und die vernachlässigbare Sedimentbelastung von November bis April ersichtlich.

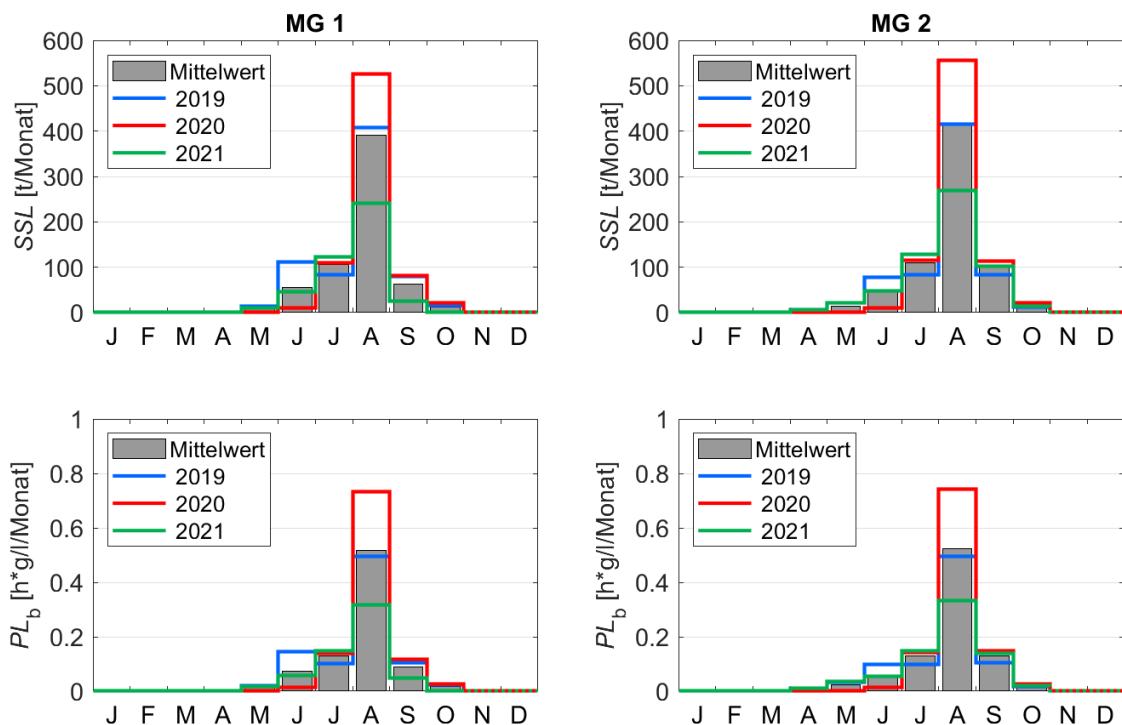


Abbildung 63: Monatliche Schwebstoff-Frachten SSL (oben) und Partikelbelastungen pro Becher PL_b (unten) und für MG 1 (links) und MG 2 (rechts) des KW Susasca.



6.3 Turbinenabrasion

6.3.1 Beschreibung der Abrasion an den Laufrädern

Abbildung 64 zeigt den Zustand von Bechern der Laufräder, die während der Projektdauer in MG 1 und MG 2 im Einsatz waren, jeweils im Winter, mit zunehmenden Abrasionsschäden.

Beim unbeschichteten Laufrad 1.3, das im März neu in MG 1 eingebaut wurde, wurde festgestellt:

- Bereits während einer Schwebstoffsaison bildete sich das typische schuppige Abrasionsmuster mit einer überlagerten Welligkeit aus, vor allem an der Innenseite der Becherwand und gegen die Becherwurzel.
- Im zweiten Jahr verstärkten sich insbesondere die grösseren Wellen, welche etwa parallel zum Becherrand bzw. Bechergrund verlaufen.
- Die Mittelschneide wurde deutlich breiter und das Längenprofil ihrer Oberkante war nicht mehr gerade (siehe auch systematische Fotos in Abbildung 37 links). Die Becherausschnitte bleiben hingegen insbesondere am linken und rechten Rand des Strahls relativ dünn bzw. scharfkantig, da dort eine geringe Bauteildicke vorhanden ist.

Beim beschichteten Laufrad 2.2, das bei der ersten Inspektion im Rahmen dieses Projekts bereits eine Schwebstoffsaison lang in MG 2 im Einsatz gewesen war (rechts in Abbildung 64), wurde festgestellt:

- An einigen Stellen auf der Mittelschneide war Grundmaterial ausgewaschen worden, nachdem die Beschichtung dort abgetragen wurde. An der rechten Flanke trat bereits ein kleiner Sekundärschaden infolge der Strömungsablösung bei der verbreiterten Stelle der Mittelschneide auf. In der linken Becherhälfte war ein Bereich zu sehen, in welchem die Beschichtung auf einem Teil ihrer ursprünglichen Dicke abgetragen wurde (vermutlich eine obere Lage der Beschichtung). Die Becherinnenseite und die Becherausschnitte waren aber noch vollflächig beschichtet.
- Nach insgesamt zwei Schwebstoffsaisons dehnte sich die Grundmaterialabrasion auf einen grossen Teil der Mittelschneide aus und entwickelte sich vor allem zur rechten Flanke hin (= unten im eingebauten Zustand des Laufrads). An den Becherausschnitten kam es vor allem im Kernbereich des Strahls auch zu Beschichtungsverlust und Grundmaterialabrasion. Vermutlich als Folge einer Unebenheit (Rand einer Beschichtungslage) kam es in der linken Becherhälfte zu lokaler Grundmaterialerosion auf der Innenseite der Becherwand im hinteren Bereich.
- In einer weiteren Schwebstoffsaison verstärkten sich die beschriebenen Schäden. Die Beschichtung auf den Mittelschneiden und an den Bechereintrittskanten war nun systematisch erodiert. Auch aufgrund der asymmetrischen Abrasion an den ursprünglich beschichteten Mittelschneiden wurden diese nicht so stumpf wie beim unbeschichteten Laufrad. Trotz lokaler Schäden nach insgesamt drei Schwebstoffsaisons war die Beschichtung in einem Grossteil des Bechers noch vollflächig vorhanden.



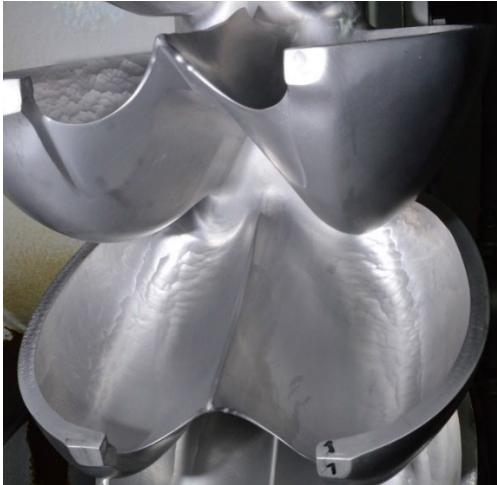
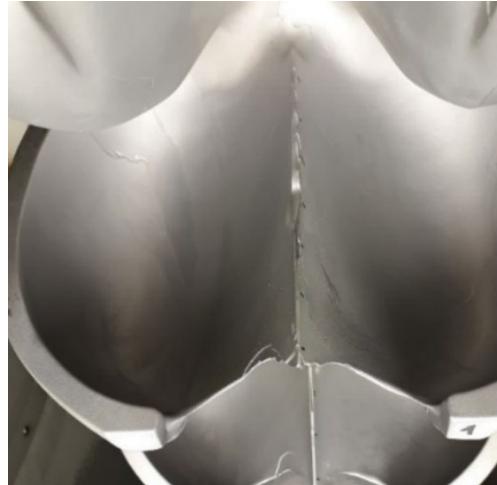
	MG 1 Lauftrad 1.3, unbeschichtet	MG 2 Laufrad 2.2, beschichtet
Winter 2018/2019	 vor dem Einbau	 nach 1 Jahr im Einsatz
Winter 2019/2020	 nach 1 Jahr im Einsatz	 nach 2 Jahren im Einsatz
Winter 2020/2021	 nach 2 Jahren im Einsatz	 nach 3 Jahren im Einsatz

Abbildung 64: Zustand der Laufräder der MG 1 (links) und MG 2 (rechts) des KW Susasca in drei Wintern während der Projektdauer, jeweils am Beispiel der Becher Nr. 1 oder 21 (Fotos: VAW).



Beim unbeschichteten Laufrad waren die Mittelschneiden im Querschnitt oben leicht gerundet mit einer symmetrischen Form. Beim beschichteten Laufrad waren die Mittelschneiden hingegen kantig und unregelmässiger abgenutzt, zum Teil mit vorstehenden Beschichtungsrändern, und hatten bei diesem Laufrad in diesem mittleren Abnutzungszustand einen asymmetrischen Querschnitt.

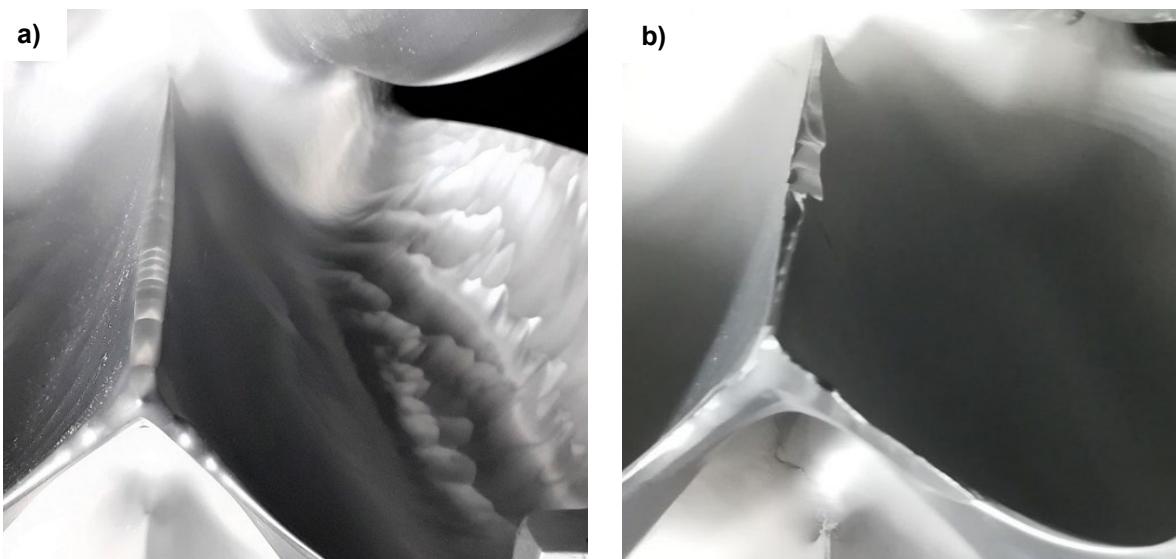


Abbildung 65: Abnutzungszustand der Mittelschneiden des a) unbeschichteten und des b) beschichteten Laufrads in MG 1 bzw. MG 2 des KW Susasca im Feb./März 2021 (Beispiele des Bechers Nr. 1 in MG 1 und des Bechers Nr. 12 in MG 2, Fotos: VAW).

Abbildung 66 zeigt den stark abgenutzten Zustand eines unbeschichteten und eines beschichteten Laufrads am Ende ihrer Einsatzdauern. Beim unbeschichteten Laufrad nahm die Dicke der Becherwand im stark gekrümmten vorderen Bereich sichtbar ab. Beim beschichteten Laufrad kam es zu ausgeprägter Grundmaterialabrasion im Becher und an der Becherwand; die Mittelschneidenspitze wurde stark abgerundet. Bei beiden Laufrädern entwickelte sich ein Wellenmuster auf der Mittelschneide.

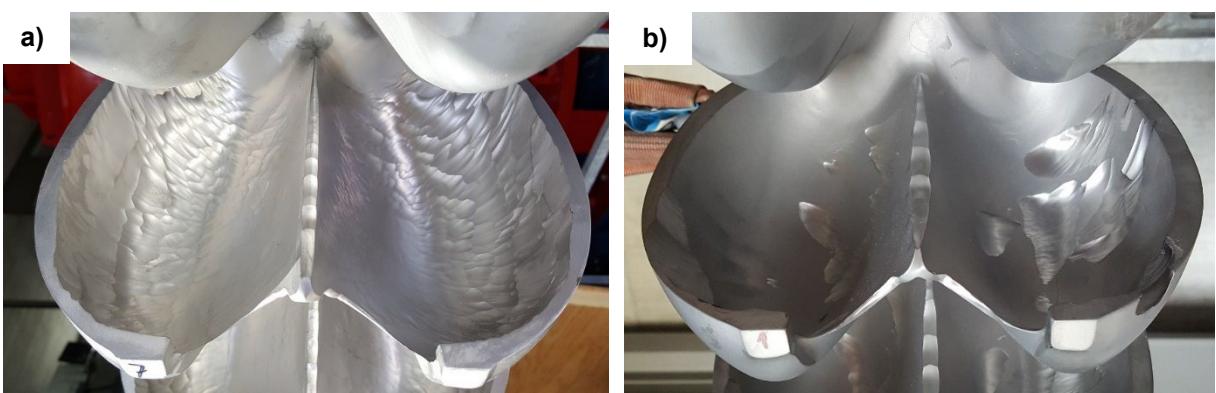


Abbildung 66: Stark abgenutztes a) unbeschichtetes Laufrad 1.1 und b) beschichtetes Laufrad 2.1 am Ende ihrer Einsatzdauern im KW Susasca (Fotos: VAW).



6.3.2 Abrasion an den Mittelschneiden

Abbildung 67 zeigt die Zusammenfassung der Resultate der Bildauswertung der Seiten- und der Schrägdraufsichten der Mittelschneiden, welche in Abschnitt 5.3.7 beschrieben wurde. Im oberen Teil der Abbildung sind die Längsprofile der Mittelschneidenoberkanten dargestellt, im unteren Teil die Mittelschneidenbreiten von der Mittelschneidenspitze bis zu ihrem hinteren Ende. Nebst den Endzuständen der drei stark abgenutzten, ausgebauten Laufräder sind für die beiden Laufräder, die am Projektende weiter in Betrieb waren, die Zustände bei der jüngsten Inspektion innerhalb des Projekts dargestellt. Bei jeder Linie handelt es sich um den Mittelwert aller vermessenen Becher (bei den Δh aus den Seitenansichten jeweils 21 Becher pro Laufrad, bei den s aus den Schrägdraufsichten ebenfalls 21 Becher bei den ausgebauten Laufrädern und etwa 8 Becher bei den eingebauten Laufrädern).

Die Mittelschneiden wurden etwa auf halber Länge am meisten erodiert. Auch der vordere Bereich bis zur Mittelschneidenspitze ist stark der Abrasion ausgesetzt, während bei einigen Laufrädern die Mittelschneiden an ihrem hinteren Ende nicht nennenswert abgetragen wurden.

Die Höhen der Mittelschneiden wurden um bis zu $\Delta h = 13$ mm reduziert, während ihre Breiten s auf 8 mm zunahmen, was 3.8 % der inneren Becherbreite ($B = 210$ mm) entspricht. Im Neuzustand war s beim unbeschichteten Laufrad etwa 0.5 mm und beim beschichteten Laufrad 1.1 bis 1.5 mm (beidseitig der Flanken Schichtdicken von je ca. 0.3 bis 0.5 mm und allenfalls ein Minimalradius auf der Mittelschneide für eine gute Beschichtbarkeit).

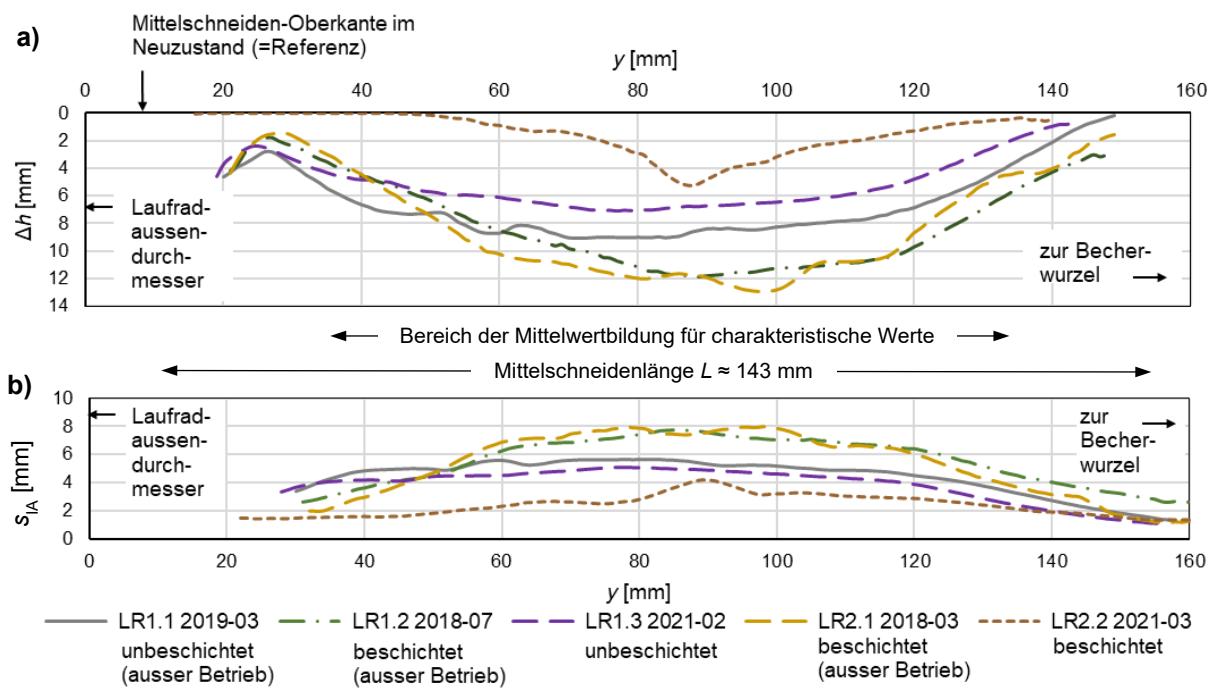


Abbildung 67: a) Reduktion der Mittelschneidenhöhe Δh und b) -breite s entlang den Mittelschneiden von fünf abgenutzten Laufrädern (zwei unbeschichtete und drei beschichtete) aufgrund von Bildauswertungen, jeweils Mittelwerte aller vermessenen Becher eines Laufrads (Distanzen in Querrichtung sind doppelt so gross dargestellt wie jene in Längsrichtung).

Bei den beiden Laufrädern, die am Projektende weiter in Betrieb waren, hat die Mittelschneidenbreite dank der Beschichtung deutlich weniger stark zugenommen (violett vs. braun), obwohl das beschichtete Laufrad schon ein Jahr länger in Betrieb ist. Beim beschichteten Laufrad kam es zu einer lokalen



Eintiefung mit entsprechender Verbreiterung an der Stelle auf der Mittelschneide, an welcher die Beschichtung im ersten Jahr beschädigt worden war und die Grundmaterialerosion einsetzte.

In den Anhängen B1 und B2 sind für diese beiden Laufräder auch die Resultate der Vermessung im vorherigen Winter dargestellt (Zwischenstände der Abrasion in Abbildung 99, Abbildung 100, Abbildung 103 und Abbildung 104).

Weiter zeigen die Abbildung 102 und Abbildung 106 in den Anhängen B1 und B2 für die ausgebauten Laufräder die Resultate der einzelnen Becher. Es fällt auf, dass bei den beschichteten Laufrädern die Unterschiede zwischen den Bechern grösser sind als beim unbeschichteten Laufrad. Dies wird damit erklärt, dass bei den beschichteten Laufrädern die anfangs lokalen Schäden zufällig auftreten und sich je nachdem, wie die Beschichtung links oder rechts der Mittelschneide abbricht, weiterentwickeln.

Von der Bildanalyse eines Bechers zu einem Zeitpunkt stehen räumlich fein verteilte Werte für Δh und s entlang der Mittelschneide zur Verfügung. Von einer extrahierten Linie wurde alle $\Delta y = 1 \text{ mm}$ ein Δh - bzw. s -Wert abgespeichert. Von diesen wurde schliesslich durch Mittelwertbildung je ein charakteristischer Δh - bzw. s -Wert berechnet, der den Abnutzungszustand des Laufrads zu diesem Zeitpunkt wiederspiegeln soll.

Im vorderen und hinteren Bereich der Mittelschneiden konnte je nach Beleuchtungsverhältnissen nicht immer eine Kante detektiert werden, was zu Datenlücken führte. Weiter wird die Mittelschneide durch die Abrasion an ihrer Spitze laufend kürzer. Damit der Mittelwert nicht durch diesen Effekt oder eine eingeschränkte Datenverfügbarkeit bei gewissen Bechern beeinflusst wird, wurde die Mittelwertbildung auf den Bereich beschränkt, in welchem von allen Aufnahmen Daten vorhanden waren. Dieser Bereich, gekennzeichnet durch den horizontalen Pfeil in Abbildung 67, reicht von $y = 34$ bis 136 mm . Bezogen auf eine anfängliche Mittelschneidenlänge $L = 143 \text{ mm}$, deren Spitze im Neuzustand bei ca. $y = 10 \text{ mm}$ lag, beginnt der Bereich für die Mittelwertbildung bei $0.17 L$ und endet bei $0.88 L$. So bezieht sich der Mittelwert auf etwa zwei Drittel der ursprünglichen Mittelschneidelänge und ist robuster gegenüber Einflüssen von lokalen Schäden als die Messung mit der Schablone lediglich alle 20 mm.

6.3.3 Abrasion an den Becherausschnitten

Analog zum vorherigen Abschnitt zeigt Abbildung 68 die Zusammenfassung der Resultate der Bildauswertung der Drauf- und Frontansichten der Becherausschnitte.

In der Draufsicht (Abbildung 68a) wurden die Becherausschnitte links und rechts der Mittelschneiden spitze am meisten vertieft, wobei die Mittelschneidenspitze auch in Richtung der Radachse (radial) «zurückversetzt» wurde. In der Frontansicht (Abbildung 68b) veränderte sich die Ausschnittsform vor allem in den äussersten Bereichen.

Bei den beiden Laufrädern, die am Projektende weiter in Betrieb waren, wurden die Becherausschnitte dank der Beschichtung deutlich weniger vergrössert (violett vs. braun), obwohl das beschichtete Laufrad schon Jahr länger in Betrieb ist.

Bei den Handmessungen wurde c als Maximalwert je im linken und rechten Becherausschnitt bestimmt. Weil die Bildanalyse räumlich verteilte Daten liefert, konnten c bzw. Δc , wie bei den Mittelschneiden, über einen bestimmten Bereich gemittelt werden. In der Absicht, dass Δc möglichst gut mit Wirkungsgradänderungen bei Vollast korreliere, wurde der Bereich für die Mittelwertbildung aufgrund eines hydraulischen Kriteriums gewählt, nämlich die nominelle Strahlbreite.

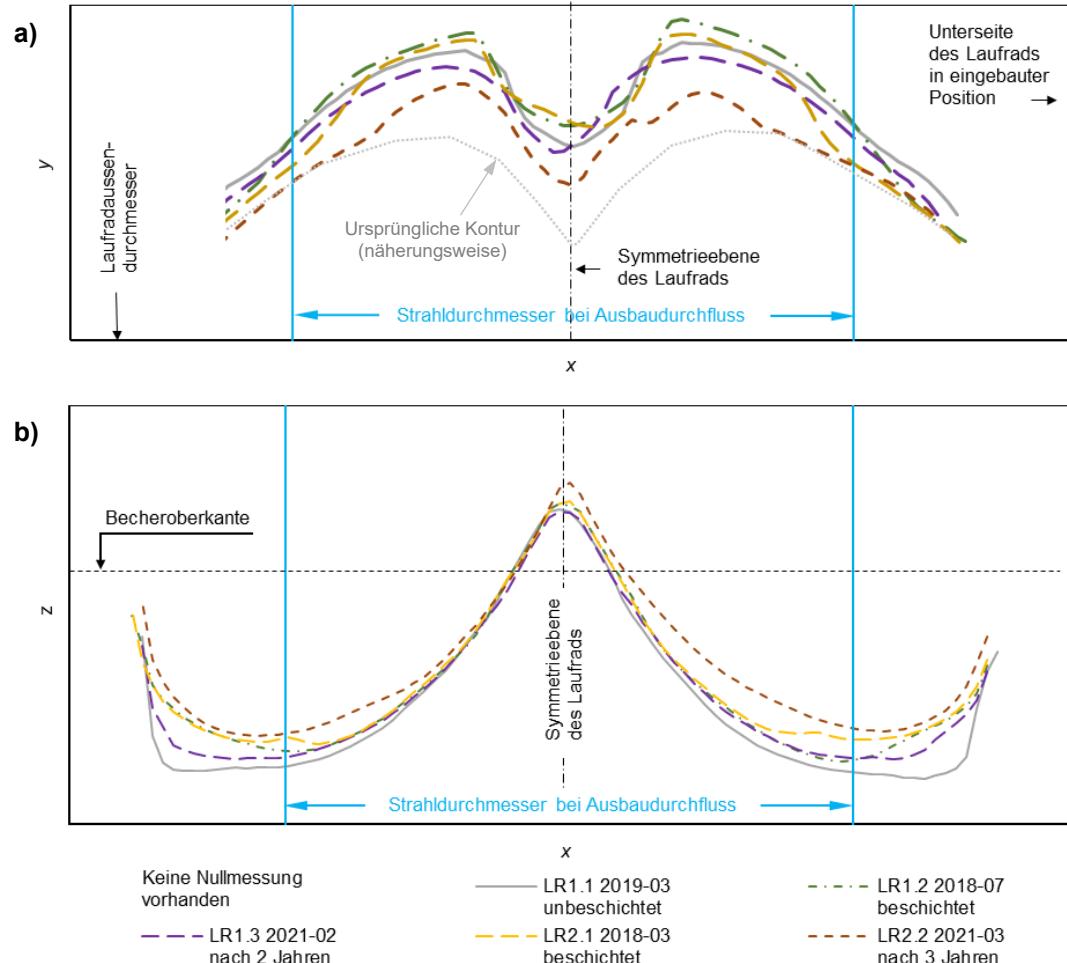


Abbildung 68: a) Draufsicht und b) Frontansicht der Becherausschnitte von fünf abgenutzten Laufrädern (zwei unbeschichtete und drei beschichtete) aufgrund von Bildauswertungen, jeweils Mittelwerte der vermessenen Becher eines Laufrads.

6.3.4 Abrasion an der Innenseite der Becherwände

Die Resultate der Messungen der Becherwanddicken gemäss Abschnitt 5.3.6 sind in Anhang B3 zusammengestellt. Bei der vordersten der fünf Messstellen (Messstelle 1) wurden die kleinsten verbleibenden Wanddicken bzw. die grössten Abrasionstiefen gemessen. Diese massgebenden Abrasions-tiefen Δe_1 sind in der Zusammenstellung im folgenden Abschnitt enthalten.

6.3.5 Verschleissgrössen im Lauf der Jahre

Abbildung 69 fasst die charakteristischen Verschleissgrössen der Laufräder in beiden MG des KW Susasca seit dessen Inbetriebnahme über die Jahre zusammen. Bei den ausgebauten Laufrädern konnte nur der Endzustand vermessen werden; der Anfangszustand wurde geschätzt. Bei den s und Δc , die mit zwei Methoden gemessen wurden, werden von Hand durchgeführten Messungen mit dem Index «M» für «*Manual measurements*» bezeichnet und die Resultate der Bildanalyse mit dem Index «IA» für «*Image Analysis*». Gemäss den Definitionen in Abbildung 29 handelt es sich jeweils um Mittelwerte über die vermessenen Becher und entsprechende Messstellen.

Bei den Mittelschneidenbreiten s_M , die mit der v-förmigen Schablone gemessen wurden, wurde zusätzlich auch der Variationsbereich angegeben (schwarze vertikale Linien). An jedem Becher wurden



das Minimum und das Maximum der Messwerte der 7 Messstellen ermittelt. Der untere Wert des angegebenen Variationsbereichs ist der Mittelwert der Minima und der obere Wert der Mittelwert der Maxima über die 10 vermessenen Becher.

Bezüglich der Mittelschneidenbreite s (zwei Diagramme in der obersten Zeile von Abbildung 69) lässt sich Folgendes feststellen:

- Gemäss den Messungen mit der Schablone (schwarze Linien) hatte s_M bei den bisher ausgebauten Laufrädern während 3 bis 4.5 Jahren bis gegen 5 mm zugenommen.
- Beim unbeschichteten eingebauten Laufrad nahm s_M in ähnlicher Geschwindigkeit zu.
- Beim beschichteten eingebauten Laufrad blieb s_M praktisch unverändert, weil die Mittelschneide an den beschädigten Stellen infolge der asymmetrischen Abrasion (Abbildung 65b) immer noch relativ scharf war und mit der v-förmigen Schablone teils sogar tiefere s_M -Werte resultierten als im Neuzustand, wodurch der Mittelwert von s über alle Messstellen im Lauf der Zeit kaum zunahm. Weiter können lokale Schäden auf der Mittelschneide neben den Punkten des Messrasters von 20 mm liegen.
- Die Bildauswertung liefert systematisch höhere s -Werte (hellblaue Linien) als die Messung mit der Schablone. Dies entspricht den unterschiedlichen Definitionen: s_M wird am höchsten Punkt der Mittelschneidenoberkante gemessen und ist aufgrund der Neigung der Tangenten schmäler als der beleuchtet Kronenbereich links und rechts der Mittelschneidenflanken, der mit der Bildauswertung erfasst wird (s_{IA}).
- Bei den beschädigten Stellen infolge der asymmetrischen Abrasion ist s_{IA} deutlich grösser als s_M . Daher nahm s_{IA} beim eingebauten beschichteten Laufrad zu, was die anlaufende Schadensentwicklung besser wiedergibt als s_M .

Bezüglich der Zunahme der Becherausschnittstiefen Δc (zwei Diagramme in der mittleren Zeile von Abbildung 69) lässt sich Folgendes feststellen:

- Gemäss den Handmessungen mit dem Massstab (schwarze Linien) betrug Δc_M bei den bisher ausgebauten Laufrädern während 3 bis 4.5 Jahren bis gegen 13 mm.
- Beim unbeschichteten eingebauten Laufrad nahm Δc_M in ähnlicher Geschwindigkeit zu.
- Beim beschichteten eingebauten Laufrad nahm Δc_M nur etwa halb so schnell zu und hat nach drei Jahren noch weniger als die Hälfte des Endwerts der ausgebauten Laufräder erreicht.
- Die Bildauswertung liefert für die eingebauten Laufräder ähnliche Δc -Werte (hellblaue Linien) wie die Messung mit dem Massstab, und bei starker Abnutzung etwas tiefere Werte. Dies passt zu den unterschiedlichen Definitionen: Δc_{IA} wird über die nominale Strahlbreite gemittelt und enthält so auch kleinere Werte neben dem Maximum, das mit der Handmessung erfasst wird (Δc_M).
- Die radiale Mittelschneidenabrasion Δy_t war meist ähnlich gross wie Δc_M , ausser beim ausgebauten unbeschichteten Laufrad. Da Δy_t ein einziger Wert pro Becher ist, kann er z.B. Veränderungen der Ausschnittsform nicht enthalten, aber ist einfach zu messen.

