

Bericht

Kraftwerk Litzirüti der Arosa Energie

Kraftwerk Litzirüti

Schwall-Sunk Sanierung Plessur

Vorstudie



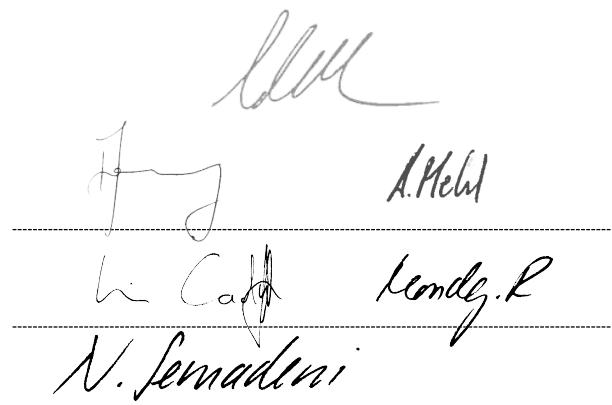
Linus Cadotsch, HTU-M
Hannes Jenny, HTU-M
Adrian Mehl, HTU-M

30. Juni 2023

Ref.-Nr. H 18353

Details zum Dokument

Titelbild Plessur bei Langwies
 Dokumentart/-klasse Bericht
 Nummer H 18353
 Auftraggeber Arosa Energie
 Anlage/Objekt Kraftwerk Litzirüti
 Titel Schwall Sunk Sanierung Vorstudie KW Litzirüti
 Betreff Vorstudie
 Linus Cadotsch, HTU-M
 Hannes Jenny, HTU-M
 Adrian Mehl, HTU-M
 Erstellt 30.06.2023
 Ursin Caduff, HTU-W
 Geprüft 30.06.2023 Ricardo Mendez, HTU-W
 Freigegeben 30.06.2023 Nadia Semadeni, HTU
 Datei SSKWLi Bericht Vorstudie 2023.06.30.docx
 Attribute Bericht | --- | --- | Ökologie | Schwall/Sunk



Verteiler

Name	STKZ
David Schmid	Amt für Natur und Umwelt Graubünden (ANU)
Andreas Meraner	Amt für Jagd und Fischerei Graubünden (AJF)
Beat Hunger	Amt für Energie und Verkehr Graubünden (AEV)
Lucie Lundsgaard	Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Tino Mongili	Geschäftsleiter Arosa Energie
Ablage HT	HDS/pfi

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
1. Zusammenfassung	6
2. Einleitung	9
3. Grundlagen und Randbedingungen	11
3.1 Bestehende Berichte und Grundlagen	11
3.2 Projektorganisation	12
3.3 Ziele	12
3.4 Projektperimeter und Wasserkraftanlagen	13
3.5 Untersuchungsstrecken	17
3.6 Resultate der strategischen Planung	19
3.7 Hydraulische Modelle	21
3.8 Hydrologie	24
3.9 Validierung hydraulische Modelle	30
3.10 Schwallversuch	32
4. Defizit- und Ursachenanalyse (TP 1)	35
4.1 Methodik	35
4.2 Resultate	54
4.3 Zusammenfassung Indikatoren	88
4.4 Vergleich zur strategischen Planung	91
4.5 Unsicherheiten und Schwierigkeiten Indikatoren	92
4.6 Ursachenanalyse	94
4.7 Gutachterliche Einschätzung Defizit- und Ursachen	96
4.8 Fazit Defizit- und Ursachenanalyse	97
5. Definition repräsentativer Ganglinien (TP 2)	101
5.1 Betriebsanalyse	101
5.2 Entscheid Repräsentativität	102
6. Zieldefinition & Sanierungsumfang (TP 3)	103
6.1 Methodik – Bestimmung hydrologische Kenngrössen	103
6.2 Methodik – Abschätzung Sanierungsumfang	109
6.3 Resultate – Bestimmung hydrologische Kenngrössen	112
6.4 Iterative Bestimmung Zieldefinition und Sanierungsumfang	116
6.5 Optimierte Volumenbewirtschaftung	119
7. Vorauswahl Sanierungsmassnahmen (TP 3)	121
7.1 Linksufriges Ausgleichsbecken	121
7.2 Ausleitkraftwerk Pradapunt	122
7.3 Schätzung Gesamtkosten (Barwert)	124
8. Gesamtbeurteilung ökologischer Nutzen	126
8.1 Sanierter Zustand mit Ausgleichsbecken	126
8.2 Sanierter Zustand mit Ausleitkraftwerk	132
8.3 Zielerfüllung	138
8.4 Methodik ökologischer Nutzen	138
8.5 Resultate Beurteilung Massnahmen	141
8.6 Kosten-Nutzen Analyse	143
8.7 Fazit ökologischer Nutzen und Verhältnismässigkeit	144
9. Gesamtbeurteilung	146
9.1 Einleitung	146
9.2 Defizit- und Ursachenanalyse	146

9.3	Zieldefinition und Sanierungsumfang	147
9.4	Vorauswahl Massnahmen	148
9.5	Ökologischer Nutzen und Verhältnismässigkeit	149
9.6	Nächste Schritte	150
	Literaturverzeichnis	152
	Abbildungsverzeichnis	153
	Tabellenverzeichnis	158
	Beilagenverzeichnis	167

1. Zusammenfassung

Mit dem Regierungsbeschluss vom 13. Oktober 2015 hat die Regierung des Kantons Graubünden auf Grundlage der strategischen Planung des Amtes für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden (ANU) der Arosa Energie die Sanierungspflicht bezüglich Schwall-Sunk angeordnet. Die Arosa Energie ist angewiesen, die wesentlichen Beeinträchtigungen aufgrund von Schwall und Sunk in den durch die betroffene Wasserrückgabe beeinträchtigten Abschnitten in der Plessur im Sinne von Artikel 39a GSchG bzw. Art. 41e Gewässerschutzverordnung (GSchV, 1998) zu verhindern oder zu beseitigen. Die Arosa Energie hat der zuständigen Behörde eine bewilligungsfähige und umsetzbare Massnahme, welche die wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk unterhalb der Wasserrückgabe des Kraftwerkes Litzirüti beseitigt, zur Genehmigung einzureichen.

Der vorliegende Bericht erfüllt die Anforderungen des genannten Regierungsbeschlusses, namentlich die Zusammenfassung der Abklärungen und Ergebnisse, basierend auf der Methode der Vollzugshilfe Massnahmen des BAFU (2017) (VZH Schwall-Sunk [1]), der folgenden Teilphasen des Hauptschrittes 1:

- a. Defizit- und Ursachenanalyse;
- b. Zieldefinition;
- c. Vorauswahl der Massnahmen.

Im ersten Schritt wurde im Rahmen der Defizitanalyse geprüft, wie gross die ökologischen Defizite in der Plessur sind. Anhand von Feldaufnahmen und Modellierungen wurde das ökologische Defizit im oberen Plessurabschnitt zwischen Litzirüti und Pradapunt evaluiert. Anschliessend wurde analysiert, auf welche Ursachen die vorgefundenen Defizite zurückgeführt werden können und es wurden die Schwall-Sunk bedingten Defizite identifiziert. Im nächsten Schritt, der Zieldefinition, wurden die ökologischen Ziele zur Beseitigung der Schwall-Sunk bedingten Defizite festgelegt. Basierend auf den ökologischen Zielen konnte der benötigte Sanierungsumfang ermittelt und parallel dazu verschiedene Sanierungsmassnahmen evaluiert und eine Auswahl an Bestvarianten bestimmt werden. Für die ausgewählten Bestvarianten wurde in einer Kosten-Nutzen-Analyse der ökologische Nutzen und die Gesamtkosten einander gegenübergestellt.

Da bereits die natürlichen Umweltbedingungen in der Plessur zwischen Litzirüti und Pradapunt hohe Anforderungen an die Leitfischart der Bachforelle stellen, stellt sich eine klare Abgrenzung zwischen den durch Schwall-Sunk bedingten Beeinträchtigungen und weiteren äusseren Bedingungen als schwierig dar. Insbesondere bei der Reproduktion der Fische und der Aufrechterhaltung einer sich selbst erhaltenden Population besteht eine Vielzahl an Defiziten unterschiedlicher Ursachen. Neben der hydraulischen Beeinträchtigung durch Schwall-Sunk sind dies insbesondere die geringe Verfügbarkeit geeigneter Laichflächen, bestehende Wanderhindernisse sowie der hohe Feinsedimenteintrag aus den Seitenbächen der Plessur.

Die durchgeführten Brutboxenversuche zeigen auf, dass die chemisch-physikalische Wasserqualität in der oberen Plessur grundsätzlich für die Reproduktion der Bachforellen geeignet ist. Weiter zeigen die Resultate der Befischungen, dass bei Litzirüti eine natürliche Reproduktion zumindest auf tiefem Niveau nachgewiesen werden konnte. Für eine sich selbst erhaltende Forellenpopulation ist diese jedoch nicht ausreichend. Mehrere Jahre alte adulte Bachforellen bei Litzirüti zeigen zumindest auf, dass dieser Abschnitt als Habitatraum genutzt wird. Unterhalb des Sapünerbachs konnten Laichgruben und Jungfische in höheren Dichten als bei Litzirüti vorgefunden

werden, ob aber im heutigen Zustand ohne Besatz eine Forellenpopulation sich selbst erhalten könnte, ist unklar.

Die Indikatorbewertungen nach VZH Schwall-Sunk [1] zeigen, dass verschiedene ökologische Defizite auf den negativen Einfluss von Schwall-Sunk zurückgeführt werden können. Insbesondere die tiefen Sunkabflüsse im Winterhalbjahr in Kombination mit den regelmässigen Schwallereignissen beeinträchtigen eine natürliche Reproduktion, insbesondere zwischen Litzirüti bis zum Zufluss des Sapünerbachs und vermindern die Habitateignung (Defizite Indikator F3* und F6 bei Litzirüti). Auch die Pegeländerungsraten in Kombination mit den trockenfallenden Flächen sind hoch und führen zu einem erheblichen Strandrungsrisiko für larvale Fische (Defizit Indikator F2* bei Litzirüti und Langwies). Zudem führen die hohen Abflussänderungsraten zu hohen Temperaturänderungsraten (Defizit Indikator Q1* bei Litzirüti und Langwies). Auch die Resultate der Erhebungen zum Makrozoobenthos der Plessur zwischen Litzirüti und Pradapunt weisen auf ein durch Schwall-Sunk verursachtes Defizit hin. Die Kolmationsaufnahmen zeigen keine nachweisbare Beeinflussung durch Schwall-Sunk auf.

Die Festlegung der hydrologischen Vorgaben zur Beseitigung der wesentlichen Beeinträchtigung und des daraus resultierenden Sanierungsumfangs ist ein iterativer Prozess. Die Definition der benötigten hydrologischen Kenngrössen ist nicht immer eindeutig, womit mehrere hydrologische Anforderungsprofile die Beseitigung der Defizite erreichen können. Die Defizite der berücksichtigten Kernindikatoren (F2*, F3* und Q1*) können einerseits mit einer Begrenzung der Pegeländerungsraten und einer ganzjährigen Sunkanhebung auf minimal 0.24 m³/s bei Litzirüti behoben werden (im Auswertungszeitraum lag der Minimalabfluss bei 0.13 m³/s). Für die Einhaltung dieser Vorgaben wird ein Retentionsvolumen von rund **30'000 m³** benötigt. Andererseits können die Defizite der berücksichtigten Kernindikatoren auch mit einer Ausleitung des Schwalls auf der Schwallstrecke bis Pradapunt behoben werden.

Im Rahmen der Vorauswahl der Massnahmen wurden verschiedene Massnahmenideen erarbeitet und in Bezug auf Schwall-Sunk, Technik, Umwelt und Umfeld bewertet. Dabei wurde vorgeschlagen zwei Sanierungsmassnahmen weiterzuverfolgen: Ein Ausgleichsbecken linksufrig bei Litzirüti mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ sowie das Ausleitkraftwerk Litzirüti-Pradapunt, welches das Betriebswasser ab der Zentrale Litzirüti weiter zur neu geplanten Zentrale Pradapunt leitet, womit die Strecke zwischen Litzirüti und Pradapunt bezüglich Schwall-Sunk saniert ist.

Damit die Kosten zwischen den zwei Sanierungsmassnahmen miteinander verglichen werden können, wurde auf Grundlage der Barwertmethode für einen Zeitraum von 40 Jahren (Ausgleichsbecken) resp. 60 Jahren (Ausleitkraftwerk) die Gesamtkosten (Barwert) ermittelt. Beim Ausleitkraftwerk wurde dabei für die Produktionseinnahmen ein Preisszenario von 80 CHF/MWh berücksichtigt:

- Gesamtkosten Ausgleichsbecken: **CHF 11.3 Mio. exkl. MWST (+/- 40%)**
- Gesamtkosten Ausleitkraftwerk: **CHF 31.0 Mio. exkl. MWST (+/- 20 %)**

Durch das Ausgleichsbecken werden die Sunkabflüsse erhöht und die Pegeländerungsraten gedämpft, trotzdem bleibt die obere Plessur mit Schwall-Sunk Verhältnissen über 7:1 und einer hohen Frequenz der Schwallereignisse weiterhin durch Schwall-Sunk geprägt. Gemäss gutachterlicher Einschätzung von Hydra begünstigt die Umsetzung des Ausgleichsbeckens durch die Erhöhung des minimalen, winterlichen Sunkabflusses sowie die Reduktion der Pegeländerungsraten die natürliche Reproduktion im Abschnitt Litzirüti. Im Gegensatz zu einem Ausgleichsbecken würde

die Variante Ausleitkraftwerk die schwallbedingten Defizite von Litzirüti bis Pradapunt komplett beseitigen. Dies würde gegenüber der Variante mit Ausgleichsbecken zu einer deutlichen Verbesserung der natürlichen Reproduktion führen und die Wahrscheinlichkeit einer selbsterhaltenden Population bei Litzirüti und Langwies weiter erhöhen. Entsprechend wird der ökologische Nutzen des Ausleitkraftwerks als wesentlich höher bewertet im Vergleich zum Ausgleichsbecken. Demgegenüber stehen die im Vergleich deutlich höheren Gesamtkosten für das Ausleitkraftwerk, welche sich jedoch bei Berücksichtigung allfälliger Investitionsbeiträge, gemäss grober Schätzung, von CHF 31.0 auf rund 4.4 Mio. exkl. MWST verringern könnten.

Beide ausgewählten Massnahmen beseitigen bzw. verringern die wesentlichen Beeinträchtigungen von Schwall und Sunk unterhalb der Wasserrückgabe des Kraftwerks Litzirüti und werden als potentiell bewilligungsfähig und umsetzbar eingestuft. Die Arosa Energie erfüllt damit die ihr mit Regierungsbeschluss vom 13. Oktober 2015 auferlegte Pflicht zur Planung von Schwall-Sunk Sanierungsmassnahmen. Basierend auf den Resultaten des vorliegenden Berichtes ist durch die Behörden ein Entscheid zur Wahl der Bestvariante unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit, der energiepolitischen Ziele sowie der weiteren nach Art. 39a Abs. 2 GSchG definierten Kriterien zu treffen und das weitere Vorgehen zu definieren.

2. Einleitung

Das revidierte Gewässerschutzgesetz (GSchG, 2011, Art. 39a) schreibt vor, dass «kurzfristige künstliche Änderungen des Wasserabflusses in einem Gewässer (Schwall und Sunk), welche die einheimischen Tiere und Pflanzen sowie deren Lebensräume wesentlich beeinträchtigen, von den Inhabern von Wasserkraftwerken mit baulichen Massnahmen verhindert oder beseitigt werden müssen. Auf Antrag des Inhabers eines Wasserkraftwerks kann die Behörde anstelle von baulichen Massnahmen betriebliche anordnen». Mit der Umsetzung der Sanierung muss bis 2030 begonnen werden.

Aufgrund dieser Gesetzesänderung musste der Kanton Graubünden dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) im Rahmen der strategischen Planung bis Ende 2014 Bericht zum Thema erstatten. Gemäss diesem Bericht [2] vom 11. Dezember 2014 erzeugt das Kraftwerk Litzirüti mit seinem Betrieb Schwall und Sunk. Die Plessur ist damit gemäss Art. 39a GSchG wesentlich durch Schwall-Sunk beeinflusst.

Mit dem Regierungsbeschluss vom 13. Oktober 2015 (Beilage 1) hat die Regierung des Kantons Graubünden auf Grundlage der strategischen Planung des Amts für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden (ANU) der Arosa Energie die Sanierungspflicht bezüglich Schwall-Sunk angeordnet. Die Gemeinde Arosa ist die Besitzerin der Arosa Energie und gleichzeitig die Eigentümerin des Kraftwerks Litzirüti. Die Arosa Energie ist eine selbständige öffentlich-rechtliche Anstalt und ist gemäss einem Betriebsführungsvertrag unter anderem für den Betrieb und den Unterhalt des Kraftwerks Litzirüti zuständig. Daher ist die Arosa Energie die Verfügungsadressatin. Zu sanieren gilt es das Kraftwerk Litzirüti mit der Wasserrückgabe in die Plessur bei Litzirüti.

Mit dem erwähnten Regierungsbeschluss wurde die Arosa Energie angewiesen, die wesentlichen Beeinträchtigungen aufgrund von Schwall und Sunk in den durch die betroffene Wasserrückgabe beeinträchtigten Abschnitten in der Plessur im Sinne von Artikel 39a GSchG bzw. Art. 41e Gewässerschutzverordnung (GSchV, 1998) zu verhindern oder zu beseitigen. Die Arosa Energie hat der zuständigen Behörde bis zum 30. Juni 2020 eine bewilligungsfähige und umsetzbare Massnahme, welche die wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk unterhalb der Wasserrückgabe des Kraftwerkes Litzirüti beseitigt, zur Genehmigung einzureichen.

Die Arosa Energie hat das Engineering Hydroenergie & Biomasse der Axpo Power AG (nachfolgend HTU genannt) mit der Bearbeitung der verschiedenen Teilphasen (TP) im Rahmen der Schwall-Sunk Sanierung beauftragt. Unter dieser Organisation wurde die erste Phase der Sanierung, welche den «Hauptschritt 1: Zielsetzung» nach dem Modul «Schwall-Sunk Massnahmen» der VZH Schwall-Sunk [1] umfasst, erarbeitet.

Am 12. Februar 2016 hat das HTU dem ANU ein Pflichtenheft zur Defizit- und Ursachenanalyse und zur Zieldefinition eingereicht. Aufgrund der parallellaufenden Gespräche zur Restwassersanierung nach Art. 80ff. GSchG wurden die Untersuchungen im Juni 2017 sistiert. Anlässlich des Runden Tisches vom 29. März 2019 konnte eine Einigung bezüglich der Sanierungsmassnahme nach Art. 80ff. GSchG beim KW (Kraftwerk) Litzirüti erzielt werden, womit die bis zu diesem Zeitpunkt sistierte Defizit- und Ursachenanalyse wiederaufgenommen werden konnte. Aufgrund der geänderten hydrologischen Ausgangslage, bedingt durch die Restwasserdotation ab Stausee Isel und dem Regimewechsel beim KW Litzirüti ab 2017, wurde am 23. Dezember 2020 ein ergänzendes Pflichtenheft bei den kantonalen Behörden zur Genehmigung eingereicht.

Bedingt durch die Verzögerungen des Projekts wurde am 2. Juli 2020 ein Fristerstreckungsgesuch beim ANU eingereicht. Die Frist für die Einreichung des Variantenstudiums wurde entsprechend dem Antrag erstreckt. Dieses ist neu bis spätestens Juni 2023 einzureichen.

Der gesetzliche Rahmen des vorliegenden Projekts ist durch den Artikel 83a GSchG gegeben. Die Entschädigung der effektiv anfallenden Kosten ist gemäss Art. 34 des Energiegesetzes (EnG) sichergestellt.

Der erste Hauptschritt setzt sich aus verschiedenen TPs zusammen. TP 0 beinhaltet die verschiedenen Arbeiten und Vorabklärungen vor und während der Ausstellung der Sanierungsverfügung. TP 1 beinhaltet die Analysen zu den vorliegenden ökologischen Defiziten und Ursachen der Schwall-Sunk Strecke der Plessur. In der TP 2 werden Abklärungen zu zukünftigen Änderungen der Abflussganglinien durchgeführt, welche sich auf den Sanierungsumfang auswirken könnten. In der TP 3 werden basierend auf den Defiziten gemäss TP 1 die Sanierungsziele festgelegt. Anhand der Sanierungsziele sowie der in der TP 2 erarbeiteten Ganglinie wird zudem der benötigte Sanierungsumfang ermittelt sowie eine Vorauswahl an Sanierungsmassnahmen getroffen.

Im zweiten Hauptschritt werden die in TP 3 vorausgewählten Massnahmen im Rahmen eines Variantenstudiums (TP 4) vertieft und verglichen. In Absprache mit den Behörden wurde entschieden, vorerst auf ein detailliertes Variantenstudium zu verzichten. Bereits durchgeführt wurde jedoch eine Gesamtbeurteilung des ökologischen Nutzens der vorausgewählten Massnahmen in TP 3.

Der vorliegende Bericht stellt die Methodik und die Resultate der TP 1 (Defizit- und Ursachenanalyse), der TP 2 (repräsentative Abflussganglinien) und der TP 3 (Zieldefinition und Vorauswahl Massnahmen) dar. Ausserdem wird eine Beurteilung des ökologischen Nutzens der vorausgewählten Sanierungsmassnahmen durchgeführt.

Mit dem vorliegenden Bericht reicht Arosa Energie der zuständigen Behörde zwei bewilligungsfähige und umsetzbare Massnahmen ein, welche die wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk unterhalb der Wasserrückgabe des KW Litzirüti beseitigen oder zumindest verringern. Arosa Energie erfüllt damit die ihr mit Verfügung vom 13. Oktober 2015 auferlegte Pflicht zur Planung von Schwall-Sunk Sanierungsmassnahmen. Basierend auf den Resultaten des vorliegenden Berichtes ist durch die Behörden ein Entscheid zur Wahl der Bestvariante unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit, der energiepolitischen Ziele sowie der weiteren nach Art. 39a Abs. 2 GSchG definierten Kriterien zu treffen und das weitere Vorgehen zu definieren.

3. Grundlagen und Randbedingungen

3.1 Bestehende Berichte und Grundlagen

An der Plessur wurden in der jüngeren Vergangenheit diverse Untersuchungen durchgeführt und in diversen Berichten festgehalten. Nachfolgend werden die wichtigsten Referenzen aufgeführt:

Amt für Jagd und Fischerei des Kantons Graubünden (AJF)

- Zusatzdokumentation von 2022 zu den Bestandeskontrollen und Fischereistatistik; Plessur FSA 312 und 313, siehe [3]
- Beilage zur Zusatzdokumentation: Bestandskontrollen und Fischereistatistik; Plessur, FSA 312 und 313. Fotokatalog, siehe [4]

In diesen Unterlagen fasst das AJF die bestehenden Daten zu den quantitativen Abfischungen von den Jahren 1996 (2x), 2000 und 2022 zusammen.

- Bericht zur Bestandskontrolle an der Plessur vom 27.07.2022, siehe [5]

Dieser Bericht zeigt die neusten Fangzahlen auf, welche für diesen Bericht verwendet wurden.

Hydra AG

- Fischereibiologisches Reproduktionspotenzial, Unterstützung, Beratung und ökologische Untersuchungen für die Defizit- und Ursachenanalyse sowie Zieldefinition, 2016, siehe [6]
- Reproduktionspotenzial für Bach- und Seeforellen in der Plessur, 2017, siehe [7] und Beilage 2
- Gutachterliche Stellungnahme zum Fragenkatalog Schwall-Sunk-Sanierung, 2023, siehe [8] und Beilage 3

Der Bericht 2017 von Hydra AG enthält wichtige Grundlagenerhebungen für die Indikatoren F3* und F4*. Der neuere Bericht von Hydra AG 2023 beurteilt die Ergebnisse von 2017 unter den heutigen Voraussetzungen neu und schätzt den ökologischen Nutzen der Schwall-Sunk Sanierung ein.

- Ökologische Einschätzung Sanierungsvarianten, 2023, siehe [9] und Beilage 4

Pöyry

- Machbarkeitsstudie für ein Ausgleichsbecken resp. eine Ausgleichskaverne, 2015, siehe [10]

In diesem Bericht hat die Pöyry Schweiz AG im Auftrag der Arosa Energie die Machbarkeit eines Ausgleichsbeckens resp. einer Ausgleichskaverne geprüft. Geprüft wurden Speichervolumina von 15'000 m³, 20'000 m³ und 30'000 m³.

Wasser Fisch Natur AG (WFN)

- Kraftwerk Litzirüti – Sanierung Schwall-Sunk. Fachbericht Makrozoobenthos und Kolmation, 2021, siehe [8] und Beilage 7

Dieser Bericht von WFN stellt die Grundlage für die Indikatoren zum Makrozoobenthos und zur Kolmation dar. Der Bericht bezieht sich auf Feldaufnahmen von den Jahren 2016 und 2020.

3.2 Projektorganisation

Die Sanierungsmassnahmen an der Plessur müssen gemäss der Sanierungsanordnung vom 14. Oktober 2015 mit weiteren Sanierungsmassnahmen im Kanton Graubünden und insbesondere mit den Einzugsgebieten des Hinterrheins, Prättigau und Vorderrheins abgestimmt werden. Die kantonalen Fachstellen des Kantons Graubünden haben für diese Abstimmung zu sorgen. Die Arosa Energie haben die Umweltabteilung des Engineerings der Axpo (HTU) mit den Projektierungsarbeiten des Hauptschrittes 1 beauftragt. Daher ist eine Koordination mit der Sanierung des Alpenrheins, welche ebenfalls über Axpo bearbeitet wird, ebenfalls sichergestellt.

In der Bearbeitung der gewässerökologischen Fragestellungen und Aufnahmen wird HTU durch die Hydra AG (Hydra) und die Wasser Fisch Natur AG (WFN) unterstützt. Eine Aufteilung der Aufgaben zwischen HTU, Hydra und WFN kann Kapitel 4.1 entnommen werden.

Hydra hat die Grundlegendaten im Jahr 2016 erhoben und im Bericht von 2017 dokumentiert (siehe [11] und Beilage 2). Hydra hat bei der Erstellung des vorliegenden Berichts nochmals einige zusätzliche gutachterliche Beurteilungen vorgenommen und in einem neuen Bericht von 2023 festgehalten (siehe [7] und Beilage 3). Da das Betriebsregime vom KW Litzirüti gegenüber der Vergangenheit verändert wurde (siehe Kapitel 3.4.1) und weil seit dem 1. Februar 2020 im Winter eine Restwasservorschrift ab Stausee Isel von 60 l/s gilt (siehe Kapitel 3.4.2), hat sich die ganze Beurteilungssituation verändert. Daher weisen einige Bewertungen seitens Hydra AG mit dem Bericht von 2023 eine leicht andere Tendenz auf als im Jahr 2017.

Die Grundlegendaten für das hydraulische 2D-Modell wurden im Winter 2009 von den Ingenieuren Bart AG und im Winter 2015 von Meisser Vermessungen AG erhoben (vgl. Kapitel 3.7)

3.3 Ziele

3.3.1 Ziele Phase Defizit- und Ursachenanalyse (TP 1)

Die Ziele der TP 1 umfassen im Wesentlichen die nachfolgenden Punkte:

- Die ökologischen Untersuchungen des Kantons Graubünden für die strategische Planung [2] sind zu ergänzen und überprüfen. Die ergänzenden Untersuchungen ermöglichen eine aussagekräftige Defizit- und Ursachenanalyse und dienen der Zieldefinition als Grundlage.
- Die wesentlichen Beeinträchtigungen aufgrund Schwall-Sunk durch das Kraftwerk Litzirüti sind in nachvollziehbarer Weise dargelegt und von nicht durch das Kraftwerk verursachten ökologischen Defiziten in der Plessur abgegrenzt.

Das Untersuchungsprogramm der Defizit- und Ursachenanalyse wurde im Pflichtenheft vom 15. Dezember 2015 [12] festgehalten und mit dem ANU abgesprochen.

3.3.2 Ziele Phase repräsentative Abflussganglinien (TP 2)

Die Ziele der TP 2 umfassen im Wesentlichen den nachfolgenden Punkt:

- Beurteilung Repräsentativität des Kraftwerksbetriebs der letzten Jahre und Festlegung von für die Zukunft repräsentativen Abflussganglinien.

Für die TP 2 wurden keine detaillierten Untersuchungen durchgeführt.

3.3.3 Ziele Phase Zieldefinition & Vorauswahl Massnahmen (TP 3)

Die Ziele der TP 3 umfassen im Wesentlichen die nachfolgenden Punkte:

- Für jeden berücksichtigten Kernindikator, der ein wesentliches Defizit aufweist, können konkrete Ziele festgelegt werden, welche durch Sanierungsmassnahmen erreichbar sind. Dabei orientieren sich die Zielwerte an den Ergebnissen der Defizit- und Ursachenanalyse und sind gewässerspezifisch.
- Die Zieldefinition muss präzise beschrieben werden, damit eine Überprüfung der Wirksamkeit möglich ist.
- Für Arosa Energie werden in Bezug auf ihre Wasserrückgabe in die Plessur konkrete Sanierungsziele, resp. hydrologische Anforderungsprofile festgelegt.
- Anhand von hydraulischen Modellierungen wird überprüft, ob die Sanierungsziele mittels verhältnismässiger Massnahmen erreicht werden können.
- Auf Basis der hydrologischen Anforderungsprofile kann eine Vorauswahl von möglichen Massnahmen definiert werden.