Bezüglich der Abrasion im Bechergrund Δf (Dreieckssymbole in den zwei Diagrammen in der untersten Zeile von Abbildung 69) lässt sich Folgendes feststellen:

- Beim bisher ausgebauten unbeschichteten Laufrad wurde der Bechergrund in drei Jahren 2.5 mm vertieft.
- Beim eingebauten unbeschichteten Laufrad schreitet die Abrasion im Bechergrund mit ähnlicher Geschwindigkeit voran, ist aber nicht massgebend für den Entscheid der Ausserbetriebnahme.
- Bei den ausgebauten stark abgenutzten beschichteten Laufrädern war $\Delta f > 0$, weil mindestens in einigen Bechern die Beschichtung im Bechergrund abgetragen wurde.
- Beim eingebauten beschichteten Laufrad ist der Bechergrund noch beschichtet und $\Delta f \approx 0$.



Bezüglich der Abrasion an der inneren Becherwand im vorderen Bereich Δe_1 (Kreuzsymbole in den zwei Diagrammen in der untersten Zeile von Abbildung 69) lässt sich Folgendes feststellen:

- Beim am stärksten abgenutzten, ausgebauten Laufrad erreichte die Abrasionstiefe Δe_1 trotz anfänglicher Beschichtung die Wanddicke (d.h. Becherwand ist dort nicht mehr vorhanden).
- Bei den zwei anderen ausgebauten Laufrädern erreichte Δe_1 ca. 5 mm, was mehr als halben Wanddicke entspricht (geschätzt aufgrund der sichtbaren Randdicke).
- Beim eingebauten unbeschichteten Laufrad erreichte Δe_1 etwa einen Drittel der Wanddicke.
- Beim eingebauten beschichteten Laufrad ist dort noch Beschichtung vorhanden und $\Delta e_1 \approx 0$.

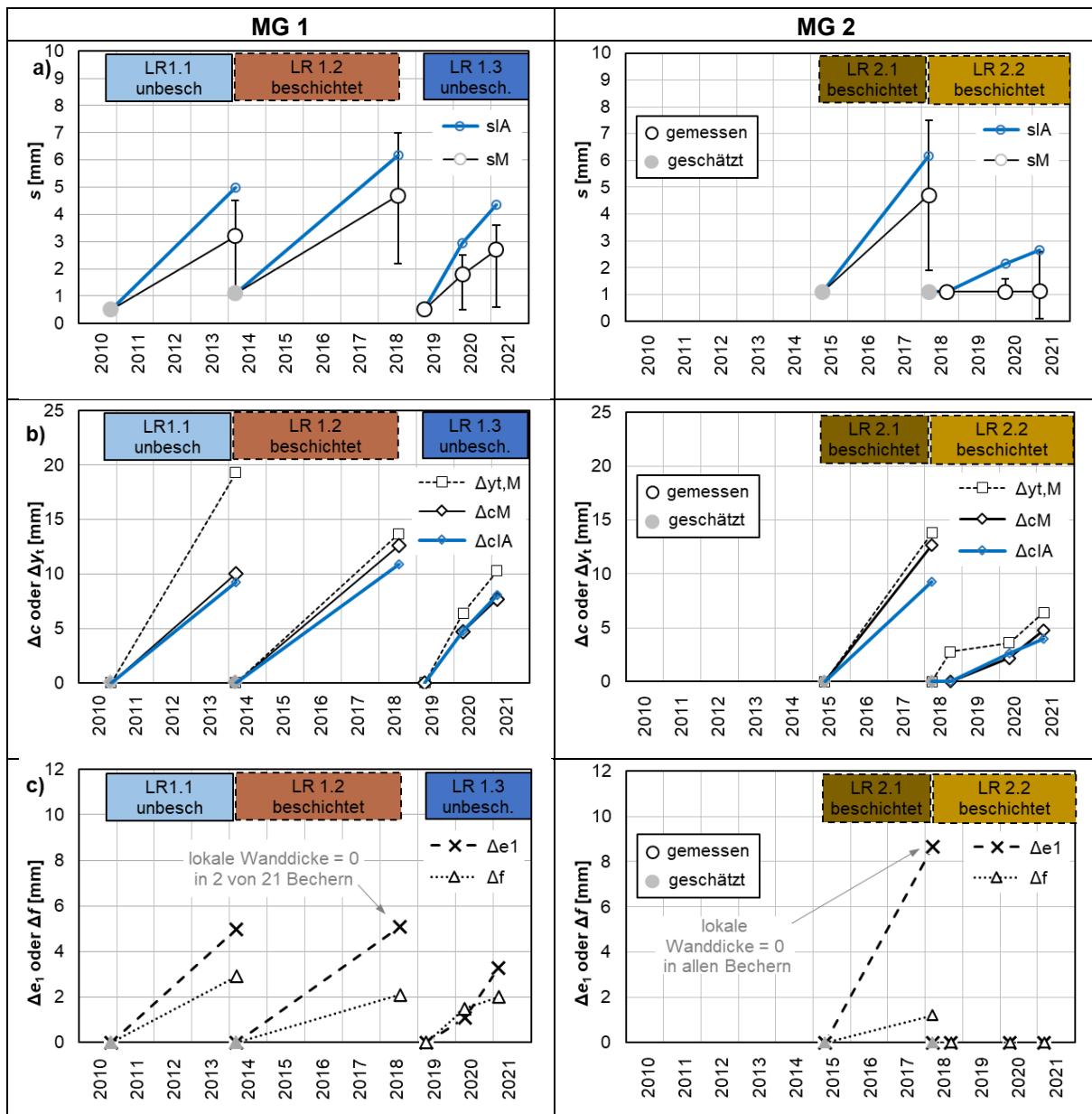


Abbildung 69: Charakteristische Abrasionsmasse der Laufradbecher in MG 1 (links) und MG 2 (rechts) am KW Susasca 2010 - 2021 aufgrund von Handmessungen (M = manual, schwarz) und aufgrund der Bildauswertung (IA = Image Analysis, blau):

- Mittelschneidenbreite s ,
- Zunahme der Ausschnittstiefe Δc und radiale Mittelschneidenspitzenabrasion Δy_t sowie
- Abrasionstiefe innen an der Becherwand Δe_1 (vorne bei Messtelle 1) und Abrasionstiefe im Bechergrund Δf .



6.3.6 Masseverlust der Laufräder infolge Abrasion

In Abbildung 70 sind die Massen (Gewichte) der vier Laufräder dargestellt, die während der Projekt-dauer am Hallenkran gewogen werden konnten (Abschnitt 5.3.8). Zum Vergleich ist links davon die nominelle Masse eines unbeschichteten Laufrads (gemäß Plan) und die rechnerisch abgeschätzte Masse der Beschichtung dargestellt. Für letztere wurde eine mittlere Schichtstärke von 500 µm auf den Innenflächen aller Becher (1.28 m^2) und eine Dichte von $12 \text{ cm}^3/\text{g}$ angenommen. Der Vergleich der tatsächlichen und der nominellen Masse eines fabrikneuen Laufrads mit einer Abweichung von ca. 5 kg oder 1.4 % bestätigt, dass zum verlässlichen Bestimmen von abrasionsbedingten Massenverlusten an Laufrädern stets eine Wägung vor dem Einbau erforderlich ist («Nullmessung»).

Da während des Forschungsprojekts kein Laufrad vor und nach seiner Einsatzdauer gewogen werden konnte, konnten bisher keine Masseverluste direkt bestimmt werden. Durch den Vergleich der Messungen mit den nominellen Werten wurden aber für die stark abgenutzten ausgebauten Laufräder die in Abbildung 70 angegebenen Masseverluste geschätzt. Der aufgrund der Wägungen geschätzte Massenverlust von ca. 25 kg für ein unbeschichtetes Laufrad erscheint plausibel, da einer mittleren Abrasionstiefe von 2.5 mm über die Becherinnenflächen entspricht (Annahme $7.7 \text{ cm}^3/\text{g}$ für Chromstahl). Der Masseverlust an einem beschichteten Laufrad ist kleiner als an einem unbeschichteten Laufrad, da die Beschichtung trotz lokal tieferer Auswaschungen das Grundmaterial auf mehr als der Hälfte der Becherinnenfläche bis zum Lebensende des Laufrads vor Abrasion schützt.

Auch bei einem unbeschichteten Laufrad ist die abradierte Masse von schätzungsweise 25 kg während gut drei Jahren (ca. 8 kg/Jahr) sehr klein im Vergleich zur mittleren Schwebstofffracht von ca. 1340'000 kg/Jahr (Abbildung 59). Der Faktor zwischen dem Masseverlust und der Masse Partikel, welche die Abrasion verursachen, beträgt so etwa 1/167'500.

Die Bestimmung des Massenverlusts an den Laufrädern mittels Wägung erlaubt kein fortlaufendes Verschleissmonitoring an den eingebauten Laufrädern. Gemessene Massenverluste können jedoch für die Kalibrierung von numerischen Simulationsmodellen wertvoll sein.

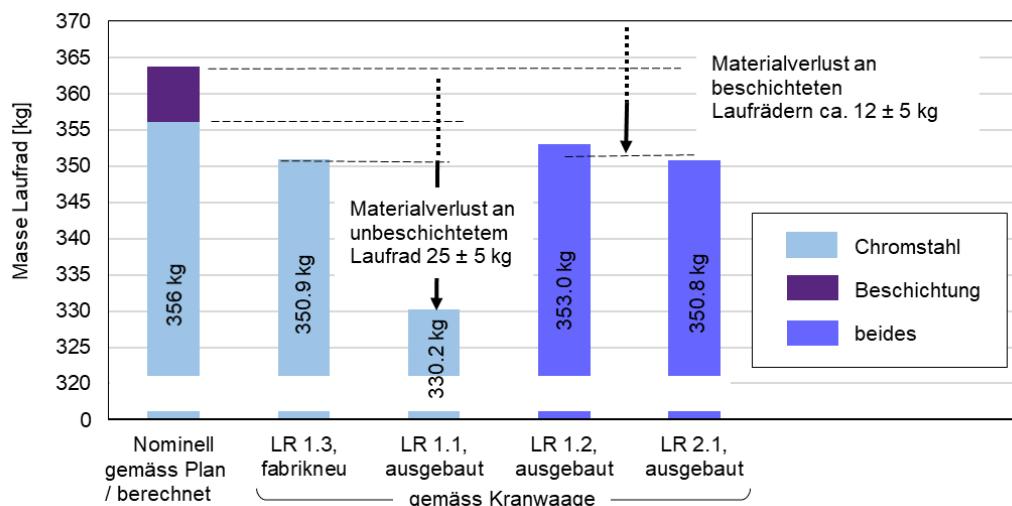


Abbildung 70: Resultate und Interpretation der Wägungen von Laufrädern des KW Susasca vor ihrem Einbau oder nach ihrem Ausbau.



6.3.7 Abrasion an den Düsen

Abbildung 71 zeigt den Zustand von Düsennadeln in beiden MG bei der letzten Inspektion während der Projektlaufzeit. Der Zustand aller vier Düsen einer MG war jeweils ähnlich.

Die Düsennadeln aus Chromstahl (ohne Beschichtung) in MG 2 waren im vorderen Bereich stark abradiert, aber noch funktionstüchtig (liessen sich noch dicht schliessen). Die Flanken des ursprünglichen Kegels wurden leicht konvex und am Kegel war das typische Rippelmuster zu erkennen (Abbildung 71b). Diese Düsenbauteile waren seit der Inbetriebnahme von MG 2 bis zum Inspektionszeitpunkt 6 Jahre im Einsatz (Abbildung 16). Sie wurden nach einer weiteren Schwebstoffssaison, also nach insgesamt 7 Jahren ersetzt. Um den Abrasionswiderstand zu erhöhen, wurden Düsennadeln und -ringe aus Stellit eingebaut.

Bei MG 1 wurden die originalen Düsenbauteile aus Chromstahl bereits im Sommer 2018 durch solche aus Stellit ersetzt. Die originalen Düsenbauteile waren seit 2010, also 7.5 Jahre im Einsatz. An diesen Düsennadeln ist nach zweijährigem Einsatz keine Abrasion von Auge erkennbar, mit Ausnahme einer minimalen Vergrösserung des Spitzenradius auf weniger als ca. 0.5 mm (Abbildung 71a).

Es wird erwartet, dass die hochwertigen Düsenbauteile deutlich länger als 7 Jahre im Einsatz sein werden. Um die Demontage und -montagearbeit zu erleichtern, wird der spätere Ersatz von Düsenbauteilen idealerweise mit einem häufiger erforderlichen Laufradersatz koordiniert.

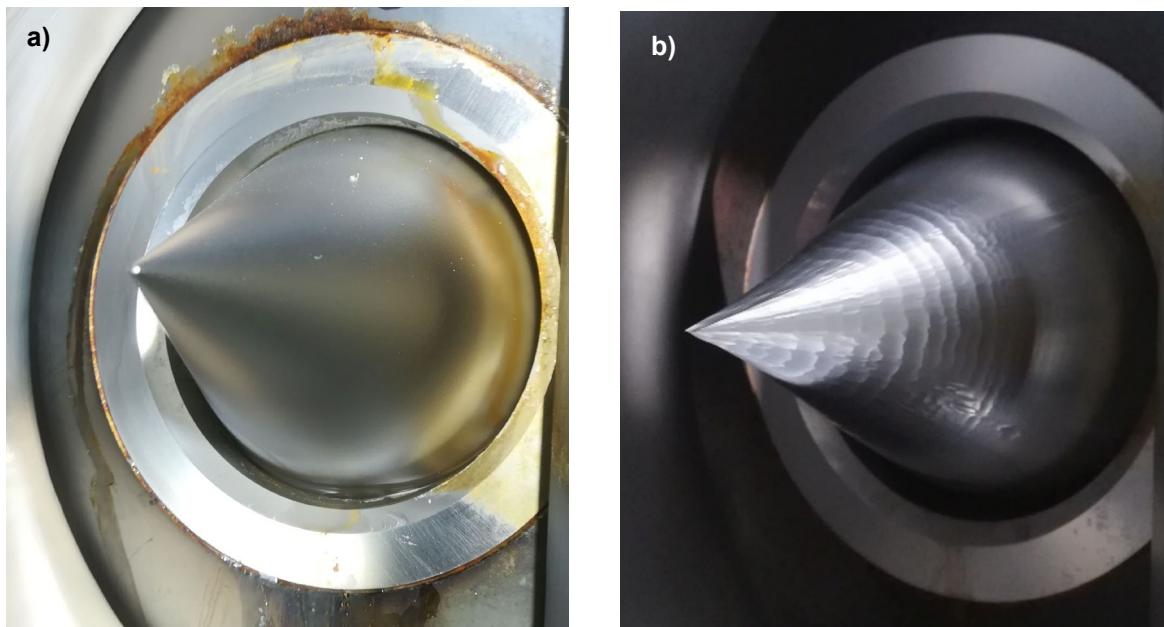


Abbildung 71: Beispiele von Düsennadeln des KW Susasca im Feb./März 2021: a) aus Stellit nach 2 Jahren in Betrieb in MG 1, b) aus Chromstahl mit Abrasion nach 6 Jahren in Betrieb in MG 2 (Fotos: VAW).



6.4 Abrasion je nach Partikelbelastung (IEC-Abrasionsmodell)

6.4.1 Übersicht

In diesem Abschnitt werden die Mittelschneidenbreiten und Becherausschnittstiefen aus Abbildung 69 zusammen mit den Partikelbelastungen aus Abbildung 61 ausgewertet. So können für verschiedene Stellen im Becher bzw. Anwendungsfälle die entsprechenden Werte des empirischen Koeffizienten C_g im Abrasionsmodell gemäss IEC 62364 (2019) mit den Vereinfachungen gemäss Felix (2017) spezifisch für das KW Susasca bestimmt werden. Das Abrasionsmodell wurde im Abschnitt 3.1.1 beschrieben und C_g ist in Gleichung (5) definiert.

6.4.2 Charakteristische Relativgeschwindigkeit

Für die rechnerische Abschätzung der Abrasion ist die charakteristische Relativgeschwindigkeit zwischen der Strömung und dem betrachteten Bauteil eine wichtige Grösse. Bei Peltonturbinen hängt die Fliessgeschwindigkeit des Wassers von der Nettofallhöhe ab. Da die Abrasion durch erhöhte SSC verursacht wird, welche vor allem bei hoher Wasserführung der Susasca auftreten, wurde die Nettofallhöhe beim Ausbaudurchfluss bestimmt. Da das Laufrad im Betrieb dreht, ist die charakteristische Relativgeschwindigkeit am Becher etwa halb so gross wie die Strahlgeschwindigkeit.

Für das KW Susasca ergibt sich:

- | | | |
|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| – Bruttofallhöhe | $h_B = 365 \text{ m}$ | gemäss Abschnitt 4.1, |
| – Ausbaudurchfluss | $Q_A = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ | gemäss Abschnitt 4.1, |
| – Energieverlusthöhe | $h_v = 27 \text{ m}$ | bei Q_A gemäss Abbildung 38, |
| – Nettofallhöhe | $h_n = 338 \text{ m}$ | $= h_B - h_v$, |
| – Wasserstrahlgeschwindigkeit | $w_{inj} = 81.4 \text{ m/s} \approx 293 \text{ km/h}$ | gemäss Abschnitt 3.1.1, |
| – Charakt. Relativgeschw. am Becher: | $w_{run} = 40.7 \text{ m/s} \approx 147 \text{ km/h}$ | gemäss Abschnitt 3.1.1. |

6.4.3 Bestimmung von Koeffizienten für das vereinfachte IEC-Abrasionsmodell

In Abbildung 72 sind die Zunahmen der Mittelschneidenbreiten Δs_{IA} und die Vergrösserung der Becherausschnittstiefen Δc_{IA} der beiden MG in Funktion des Abrasionspotentials zu den entsprechenden Zeitpunkten der Turbinenvermessungen dargestellt. Die Δs und Δc sind die Differenzen der s- bzw. c-Werte gemäss Bildanalyse (Index «IA») aus Abbildung 69. Den Werten aus der Bildanalyse wurde der Vorzug gegeben, weil die s-Werte beim beschichteten Laufrad die Schadensentwicklung mit einer lokalen Verbreiterung besser charakterisieren als die s-Werte von den Messungen mit der v-förmigen Schablone, die über drei Jahre praktisch konstant blieben, obwohl an der Mittelschneide Grundmaterial erodiert wurde.

Jeder s-Wert zu einem Zeitpunkt ist ein Mittelwert über einen Grossteil der Mittelschneidenlänge und über alle ca. 8 Becher, von denen jeweils am eingebauten Laufrad systematische Fotos erstellt werden konnten. Jeder c-Wert zu einem Zeitpunkt ist ein Mittelwert über den Bereich der Strahlbreite und ebenfalls über alle ca. 8 vermessenen Becher.

Das «Abrasionspotential» ist das Produkt aus der Partikelbelastung pro Becher PL_b und der dritten Potenz der charakteristischen Relativgeschwindigkeit w zwischen der Strömung und dem Laufrad. Im Gegensatz zur Partikelbelastung ist im «Abrasionspotential» die Fallhöhe berücksichtigt. Auf der oberen horizontalen Achse sind die entsprechenden Schwebstofffrachten SSL näherungsweise angegeben (spezifisch für Turbinen wie im KW Susasca). Auf der rechten vertikalen Achse sind die Verschleissgrössen jeweils mit der inneren Becherbreite B normiert. Insbesondere $\Delta s/B$ ist für die Abschätzung der Wirkungsgradreduktion von Bedeutung.

Die Partikelbelastung wurde mit $k_{\text{hardness}} = 0.61$ berechnet und bezieht sich auf das Turbinengrundmaterial. Im Sinne eines Grundfalls wurde dieser Wert unabhängig von einer Laufradbeschichtung angenommen, da auch bei beschichteten Laufrädern die hier untersuchten Abrasionen im Millimeterbereich an den Mittelschneiden und Becherausschnitten das Grundmaterial betreffen, nachdem die Beschichtung dort über ihre ganze Dicke abgetragen wurde.

Die systematischen Fotos wurden vom unbeschichteten Laufrad erstmals im März 2019 erstellt; vom unbeschichteten Laufrad erst im Frühjahr 2020. Bis zur letzten Turbinenvermessung in der Projektlaufzeit sind daher beim unbeschichteten Laufrad die Zunahme der Verschleissgrößen und die zugehörigen Partikelbelastungen über zwei Schwebstoffssaisons (2019 und 2020) bekannt; beim unbeschichteten nur über eine Schwebstoffaison (2020).

Am unbeschichteten Laufrad in MG 1 nahm die Mittelschneidenbreite während zwei Schwebstoffssaisons von 0.5 mm um $\Delta s_{IA} = 3.9$ mm zu, während die Becherausschnitte um $\Delta c_{IA} = 8.1$ mm tiefer wurden. Am beschichteten Laufrad in MG 2 betrugen $\Delta s_{IA} = 0.5$ mm und $\Delta c_{IA} = 1.4$ mm in einer Schwebstoffaison.

Vom Koordinatenursprung aus wurde je eine Trendlinie in die Δs - und Δc -Punkte des unbeschichteten bzw. des beschichteten Laufrads gelegt. Die Steigung der Trendlinien entspricht dem Parameter C_g in der Gleichung (5) und gibt an, wie «rasch» die Grundmaterial-Abrasion voranschreitet. Die ermittelten C_g -Werte sind in Tabelle 7 zusammengestellt und von SI-Einheiten (Abbildung 72) in diejenigen Einheiten umgerechnet, die in IEC 62364 (2019) verwendet werden.

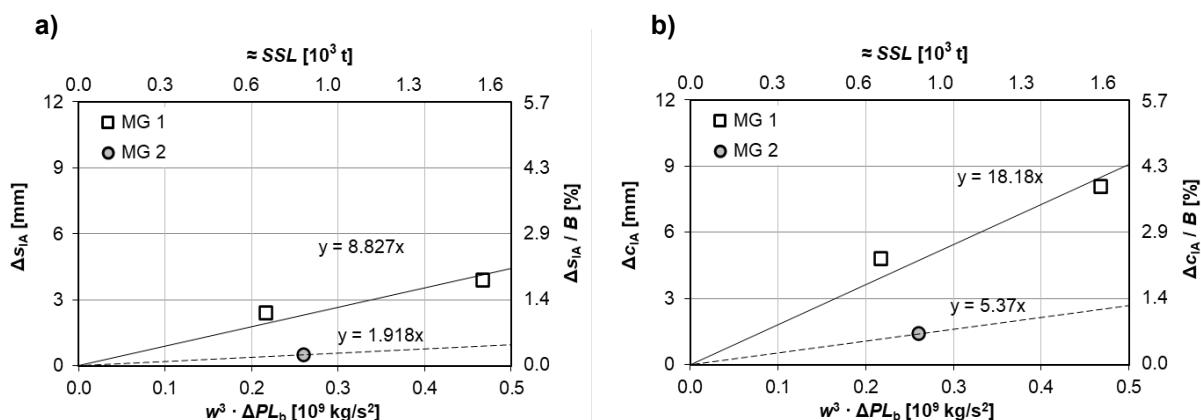


Abbildung 72: Zunahme der a) Breite der Mittelschneide Δs und b) Tiefe der Becherausschnitte Δc der Laufradbecher der MG 1 (leere Symbole) und der MG 2 (grau gefüllte Symbole) des KW Susasca vom Winter 2018/2019 bis Winter 2020/2021 in Funktion der Relativgeschwindigkeit w und der *Particle Load* eines Bechers PL_b gemäss IEC 62364 (2019) bzw. der ungefähren Schwebstofffrachten (SSL).

Tabelle 7: Kalibrierparameter für das IEC-Abrasionsmodell für die Laufräder des KW Susasca 2018/2019 – 2020/2021.

	C _g -Werte gemäss Gleichung (5)			
	unbeschichtet		beschichtet (neben Schadensstellen)	
	$\text{m} \cdot \text{s}^2/\text{kg}$	$\text{mm} / (\text{h} \cdot \text{g/l} \cdot \text{m}^3/\text{s}^3)$	$\text{m} \cdot \text{s}^2/\text{kg}$	$\text{mm} / (\text{h} \cdot \text{g/l} \cdot \text{m}^3/\text{s}^3)$
Zunahme der Mittelschneidenbreite Δs_m	$8.83 \cdot 10^{-12}$	$31.8 \cdot 10^{-6}$	$1.92 \cdot 10^{-12}$	$6.9 \cdot 10^{-6}$
Zunahme der Becherausschnittstiefen Δc_m	$18.2 \cdot 10^{-12}$	$65.4 \cdot 10^{-6}$	$5.37 \cdot 10^{-12}$	$19.3 \cdot 10^{-6}$



Die C_g -Werte für die beschichteten Laufräder beziehen sich nicht auf die Abrasion der Beschichtung, sondern auf die Abrasion des Grundmaterials an den Stellen, an denen die Beschichtung bereits abgetragen wurde und das blanke Grundmaterial sichtbar ist, d.h. auf die 2. Phase der Abrasion gemäss Felix (2017). Die tieferen C_g -Werte für die beschichteten Laufräder bestätigen, dass die Beschichtung, die neben den Schadenstellen noch vorhanden ist, die Abrasionsrate des Grundmaterials um etwa drei Viertel reduziert (siehe unterschiedliche Steigungen der Trendlinien in Abbildung 72).

6.4.4 Vergleich mit Rai et al. (2020b) und Diskussion von Verbesserungsmöglichkeiten

Um die im vorherigen Abschnitt bestimmten C_g -Werte mit einem grösseren Datensatz vergleichen zu können, wurden sie den entsprechenden Angaben gemäss Rai et al. (2020b) gegenübergestellt, die in Abschnitt 3.1.4 zusammengefasst sind. Es wurden die C_g -Werte des unbeschichteten Laufrads betrachtet, da die «kombinierte» Abrasion von Grundmaterial an Mittelschneiden oder Bechereintrittskanten an Schadensstellen neben beschichteten Flächen von Rai et al. (2020b) nicht behandelt wurde.

Für den Vergleich wurden die Parameter K_f und p für die Mittelschneidenverbreiterung und die Becherausschnittsvertiefung von Rai et al. (2020b) aus Tabelle 1 im mit der Referenzgrösse RS , d.h. der inneren Becherbreite von $B = 0.21$ m für das KW Susasca, in C_g -Werte gemäss Gl. (5) umgerechnet. Dabei wurde $K_m = 1$ für die Abrasion des Grundmaterials eingesetzt.

Wie im Abschnitt 3.1.4 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 $w = 40.7$ m/s im KW Susasca beträgt der Umrechnungsfaktor $w^{0.4} = 4.37$. So haben alle C_g -Werte in Tabelle 8 dieselbe Einheit.

Tabelle 8: 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 $RS = 0.21$ m	$C_g = \frac{K_f}{RS^P} K_m$ Gl. (5) [mm/(h·g/l·m ³ /s ³)] für unbeschichtete Laufräder		Faktor zwischen C_g-Wert gemäss Rai et al. (2020b) im Vergleich zu dieser Studie
		Rai et al. (2020b) mit Einfluss der Bauteilgrösse und bezogen auf w^3	Vorliegende Studie KW Susasca 2019-2021 mit $RS = 0.21$ m	
Verbreiterung der Mittelschneiden Δs	$0.21^{-2.69} = 66.6$	$0.68 \cdot 10^{-6} \cdot 66.6 = 45.3 \cdot 10^{-6}$	$31.8 \cdot 10^{-6}$	≈ 1.4
Vertiefung der Becherausschnitte Δc	$0.21^{-1.11} = 5.65$	$4.37 \cdot 1.1 \cdot 10^{-6} \cdot 5.65 = 27.2 \cdot 10^{-6}$	$65.4 \cdot 10^{-6}$	≈ 0.4

Angesichts der vielen Einflussfaktoren und deren Unsicherheiten ist positiv, dass die C_g -Werte beider Studien in derselben Grössenordnung liegen.

Mit den Koeffizienten gemäss Rai et al. (2020b), die auf einem grösseren und allgemeineren Datensatz beruhen, wäre die Zunahme der Mittelschneidenbreiten am KW Susasca in den zwei Schwebstoffsaisons 2019 und 2020 um 40 % überschätzt und die Vertiefung der Becherausschnitte um 60 % unterschätzt worden.



Mögliche Gründe für die Abweichungen der Resultate zwischen den beiden Studien, und damit auch Ansatzpunkte für die Verbesserung der Kalibrierung des IEC-Modells, werden wie folgt diskutiert:

- Der Verschleiss an den Mittelschneiden und den Bechereintrittskanten hängt auch vom Entwurf der Peltonbecher ab. Daher sind die Δs und Δc nicht stets proportional. Die Bechereintrittskanten bei den relativ kleinen Laufrädern des KW Susasca waren besonders gegen aussen hin dünn bzw. scharf (Abbildung 64 links unten). Im Bereich der Becherausschnitte kann auch Kavitation auftreten, welche den Materialabtrag beschleunigt.
- Der Faktor für die Bauteilgrösse RS^P differiert mit den p -Werten gemäss Rai *et al.* (2020b) bei einer Becherbreite wie am KW Susasca um einen Faktor von mehr als 10 zwischen der Mittelschneidenverbreiterung und der Becherausschnittsvertiefung (zweite Spalte in Tabelle 8). Es handelt sich also um einen sehr sensiblen Parameter, wenn RS stark von 1.0 m abweicht und p zwischen 2 und 3 liegt, wie Rai *et al.* (2020b) für die Mittelschneidenverbreiterung ermittelten. Für die verlässlichere Quantifizierung des Einflusses der Bauteilgrösse sind weitere Messungen an Turbinen mit unterschiedlichen Abmessungen wünschenswert.
- Der Einfluss des Exponenten der Geschwindigkeit $x = 3.4$ bzw. 3 macht bei einer Fallhöhe wie am KW Susasca einen Faktor von mehr als 4 aus. Es ist also wichtig, einen physikalisch möglichst zutreffenden und vergleichbaren x -Wert zu verwenden.
- Die Verschleissmasse (geometrische Definitionen und Art der Mittelwertbildung) sind nicht in allen Studien beschrieben worden und sind nicht einheitlich. Die hier verwendeten Definitionen mit Mittelwertbildung über einen Grossteil der Mittelschneidenlänge bzw. der Becherausschnittsbreite führen zu kleineren Δs bzw. Δc als wenn Maximalwerte, wie bei Messungen von Hand üblicher, verwendet werden.
- Bei anfänglich beschichteten Bauteilen ist die Variabilität der Grundmaterialerosion höher als bei beschichteten Bauteilen (der Beschichtungsverlust tritt zumindest in einer ersten Phase an «zufälligen» Stellen auf und kann sich von Becher zu Becher anders entwickeln).
- Die Partikelbelastungen können kaum genauer als $\pm 20\%$ ermittelt werden.
- Die C_g -Werte der vorliegenden Studie beruhen auf wenigen Datenpunkten und sind deshalb nicht breit abgestützt. Wünschenswert wäre eine Untersuchung über die gesamte Einsatzdauer von mehreren Laufrädern.

Für die verbesserte Kalibrierung eines Abrasionsmodells für Peltonturbinen beliebiger Grösse, mit möglicherweise deutlich unterschiedlichen hydraulischen Entwürfen und allfälliger Beschichtung, sind also weitere Untersuchungen erforderlich. Wenn weitere Daten vorliegen, wird empfohlen zu prüfen, ob mit einer Klassierung für bestimmten Merkmale der Turbinen und mit der Angabe von Anwendungsgrenzen die Prognose-Unsicherheit des Modells reduziert werden kann.

6.4.5 Anwendung des Abrasionsmodells

In Felix *et al.* (2022) wird in einem Beispiel aufgezeigt, wie das IEC-Abrasionsmodell zur Abschätzung der Abrasion an Peltonlaufrädern angewendet und die Messungen von einem Kraftwerk auf ein anderes Kraftwerk mit unterschiedlicher Fallhöhe übertragen werden.

Bei der Abschätzung der Abrasion ist die Unsicherheit geringer, wenn die Turbine, an welcher die Abrasion abgeschätzt werden soll, ähnlich ist wie die Turbine, von der die Referenzdaten stammen.

Das IEC-Abrasionsmodell ist für die Ingenieurspraxis von Bedeutung, weil dessen Anwendung deutlich weniger aufwändig und daher eher ausserhalb der Forschung anwendbar ist als numerischen Simulationen der Abrasion.



6.5 Turbinenwirkungsgrad-Reduktionen

6.5.1 Reduktion der Volllast-Wirkungsgrade im Lauf der Zeit

Abbildung 73 zeigt die Veränderungen der Wirkungsgrade beider MG bei Quasi-Volllastbetrieb im Lauf der Jahre. Aus dem Leitsystem konnten Daten seit dem 29.07.2011 exportiert werden; die Daten der ersten ca. 8 Betriebsmonate seit der Inbetriebnahme der MG 1 am 11.11.2010 waren nicht mehr verfügbar. Als Quasi-Volllastbetrieb wurde klassiert, wenn der Durchfluss einer Turbine über 90 % ihres Ausbaudurchflusses lag ($Q > 0.9 Q_A = 0.9 \cdot 1.0 \text{ m}^3/\text{s} = 0.9 \text{ m}^3/\text{s}$).

Für MG 1 (oben) liegt bis zum Projektende im Dez. 2021 eine Wirkungsgradhistorie über 11 Jahre vor, in welcher zwei unbeschichtete und ein beschichtetes Laufrad im Einsatz waren. Bei MG 2 (unten), die im Frühjahr 2015 in Betrieb ging, waren über 7 Jahre zwei beschichtete Laufräder im Einsatz.

Da die MG vor allem im Winterhalbjahr nicht mit Quasi-Volllast in Betrieb waren, sind dann keine Datenpunkte vorhanden. Aufgrund der zufälligen Fluktuationen der zugrundeliegenden Messgrößen, vor allem des Durchflusses, streuen die minütlichen Wirkungsgradpunkte um einige Prozente. Um diese Streuung zu reduzieren, wurde tägliche Mittelwerte (dunklere Punkte) berechnet. Die Wirkungsgradänderungen können an den vertikalen Hilfslinien, die einen Abstand von 1 % haben, abgelesen werden.

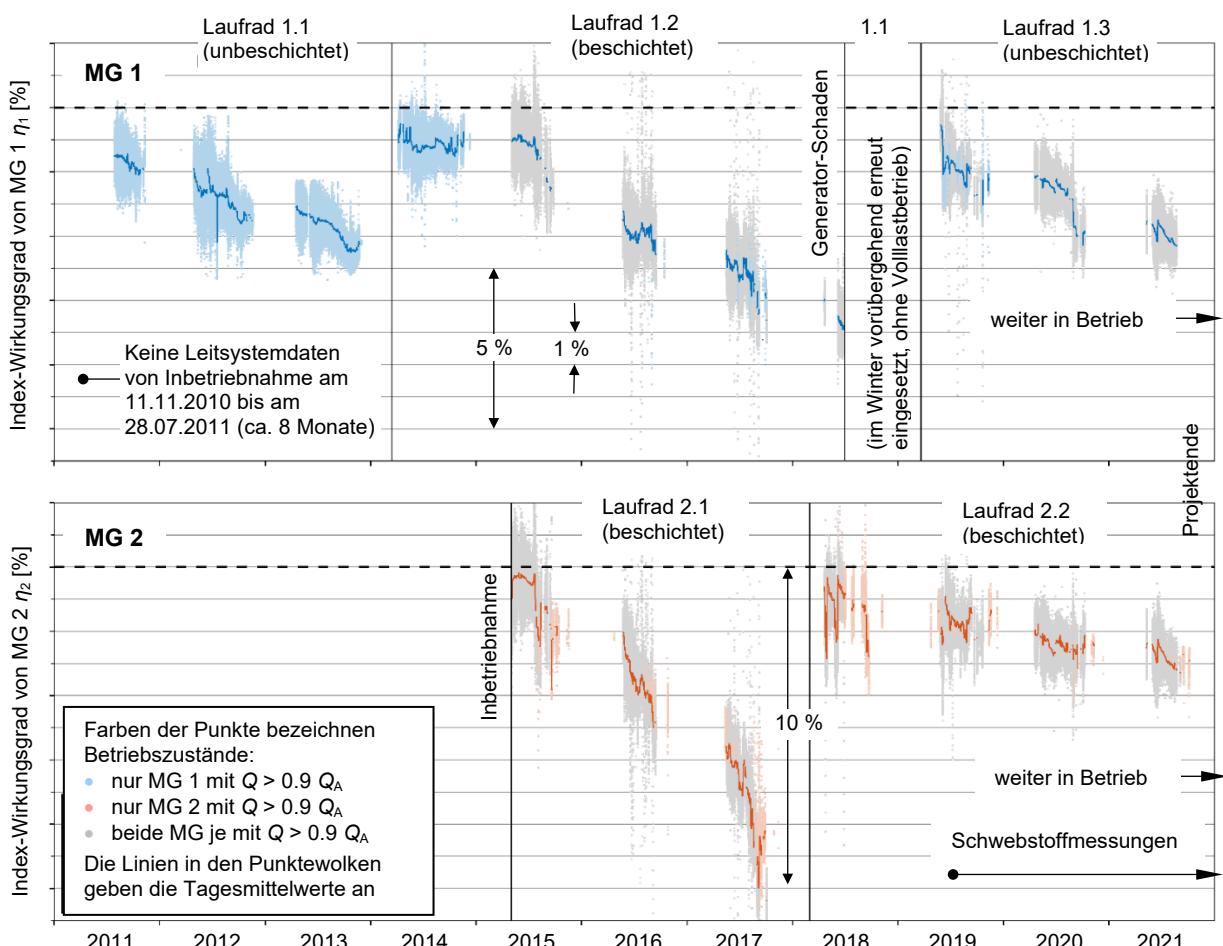


Abbildung 73: Historie des Index-Wirkungsgrades für beide Maschinengruppen (MG) des KW Susasca während Quasi-Volllastbetrieb der jeweiligen MG im Lauf der Jahre 2011-2019 (Leitsystemdaten: OEES; Auswertung: VAW).



Da der anfängliche Wirkungsgrad bei der Inbetriebnahme der MG 1 nicht bekannt ist, wurde ein Referenzwirkungsgrad (gestrichelte Linie) für beide MG so eingetragen, dass er – auf die nächste Prozentlinie gerundet – über dem höchsten bisher ausgewerteten Wirkungsgrad-Tagesmittelwert eines fabrikneu eingebauten Laufrads liegt (MG 2 im Frühjahr 2015). Bei den fünf unbeschichteten und den beschichteten Laufrädern, die vor und während der Projektdauer zwischen 3 und 4.5 Jahre im Einsatz waren, nahmen die Wirkungsgrade um einige Prozent und in einem Fall bis gegen 10 % ab.

Abbildung 74 zeigt die Wirkungsgradabnahmen aus der vorherigen Abbildung nun aufgeteilt nach den einzelnen Laufrädern (statt pro MG) und in Funktion der gewichteten Betriebsstunden (statt der Kalenderzeit). Die Betriebsstunden wurden mit dem Anteil der in Betrieb stehenden Düsen gewichtet, d.h. mit der Anzahl der geöffneten Düsen / 4. So können die Entwicklungen der Turbinenwirkungsgrade der einzelnen Laufräder besser verglichen werden. Sind beispielsweise zwei von vier Düsen während einer Stunde in Betrieb, entspricht dies einer halben gewichteten Betriebsstunde. Wenn zwei von vier Düsen in Betrieb sind, wird eine halb so grosse Abrasionsrate erwartet wie im Quasi-Volllastbetrieb.

In Tabelle 9 sind die ausgewerteten Wirkungsgradabnahmen $\Delta\eta$ pro Laufrad zusammengestellt. Diese beziehen sich auf den Zeitraum seit dem Einbau eines fabrikneuen Laufrads bis zu dessen letztmaligem Ausbau (Lebensende) oder dem Projektende (Stand der Auswertungen). Weiter ist die über die Einsatzzeit gemittelte Abnahmerate des Wirkungsgrads pro Schwebstoffsaaison angegeben.

Tabelle 9: Wirkungsgradabnahmen $\Delta\eta$ der Laufräder am KW Susasca 2011 – 2021 (Betriebsdaten: OESS; Auswertung: VAW).

Lauf- rad	Beschich- tung	$\Delta\eta$ am Ende [%]	Einsatzdauer [Schweb- stoffsaisons]	Status am Projektende	Mittlere $\Delta\eta$ -Rate [%/Schwebstoffsaison]
1.1	Nein	≈ 2.7	3	ausgebaut	≈ 0.9
1.2	Ja	≈ 6.0	4.5 (max.)	ausgebaut	≈ 1.3
1.3	Nein	≈ 3.0	3+	weiter in Betrieb	≈ 1.0
2.1	Ja	≈ 8.5 (max.)	3 (min.)	ausgebaut	≈ 2.8 (max.)
2.2	Ja	≈ 2.0 (min.)	4+	weiter in Betrieb	≈ 0.5 (min.)

In dieser Betrachtung mit der Wirkungsgradabnahmen pro Schwebstoffsaison ist kein günstiger Effekt der Beschichtung zu erkennen. Es wird vermutet, dass die Partikelbelastungen in den einzelnen Schwebstoffsaisons stark unterschiedlich waren, oder allenfalls weitere Effekte an den Düsen eine Rolle spielten, wie im Folgenden diskutiert wird.

Beim Laufrad 1.2 war die durchschnittliche Wirkungsgradabnahme pro Schwebstoffsaison trotz Beschichtung höher als beim Laufrad 1.1. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass in den Jahren 2011–2013, als das Laufrad 1.1 in Betrieb war, der Entsander bereits mit zwei Kammern in Betrieb war, obwohl nur eine Turbine vorhanden war. In der ersten Ausbauetappe wurde der Entsander also maximal mit halbem Ausbaudurchfluss beaufschlagt, wodurch eine höhere Absetzleistung und eine bessere Sedimentabscheidung zu erwarten sind als seit dem Einbau der zweiten Maschine.

Beim Laufrad 2.1 war die Wirkungsgradabnahme pro Schwebstoffsaison trotz Beschichtung außerordentlich hoch, was die Frage aufwarf, ob die Beschichtung die übliche Qualität aufwies und sich der Mehrpreis beschichteter Laufräder wirtschaftlich rechtfertigen lasse. Daher wurde im Jahr 2019 wieder, wie bei der Inbetriebnahme der Anlage, ein unbeschichtetes Laufrad in MG 1 eingebaut.

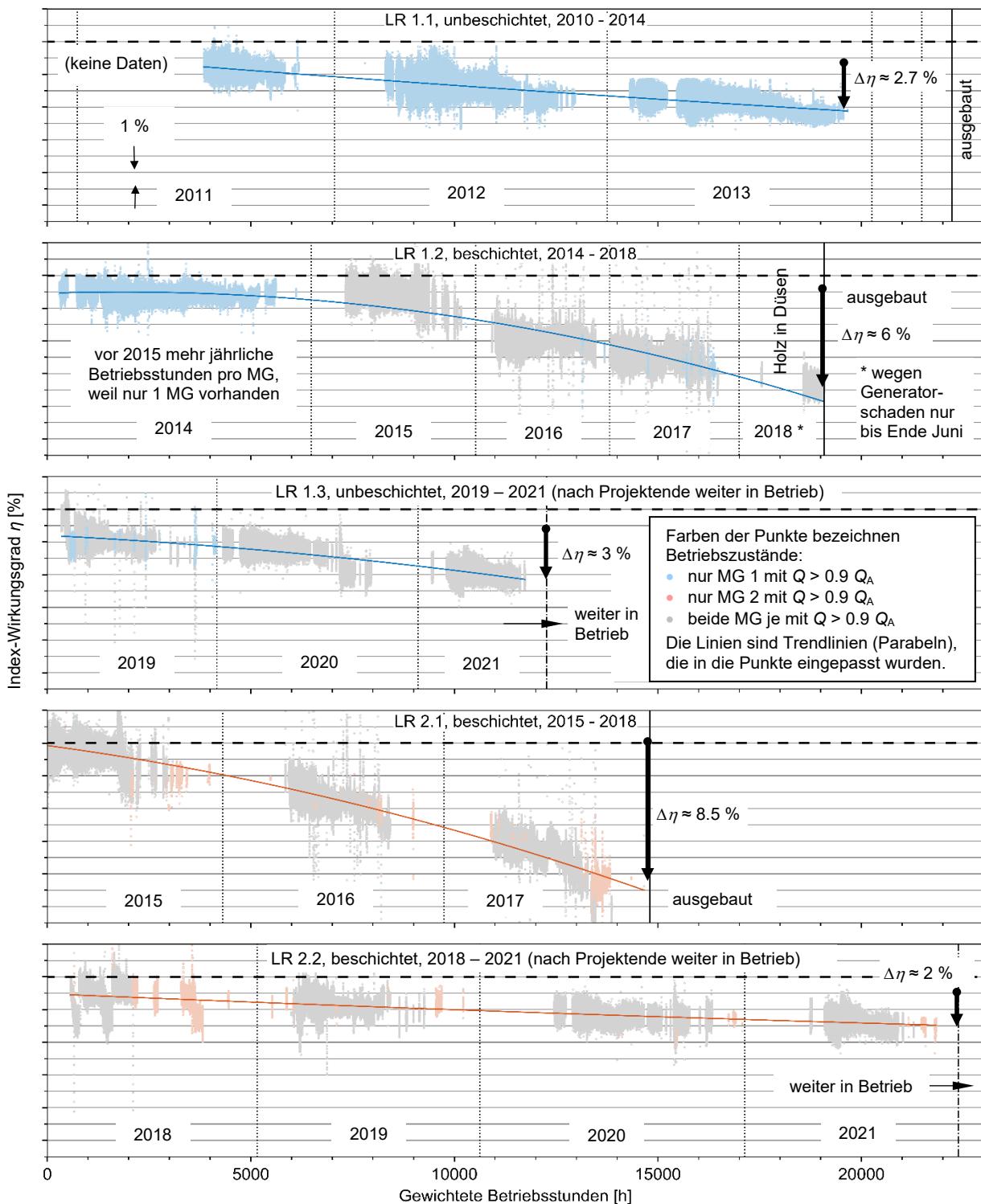


Abbildung 74: Index-Wirkungsgrade der MG des KW Susasca mit den fünf Laufrädern, die bis zum Projektende im Einsatz waren oder gewesen sind, in Funktion der gewichteten Betriebsstunden (Gewichtungsfaktor = Anzahl Düsen in Betrieb / 4). (Leitsystemdaten: OESS; Auswertung bis 14.11.2021: VAW).



In den Jahren 2015 bis 2017 nahmen die Wirkungsgrade bei beiden MG trotz Beschichtung der Laufräder 1.2 und 2.1 stark ab. Es wird vermutet, dass die Schwebstofffrachten in der Susasca im Zulauf zur Wasserfassung in jenen Jahren besonders hoch waren:

- Ein möglicher Grund ist, dass in der Schwemmebene *Chant Blau* oberstrom der Wasserfassung die Kies- und Sandentnahmen (als ökologische Ausgleichsmassnahme des Kraftwerksausbaus) eingestellt worden waren und sich daher der Sedimenthaushalt der Schwemmebene zumindest vorübergehend veränderte.
- Weiter kann durch das Hochwasser im Jahr 2014 (Abbildung 39a) eine grosse Sedimentmenge in die Schwemmebene eingetragen worden sein. So können in den folgenden zwei bis drei Jahren bei erhöhtem Abfluss der Susasca grössere Sedimentmengen als üblich zur Wasserfassung und teilweise durch die Turbinen gelangt sein.

Überdurchschnittlich hohe natürliche Schwebstofffrachten in den Jahren 2015 bis 2017 lassen sich nicht mehr direkt quantifizieren, da in jenen Jahren noch keine Schwebstoffmessgeräte installiert waren. Die Anzahl der Staubecken- und Entsanderspülungen in jenen drei Jahren, insbesondere im Jahr 2015, war jedenfalls höher als in den Jahren 2020 und 2021 (Abbildung 40 und Abbildung 42b).

Nebst Variationen im natürlichen Schwebstoffaufkommen wird die Partikelbelastung der Turbinen durch die Betriebsweise des Kraftwerks beeinflusst. Als Hauptgrund für besonders hohe Partikelbelastungen in den Jahren 2015 und 2016 werden die je ca. 20 Entsanderspülungen, die mit Überlastbetrieb der Kammern durchgeführt wurden (Abbildung 42a), gesehen. Dadurch gelangten vermutlich auch gröbere Partikel (bis 0.6 statt bis 0.3 mm) ins Triebwasser, was beschichtete Laufräder besonders beansprucht bzw. nach stellenweisem Verlust der Beschichtung zur ausgeprägten beobachteten Grundmaterialabrasion führen kann.

Ein zusätzlicher möglicher Grund für starke Wirkungsgradabnahmen ist eine vorübergehend schlechtere Qualität der Wasserstrahlen in der Turbine infolge starker Abrasion oder hängen gebliebenem Geschwemmsel in den Düsen. Beides lässt sich nicht mehr rekonstruieren, da die ausgebauten Düseenteile nicht mehr vorhanden sind und das Entfernen von Geschwemmsel aus den Düsen nicht stets protokolliert wurde. Beispielsweise im April und Mai 2018 war der Wirkungsgrad von MG 1 vorübergehend ca. 2 % tiefer, was dem Einfluss von Geschwemmsel in den Düsen zugeordnet werden konnte. Die Datenpunkte aus jener Periode wurden für die Auswertung der abrasionsbedingten Wirkungsgradabnahmen ausgeschlossen.

Während der Projektlaufzeit vom Herbst 2018 bis Ende 2021 waren die Wirkungsgradabnahmen im Vergleich zu früheren Jahren moderat, was vor allem damit erklärt wird, dass keine grösseren Hochwasser auftraten. In geringerem Mass dürfte gegen das Projektende hin auch die verbesserte Platzierung und Parametrisierung der Sedimentniveausonden im Entsander beigetragen haben, die Partikelbelastung der Turbinen zu begrenzen, da der Bedarf an Entsanderspülungen zuverlässiger aus der Ferne erkannt und rechtzeitig gespült werden kann. Weiter wurde der Überlastbetrieb einer Entsanderkammer während der Spülung der anderen weitgehend vermieden (Abbildung 42a). Zu einer eher geringen Wirkungsgradabnahme trug auch bei, dass kurz vor bzw. nach dem Projektbeginn bei beiden MG neue Laufräder eingebaut wurden und die ausgeprägteren Wirkungsgradabnahmen später auftraten.



6.5.2 Reduktion der Volllast-Wirkungsgrade in Funktion der Partikelbelastung

Im ersten Unterkapitel der Wirkungsgrade wurde untersucht, wie diese im Lauf der Jahre oder der gewichteten Betriebsstunden abgenommen haben. Im Folgenden soll untersucht werden, wie die Wirkungsgrade in Funktion der Partikelbelastung abgenommen haben.

Gemäss IEC-Abrasionsmodell (Abschnitt 3.1.1) nehmen die Abrasionstiefen und näherungsweise auch die Mittelschneidenbreiten proportional zur Partikelbelastung zu. Gemäss Maledet (2008) und Zhang (2016) wird für unbeschichtete Laufräder, in welchen die Mittelschneiden zunehmend stumpfer werden, eine progressive Wirkungsgradabnahme erwartet (3.2).

Seit der Installation der Schwebstoffmessgeräte an der Wasserfassung des KW Susasca und bis zum Ende des Forschungsprojekts, also in den Jahren 2019 - 2021, ist im Gegensatz zu den früheren Jahren auch die Partikelbelastung bekannt (Abschnitt 6.2.12). In Abbildung 76 ist dargestellt, wie die Quasi-Volllastwirkungsgrade der beiden MG in Funktion der Partikelbelastung abgenommen haben. Zum Vergleich sind dieselben Datenpunkte vorher in Abbildung 75 in Funktion der gewichteten Betriebsstunden dargestellt (= Ausschnitt der letzten drei Jahre aus Abbildung 73).

Mit dem unbeschichteten Laufrad (in MG 1, blaue Trendlinien) nahm der Wirkungsgrad wie erwartet progressiv in Funktion der Betriebsstunden oder der Partikelbelastung ab. Hingegen mit dem beschichteten Laufrad (in MG 2, rote Trendlinien), bei welchem die Mittelschneiden trotz lokaler oder asymmetrischer Schädigung recht scharf blieben, nahm der Wirkungsgrad etwa linear ab in Funktion der Betriebsstunden oder der Partikelbelastung. Aufgrund der Unsicherheiten in den Wirkungsgraden kann die Kurvenform nicht genauer bestimmt werden.

Gemäss Abbildung 63 tritt mehr als die Hälfte der jährlichen Partikelbelastung im August auf. Um diese Hauptphase der Partikelbelastung sichtbar zu machen, wurden die Punkte aus dem Monat August jeweils dunkelbraun hervorgehoben. Die Breite der August-Punktewolken macht in Abbildung 75 etwa ein Achtel der jährlichen gewichteten Betriebsstunden aus; in Abbildung 76 hingegen mehr als die Hälfte der jährlichen Partikelbelastung.

Die Kurven in Abbildung 76 dienen als Grundlage, um zukünftige Wirkungsgradabnahmen für unbeschichtete oder beschichtete Laufräder in Funktion der Partikelbelastung für das KW Susasca vorauszusehen.

Die Kurven in Abbildung 76 ist jedoch fallspezifisch und können nicht direkt auf eine Pelton-turbine anderer Grösse übertragen werden. Stattdessen wird für die Prognose von Wirkungsgradabnahmen an hydraulischen Turbinen empfohlen, in zwei Schritten vorzugehen:

- Berechnung der Abrasion (Geometrieveränderungen, z.B. Mittelschneidenverbreiterung) aufgrund der Partikelbelastung und weiterer Parameter (z.B. gemäss IEC-Abrasionsmodell),
- Berechnung der Wirkungsgradabnahme in Funktion der normierten Geometrieveränderung (z.B. relative Mittelschneidenbreiten).

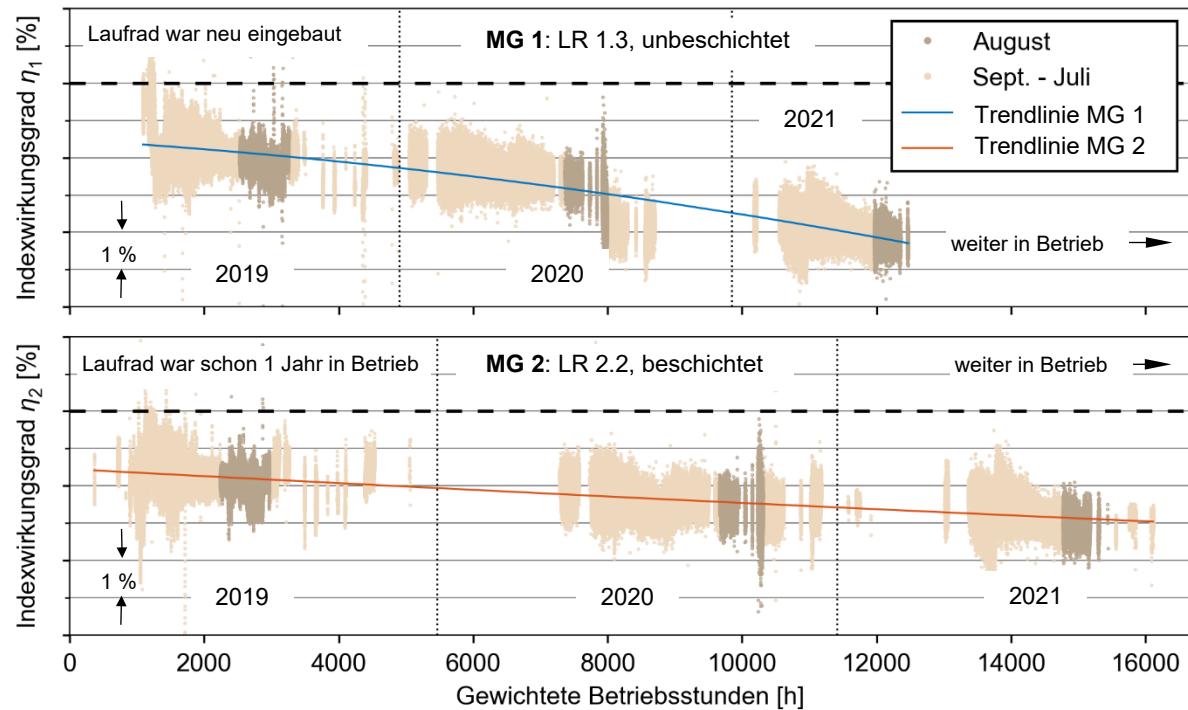


Abbildung 75: Index-Wirkungsgrad der beiden Maschinengruppen im Quasi-Vollastbetrieb in Funktion der gewichteten Betriebsstunden (gewichtet mit dem Anteil der betriebenen Düsen) 2019 - 2021.

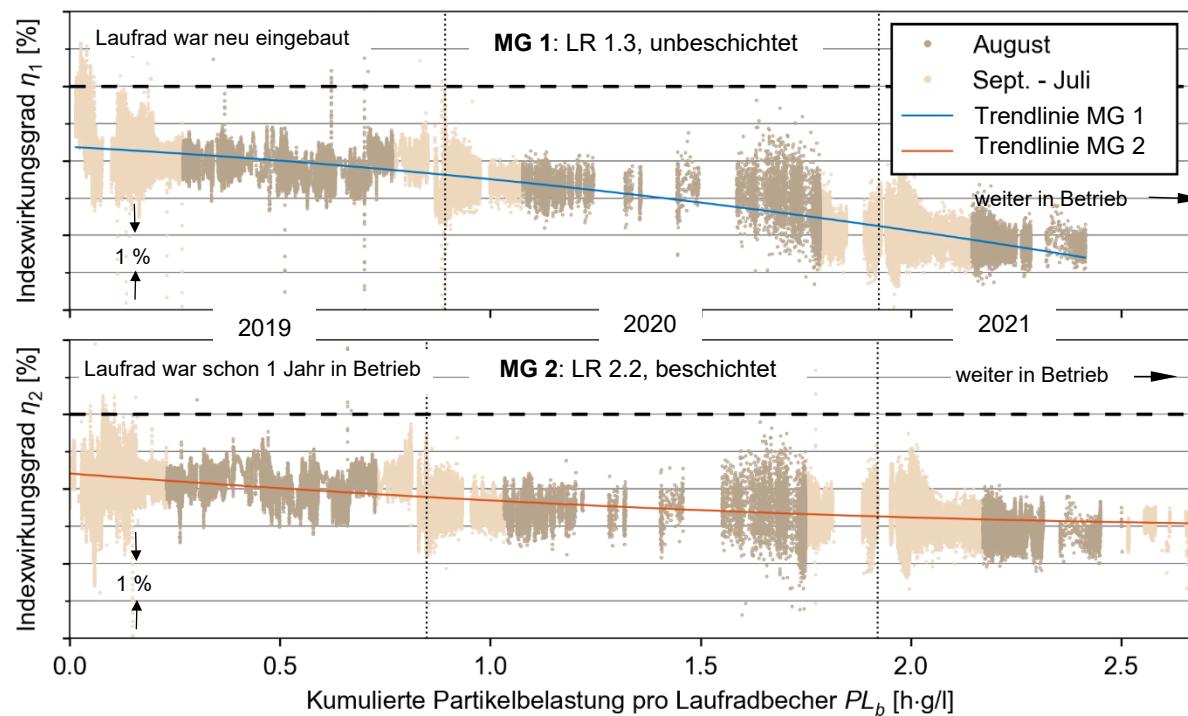


Abbildung 76: Index-Wirkungsgrad der beiden Maschinengruppen im Quasi-Vollastbetrieb in Funktion der kumulierten Partikelbelastung pro Laufradbecher PL_b 2019 - 2021.



6.5.3 Reduktion des Vollast-Wirkungsgrades in Funktion von Verschleissgrößen

In diesem Abschnitt wurde untersucht, wie die ermittelten Wirkungsgradabnahmen von ausgewählten Verschleissgrößen abhängen. In Abbildung 77 sind für alle Laufräder (LR), die am KW Susasca am Projektende in Betrieb waren oder gewesen sind, die Wirkungsgradabnahmen in Funktion der Mittelschneidenbreite s , der Zunahme der Becherausschnittstiefe Δc und der radialen Abrasion an der Mittelschneidenspitze Δy_t dargestellt.

Die Diagramme links zeigen Index-Wirkungsgrade in Funktion der absoluten Verschleissgrößen, die Diagramme rechts zeigen dieselben Daten in Form von Wirkungsgradabnahmen in Funktion der relativen Verschleissgrößen (normiert mit der inneren Becherbreite B). Die Normierung der Verschleissgrößen mit der inneren Becherbreite dient dazu, den Vergleich mit Laufrädern mit anderen Becherbreiten zu erleichtern. In den Diagrammen links sind unterschiedliche anfängliche Wirkungsgrade sichtbar; in den Diagrammen rechts sind die Abnahmen auf den anfänglichen Wirkungsgrad des jeweiligen Laufrads bezogen. Aufgrund der Fluktuationen in den Leitsystemdaten (Streuung der Wirkungsgradpunkte in den vorherigen Abbildungen) wird die Unsicherheit der Wirkungsgradwerte zu den Vermessungszeitpunkten auf $\pm 0.5\%$ geschätzt.

Wie bei der Bestimmung der Koeffizienten für das Abrasionsmodell, wurden die s - und Δc -Werte von den Bildauswertungen (Index «IA») verwendet. Für Δy_t wurden die Daten der Handmessungen verwendet, weil sich diese Größe mit einer einzigen Messung pro Becher mit einem Massstab einfacher und schneller bestimmen lässt als mit Bildanalyse.

Bei den drei ausgebauten Laufrädern konnte nur der Endzustand vermessen werden; für deren anfängliche s , Δc und Δy_t -Werte wurden die anfänglichen Werte des unbeschichteten Laufrads 1.1 angenommen und im Fall von beschichteten Laufrädern eine nominale Schichtdicke von 0.3 mm berücksichtigt. Bei den beiden Laufrädern, die am Projektende weiter in Betrieb waren (farbige Linien), sind Datenpunkte zwischen der ersten und letzten Messung verfügbar.

Bei den beiden ausgebauten, beschichteten Laufrädern nahm der Wirkungsgrad in ähnlicher Art mit dem Verschleiss ab (gestrichelte Linien). Ebenso ist der Verlauf für die beiden unbeschichteten Laufräder (ausgezogene Linien) ähnlich. Die Linien des beschichteten Laufrads, das am Projektende weiter in Betrieb war (violett), liegt oft zwischen den erwähnten Liniengruppen. Bei diesem Laufrad gab es zwar nennenswerten Grundmaterialabrasion an den Becherausschnitten inklusive der Mittelschneidenspitze, aber an der Mittelschneide gab es nur lokal eine ausgeprägte Verbreiterung (braune Linie in Abbildung 67b).