Für die TP 3 wurde kein separates Pflichtenheft erstellt. Jedoch entspricht auch hier das Vorgehen der Methodik vom Schwall-Sunk Projekt für den Rhein. Für den Rhein wurde mit dem Pflichtenheft vom 29. April 2020 [13] die Methodik und das Vorgehen klar definiert und mit den Behörden abgesprochen. Mit den Behörden wurde vereinbart auch für die Plessur gleich vorzugehen.

3.4 Projektperimeter und Wasserkraftanlagen

Der Projektperimeter (Abb. 3.1) der Schwall-Sunk Sanierung umfasst die Plessur ab der Wasserrückgabe des KW Litzirüti bis zur Fassung Pradapunt des KW Lünen, was einer Gewässerstrecke von rund 6.7 km entspricht. Rund 2.1 km nach der Wasserrückgabe des KW Litzirüti mündet der ungenutzte Sapünerbach in die Plessur, was eine Dämpfung der Abflussschwankungen des Kraftwerksbetriebs in der unterliegenden Schwall-Sunk-Strecke zur Folge hat.

Durch die Weiterleitung des Schwalls ab der Fassung Pradapunt durch die beiden Unterlieger KW Lünen und KW Chur-Sand ist auch die Strecke Chur-Sand bis zur Mündung in den Alpenrhein indirekt durch Schwall-Sunk durch den Speicherbetrieb des KW Litzirüti betroffen. Da der unterste Abschnitt stark verbaut und aus ökologischer Sicht von untergeordneter Bedeutung ist, und deshalb der Effekt von Schwall-Sunk nicht mehr ausschliesslich auf den Betrieb des KW Litzirüti zurückzuführen ist, liegt der Fokus der vorliegenden Untersuchungen auf der oberen Schwall-Sunk Strecke zwischen dem KW Litzirüti bis zur Fassung Pradapunt. Die Abklärungen zu Schwall-Sunk im untersten Plessurabschnitt und zum Einfluss des Betriebs des KW Lünen werden in separaten Abklärungen im Zusammenhang mit den Abklärungen zur Sanierungspflicht des KW Lünen bezüglich Schwall-Sunk durchgeführt.

Der Alpenrhein führt deutlich mehr Wasser als die Plessur. So liegt das Q_{347} an der Messstelle des BAFU im Rhein bei Domat/Ems im langjährigen Mittel bei $35.1 \text{ m}^3/\text{s}^1$.

¹ Bundesamt für Umwelt BAFU - Hydrologische Daten und Vorhersagen, Messstelle Rhein – Domat/Ems, LH 2602, Jahr 2014

Das Q_{347} in der Plessur liegt mit $1.97 \text{ m}^3/\text{s}$ deutlich tiefer². Auch bei tiefem Abfluss im Alpenrhein und Schwallbetrieb in der Plessur dürfte das Schwall/Sunk-Verhältnis von 1.5:1 gemäss GSchV nicht überschritten werden. Es besteht demnach im Alpenrhein keine wesentliche Beeinträchtigung durch Schwall und Sunk aufgrund des Kraftwerksbetriebes an der Plessur. Im Weiteren wurden die ökologischen Ziele zur Beseitigung der wesentlichen Beeinträchtigung von Schwall und Sunk für die Plessur so definiert, dass nach der Umsetzung der Sanierung an der Plessur eine wesentliche Beeinträchtigung des Alpenrheins durch die Kraftwerksgesellschaften an der Plessur ausgeschlossen werden kann. Der Alpenrhein ist nicht mehr Teil des Projektperimeters.

Eine Übersicht zur Wasserkraftnutzung an der Plessur kann Abb. 3.1 entnommen werden.

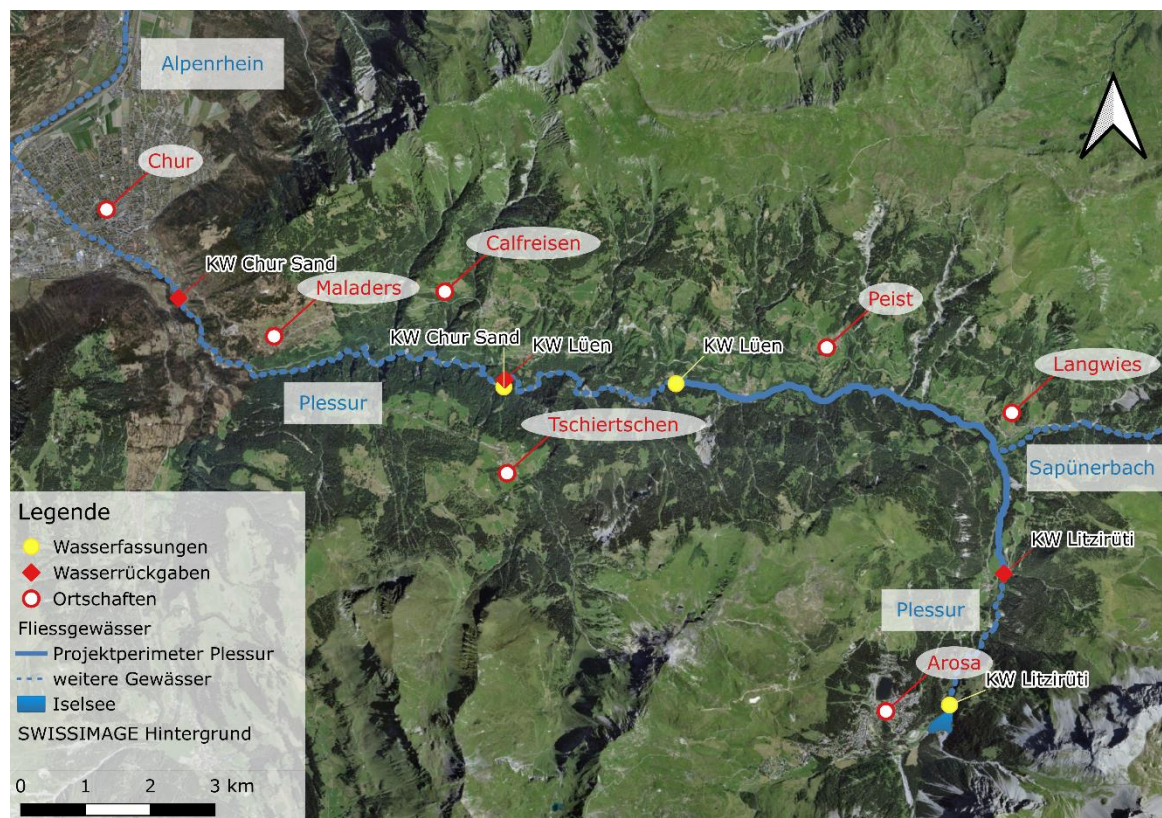


Abb. 3.1 Wasserefassungen und -rückgaben im Projektperimeter. Quelle Hintergrund: Swisssimage (swisstopo).

Die Kennzahlen der Wasserkraftanlage Litzirüti werden in Tab. 3.1 zusammengefasst. Der Standort der Wasserrückgabe ist in Abb. 3.1 dargestellt. Beim KW Litzirüti handelt es sich um ein Kraftwerk, welches den Betrieb unter Berücksichtigung der Rahmendbedingungen wie Laufwasserzufluss, Speicherkapazität und den Anforderungen des Strommarktes unterschiedlich stark variieren kann.

² Bundesamt für Umwelt BAFU - Hydrologische Daten und Vorhersagen, Messstelle Plessur - Chur, LH 0185, Jahr 2014

Kraftwerks- gesellschaft	Zent- rale	QA [m³/s]	Nutzbares Speicher- volumen [m³]	IBS	Konzessi- onsende	Koordina- ten (LV95)
Arosa Energie	Litzirüti	3	250'000	24.12. 1968	2068	773078, 185715

Tab. 3.1 **Übersicht der Zentrale Litzirüti. QA: Ausbauwassermenge in m³/s
IBS: Inbetriebsetzung.**

Das KW Litzirüti nutzt das Wasser der Plessur und deren Zuflüsse, die im Stausee Isel gespeichert werden. Das Wasser wird in der Zentrale Litzirüti beim gleichnamigen Dorf turbinert und von dort zurück in die Plessur gegeben. Der Stausee Isel hat ein nutzbares Stauvolumen von 250'000 m³, was einem Tages- bis Wochenspeicher zugeordnet werden kann.

3.4.1 Regimewechsel Kraftwerk Litzirüti

Das Betriebsregime beim KW Litzirüti wurde ab dem 1. Januar 2017 aufgrund eines neuen Abnahmevertrages massgeblich angepasst. Vor dem 1. Januar 2017 wurde mehrheitlich ein Laufwasserbetrieb gefahren. Seit dem 1. Januar 2017 wird der Betrieb des KW Litzirüti entsprechend den Strommarktpreisen optimiert. In Abb. 3.2 sind die mittleren täglichen Betriebsdurchflüsse sowie der minimale und maximale tägliche Durchfluss des KW Litzirüti dargestellt.

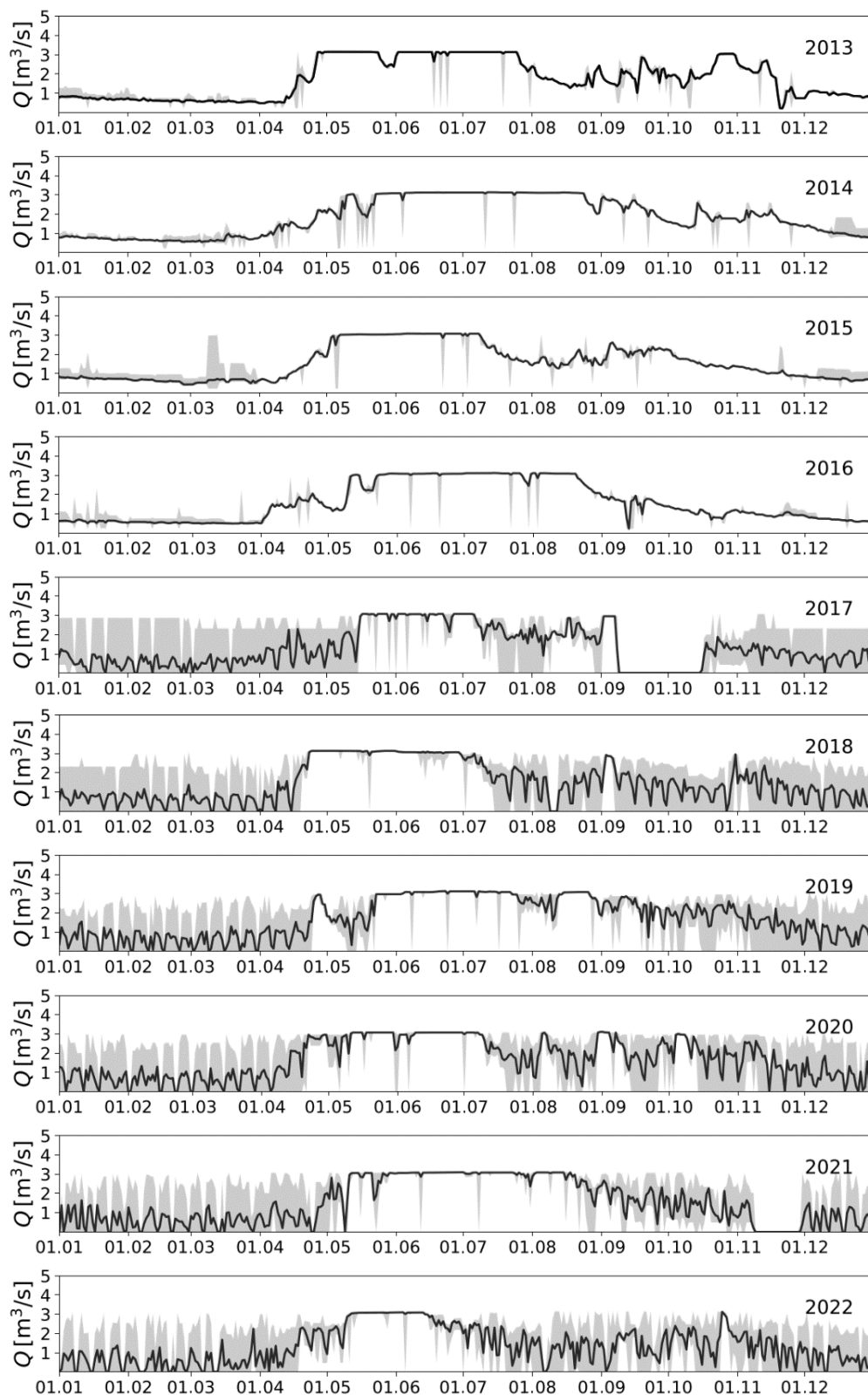


Abb. 3.2 Betriebsdurchflüsse Kraftwerk Litzirüti von 2013 bis 2022 [m^3/s]. Schwarze Linie = mittlere tägliche Durchflüsse. Grauer Bereich = Bereich zwischen minimalem und maximalem täglichem Durchfluss.

Vor dem Januar 2017 wurde mit Ausnahme der Frühlings- und Sommerperiode grösstenteils ein Teillastbetrieb gefahren. Bis auf wenige Abschaltungen - im Zeitraum zwischen 2013 bis 2016 gab es im Winterhalbjahr jeweils zwischen 10 bis 20 Abschaltungen - war das Kraftwerk konstant im (Teillast-)Betrieb. Bis auf diese Abschaltungen herrschte somit vor 2017 in der Plessur zwischen Litzirüti und Pradapunt ein grösstenteils von Schwall-Sunk unbeeinflusstes Abflussregime.

Seit Januar 2017 wird, mit Ausnahme der Frühlings- und Sommerperiode, der Speicher Isel verstärkt bewirtschaftet und ein intermittierender Kraftwerkeinsatz gefahren. Teillastbetrieb findet kaum mehr statt. Je nach Wasserdargebot und Strommarktsituation finden täglich ein oder mehrere Volllastereignisse statt, während das Kraftwerk zwischen den Ereignissen stillsteht.

Es wird davon ausgegangen, dass das Betriebsregime, welches seit Januar 2017 gefahren wird, auch in der Zukunft angewendet wird.

3.4.2 Restwassersanierung nach Art. 80ff. GSchG

Die Arosa Energie war verpflichtet, das KW Litzirüti nach Art. 80ff GSchG zu sanieren. Mit Regierungsbeschluss vom 3. September 2019 wurde Arosa Energie verpflichtet, ab der Wasserfassung beim Stausee Isel eine Dotiereinrichtung zu erstellen und folgende saisonal abgestufte Dotierwassermengen abzugeben:

Oktober bis April: 60 l/s

Mai bis Juli: 100 l/s

August bis September: 80 l/s

Die Dotieranlage wurde am 1. Februar 2020 in Betrieb genommen. Für die vorliegenden Schwall-Sunk Modellierungen wurde für den Gesamtzeitraum der Auswertungen (auch für den Zeitraum zwischen Januar 2017 bis Februar 2020) der Zustand nach Umsetzung der Restwasserabgabe berücksichtigt.

3.5 Untersuchungsstrecken

Grundsätzlich orientiert sich die Wahl der Untersuchungsstrecken (US) an der kantonalen strategischen Planung. Somit können bereits bestehende Untersuchungsergebnisse mit den neuen Ergebnissen der Defizit- und Ursachenanalyse verglichen werden (Kapitel 4.4). Insbesondere wurden bei der Wahl der Untersuchungsstrecken die aus ökomorphologischer Sicht interessanten Auengebiete Plessuraue bei Litzirüti und Plessuraue bei Molinis berücksichtigt. Die Plessuraue bei Litzirüti ist gemäss dem Inventar für Auengebiete ausserhalb des Bundesinventars ein Auengebiet von regionaler Bedeutung mit der Qualität II. Dies bedeutet, dass die Bewertung die Kriterien für die Aufnahme ins Bundesinventar nicht erreicht hat. Die Plessuraue bei Molinis, welche sich von der Einmündung des Sapünerbachs bis nach Pradapunt erstreckt, ist im Anhang 2 (Liste der nicht definitiv bereinigten Auengebiete von nationaler Bedeutung) des Bundesinventars der Auengebiete von nationaler Bedeutung mit der Nummer 435 aufgeführt. Die negativen Auswirkungen von Schwall-Sunk sind in den Auengebieten am relevantesten. Die zwei gemäss Tab. 3.2 und Abb. 3.3 definierten Untersuchungsstrecken wurden auch daher hier angesetzt.

Bezeichnung	Beschrieb	Höhe m ü. M.	Koordinaten
Litzirüti	Auengebiet unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti	1'380	773'022.17, 186'131.09
Langwies	Auengebiet unterhalb der Einmündung des Sapünerbachs	1'215	772'444.66, 188'042.02

Tab. 3.2 Definierte Untersuchungsstrecken im Projektperimeter.

Im Bereich bei Molinis, ein Auengebiet, welches kurz vor der Fassung Pradapunt liegt, wurden ebenfalls diverse Untersuchungen durchgeführt. Dieser Bereich wurde aber als keine eigene Untersuchungsstrecke ausgeschieden.



Abb. 3.3 Auengebiete und definierte Untersuchungsstrecken im Projektperimeter. Quelle Hintergrund: Swissimage (swisstopo).

Für die Plessuraue bei Molinis wurden ursprünglich, wie bei der strategischen Planung (vgl. Abb. 3.4), zwei Untersuchungsstrecken ausgewählt; ein Abschnitt bei Langwies und ein Abschnitt bei Molinis. Da sich im Zuge der Untersuchungen zu den Laichplätzen von 2015/16 durch die Hydra AG zeigte, dass aus fischbiologischer Sicht weniger der Abschnitt bei Molinis, sondern mehr der Abschnitt bei Langwies von Bedeutung ist (vgl. Beilage 2), wurde der Abschnitt bei Molinis nicht im hydraulischen 2D-Modell integriert und somit ein Grossteil der Indikatoren nur für die Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies ausgewertet (rot markiert in Abb. 3.3). Weiter führt eine Schwall-Sunk Sanierung der Strecken Litzirüti und Langwies auch zu einer Sanierung bei Molinis. Die Basisabflüsse sind durch diverse Zubringer bei Molinis um ein Vielfaches höher als bei Litzirüti und dementsprechend sind auch die Schwall-Sunk Defizite und der benötigte Sanierungsumfang bei Litzirüti wesentlich höher als bei Molinis.

3.6 Resultate der strategischen Planung

Der Kanton Graubünden hat im Rahmen der strategischen Planung an mehreren Abschnitten der Plessur ökologische Erhebungen durchgeführt und gemäss der VZH Strategische Planung Sanierung Schwall-Sunk [1] ausgewertet. Die dabei betrachteten Untersuchungsstrecken sind in Abb. 3.4 dargestellt.

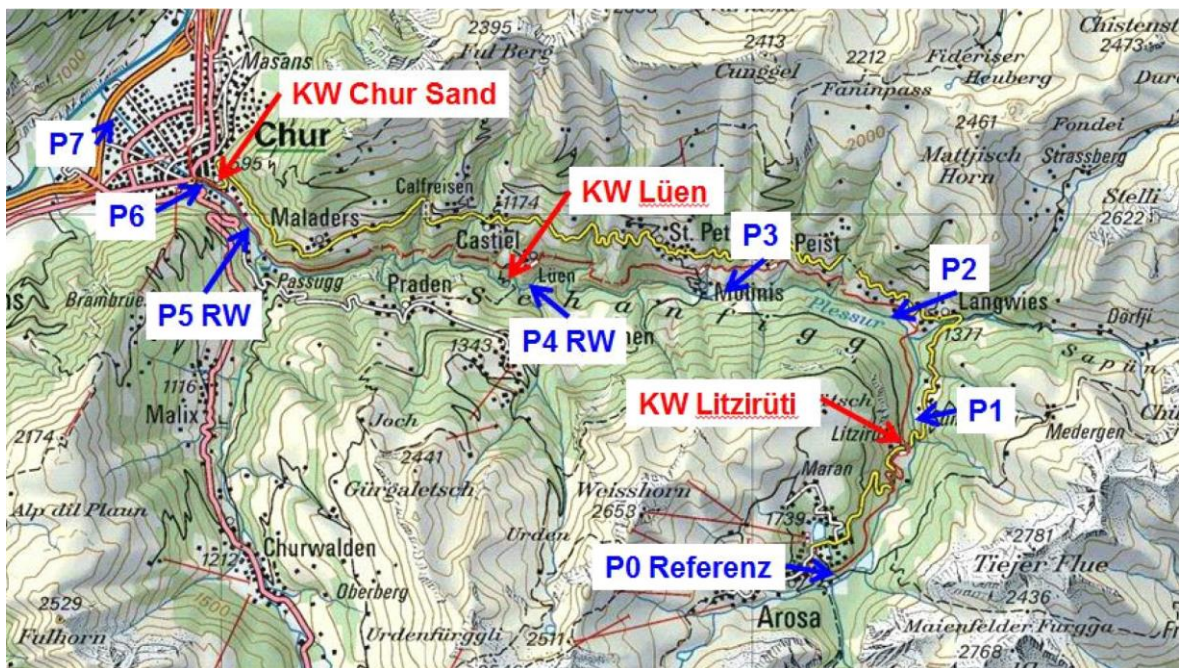


Abb. 3.4 Untersuchungsstrecken gemäss dem Grundlagenbericht aus der strategischen Planung [2]. Quelle Hintergrundkarte: Swisstopo (swisstopo).

Die Untersuchungsstrecken P1, P2 und P3 der strategischen Planung entsprechen dabei den in der vorliegenden Defizit- und Ursachenanalyse verwendeten Untersuchungsstrecken (vgl. Kapitel 3.4). Jedoch wurden für die Defizit- und Ursachenanalyse gewisse Untersuchungsstrecken aus der strategischen Planung nicht weiter untersucht. Die Untersuchungsstrecken P4 bis P7 liegen nicht mehr im direkten Einflussbereich des KW Litzirüti. Eine Referenz-Untersuchungsstrecke (P0) wurde nicht weiterverfolgt. Es hätte 2 Möglichkeiten für eine Referenzstrecken gegeben. Entweder in der Restwasserstrecke oder oberhalb des Stausees Isel. Bei beiden Möglichkeiten standen aber keine Messstellen und kein hydraulisches Modell zur Verfügung. Dazu kommt, dass die Restwasserstrecke relativ weit entfernt von einem natürlichen Zustand ist. Die Bereiche oberhalb des Stausees sind dagegen morphologisch gesehen komplett anders (sehr flach) als die Schwallstrecken (sehr steil) unterhalb der Wasserrückgabe. Eine Übersicht zu den Untersuchungsstrecken gemäss der strategischen Planung [2] kann der Tab. 3.3 entnommen werden.

Name gemäss strategischer Planung	Zuweisung KW gemäss strategischer Planung	Verwendung in Defizit- und Ursachenanalyse	Terminologie Defizit- und Ursachenanalyse
P0	-	nein	-
P1	KW Litzirüti	ja	Litzirüti
P2	KW Litzirüti	ja	Langwies
P3	KW Litzirüti	Nur Kolmation und MZB	Molinis
P4 RW	KW Litzirüti	Nur Kolmation und MZB	-
P5 RW	KW Lünen	nein	-
P6	KW Sand	Separate Abklärung	-
P7	KW Sand	Separate Abklärung	-

Tab. 3.3 Übersicht der Untersuchungsstrecken gemäss der strategischen Planung im Vergleich zu den in der Defizit- und Ursachenanalyse betrachteten Untersuchungsstrecken. Die Untersuchungsstrecken aus der strategischen Planung sind aber nicht immer ganz deckungsgleich mit dem Standort in der Defizit- und Ursachenanalyse.

Für die Indikatorenauswertungen gemäss VZH Schwall-Sunk [1] wurde keine Referenzstrecke berücksichtigt. Für die gutachterliche Bewertung der Defizite und Ziele wurden jedoch ökologische Aufnahmen (insbesondere Abfischungsergebnisse) für den Abschnitt zwischen dem Stausee Isel und der Wasserrückgabe Litzirüti (Restwasserstrecke) berücksichtigt.

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, wurde die Untersuchungsstrecke P3, welche wie die Untersuchungsstrecke Langwies ebenfalls in der Plessuraue bei Molinis liegt, in der Defizit- und Ursachenanalyse nicht detailliert (keine Modellierungen) untersucht.

Die Beurteilung der einzelnen Indikatoren befindet sich in Abb. 3.6 und orientiert sich am Bewertungsschema gemäss Abb. 3.5.

Die Resultate der strategischen Planung zeigen für die fünf dem Kraftwerk Litzirüti zugeordneten Untersuchungsstrecken eine wesentliche Beeinträchtigung auf. Besonders schlecht bewertet sind die Indikatoren Brütlinge (F4) und die Kolmation (H1). Insgesamt liegt eine wesentliche Beeinträchtigung hinsichtlich Schwall-Sunk vor, wobei die grössten Defizite bei der Untersuchungsstrecke P1 (Litzirüti) vorliegen. Bei P1 wurden die meisten Indikatoren ausgewertet, was auch ein Grund für die vielen Defizite sein dürfte.

Bewertungsmethodik

Bewertungsklassen:

1	sehr gut
2	gut
3	mässig
4	unbefriedigend
5	schlecht
0	nicht untersucht
< 0	nur geschätzt

Wesentliche Beeinträchtigung wenn:

- mindestens ein Indikator rot, oder
- mindestens zwei Indikatoren orange, oder
- mindestens drei Indikatoren gelb, oder
- ein Indikator orange und zwei weitere gelb

Abb. 3.5 Die Bewertungsmethodik gemäss der strategischen Planung [2].

			Ökomorphologie	F MSK Fische	trockenfallende Fläche	V Schwallrückgang	gestrandete Fische	F2 gesamt	F3 Bedarf Laichareale	F4 Brütlinge	F5 fischereil. Produktivität	B1 Biomasse MZB	B2 MSK Benthos	B3 Längenzonation	B4 EPT Familien	H1 Kolmation	A1 Mindesttestwasser	Q1 Temperatur	Beeinträchtigung
P0	Referenz	Plessur	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	2	0	1	0	2
P1	Bewertung	Plessur	1	2	5	5	1	5	0	5	1	1	2	4	2	5	5	1	5
P2	Bewertung	Plessur	1	2	0	0	0	2	0	5	1	1	2	3	2	4	0	0	0
P3	Bewertung	Plessur	1	2	4	0	0	0	0	5	1	1	2	3	2	4	0	0	0
P4	Bewertung	Plessur	1	3	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5	4	0	0

Abb. 3.6 Die Untersuchungsergebnisse für die Plessur gemäss der strategischen Planung [2]. Eine wesentliche Beeinträchtigung ist ausser bei P0 bei allen fünf dem KW Litzirüti zugewiesenen Untersuchungsstrecken gegeben.

3.7 Hydraulische Modelle

Für die Beurteilung des ökologischen Zustands des Gewässers im Projektperimeter und der Schwall-Sunk bedingten Defizite, wie auch für die Zieldefinition, werden verschiedene hydraulische Modellierungen benötigt. So basiert eine Vielzahl der Indikatoren der VZH Schwall-Sunk [1] auf hydraulischen Modellierungen.

3.7.1 Aufnahme Topographie

Im Rahmen des Projektes KW Plessur wurde die Plessur im November 2009 von Bart Ingenieure AG mittels Laserscanning vermessen. Die im Jahr 2009 zwischen Litzirüti und Pradapunt erhobenen Daten wurden erst 2015 vollständig ausgewertet. Dabei wurde entschieden, die aus damaliger Sicht ökologisch relevantesten zwei Abschnitte der Aue Litzirüti und der Aue Molinis aufgrund morphologischer Veränderungen seit 2009 nochmals zu vermessen. Im Dezember 2015 wurden diese zwei Abschnitte mittels Multikopter von Meisser Vermessungen AG nochmals photogrammetrisch vermessen.

Im Zuge der Untersuchungen zu den Laichplätzen von 2015/16 durch die Hydra AG zeigte sich, dass aus fischbiologischer Sicht weniger die Aue Molinis, sondern mehr der Bereich bei der ARA Langwies von Bedeutung ist (siehe Kapitel 4.1.3). Daher wurde basierend auf den Laserscandaten von 2009 und den photogrammetrischen Aufnahmen von 2015 für den Abschnitt Litzirüti bis zum unteren Ende der Untersuchungsstrecke Langwies ein hydraulisches 2D-Modell mit Hilfe der Verarbeitungssoftware Fluviz und der Modellierungssoftware FLUMEN aufgesetzt (zur Ausdehnung der Modelle siehe Abb. 3.7). Bei Wiederaufnahme der Projektierungsarbeiten wurde an der Koordinationssitzung mit den kantonalen Behörden vom 19. November 2019 entschieden, dass eine Erweiterung des hydraulischen Modells zusätzlich bis Pradapunt, statt nur bis zum unteren Ende der Untersuchungsstrecke Langwies, als nicht notwendig und auch als nicht verhältnismässig erachtet wird. Die Auswertung der hydrologischen Gegebenheiten in den zwei Bereichen Litzirüti und Langwies ist ausreichend, um die Defizite zu ermitteln und den Sanierungsumfang für den oberen Abschnitt der Plessur festzulegen.

Für das zusätzlich erstellte hydraulische 1D-Modell wurden als topographische Grundlage die öffentlich verfügbaren LiDAR-Vermessungsdaten (swissSURFACE^{3D} von

swisstopo [15]) zwischen Litzirüti bis Pradapunt verwendet. Auf Basis dieser Daten wurden Querprofile mit Abständen von 40 m und damit das 1D-Modell erstellt. Basierend auf den Querprofilen wurde für diesen Abschnitt mit Hilfe der Verarbeitungssoftware Fluviz und der Modellierungssoftware Flush ein hydraulisches 1D-Modell aufgesetzt.