Brekke *et al.* (2002) gaben als Richtwert an, dass der Wirkungsgrad einer (unbeschichteten) Peltonturbine bei Vollast um 1 % abnehme, wenn deren Mittelschneiden eine Breite von 1 % der inneren Becherbreite erreichen. Dieser Punkt ist zusätzlich in Abbildung 77b eingetragen. Für das unbeschichtete Laufrad, das am Projektende in Betrieb war, stimmen die Messwerte gut mit diesem Richtwert überein. Bei den ausgebauten Laufrädern verliefen die Wirkungsgradabnahmen vermutlich nicht linear vom angenommenen Anfangswert zum Endwert, sondern entwickelten sich progressiv (nach oben gebogene Kurvenverläufe). So verliefen ihre Wirkungsgradabnahmen innerhalb des ersten Betriebsjahrs vermutlich ebenfalls in der Nähe des erwarteten Richtwerts.

Für das Prognostizieren von Wirkungsgradabnahmen wäre wünschenswert, dass eine klare und allgemeingültige Abhängigkeit von einer Verschleissgröße für unbeschichtete oder beschichtete Laufräder bestünde. Da sich der Verschleiss an den Mittelschneiden und Becherausschnitten nicht stets proportional entwickelt, erscheint es erforderlich, mehr als eine Verschleissgröße zu verwenden.

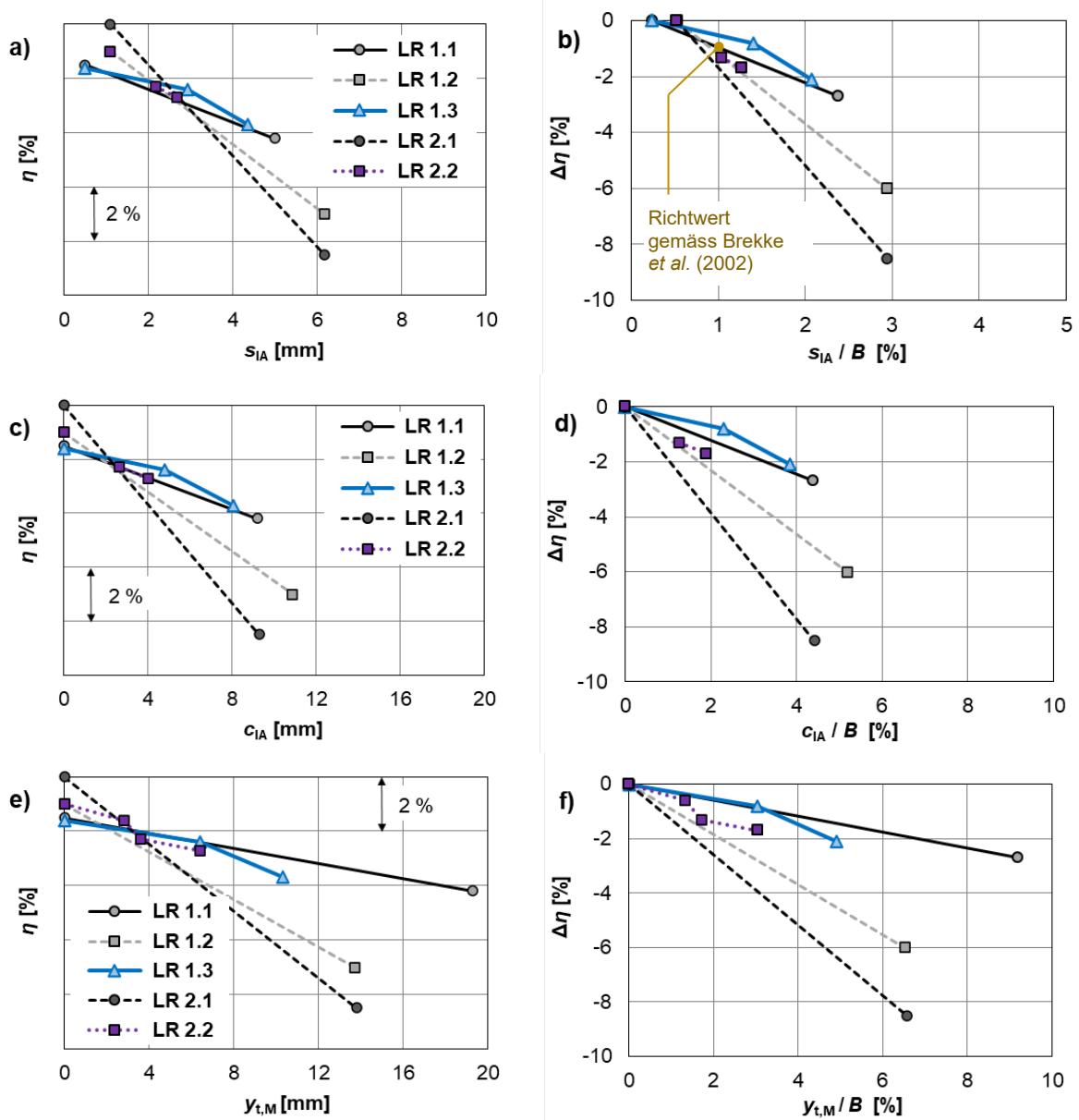


Abbildung 77: Wirkungsgradabnahmen je nach Verschleissgrößen am KW Susasca 2010-2021: a) und b) in Funktion der absoluten bzw. relativen Mittelschneidenbreite (von Bildanalyse), c) und d) in Funktion der absoluten bzw. relativen Zunahme der Becherauschnittstiefe (von Bildanalyse), e) und f) in Funktion der absoluten bzw. relativen radialen Abrasion an der Mittelschneidenspitze Δy_t (Messungen mit Massstab).



6.5.4 Reduktion des Wirkungsgrades über den gesamten Lastbereich

Während in den Abschnitten 6.5.1 bis 6.5.3 Wirkungsgradabnahmen bei Quasi-Volllast präsentiert wurden, werden in diesem Abschnitt auch Wirkungsgradabnahmen bei Teillast bzw. über den gesamten Lastbereich untersucht.

Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, bewirkt hydro-abrasiver Verschleiss an einer Peltonturbine (mit konstanter Fallhöhe) in der Regel nicht ausschliesslich eine vertikale Verschiebung der Kurven im Wirkungsgradiogramm. Tendenziell sind im tiefen Teillastbereich, wenn nicht nur weniger Düsen in Betrieb sind, sondern diese auch nur teilweise geöffnet sind, grössere Wirkungsgradabnahmen zu erwarten. Bei teilgeöffneten Düsen ist der Durchmesser der Wasserstrahlen kleiner und die absolute Mittelschneidenbreite fällt stärker ins Gewicht, nebst weiteren Effekten.

Die Wirkungsgrade über den gesamten Lastbereich wurden jeweils zwischen den Phasen mit starker Schwebstoffbelastung, also im Winterhalbjahr ausgewertet. Damit auch Punkte mit Quasi-Vollastbetrieb dabei sind, wurde in der Regel der Zeitraum von anfangs Oktober bis Ende Mai berücksichtigt (ausser beim Einbau eines neuen Laufrads im Frühjahr oder am Projektende). Zur Reduktion der Streuung wurden Durchflussklassen von $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ (5 % von Q_A) gebildet und die Mittelwerte der Wirkungsgrade pro Klasse berechnet.

Für die Laufräder, welche während der Projektdauer in Betrieb waren, ist die Veränderung der Teillastwirkungsgradkurven im Lauf der Jahre 2018/2019 bis 2021 im Anhang C1 dargestellt. Die Linien bezeichnen die Mittelwerte der Wirkungsgrade in jeder Durchflussklasse.

- Bei MG 2 mit dem beschichteten Laufrad sind ausreichend viele Datenpunkte vorhanden, dass zwischen jeder Schwebstoffsaison eine «relativ glatte» Kurve ausgewertet werden konnte, welche eine konsistente Kurvenschar bilden. Während der Wirkungsgrad bei Quasi-Volllast über die vier Jahre um ca. 2 % abnahm (siehe auch unten rechts in Abbildung 74), nahm er bei halber Last ($0.5 Q_A = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) um ca. 5.5 % und bei tiefer Teillast von $0.2 Q_A = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ um ca. 9 % ab.
- Bei MG 1 mit dem unbeschichteten Laufrad sind weniger Daten vorhanden (1 Jahr weniger) und nicht in jeder Periode zwischen den Schwebstoffsaisons kamen alle Durchflusswerte vor. Dennoch kann eine konsistente Kurvenschar approximiert werden. Während der Wirkungsgrad bei Quasi-Volllast über die drei Jahre um ca. 3 % abnahm (siehe auch in Abbildung 74), nahm er bei halber Last um ca. 5 % und bei 20 %-Last um ca. 6 % ab.

Beim beschichteten Laufrad war also die Wirkungsgradabnahme bei Teillast ausgeprägter. Solche Informationen sind nützlich, um zu entscheiden, welche MG ausserhalb der Periode mit dem Zweimashinenbetrieb bevorzugt in Betrieb sein soll, um die Stromproduktion im Winter zu maximieren – nebst anderen Bedingungen wie Revisionsarbeiten etc.



6.6 Wirtschaftlichkeit

6.6.1 Schwebstoffbedingte Turbinenkosten

Infolge des hydro-abrasiven Verschleisses fallen zusätzliche Kosten für Unterhalt und Ersatz der Turbinenbauteile an. Diese schwebstoffbedingten Kosten wurden für die Laufräder und Düsen gemäss Tabelle 10 abgeschätzt. Für die Bestimmung der jährlichen Kosten wurde ein kalkulatorischer Zinssatz von 3 % berücksichtigt. Die weniger ausgeprägte Abrasion an übrigen Turbinenteilen wie den Strahlablenkern und weiteren Anlageteilen (Spülgasse am Wehr, Entsander, Druckleitung und Unterwasserkanal) wurde vernachlässigt. Weiter wurden die Mindererlöse infolge tieferer mittlerer Wirkungsgrade bei hohem Verschleiss vernachlässigt.

Mit dem Kenntnisstand am Ende des Forschungsprojekts resultierten schwebstoffbedingte spezifische Turbinenkosten von ca. 28 CHF/t bzw. 0.15 Rp/kWh.

Tabelle 10: Zusammenstellung der jährlichen schwebstoffbedingten Turbinenkosten am KW Susasca (Datengrundlage 2019-2021).

Bauteil	Annahmen	Kosten
Laufrad	Kosten für ein neues beschichtetes Laufrad ca. 100 kCHF (Beschaffung und Laufradwechsel) Lebensdauer bei sorgfältigem Betrieb ca. 6 Jahre (gegenüber bisheriger Betriebserfahrung optimistische Annahme, damit die schwebstoffbedingten Kosten nicht überschätzt werden) Ohne sedimentbedingte Abrasion könnte ein unbeschichtetes Laufrad (ca. 70 kCHF) rund 25 Jahre im Einsatz sein (Ermüdung, Abrasion durch Wasser, technol. Fortschritt)	ca. 18 kCHF/a pro MG – ca. 4 kCHF/a pro MG <hr/> ca. 14 kCHF/a pro MG
Düsen	Kosten für neuen Satz Stellit-Düsenbauteile ca. 70 kCHF Lebensdauer bei sorgfältigem Betrieb ca. 12 Jahre (= 2 Laufradersatzintervalle, vermutlich eher konservative Annahme) Ohne sedimentbedingte Abrasion könnte ein Satz CrNi-Düsenbauteile (ca. 40 kCHF) 25 Jahre im Einsatz sein	ca. 7 kCHF/a pro MG – ca. 2 kCHF/a pro MG <hr/> ca. 5 kCHF/a pro MG
Total für 2 MG	Beide MG werden etwa gleich stark beansprucht Bezogen auf turbinierte Feinsedimentfracht von 1340 t/Jahr Bezogen auf Energieproduktion mit Arbeitswert 0.78 kWh/m ³ und mittlere SSC = 0.042 g/l	ca. 38 kCHF/a ca. 28 CHF/t ca. 0.15 Rp/kWh

6.6.2 Wirtschaftlichkeit einer Laufrad-Beschichtung

Gemäss Tabelle 10 betragen die Mehrkosten für ein beschichtetes Laufrad ca. 30 kCHF im Projektzeitraum. Es stellte sich die Frage, ob diese Mehrkosten wirtschaftlich begründet werden können.

Dafür wurde die Wirkungsgradänderungen $\Delta\eta$ der beiden MG im Vollastbetrieb gemäss Abbildung 74 bzw. Tabelle 9 im Abschnitt 6.5.1 verglichen:

- Beim unbeschichteten Laufrad $\Delta\eta \approx -1.0\%$ pro Jahr
- Beim beschichteten Laufrad $\Delta\eta \approx -0.5\%$ pro Jahr

Mit der Laufradbeschichtung wird also eine Mehrproduktion erwartet, die um 0.5 % pro Jahr zunimmt. Bei einer nominalen jährlichen Produktion von 26 GWh/Jahr für beide MG gemäss Abschnitt 4.1,

d.h. 13 GWh/Jahr für eine MG, und einem angenommenen Strompreis von 120 CHF/MWh entspricht dies im Lauf der Jahre den Mehrerlösen gemäss Tabelle 11.

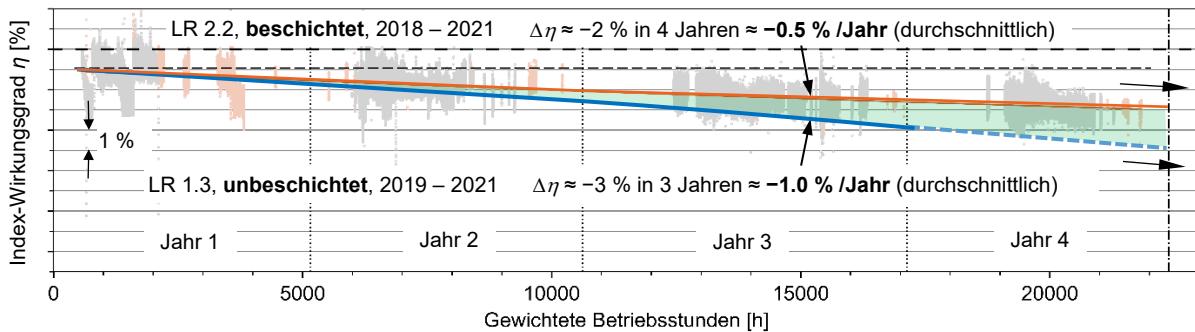


Abbildung 78: Wirkungsgradabnahme eines beschichteten Laufrads über 4 Jahre (LR 2.2 in MG 2 aus Abbildung 74) im Vergleich zu derjenigen eines unbeschichteten Laufrads (LR 1.3 in MG 1).

Tabelle 11: Mehrerlös pro MG mit einem beschichteten gegenüber einem unbeschichteten Laufrad (Datengrundlage 2019-2021).

Einsatzdauer seit Einbau [Jahren]	Wirkungsgradunterschied		Mehrproduktion über Einsatzdauer [MWh]	Mehrerlös über Einsatzdauer [kCHF]
	am Ende [%]	im Mittel [%]		
1	0.5	0.25	33	4
2	1.0	0.5	130	16
3	1.5	0.75	293	35
4	2.0	1.0	520	62

Wenn ein Laufrad mindestens 3 Jahre in Betrieb sein kann, ist der erwartete Mehrerlös in der letzten Spalte von Tabelle 11 höher als die Mehrkosten für die Beschichtung. Da das beschichtete Laufrad von MG 2 am Ende des Projekts 4 Jahre in Betrieb (2018-2021) war, wird eine Laufradbeschichtung am KW Susasca als wirtschaftlich angesehen. Um eine Einsatzdauer von mehr als 3 Jahren und die moderate Wirkungsgradabnahme gemäss aktueller Betriebserfahrung zu erreichen, sind übermässige Sedimentbelastungen möglichst zu vermeiden (vorsichtiger Betrieb des Ensanders und Anlage bei grösseren Hochwassern ausser Betrieb nehmen).

Die folgenden weiteren Effekte einer Beschichtung wurden vernachlässigt:

- Die Beschichtung erlaubt in der Regel eine längere Einsatzdauer des Laufrads. Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit einer Beschichtung gegenüber der obigen Abschätzung.
- Ein beschichtetes Laufrad hat in der Regel einen leicht tieferen anfänglichen Wirkungsgrad als ein unbeschichtetes (z.B. um 0.5 %), weil die Mittelschneiden anfangs weniger scharf und die Becherinnenseiten anfangs rauher sind. Dieser Effekt konnte in der vorliegenden Studie nicht quantifiziert werden, da nicht an derselben MG ein unbeschichtetes und ein beschichtetes Laufrad im Einsatz waren und die ausgewerteten Wirkungsgrade eine höhere Unsicherheit aufweisen, als wenn die Wirkungsgradmessungen mit aufwändigeren Methoden durchgeführt worden wären. Durch diesen Effekt verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit einer Beschichtung gegenüber der obigen Abschätzung.

Es wird davon ausgegangen, dass diese beiden gegenläufigen Effekte zusammen dazu führen, dass es am KW Susasca mit den damaligen Marktsituation ein Jahr länger dauern kann, bis eine Beschichtung wirtschaftlich wird – im vorliegenden Fall also vier Jahre.



6.6.3 Wirtschaftlich optimaler Zeitpunkt für Laufradersatz

In diesem Abschnitt wurde untersucht, nach wie vielen Jahren der Ersatz eines beschichteten Laufrads im KW Susasca wirtschaftlich ist, sofern nicht vorher ein Ersatz aus technischen Gründen erforderlich wird.

Je länger ein Laufrad in Betrieb ist, desto mehr nimmt sein Wirkungsgrad ab. Dementsprechend steigen die Minderproduktion und die Mindererlöse. Diese wurde mit folgenden Annahmen berechnet:

- Typische monatliche Produktionen einer MG in den Jahren 2019-2021 (Linie mit hellblauer Füllfläche in Abbildung 79a), d.h. von April bis Oktober 75 % der Jahresproduktion.
- Typische monatliche Partikelbelastungen Jahre 2019-2021 (Abbildung 63), d.h. ca. 57 % der Partikelbelastung im August.
- Wirkungsgradabnahme in zwei Szenarien:
 - 1) günstiger Fall, wie bei MG 2 in den Jahren 2018-2021 mit dem beschichteten LR 2.2 (Abbildung 74), d.h. lediglich -2 % in 4 Jahren, linear angenommen.
 - 2) weniger günstiger Fall mit -4% in 4 Jahren, leicht progressiv, ähnlich wie bei ausgebauten beschichteten Laufrädern, aber nicht so stark
- Wirkungsgradabnahme proportional zur Partikelbelastung angesetzt (Abbildung 76), ergibt Wirkungsgradverläufe gemäss den violetten Linien für die beiden Szenarien in Abbildung 79a.
- Grundannahme für Strompreis 120 CHF/MWh sowie +50 %, um die Auswirkungen zu studieren.

Die berechneten kumulierten Mindererlöse seit dem Einbau eines neuen beschichteten Laufrades sind in Abbildung 79b dargestellt.

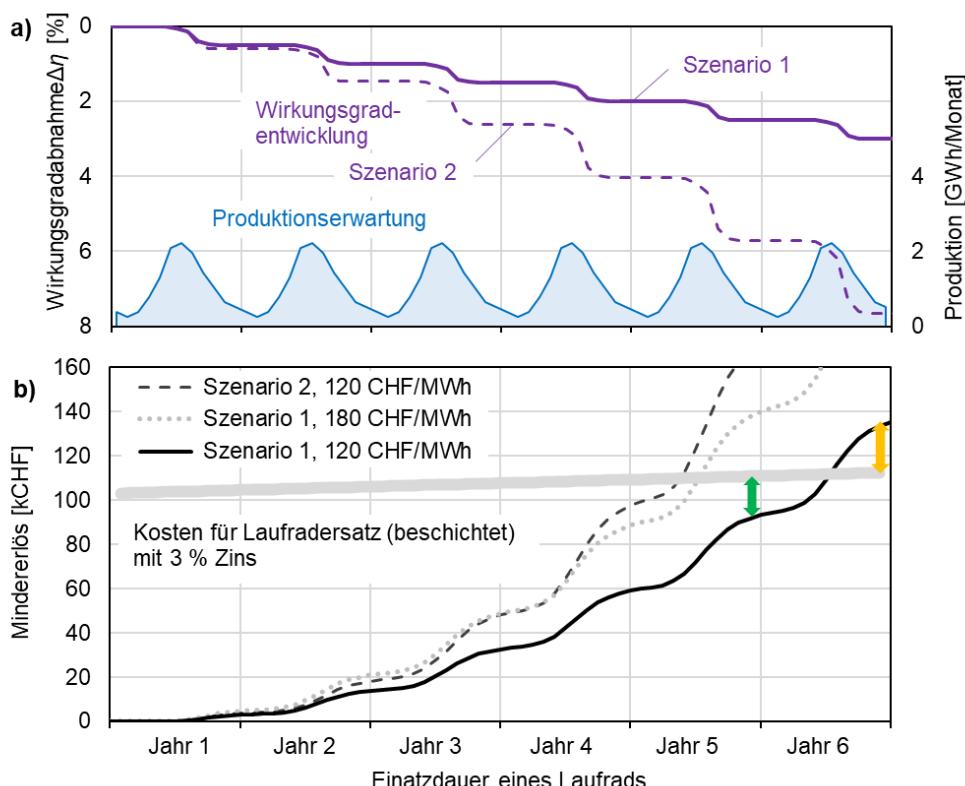


Abbildung 79: Untersuchung der wirtschaftlichen Laufradersatzdauer am KW Susasca: a) Wirkungsgradreduktion in zwei Szenarien und typische monatliche Produktionen; b) wirkungsgradbedingte kumulierte Mindererlöse in den zwei Szenarien und je nach Strompreis im Vergleich zu den Laufradersatzkosten mit kalkulatorischem Zinssatz.



Obwohl im Szenario 1 (schwarze Linie) der Wirkungsgrad linear zur Partikelbelastung, die jedes Jahr gleich angenommen wurde, abnimmt, nimmt der kumulierten Mindererlöse progressiv zu, weil im Lauf der Jahre zunehmend grössere Mindererlöse dazukommen. Wenn der Strompreis 50 % höher ist, nehmen die Mindererlöse ebenfalls um 50 % zu (grau gepunktete Linie). Wenn der Wirkungsgrad stärker und progressiv abnimmt (Szenario 2, gestrichelte Linie), nehmen die Mindererlöse rascher zu.

Nebst den Mindererlösen sind in Abbildung 79b auch die Kosten für den Ersatz eines beschichteten Laufrads in der Grössenordnung von 100 kCHF (Abschnitt 6.6.1) dargestellt. Diese bestehen zum Grossteil aus den Beschaffungskosten, welche typischerweise schon vor dem Einbau eines Laufrads anfallen. Um die Kosten für das in einem Laufrad gebundene Kapital abzubilden, wurde ein kalkulatorischen Zinssatz von 3 % pro Jahr berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass das Laufrad ein Jahr vor seinem Einbau beschafft wird. Aufgrund der jährlichen Abschreibungen wurden bei der Berechnung der Kapitalkosten im zeitlichen Mittel die Hälfte der Laufradersatzkosten angesetzt.

Im Szenario 1, mit der Grundannahme des Strompreises, erreicht der kumulierte Mindererlös im Sommer des sechsten Jahres die Ersatzkosten. Um Produktionseinbussen infolge Nichtverfügbarkeit der MG zu vermeiden, werden die Laufräder jeweils im Winterhalbjahr ersetzt. Im Winter nach dem 5. Jahr ist die Differenz zwischen dem Mindererlös und den Ersatzkosten kleiner (grüner Pfeil in Abbildung 79b) als im Winter danach (oranger Pfeil). Daher ist es unter diesen Verhältnissen am wirtschaftlichsten, das Laufrad nach 5 Schwebstoffsaisons zu ersetzen. Ein Laufradersatz im Herbst hat auch aus energetischer Sicht den Vorteil, dass das praktisch klare Wasser im Winterhalbjahr mit möglichst hoherem (Teillast-)Wirkungsgrad turbiniert werden kann.

Die Annahme einer Wirkungsgradreduktion von lediglich 2 % in 4 Jahren gemäss der Betriebserfahrung 2018-2021 mit dem beschichteten Laufrad ist gegenüber den aufgetretenen Wirkungsgradabnahmen und Verschleisssschäden bei den vor 2018 ausgebauten Laufrädern (LR 1.1, 1.2 und 2.1) optimistisch und bedingt das Vermeiden von aussergewöhnlichen Partikelbelastungen (Ausserbetriebnahme bei grösseren Hochwassern). Es wird davon ausgegangen, dass die Asymmetrie der Grundmaterial-abrasion an den Mittelschneiden zur eher geringen Wirkungsgradabnahme beitrug, und sich diese Asymmetrie nicht stets so entwickelt. Mit einer stärkeren Wirkungsgradabnahme und/oder einem höheren Strompreis ist ein Laufradersatz früher wirtschaftlich, z.B. bereits nach 4 Jahren.

Um das Laufrad zum wirtschaftlichsten Zeitpunkt zu ersetzen oder allenfalls Revisionsarbeiten wirtschaftlich zu begründen, ist es jeweils erforderlich, den Index-Wirkungsgrad jeder MG am Ende einer Schwebstoffsaaison zu kennen (Abgottspont et al. 2022b).

Unabhängig vom wirtschaftlichen Kriterium kann es in Ausnahmefällen erforderlich werden, ein Laufrad aus technischen Gründen früher zu ersetzen, z.B. wenn untypische lokale Schäden an der Be-schichtung zu tiefen Auswaschungen des Grundmaterials in hochbeanspruchten Bereich des Bechers führen und so die Integrität des Laufrads in Frage stellen.

Da in der Regel die Laufräder der beiden MG nicht im selben Jahr ersetzt werden, weist jeweils eine MG einen höheren Wirkungsgrad auf als die andere. Aus wirtschaftlicher und energiewirtschaftlicher Sicht ist es vorteilhaft, wenn diese im Winter bevorzugt zum Einsatz kommt.

Bei den obigen Überlegungen wurde davon ausgegangen, dass die hochwertigen Düsenbauteile keiner nennenswerte Wirkungsgradreduktion verursachen.



6.6.4 Temporäre Ausserbetriebsnahmen während hoher Partikelbelastung

Eine Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit des Betriebs von Wasserkraftwerken mit zeitweiser hoher SSC bezüglich Abrasion zu optimieren, besteht in der vorübergehenden Ausserbetriebsnahme während Schwebstofftransport-Ereignissen (Abschnitt 3.3). Im Folgenden wird diese Option für das KW Susasca untersucht, insbesondere wie hoch der Schwellenwert für die Abstellung ($SSC_{Abstell}$) gewählt werden soll.

In einem ersten Schritt wurde anhand der SSC-Ganglinie (basierend auf der Trübung) der Jahre 2019 bis 2021 für verschiedene $SSC_{Abstell}$ ausgewertet, wie oft solche Ausserbetriebsnahmen in diesen Jahren vorgekommen wären und wie lange die Überschreitungen des Schwellenwerts gedauert hätten. Abbildung 80 zeigt je nach $SSC_{Abstell}$ die durchschnittliche jährliche Anzahl der potenziellen Abstell-Ereignisse und die durchschnittliche Überschreitungsdauer pro Ereignis. Eine $SSC \geq 8 \text{ g/l}$ wurde in den untersuchten drei Jahren nie registriert, was auch mit dem beschränkten SSC-Messbereich der Trübungssonden zu tun haben kann. Es traten aber auch tatsächlich in diesen Jahren keine grösseren Hochwasser in der Susasca auf. Für beispielsweise eine $SSC_{Abstell} = 4 \text{ g/l}$ wären pro Jahr zwei bis drei Abstell-Ereignisse, je mit einer Überschreitungsdauer von ca. 50 min, zu erwarten. Dies entspricht einer totalen Überschreitungsdauer von ca. 2 h/Jahr, was betrieblich noch akzeptabel scheint, da auch aus anderen Gründen solche kürzere Nicht-Verfügbarkeiten der Anlage vorkommen können. Hingegen wäre eine $SSC_{Abstell} = 1 \text{ g/l}$ deutlich zu tief gewählt, da 13 Abstellungen pro Jahr nicht akzeptabel wären.

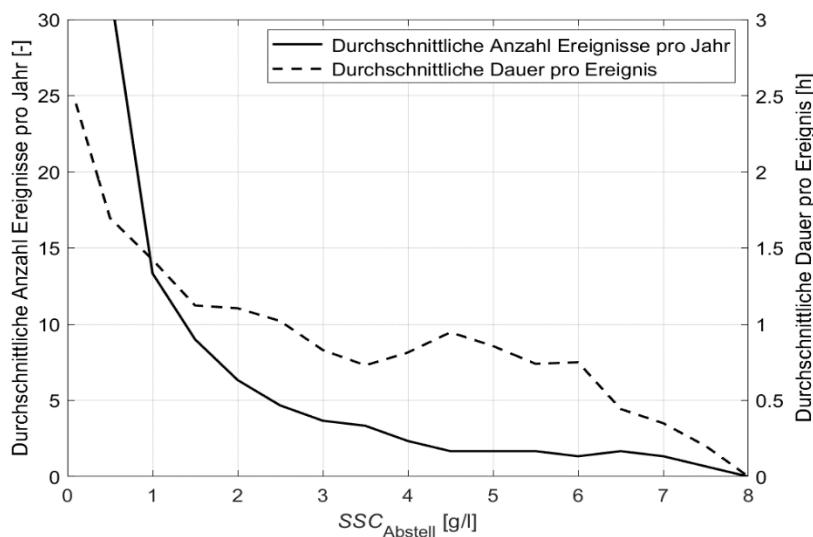


Abbildung 80: Durchschnittliche Anzahl und Dauer von Abstell-Ereignissen je nach Abstell-Schwebstoffkonzentration $SSC_{Abstell}$.

Obwohl Kraftwerks-Abstellungen so rasch als möglich erfolgen sollten, um den Eintritt von stark schwebstoffhaltigem Wasser in die Druckleitung möglichst zu vermeiden, ist aus den folgenden Gründen eine gewisse Zeit zwischen der Überschreitung der $SSC_{Abstell}$ und dem Stillstand der Maschinen erforderlich:

- Da Trübungsmesswerte rasch ändern können und um Fehlalarme zu vermeiden, wird der Alarm erst mit einer gewissen Verzögerung ausgegeben.
- Um Fehlabstellungen z.B. infolge Störungen an den Messgeräten zu vermeiden, sind bisher am KW Susasca keine automatischen Abstellungen vorgesehen. Daher benötigt der Picket-Mitarbeiter eine gewisse Zeit, um den Alarm zu plausibilisieren und die Wetterlage einzuschätzen, wenn möglich das stromabnehmende Energieversorgungsunternehmen über die bevorstehende Abstellung zu informieren und die Abstellung durchzuführen.



Weiter wird vorgeschlagen, die Anlage erst in Betrieb zu nehmen, wenn die SSC deutlich unter die SSC_{Abstell} abgenommen hat und ein Ende des Hochwassers absehbar ist.

Bei den im folgenden untersuchten Abstell-Szenarien wurden folgende Werte angenommen:

- Auslösung des Abstell-Alarms, wenn $SSC \geq SSC_{\text{Abstell}}$ während 3 Minuten,
- Reaktionszeiten t_{Reakt} von 0, 12, 27 und 57 min bis zum Stillstand der Maschinen, d.h. total 3 Minuten, $\frac{1}{4}$ h, $\frac{1}{2}$ h oder 1 h nach Überschreitung von SSC_{Abstell} ,
- «Grünes Licht» für Wiederinbetriebnahme, wenn $SSC \leq 0.5 \cdot SSC_{\text{Abstell}}$ während 3 min,
- gleiche Reaktionszeiten wie bei Ausserbetriebsnahme, bis die Anlage wieder mit der Leistung, die vom aktuellen Wasserdargebot her möglich ist, in Betrieb ist.

In einem zweiten Schritt wurde die SSC_{Abstell} aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen abgeschätzt. Unter Berücksichtigung der obigen Alarm- und Reaktionszeiten wurde dafür berechnet, wie die Sedimentbelastung reduziert wird und wie andererseits die Produktionsverluste zunehmen, je tiefer die SSC_{Abstell} gewählt wird. Als Mass für die Sedimentbelastung wurde die mittlere verbleibende jährliche Partikelbelastung der Becher PL_b im Vergleich zum Wert ohne Abstellungen verwendet. Die mittleren jährlichen Produktionsverluste infolge der Abstellungen wurden ebenfalls auf einer relativen Skala, normiert auf die nominale jährliche Produktion (26 GWh/Jahr für beide MG) dargestellt (Abbildung 81).

Wie erwartet kann ein grösserer Anteil der Partikelbelastung von der Anlage ferngehalten werden, wenn die Fassung möglichst rasch nach dem Alarm geschlossen wird (kurze Reaktionszeit). Mit der getroffenen Annahme, dass die Reaktionszeiten bei der Abstellung und der Wiederinbetriebnahme gleich sind, wirken sich längere Reaktionszeiten praktisch nicht auf den mittleren Produktionsverlust aus, weil die Ausserbetriebsnahmen meist bei Volllastbetrieb stattfinden. Für SSC_{Abstell} unter ca. 4 g/l nimmt die Partikelbelastung (blau) stark ab, aber die Produktionsverluste (rot) nehmen im Gegenzug stark zu.

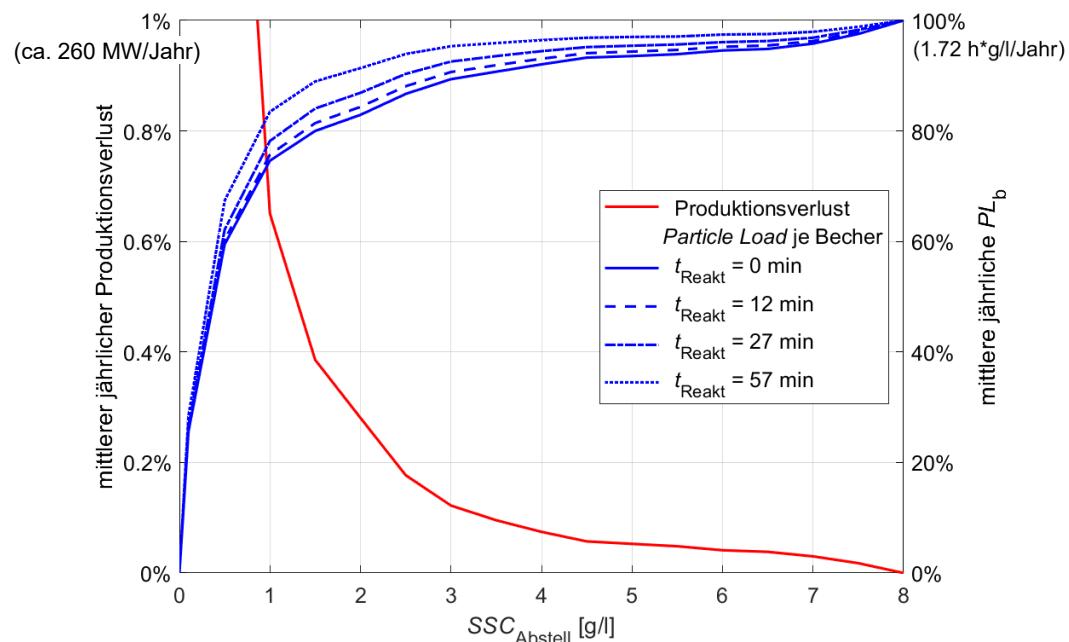


Abbildung 81: Reduktion der Partikelbelastung pro Becher PL_b und Zunahme der Produktionsverluste je tiefer die Abstell-Schwebstoffkonzentration SSC_{Abstell} gewählt wird. Die Partikelbelastung kann bei kurzer Reaktionszeit stärker reduziert werden.



Damit die blauen Kurven besser mit der roten Kurve vergleichbar sind, wurden beide Größen als jährliche Geldbeträge ausgedrückt:

- Ausgehend vom mittleren jährlichen Produktionsverlust wurde mit einem angenommenen Strompreis von 120 CHF/MWh die mittlere jährliche Erlöseinbusse berechnet.
- Die Umrechnung der vermiedenen Partikelbelastung in vermiedene schwebstoffbedingte Turbinenkosten basiert auf 28 CHF/t gemäss Abschnitt 6.6.1.

In Abbildung 82 sind die mittleren jährlichen Erlöseinbussen infolge der Stillstandzeiten den vermiedenen schwebstoffbedingten Turbinenkosten gegenübergestellt. Eine kurze Reaktionszeit hat wiederum einen positiven Einfluss auf die vermiedenen Kosten, während der Effekt auf die Erlöseinbussen vernachlässigbar ist.

Eine sofortige Reaktion ($t_{Reakt} = 0$) wäre nur mit automatischer Abstellung möglich, erscheint aber wegen des Risikos von Fehlabstellungen nicht sinnvoll. Abstellungen nach 12 Minuten sind für die Umsetzung anspruchsvoll; nach 27 Minuten ist es zuverlässiger machbar (bei diesem Kleinwasserkraftwerk gibt es einen 24 h-Pikettdienst, aber keine rund um die Uhr besetzte Leitwarte). Abstellungen 1 h nach der Schwellenwertüberschreitung wären bei den Ereignissen 2019-2021 nicht sinnvoll gewesen, da diese meist so kurz dauerten, dass so keine nennenswerten Sedimentbelastungen hätte vermieden werden können.

In Abbildung 82 ist der Bereich grün markiert, in welchem die erwarteten vermiedenen Turbinenkosten (bei 27 Minuten Reaktionszeit) höher sind als die erwartete Erlöseinbusse. Dies ist der wirtschaftliche Bereich für «praktikable» Abstellungen. Falls die Reaktionszeit auf bis zu 12 Minuten verkürzt werden kann, ist auch der gelbe Bereich wirtschaftlich.

Um den Verschleiss und die damit einhergehenden Wirkungsgradreduktionen mit praktikablen Reaktionszeiten im wirtschaftlichen Bereich möglichst gering zu halten, wurde basierend auf dem Kenntnisstand am Ende des Forschungsprojekts eine $SSC_{Abstell} = 4 \text{ g/l}$ gewählt.

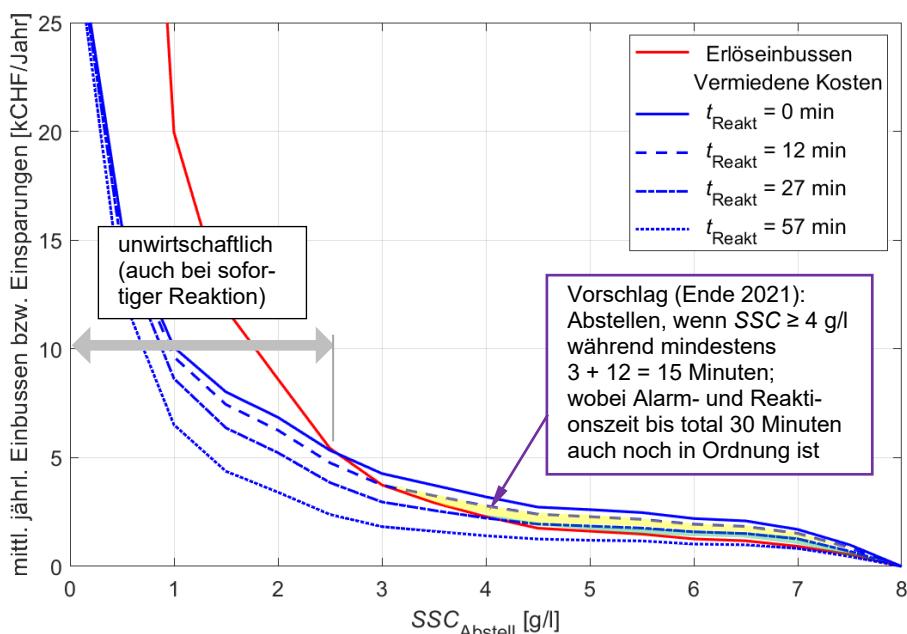


Abbildung 82: Mittlere jährliche Erlöseinbussen (rot) und Turbinenkosten-Einsparungen (blau) je nach Abstell-Schwebstoffkonzentration und Reaktionszeit (vom Alarm bis zur Abstellung) für das KW Susasca (Datenbasis: 2019 bis 2021).



Schliesslich wurde untersucht, wie die Ausserbetriebnahmen in den Jahren 2019 bis 2021 abgelaufen wären, wenn in diesen Jahren schon $SSC_{\text{Abstell}} = 4 \text{ g/l}$ definiert gewesen und das KW mit einer Reaktionszeit von jeweils 12 Minuten abgestellt worden wäre.

Tabelle 12 fasst die simulierten Ausserbetriebnahmen mit den resultierenden Kennwerten zusammen. Die Stillstandzeiten sind zudem in den Zeitreihen in Anhang A5 braun dargestellt. Alle Abstellungen hätten im August stattgefunden. Die Anlage wäre im Mittel nur knapp 1.5 h pro Ereignis stillgestanden (min. 0.5 und max. 2.5 h). Der maximale Produktionsverlust von 16 MWh (0.06 % der nominalen Jahresproduktion) wäre im August 2021 aufgetreten und hätte zu einer Erlöseinbusse von rund 1'900 CHF geführt. Dem gegenüber steht eine vermiedene Schwebstofffracht von ca. 100 t (7.7 % der mittleren jährlichen Fracht), wovon eine Reduktion der Turbinenkosten von rund 2'900 CHF erwartet wird. Somit wird erwartet, dass mit einer Abschaltung während dieses Ereignisses ein wirtschaftlicher Vorteil von ca. 1000 CHF resultiert hätte. Bei den anderen Ereignissen war der wirtschaftliche Vorteil kleiner bzw. bei einigen leicht negativ, aber in der Summe bzw. im Mittel leicht positiv.

Tabelle 12: Simulierte Ausserbetriebnahmen des KW Susasca im Zeitraum 2019-2021 für $SSC_{\text{Abstell}} = 4 \text{ g/l}$ und $t_{\text{Reakt}} = 12 \text{ min}$ mit Abstelldauer, Produktionsverlust und vermiedener turbinierter Schwebstofffracht SSL.

Ausserbetrieb-nahme	Abstell-dauer [min]	Produktions-verlust [MWh]	Vermie-dene SSL [t]	Erlös-einbusse [CHF]	vermiedene Kosten [CHF]	Vorteil [CHF]
12.08.2019 16:10	35	3.7	11	438	297	-141
12.08.2019 19:10	87	8.9	41	1'070	1'145	75
23.08.2019 19:44	67	6.9	35	826	988	163
17.08.2020 08:40	62	5.7	21	678	577	-101
22.08.2020 16:30	107	10.8	67	1'294	1'882	588
29.08.2020 04:48	50	5.2	20	618	554	-64
22.08.2021 21:11	157	15.8	103	1'894	2'892	999
Total in 3 Jahren	565	56.8	298	6'817	8'336	1'518
Mittel pro Jahr	188	18.9	99	2'272	2'779	506
Mittel pro Ereignis	81	8.1	43	974	1'191	217

Bei allen sieben Schwebstofftransportereignissen in den Jahren 2019 – 2021 hätte eine Kraftwerksabstellung keinen bedeutenden wirtschaftlichen Vorteil gebracht, weil in diesen Jahren kein grösseres Hochwasser auftrat. Abstellungen sind dann bedeutender, wenn ein grösseres Hochwasser bzw. Unwetter bei durchgehendem Kraftwerksbetrieb dazu führen würde, dass ein Laufrad früher ersetzt werden muss und das Kraftwerk allenfalls nach dem Ereignis, in der abflussreichen Jahreszeit, nicht voll verfügbar ist.

Ende 2021 wurden im Leitsystem Alarne definiert, die ausgelöst werden, wenn die SSC -Signale der beiden Trübungssonden oder des akustischen Sensors 4 g/l während mindestens 3 Minuten überschreiten. Als Vorwarnung wurden zusätzlich Alarne bei 80 % der SSC_{Abstell} , also bei 3.2 g/l definiert. Die Alarmwerte werden aus den folgenden Überlegungen vermutlich erhöht:

- Gemäss Tabelle 12 sind die wirtschaftlichen Vorteile bei den kleineren Ereignissen moderat und liegen in der Grössenordnung des betrieblichen Aufwands für Abschaltungen und Wiederinbetriebnahmen (in obiger Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht berücksichtigt).
- Wenn in Zukunft die Strompreise höher sind, sind höhere SSC_{Abstell} wirtschaftlich.



7 Synthese

7.1.1 Einordnung der Studie

Mit dieser Untersuchung konnte ein reichhaltiger Datensatz über drei Jahre über das Schwebstoffaufkommen aus einem alpinen Einzugsgebiet, die Entsandung, den Verscheiss an Peltonturbinen und dessen Auswirkungen auf deren Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit gewonnen werden. Mit der Auswertung von Archivdaten aus dem Leitsystem und der Vermessung von drei ausgebauten, abgenutzten Laufrädern konnte der Untersuchungszeitraum auf bis zu 11 Jahre ausgedehnt werden. Die hauptsächlichen Unterschiede dieser Studie zu jener am KW Fieschertal (Felix et al. 2022) sind:

- Einzugsgebiet mit geringerem Vergletscherungsgrad und kleineres Gewässer,
- Zusätzlich Untersuchung des Entsanders und der Wirkung von Beruhigungsrechen,
- Kleinwasserkraftwerk mit vierdüsigen Peltonturbinen mit deutlich schmaleren Bechern,
- Unbeschichtete und beschichtete Laufräder gleichzeitig in einer Anlage,
- Keine Revisionsarbeiten an den Laufrädern,
- Turbinenvermessung mit einfachen Mitteln (Verzicht auf 3d-Scans aus Kostengründen),
- Wirkungsgradabnahmen im Bereich mehrerer Prozente.

Eine ähnlich umfassende Studie über die Abrasion von Peltonturbinen an einer Kleinwasserkraftanlage ist nach Kenntnis der Autoren in der Literatur nicht verfügbar.

7.1.2 Schwebstoffmessungen in Echtzeit

Das Verhalten von herkömmlichen Trübungssonden, einem neueren akustischen Sensor (*LISST-ABS*), einem Dichtemessgerät (CFDM) und zwei Laserdiffraktometern wurde unter realen Bedingungen an einer alpinen Wasserfassung auf 1778 m ü. M. vom Typ Seitenentnahme mit Entsander während drei Schwebstoffsaisons untersucht, in welchen keine grösseren Hochwasser auftraten.

Da im Einzugsgebiet Nadelbäume bis ca. 2200 m ü. M. vorkommen, enthielt das Bachwasser insbesondere im Herbst auch organisches Material (v.a. die für die Region typischen Lärchennadeln). Deshalb war für den Betrieb des CFDM eine automatische Rückspüleinrichtung erforderlich und das *LISST-StreamSide* bewährte sich nicht. Im Gegensatz zum KW Fieschertal bewährte sich auch das CFDM nicht. Mögliche Gründe sind unkomensierte Einflüsse der Temperatur, Abrasion oder variable Ablagerungen in den Messrohren, das spezifische Gerätemodell.

Die Trübungssonden mit automatischer Druckluftreinigung erwiesen sich an dieser Wasserfassung als zweckdienlich für das Echtzeitmonitoring der SSC bis ca. 7 g/l. Die an der VAW entwickelte Steuerung des automatischen Wasserprobennehmers bewährte sich zur Entnahme relevanter Wasserproben während erhöhter Trübung. Basierend auf den Referenz-SSC, die im Labor von den Proben bestimmt wurden, erlaubten die Trübungssonden die fortlaufende Quantifizierung der Schwebstofffracht.

Das Signal des akustischen Sensors wichen zeitweise stark von jenem der Trübungssonden ab, weil er auf gröbere Partikel empfindlich ist. Es konnte nicht vollständig geklärt werden, ob zeitweise tatsächlich Feinsand mit der vom akustischen Sensor angegebenen SSC transportiert wird, nebst den Siltpartikeln, die vor allem von Ende Juli bis Ende August auftreten, vermutlich wegen der Eisschmelze am Grialetschgletscher. Um die Eignung des akustischen Sensors für den Einsatz an Wasserkraftanlagen bestätigen und die Interpretation seiner Signale verbessern zu können, werden weitere Feld- und Laufmessungen empfohlen.



7.1.3 Entsander

Die zwei Messkampagnen am Entsander im Jahr 2019 zeigten, dass im Sohlenbereich der Entsanderkammern erhöhte Fliessgeschwindigkeiten auftreten. Dies wird auf eine Strömungskonzentration zurückgeführt, die dadurch entsteht, dass der Strömungswiderstand unter den Beruhigungsrechen geringer ist als im Bereich der Beruhigungsrechen. Um diese Strömungskonzentration zu mindern und die Absetzwirkung des Entsanders zu verbessern, wurden im November 2020 die Stäbe der Beruhigungsrechen nach unten verlängert. Die Messkampagne im Sommer 2021 bestätigte eine gleichmässigere Geschwindigkeitsverteilung. Es wird daher empfohlen, Beruhigungsrechen so auszubilden, dass der Strömungswiderstand über den ganzen Abflussquerschnitt möglichst ähnlich ist, sofern nicht unten für das Durchleiten von Geschiebe ein grösserer Abstand erforderlich ist.

Für das Spülen einer Kammer des Entsanders muss das Wasser abgelassen werden (System Büchi) und diese steht dann für fast eine halbe Stunde nicht für den Durchfluss des Triebwassers zur Verfügung. Wie ursprünglich vorgesehen, wurde empfohlen, die Kraftwerksleistung während der Spülung mit einer der beiden Entsanderkammer auf die Hälfte zu drosseln, vor allem, um Resuspension von bereits abgelagerten Partikeln zu vermeiden, die den Turbinenverschleiss verstärken könnten. Bei Spülsystemen, welche das Abziehen der Sedimentablagerungen ohne Absenkung des Wasserspiegels erlauben, würde diese Betriebseinschränkung entfallen, aber es sind grössere bauliche Investitionen erforderlich und solche Systeme bewähren sich nicht unbedingt bei Sedimentablagerungen, die zumindest zeitweise kohäsiv sind und viel Nadeln von Laubbäumen enthalten. Mit der relativ geringen jährlichen Anzahl von Entsanderspülungen im vorliegenden Fall erscheint das einfache Spülsystem und das Inkaufnehmen von vorübergehenden Produktionseinschränkungen als guter wirtschaftlicher Kompromiss.

Die vorbestehenden Installationen zur Messung der Sedimentniveaus in den Entsanderkammern erwiesen sich als unzuverlässig und ermöglichen keine bedarfsgerechten Spülungen. Die bestehenden Ultraschallsonden wurden anders parametriert und tiefer gesetzt (von 3.0 auf 1.4 m über der Sohle), damit der Schall auf kürzerer Distanz reflektiert wird und so das Sedimentniveau auch bei erhöhter SSC zuverlässiger gemessen werden kann. Nach der Verlängerung der Beruhigungsrechen verschob sich der Hochpunkt der Sedimentablagerungen in den Kammern näher zu ihrem Einlauf. Um den Bedarf einer Spülung rechtzeitig anzuzeigen, wurden die Ultraschall-Sedimentniveausonden an diese Stelle versetzt. Um die Zuverlässigkeit der Fernüberwachung der Sedimentniveaus zu steigern, wurde in jeder Kammer ein Vibrations-Grenzstandssensor ergänzt (inhomogen redundante Instrumentierung). Solche praktischen Aspekte wie die Installation geeigneter Sensor-Kombinationen an massgebenden Stellen und das Verbessern ihrer Einstellungen je nach Betriebserfahrung sind wichtig, um eine Entsandungsanlage möglichst gut betreiben zu können und so die baulichen Investitionen möglichst gut nutzen zu können, um die Sedimentbelastung der Turbinen zu reduzieren.

7.1.4 Turbinenabrasion

Mit Freihand-Fotoaufnahmen und einfachen Handmessungen im Winterhalbjahr kann die Abrasion an den Laufrädern und Düsen ohne Produktionsausfall und mit moderaten Kosten dokumentiert und quantifiziert werden. Dabei ist wichtig, die Messungen stets in derselben Art durchzuführen und strukturiert abzulegen, um langjährig vergleichbare Daten zu erhalten.

Systematische Fotoaufnahmen und entsprechende Bildauswertung ermöglichen, das Ausmass der Erosion auf den Mittelschneiden und an den Becherausschnitten mit hoher räumlicher Auflösung zu verfolgen, wenn 3d-Scans nicht aus anderen Gründen benötigt werden und deren Kosten höher sind. Heutzutage sind auch automatische Lösungen mit einer permanent im Turbinengehäuse installierten Kamera erhältlich, die während dem Auslaufvorgang von grösseren Peltonturbinen Fotos der Becher am drehenden Laufrad erstellt und Informationen aus den Bildern extrahiert (Lötscher et al. 2022).



Die Mittelschneidenbreite gilt als einer der wichtigen Verschleissgrößen. Welche weiteren Größen im routinemässigen Lanzeitbetrieb gemessen werden sollen, hängt auch davon ab, ob ein unbeschichtetes oder beschichtetes Laufrad im Einsatz ist. Interessant sind diejenigen Größen, die sich mit geringem Aufwand erheben lassen und für die Prognose der Restlebensdauer eines Bauteils bzw. des Bedarfs an Revisionsarbeiten dienlich sind, weil sie stark mit den Wirkungsgradreduktionen korrelieren oder die Sicherheit betreffen.

Der Einsatz von hochwertigen Düsenbauteilen und die Beschichtung des Laufrads verminderten das Ausmass der Abrasion. Es wird davon ausgegangen, dass der deutliche stärkere Verschleiss der zwei beschichteten Laufräder in den Jahren 2014 bis 2018 durch höhere Partikelbelastung (Hochwasser und allenfalls Resuspension während dem Spülen der Entsanderkammern) verursacht wurde; was sich allerdings nicht mehr nachvollziehen lässt.

7.1.5 Wirkungsgradänderungen

Dank Betriebs- und Archivdaten aus dem Kraftwerksleitsystem konnten die Wirkungsgrad-Veränderungen der Turbinen im Lauf der Jahre praktisch seit der Inbetriebnahme der ersten MG ausgewertet werden. Da die Wirkungsgradabnahmen bis zum Ausbau eines Laufrads im Bereich einiger Prozente liegen, liess sich die Entwicklung des Volllastwirkungsgrads trotz der zufälligen Schwankungen der relevanten Messsignale mit einer relativ einfachen Auswertung der Betriebsdaten ohne spezielle Messungen auswerten. Mit den stark abgenutzten Laufrädern in Jahren 2014 bis 2018 traten beträchtliche Wirkungsgradreduktionen bis 8.5 % auf. In Zukunft werden in der Regel Wirkungsgradabnahmen von lediglich wenigen Prozenten erwartet, bis ein Laufrad aus Gründen der Wirtschaftlichkeit oder Sicherheit ersetzt wird.

7.1.6 Wirtschaftlichkeit

Aufgrund der Messdaten und der Marktsituation 2018/2019 – 2021 wird eine Beschichtung des Laufrads und dessen Ersatz alle 4 bis 5 Jahre als wirtschaftlich eingestuft.

Es wird empfohlen, dies erneut zu beurteilen, wenn

- eine längere Datenreihe, d.h. mehr Erfahrung, insbesondere bezüglich der Wirkungsgradabnahmen von weiteren beschichteten Laufrädern, vorliegt,
- die Strompreise oder die Laufrad- und Beschichtungspreise ändern,
- weitere Erkenntnisse darüber vorliegen, wie lokale (auch untypische) Schäden in der Beschichtung, die zu ausgeprägter Grundmaterialabrasion (im ungünstigen Fall in dynamisch stark beanspruchten Bereichen des Bechers) führen, die Einsatzdauer eines Laufrads beschränken können bzw. wie die Schadensentwicklung an solchen Stellen mit Revisionsarbeiten gemindert werden kann,
- Hinweise von anderen Wasserkraftanlagen vorliegen, dass allenfalls mit Schleifen von unbeschichteten Bechern im Winter auch bei kleineren Laufrädern wie im vorliegenden Fall die Entwicklung der ausgeprägten Welligkeit und die Wirkungsgradabnahme in einem solchen Ausmass verlangsamt werden können, dass unbeschichtete Laufräder aufgrund ihrer tieferen Anschaffungskosten doch insgesamt wirtschaftlicher sind.

Um übermässigen Turbinenverschleiss während Hochwassern zu vermeiden, wurde vorgeschlagen, die Anlage ausser Betrieb zu nehmen, wenn die SSC 4 g/l während länger als 15 bis 30 Minuten überschreitet. Die Umsetzung von solchen vorübergehenden Ausserbetriebsnahmen an einem Bergbach, der rasch auf Regen reagiert, ist für den Betreiber einer Kleinwasserkraftanlage eine Herausforderung. Um seinen Aufwand möglichst zu reduzieren und die Verfügbarkeit der Anlage hochzuhalten, ist eine höhere Abschalt-SSC erwünscht.



In einigen Schwebstofftransportereignissen in den Jahren 2019 – 2021 waren die Trübungssonden in der Lage, SSC bis 7 g/l zu messen. Daher kann mit Verwendung der bestehenden Trübungssonden die SSC_{Abstell} auf 6 g/l angehoben werden. Damit der Abschalt-Alarm auch bei hohen SSC ausgelöst wird, bei welchen die Trübungssonde vorübergehend überlastet sein kann, und tiefe Werte anzeigt, sind zusätzliche Vorkehrungen empfehlenswert.

8 Schlussfolgerungen

Das Kleinwasserkraftwerk Susasca bietet gute Bedingungen, um die Entsandung und die Abrasion an Peltonturbinen gemeinsam an einer Anlage zu erforschen. Die Kernpunkte aus der vorliegenden Studie in den Jahren 2018 – 2021 werden wie folgt zusammengefasst:

- Bei Laufwasserkraftanlagen mit Fallhöhe von mehreren Hundert Metern an Gebirgsbächen mit sich zurückziehenden Gletschern in Einzugsgebiet kann beträchtliche Turbinenabrasion auftreten, insbesondere bei Peltonturbinen mit vier bis sechs Düsen und eher schmalen Bechern, wie bei Kleinwasserkraftwerken üblich.
- Für eine möglichst gute Sedimentabscheidung in einem Entsander sind Aspekte wie die Auswahl, Platzierung und Parametrierung von Sedimentniveau-Sensoren, die hydraulische Ausbildung von Beruhigungsrechen und seine Betriebsweise auch von Bedeutung.
- Trübungssonden erlauben die Echtzeit-Messung von Schwebstoffkonzentrationen am untersuchten Bergbach bis ca. 7 g/l.
- Als Ergänzung zu Handmessungen wurde ein Verfahren entwickelt, mit welchem die Abrasion an Mittelschneiden und Becherausschnitten von Pelton-Laufrädern aufgrund von systematisch aufgenommenen Fotos mit moderaten Kosten räumlich fein aufgelöst quantifiziert werden kann.
- Es wurden Datensätze über die Strömung in einer Entsanderkammer mit zwei Konfigurationen von Beruhigungsrechen, die Partikelbelastung, Abrasion an Peltonlaufrädern und die resultierenden Wirkungsgradänderungen zusammengestellt, die als Orientierung für andere Wasserkraftanlagen (Benchmark) und für die Weiterentwicklung von empirischen Formeln (Prognosemodelle) bzw. numerischen Simulationsmodelle dienen können.
- Die Verwendung eines beschichteten Laufrads erscheint aufgrund der Daten aus der Projektlaufzeit wirtschaftlich, vor allem weil sein Wirkungsgrad weniger rasch abnahm als bei einem unbeschichteten Laufrad. Da Beschichtungen einen höheren Widerstand gegen die schleifende Beanspruchung von feinen Partikeln (Silt) als gegen den Anprall von gröberen Partikeln (Feinsand) aufweisen, ist wichtig, die Turbinen vor übermässiger Partikelbelastung zu schützen. Daher wurde im Leitsystem ein Alarm bei 4 g/l programmiert, bei die Anlage vorübergehend ausser Betrieb genommen werden soll.
- Für den Laufradersatz aus wirtschaftlichen Gründen ist die Kenntnis der Turbinenwirkungsgrade im Lauf der Zeit (Historie bzw. Prognose) eine wichtige Entscheidungsgrundlage.
- Mit dem Trend zu steigenden Strompreisen gewinnt das Wirkungsgradmonitoring an Bedeutung und der Ersatz von Laufrädern kann bei geringeren Wirkungsgradreduktionen wirtschaftlich ge-rechtfertigt werden. Die im zeitlichen Mittel höheren Wirkungsgrade tragen dazu bei, das Wasserkraftpotential möglichst gut zu nutzen, was insbesondere im Winter von Bedeutung ist.

Verbesserte Kenntnisse über die Schwebstoffbelastung, Wirkung von Entsandern, Turbinenabrasion und Wirkungsgradveränderungen sowie entsprechende Messtechnik tragen zur wirtschaftlichen und energetischen Optimierung von Hoch- und Mitteldruck-Wasserkraftanlagen an Gebirgsbächen bei.



Referenzen

Grundlagen

- Abgottsporn A., Stern P., Staubli T., Felix D., Winkler K. (2013). **Measuring Turbine Abrasion and Efficiency Decrease: First Results of the Case Study at HPP Fieschertal.** Proc. Hydro 2013 Conference, Innsbruck: Paper 18.05. Aqua-Media International, Wallington, UK.
- Abgottsporn A., Felix D., Staubli T., Boes R. (2022a). **Betriebs- und Unterhaltsoptimierung von beschichteten Pelonturbinen mit hydro-abrasivem Verschleiss – Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt am KW Fieschertal.** Wasser Energie Luft 114(2): 105–117.
- Abgottsporn A., Staubli T., Bieri E., Felix D. (2022b). **Economic optimization of maintenance measures based on continuous efficiency monitoring.** Proc. 21th International Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (Hrsg.), Wien.
- 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.
- Bezinge A., Clark M., Gurnell A., Warburton J. (1989). **The Management of Sediment Transported by Glacial Melt-Water Streams and its Significance for the Estimation of Sediment Yield.** Annals of Glaciology, 13, 1-5. doi:10.3189/S0260305500007527.
- BFE (2019). **Statistik der Wasserkraftanlagen.** Datenblatt der Zentrale «Sot Ruinas, Susch».
- Boes R. (2010). **Kontinuierliche Messung von Schwebstoffkonzentration und –korngrößenverteilung im Triebwasser und Quantifizierung der Hydroabrasion an einer Pelonturbine.** 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 von der DGZfP, Berlin.
- Brekke H., Wu Y.L., Cai B.Y. (2002). **Design of Hydraulic Machinery Working in Sand Laden Water.** In Duan C.G. & Karel V.Y. (eds.), *Abrasive Erosion & Corrosion of Hydraulic Machinery* (pp. 155–233). Imperial College Press, London.
- Drobir H. (1981). **Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge.** Österreichische Wasserwirtschaft, 33: 243-253.
- DWA (2006). **Entlandung von Stauräumen.** Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.
- Felix D. (2017). **Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines.** VAW-Mitteilung 238 (R. M. Boes, Hrsg.) und Dissertation 24145, ETH Zürich, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000161430>
- Felix D., Abgottsporn A., Staubli T., von Burg M., Kastinger M., Albayrak I., Boes R. (2022). **Untersuchung der Schwebstoffbelastung, der hydro-abrasiven Erosion und der Wirkungsgradänderungen an beschichteten Pelonturbinen in der Hochdruckwasserkraftanlage Fieschertal.** Schlussbericht an das Bundesamt für Energie (BFE). Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich und Kompetenzzentrum für Fluidmechanik und Numerische Methoden der Hochschule Luzern. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40669>.