Zu erwähnen ist, dass sowohl im 2D- als auch im 1D-Modell keine bathymetrischen Aufnahmen vorhanden sind, sondern die Topographie mit Wasseroberfläche aufgenommen worden ist. Somit weisen die Topographiedaten der benetzten Gewässersole einen gewissen Fehler auf. Da die Aufnahmen im November 2009 sowie im Dezember 2015 bei geringen Abflüssen während des Winterhalbjahrs aufgenommen worden sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Resultate der hydraulischen Modellierungen trotzdem relativ aussagekräftig sind.

Es wird hierbei darauf hingewiesen, dass die Morphologie ganz allgemein ständigen Veränderungen unterliegt und die aufgenommene Topographie daher lediglich eine Momentaufnahme darstellt.

3.7.2 2D-Modell

Das 2D-Modell wurde bereits 2015 erstellt und validiert. Es wurde entschieden, dafür die Software FLUMEN (FLUvial Modelling ENgine) von Dr. Cornell Beffa, zu verwenden. FLUMEN basiert auf den tiefengemittelten Flachwassergleichungen in Erhaltungsförm. Zur Diskretisierung des Terrains verwendet FLUMEN ein unstrukturiertes Dreiecksnetz (TINs). Numerische Konsistenz wird durch Verwendung von glatten Netzen erreicht (minimale Winkel zwischen den Dreieckseiten). Es kam die Version 3.09 (April 2016) zum Einsatz. Das hydraulische 2D-Modell für die Plessur besteht aus 323'477 triangulierten Elementen, wobei die Zellgrösse je nach Morphologie von 0.08 m² bis 0.51 m² variiert (Mittelwert: 0.32 m²).

Das hydraulische 2D-Modell wurde im Rahmen des vorliegenden Berichts für stationäre (Zeit unabhängige, konstante Abflüsse) Betrachtungen verwendet. Diese dienen als Grundlage zur Berechnung der trockenfallenden Fläche (Indikator F2*), und der Habitatmodellierungen (Indikatoren F3* und F6). Für die Auswertungen wurden insgesamt 13 stationäre Abflüsse zwischen 0.1 m³/s und 5.6 m³/s modelliert und die benetzten Flächen ermittelt. Die benetzte Fläche für Abflüsse zwischen zwei jeweilig stationär modellierten Abflüssen wurden linear interpoliert. Ausgewertet wurden jeweils die benetzten Flächen in den zwei Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies (vgl. Abb. 3.7).

Während für die Untersuchungsstrecke Litzirüti eine genügend gute Qualität der Topographiedaten zur Verfügung stand, waren die Topographiedaten für die Untersuchungsstrecke Langwies teilweise mangelhaft. In der Untersuchungsstrecke Langwies standen teilweise nicht genügend Daten für die gesamte, benetzte Gewässerböite zur Verfügung. Für die Auswertungen der benetzten Flächen wurden daher nur die Segmente des Modells berücksichtigt, bei denen die gesamte benetzte Gewässerböite zur Verfügung steht (vgl. Abb. 4.16).

Auf die Validierung des Modells wird in Kapitel 3.9 eingegangen.

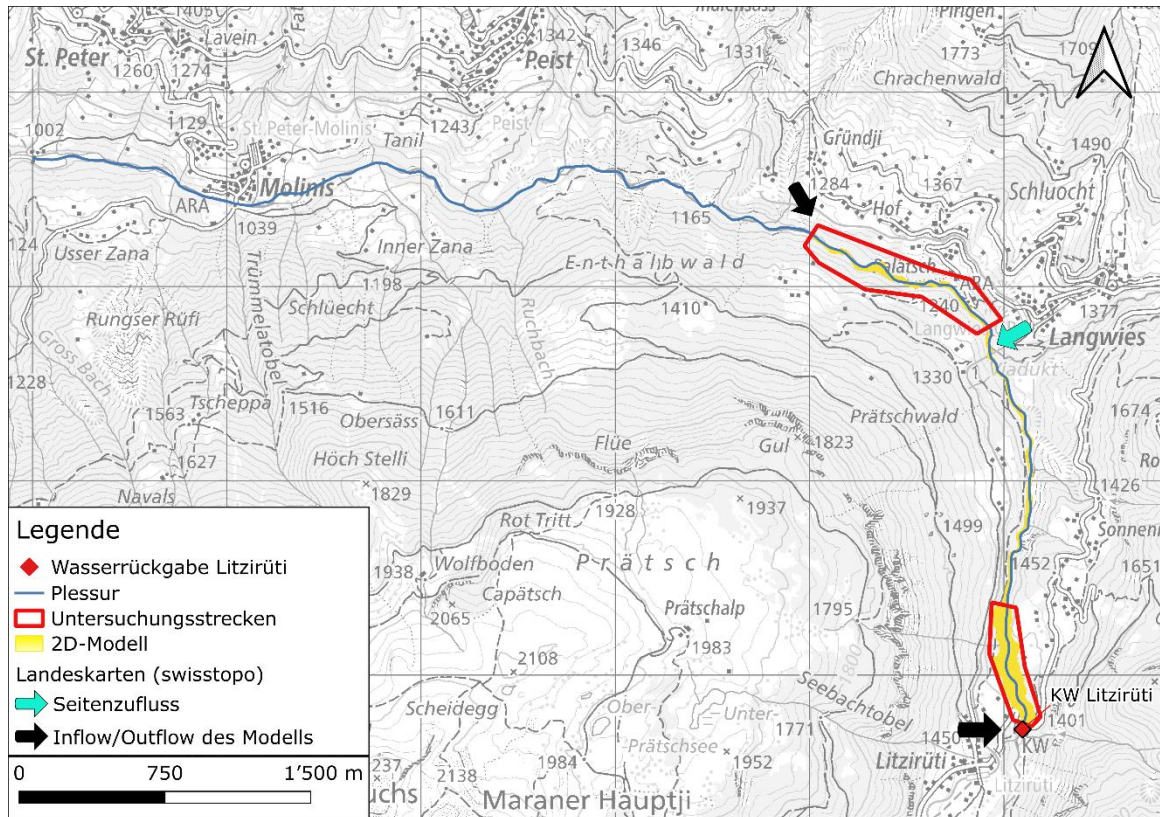


Abb. 3.7 **Hydraulisches 2D-Modell der Plessur mit oberer und unterer Randbedingung und den zwei markierten Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies. Quelle Hintergrundkarte: Swisstopo (swisstopo).**

3.7.3 1D-Modell

Um im Rahmen der Zieldefinition, mit vertretbarem Rechenaufwand, unterschiedliche hydrologische Zustände modellieren zu können, wurde ein hydraulisches 1D-Modell aufgesetzt. Dieses erlaubt instationäre Berechnungen einer längeren Zeitperiode (mehrere Jahre). Über die instationären 1D-Modellierungen kann für jedes Querprofil eine Abflussganglinie berechnet werden. Somit können die für die Indikatorenauswertung benötigten Abflussquantile nicht mehr ausschliesslich punktuell für die wenigen vorhandenen Abflussmessstellen bestimmt werden, sondern direkt für die relevanten Untersuchungsstrecken hergeleitet werden. Gegenüber dem 2D-Modell, wurde das 1D-Modell für die gesamte Strecke bis Pradapunt, statt nur bis zur Untersuchungsstrecke Langwies erstellt (vgl. Abb. 3.8). Auf die Validierung des 1D-Modells wird in Kapitel 3.9.2 eingegangen.

Als Randbedingung werden der Abfluss der Plessur vor der Wasserrückgabe des KW Litzirüti, die Wasserrückgabe des KW Litzirüti, sowie die Seitenzuflüsse innerhalb des Projektperimeters (Sapünerbach, Frauentobelbach, Farbtobelbach) im Modell berücksichtigt. Die Herleitung der Abflusswerte der Seitenzuflüsse kann Kapitel 3.8 entnommen werden. Auf die Validierung des Modells wird in Kapitel 3.9 eingegangen.

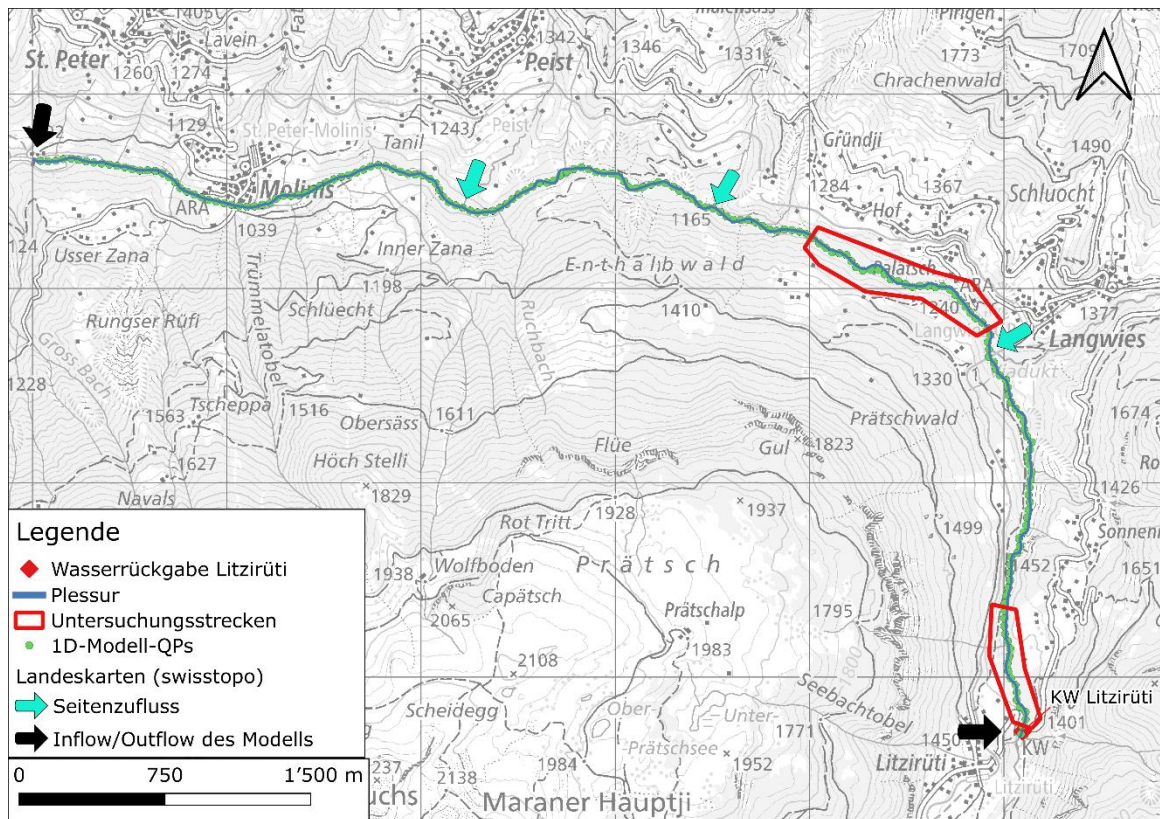


Abb. 3.8 **Hydraulisches 1D-Modell der Plessur mit oberer und unterer Randbedingung sowie den drei Seitenzuflüssen und den zwei markierten Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies. Quelle Hintergrundkarte: Swisstopo (swisstopo).**

3.8 Hydrologie

Für die Beurteilung der Defizite sollen gemäss VZH Schwall-Sunk [1] grundsätzlich die Abflussverhältnisse der letzten 5 – 10 Jahre beurteilt werden. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die Abflussverhältnisse von **Januar 2017 bis Februar 2023** und somit ein Zeitraum von über 6 Jahren beurteilt. Auf eine Auswertung der Periode vor Januar 2017 wurde verzichtet, da das Betriebsregime des KW Litzirüti ab dem 01.01.2017 signifikant umgestellt worden ist (vgl. Kapitel 3.4.1).

Im untersuchten Zeitraum fanden zwei mehrwöchige Ausserbetriebnahmen statt (Revisionsarbeiten im September und Oktober 2017 sowie im November 2021). Bei der Indikatorbewertung und der Bestimmung des Sanierungsumfangs wurden diese zwei Ausserbetriebnahmen nicht ausgeschlossen, da solche Revisionsperioden auch in Zukunft wiederholt auftreten werden.

Zur Beschreibung der Schwall-Sunk Problematik ist eine Abflussganglinie mit einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung erforderlich. Der gemessene Abfluss bzw. der Wasserpegel liegt überall in einer Auflösung von 15 Minuten (15 Minuten-Durchschnitt) oder kleiner vor. In der Regel stehen Daten mit einer Auflösung von 10 Minuten zur Verfügung. Die Betriebsdaten liegen in einer Auflösung von 15 Minuten vor.

3.8.1 Messeinrichtungen

Zur Beurteilung verschiedener Indikatoren, zur Herleitung der Abflussganglinien der Seitenzuflüsse sowie zur Validierung der hydraulischen Modelle wurden diverse Messreihen verwendet. Dazu wurden Messeinrichtungen an verschiedenen Standorten zur Ergänzung der Datengrundlage installiert. Zusätzlich stehen die Betriebsdaten der Zentrale Litzirüti zur Verfügung. Tab. 3.4 fasst die berücksichtigten Messdaten zusammen. Je nach Herkunft der Messdaten wird unter den nachfolgenden Typen unterschieden (Tab. 3.4):

- ANU:
Messdaten des ANU, 10-Minuten-Werte, PQ-Beziehung ab Mitte Juli 2021, tiefe bis mittlere Genauigkeit
- Radar:
Installierte Radarsonde 10-Minuten-Werte, PQ-Beziehung basierend auf Salzverdünnungsmessungen, mittlere Genauigkeit
- KW Litzirüti:
Kraftwerksbetriebsdaten, 15-Minuten-Werte, mittlere Genauigkeit
- Hobo:
Temperaturlogger Hobo der Marke Onset, 10-Minuten-Werte, mittlere Genauigkeit
- Zufluss Isel:
Pegelmessdaten Stausee Isel, 15-Minuten Werte, mittlere Genauigkeit

Name	Typ	Messparameter	Zeitliche Auflösung [min]	Genauigkeit	Ausgewertet von	Ausgewertet bis	US
ARA Langwies	ANU	Q*, P	10	Tief bis mittel	01.2017	02.2023	Langwies
Radarsonde Brücke Litzirüti	Radar	P, Q	10	Mittel	01.2017	04.2018	Litzirüti
KW Litzirüti	KW	Q	15	Mittel	01.2017	02.2023	Litzirüti, Langwies
Temp. Logger Restwasser	Hobo	T	10	Mittel	01.2017	11.2021	Restwasser, Litzirüti
Temp. Logger Wasserrückgabe	Hobo	T	10	Mittel	01.2017	11.2021	Litzirüti
Temp. Logger Schwallstrecke	Hobo	T	10	Mittel	01.2017	11.2021	Litzirüti
Zufluss Stausee Isel	-	Q	15	Mittel	11.2019	02.2023	Restwasser, Natürliche Referenz
Überlauf Stausee Isel	-	Q	15	Mittel	01.2020	02.2023	Restwasser

Tab. 3.4

Berücksichtigte Messstationen für die Defizit- und Ursachenanalyse (P: Pegel, Q: Abfluss, T: Temperatur).
***Q erst ab Mitte Juli 2021, da erst dann eine PQ-Beziehung hergestellt wurde.**
Die Sohle ist bei der ARA-Sonde nicht befestigt, weshalb die Messreihe über längere Zeit nicht stabil sein dürfte.

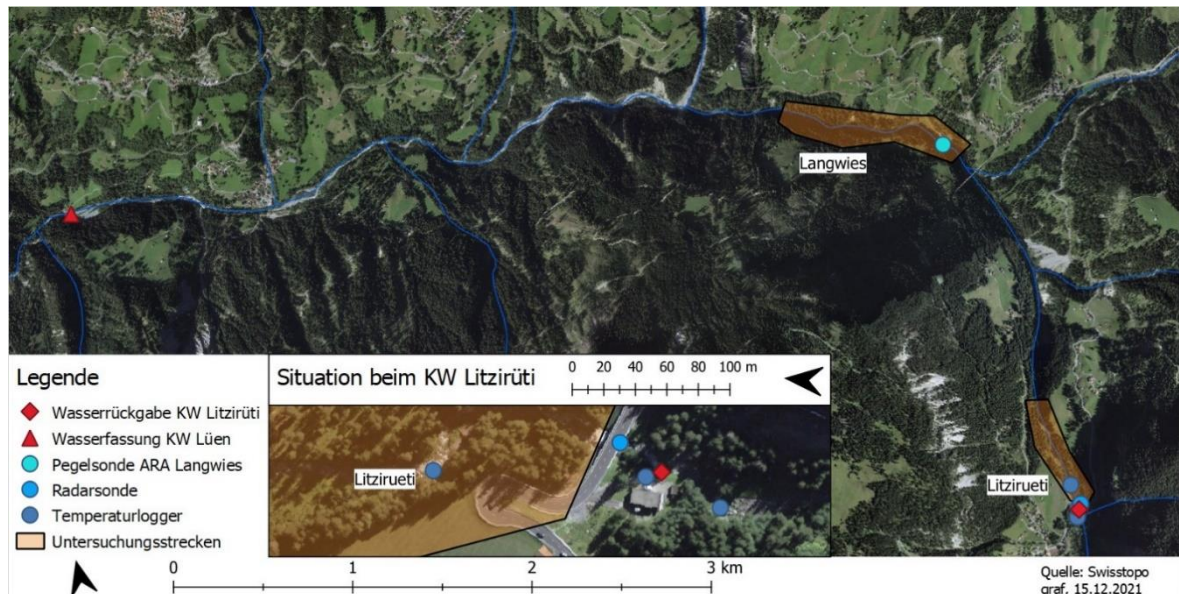


Abb. 3.9 Messstellen und Untersuchungsstrecken in der Schwallstrecke Litzirüti (von Wasserrückgabe KW Litzirüti bis zur Wasserfassung KW Lüen). Quelle Hintergrund: Swisstopo (swisstopo).

3.8.2 Betriebsdaten

Die Betriebsdaten bilden die Grundlage für die instationären hydraulischen Modellierungen (Inputdaten) und somit auch für die Beurteilung der einzelnen Indikatoren. Die Betriebsdaten stehen in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten zur Verfügung.

3.8.3 Bestimmung Basisabfluss

Neben den Betriebsdaten ist der Basisabfluss (obere Randbedingung) eine wesentliche Grundlage für die hydraulische Modellierung. Der Basisabfluss vor der Wasserrückgabe Litzirüti wird nicht gemessen und kann somit nur indirekt für den Auswertungszeitraum von Januar 2017 bis Februar 2023 hergeleitet werden.

Zur Herleitung des Basisabflusses stehen zwei Methoden zur Verfügung:

Methode 1:

Der Basisabfluss kann auf Grundlage der Abflussmessungen der Radarsonde unterhalb der Wasserrückgabe und den Betriebsabflüssen des KW Litzirüti hergeleitet werden. Über eine Massenbilanzierung können die Basisabflüsse aus der Differenz zwischen dem gemessenen Abfluss in der Plessur bei Litzirüti und den Betriebsdaten in einer täglichen Auflösung hergeleitet werden. Nachteil dieser Methodik ist, dass die Abflussmessdaten der Radarsonde nur für den Zeitraum von Januar 2017 bis April 2018 zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurde entschieden, den Basisabfluss basierend auf einer zweiten Methode herzuleiten.

Methode 2:

Der Basisabfluss kann auf Grundlage der (indirekten) Zuflussmessung zum Stausee Isel hergeleitet werden (verwendet wurden täglich gemittelte Zuflussmessdaten). Dazu wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass der Abfluss pro Fläche für das Einzugsgebiet des Stausees Isel und für das Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Stausee Isel und der Wasserrückgabe Litzirüti die gleiche Grössenordnung hat und die Einzugsgebiete damit hydrologisch ähnlich sind. Basierend auf dem Verhältnis

zwischen den zwei Einzugsgebietsflächen wurden die Abflüsse für das Zwischeneinzugsgebiet zwischen Stausee Isel und Wasserrückgabe Litzirüti aus den Zuflussmessdaten in den Stausee Isel herunterskaliert.

Der Basisabfluss setzt sich neben den hergeleiteten natürlichen Zuflüssen aus dem Zwischeneinzugsgebiet auch noch aus dem ab Staumauer Isel dotierten Restwasser (vgl. Kapitel 3.4.2) sowie den Überläufen ab Staumauer Isel zusammen.

Die Messdaten zu den Zuflüssen und Überläufen beim Stausee Isel stehen für den Zeitraum von Januar 2020 bis Februar 2023 zur Verfügung. Für den Zeitraum von Januar 2017 bis Januar 2020 wurden die Messdaten des Jahres 2020 verwendet.

Die Basisabflussganglinie wurde in einer täglichen Auflösung aufbereitet.

Die Methode 2 wurde einerseits gegenüber der Methode 1 aufgrund der grösseren verfügbaren Datenmenge bevorzugt. Vorteil der Methode 2 ist ausserdem, dass auch der hydrologische Vergleichszustand (vgl. Kapitel 3.8.5) über die Zuflussdaten in den Stausee Isel hergeleitet wird. Der Vergleich zwischen dem heutigen beeinflussten Zustand und dem Vergleichszustand bezieht sich somit auf die gleiche und nicht zwei unterschiedliche Zeitperioden, was die Aussagekraft eines solchen Vergleiches erhöht.

3.8.4 Bestimmung Seitenzuflüsse

Neben den Zuflüssen aus dem Kraftwerk Litzirüti (Betriebsdaten) und dem Basisabfluss vor der Wasserrückgabe, stellen die weiteren Seitenzuflüsse einen wichtigen Input für die hydraulische Modellierung dar.

Für das hydraulische 1D-Modell wurden insgesamt 3 Zuflüsse berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.7.3).

Die Seitenzuflüsse werden nicht gemessen und können somit nur indirekt für den Auswertungszeitraum von Januar 2017 bis Februar 2023 hergeleitet werden. Auf eine Verwendung der Messdaten der Radarsonde beim KW Litzirüti wurde aufgrund der ungenügend grossen zeitlichen Abdeckung der Daten von nur gut einem Jahr verzichtet. Auch auf die (mithilfe der im Juni 2021 erstellten PQ-Beziehung hergeleiteten) Abflussmessungen der ANU Pegelsonde bei Langwies wurde aufgrund der ungenügenden Datenqualität verzichtet.

Für die Abschätzung der Abflussganglinien der Seitenzuflüsse wurde auf die durch das BAFU berechneten natürlichen mittleren monatlichen Abflüsse aus dem Datensatz «MQ-GWN-CH» (verfügbar auf maps.geo.admin.ch) zurückgegriffen. Diese Datensätze bestehen aus monatlichen Mittelwerten, womit trockene oder nasse Perioden nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der verfügbaren Messdaten bilden diese Daten jedoch die einzig verfügbare Grundlage zur Berücksichtigung der Seitenzuflüsse bei der Plessur.

3.8.5 Hydrologischer Vergleichszustand

Für die Auswertung verschiedener Indikatoren werden Angaben zum hydrologisch unbeeinflussten Zustand ohne Einwirkung der Wasserkraft in der Plessur (Vergleichszustand) in den Untersuchungsstrecken benötigt. So basieren die Indikatoren F3*, und F6 auf einem Vergleich der heutigen hydrologischen Situation mit derjenigen im kraftwerksunbeeinflussten Zustand (Vergleichszustand).

Da der kraftwerksunbeeinflusste Zustand nicht gemessen werden kann, muss dieser hergeleitet werden. Dazu wurden drei verschiedene Ansätze geprüft. Der Hauptunterschied der Ansätze ist in erster Linie die Datengrundlage. Nachfolgend sind die drei Ansätze kurz erläutert:

- | | |
|------------------------|---|
| 1 MMQ Swisstopo | Basis: Niederschlagabflussmodell |
| 2 Historische Daten | Basis: Ein Messwert pro Tag der Jahre 1917 & 1918 |
| 3 Zuflussdaten Stausee | Basis: Hochaufgelöste Messreihe von 2019 -2023, hergeleitet aus dem Pegel des Stausees und den Produktionsdaten |

Die historischen Daten stammen von einer alten Messstelle mit der Stations-Nummer 7582, die rund 900 m oberhalb der heutigen Wasserrückgabe aber noch unterhalb der heutigen bestehenden Staumauer in der Plessur lag.

Alle drei Ansätze haben Vor- und Nachteile, welche in Tab. 3.5 einander gegenübergestellt sind. Die Gegenüberstellung ist wichtig, denn die natürlichen Abflüsse haben einen wesentlichen Einfluss auf die Bewertung der Indikatoren.

Gleichzeitig ist hier grundsätzlich festzuhalten, dass der natürliche Zustand nie direkt gemessen werden kann und deshalb immer hergeleitet werden muss. Wie genau diese Herleitung dem heutigen natürlichen Zustand ohne Wasserkraft entspricht, ist schwierig abzuschätzen. Diese Tatsache zeigt, dass die Bewertungen dieser Indikatoren mit grosser Vorsicht zu interpretieren sind, denn die Indikatoren reagieren auch relativ sensitiv auf eine Änderung des natürlichen Zustands.

Methode	Vorteile	Nachteile
MMQ Swisstopo	<ul style="list-style-type: none"> Abflüsse können für jeden beliebigen Punkt im Gewässer bestimmt werden 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe zeitliche Auflösung (monatlich), trockene oder nasse Perioden werden nicht berücksichtigt, was die tiefen und hohen Abflussquantile verfälscht.
Historische Daten	<ul style="list-style-type: none"> Tatsächlich gemessene Werte im Einzugsgebiet 	<ul style="list-style-type: none"> Die Messdaten sind nur an einem Punkt im Gewässer verfügbar Nur für eine Periode von 2 Jahren verfügbar Klimatische Änderungen, welche seit 1918 stattgefunden haben, werden bei der Verwendung von historischen Daten nicht berücksichtigt.
Zuflussdaten Stausee	<ul style="list-style-type: none"> Tatsächlich gemessene Werte Hohe zeitliche Auflösung Die Daten stehen für den gleichen Zeitraum zur Verfügung, in welchem auch die weiteren Messdaten erhoben worden sind. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Ganglinie an einem Punkt im Gewässer muss unter vereinfachten Annahmen zu den weiteren Betrachtungspunkten im Einzugsgebiet extrapoliert werden

Tab. 3.5 Vor- und Nachteile der Methoden zur Bestimmung des Vergleichszustands.

Auf Grundlage der Tab. 3.5 wurden für die Bestimmung des hydrologischen Vergleichszustandes die (indirekt gemessenen) Zuflussdaten des Stausees Isel von November 2019 bis Februar 2023 verwendet (verwendet wurden täglich gemittelte Zuflussmessdaten). Die historischen Daten wurden nicht verwendet, weil nur 2 Jahre zur Verfügung standen und die Daten schon über 100-jährig sind (klimatische Veränderungen). Der Nachteil der mittleren monatlichen Abflüsse aus Swisstopo ist die geringe zeitliche Auflösung, womit minimale und maximale Abflüsse nicht rekonstruiert werden können.

Hergeleitet wurde der hydrologische Vergleichszustand für die zwei Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies. Dazu wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass der spezifische Abfluss pro Fläche für das Einzugsgebiet des Stausees Isel und für das Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem Stausee Isel und der Untersuchungsstrecke Litzirüti bzw. Langwies die gleiche Grössenordnung hat. Basierend auf dem Verhältnis zwischen den zwei Einzugsgebietsflächen wurden die Abflüsse für die Einzugsgebiete Litzirüti und Langwies (nach Zufluss Sapünerbach) aus den Zuflussmessdaten in den Stausee Isel extrapoliert.

3.9 Validierung hydraulische Modelle

3.9.1 2D-Modell

Die Validierung des 2D-Modells wurde für den 9. März 2015 durchgeführt, welcher der erste Tag des 5-tägigen Schwallversuchs vom Montag, 9. März 2015 bis zum Freitag, 15. März 2015 war (siehe weiteres zum Schwallversuch in Kapitel 3.10). Die an diesem Tag im Feld erhobenen Abflüsse wurden entsprechend in das Modell gegeben. Die resultierenden modellierten Pegelganglinien und -änderungsraten wurden visuell mit den an der ARA Langwies mittels Radarsonde erhobenen Pegelmessdaten verglichen.

Unter der Annahme einer korrekten Hydrologie (d.h. korrekte Zuflüsse in das Modell) bleibt als zu kalibrierende Grösse massgeblich die Rauigkeit im Modell. Im Falle der Plessur standen hierzu die an mehreren Standorten mittels Linienzahlprobe aufgenommenen Korngrössenverteilungen zur Verfügung. Die Validierung zeigte, dass mit der daraus errechneten Rauigkeit eine gute Korrelation des Modelles zu der Pegelmessstation bei der ARA Langwies erreicht werden konnte.

3.9.2 1D-Modell

Zur Validierung des 1D Modells wurde die modellierte Ganglinie mit der verfügbaren Ganglinie der vorhandenen Messstationen im Projektperimeter für den gleichen Zeitraum verglichen. Die Validierung wurde dabei für die Periode vom 03. Januar 2017 bis zum 03. Januar 2018 durchgeführt. Für diese Periode stand eine eigens installierte Radarmesssonde bei Litzirüti zur Verfügung (vgl. Kapitel 3.8.1). Die Abflüsse wurden aufgrund der erhobenen Pegelmessungen durch eine kalibrierte PQ-Beziehung, basierend auf Salzverdünnungsmessungen, ermittelt.

Die modellierten Ganglinien (Abfluss, Pegel sowie die jeweiligen Änderungsraten) wurden visuell mit den jeweiligen Messdaten an den verfügbaren Messstellen verglichen. Als Beispiel wird der Abfluss während des Zeitraums 24. Februar bis 19. März 2017 in Abb. 3.10 dargestellt.