- GLAMOS (2021). **Glacier Monitoring in Switzerland**, mit Gletscherinventaren von 1850, 1973 und 2016. <https://www.glamos.ch/en/downloads#tab-inventories/E23-16>
- Hassler P., Schnablegger W. (2006). **Pelton runner maintenance and its results at Verbund-Austrian Hydro Power AG**. Proc. 14th Intl. Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (Hrsg.), Wien: 445–454.
- Hofer B. (1987). **Der Feststofftransport von Hochgebirgsbächen am Beispiel des Pitzbaches**. Österreichische Wasserwirtschaft, 39(1/2), 30-38.
- Hydro-Solar (2016). **Pläne des Wasserkraftwerks Susasca, Susch**. Hydro-Solar Engineering AG, Niederdorf.
- IEC 62364 (2019). **Guide for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis, and Pelton turbines**. 2. Ausgabe, International Electrotechnical Commission, Genf.
- Kammerlander J., Achleitner S., Schöber J., Hofer B. (2017). **Geschiebehaushalt in kleinen Hochgebirgsbächen der Nordtiroler Zentralalpen**. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 69: 114-124.
- Lifa I., Braun S., Witek M., Krummenacher B., Peter A., Beck C., Boes R. (2022). **Optimierter Coanda-Rechen für Wasserkraft und Fisch**. Wasser Energie Luft 114(3): 175-182.
- Lötscher B., Kraxner T., Wittwer B. (2022). **The use of computer vision and pattern recognition in condition monitoring of Pelton runners**. Proc. 21th International Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (Hrsg.), Wien.
- Maldet R. (2008). **Pelton runner with high erosion caused by glacier sediment: assessment and measures**. Proc. 15th International Seminar on Hydropower Plants, Doujak E. (Hrsg.), Wien: 639-646.
- Meteoschweiz (2021). **Frequenzdiagramm für Niederschlagssumme in Scuol**. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/standardperiode.html>
- Meteoschweiz (2022). **Automatisches Messnetz, Niederschlagsmesstation Susch** (Stationskürzel SUS). <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/messwerte-und-messnetze.html#param=messwerte-niederschlag-10min&lang=de&station=SUS&chart=year>
- Merkus H. G. (2009). **Particle size measurements: Fundamentals, practice, quality**. Particle Technology Series. Delft, Niederlande: Springer.
- Namgyal L. & Tandin T. (2021). **Hydropower plant operation optimization based on sediment erosion**. Journal of the Bhutan Ecological Society 4, 80–95.
- Ortmanns C. (2006). **Entsander von Wasserkraftanlagen**. VAW-Mitteilung 193 (Minor H.-E., Hrsg.) und Dissertation 16324, ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005126582>
- Paschmann C. (2018). **Design Optimization of Alpine Desanding Facilities**. VAW-Mitteilung 247 (R. M. Boes, Hrsg.) und Dissertation 24913, ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000273062>
- Paschmann C., Vetsch D.F., Boes, R.M. (2022). **Design of Desanding Facilities for Hydropower Schemes Based on Trapping Efficiency**. Water 14, 520, <https://doi.org/10.3390/w14040520>.
- 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.
- Vetsch D.F., Paschmann C., Boes R.M. (2022). **Enhanced design of desanding facilities at hydro-power schemes.** *Proc. Hydro 2022 Conference*, Strassburg: Paper 23.03. Aqua~Media International, Wallington, UK.
- 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.
- Winkler K., Dekumbis R., Rentschler M., Parkinson E., Garcin H. (2011). **Understanding hydro-abrasive erosion,** *Proc. Hydro 2011 Conference*, Prag: Paper 2.05. Aqua~Media International, Wallington, UK.
- zek (2016). **KW Susasca: zweite Ausbaustufe bringt Leistungsschub und Optimierungspaket. Zukunftsenergie und Kommunaltechnik (zek) Hydro**, Bad Ischl, Ausgabe Juni 2016, 16-20.
- Zhang Z. (2016). **Pelton turbines.** Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Arbeiten von Studierenden

- Bleiker S. & Mayer D. (2020). **Sedimentbilanzierung am Kleinwasserkraftwerk Susasca.** *Bachelorarbeit*, VAW, ETH Zürich (unpubliziert).
- Cabdulle S. (2021). **Suspended sediment load of the HPP Susasca in 2019 and 2020.** *Projektarbeit*, VAW, ETH Zürich (unpubliziert).
- Cracknell N. (2020). **Turbine erosion and efficiency reduction in the small hydropower plant Susasca.** *Projektarbeit*, VAW, ETH Zürich (unpubliziert).
- Stadler L. & Wenger R. (2019). **Sedimentbilanzierung am Kleinwasserkraftwerk Susasca.** *Bachelorarbeit*, VAW, ETH Zürich (unpubliziert).
- von Ah F. (2020). **Sediment Load in 2019 in the Small Hydropower Plant Susasca.** *Projektarbeit*, VAW, ETH Zürich (unpubliziert).
- Zemp C. (2019). **Sediment- und Laufradmanagement am Kleinwasserkraftwerk Susasca.** *Masterarbeit*, VAW, ETH Zürich (unpubliziert).

Bisherige Publikationen aus diesem Projekt

- Marschall Y., Felix D., Boes R. (2019). **Quantifizierung der Abnutzung von Peltonlaufrädern mittels Bildanalyse.** *21. Treffen junger WissenschaftlerInnen*, Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.), Karlsruhe: 145-150, <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/106543>.
- Felix D., Kastinger M., Cracknell N., Boes R. (2022). **Umgang mit Feinsedimenten am Kleinwasserkraftwerk Susasca (GR).** Vortrag vom 02.11.2022 in Olten an der Fachtagung Wasserkraft, organisiert durch den Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (SWV). Die Vortragsfolien auf Deutsch und Französisch wurden den Teilnehmern zur Verfügung gestellt.



Danksagung

Die Autoren dieses Berichts bedanken sich bei Markus Hintermann, *Hydro-Solar Water Engineering*, für seine Anfrage an die VAW, die den Anstoss zu diesem Forschungsprojekt gab, seine Vorbereitung für das interessante Setup der Studie mit gleichzeitig einem unbeschichteten und einem beschichteten Laufrad, und die gute Zusammenarbeit. Ein weiterer Dank geht an Giancarlo Neuhäusler, Betriebsleiter der *Ouvra Electrica Susasca Susch* (OESS) sowie an die Kraftwerksmitarbeiter Fabian Denoth, Noldi Menig, Andrea Müller und Emil Müller für das Ermöglichen der Studie und die gute Zusammenarbeit inklusive Terminkoordination für die Arbeiten an der Wasserfassung und im Maschinenhaus.

Weiter wird die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojekts 2018-2021 durch das Bundesamt für Energie, vertreten durch Dr.-Ing. Klaus Jorde, durch die OESS sowie die ETH Zürich verdankt. Die OESS unterstützte das Projekt zusätzlich durch Eigenleistungen und das Beziehen von Dritten für das Entfernen und die Wiederinstallation der Abdeckung über den Entsanderkammern für die drei Messkampagnen, die Erstellung des Schachts über der Entnahmekammer, für Bohrungen, Kabelführungen und Beleuchtungsinstallation in den Entsanderkammern, die Integration von zusätzlichen Messsignalen ins Leitsystem und die Visualisierung, sowie für den Datenaustausch (Internetverbindung).

Ein weiterer Dank geht an Studierende der ETH im Bau- und Umweltingenieurwesen, die mit ihren Arbeiten (siehe vorheriges Kapitel) zur Datenauswertung beitragen, sowie an die Doktoranden M.R. Maddahi und S. Dahal für ihre Feldeinsätze. Ebenfalls verdankt werden die Sedimentanalysen von Dr. M. Plötze, A. Röthlisberger und M. Rothaupt im *ClayLab* des Instituts für Geotechnik und die von A. M. Aguilar Sanchez am Institut für Baustoffe der ETH Zürich angefertigten Mikroskop-Bilder.

Der Hauptautor dieser Studie, Dr. David Felix, bedankt sich insbesondere bei den folgenden VAW-Mitarbeitern für ihre Beiträge zu diesem Forschungsprojekt – auch während der Covid19-Situation:

- Prof. Dr. Robert Boes: Mitkonzeption der Studie, wissenschaftliche Leitung, Reviews.
- Dr. Ismail Albayrak: Wissenschaftliche Beratung, Mitarbeit und Reviews.
- Yannick Marschall: Entwurf und Umsetzung der Schwebstoffmesseinrichtungen, zwei Messkampagnen am Entsander, Entwicklung des Bildauswertungs-Tools für die Abrasion an den Mittelschneiden in deren Seitenansicht, Feldarbeit.
- Maximilian Kastinger: zwei Messkampagnen am Entsander, umfangreiche Auswertungen der Schwebstoff-, Betriebs- und Abrasionsdaten mit Simulation der KW-Ausserbetriebnahmen.
- Nevin Cracknell: Weiterentwicklung des Bildauswertungs-Tools für die Abrasion an den Mittelschneiden und Becherausschnitten, umfangreiche Auswertungen zur Abrasion und zum Turbinenwirkungsgrad, Laufradvermessung, Feldarbeit an der Wasserfassung und Laboranalysen.
- Sebastian Davidis: Messkampagne am Entsander, Schwebstoffmonitoring, Laufradvermessung, Mitarbeit bei der umfangreichen Auswertung der Betriebs- und Abrasionsdaten.
- Dorte Masovic: Konstruktionszeichnungen für die Halterungen der Messgeräte und die Anpassung der Beruhigungsrechen, Schemas und Illustrationen.
- Mario Moser: Informatik, Steuerung des automatischen Probenehmers und Datenerfassung.
- Daniel Gubser: Elektrische Installation der Messgeräte, Entwicklung der Steuerung der automatischen Rückspülung für das CFDM, Datenerfassung und Messkampagnen am Entsander.
- Robert Pöschl: Erstellen und Montieren von Halterungen der Messgeräte und Anpassung der Beruhigungsrechen.
- Adriano Lais: Projektabwicklung und Ressourcenplanung.
- Daniela Addor und Pia Steinback: Administrative Unterstützung.



Anhang A: Schwebstoffbelastung

A1: Mikroskop-Bilder von Feinsedimentpartikeln

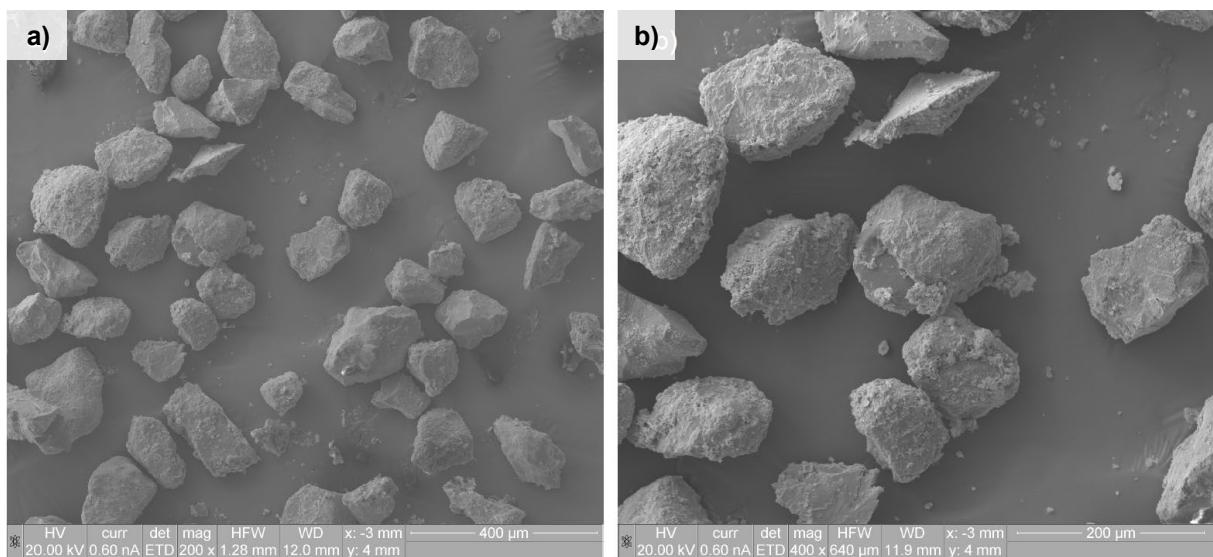


Abbildung 83: Elektronenmikroskop-Bilder von Partikeln aus dem Triebwasser des KW Susasca vom 01.07.2020 um 20:05 Uhr (Probe S-069b) mit zunehmendem Vergrösserungsfaktor (a-b) (Institut für Baustoffe IfB, im Auftrag der VAW, ETH Zürich).

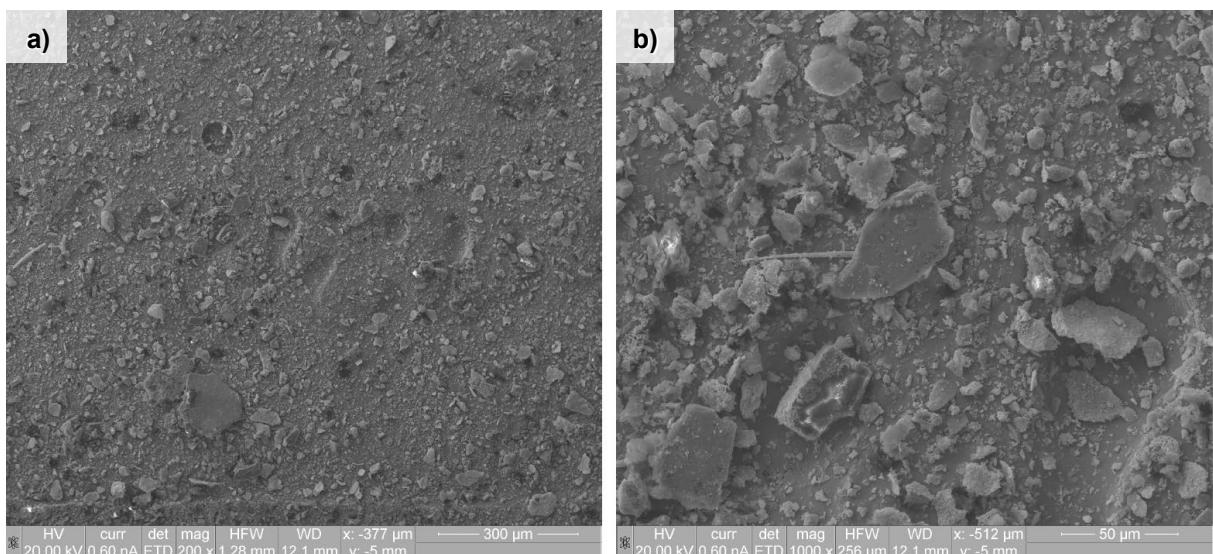


Abbildung 84: Elektronenmikroskop-Bilder von Partikeln aus dem Triebwasser vom 31.07.2020 um 17:34 Uhr (Probe S-084) mit zunehmendem Vergrösserungsfaktor (a-b) (IfB, ETH Zürich).

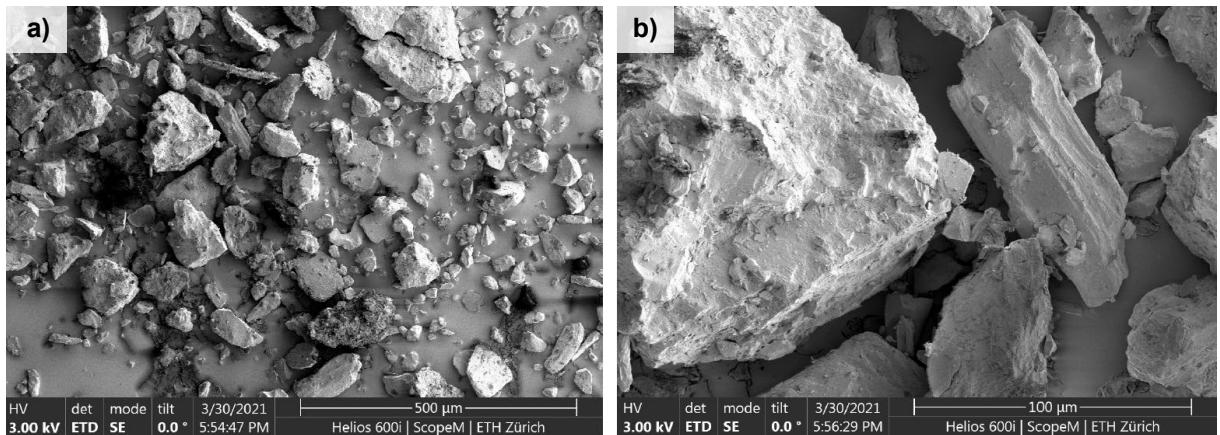


Abbildung 85: Elektronenmikroskop-Bilder von Partikeln aus dem Triebwasser vom 06.08.2020 (Probe S-L1) mit zunehmendem Vergrösserungsfaktor (a-b) (IfB, ETH Zürich).

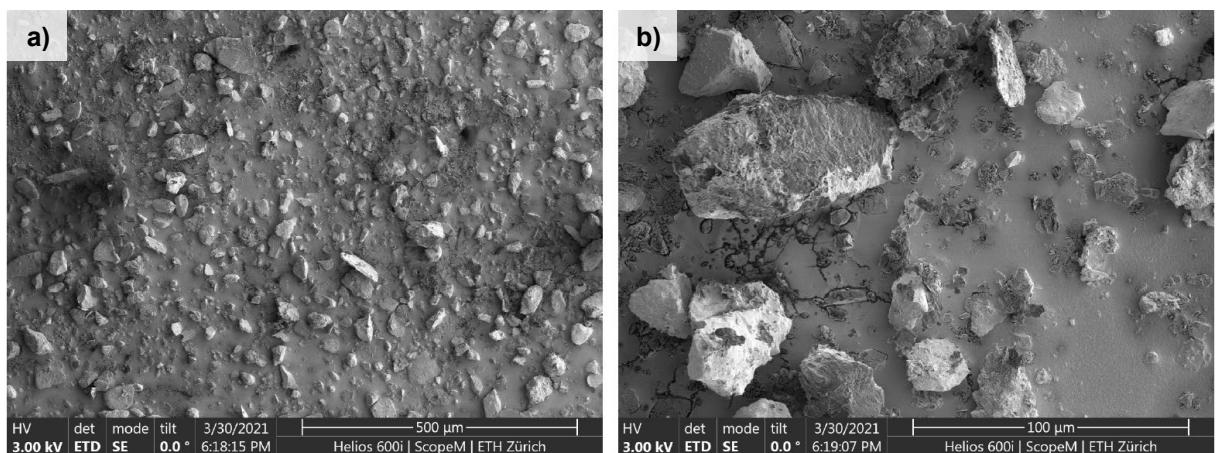


Abbildung 86: Elektronenmikroskop-Bilder von Partikeln aus dem Triebwasser vom 11.08.2020 um 18:11 Uhr (Probe S-096) mit zunehmendem Vergrösserungsfaktor (a-b) (IfB, ETH Zürich).

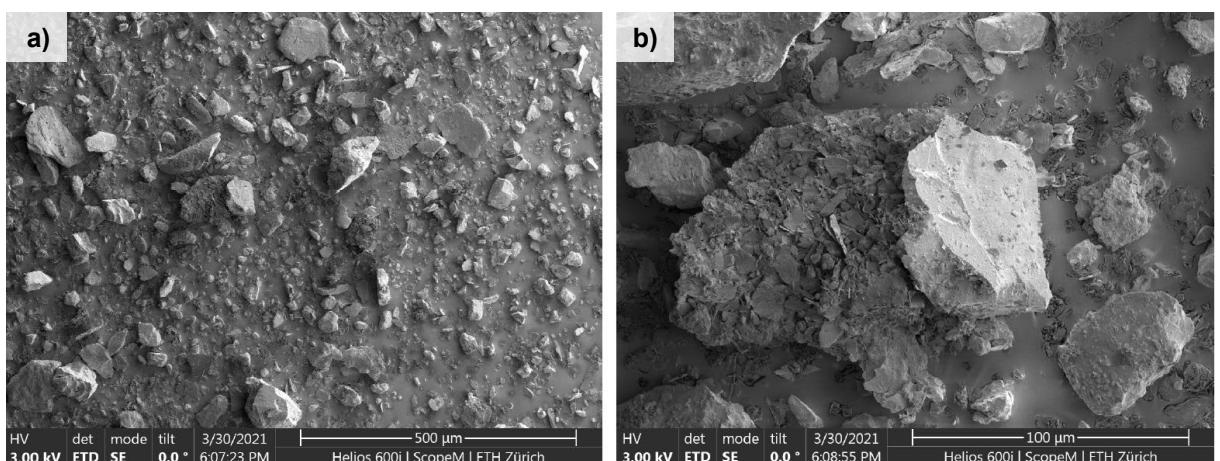


Abbildung 87: Elektronenmikroskop-Bilder von Partikeln aus dem Triebwasser vom 29.08.2020 um 04:48 Uhr (Probe S-122) mit zunehmendem Vergrösserungsfaktor (a-b) (IfB, ETH Zürich).



A2: Monatliche Sedimentfrachten und mittlere SSC

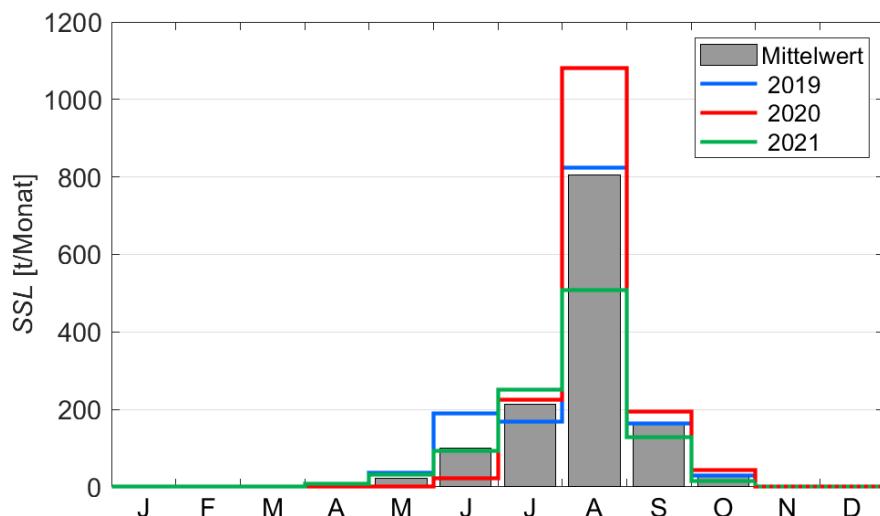


Abbildung 88: Monatliche Schwebstofffrachten in der Druckleitung des KW Susasca 2019 - 2021.

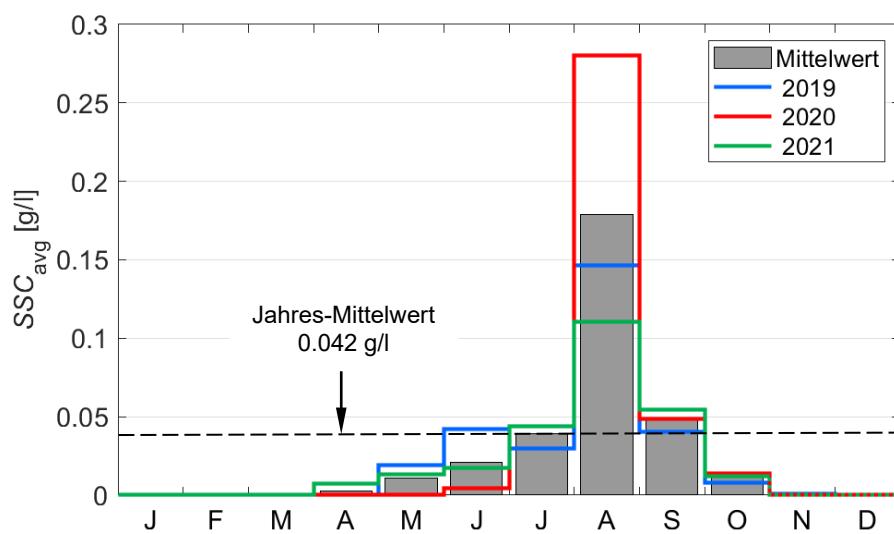
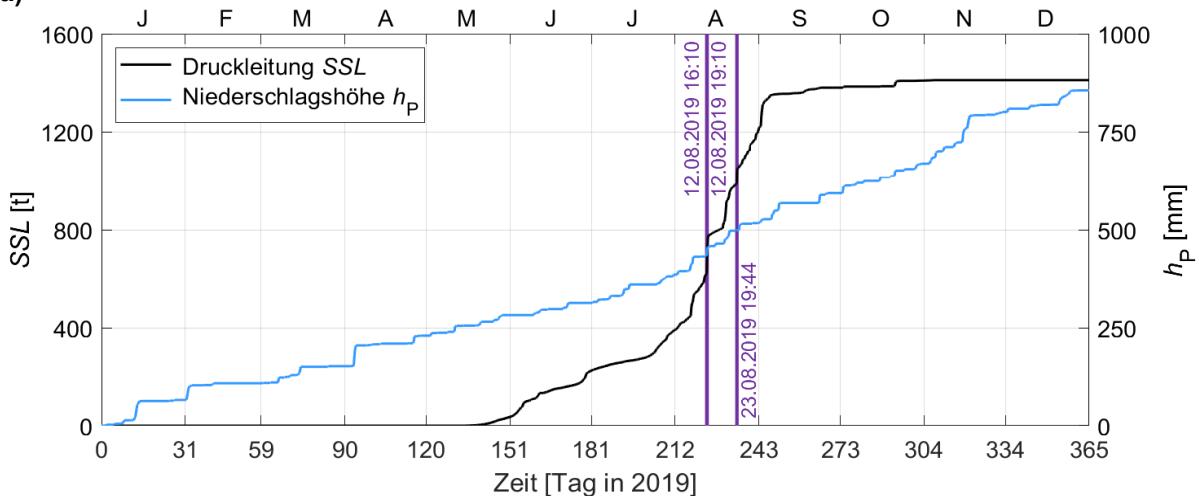


Abbildung 89: Mittlere monatliche Schwebstoffkonzentrationen in der Druckleitung des KW Susasca 2019 - 2021.

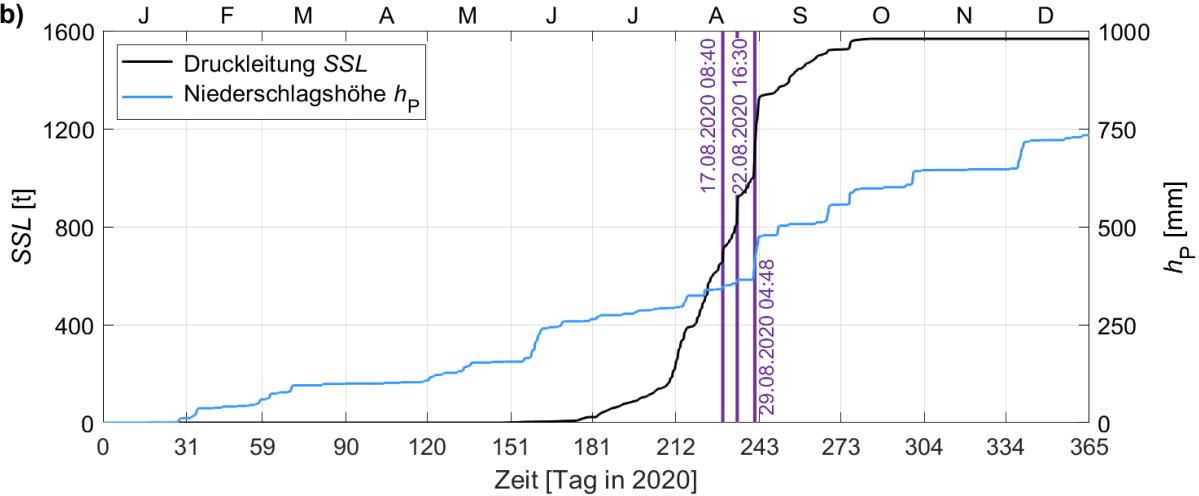


A3: Niederschlagshöhen und Sedimentfrachten

a)



b)



c)

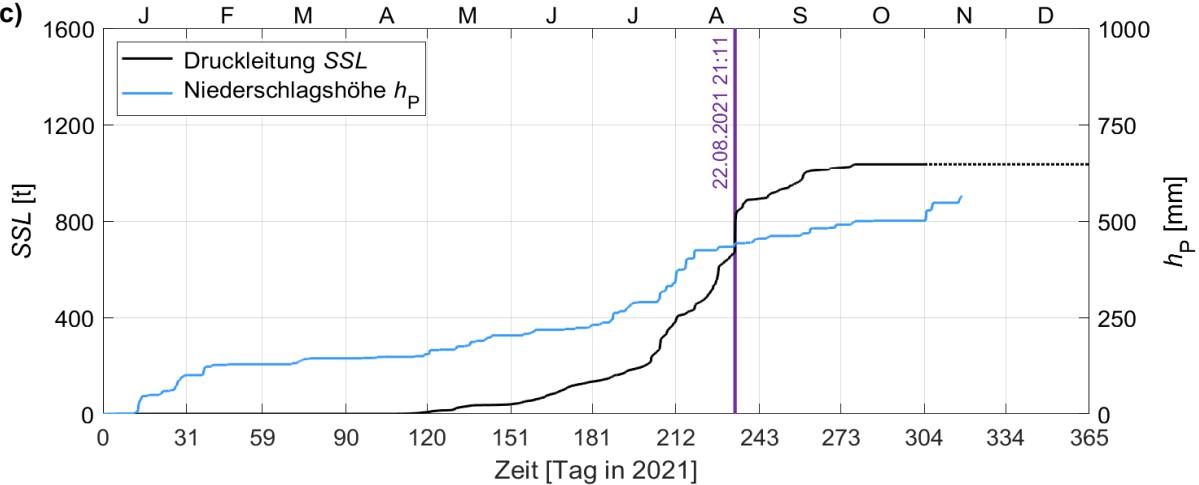


Abbildung 90: Kumulierte Niederschlagshöhen h_P und Schwebstofffrachten SSL in den Jahren (a) 2019, (b) 2020 und (c) 2021.
In violett sind signifikante Schwebstofftransport-Ereignisse eingetragen.



A4: Turbinierte Wasservolumen und Sedimentfrachten

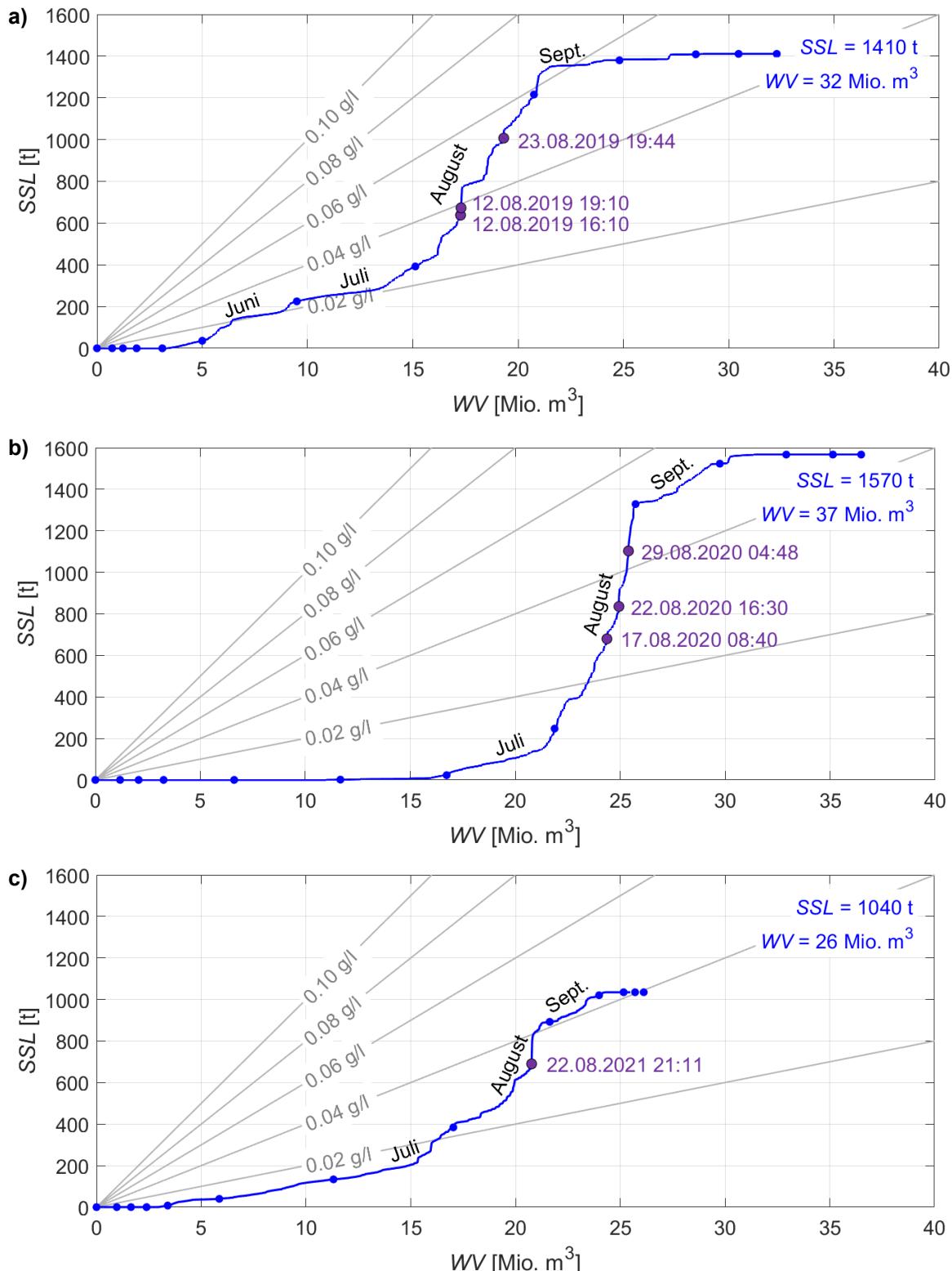


Abbildung 91: Kumulierte Schwebstofffrachten SSL in Funktion der turbinierten Wasservolumen WV in den Jahren a) 2019, b) 2020 und c) 2021. In violettt sind signifikante Schwebstofftransport-Ereignisse eingetragen.



A5: Schwebstofftransport-Ereignisse

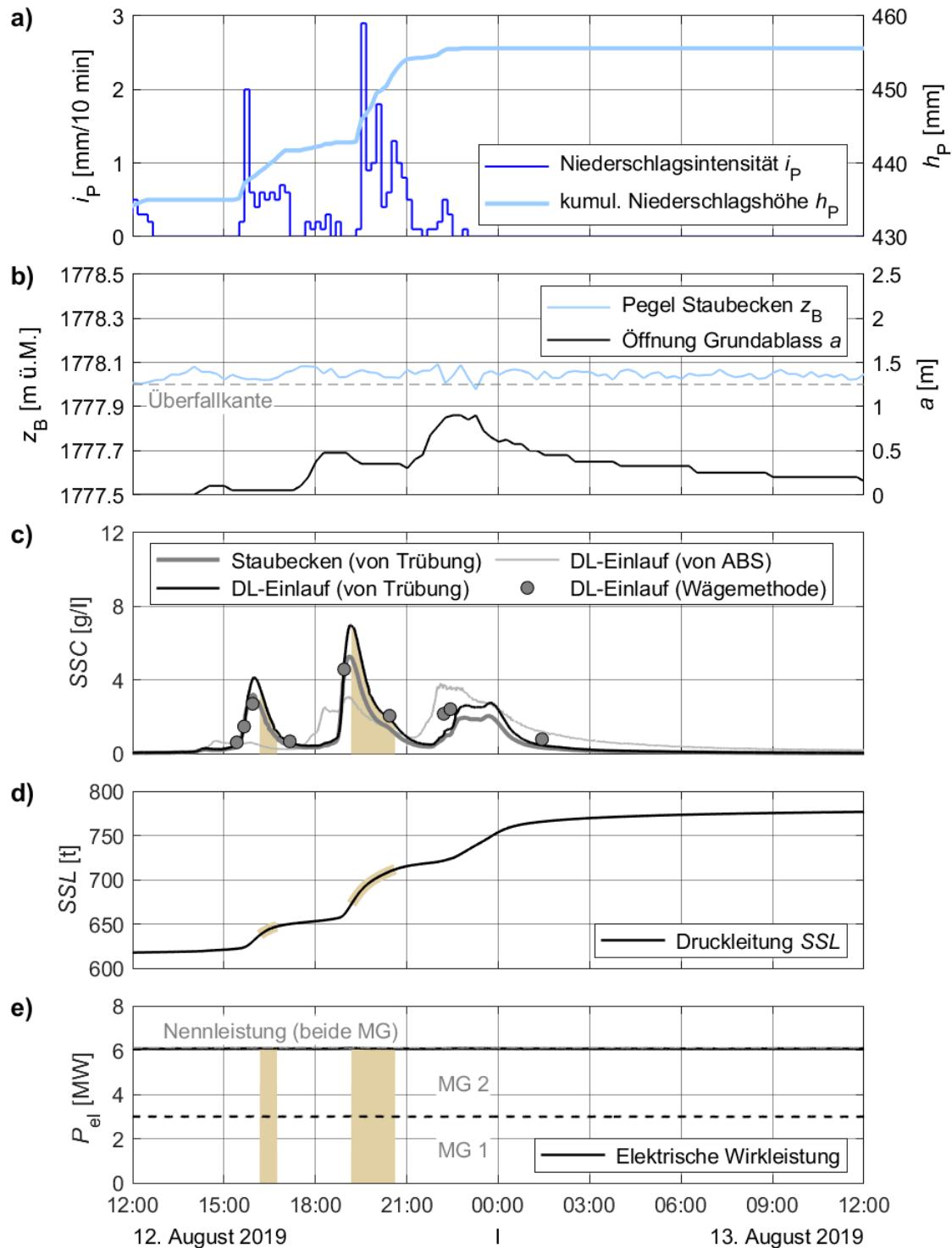


Abbildung 92: Zeitreihen während des Schwebstofftransportereignisses vom 12. und 13. August 2019: a) Niederschlagsintensität i_p und kumulierte Niederschlagshöhe h_p ; b) Pegel im Staubecken z_B und Öffnungshöhe des Grundablasses a ; c) SSC im Staubecken und in Entnahmekammer vor dem Einlauf zur Druckleitung; d) kumulierte SSL in der Druckleitung; e) elektrische Leistung beider MG. In braun sind die Zeiträume simulierter temporärer Ausserbetriebsnahmen während hoher SSC dargestellt.

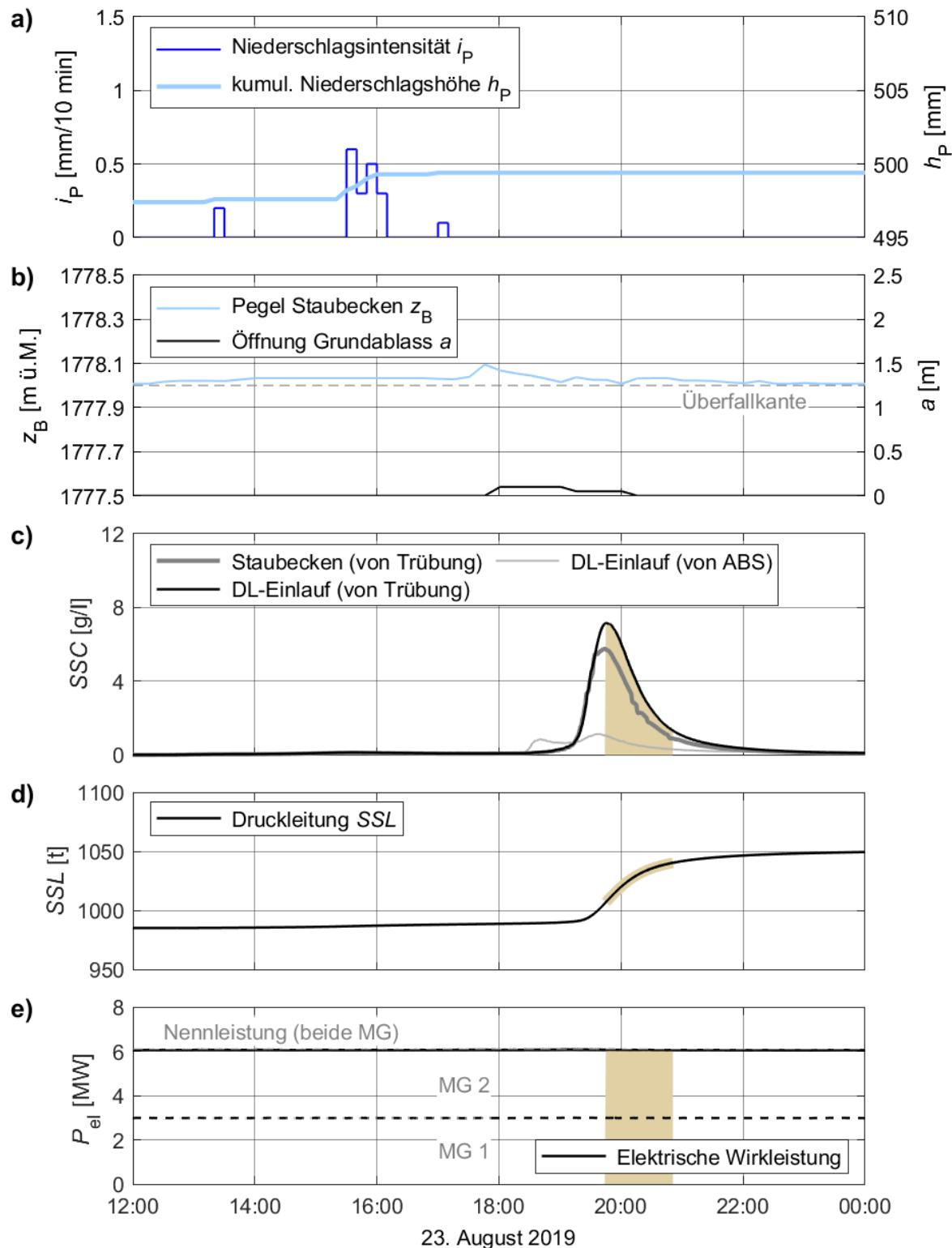


Abbildung 93: Zeitreihen während des Schwebstofftransportereignisses vom 23. August 2019: a) Niederschlagsintensität i_p und kumulierte Niederschlagshöhe h_p ; b) Pegel im Staubecken z_B und Öffnungshöhe des Grundablasses a ; c) SSC im Staubecken und in der Entnahmekammer vor dem Einlauf zur Druckleitung; d) kumulierte SSL in der Druckleitung; e) elektrische Leistung beider MG. In braun sind die Zeiträume simulierter temporärer Ausserbetriebnahmen während hoher SSC dargestellt.

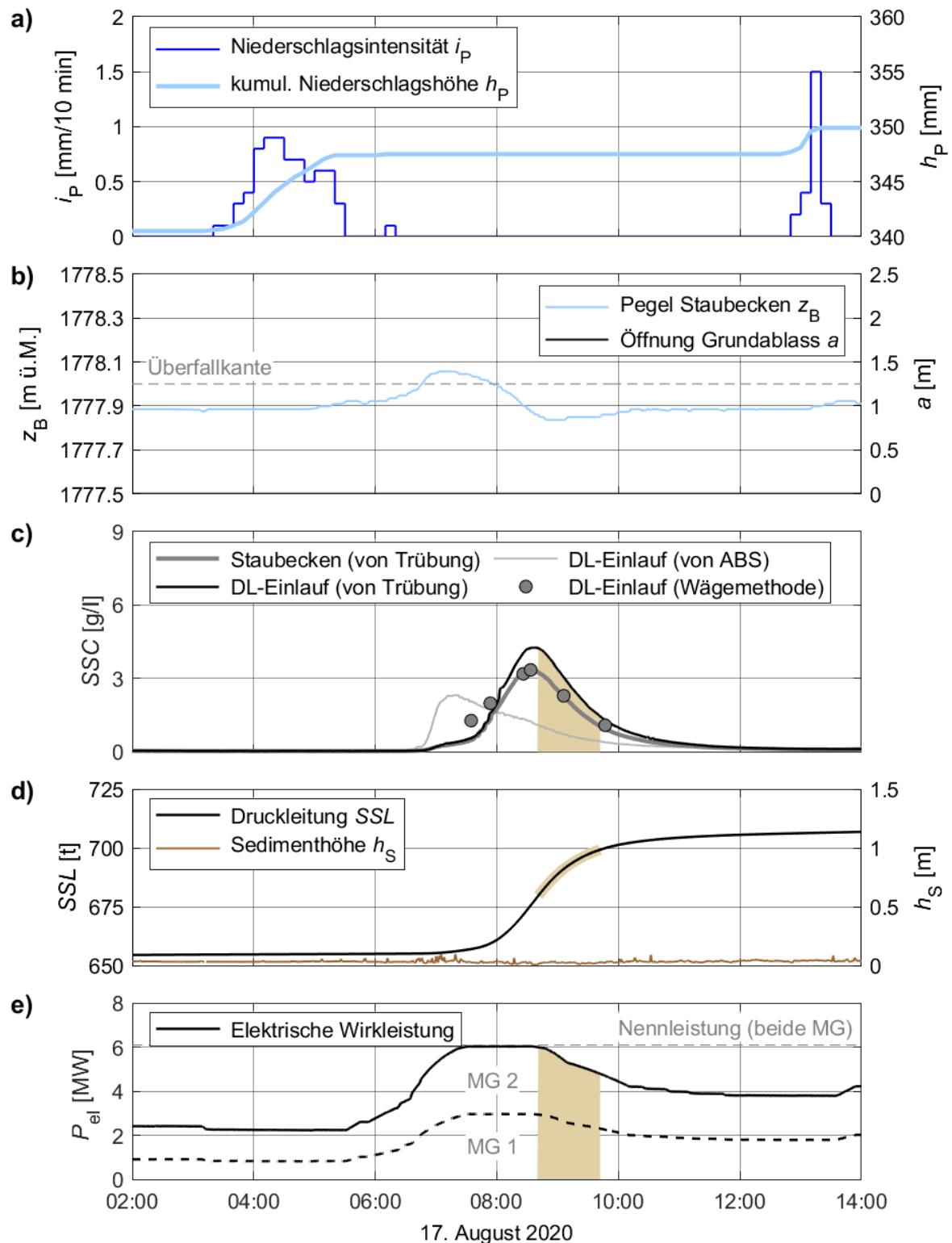


Abbildung 94: Zeitreihen während des Schwebstofftransportereignisses vom 17. August 2020: a) Niederschlagsintensität i_p und kumulierte Niederschlagshöhe h_p ; b) Pegel im Staubecken z_B und Öffnungshöhe des Grundablasses a ; c) SSC im Staubecken und in der Entnahmekammer vor dem Einlauf zur Druckleitung; d) SSL in der Druckleitung und Sedimenthöhe h_s in Entsanderkammer 1; e) elektrische Leistung beider MG. In braun sind die Zeiträume simulierter temporärer Ausserbetriebnahmen während hoher SSC dargestellt.

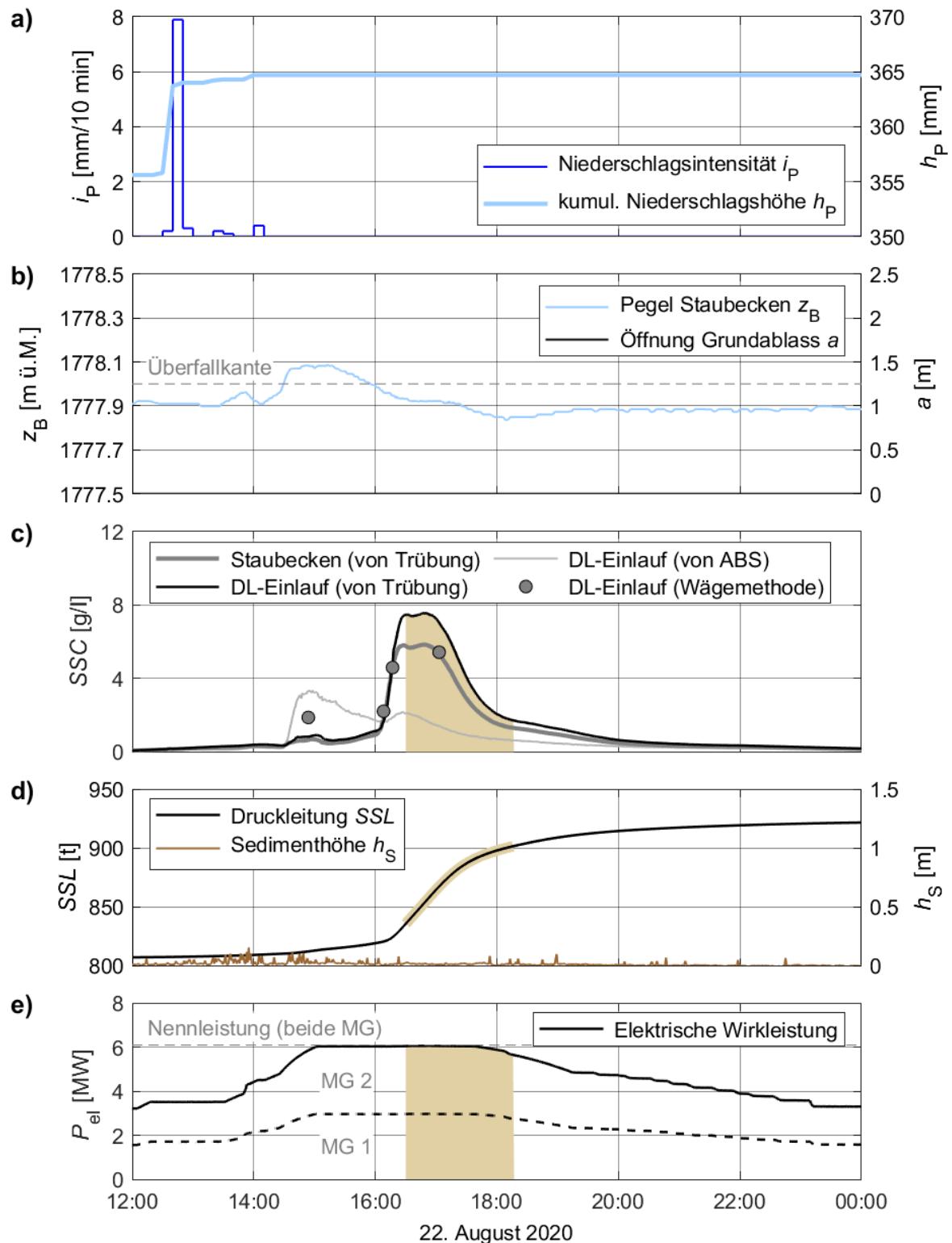


Abbildung 95: Zeitreihen während des Schwebstofftransportereignisses vom 22. August 2020: a) Niederschlagsintensität i_p und kumulierte Niederschlagshöhe h_p ; b) Pegel im Staubecken z_B und Öffnungshöhe des Grundablasses a ; c) SSC im Staubecken und in der Entnahmekammer vor dem Einlauf zur Druckleitung; d) SSL in der Druckleitung und Sedimentenhöhe h_s in Entsanderkammer 1; e) elektrische Leistung beider MG. In braun sind die Zeiträume simulierter temporärer Ausserbetriebnahmen während hoher SSC dargestellt.

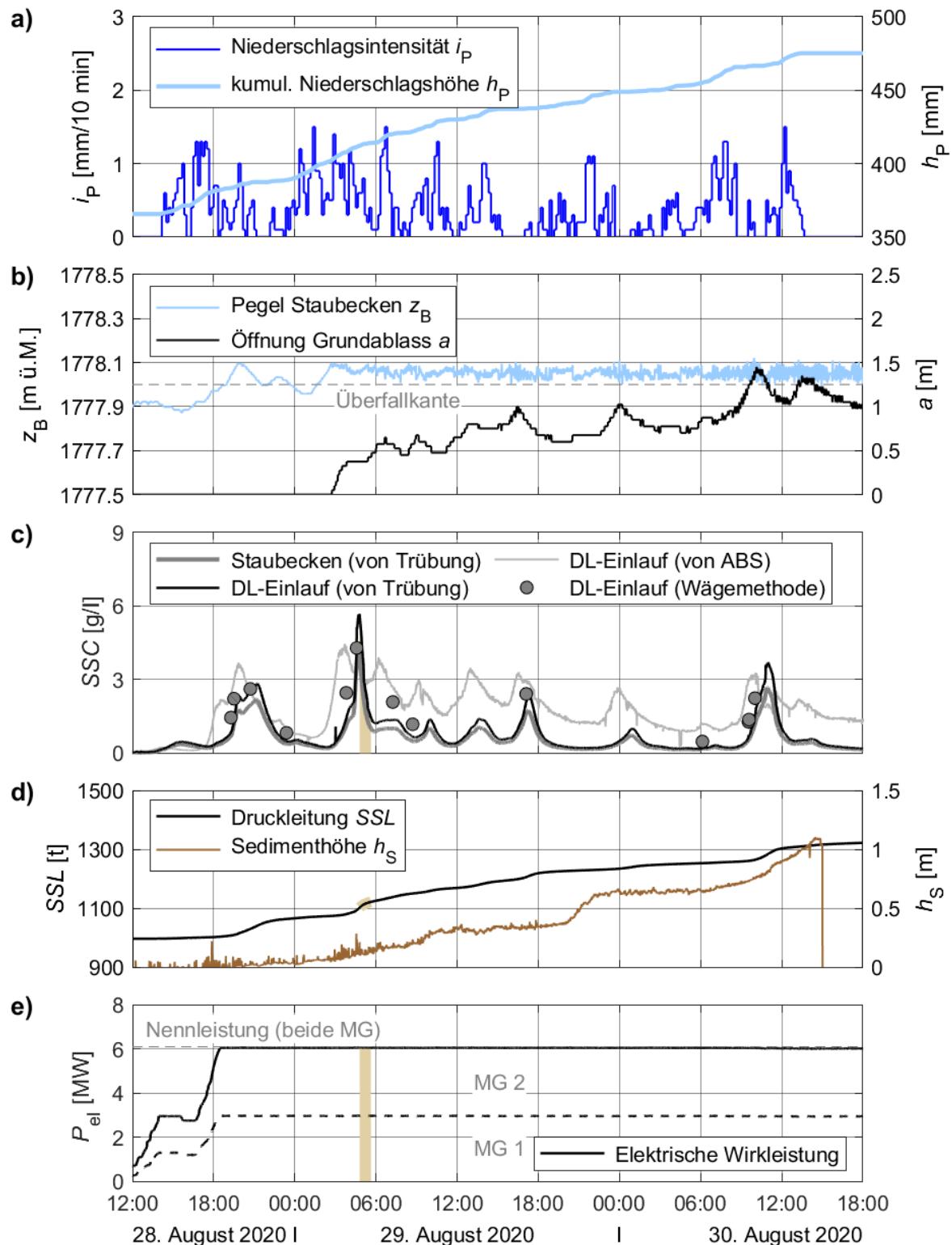


Abbildung 96: Zeitreihen während des Schwebstofftransportereignisses 28. bis 30. August 2020: a) Niederschlagsintensität i_p und kumulierte Niederschlagshöhe h_p ; b) Pegel im Staubecken z_B und Öffnungshöhe des Grundablasses a ; c) SSC im Staubecken und in der Entnahmekammer vor dem Einlauf zur Druckleitung; d) SSL in der Druckleitung und Sedimentenhöhe h_s in Entsanderkammer 1; e) elektrische Leistung beider MG. In braun sind die Zeiträume simulierter temporärer Ausserbetriebnahmen während hoher SSC dargestellt.

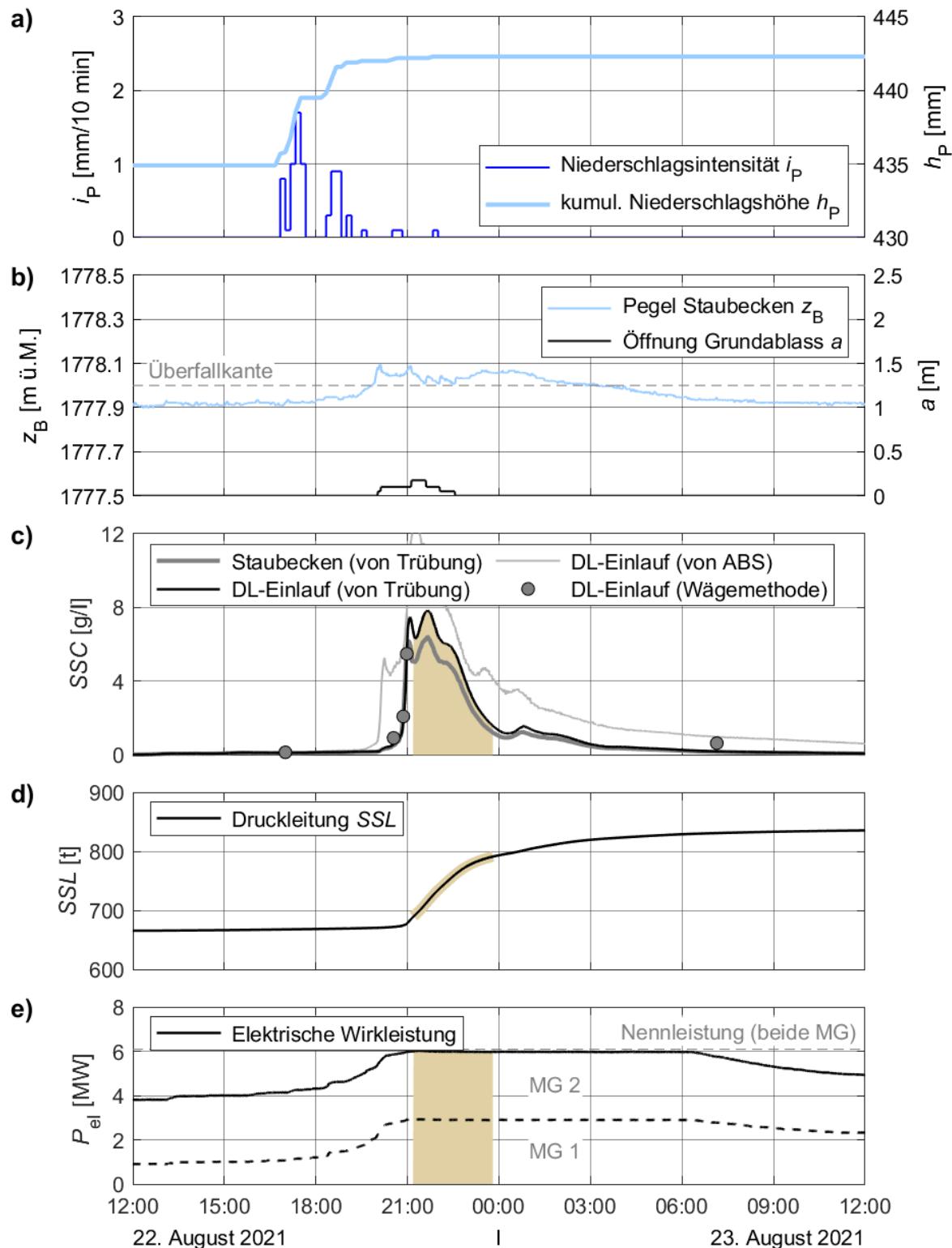


Abbildung 97: Zeitreihen während des Schwebstofftransportereignisses vom 22. und 23. August 2021: a) Niederschlagsintensität i_p und kumulierte Niederschlagshöhe h_p ; b) Pegel im Staubecken z_B und Öffnungshöhe des Grundablasses a ; c) SSC im Staubecken und in der Entnahmekammer vor dem Einlauf zur Druckleitung; d) kumulierte SSL in der Druckleitung; e) elektrische Leistung beider MG. In braun sind die Zeiträume simulierter temporärer Ausserbetriebsnahmen während hoher SSC dargestellt.