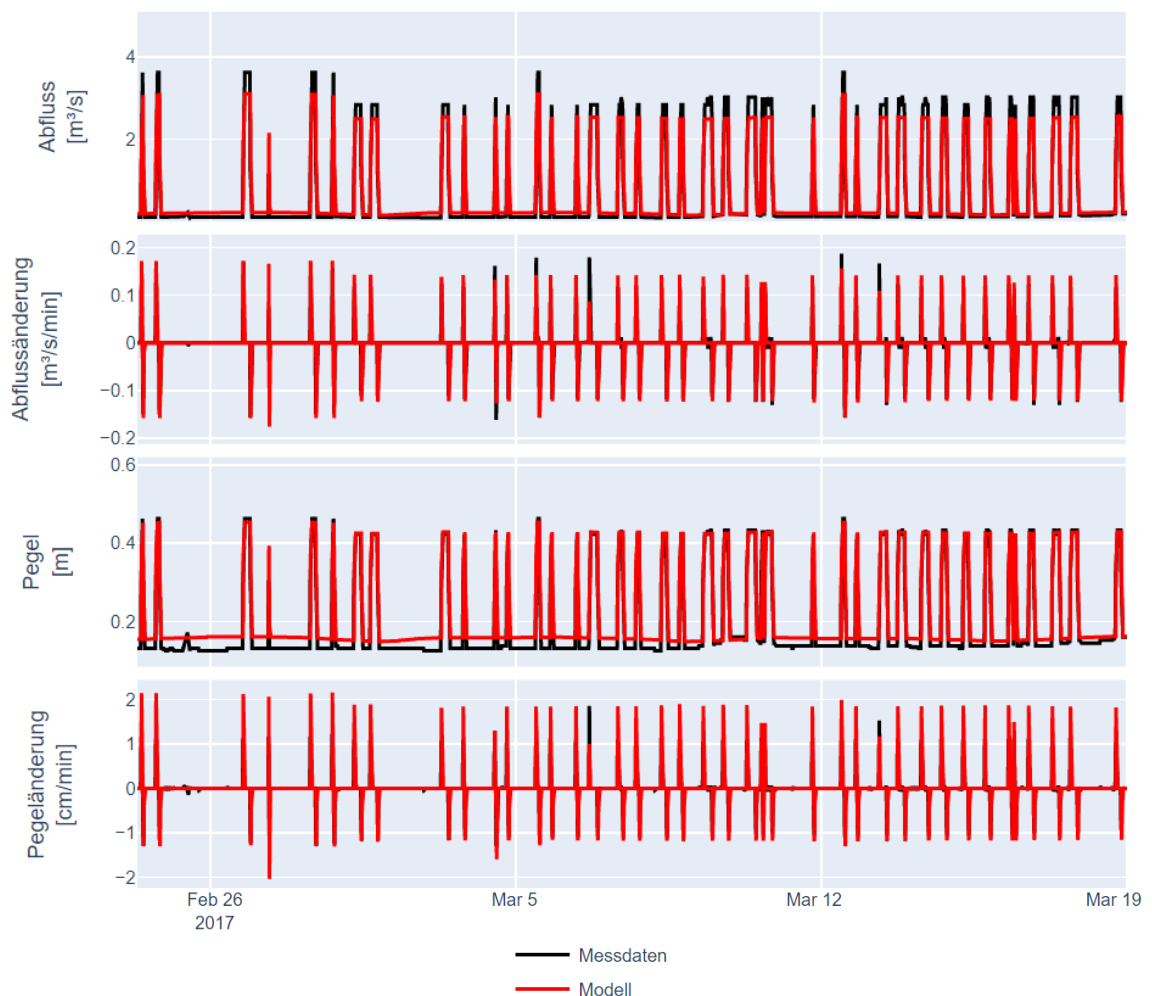


Abb. 3.10 Visuelle Validierung des Abflusses sowie des Pegels bei der Schwallstrecke Litzirüti.

Die visuelle Validierung zeigt eine gute Übereinstimmung der modellierten Ganglinien mit den Abflussmessstationen. Für die Schwall-Sunk Sanierung sind insbesondere die hydrologischen Kenngrössen gemäss Kapitel 4.1 relevant. Die Daten der Abflüsse zeigen, dass die Sunkabflüsse in einem hohen Masse den gemessenen Abflüssen entsprechen. Grössere Abweichungen gibt es hingegen bei den Schwallabflüssen, welche für hohe Abflussspitzen leicht tiefer ausfallen. Die Unterschiede zwischen Modell und Messdaten können hauptsächlich auf Ungenauigkeiten der nicht gemessenen Zuflüsse (Basisabfluss und Seitenzuflüsse, vgl. Kapitel 3.8) sowie auf Ungenauigkeiten der Pegelmessstelle bei Litzirüti zurückgeführt werden.

Die Pegeländerungsraten weisen mehrheitlich eine hohe Übereinstimmung auf. Die Radar-Pegelsonde misst alle zehn Minuten einen Momentanwert des Pegels. Die modellierten Messwerte hingegen stellen 10-Minuten Mittelwerte aus mehreren Messungen dar. Es wird davon ausgegangen, dass durch eine solche Mittelung die Pegeländerungsraten etwas geglättet werden. Die gemessenen Pegeländerungsraten mittels Radarsonde können daher als eher konservativ eingeschätzt werden, d.h. die Pegeländerungsraten fallen grundsätzlich leicht zu hoch aus.

3.9.3 Fazit

Modellierungen sind allgemein nur so gut, wie die zugrundeliegenden Grundlagedaten (Geometrie und Hydrologie). Die Validierung der Modelle zeigt allgemein eine genügend hohe Übereinstimmung mit den vorhandenen Messdaten. Für die durchgeführten Modellierungen wird davon ausgegangen, dass die Modelle für die jeweiligen Fragestellungen eine genügend hohe Genauigkeit aufweisen.

3.10 Schwallversuch

Grundsätzlich geht HTU davon aus, dass die hydraulischen Modellierungen durch das 2D-Modell (siehe Kapitel 3.7.2) die Gegebenheiten vor Ort relativ gut wiedergeben können. Trotzdem wurde im Rahmen eines Schwallversuches eine Überprüfung der Modellresultate inkl. Feldaufnahmen durchgeführt. Ein Schwallversuch wurde im März 2015 durchgeführt. Zum damaligen Zeitpunkt wurde beim Kraftwerk Litzirüti noch kein intermittierender Betrieb gefahren (vgl. Kapitel 3.4.1), weshalb die Resultate des Schwallversuchs ursprünglich für die Ausarbeitung der Defizit- und Ursachenanalyse genutzt werden sollten. Da für die vorliegenden Untersuchungen schlussendlich eine genügend grosse Datenreihe mit Schwallbetrieb seit 2017 vorliegt, wurden die Daten des Schwallversuchs nur noch beschränkt verwendet.

Der Betrieb der Arosa Energie hat in der Versuchswoche vom Montag, 9. März bis Freitag, 13. März 2015 die Zentrale so betrieben, dass täglich (Montag bis Freitag) zwei Schwallwellen und zwei längere Perioden mit Sunk in der Plessur auftraten. So wurde morgens von 07:00 bis 08:30 mit Maximallast ($3 \text{ m}^3/\text{s}$) gefahren und anschliessend bis 10:00 kein Wasser turbinert. Von 10:00 bis 11:00 wurde nochmals mit Maximallast gefahren. Anschliessend stand bis ca. 16:00 die Maschine erneut still. Über Nacht wurde von 16:00 bis 07:00 der Pegel des Stausees Isel konstant gehalten und somit nur der natürliche Zufluss turbinert (rund 550-600 l/s in der Versuchswoche; Abb. 3.4). Mit dem Szenario wurde der geplanten Bewirtschaftung des Sees (Höchststand Ende Dezember, Tiefstand Ende April) Rechnung getragen. Zu Beginn und am Ende der Versuchswoche lag der Seespiegel auf dem geplanten Niveau.

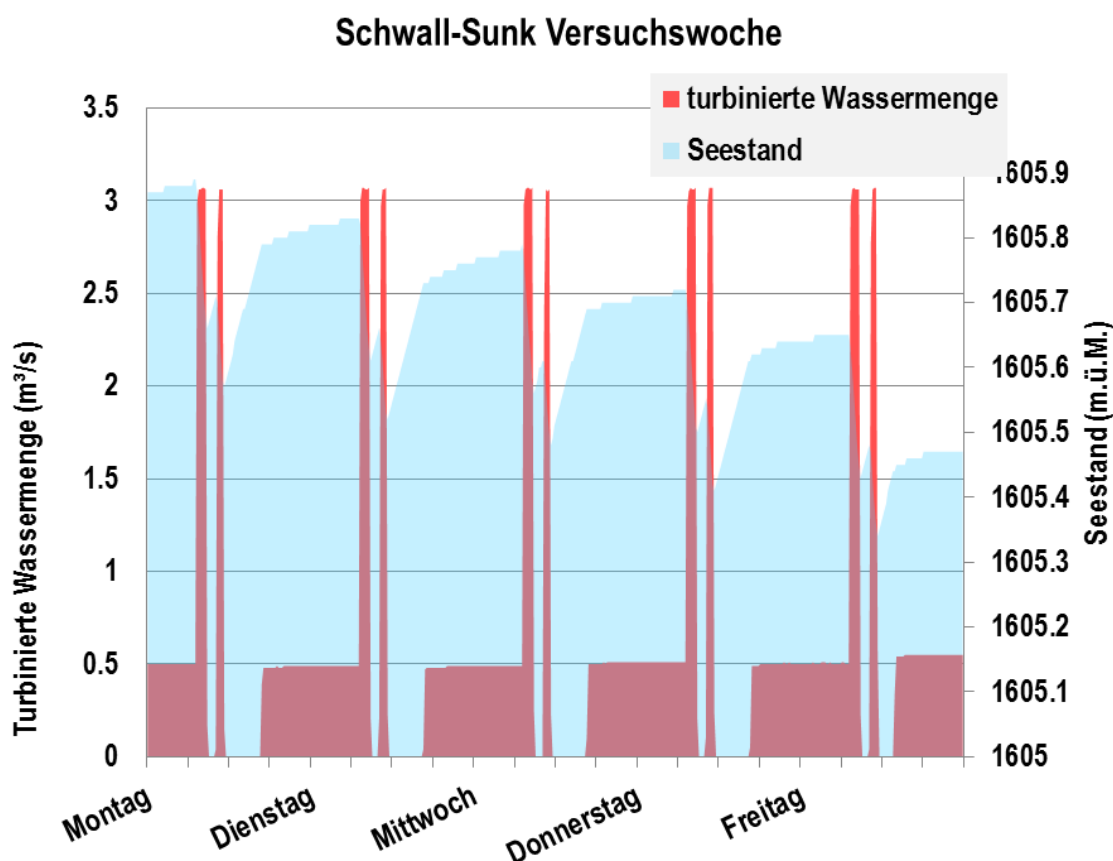


Abb. 3.11 Turbinierte Wassermenge und Stand des Stausees Isel in der Versuchswoche zwischen Montag, 9. und Freitag, 13. März 2015.

Der Schwallversuch fand während Niedrigwasserverhältnissen vor der Schneeschmelze statt, wo die negativen Auswirkungen von Schwall und Sunk deutlich ausgeprägter sind als in den abflussreichen Sommermonaten. Die Schneeschmelze dürfte einzig am Nachmittag bereits leicht eingesetzt und zu höheren Abflüssen geführt haben.

Im Rahmen des Schwallversuchs wurden verschiedene Messungen und Felderhebungen durchgeführt. Details über die durchgeführten Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt und können ebenfalls in Kapitel 4.2 bei den jeweiligen Indikatoren entnommen werden.

3.10.1 Aufnahmen

Im Zuge der Schwallversuche wurden folgende Aufnahmen durchgeführt:

- Pegel und damit zusammenhängende Pegeländerungsraten
- Trübung
- Benetzte Breite bei Schwall und Sunk
- Geschiebetrieb
- Temperatur

3.10.2 Messeinrichtungen und Aufnahmestandorte

Es wurden Aufnahmen und Messungen bei den drei Untersuchungsstrecken Litzirüti, Langwies und Molinis (vgl. Kapitel 3.5) durchgeführt. An den drei Standorten wurden

folgende Messeinrichtungen aufgestellt, bzw. waren bereits vorhanden (siehe dazu auch Abb. 3.9):

Pegelmessungen:

- Radar für Pegelmessung an der Strassenbrücke bei Litzirüti. Die Messstelle wurde bereits seit dem Jahr 2010 betrieben und befand sich direkt unterhalb der Wasserrückgabe. Das Messintervall wurde für die Schwallversuche von 15 min auf 1 min reduziert, um so eine möglichst genaue Aufzeichnung zu erhalten. Ziel der Messung: Pegeländerungsrate kurz nach der Wasserrückgabe.
- Pegelsonde bei der ARA Langwies: Ziel der Messung: Pegeländerungsrate nach dem ersten grösseren Zufluss.
- Radar bei der Strassenbrücke Molinis: Die Aue Molinis, welche sich oberhalb der Strassenbrücke befindet, stellt einen sensiblen Bereich dar. Daher soll in diesem Bereich die Pegelrückgangsrate ebenfalls erfasst werden. Ziel der Messung: Rückschlüsse auf die Pegeländerungsrate im Bereich der Aue Molinis.

Trübungsmessungen:

- Trübungssonden wurden unterhalb der Wasserrückgabe der ARA Langwies sowie im Staubereich Pradapunt installiert. Die Sonden wurden von Mitte Januar 2015 bis zum Beginn der Schneeschmelze Anfang April 2015 betrieben. Ziel: Einfluss des Kraftwerksbetriebes auf die Trübung.

Temperaturmessungen:

- Der Kanton Graubünden installierte unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti temporär eine Temperatursonde. Die Daten aus der Versuchswoche wurden zur Verfügung gestellt und konnten ebenfalls ausgewertet werden. Ziel: Messung der Temperaturänderung unterhalb der Wasserrückgabe
- Die Pegelsonde bei der ARA Langwies registrierte neben dem Pegel auch die Wassertemperatur, wodurch auch die Temperaturveränderung an diesem Standort aufgezeichnet werden konnte. Ziel: Temperaturänderung nach dem ersten grösseren Zufluss.

Benetzte Breite bei Schwall und Sunk:

Sowohl in der Aue Litzirüti als auch der Aue Molinis wurden die benetzten Breiten aufgenommen. Die benetzte Breite wurde dabei am Montag, 9. März 2015 einmal bei Sunk und einmal bei Schwall aufgenommen. Bei der Aue Litzirüti wurden 8 und bei der Aue Molinis 7 Querprofile aufgenommen.

Geschiebetrieb:

Um zu beurteilen, ob das Geschiebe bei Schwall in Bewegung gerät, wurden an den drei Standorten am Montag, 9. März 2015 bei Sunk mehrere Flächen farbig markiert und die Flächen fotografisch festgehalten. Am Ende der Woche, Freitag, 13. März 2015 wurden die Flächen bei Sunk erneut fotografiert. Durch den Vergleich der Bilder kann festgestellt werden, ob es durch Schwallereignisse zu Geschiebeverfrachtung gekommen ist. Dieser Versuch stellt nicht den Worst-Case dar, zumal die grössten Schubspannungen in Flussmitte auftreten.

4. Defizit- und Ursachenanalyse (TP 1)

4.1 Methodik

Für die Defizit- und Ursachenanalyse wie auch für die Zieldefinition stehen in der VZH Schwall-Sunk [1] verschiedene Indikatoren zur Verfügung. Diese sind in vier Gruppen eingeteilt: Kernindikatoren, Schwall-Sunk sensitive Indikatoren, Breitbandindikatoren und Zusatzindikatoren.

Die hier vorgestellten Untersuchungen beinhalten insbesondere die Kernindikatoren sowie die Schwall-Sunk sensitiven Indikatoren. Die Untersuchungen wurden mit dem Pflichtenheft vom 15. Dezember 2015 [12] und dem ergänzenden Pflichtenheft vom 23. Dezember 2020 [13] vorgängig mit dem ANU abgesprochen.

Für die Beurteilung der einzelnen Indikatoren sind in der VZH Schwall-Sunk [1] verschiedene Wertefunktionen bzw. Grenzwerte angegeben. Der Zustand der Indikatoren wird, sofern möglich, jeweils in 5 Klassen («schlecht», «unbefriedigend», «mässig», «gut» sowie «sehr gut») beurteilt. Zur einfacheren Darstellung werden die Beurteilungen farblich gemäss Tab. 4.1 gekennzeichnet.

Bewertung	Zustand	Beeinträchtigung
	sehr gut	keine
	gut	gering
	mässig	wesentlich
	unbefriedigend	stark
	schlecht	sehr stark

Tab. 4.1 Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1].

Die in der VZH Schwall-Sunk [1] vorgeschlagene Methodik zur Beurteilung der verschiedenen Indikatoren und insbesondere die Wertefunktionen bzw. Grenzwerte sind mehrheitlich neu und noch wenig erprobt. Bei der Beurteilung der Indikatoren und der Anwendung der verschiedenen Grenzwerte bestehen verschiedene Unsicherheiten und Probleme. Diese wurden gegenüber dem BAFU aufgezeigt und werden seitens der Behörden grundsätzlich nachvollzogen. Für die Durchführung der Vorstudie der Schwall-Sunk Sanierungen der Axpo wurde entschieden, die Indikatoren wie vorgesehen auszuwerten und Abweichungen gegenüber der VZH Schwall-Sunk [1] mit Experteneinschätzung zu begründen. Faktoren, welche aus Sicht Axpo in den Indikatoren ungenügend abgebildet werden, sollen gutachterlich eingeschätzt werden. Für die Auswertung der Indikatoren wurde grundsätzlich das gleiche methodische Vorgehen wie bei den Schwall-Sunk Sanierungen am Rhein der Axpo durchgeführt.

4.1.1 A2 – Hydrologische Kenngrössen

Einer der wichtigsten Indikatoren ist der Indikator A2 – Hydrologische Kenngrössen. Diese stehen in Wechselwirkung mit den weiteren biotischen und abiotischen Indikatoren und sind schlussendlich das Bindeglied zu dem durch das Kraftwerk verursachte Schwall-Sunk Regime. Anhand der hydrologischen Kenngrössen werden daher die gewässerspezifischen Zielwerte für die betreffende Wasserrückgabe definiert. Dabei gilt es den Betrachtungspunkt, die Betrachtungsperiode, die Jahreszeit wie auch die statistischen Quantile zu definieren. Durch letztere wird bestimmt, welcher statistische Wert der hydrologischen Kennwerte einer Ganglinie für die Beurteilung eines Indikators herangezogen wird. Bei der Betrachtung von Beeinträchtigungen, die bereits durch wenige ausgeprägte Schwall-Sunk Ereignisse (z.B. Zerstörung von Laichgruben

durch Geschiebetrieb während Schwallereignis) eintreten, sind dementsprechend als statistische «Extremwerte» zu betrachten (95%-Quantil der Tagesmaxima bzw. 5%-Quantil der Tagesminima). Bei Beeinträchtigungen, welche durch regelmässige, immer wiederkehrende und weniger ausgeprägte Schwall-Sunk Ereignisse verursacht werden (z.B. Beurteilung Habitateignung), wird hier das 40%- bzw. 60%-Quantil verwendet.

Die zu bestimmenden hydrologischen Kenngrössen sind gemäss VZH Schwall-Sunk [1]:

- | | | |
|--------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 1. Schwallabfluss Q_{\max} | [m ³ /s] | Tagesmaximum des Abflusses |
| 2. Sunkabfluss Q_{\min} | [m ³ /s] | Tagesminimum des Abflusses |
| 3. Pegelanstiegsrate $dh/dt+$ | [cm/min] | Höchster positiver Tageswert |
| 4. Pegelrückgangsrage $dh/dt-$ | [cm/min] | Höchster negativer Tageswert |

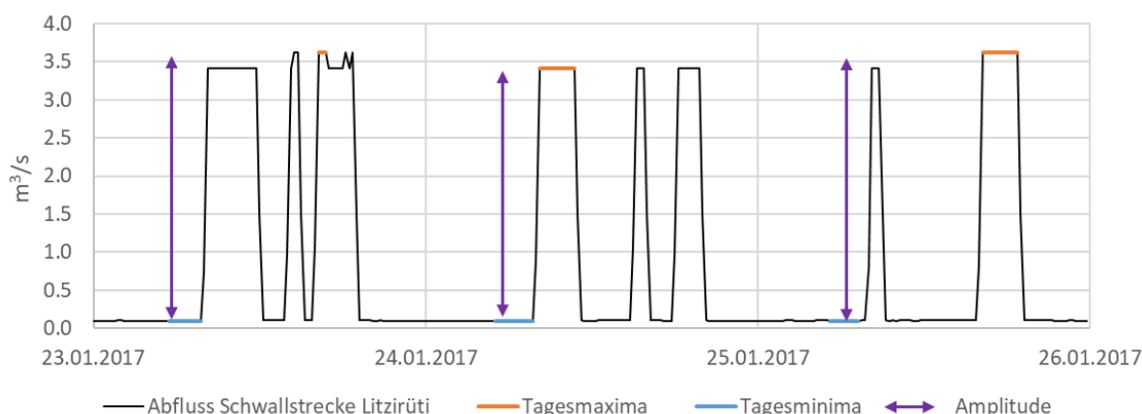


Abb. 4.1 Beispielganglinie (Abfluss Schwallstrecke Litzirüti) mit eingezeichneten Amplituden, Abflusstagesmaxima und -tagesminima.

Neben den hydrologischen Kenngrössen die für die Indikatorenbewertung nötig sind, werden noch weitere Kenngrössen berechnet, welche relevant für die gutachterliche Einschätzung sein können. Nachfolgend werden die Kenngrössen aufgelistet und erklärt:

- Schwall/Sunk-Verhältnis (VSS), Verhältnis des maximalen Schwallabfluss zum minimalen Sunkabfluss → das Schwall/Sunk-Verhältnis wird gemäss Definition der VZH Schwall-Sunk [1] berechnet. $VSS = 80\%$ -Quantil von allen Tagesmaxima/Tagesminima, der betrachteten Periode.
- Schwall/Sunk-Amplitude, Abflusssdifferenz zwischen Schwall- und Sunkabfluss jedes Tages (minimal und maximal Abfluss) → 80% Quantil der Differenz von Schwall- und Sunkabfluss aller Tage
- Frequenz (Häufigkeit der Schwallereignisse) → Von der VZH Schwall-Sunk [1] gibt es keine vorgegebene Berechnungsmethode, HTU berechnet die Frequenz, indem pro Tag alle Ereignisse gezählt werden, die das Schwall/Sunk-Verhältnis von 1 zu 1.5 überschreiten. Aus der Summe aller Ereignisse wird das 80%-Quantil der entsprechenden Periode berücksichtigt. Als Ereignis gilt, wenn der Abfluss das lokale Minimum um das 1.5-fache übersteigt und gilt erst dann als beendet, wenn der Abfluss von dem lokalen Maximum wieder um den Faktor 1.5 sinkt (vgl. Abb. 4.2). Mit dieser Methodik wird sichergestellt, dass eine Schwallwelle immer nur als ein Event und nicht als mehrere Events gezählt wird.

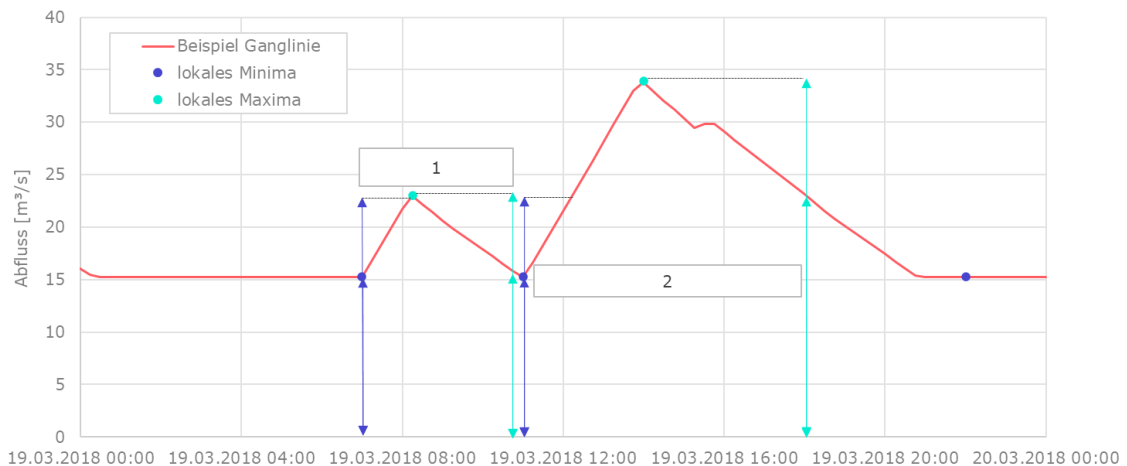


Abb. 4.2 Beispiel einer Ganglinie mit Zählung der Frequenzereignissen. Die Pfeile dienen dabei als Hilfe und zeigen das 1 zu 1.5 Verhältnis an, wobei violett den Start und türkis das Ende des Ereignisses definiert. An diesem Tag wurden zwei Ereignisse gezählt.

Leitfischchart

Die dominierende Fischart in der Plessur ist die Bachforelle. Die Seeforelle, welche lediglich im aus ökomorphologischer Sicht schlecht bewerteten, unteren Abschnitt der Plessur und in der oberhalb liegenden Restwasserstrecke der GKC ihr natürliches Verbreitungsgebiet hätte und aufgrund von natürlichen Hindernissen nicht in den oberen Plessurabschnitt aufsteigen kann, wird daher nicht betrachtet (siehe Pflichtheft vom 12. Dezember 2015 [12]).

Seit der Eintiefung der Alpenrheinsohle an der Plessurmündung und der Entstehung/Erhöhung des Plessurfalls unmittelbar flussaufwärts von Chur können migrierende und einstiegswillige Fische – allen voran die Seeforellen, aber auch Kleinfischarten wie die an dieser Stelle im Alpenrhein vorkommenden Groppen und Strömer – nicht mehr hindernisfrei in die Plessur aufsteigen. Der Aufstieg von Seeforellen vom Alpenrhein in die Plessur ist heute erschwert bis unmöglich. Die definitive Aufstiegs-grenze flussaufwärts ist auch für Forellen dann der Plessurfall. Neben den strukturellen Hindernissen besteht auch ein hydraulisches Hindernis in Form des Schwall-Sunk-Regimes der KW Chur Sand I und II in Kombination mit hart verbauten Ufern sowie zeitweise zu geringe Abflüsse durch die Wasserentnahme für die Mühlbäche.

Analysierte Jahreszeiten (Saisonalität)

Die Wahl der Jahreszeiten erfolgte aufgrund von gewässerökologischen Kriterien, welche entsprechend den Anforderungen der einzelnen Indikatoren von Axpo in Abstimmung mit den beteiligten Gewässerökologen von der Hydra AG festgelegt wurden und sich an den beim Rhein definierten Perioden orientieren (vgl. jeweiliger Indikator in Kapitel 4.1).

Für die Berechnung der Abflusskennwerte des Ist-Zustandes wurden jeweils die Messdaten und die Betriebsdaten von Januar 2017 bis Februar 2023 verwendet. Tab. 4.2 gibt eine Übersicht über die verwendeten Perioden und Quantile für die einzelnen Indikatoren.

Bezeichnung	Periode	Quantil	Indikatoren
Sunk	Mitte März - Mitte Mai	5	F2 (benetzte Fläche) – larvale Forellen Makrozoobenthos
Sunk	Mitte Mai – Ende Juli	5	F2 (benetzte Fläche) – Überg. Forellen
Sunk	August – Ende Sept.	5	F2 (benetzte Fläche) – juvenile Forellen
Schwall	Mitte März - Mitte Mai	95	F2 (benetzte Fläche) – larvale Forellen Makrozoobenthos
Schwall	Mitte Mai – Ende Juli	95	F2 (benetzte Fläche) – Überg. Forellen
Schwall	August – Ende Sept.	95	F2 (benetzte Fläche) – juvenile Forellen
Sunk	Oktober-Dezember	5	F3 (Fortpflanzungsperiode, Laichen)
Sunk	Oktober - Ende April	5	F3 (Embryonalentwicklung, Trockenfallen)
Schwall	Oktober - Ende April	90*	F3 (Embryonalentwicklung, Erosion)
Sunk	Februar	40	F6 (Habitatangebot)
Schwall	Februar	60	F6 (Habitatangebot)
Sunk	Mai	40	F6 (Habitatangebot)
Schwall	Mai	60	F6 (Habitatangebot)
Sunk	August	40	F6 (Habitatangebot) Makrozoobenthos
Schwall	August	60	F6 (Habitatangebot) Makrozoobenthos
Sunk	November	40	F6 (Habitatangebot)
Schwall	November	60	F6 (Habitatangebot)
Schwall	Mitte März – Mitte Mai	60	Makrozoobenthos
Schwall	August	95	Makrozoobenthos

Tab. 4.2 **Übersicht der hydrologischen Kenngrössen, betrachteten Perioden und angewendeten Quantile für die Auswertung der Indikatoren.**
*** Da insgesamt 42 Tage im Untersuchungszeitraum ausgeschieden worden sind (herbstliche Hochwasserperiode) und erst anschliessend das 95%-Quantil der Abflüsse bestimmt worden ist, entspricht der definierte Schwallabfluss hier dem 90%-Quantil der täglichen Maximalabflüsse (vgl. Kapitel 6.4.3).**

4.1.2 F2* – Stranden von Fischen

Die Verdriftung und das Stranden von Jungfischen ist einer der vielfach beschriebenen Effekte eines Schwall-Sunk Regimes. Einer der Kernindikatoren ist daher das Stranden von Fischen, welcher die Verdriftung und das Stranden in den sensibelsten Altersstadien der Fische (Larven und Jungfische [0⁺]) untersucht. Der Indikator F2* - Stranden von Fischen - basiert dabei auf zwei Kriterien: Anteil trockenfallender Flächen und Pegelrückgangsraten. Betrachtet wurden jeweils Forellenbrütlinge (larval), die Juvenilphase und eine Übergangsphase zwischen larvaler und juveniler Phase.

Hydrologische Kenngrößen

Die relevanten Abflüsse in den zwei Untersuchungsstrecken zur Bestimmung des Indikators wurden anhand der instationären hydraulischen Modellierungen mit dem 1D-Modell bestimmt. Die Modellierungen wurden für den Zeitraum von Januar 2017 bis Februar 2023 ausgewertet und die hydrologische Kenngrößen beziehen sich entsprechend für diese spezifische Periode.

Entgegen dem Vorgehen gemäss VZH Schwall-Sunk [1] wurden die massgeblichen Schwall- und Sunkabflüsse nicht mehr für die gesamte Periode berechnet und anschliessend daraus die trockenfallenden Flächen berechnet, sondern es wurden die täglichen trockenfallenden Flächen berechnet.

Trockenfallende Flächen

Der Anteil der trockenfallenden Flächen zwischen Schwall und Sunk wurde gemäss der Wertefunktion der VZH Schwall-Sunk [1] beurteilt. Grundsätzlich ist der Anteil trockenfallender Fläche stark von der Morphologie abhängig. So ist die Variation der benetzten Fläche bei einer naturnahen Morphologie deutlich höher als in einem kanalisierten Abschnitt.

Die trockenfallenden Flächen wurden mithilfe der stationären hydraulischen Modellierungen (2D-Modell) verschiedener Abflüsse berechnet. Lagen die ermittelten Schwall- und Sunkabflüsse zwischen den stationär modellierten Abflüssen (berechneten benetzten Flächen) wurde die benetzte Fläche linear zwischen zwei Abflüssen interpoliert.

Die Berechnung der trockenfallenden Flächen wurde gegenüber dem in der Vollzugshilfe vorgeschlagenen Vorgehen angepasst. In der VZH Schwall-Sunk [1] wird die trockenfallende Fläche aus der Differenz der benetzten Fläche bei Sunkabfluss (5%-Quantil aller Tagesminima) und bei Schwallabfluss (95%-Quantil aller Tagesmaxima) der jeweiligen Periode bestimmt. Aufgrund der Periodendauer über mehrere Monate, können so auch saisonale Abflussschwankungen starken Einfluss haben. Es wird nicht als zielführend erachtet ein Sunk-Abflussquantil aus dem März mit einem Schwall-Abflussquantil aus dem Mai zu vergleichen.

Aus diesem Grund hat HTU die Methodik dahingehend angepasst, dass die trockenfallenden Flächen für jeden Tag einzeln bestimmt werden und schlussendlich das 95%-Quantil aller Tage in der jeweiligen Periode verwendet wird. Die trockenfallenden Flächen werden also neu aus der Differenz der benetzten Fläche beim Tagesminimum und beim Tagesmaximum des Abflusses aller Tage bestimmt und schlussendlich das 95%-Quantil aller Tage in der jeweiligen Periode für den Indikator F2* verwendet.

Pegelrückgangsraten

Grundsätzlich besteht das ganze Jahr über die Gefahr des Strandens von Fischen infolge zu hoher Pegelrückgangsraten. Besonders kritisch ist die Situation in der Plessur

jedoch im Frühjahr von Mitte März bis Mitte Mai für die frisch geschlüpften Forellen. Sofern eine erfolgreiche Reproduktion stattgefunden hat, verlassen die Brütlinge das Sohlsubstrat des Gewässers und weisen in der ersten Lebensperiode noch eine sehr geringe Schwimmfähigkeit auf.

Gemäss VZH Schwall-Sunk [1] berechnet sich die Pegelrückgangsrate anhand des 95%-Quantils der täglichen maximalen Pegelrückgangsraten.

Die in der VZH Schwall-Sunk [1] beschriebene Methodik kann für Messdaten direkt angewendet werden. Hierbei wird die Auswertung der Pegelrückgangsrate für einen Punkt im Gewässer bewertet. Mittels hydraulischer Modellierung besteht die Möglichkeit, die Pegelrückgangsraten (welche abhängig von der Morphologie sind) nicht nur punktuell, sondern flächig über die Untersuchungsstrecke auszurechnen. Bei der flächigen Auswertung einer hydraulischen Modellierung können Ganglinien der Pegel für jede Zelle, resp. jedes Querprofil des Modelles ausgewertet werden, was pro Untersuchungsstrecke zu einer hohen Anzahl von Ganglinien führt. Für die effektive Bewertung der Untersuchungsstrecke müssen diese Ganglinien jeweils aggregiert werden.

Aufgrund der jeweils vorherrschenden Morphologie gibt es in den Untersuchungsstrecke einzelne Bereiche, welche verhältnismässig hohe Pegelrückgangsraten aufweisen. Solche hohen Pegelrückgangsraten können beispielsweise in einer lokalen Verengung des Querschnittes auftreten. Meist sind da die Ufer auch steiler und dadurch das Stranden weniger relevant als bei flachen Kiesbänken.

Solche lokalen Stellen können kaum mit verhältnismässigen Mitteln saniert werden und sind in Rücksprache mit den Gewässerökologen auch ökologisch nicht relevant.

Liegen detaillierte hydraulische **2D-Modelle** vor, so besteht die Möglichkeit, die Pegelrückgangsraten gezielt an den Stellen und zu denjenigen Zeitpunkten zu berechnen, wo ein Stranden tatsächlich möglich ist. Dabei wird die Pegelrückgangsrate in jeder Zelle des Modelles fortlaufend für jedes Zeitintervall (10 Minuten) bestimmt. Damit eine Pegelrückgangsrate aber relevant ist und daher ein Stranden tatsächlich möglich ist, muss die Wassertiefe der Zelle genügend klein (Wassertiefe < 20 cm) sein und die Zelle anschliessend trockenfallen (Wassertiefe < 2 cm). Für jede Modellzelle kann anschliessend die maximale Pegelrückgangsrate anhand der «repräsentativen Ganglinie» berechnet und gemäss VZH Schwall-Sunk [1] bewertet werden.

Abb. 4.3 zeigt exemplarisch ein Ereignis mit einem Abflussrückgang von Schwall zu Sunk. In der Mitte des Gewässers gibt es keine relevanten Pegelrückgangsraten, da in diesen Bereichen die Wassertiefe durchgehend genügend hoch ist, sodass kein Stranden von Fischen stattfindet.

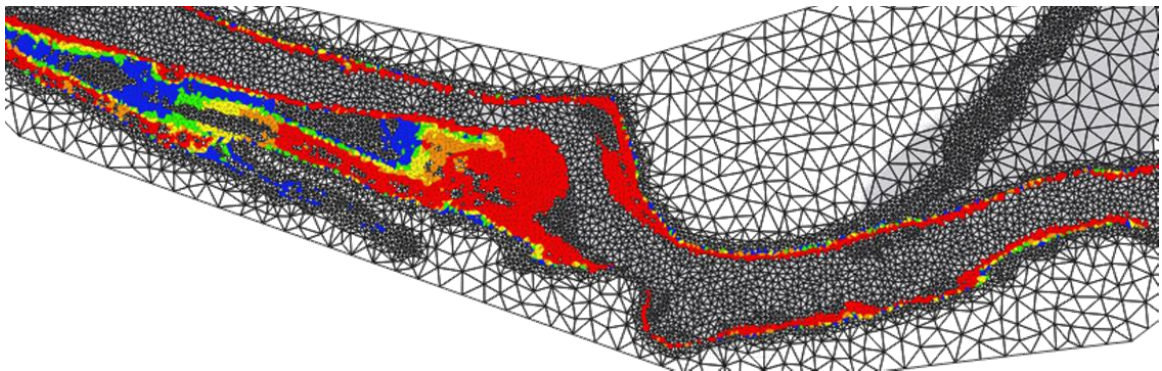


Abb. 4.3 Beispiel (Rhein) flächige Betrachtung der Pegelrückgangsraten in einem 2D-Modell. Die dargestellten Farben entsprechen der Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1] (blau: «sehr gut», bis rot: «schlecht»).

Wie bereits zuvor erwähnt, gibt es aufgrund der Morphologie einige Zellen, welche sehr hohe Pegelrückgangsraten aufweisen. Für die Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1] wird angenommen, dass 20% der relevanten Flächen als nicht massgebend betrachtet werden können. Dieses Vorgehen deckt sich mit der durch das BAFU bereits genehmigten Schwall-Sunk Sanierung an der Muota, wie auch mit den weiteren durch Axpo bearbeiteten Schwall-Sunk Projekte. Die Pegelrückgangsraten entsprechen daher örtlich dem 80%-Quantil (gewichtet nach den Flächen der Zellen) und zeitlich dem 95%-Quantil der täglich maximalen Pegelrückgangsraten, über die definierte Untersuchungsperiode, jeder Zelle mit relevanten Pegelrückgangsraten.

Im vorliegenden Sanierungsprojekt an der Plessur liegen zwar detaillierte 2D-Modellierungen vor, welche für die Festlegung der Defizite und des Zielzustandes auch zwingend erforderlich waren, jedoch benötigen instationäre Berechnungen mittels 2D-Modellen einen enormen Rechenaufwand. Eine Betrachtung über einen längeren Zeitraum (mehrere Jahre) ist dadurch nicht zielführend. Für die Defizit- und Ursachenanalyse sowie für die Zieldefinition und Überprüfung der Zielerreichung durch verschiedene Massnahmen ist jedoch eine Modellierung über mehrere Jahre notwendig. Nur so können die gemäss VZH Schwall-Sunk [1] vorgegebenen zeitlichen Quantile für verschiedene Zustände bestimmt werden.

Analog zum 2D-Modell wurde daher durch HTU in Zusammenarbeit mit Dr. Cornel Beffa (beffa tognacca GmbH) eine Methode entwickelt, um vergleichbare Ergebnisse mittels **1D-Modell** zu erhalten. So werden die Ganglinien anstelle von jeder Zelle, an jedem Stützpunkt eines Querprofils ausgewertet (vgl. Abb. 4.4). Damit eine Pegelrückgangsraten relevant ist und daher ein Stranden tatsächlich möglich ist, muss die Wassertiefe beim jeweiligen Stützpunkt genügend klein sein (Wassertiefe < 20 cm) und der Stützpunkt anschliessend trockenfallen (Wassertiefe < 2 cm). Für jeden Stützpunkt (31 pro Querprofil) sämtlicher Querprofile in einer Untersuchungsstrecke kann anschliessend die max. Pegelrückgangsraten berechnet werden. In einer Untersuchungsstrecke mit 10 Querprofilen resultieren dadurch maximal 320 Pegelrückgangsraten. Aufgrund der nicht uniformen Verteilung der Stützpunkte wird eine Gewichtung anhand der durch den jeweiligen Stützpunkt beeinflussten Fläche vorgenommen.

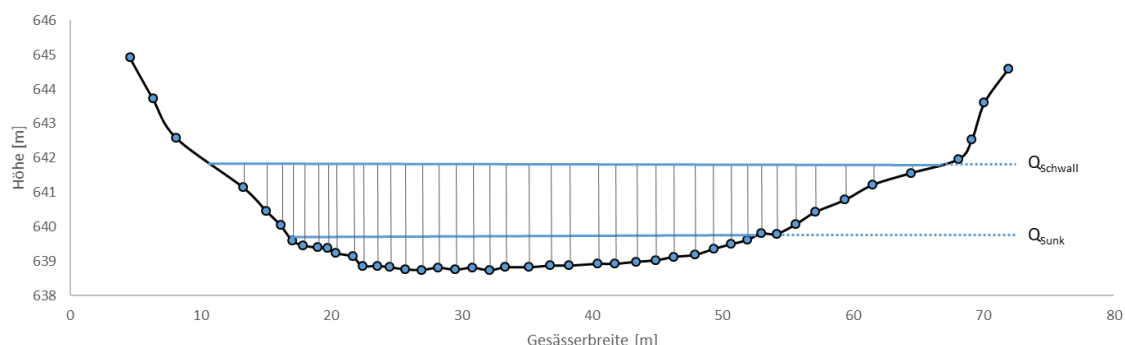


Abb. 4.4 Beispiel eines Querprofils mit eingezeichneten Stützpunkten.

Für die Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1] wird angenommen, dass 20% der relevanten Flächen als nicht massgebend betrachtet werden können. Die Pegelrückgangsraten entspricht daher örtlich dem 80%-Quantil (gewichtet nach den beeinflussten Flächen der Stützpunkte) und zeitlich dem 95%-Quantil der täglich maximalen Pegelrückgangsraten der Stützpunkte, bei welchen das Stranden von Fischen auch möglich ist.

Für die schlussendliche Bewertung des Indikators wird nur die flächige Betrachtung (Auswertung nur, wo Stranden möglich ist) berücksichtigt. Diese Methodik wurde auch für die Zieldefinition und die Bestimmung des Sanierungsumfangs (Kapitel 6) angewendet.

Zur Überprüfung der vorgeschlagenen Methodik wurden die Resultate über einen Zeitraum von zwei Wochen beider Modelle (1D und 2D) bereits bei der Schwall-Sunk Sanierung Rhein verglichen. Die Resultate, dargestellt in Abb. 4.5, zeigen die maximalen Pegelrückgangsraten als Summenkurve des 2D-Modelles (rot) und des 1D-Modelles (schwarz) für zwei verschiedene Untersuchungsstrecken beim Rhein. Die Resultate zeigen eine hohe Übereinstimmung, wobei die Genauigkeit abhängig von der Anzahl der Querprofile in der Untersuchungsstrecke und der Länge der untersuchten Zeitreihe ist. Trotz der hohen Übereinstimmung der Modelle, können beim Rhein Abweichungen in der Grössenordnung von 0.1 cm/min im 1D-Modell nicht ausgeschlossen werden.

Für die hydraulischen Modellierungen bei der Plessur wurde für den Indikator F2* die gleiche Methodik für die flächige Auswertung der Pegelrückgangsraten verwendet wie bei den hydraulischen Modellierungen am Rhein. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass auch bei der Plessur eine hohe Übereinstimmung zwischen 1D- und 2D-Modellierung besteht.

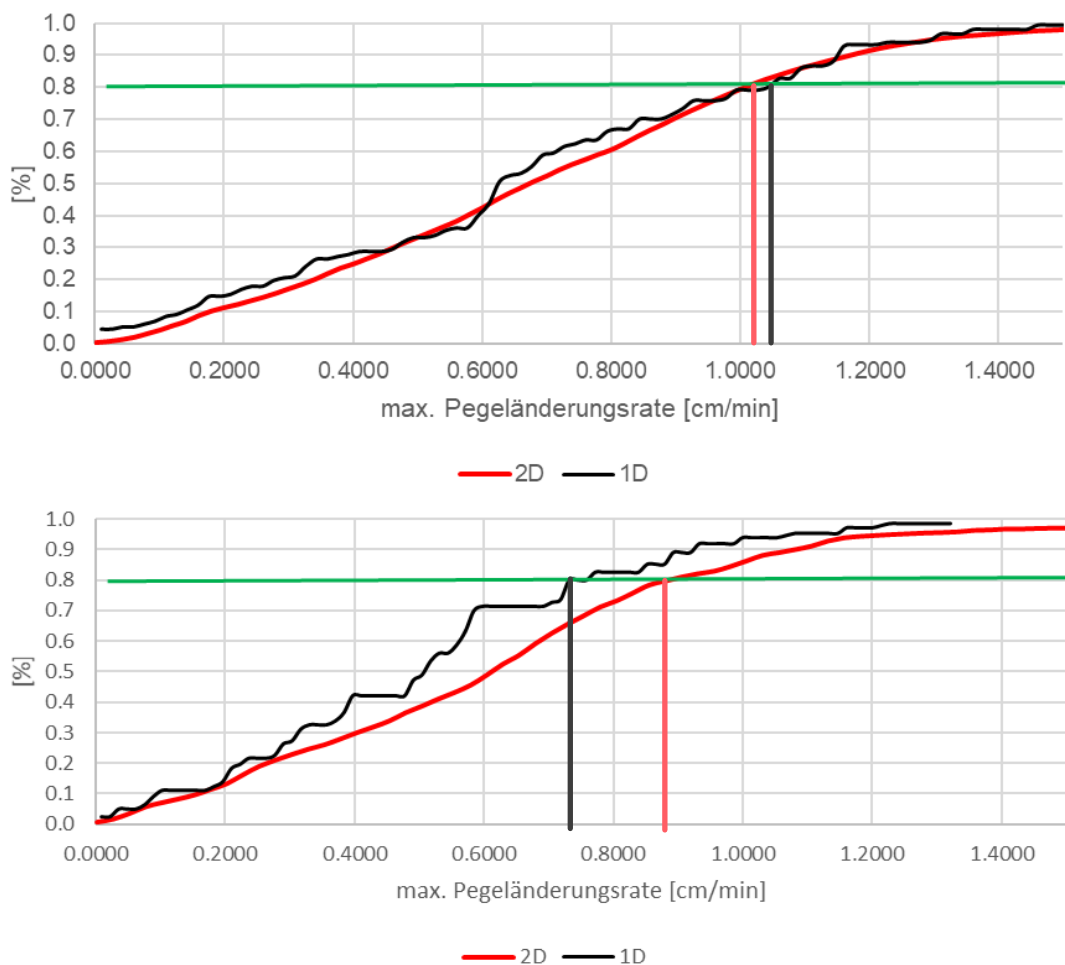


Abb. 4.5 Durchgeführter Vergleich «flächige» Betrachtung 1D- und 2D-Modelle beim Rhein
 oben: Untersuchungsstrecke mit 13 Querprofilen,
 unten: Untersuchungsstrecke mit 11 Querprofilen,
 rot: 2D-Modell, schwarz: 1D-Modell,
 grün: 80%-Quantil zur Bestimmung der resultierenden Pegelrückgangsrate.

Im Sinne der Transparenz werden die Resultate der Pegelrückgangsrate jeweils gemäss der beschriebenen Methodik (flächige Auswertung) und zusätzlich die Auswertungen der verfügbaren Pegelmessstellen gezeigt.

4.1.3 F3* – Laichareale

Zur Bestimmung des Indikators F3* wurden an der Plessur folgende Aufnahmen und Untersuchungen durchgeführt:

- Kartierung der geeigneten Laichsubstratflächen für Forellen Hydra AG (Beilage 2)
- Laichgrubenkartierung durch Hydra AG (Beilage 2)
- Brutboxenversuche durch Hydra AG (Beilage 2)
- Überprüfung der Stabilität der Deckschicht während des Schwallversuchs durch HTU (siehe auch Kapitel 3.10)
- Berechnung der durch Schwall-Sunk wegfallenden Laichgebiete (trockenfallen und erodieren) für Forellen im Vergleich zum unbeeinflussten Zustand durch HTU und Beurteilung durch Hydra AG.

Für die detaillierte Beschreibung der Aufnahmen durch die Gewässerökologen wird auf den entsprechenden Bericht in (Beilage 2) verwiesen.

Kartierung Laichsubstrate und Laichgruben

Die Feldkartierung des Laichsubstrats hat Hydra AG am 24. und 25. November 2015 und 15. Dezember 2015 durchgeführt (siehe dazu auch Beilage 2). Kartiert wurde die Strecke zwischen der Plessurmündung und Arosa, was einer Strecke von rund 25 km entspricht. Da Seeforellen natürlicherweise nicht bis Litzirüti aufsteigen können, wurde für die oberhalb von Pradapunt liegenden Abschnitte nur das Sohlsubstrat kartiert, welches für die Bachforellen-Reproduktion relevant ist.

Kartiert wurden potentielle Laichflächen, welche mindestens 2 Quadratmeter messen. Aufgenommen wurden auch Wassertiefen, Strömungsverhältnisse, Substratzusammensetzungen sowie die Kolmation. Damit wurde die Eignung der Flächen zur Laichabgabe von Forellen bewertet. Ob die kartierten Flächen für die gesamte Eientwicklungszeit ausreichend vor Hochwasser geschützt sind, wurde nicht erfasst.

Der gesamte auf mögliche Laichhabitate kartierte Abschnitt wurde auch auf Forellenlaichgruben kontrolliert. Da die Plessur zur Zeit der Aufnahmen kaum von Algen bewachsen war, war die Erkennbarkeit der Laichgruben reduziert.

Brutboxenversuche

Um die Eignung von Gewässern zur Eientwicklung von Fischen zu testen, haben sich Brutboxenversuche bewährt. Hierbei wird die natürliche Eientwicklung innerhalb der Laichgruben simuliert. Die Boxen werden dabei in möglichst geeignetem Substrat exponiert. Es wird auch darauf geachtet, dass die Stellen bei Sunk nicht trockenfallen. So werden ausschliesslich Eignung von Gewässerqualität, Schwebstofffracht und eventuelle negative Einflüsse der Temperatur getestet.

Hydra AG hat an fünf Standorten Meiersboden, Lüen, Molinis, Langwies und Litzirüti Brutboxenversuche durchgeführt (Tab. 4.3 und Abb. 4.6). Pro Standort wurden je vier bis fünf Brutboxen mit je 30 Eiern in ca. 10 bis 15 cm Tiefe vergraben. Die vorgehälterten Eier waren bereits im Augenpunktstadium und wurden am 20. und 21. Januar 2016 exponiert. Als Boxen wurden modifizierte Whitlock-Vibert-Boxen (WV-Boxen) verwendet.

Die Expositionsdauer wurde so gewählt, dass die Eier nach der Befruchtung ca. 440 Tagesgrade zur Entwicklung zur Verfügung hatten. Die verwendeten Eier hatten bereits zu Beginn des Versuches in der Fischzucht eine Entwicklung von 325 Tagesgraden absolviert. Daher wurden die Brutboxen dann nur noch 144 Tagesgrade in der Plessur gelassen, wodurch schliesslich insgesamt 469 Tagesgrade gezählt wurden. Ein Schlupferfolg von über 60% der Eier wird als «gut», einer von über 90% als «sehr gut» bewertet [16].

Probestelle	Anzahl Brutboxen	Koordinaten	Grundwassereinfluss
Litzirüti	4	2'773'008,1'186'055	Exfiltration
Langwies	3	2'772'724,1'188'008	
Molinis	3	2'769'234,1'188'419	Infiltration
Lüen	3	2'765'579,1'188'635	Exfiltration
Meiersboden	3	2'761'349,1'188'943	

Tab. 4.3 Koordinaten der Probestellen für die Brutboxen-Versuche gemäss Beilage 2.

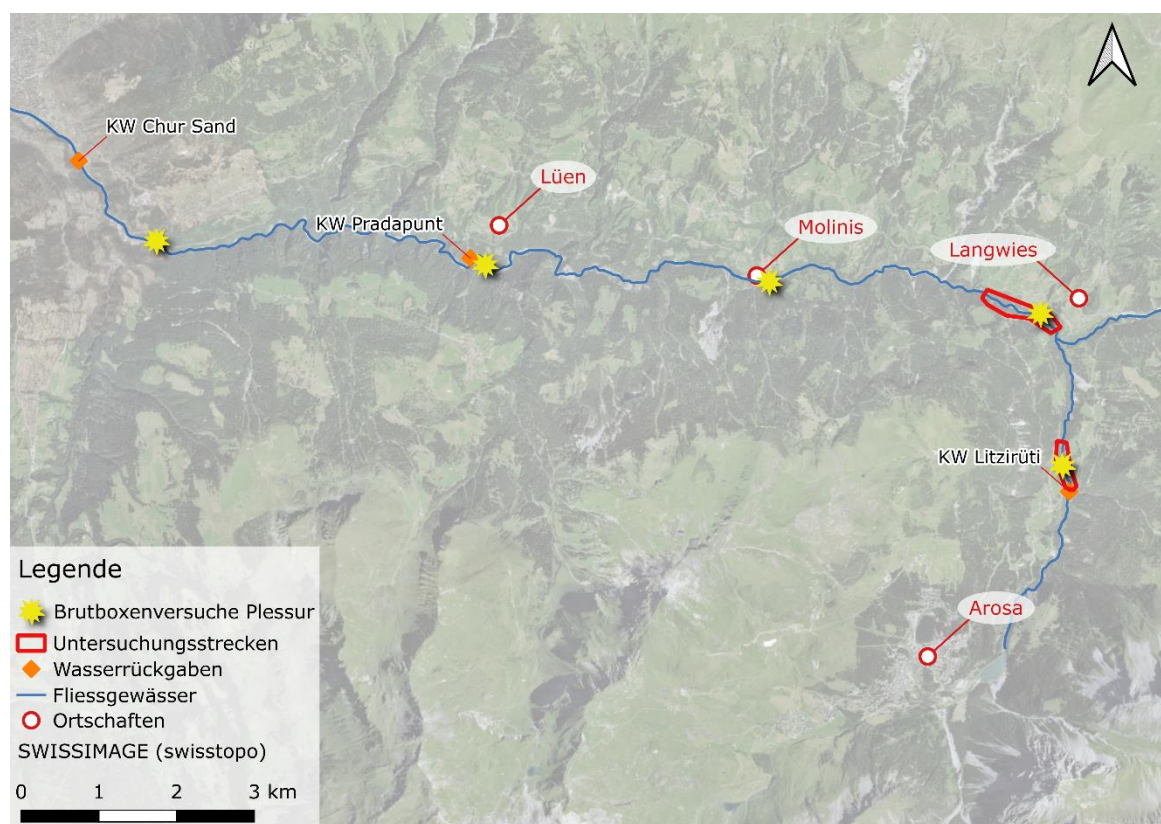


Abb. 4.6 Standorte der Brutboxenversuche. Quelle Hintergrund: Swisimage (swisstopo).

Für detailliertere Angaben zu den Brutboxenversuchen durch Hydra AG wird auf den entsprechenden Bericht in Beilage 2 verwiesen.

Erhebung/Bestimmung des Indikators

Das Laichgeschäft kann unter den heutigen Bedingungen nur funktionieren, wenn das geeignete lockere Laichsubstrat vorhanden ist und diese Bereiche während der Fortpflanzungsperiode die erforderlichen Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen erreichen. Zusätzlich ist zu beachten, dass sich der Fortpflanzungserfolg (geschlüpfte Brütlinge) nur einstellt, wenn während der Dauer der Ei- und Embryonalentwicklung bei Sunk die entsprechenden Flächen nicht trockenfallen und bei Schwall nicht weg-erodiert werden. Zudem muss in den Laichgebieten eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Interstitials während der Eientwicklung gegeben sein, d.h. die Sohle darf nicht zu stark kolmatieren.

Bei der Methodik der Brutboxen mit Augenpunktstadium besteht allgemein der Nachteil, dass beim Exponieren der Brutboxen die Gewässersohle entkolmatiert wird. Die negativen Effekte der Kolmation werden daher unterschätzt, da die naturverlaichten Eier eine längere Zeit im Substrat verbringen.

Das Angebot an potentiellen Laicharealen wird durch Habitatmodellierungen mit der Software CASiMiR-Fish für Forellen bestimmt. Es wurde dabei ein multivariates, regelbasiertes Modell verwendet, wobei die entsprechenden Fuzzy-Regeln für die Bachforelle von Hydra AG erstellt wurden. Solche Fuzzy-Regeln sind sowohl spezifisch auf das Entwicklungsstadium der zu untersuchenden Fischart als auch auf die vorliegenden Gewässercharakteristika angepasst. Basierend auf den stationären hydraulischen 2D-Modellierungen können entsprechend die potentiellen Laichareale bei unterschiedlichen Abflüssen berechnet werden, wobei zusätzlich anhand der hydraulischen Modellierungen überprüft wird, inwiefern bei Schwall Geschiebetrieb einsetzt und die Laichgruben erodiert werden können (Sohlschubspannung $> 40 \text{ N/m}^2$ abgeleitet aus dem Shields-Diagramm [17]) sowie, ob die betroffenen Laichgruben bei Sunk trocken fallen (Wassertiefe $< 1 \text{ cm}$) können.

Bei der Bestimmung der potentiellen Laichflächen wurde nur die hydrologische Eignung ohne Berücksichtigung des Substrats analysiert. Mit hydrologisch geeigneten Laicharealen werden diejenigen Standorte verstanden, welche aufgrund der Fließgeschwindigkeit sowie der Wassertiefe für ein Laichen geeignet sind. Weitere Faktoren wie die Korngrößenverteilung (Substrateignung) oder mögliche Unterstände (Totholz, Vegetation, etc.) werden dabei nicht berücksichtigt. Konkret wird hierzu für die Modellierung mit CASiMiR-Fish davon ausgegangen, dass die gesamte benetzte Fläche grundsätzlich eine geeignete Substratzusammensetzung hat, der Einfluss von unterschiedlichem Substrat fällt so weg.

Die Bewertung erfolgt anhand eines Vergleiches der berechneten hydrologisch geeigneten Laichareale im heutigen Zustand mit der hydrologisch geeigneten Laichareale im natürlichen Zustand. Abweichend von der VZH Schwall-Sunk [1] werden hierbei die geeigneten Laichareale für sämtliche Abflüsse mit den korrespondierenden Laichflächen im natürlichen Zustand verglichen und nicht ein Vergleich für einen bestimmten Abfluss durchgeführt (entspricht der grauen Fläche in Abb. 4.7). Der Flächenverlust an geeigneten Laicharealen der Fische gegenüber dem Vergleichszustand (im dargestellten Beispiel 9.6%) wird anhand der Wertefunktion gemäss der VZH Schwall-Sunk [1] bewertet.