A6: Resultate des Coriolis-Massestrom- und Dichtemessgeräts (CFDM)

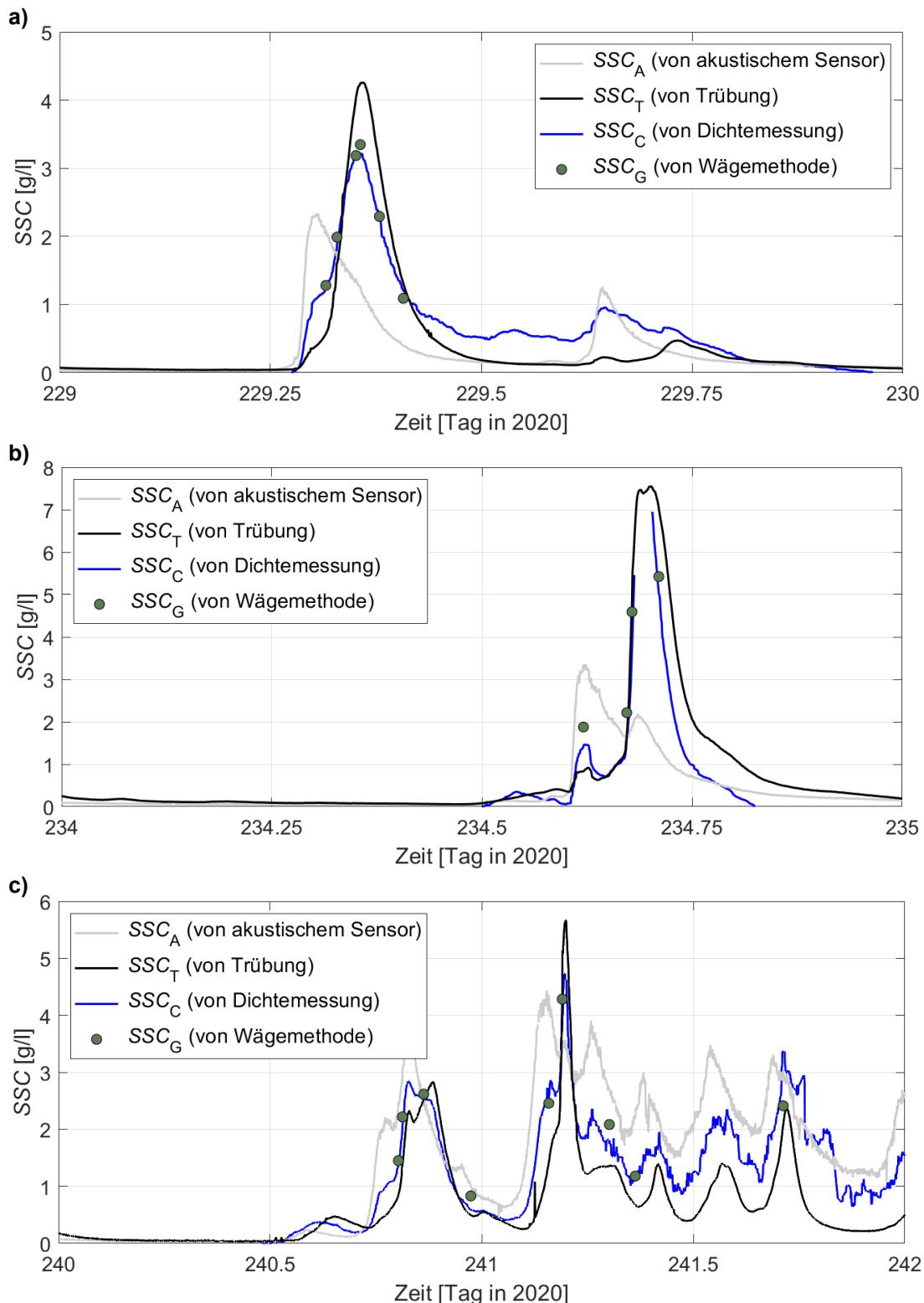


Abbildung 98: Vergleich der SSC gemessen mit akustischem Sensor, Trübungssonde, CFDM und Wägemethode (Referenz) während Schwebstofftransport-Ereignissen am (a) 17.08., (b) 22.08. und (c) 28.-29.08.2020



Anhang B: Turbinenabrasion

B1: Mittelschneiden-Breiten aus Schrägdraufsichten

Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der vermessenen Becher pro Laufrad und Aufnahmepunkt; die Breiten sind zweimal so breit dargestellt wie die Längen.

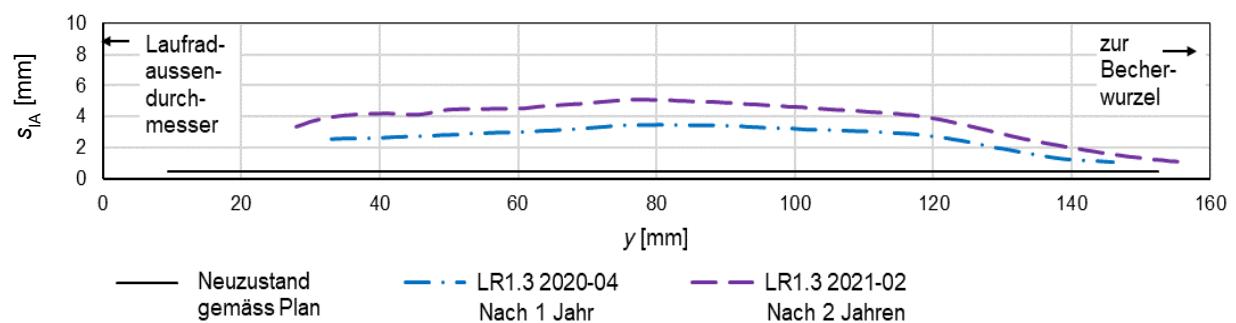


Abbildung 99: Verteilung der Mittelschneidenbreiten (aus Bildanalyse von Schrägdraufsichten) entlang der Mittelschneide des unbeschichteten Laufrads 1.3, welches am Projektende 2021 weiter im Einsatz war.

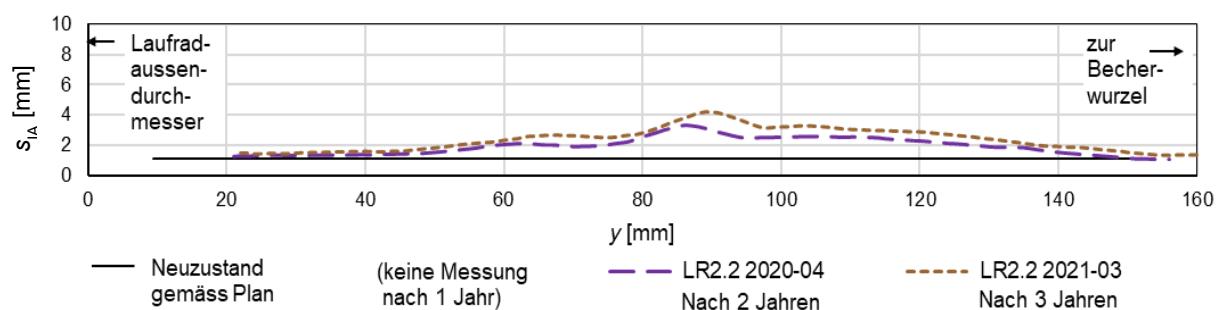


Abbildung 100: Verteilung der Mittelschneidenbreiten (aus Bildanalyse von Schrägdraufsichten) entlang der Mittelschneide des beschichteten Laufrads 2.2, welches am Projektende 2021 weiter im Einsatz war.

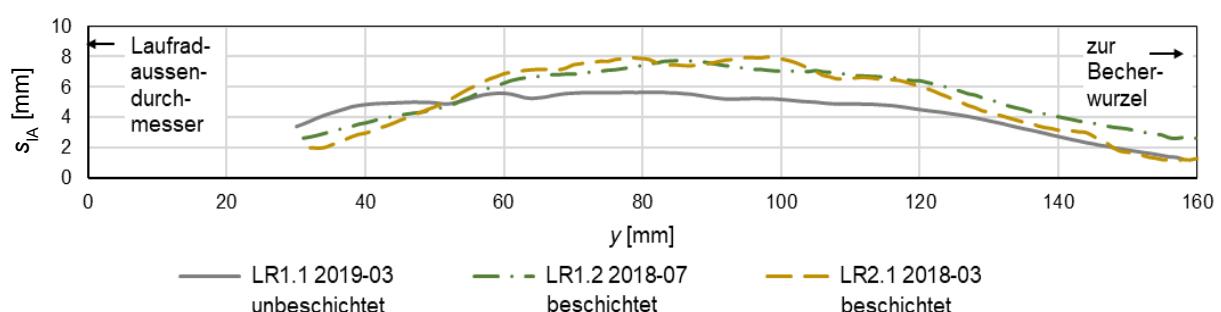


Abbildung 101: Verteilung der Mittelschneidenbreiten (aus Bildanalyse von Schrägdraufsichten) entlang der Mittelschneide der übrigen Laufräder, welche nicht mehr im Einsatz sind.

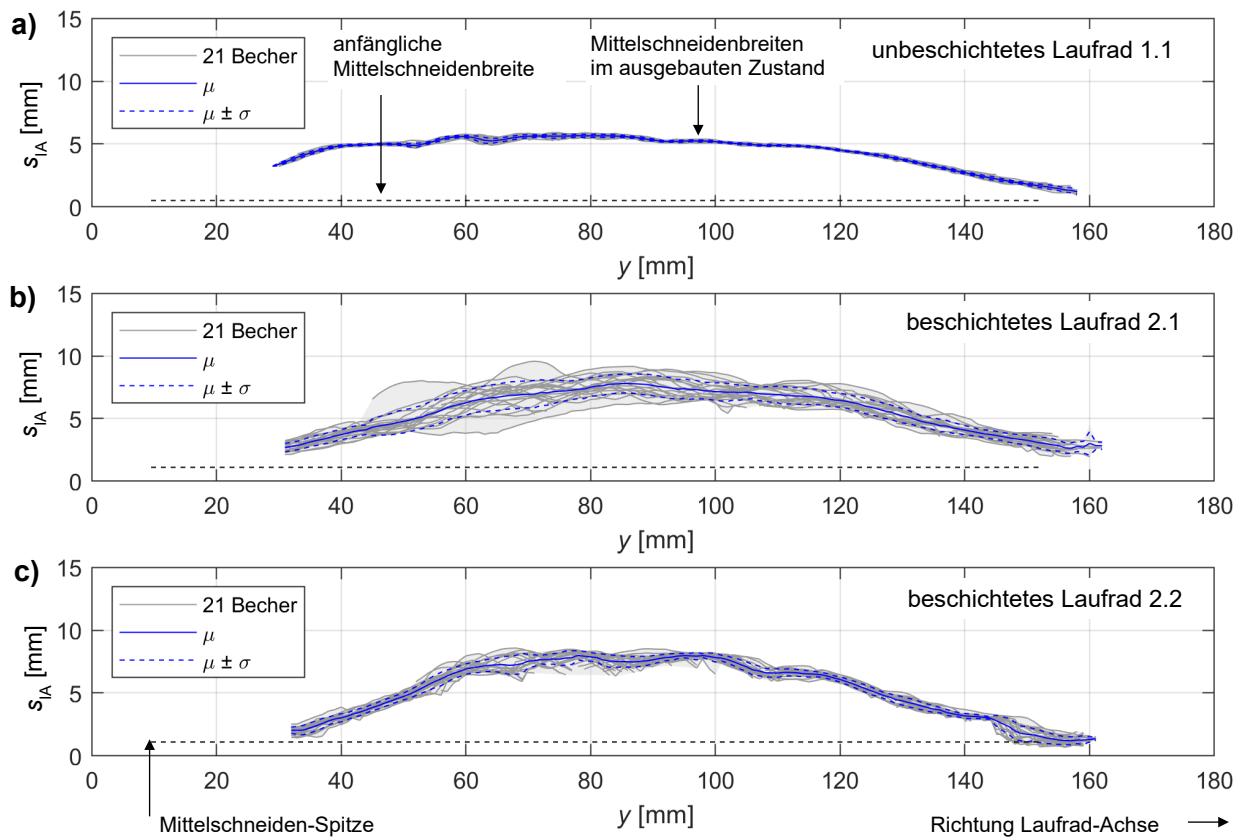


Abbildung 102: Variation der Mittelschneidenbreiten (aus Bildanalyse von Schrägdraufsichten) entlang der Mittelschneide für die je 21 Becher der drei stark abgenutzten Laufräder, welche nicht mehr im Einsatz sind (μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung).



B2: Mittelschneiden-Höhenreduktion aus Seitenansichten

*Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der vermessenen Becher pro Laufrad und Aufnahmezeitpunkt; die Höhen sind zweimal so hoch dargestellt wie die Längen.

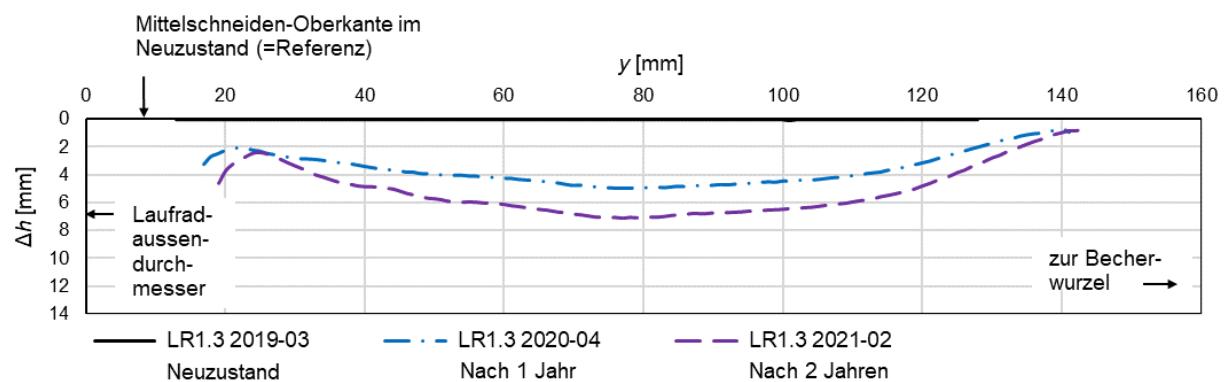


Abbildung 103: Verteilung der Mittelschneiden-Höhenreduktion (aus Bildanalyse von Seitenansichten) entlang der Mittelschneide des unbeschichteten Laufrads 1.3, welches am Projektende 2021 weiter im Einsatz war.

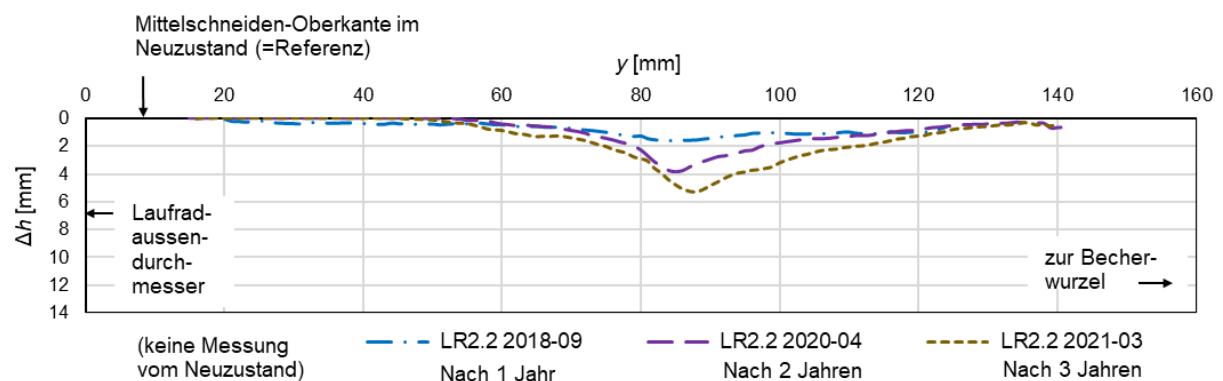


Abbildung 104: Verteilung der Mittelschneiden-Höhenreduktion (aus Bildanalyse von Seitenansichten) entlang der Mittelschneide des beschichteten Laufrads 2.2, welches am Projektende 2021 weiter im Einsatz war.

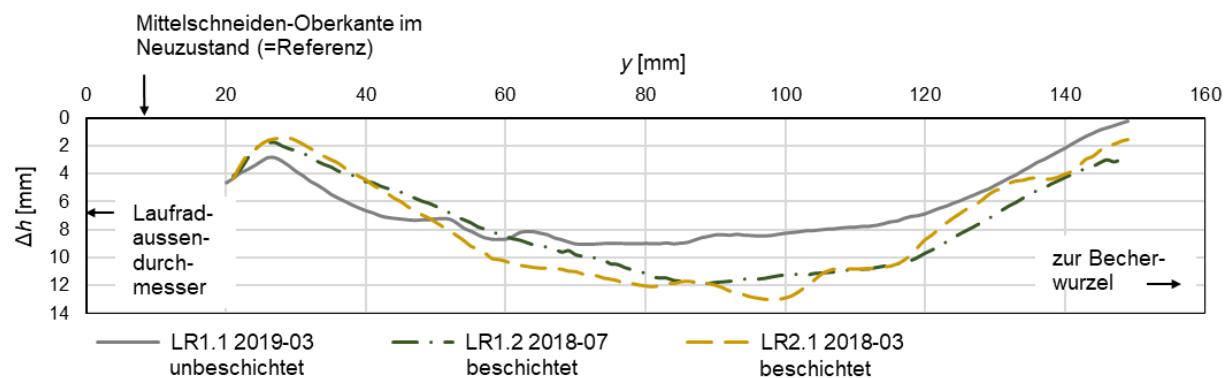


Abbildung 105: Verteilung der Mittelschneiden-Höhenreduktion (aus Bildanalyse von Seitenansichten) entlang der Mittelschneide der übrigen Laufräder, welche nicht mehr im Einsatz sind.

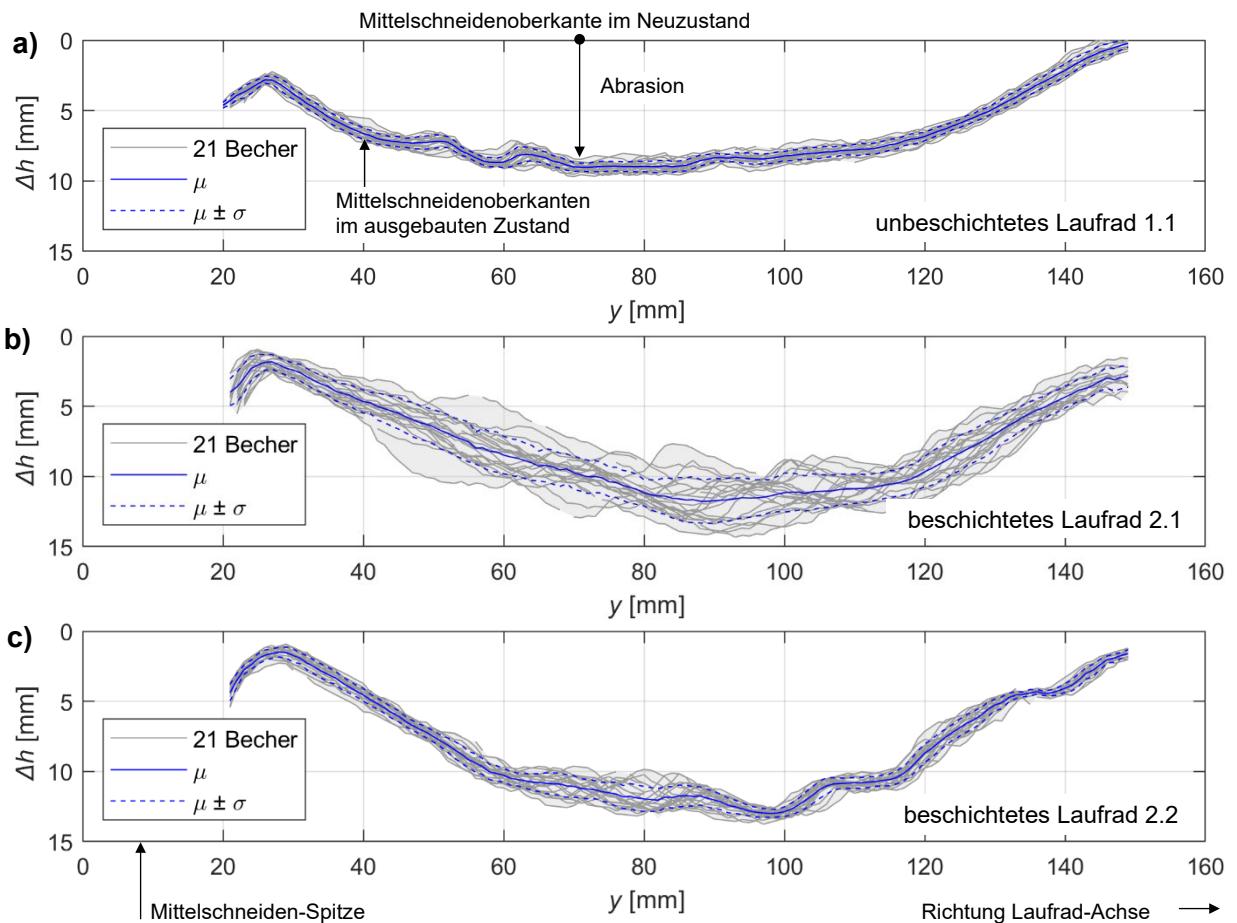
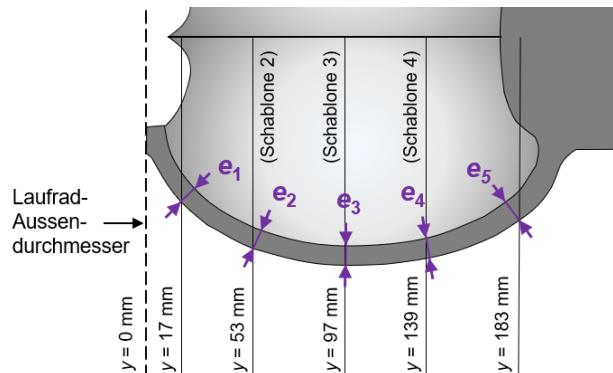


Abbildung 106: Variation der Mittelschneiden-Höhenreduktion (aus Bildanalyse von Seitenansichten) entlang der Mittelschneide für die je 21 Becher der drei stark abgenutzten Laufräder, welche nicht mehr im Einsatz sind (μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung).



B3: Becherwanddicken



Die Becherwanddicken wurden nahe des oberen Becherrands, senkrecht zur Becherinnen- und -aussenseite, gemessen

Jeweils an linker und rechter Becherwand

Abbildung 107: Definition der Lage der 5 Messstellen für die Becherwanddicke (= Abbildung 29f).

Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der vermessenen Becher pro Laufrad und Aufnahmezeitpunkt.

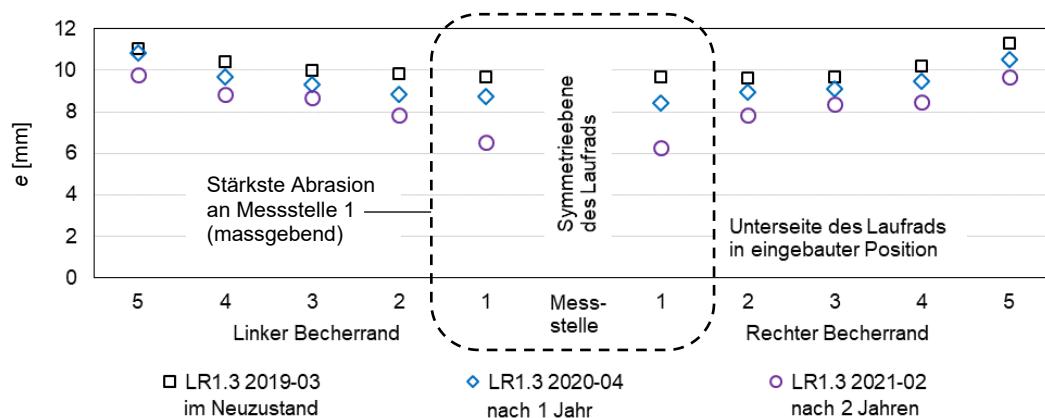


Abbildung 108: Becherwanddicke e an je fünf Messstellen am linken und rechten Becherrand für das unbeschichtete Laufrad 1.3, welches am Projektende weiter im Einsatz war.

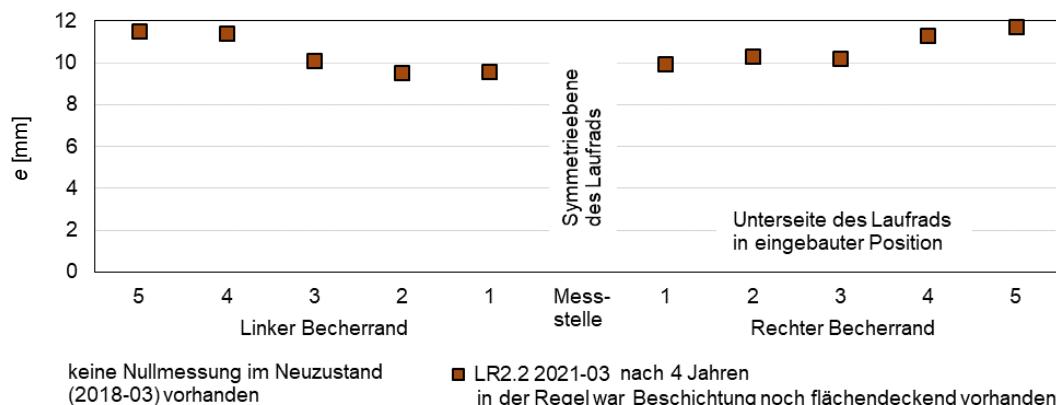


Abbildung 109: Becherwanddicke an je fünf Messstellen am linken und rechten Becherrand für das beschichtete Laufrad 2.2, welches am Projektende weiter im Einsatz war.

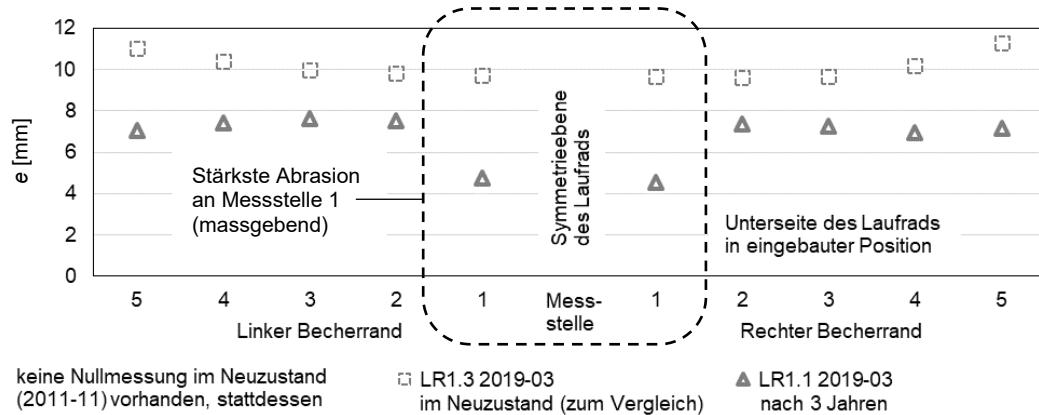


Abbildung 110: Becherwanddicke an je fünf Messstellen am linken und rechten Becherrand des stark abgenutzten unbeschichteten Laufrads 1.1, welches nicht mehr im Einsatz ist.

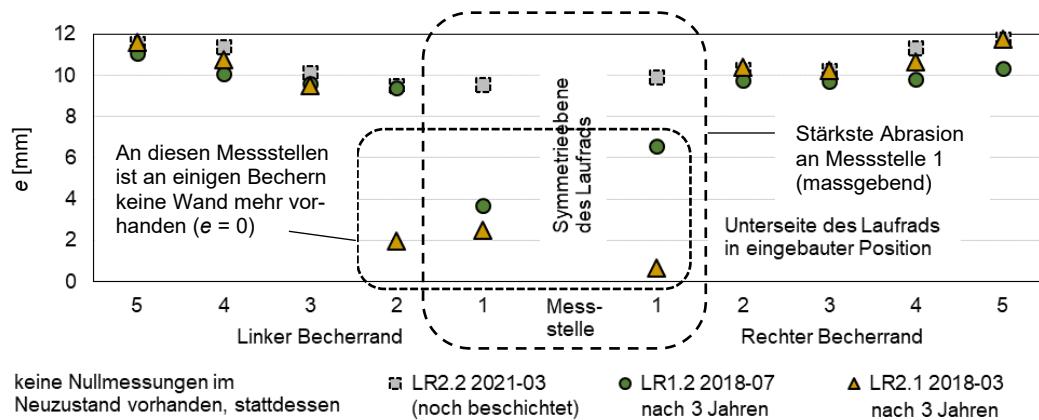


Abbildung 111: Becherwanddicke an je fünf Messstellen am linken und rechten Becherrand der zwei stark abgenutzten beschichteten Laufräder, welche nicht mehr im Einsatz sind.



Anhang C: Wirkungsgradabnahmen

C1: Wirkungsgradabnahmen bei Teil- bis Volllastbetrieb

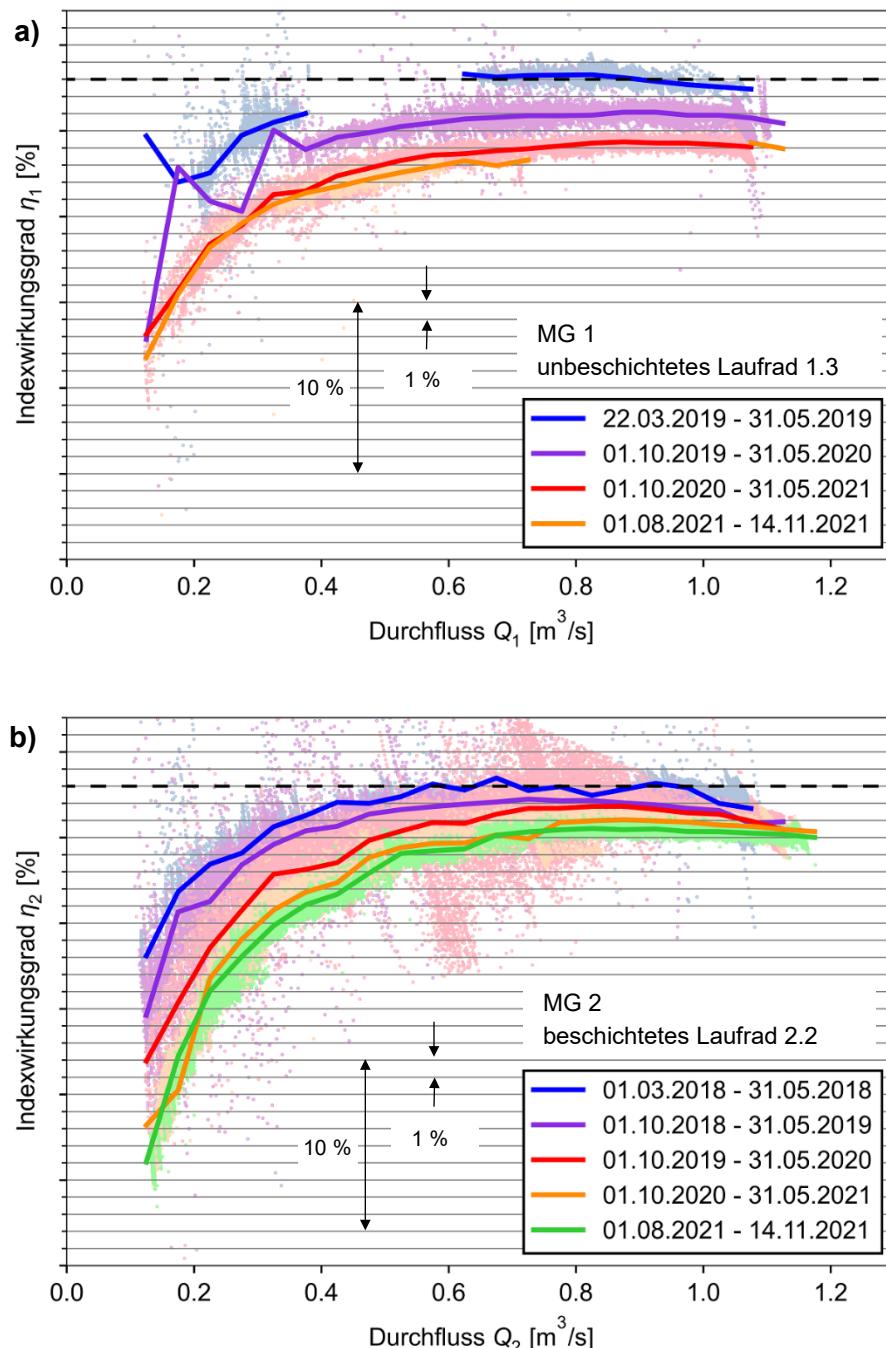


Abbildung 112: Veränderungen des Index-Wirkungsgrads von Teil- bis Volllast für beide MG des KW Susasca mit den Laufrädern, die während der Projektdauer 2018/2019–2021 im Einsatz waren: a) MG 1 mit unbeschichtetem Laufrad 1.3 und b) MG 2 mit beschichtetem Laufrad 2.2.