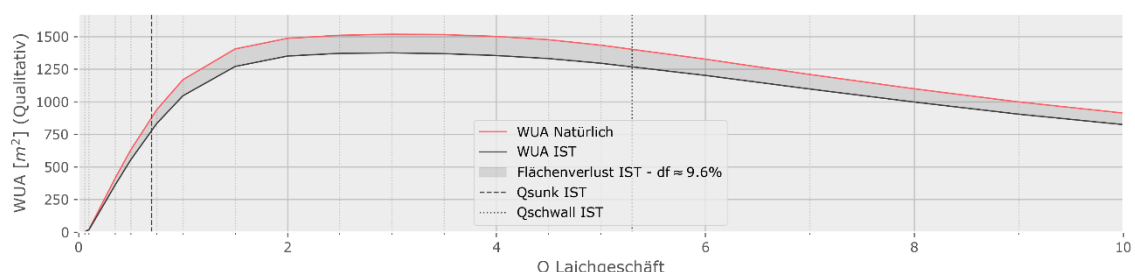


Abb. 4.7 Beispiel Bewertung Indikator F3* für die Bachforelle in der Untersuchungsstrecke Langwies. Die graue Fläche zwischen den beiden Kurven stellt den Flächenverlust für sämtliche Abflüsse gegenüber dem natürlichen Abfluss dar.

Analysierte Zeitperiode

Als Grundlage für die Auswertung des Indikators F3* wurden die Abflüsse der Zeitperiode von Beginn des Laichgeschäftes bis zum Einsetzen der Schneeschmelze (Anfangs Oktober bis Ende April) herangezogen, da grundsätzlich während dieser Zeit die Fortpflanzung und Eientwicklung von Forellen in der Plessur stattfindet. Dieser Zeitraum wurde in Zusammenarbeit mit den Gewässerökologen der Hydra AG definiert. Im vorliegenden Projekt wurden folgende Abflusskennwerte verwendet:

Bei der Bestimmung des Schwallabflusses wurde beschlossen, herbstliche Hochwasserperioden auszuschliessen, da diese die Resultate verfälschen. Im Zeitraum von Januar 2017 bis Februar 2023 wurden daher insgesamt 42 Tage als Hochwasserperioden definiert und für die Schwallbegrenzung nicht berücksichtigt. Alle 42 Tage liegen im Zeitraum von Oktober bis Dezember. Die 42 Tage entsprechen einem Anteil von knapp 5% der Wintertage zwischen Oktober bis März im betrachteten Zeitraum. Erst nach diesem Hochwasserausschluss werden die 95%-Quantile von den Tageswerten genommen. Das entscheidende Schwallereignis entspricht dann in etwa dem 90%-Quantil der Abflüsse für die Periode von Oktober bis Ende April. Der Sunkabfluss entspricht dem 5%-Quantil.

Es wurde zwischen der Fortpflanzungs- resp. Laichperiode und der Phase der Embryonalentwicklung unterschieden. Für die Modellierung des Habitatangebots während der Fortpflanzungszeit sind an der Plessur die Abflussverhältnisse der Periode von Oktober bis Dezember relevant. Für die Beurteilung der Embryonalentwicklung im Sohlsubstrat bis zur Emergenz sind die Abflussverhältnisse zwischen Oktober und Ende April massgebend.

Überprüfung der Umlagerungsstabilität von Kies/Kiesfärbversuchen

Im Rahmen des Schwallversuchs vom 9. bis 13. März 2015 wurde die Umlagerungsstabilität von Geschiebe untersucht. Dazu wurde bei Sunk gefärbtes Substrat vor und nach dem Schwallversuch fotografisch festgehalten (siehe auch Kapitel 3.10 zur Methodik und die Kurzdokumentation zu den Färbversuchen in Beilage 8). Am Ende des Schwallversuchs wurden die Flächen bei Sunk erneut fotografiert. Durch den Vergleich der Bilder konnte festgestellt werden, ob es während den Schwallereignissen zu Geschiebeverfrachtungen gekommen ist. Mit diesen Untersuchungen sollte eruiert werden, ob potentiell Laichsubstrat während Schwall umgelagert werden kann und dadurch das Angebot an geeigneten Laicharealen reduziert wird bzw. angelegte Laichgruben beeinträchtigt werden können.

4.1.4 F4* – Jungfischvorkommen

Der Indikator F4 wurde komplett von Hydra AG bearbeitet. Die Bewertung erfolgt gemäss VZH Schwall-Sunk strategische Planung und erfolgte gutachterlich. Die Untersuchungen zum Jungfischvorkommen von Bach- und Seeforellen basieren auf Abfischungen in den Standorten Litzirüti, Langwies, Molinis, Lünen und Meiersboden auf rund 140 bis 315 m langen Teilstrecken. Die Sömmerlingsbefischungen wurden am 1. September 2016 durchgeführt. Um die Befischungsergebnisse nicht zu verfälschen, wurde 2015 und bis im Herbst 2016 kein Besatz durchgeführt. Bei den Sömmerlingsbefischungen handelt es sich um Befischungen der Uferbereiche. Das heisst, es handelt sich dabei um keine kompletten Bestandesaufnahmen und die uferfernen Bereiche, an denen sich grössere Forellen aufhalten können, werden nicht vollständig abgebildet. Der genaue Beschrieb zur Erfassungsmethodik sowie die Resultate der gutachterlichen Untersuchungen befinden sich im Bericht von Hydra AG (Beilage 2). Auch bereits am 20. April 2015 wurden Brütlingsbefischungen durchgeführt, wodurch einige Vergleiche mit dieser Erhebung möglich sind. Besetzt wurden im Jahr 2015

nur Forellen im Fondeierbach. Am 27. Juli 2022 wurde unter der Leitung des AJF eine quantitative Bestandskontrolle bei Litzirüti durchgeführt [5].

Dazu hat das AJF fischereiliche Statistiken der Plessur zur Verfügung gestellt [4]. Damit lassen sich die Abfischungen von 2016 und 2022 mit weiteren Bestandesaufnahmen aus der Vergangenheit vergleichen (siehe Tab. 4.4). Durch die verschiedenen Bestandesaufnahmen lassen sich auch Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Schwall-Sunk durch den Regimewechsel ab 2017 ziehen.

Datum	Methodik	Standort	Besatz
24.04.1990	Qualitativ	Restwasserstrecke Litzirüti (FSA 312)	?
05.02.1999	Quantitativ	Zwischen Wasserrückgabe KW Litzirüti bis oberhalb Sapünerbach (FSA 313)	?
10.04.1999	Quantitativ	Zwischen Wasserrückgabe KW Litzirüti bis oberhalb Sapünerbach (FSA 313)	?
19.08.1999	Qualitativ	Zwischen Wasserrückgabe KW Litzirüti bis oberhalb Sapünerbach (FSA 313)	?
11.04.2000	Quantitativ	Restwasserstrecke Litzirüti (FSA 312)	?
09.01.2001	Qualitativ	Zwischen Wasserrückgabe KW Litzirüti bis oberhalb Sapünerbach (FSA 313)	?
20.04.2015	Brüttingsbefischung	Referenzstrecke, Litzirüti, Langwies, Molinis, Lünen, Meiersboden	2015 nur im Sapünerbach
01.09.2016	Sömmerlingsbefischung	Litzirüti, Langwies, Molinis, Lünen, Meiersboden, 2x Chur (P6 und P7)	ausgesetzt
24.07.2018	Qualitativ	Zwischen Wasserrückgabe KW Litzirüti bis oberhalb Sapünerbach (FSA 313)	?
27. Juli 2022	Quantitative Befischung	Restwasserstrecke Litzirüti (FSA 312) Zwischen Wasserrückgabe KW Litzirüti bis oberhalb Sapünerbach (FSA 313)	ausgesetzt

Tab. 4.4 Übersicht über die Abfischungen aus den letzten Jahren.

4.1.5 F6 – Habitateignung Fische

Das Ziel des Indikators F6 liegt in der Beurteilung der allgemeinen Habitateignung für die im betrachteten Gewässerabschnitt vorkommenden Leitfischarten. Gemäss VZH Schwall-Sunk [1] erfolgt dies anhand eines Vergleichs des Flächenangebots an geeignetem Habitat beim mittleren natürlichen Abfluss Q_{182} mit dem Flächenangebot an geeignetem Habitat bei Schwall und Sunk. Der Vergleich eines einzigen statistischen Wertes des «natürlichen» Zustandes mit einem mittleren Sunk und Schwall erscheint wenig sinnvoll. Das Q_{182} des «natürlichen» Zustandes beschreibt den Abfluss, welcher an 50% der Abflüsse über das Jahr gesehen grösser und 50% kleiner ist als das Q_{182} . Inwiefern dies ein für das Gewässer und die darin vorkommende Fischfauna relevanter Zustand war, lässt sich nur schwer beurteilen.

Allgemein erscheint die Beeinflussung des Indikators F6 mittels Sanierungsmassnahmen schwierig, in besonderem Masse trifft dies bei einer Betrachtung von jährlichen Kennwerten der Abflussganglinie zu. Konkrete Massnahmen zur Beeinflussung des

mittleren jährlichen Sunk- oder Schwallabflusses sind sehr schwer bestimmbar und erschweren die Zieldefinition für den Indikator F6 stark. Aus diesem Grund wird beim Indikator F6 von der Methodik gemäss VZH Schwall-Sunk [1] abgewichen.

Erhebung/Bestimmung des Indikators

Grundlage bei der Bestimmung des Indikators bilden Habitatmodellierungen. Bei den Habitatmodellierungen werden die Lebensraumansprüche der Bachforellen für die jeweiligen Verhältnisse im Gewässer bei einem bestimmten Abfluss (Schwall oder Sunk) mit dem hydrologischen Vergleichszustand verglichen. Die hydraulischen Modellierungen (stationäre 2D-Modellierungen) bilden daher auch für die Bestimmung dieses Indikators eine wichtige Grundlage.

Die Bestimmung der Lebensraumansprüche für die jeweiligen Abflüsse der Fische im Gewässer erfolgte mit der Software CASiMiR-Fish anhand eines multivariaten, regelbasierten Modells. Dazu wurden die Abflusstiefe und Fließgeschwindigkeit aus den hydraulischen stationären 2D-Modellierungen sowie Fuzzy-Regeln verwendet. Auf eine Berücksichtigung von Substrat und Strukturen wurde verzichtet, da eine Erfassung des Sohlsubstrates und von Strukturen mit sehr grossem Aufwand verbunden ist und die beiden Parameter zwischen den verschiedenen, untersuchten Szenarien (mittlerer natürlicher Abfluss sowie Schwall und Sunk) nicht variieren.

Der Indikator F6 wurde ausschliesslich für Bachforellen untersucht und für die zwei Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies ausgewertet.

Analysierte Zeitperiode

Gerade im alpinen Bereich variieren die Abflüsse über das Jahr gesehen sehr stark. So sind auch die Sunk- und Schwallabflüsse je nach Saison sehr unterschiedlich. Die vorgeschlagene Annahme betrachtet daher entgegen der vorgegebenen Methodik gemäss VZH Schwall-Sunk [1] beim Indikator F6, repräsentativ für die verschiedenen Saisons, die vier Monatsmittel im Vergleichszustand der Monate Februar, Mai, August und November und die entsprechenden Sunk- (40%-Quantil) und Schwallabflüsse (60%-Quantil) dieser Monate.

4.1.6 B1*, B2*, B3 und B4 - Makrozoobenthos

Zur Beurteilung der Auswirkungen des Schwall-Sunk Regimes auf das Makrozoobenthos hat WFN Felderhebungen der folgenden Schwall-Sunk sensitiven Indikatoren durchgeführt:

- B1* Biomasse und Diversität Makrozoobenthos
- B3 Längenzonation Makrozoobenthos
- B4 EPT-Familien Makrozoobenthos

Dazu wurden die Resultate mit dem Breitbandindikator B2* MSK-Modul Makrozoobenthos ergänzt.

Die Methodik der Probenahme richtete sich grundsätzlich nach der VZH Schwall-Sunk [1]. Weitere Details zu der Erhebung und der Methodik können im Bericht von WFN AG in Beilage 7 bzw. [8] entnommen werden. Die Indikatoren wurden in beiden Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies sowie in den Auen Molinis und Lünen ausgewertet (siehe Abb. 4.8). Die Aue Lünen befindet sich in der Restwasserstrecke des KW Lünen.

WFN hat die ursprünglichen Felddaufnahmen im Jahr 2016 durchgeführt und in einem Bericht von 2017 dokumentiert. Aufgrund dem Regimewechsel ab 2017 (siehe Kapitel 3.4.1) wurde in Absprache mit den Behörden entschieden, die Aufnahmen zu wiederholen. Daher hat WFN im Jahr 2020 erneute Makrozoobenthosaufnahmen im Feld durchgeführt und im Bericht von 2021 in Beilage 7 dokumentiert. Die Probenahmen wurden am 26. und 27. März 2020 durchgeführt und richten sich nach der VZH Schwall-Sunk [1]. Details zur Methodik der Probenahme und Auswertung sind in Beilage 7 enthalten.

Durch die zwei Bestandesaufnahmen vor und nach dem Regimewechsel, lassen sich auch Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Schwall-Sunk auf das Makrozoobenthos ziehen.

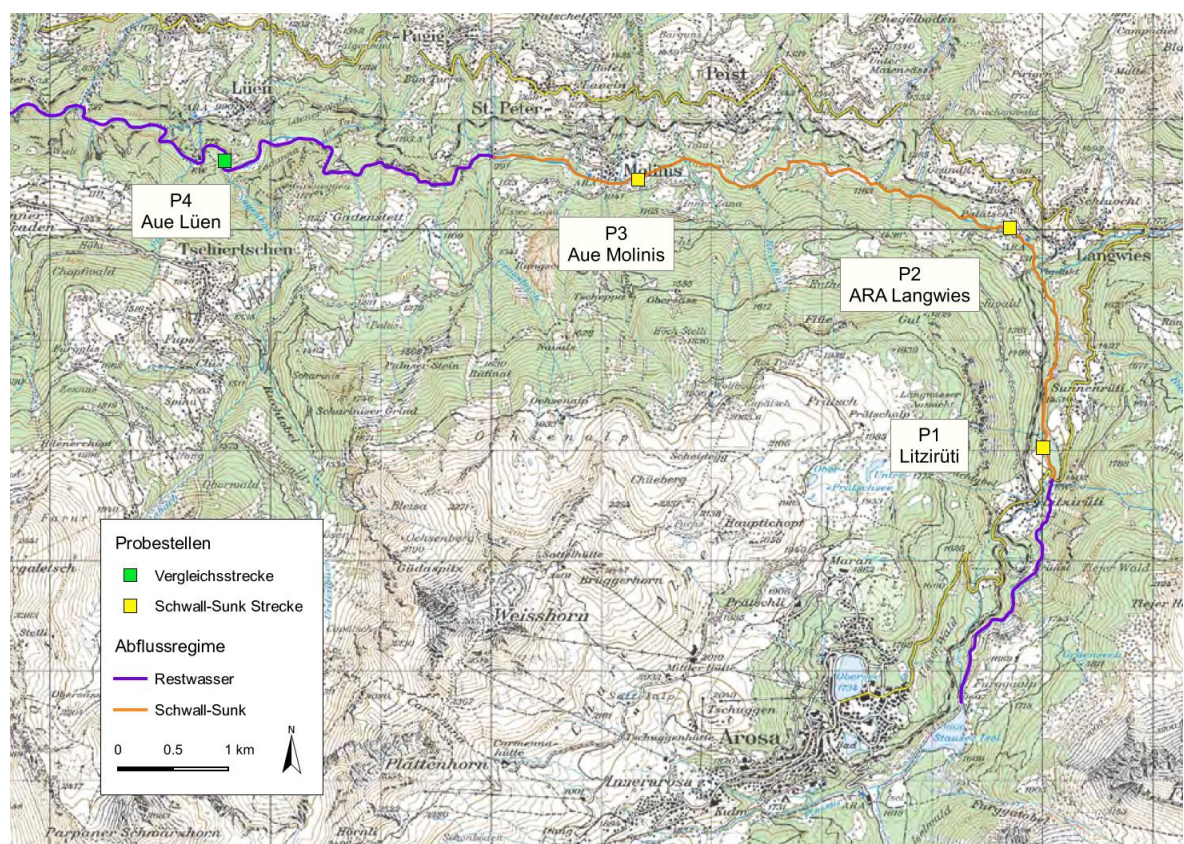


Abb. 4.8 Vier Untersuchungsstellen für Makrozoobenthos und Kolmation [8].
Quelle Hintergrundkarte: Swisssimago (swisstopo).

4.1.7 H1*, H2 – Kolmation

Gemäss der VZH Schwall-Sunk [1] sollen die Zusatzindikatoren H1* – Innere Kolmation und H2 – Äussere Kolmation erhoben werden, wenn im betroffenen Einzugsgebiet mit hoher Schwall-Sunk bedingter Trübung und hoher Kolmation festgestellt werden. Gemäss der strategischen Planung wurde die Kolmation H1* mit «schlecht» bei Litzirüti und mit «unbefriedigend» bei Langwies beurteilt (siehe dazu Kapitel 4.4).

H1* – Innere Kolmation

Als innere Kolmation bezeichnet man die Ablagerung von Feinsedimenten und -partikeln im Porenraum der Gewässersohle [8]. Als Folge der inneren Kolmation wird die

Gewässersohle verdichtet, wodurch die Sauerstoffzufuhr, die Durchlässigkeit und der Lebensraum zahlreicher Gewässerorganismen beeinträchtigt werden.

H2 – Äussere Kolmation

Die äussere Kolmation bezieht sich auf die Ablagerung von Schwebstoffen und Feinsedimenten (Sand, Silt oder Ton) auf der Gewässersohle [8]. Mögliche negative Folgen sind eine Abnahme der Durchlässigkeit sowie eine reduzierte Sauerstoffzufuhr im Substrat. Der Indikator H2 beschreibt somit die Limitierung der Bewohnbarkeit der Habitate [1].

Die Erhebungen der Kolmation wurde von WFN bei den Standorten Litzirüti, ARA Langwies, Aue Molinis und Aue Lünen durchgeführt (Abb. 4.8). Die ursprünglichen Erhebungen fanden im Herbst 2014 und Frühling 2015 statt. In Absprache mit den Behörden wurde entschieden, die Aufnahmen aufgrund des Regimewechsels ab 2017 zu wiederholen. Die neuen Erhebungen fanden am 18. Dezember 2019 und 26. und 27. März 2020 durch WFN statt. Durch die zwei Bestandesaufnahmen vor und nach dem Regimewechsel, lassen sich auch Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Schwall-Sunk auf die Kolmation ziehen.

4.1.8 Q1* – Temperatur

Neben Abfluss- und Pegelschwankungen kann ein Schwall-Sunk Regime weiter zu abrupten Temperaturänderungen im Gewässer führen (z.B. Turbinieren von Wasser aus höhergelegenen Stauseen). Gemäss VZH Schwall-Sunk [1] ist die Temperaturänderungsrate $TR_{\text{Schwall-Sunk}}$ (90%-Quantil) die massgebende Grösse, anhand derer die Auswirkungen der Temperaturschwankungen beurteilt werden können. Daneben werden noch weitere Parameter als Korrekturfaktoren mitberücksichtigt. Ausgewertet wurden die mittels instationärer 1D-Modellierung modellierten Werte.

Messstandorte

Für die Bestimmung dieses Indikators sind Temperaturmessdaten erforderlich. Für die Defizitanalyse sind grundsätzlich nur Temperaturmessdaten unterhalb der Wasserrückgabe notwendig. Für die Prognose bzw. Zieldefinition und Massnahmenplanung werden jedoch auch Daten zur Temperatur des Betriebswassers und des Restwassers vor der Wasserrückgabe benötigt. Nur so können mittels Mischverhältnissen die möglichen Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen bestimmt werden. Für die vorliegenden Arbeiten wurden daher die in Kapitel 3.8.1 beschriebenen Sonden installiert.

Analysierte Periode

Für eine Bewertung der Temperatúrauswirkungen werden Daten von mindestens einem ganzen Jahreszyklus benötigt. Idealerweise ist eine 5-jährige Temperaturmessreihe vorhanden. Ausgewertet wurden die Temperaturmessdaten von gut 4 Jahren.

Wie in Abb. 4.10 abgebildet, wurden Temperaturmessdaten von der Restwasserstrecke, Wasserrückgabe und Schwallstrecke von gut 4 Jahren bei Litzirüti verwendet. Bei Langwies oder am Sapünerbach gab es keine Temperaturmessung. Bei den drei Messsonden (vgl. Kapitel 3.8.1) gab es grössere Datenlücken und zudem weisen die Daten häufig Fehlmessungen aufgrund Trocken fallen (Messung Lufttemperatur) oder Vereisungen auf. Aus diesen Gründen wurden die Daten wie folgt aufgearbeitet:

1 Auffüllen möglicher Lücken

Ersetzen der Lücken mit den mittleren Datenwerten aller weiteren Jahre. Abb. 4.9 stellt dies anhand der Temperaturmessung in der Restwasserstrecke grafisch dar.

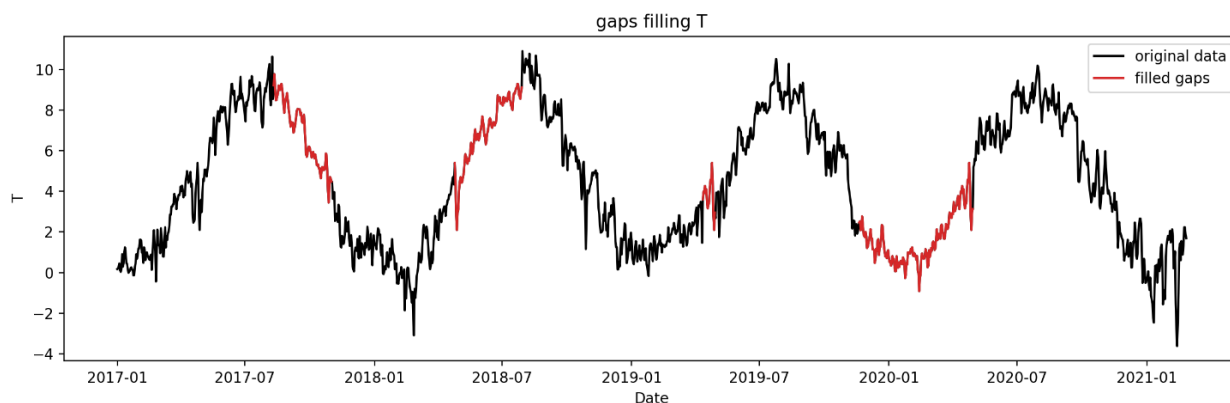


Abb. 4.9 Aufgefüllte Lücken der Temperaturdaten in der Restwasserstrecke Litzirüti

2 «Despiking» / Extreme eliminieren

Um das Rauschen und die Peaks zu eliminieren, werden die Daten zuerst auf eine gröbere Auflösung umgerechnet (Stunde oder Tage). Höhere Peaks (Trockenfallen) werden anhand eines definierten Quantils (hier 95%-Quantil) entfernt. In einem zweiten Schritt werden die Daten anhand eines Moving-Average Filters (hier über 5 Tage) geglättet. Abb. 4.10 stellt dies anhand der Temperaturmessung der Wasserrückgabe des KW Litzirüti dar.

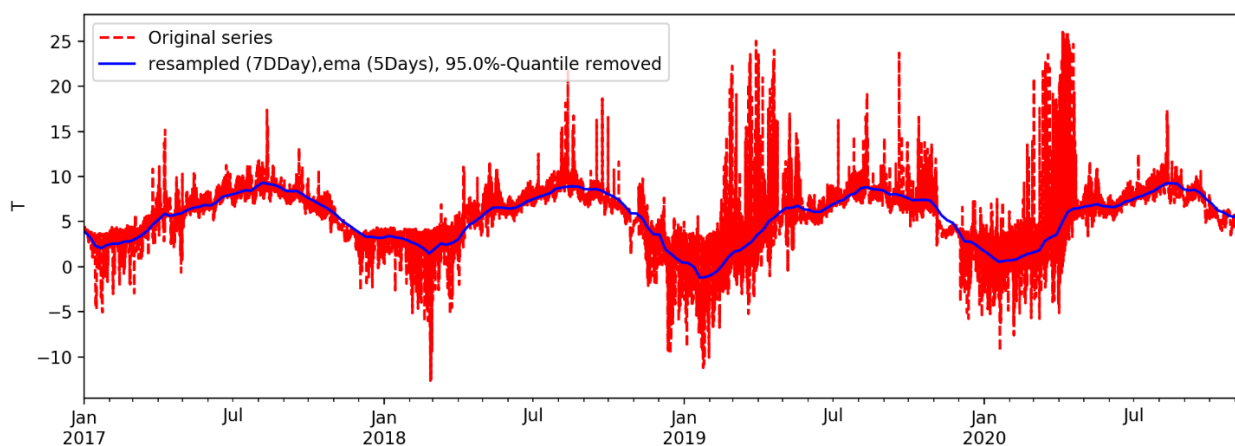


Abb. 4.10 Eliminiertes Rauschen bei den Temperaturdaten der Wasserrückgabe des KW Litzirüti.

Erhebung/Bestimmung des Indikators

Die Auswertung der Temperaturdaten erfolgte gemäss den Vorgaben der VZH Schwall-Sunk [1] mit einer zeitlichen Auflösung von zehn Minuten und einer Messgenauigkeit von $< 0.1^\circ\text{C}$. Die Auswertung erfolgt gemäss der Excel-Vorlage des BAFU³ zum MSK-Modul Temperatur⁴.

Neben der Temperaturänderungsrate wurde in der Auswertung zusätzlich die Temperaturamplitude $TA_{\text{Schwall-Sunk}}$ ermittelt, welche mit der gewässertypspezifischen Referenz-Temperaturamplitude TA_{Ref} verglichen wurde. Die Temperaturamplitude $TA_{\text{Schwall-Sunk}}$ entspricht einer repräsentativ durch Schwall-Sunk erzeugten Tagesamplitude, die

³ Version Dezember 2011

⁴ Modul-Stufen-Konzept des Bundes. Sammlung von standardisierten Methoden zur Analyse und Beurteilung von Fließgewässern anhand verschiedener Merkmale (Module) und in verschiedenen Beobachtungstiefen (Stufen)

gewässertypspezifische Referenz-Temperaturamplitude TA_{Ref} entspricht einer typischen, eher grossen, im Sommer vorkommenden Tagesamplitude. TA_{Ref} wird über die Gewässerregion definiert. In Rücksprache mit Hydra entspricht die Plessur dem Gewässertyp des Epirhithral-subalpin (ERs).

Die Auswertungen wurden sowohl für die Temperaturmesssonden durchgeführt als auch mit den instationär modellierten Temperaturverläufen (1D-Modell) für die zwei Untersuchungsstrecken ausgewertet. Für die Seitenzuflüsse wurde vereinfacht der gleiche Temperaturverlauf, wie für den gemessenen Restwasserabfluss verwendet. Die resultierenden Temperaturen wurden mittels Mischverhältnissen instationär modelliert.

4.1.9 Zusammenhang Kraftwerksbetrieb und Trübung der Plessur

Das Schwall-Sunk Regime kann sich potentiell auch auf die Trübung beziehungsweise auf die Schwebstofffracht im Fliessgewässer auswirken. So kann der Schwall sedimentiertes Material wieder aufwirbeln und eine zusätzliche Trübung verursachen. Um diesen Effekt in der Plessur zu untersuchen, wurden Trübungsmessungen mit den Betriebsdaten und Abfluss- / Pegelmessungen verglichen und vereinfacht ausgewertet. Die Trübung der Plessur wurde Mitte Januar 2015 bis zum Beginn der Schneeschmelze Anfang April 2015 bei den Messstellen in Langwies und Pradapunt gemessen.

4.1.10 Nicht durchgeführte (untersuchte) Indikatoren

In der VZH Schwall-Sunk [1] des BAFU sind grundsätzlich noch weitere Indikatoren für die Untersuchungen der Schwall-Sunk Problematik aufgeführt. In Rücksprache mit den zuständigen Leitbehörden erscheint es jedoch nicht sinnvoll, alle diese Indikatoren zu erheben. Diese Ansicht wird in den folgenden Unterkapiteln begründet.

D1 – Drift

Der Indikator D1 Drift wurde nach Rücksprache mit dem ANU nicht untersucht. Driftversuche sind mit erheblichem Aufwand verbunden. Zudem ist die Bewertung von Driftversuchen heikel, weil deren Ergebnisse stark von der hydrologischen Vorgeschichte, der Jahres- und Tageszeit abhängen. Eine Interpretation dieser Untersuchungen ist daher schwierig.

Gemäss Pflichtenheft vom 15. Dezember 2015 [12] wurde offengehalten, ob Driftversuche in Abhängigkeit der B1*-Resultate nachträglich durchgeführt werden sollen. Die Resultate zur Biomasse und Diversität des Makrozoobenthos (siehe Kapitel 4.2.6) deuten aber nicht daraufhin, dass Drift ein übermässiges Problem darstellt. Daher ist eine Erhebung des Indikators D1 aus Sicht Axpo weiterhin nicht notwendig.

B5 – Habitateignung Makrozoobenthos

Weiter wurde der Indikator B5 Habitateignung Makrozoobenthos – wie im Pflichtenheft 15. Dezember 2015 [12] bereits erläutert – nicht untersucht. Eine Modellierung der Habitateignung für Makrozoobenthos erachtet Axpo als sehr schwierig. Im Vergleich zu den Habitaten der Fische sind die verschiedenen Habitate des Makrozoobenthos viel kleinräumiger und umfassen auch Standorte unter dem Besiedelungssubstrat, was über die Möglichkeiten einer hydraulischen Modellierung hinausgeht. Zudem fehlen in vielen Fällen Grundlagedaten zu den artspezifischen Präferenzkurven, welche nur für vereinzelte Arten vorliegen. Der Indikator befindet sich aktuell beim BAFU in Überarbeitung. Inwiefern der Indikator zu einem späteren Zeitpunkt berücksichtigt werden kann, kann nicht abschliessend beurteilt werden.

An der Plessur verzichtet Axpo daher vorerst auf die Bearbeitung dieses Indikators. Aus Sicht der Axpo rechtfertigt die eingeschränkte Aussagekraft dieser Untersuchungen den Aufwand für die Modellierungen nicht, bzw. ist je nach Wahl des Modells nicht möglich. Die Beeinträchtigung Schwall-Sunk des Makrozoobenthos wurde anhand der schwallsensitiven Indikatoren B1*, B2, B3 und B4 beurteilt (siehe Kapitel 4.2.6).

4.2 Resultate

Nachfolgend werden die Resultate für die einzelnen Indikatoren zusammengefasst.

4.2.1 A2 – Hydrologische Kenngrössen

In Kapitel 4.1.1 werden die Zeiträume (Perioden) und die verwendeten Daten beschrieben. Die nachfolgenden Kennwerte basieren auf den modellierten Ganglinien (in-stationäre hydraulische 1D-Modellierung). Ausgewertet wurde eine Periode von Januar 2017 bis Februar 2023 (vgl. Kapitel 3.8).

In Abb. 4.11 sind die Kennwerte inkl. dem Schwall-Sunk Verhältnis der Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies dargestellt. Die Kennwerte Jahresmittelwert (MQ), Jahresschwallabfluss (95%-Quantil aller Tagesmaxima), Jahressunkabfluss (5%-Quantil aller Tagesminima), Ausbauwassermenge (Q_A) und Sunkabfluss, Minimal- und Maximalabfluss aller Untersuchungsstrecken sind in Abb. 4.12 und Abb. 4.13 aufgelistet.

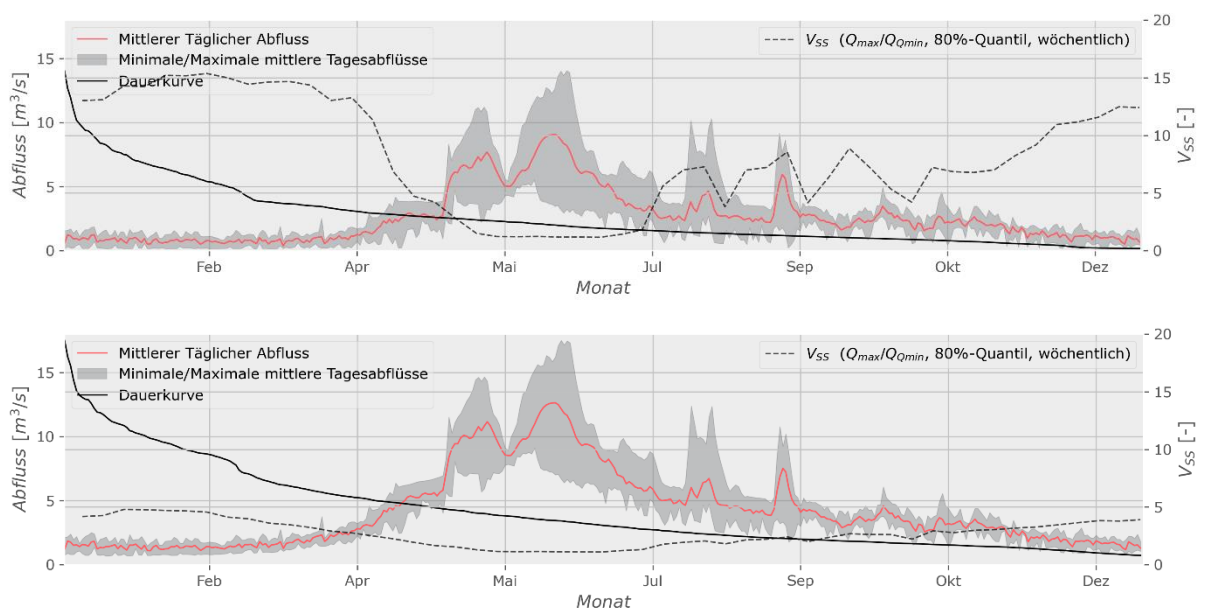


Abb. 4.11 Mittlerer täglicher Abfluss und minimale/maximale mittlere Tagesabflüsse sowie das Schwall-Sunk Verhältnis im Jahresverlauf (VSS) der Untersuchungsstrecken Litzirüti (oben) und Langwies (unten) in der Zeitperiode Januar 2017 - Februar 2023.



	F3* - Laichentwicklung Okt.-Ende April	F3* - Laichgeschäft Okt.-Dez	F2* - larval Mitte März - Mitte Mai	F2* - Übergang Mitte Mai - Ende Juli	F2* - juvenil Aug - Ende Sep	Kennwerte ganzjährig
Min (m³/s)	0.13	0.17	0.16	0.27	0.13	0.13
Sunk 5% (m³/s)	0.16	0.19	0.18	0.46	0.27	0.17
Schwall 95% (m³/s)	3.5	3.6	6.7	10.4	8.0	8.2
Amplitude (m³/s)	2.7	2.6	2.7	1.8	2.7	2.6
VSS (-)	13.1	10.8	11.7	1.7	12.2	11.7
Frequenz (-)	2	2	2	1	2	2

Abb. 4.12 Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Perioden der jeweiligen Indikatoren des Gesamtzeitraums von Januar 2017 bis Februar 2023.

	F3* - Laichentwicklung Okt.-Ende April	F3* - Laichgeschäft Okt.-Dez	F2* - larval Mitte März - Mitte Mai	F2* - Übergang Mitte Mai - Ende Juli	F2* - juvenil Aug - Ende Sep	Kennwerte ganzjährig
Min (m³/s)	0.68	0.78	1.05	2.54	0.68	0.68
Sunk 5% (m³/s)	0.74	0.83	1.15	2.86	1.68	0.76
Schwall 95% (m³/s)	5.3	4.5	10.0	13.8	10.1	11.4
Amplitude (m³/s)	2.7	2.7	2.8	1.8	2.8	2.7
VSS (-)	3.9	3.6	2.7	1.3	3.5	3.5
Frequenz (-)	2	2	2	0	2	2

Abb. 4.13 Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Langwies für die Perioden der jeweiligen Indikatoren des Gesamtzeitraums von Januar 2017 bis Februar 2023.

4.2.2 F2* – Stranden von Fischen

Grenzwerte VZH Schwall-Sunk

In der VZH Schwall-Sunk [1] sind sowohl für die Beurteilung und Bewertung der trockenfallenden Flächen als auch für die Pegelrückgangsraten Wertefunktionen bzw. Grenzwerte enthalten. Für die Pegelrückgangsraten werden die Wertefunktionen weiter nach den Altersstadien (larvale und juvenile) der Bachforellen unterschieden

Anteil trockenfallender Fläche

Die Anteile täglicher, trockenfallender Flächen (95%-Quantil) zwischen den Schwall-Sunk-Abflüssen kann der Abb. 4.14 für die relevanten Perioden und die Untersuchungsstrecken entnommen werden. In den Abbildungen Abb. 4.15 bis Abb. 4.16 sind die trockenfallenden Flächen zwischen Schwall und Sunk für die zwei Untersuchungsstrecken dargestellt.

	Litzirueti	Langwies
$F2^* - dF$ [%] - larval	43.7	14.8
$F2^* - dF$ [%] - Übergang	33.7	7.5
$F2^* - dF$ [%] - juvenil	42.3	12.7

Abb. 4.14 Anteil täglicher trockenfallender Flächen [%] (95%-Quantil) zwischen Schwall und Sunk für die Forellen für die relevanten Perioden in den Untersuchungsstrecken ausgewertet für die Periode von Januar 2017 bis Februar 2023.

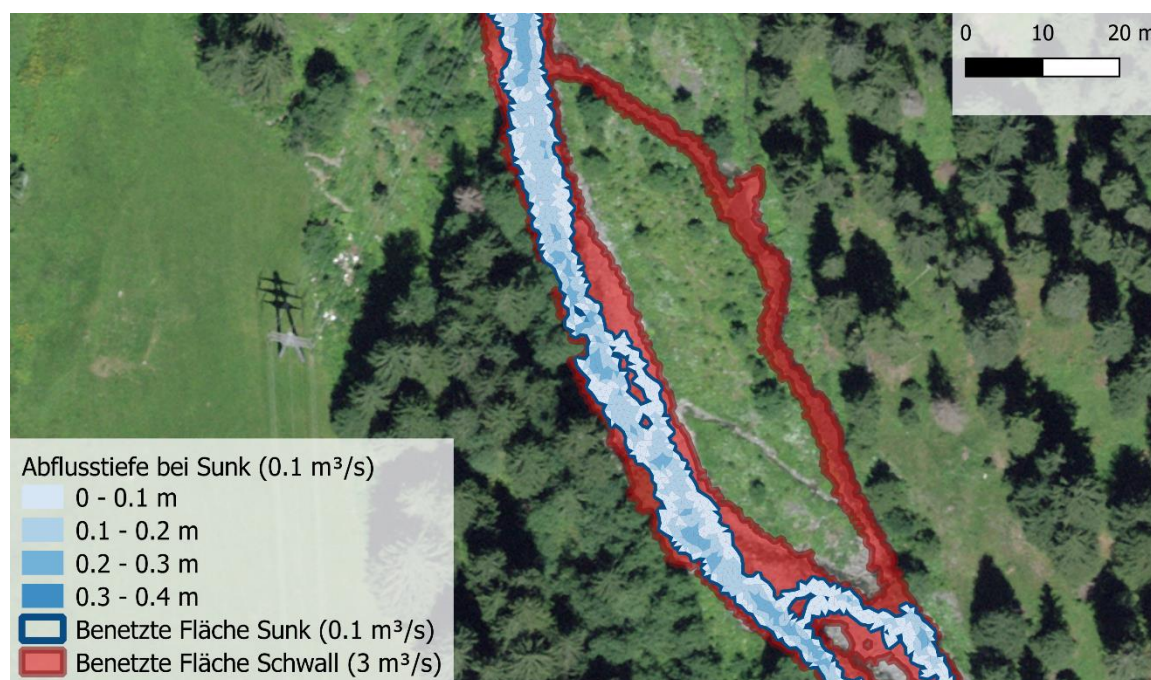


Abb. 4.15 Vergleich der benetzten Fläche in der Untersuchungsstrecke Litzirüti bei Schwall (3 m³/s) und Sunk (0.1 m³/s). Dargestellt sind jeweils die modellierten stationären Abflüsse, welche am nächsten bei den entsprechenden hydrologischen Kenngrößen liegen. Bei Sunk ist zusätzlich die Fliesstiefe [m] dargestellt. Quelle Hintergrund: Swisstopo (swisstopo).

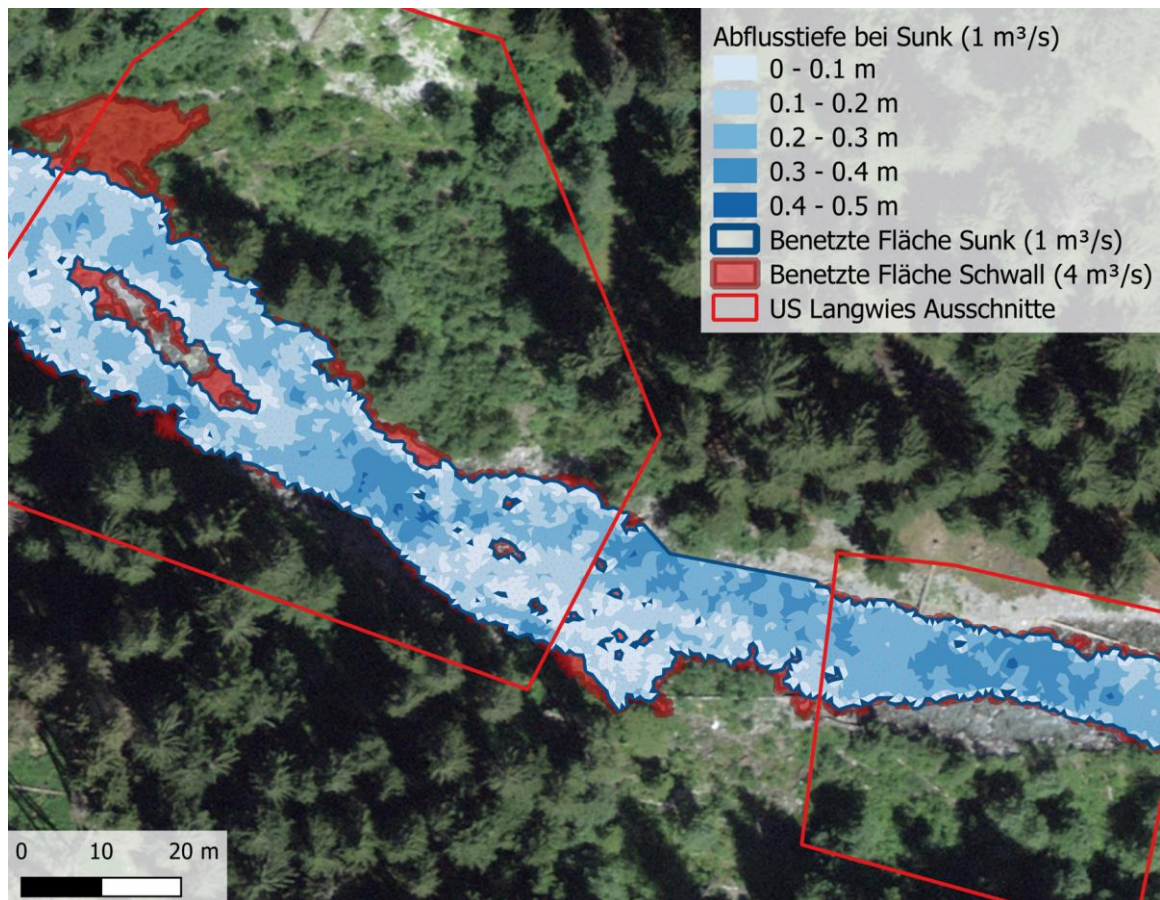


Abb. 4.16 Vergleich der benetzten Fläche in der Untersuchungsstrecke Langwies bei Schwall ($4 \text{ m}^3/\text{s}$) und Sunk ($1 \text{ m}^3/\text{s}$). Dargestellt sind jeweils die modellierten stationären Abflüsse, welche am nächsten bei den entsprechenden hydrologischen Kenngrössen liegen. Ausgewertet wurden bei Langwies nur die rot eingerahmten Segmente. Bei Sunk ist zusätzlich die Fliesstiefe [m] dargestellt. Quelle Hintergrund: Swisstopo (swisstopo).

Der Anteil der trockenfallenden Flächen ist sowohl vom Schwall-Sunk Verhältnis als auch von der Morphologie abhängig. Bei Litzirüti fallen die täglichen Flächenverluste zwischen Schwall und Sunk hoch aus, insbesondere auf Grund der teilweise sehr tiefen Basisabflüsse im Verhältnis zur Ausbauwassermenge des Kraftwerks Litzirüti. Bei Langwies nach Zufluss des Sapünerbachs sind die trockenfallenden Flächen zwischen Schwall und Sunk bereits wesentlich geringer und weisen gemäss VZH Schwall-Sunk [1] kein Defizit mehr auf.

Pegelrückgangsraten

Abb. 4.17 stellt die Bewertung für die Pegelrückgangsraten gemäss VZH Schwall-Sunk [1] für jedes Querprofil der hydraulisch instationären 1D-Modellierung für die larvale Periode für die Bachforelle dar. Ebenfalls dargestellt sind die Auswertungen der Pegelrückgangsraten bei den zwei Pegelmessstellen in Litzirüti und Langwies für die larvale Periode. Abb. 4.18 listet die flächig ausgewerteten Pegelrückgangsraten für die zwei Untersuchungsstrecken auf.

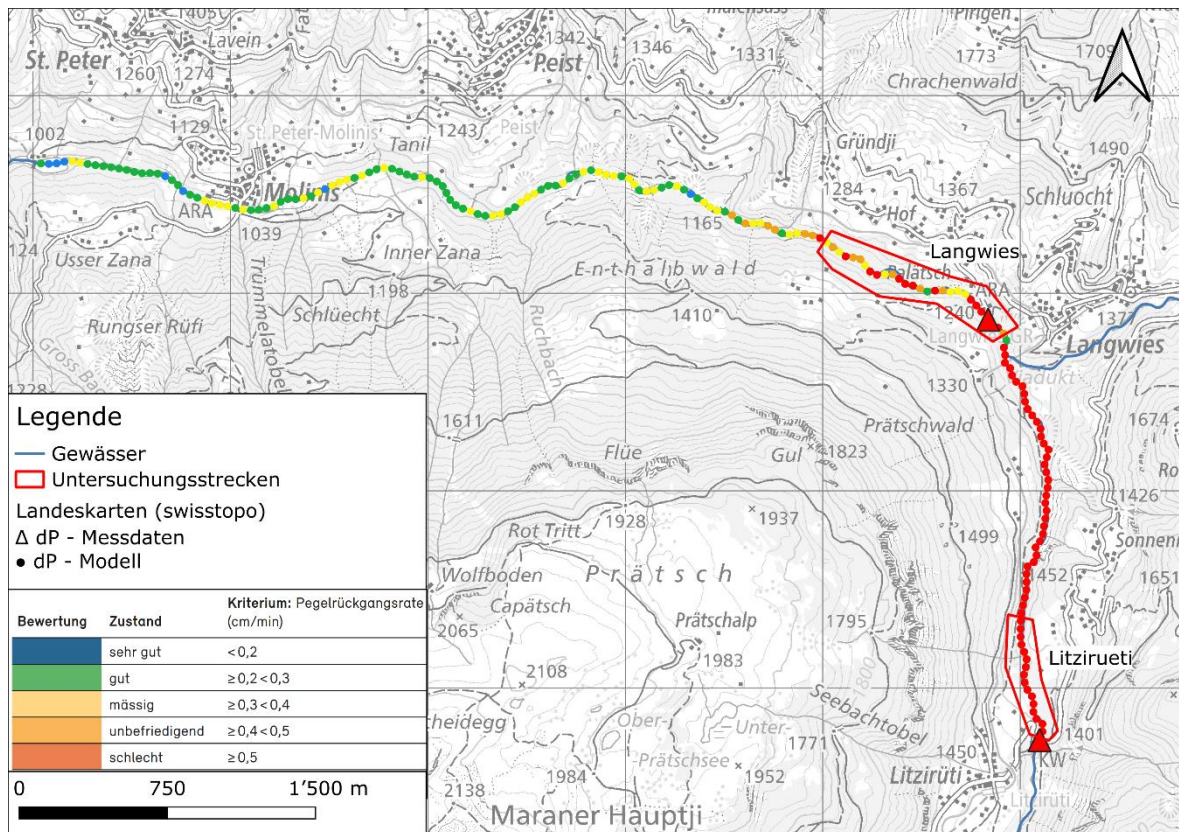


Abb. 4.17 Resultate Pegelrückgangsraten (Messwerte/Modelliert) für den Ist-Zustand von Januar 2017 bis Februar 2023 für larvale Forellen für alle Querprofile sowie die Pegelmessstellen. Quelle Hintergrundkarte: Swisstopo.

	Litzirüti	Langwies
$F2^* - dP$ [cm/min] - larval	1.56	0.39
$F2^* - dP$ [cm/min] - Übergang	1.13	0.2
$F2^* - dP$ [cm/min] - juvenil	1.35	0.29

Abb. 4.18 Flächig ausgewertete Pegelrückgangsraten [cm/min] bei Litzirüti und Langwies.

Bis zum Zufluss des Sapünerbachs werden die Pegelrückgangsraten in der larvalen Periode für alle Querprofile schlecht bewertet. Gemässer flächiger Auswertung beträgt die Pegelrückgangsraten für die larvale Periode 1.56 cm/min und wird mit schlecht bewertet. Auch die Pegelmessdaten bei Litzirüti werden mit schlecht bewertet. In der Übergangsphase werden die Pegelrückgangsraten bei Litzirüti noch mit mässig bewertet. In der juvenilen Phase liegt bei Litzirüti gemäss VZH Schwall-Sunk [1] kein Defizit mehr vor.

Ab dem Zufluss Sapünerbach fallen die Pegelrückgangsraten deutlich geringer aus, werden aber immer noch teilweise mit ungenügend bis schlecht bewertet. Auch die flächige Bewertung ist mit einem Wert von 0.39 cm/min nur knapp als mässig einge-

stuft. Die Pegelmessdaten bei Langwies werden mit schlecht bewertet. In der Übergangsphase und der juvenilen Phase liegt bei Langwies gemäss VZH Schwall-Sunk [1] kein Defizit mehr vor.

Unterhalb der Untersuchungsstrecke Langwies werden die Pegelrückgangsraten kontinuierlich besser bewertet. Dies ist einerseits auf die Dämpfung der Schwallwellen im Verlauf der Fliessstrecke und andererseits auf die Zunahme der Basisabflüsse durch den Zufluss der seitlichen Zubringer (Frauentobelbach und Farbtobelbach) zurückzuführen.

Aggregierte Bewertung F2*

Abb. 4.19 zeigt die aggregierte Bewertung für F2* gemäss VZH Schwall-Sunk [1]. Ein Defizit liegt bei Litzirüti für die larvale Periode und die Übergangsperiode vor. Bei Langwies liegt ein leichtes Defizit für die larvale Periode vor. Für den Indikator sind entsprechende Ziele zu formulieren, um die Defizite zu beheben. Auf die methodischen Unsicherheiten und deren Relevanz wird in Kapitel 4.5 eingegangen.

	Litzirüti	Langwies
F2* - Agg - larval		
F2* - Agg - Übergang		
F2* - Agg - juvenil		
F2* - dF [%] - larval	43.7	14.8
F2* - dF [%] - Übergang	33.7	7.5
F2* - dF [%] - juvenil	42.3	12.7
F2* - dP [cm/min] - larval	1.56	0.39
F2* - dP [cm/min] - Übergang	1.13	0.2
F2* - dP [cm/min] - juvenil	1.35	0.29

Abb. 4.19 Aggregierte Bewertung F2*

Gutachterliche Bewertung F2* durch Hydra

Die Bewertung des Indikators F2* gemäss Vollzugshilfe beinhaltet nicht alle ökologischen Aspekte. Ein wichtiger Punkt, welcher gemäss Vollzugshilfe nicht berücksichtigt wird, ist die Häufigkeit von Sunkereignissen und damit das kumulierte Stranden von Fischen über eine längere Zeit in den Bereichen mit grossen trockenfallenden Flächen. Um diese Lücke zu einem Gesamtbild bei der Beurteilung zu schliessen, hat Hydra eine gutachterliche Bewertung vorgenommen [9].

Die Häufigkeit von Schwallereignissen (in Kombination mit den trockenfallenden Flächen und den hohen Pegelrückgängen) wird wie erwähnt nicht durch die Auswertung gemäss Vollzugshilfe abgedeckt. Gerade während der larvalen Phase dürften sich die Verluste mit vielen Schwall-Sunk Ereignissen aufsummieren.

Litzirüti

Die Resultate gemäss Vollzugshilfe erreichen die F2* Bewertungen «mässig» bis «schlecht». Die schlechteste Bewertung betrifft die empfindlichste Zeit der Forellen, nämlich die Larvalphase. Diese Teilbewertung muss in der Gesamtbeurteilung stark gewichtet werden.

Langwies

Die Resultate gemäss Vollzugshilfe erreichen die F2* Bewertungen grundsätzlich ein «gut» bis «sehr gut». Während der Larvalphase werden die Pegeländerungsraten mit «unbefriedigend» bewertet. Auch wenn die insgesamt trockenfallenden Flächen relativ gering sind, so ergibt sich ein regelmässig trockenfallender Spülsaum, an dem Fischlarven stranden können. Durch die hohe Frequenz des Trockenfallens wertet Hydra die Bewertung gemäss Vollzugshilfe ab.

4.2.3 F3* – Laichareale

Laichflächenkartierung

Bei der Kartierung der potentiellen Laichsubstrate in der Plessur durch Hydra AG wurde eine Fläche von 2'831 m² potentielle Laichsubstrate erfasst. Davon hat die Hydra AG 1'009 m² als gut geeignet und 1'822 m² als potentiell geeignet eingestuft. Eine Abwertung erfolgt durch zu hohe Fließgeschwindigkeiten oder zu geringen Wassertiefen. Ein grosser Teil der kartierten Laichsubstratflächen liegen unterhalb von Pradapunt und damit ausserhalb des Projektperimeters.

Bei der Kartierung der Laichgruben wurden im gesamten kartierten Bereich 40 Laichgruben gefunden. Da Laichgruben nur über eine begrenzte Zeit sichtbar sind, ist davon auszugehen, dass die effektive Anzahl an Laichgruben höher sein dürfte.

Abschnitt	Laichsubstrat			Laichgruben
	Geeignet [m ²]	Möglicherweise geeignet [m ²]	Gesamt [m ²]	Anzahl
oberhalb Litzirüti (Restwasserstrecke und Strecke bis Arosa)*	7	1'057	1'064	17
Langwies bis Litzirüti (Schwall-Sunk)	31	42	73	0
Pradapunt bis Langwies (Schwall-Sunk)	69	272	341	3
Mündung Alpenrhein bis Pradapunt *	902	451	1'353	20
Gesamt (Mündung Alpenrhein bis Arosa)	1'009	1'822	2'831	40

Tab. 4.5 Laichhabitatflächen und Laichgruben gemäss [11]
* Strecken ausserhalb des Projektperimeters.

Im Projektperimeter ist grundsätzlich Laichsubstrat vorhanden. In der unteren Strecke zwischen Pradapunt und Langwies gibt es Abschnitte mit geeignetem Substrat, im oberen Bereich bei der Mündung des Sapünerbachs auch mit optimalem Substrat, welches zumindest teilweise nachweislich durch Forellen genutzt wird (3 Laichgruben). Oberhalb der Sapünerbachmündung und damit in der relativ steilen Schwall-Sunk Strecke, mit morphologisch bedingt gröberem Substrat, gibt es nur noch lokal Laichsubstrat. Hydra AG geht davon aus, dass in den steileren Bereichen der Plessur bei natürlichen Hochwassereignissen in den Sommermonaten potentielles Laichsubstrat umgelagert werden kann (Beilage 2). Durch die Seitengewässer wird jedoch bei Hochwassereignissen auch wieder neues Substrat eingelagert. Damit ist diese Materialumlagerung im Feld auch kaum zu erkennen.

Die grössten Laichflächen finden sich in den Restwasserstrecken zwischen Chur Sand und Pradapunt. Die Gewässerneigung ist in diesem Bericht mit 2 bis 2.5 % relativ moderat und die Morphologie entsprechend gut geeignet. Die Schwall-Sunk Strecke zwischen Litzirüti und Pradapunt ist dagegen relativ steil und das Geschiebe entsprechend gröber und als Laichsubstrat weniger geeignet.



Abb. 4.20 Kartierte potentielle Laichflächen im unteren Projektperimeter an der Plessur zwischen Lünen bis Langwies. Quelle: [11] (bearbeitet).

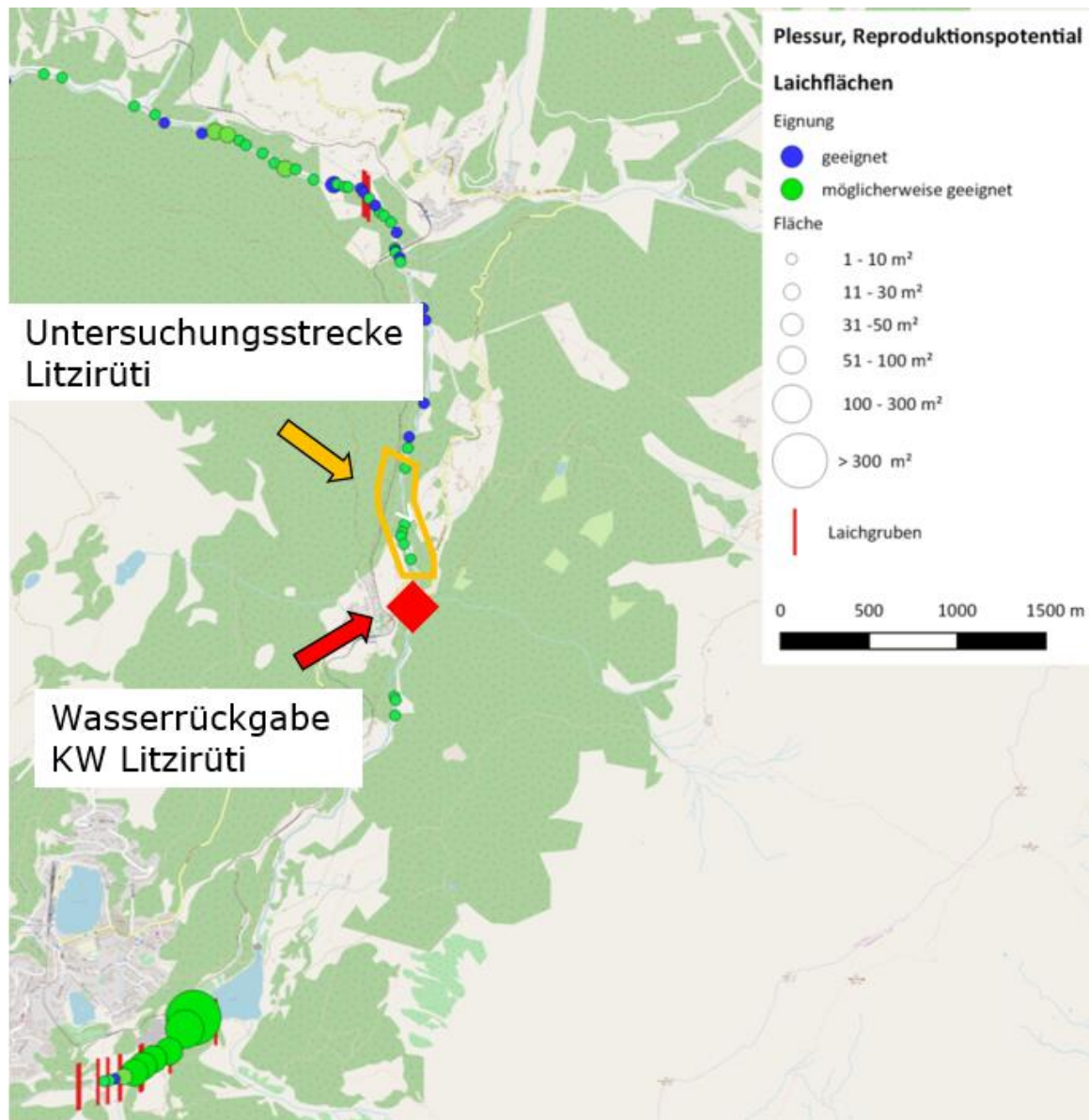


Abb. 4.21 Kartierte potentielle Laichflächen im oberen Projektperimeter an der Plessur zwischen Langwies bis Arosa, Quelle: [11] (bearbeitet).

Brutboxenversuche

Die Ergebnisse der Brutboxenversuche von der Hydra AG in der Plessur zeigen, dass die natürliche Reproduktion in der Plessur grundsätzlich funktionieren kann. Zwischen den einzelnen Untersuchungsstellen gab es jedoch grosse Unterschiede hinsichtlich Schlupferfolg (siehe Abb. 4.22). Die Resultate der Brutboxenversuche sind in Beilage 2 detailliert beschrieben, nachfolgend sind nur die wichtigsten Erkenntnisse aufgelistet:

Die Untersuchungsstellen in Meiersboden und Lünen (Restwasserstrecken) zeigen mit einem Schlupferfolg um 98% die besten Ergebnisse. Bei Langwies waren dagegen nur 49% der Dottersacklarven bei der Bergung lebend. Eine Box war stark sedimen-

tiert, eine weitere war durch die starke Strömung, mit entsprechender Kiesumlagerung, beeinträchtigt. Dagegen wies die dritte Box mit einem Schlupferfolg von 93% gute Ergebnisse aus. In einigen Brutboxen wurden grosse Mengen an organischem und anorganischem Feinmaterial gefunden, was vermutlich zur mechanischen Schädigung der Brut geführt hat. Der Feinmaterialeintrag schwankte jedoch stark, kleinräumig zwischen den verschiedenen Expositionsstellen. Allgemein war der starke Algenbewuchs auffällig, was auf einen erhöhten Nährstoffeintrag der Kläranlage Langwies oder Arosa (möglicherweise durch eine Überlastung der Kläranlage während der Wintersaison) hinweisen könnte.

Bei Litzirüti haben zwischen 11% und 91% und im Schnitt 61% der Brütlinge überlebt. Die mittelmässige Schlupf- bzw. Überlebensrate dürfte im Zusammenhang mit der starken Strömung, und entsprechender Kiesumlagerung, stehen (eine Box war halb ausgegraben). Vermutlich ist beim Standort Litzirüti mit einer generellen stärkeren Mobilität der Kiesfraktionen zu rechnen. Bei dieser Untersuchungsstrecke war die Entwicklung der Larven am weitesten fortgeschritten, was auf die relativ warme Wassertemperatur des Stausees Isel mit relativ konstanten 4 °C zurückzuführen sein dürfte.

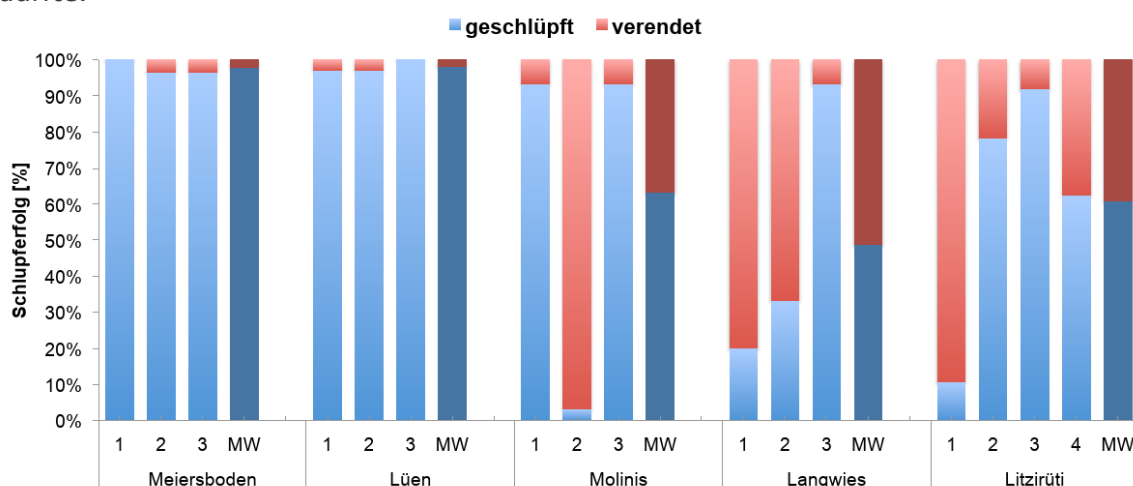


Abb. 4.22 Schlupferfolg befruchteter Bachforelleneier, die in der Plessur exponiert wurden.
Legende: 1, 2, 3: Nummer der Brutboxen, MW: Mittelwert
Quelle: Hydra AG 2017, Beilage 2,

Der Erfolg der Reproduktion hängt jedoch von mehreren Faktoren wie den hydraulischen Verhältnissen, Wasserstandsschwankungen, dem Eintrag von Feststoffen und organischem Material, In- und Exfiltration von Grundwasser sowie der Wassertemperatur ab. Insgesamt zeigen die Brutboxenversuche gewisse Beeinträchtigungen an, jedoch geht Hydra AG davon aus, dass der Laicherfolg bei ausreichend Laichgruben zum Erhalt einer Population ausreicht [7].

Geschiebefärbversuche

Die Kieseinfärbungen während des Schwallversuchs vom 9. bis 13. März 2015 haben gezeigt, dass durch das Kraftwerk Litzirüti verursachte Schwallereignisse bei Niedrigwasserverhältnissen in den drei Untersuchungsstrecken Litzirüti, Langwies und Molinis nur zu sehr geringen Geschiebebewegungen führen (siehe dazu die Kurzdokumentation zu den Kiesfärbversuchen in Beilage 8). Einzig beim sehr feinen tonig/sandigen Material sowie beim kiesigen Material konnte vereinzelt Bewegung festgestellt werden (Beilage 2). Es muss berücksichtigt werden, dass die eingefärbten Flächen

nicht dort liegen, wo der effektive Laich abgelegt wird. Der Laich dürfte im dauerbettezten Bereich liegen, wo die Schubspannung bei Schwall höher sein dürfte als bei den eingefärbten Flächen.

Zwischen den Aufnahmen in den 3 Untersuchungsstrecken konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Basierend auf den Feldversuchen kann somit gefolgert werden, dass zumindest bei Niedrigwasserverhältnissen eine grossflächige Mobilisierung von Laichsubstrat verursacht durch den Schwallbetrieb beim Kraftwerk Litzirüti ausgeschlossen werden kann. Nicht ausgeschlossen ist jedoch, dass bei höheren natürlichen Abflüssen und gleichzeitig stattfindenden Volllastereignissen laichrelevanter Kies an exponierten Stellen mobilisiert werden könnte und somit potentiell Laichgruben durch den Schwallbetrieb geschädigt werden könnten. Mehr Aufschluss dazu können die Modellierungsergebnisse geben, bei welchen eine Mobilisierung flächendeckend und bei unterschiedlichen Abflüssen evaluiert wird.



Abb. 4.23 Dokumentation Geschiebebewegung am Standort Litzirüti 4. Aufnahme 9. März 2015, links zu Beginn der Versuchswochen und am Ende der Versuchswochen am 13. März 2015, rechts. Die Kreise kennzeichnen Bereiche, in denen während den Versuchen Geschiebe mobilisiert wurde. Die sich entsprechenden Bereiche wurden mit derselben Kreisfarbe markiert.

Indikatorbewertung

Für eine erfolgreiche natürliche Reproduktion sind verschiedene Faktoren massgebend. Namentlich sind dies insbesondere die Morphologie (bestehend aus natürlichen morphologischen Strukturen oder Instream-Massnahmen), das Geschiebe (inkl. Kolmation, Trübung) sowie die vorherrschende Hydrologie. Von den genannten Faktoren ist jedoch nur letztere direkt durch eine Schwall-Sunk Sanierung beeinflussbar. Es wird daher darauf hingewiesen, dass nur anhand einer Kombination der genannten Faktoren eine erfolgreiche natürliche Reproduktion in der Plessur ermöglicht werden kann. So kann auch bei einer optimalen Hydrologie kein erfolgreiches Laichen stattfinden, wenn das notwendige Laichsubstrat nicht zur Verfügung steht.

Hydrologische Kenngrössen

Die Modellierungen werden, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, für die Sunk- und Schwallabflüsse im Ist-Zustand wie auch für die Abflüsse im hydrologischen Vergleichszustand durchgeführt und verglichen. Die entsprechenden Abflüsse für die relevante Periode von anfangs Oktober bis Ende April sind in Tab. 4.6 aufgelistet.

Daraus wird ersichtlich, dass die heutigen Sunkabflüsse in der Schwall-Sunk Strecke bei Litzirüti deutlich unterhalb den Mindestabflüssen im Vergleichszustand liegen.

Durch den Zufluss des Sapünerbachs, ist bei Langwies die Abweichung zum Vergleichszustand bereits wesentlich kleiner. Auch die Schwallabflüssen sind im Ist-Zustand deutlich höher als die Maximalabflüsse im Vergleichszustand.

Messgrösse	Litzirüti	Langwies
Sunkabfluss Ist-Zustand [m ³ /s]	0.16	0.74
Referenzabfluss (5%-Quantil) [m ³ /s]	0.54	0.94
<i>Differenz zwischen Ist- und Vergleichszustand (Sunk)</i> <i>[m³/s]</i>	<i>0.38</i>	<i>0.20</i>
Schwallabfluss Ist-Zustand [m ³ /s]*	3.51	5.33
Referenzabfluss (95%-Quantil) [m ³ /s]	2.59	4.48
<i>Differenz zwischen Ist- und Vergleichszustand (Schwall)</i> <i>[m³/s]</i>	<i>-0.92</i>	<i>-0.85</i>
<i>Installierte Ausbauwassermenge [m³/s]</i>	<i>3.00</i>	<i>3.00</i>

Tab. 4.6 **Verwendete Schwall-Sunk Abflüsse [m³/s] für den Ist- und den Vergleichszustand für die Periode von anfangs Oktober bis Ende April sowie Auflistung der absoluten Differenzen zwischen Ist- und Vergleichszustand und installierte Ausbauwassermenge für die 2 Untersuchungsstrecken.**
*** Die Hochwassertage wurden manuell entfernt und nicht das 95% Quantil verwendet.**

Habitatmodellierungen

Mit Habitatmodellierungen wird hier die Modellierung der Laichareale (geeignete Habitate fürs Laichgeschäft) verstanden. Anhand der Software CASiMiR-Fish2d wurden für jeweils verschiedene stationäre Abflüsse die hydrologisch geeigneten Laichareale für Bachforellen bestimmt. Unter hydrologisch geeigneten Laicharealen werden diejenigen Standorte verstanden, welche aufgrund der Fliessgeschwindigkeit sowie der Wassertiefe für ein Laichen geeignet sind. Weitere Faktoren wie die Korngrössenverteilung oder mögliche Unterstände (Totholz, Vegetation, etc.) werden dabei nicht berücksichtigt. Aufgrund dieser Vernachlässigung können die berechneten Flächen der geeigneten Laichareale (WUA = weighted usable area) nicht als absolute Werte betrachtet werden und überschätzen die effektiven geeigneten Flächen meist deutlich. Es wird dadurch jedoch sichergestellt, dass nur diejenigen Einflüsse auf die Laichareale berücksichtigt werden, welche auch durch eine Schwalldämpfung oder Sunkerhöhung angepasst werden können. Die effektive Bewertung des Indikators basiert schliesslich auf einem Vergleich der geeigneten Laichareale im Ist-Zustand mit dem «natürlichen» Zustand, wodurch die Überschätzung der effektiven Laichareale eliminiert wird.

Abb. 4.24 zeigt beispielhaft für die Untersuchungsstrecke Litzirüti die mittels 2D-Modell berechneten, hydrologisch geeigneten Laichareale für die Bachforelle für verschiedene Abflüsse. Allgemein kann jedoch festgehalten werden, dass bei hohen Abflüssen die geeigneten Flächen nur noch an Ufernähe vorkommen.

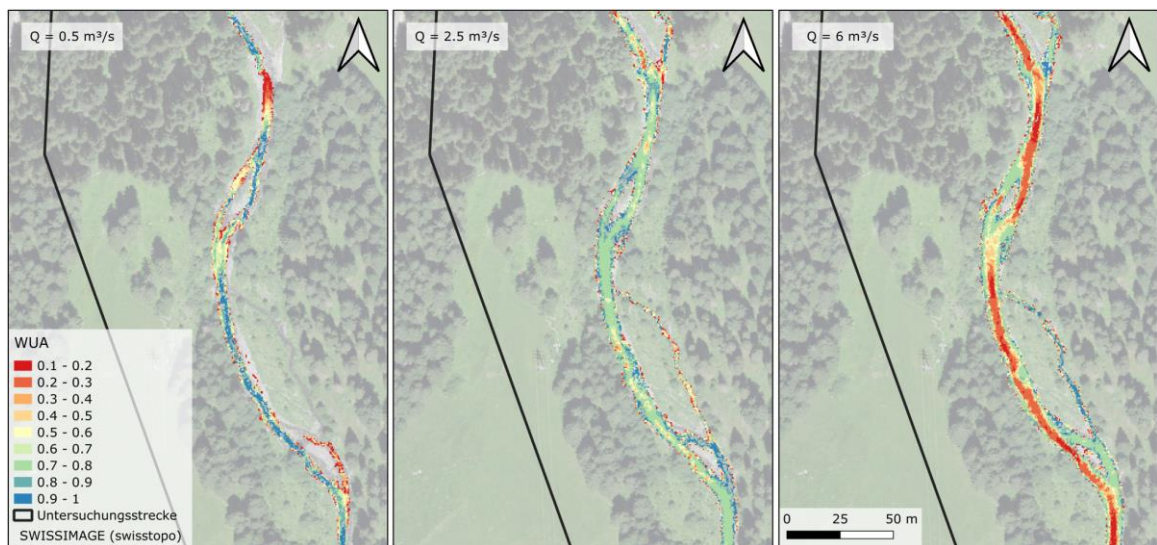


Abb. 4.24 Beispiel der berechneten, hydrologisch geeigneten Laicharealen in der Untersuchungsstrecke Litzirüti anhand der Abflusswerte 0.5 m³/s, 2.5 m³/s und 6 m³/s. Quelle Hintergrundkarte: Swisstopo.

Flächen, welche bei Schwall erodieren (Annahme: Sohlschubspannung > 40 N/m² für 2D-Modelle, resp. Fließgeschwindigkeiten > 2 m/s für 1D-Modell) sowie Flächen, welche bei Sunk trockenfallen, werden daher für sämtliche berechneten, hydrologisch geeigneten Laichareale (vgl. Abb. 4.24) der betrachteten stationären Abflüsse für die Periode der Embryonalentwicklung entfernt. Anhand dieser Resultate können je Abfluss während der Laichperiode die resultierende WUA für den heutigen Ist-Zustand wie auch für den natürlichen Abfluss bestimmt werden.

Die Bewertung erfolgt anhand eines Vergleiches der geeigneten Flächen im heutigen Zustand mit der geeigneten Fläche im «natürlichen» Zustand. Abweichend zur VZH Schwall-Sunk [1] wird hierbei die geeignete Fläche für sämtliche Abflüsse mit den korrespondierenden Laichflächen im «natürlichen» Zustand verglichen und nicht ein Vergleich für einen bestimmten Abfluss durchgeführt. Der Flächenverlust entspricht daher der grauen Fläche in Abb. 4.25). Verluste entstehen über die ganze Laichperiode von Oktober bis April durch das Trockenfallen und Erodieren von Laichflächen während des Laichgeschäfts und/oder während der Laichentwicklung. Bei Litzirüti betragen die Flächenverlust 34% und bei Langwies 10%.

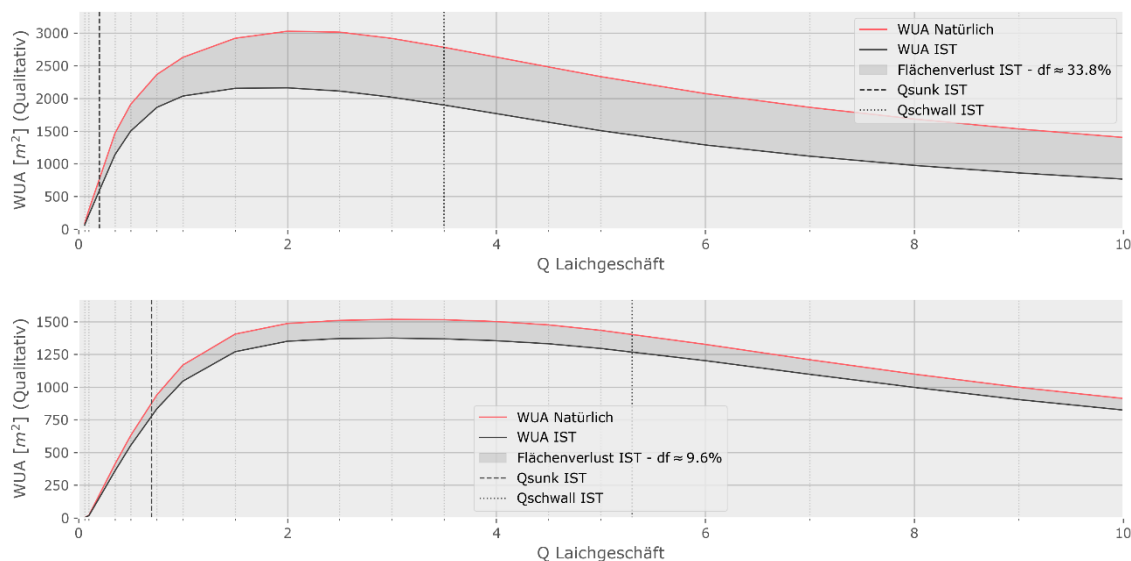


Abb. 4.25 Bewertung für den Indikator F3* für die Bachforelle in den Untersuchungsstrecken Litzirüti (oben) und Langwies (unten). Die graue Fläche zwischen den beiden Kurven stellt den Flächenverlust für sämtliche Abflüsse des Ist-Zustands gegenüber dem Vergleichszustand (natürlich) dar.

Bei der Untersuchungsstrecke Langwies sind die Differenzen zwischen den natürlichen Abflüssen und den IST-Abflüssen kleiner, wodurch auch die Flächenverluste kleiner sind. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Problematik des Trockenfallens ab Zufluss Sapünerbach stark abnimmt. Auf der anderen Seite bewirkt die durch die höheren Abflüsse potentiell erhöhte Erosion keine feststellbare Erhöhung der Flächenverluste.

Die Resultate zeigen in Tab. 4.7, dass ein leichtes Defizit aufgrund der Wasserrückgaben Litzirüti in der oberen Untersuchungsstrecken entsteht. Nach dem Zusammenfluss mit dem Sapünerbach und weiteren kleineren Seitengewässer ist der Zustand bereits wieder «sehr gut».

Fischart (relevanter Zeitraum)	Litzirüti	Langwies
Bachforelle (Oktober bis Ende April)	34	10

Tab. 4.7 Bewertung Indikator F3* (Laichflächenverlust in [%]) für die Bachforelle.

Der Indikator F3* kann sowohl durch eine Schwallreduktion als auch durch eine Sunkerhöhung verbessert werden. Dadurch können die erodierten Flächen resp. die trockenfallenden Flächen reduziert und die hydraulisch geeigneten Laichareale beeinflusst werden. Abb. 4.26 zeigt bei der Untersuchungsstrecke Litzirüti die Fläche der hydraulisch geeigneten Laichareale in Abhängigkeit des Schwall- und Sunkabflusses. Damit wird deutlich, dass mit den Sunkabflüssen grosse Substratflächen verloren gehen. Das heisst, dass der Sunk die grösseren Defizite gegenüber den Schwall-Ereignissen verursacht. Im Umkehrschluss wird auch klar, dass bereits mit kleinen Sunkanhebungen eine relative grosse Wirkung entfaltet wird. Wie auch die Kiesfärbeversuche zeigen, bestätigen die Modellierungsergebnisse, dass eine potentielle Zerstörung der Laichgruben bei Schwall allgemein möglich aber in den meisten Fällen wenig problematisch scheint. Jedoch dürften die hydraulischen Verhältnisse bei Litzirüti auch nur eine eingeschränkte Stabilität des Laichsubstrats zulassen. Möglicherweise

deutet dies auf eine generell stärkere Mobilität der Kiesfraktionen im Abschnitt Litzirüti-Langwies hin und damit auf eine natürlicherweise geringere Eignung des Laichsubstrats.

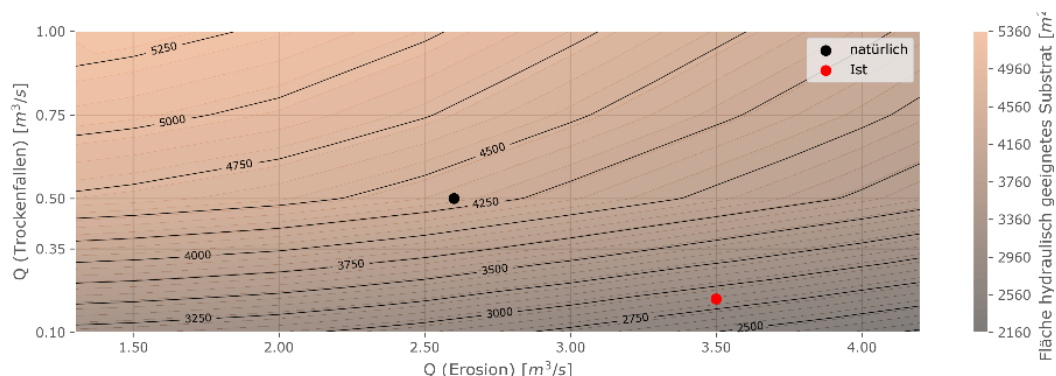


Abb. 4.26 **Hydraulisch geeignete Laichflächen in Abhängigkeit des Schwallabflusses (Q Erosion) und des Sunkabflusses (Q Trockenfallen) bei kraftwerksunbeeinflussten Abflussverhältnissen («natürlich»; schwarzer Punkt) und den heutigen Schwall-Sunk Verhältnissen bei Litzirüti (roter Punkt).**

Die Resultate des Indikators F3* sind aufgrund der Abhängigkeit von den Abflüssen stark abhängig von der Definition der Periode der Embryonalentwicklung zur Auswahl der Abflüsse. Natürlicherweise führt die im Frühjahr einsetzende Schneeschmelze zu höheren Abflüssen und damit zu einer erhöhten Erosion, welche nicht kraftwerksbedingt ist. Aus diesem Grund ist eine längere Periode im Frühling (länger als Ende April) aus Sicht HTU nicht sinnvoll, da im späteren Frühling höhere Abflüsse nicht berücksichtigt werden soll, da sie sonst den kraftwerksbedingten Schwall-Abfluss verfälschen.

Die verwendeten Abflussganglinien für den Ist-Zustand und die «natürliche» Situation sind in Abb. 4.27 dargestellt. Deutlich ersichtlich sind die hohen Abflussschwankungen im heutigen Zustand, welche im «natürlichen» Zustand nicht auftreten.

Es wird - gemäss dem heutigen Wissenstand zum Laichverhalten - davon ausgegangen, dass sowohl die Wahl der geeigneten Laichareale (Suchphase) als auch der Laichvorgang mehrere Stunden bis Tage [18] dauert. Aus diesen Überlegungen muss davon ausgegangen werden, dass ein Rogner den Laichprozess erst dann beginnt, wenn die Abflussverhältnisse über eine längere Zeit bezüglich sämtlicher Bedingungen erfüllt werden. Die Dauer der geeigneten Abflüsse wird mit der Methode gemäss VZH Schwall-Sunk [1] nicht berücksichtigt. Gemäss Methodik der VZH Schwall-Sunk [1] wird lediglich einen statischen Vergleich der Bedingungen bei den vorherrschenden Abflüssen durchgeführt ohne die Dauer dieser Abflusszustände mitzubetrachten.

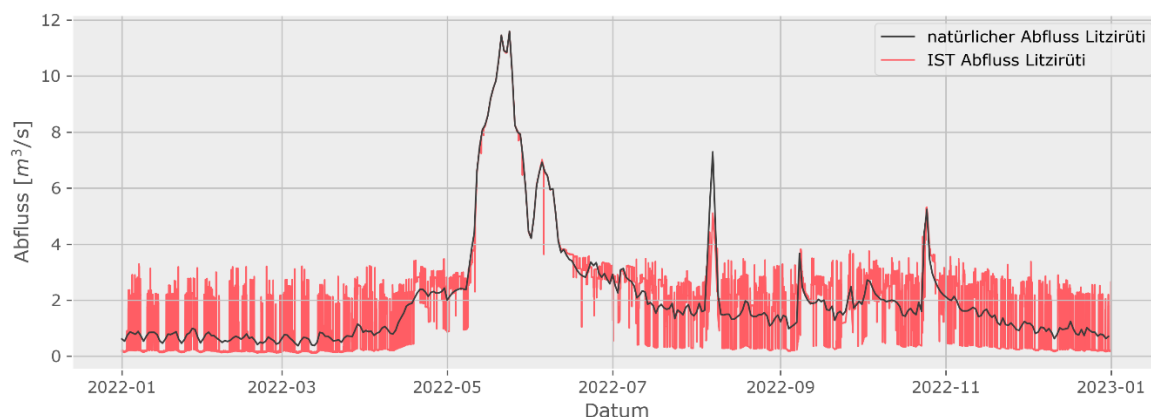


Abb. 4.27 **Verwendete Abflussganglinien für den Ist-Zustand und den «natürlichen» Zustand für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für einen Ausschnitt im Jahr 2022.**

Beurteilung Indikator

Litzirüti

Bei Litzirüti wurden keine Laichgruben gefunden. Geeignete und potentiell geeignete Laichflächen sind jedoch in geringem Masse vorhanden. Eine natürliche Reproduktion ohne hydrologische Beeinträchtigung durch Schwall-Sunk scheint theoretisch möglich zu sein, wie auch die Brutboxenversuche gezeigt haben. Dies haben auch die Abfischungen im Sommer 2022 gezeigt. Sowohl in der Restwasserstrecke als auch in der Schwallstrecke wäre eine natürliche Reproduktion auf tiefem Niveau möglich. Trotz nur mässigem Defizit sind für den Indikator entsprechende Ziele zu formulieren, um die Defizite zu beheben.

Langwies

Zwischen der Mündung des Frauentobelbachs und des Sapünerbachs liegen relativ viele möglicherweise geeignete Laichsubstratflächen, welche auch teilweise von den Bachforellen genutzt werden. So wurden 3 Laichgruben festgestellt. Dank dem Zufluss des Sapünerbachs sind auch die hydrologischen Bedingungen weitaus besser als gleich unterhalb der Wasserrückgabe des KWs Litzirüti. Gemäss den Modellierungen liegen bei der Untersuchungsstrecke keine Beeinträchtigungen vor.

Gutachterliche Bewertung F3* durch Hydra

Die im Untersuchungsabschnitt insgesamt verfügbare, geeignete Laichfläche wird gemäss Vollzugshilfe nicht berücksichtigt. Bei einem Überschuss an vorhandenen Laichflächen fällt ein Verlust durch Schwall-Sunk weniger ins Gewicht als bei einem Mangel.

Für die Eiablage brauchen Forellen allgemein stabile Abflussphasen. Es mehren sich die Anzeichen, dass Schwall-Sunk diese stabile Abflussphasen verhindern, mit der Folge, dass die Forellen irgendwo, aber nicht an einem guten Ort laichen. Dazu kann die Kolmation Kiesflächen mit geeignete Korngrössen verhärten, sodass keine Laichablage möglich ist.

Diese drei Faktoren werden in der Vollzugshilfe nicht berücksichtigt. Hydra hat diese jedoch bei seiner gutachterlichen Bewertung einfließen lassen.

Litzirüti

Bei Litzirüti finden sich nur wenige geeignete Laichflächen. Daher ist der Schwall-Sunk bedingte Flächenverlust gegenüber der Bewertung gemäss Vollzugshilfe stärker zu berücksichtigen. Dazu führt der Schwall-Sunk Betrieb höchstwahrscheinlich zu einer Beeinträchtigung der Standortwahl der Forellen. Diese beiden Aspekte führen zu einer gutachterlichen leichten Abwertung gegenüber der Bewertung nach Vollzugshilfe. Hydra geht von einer Abwertung von «mässig» gemäss Vollzugshilfe auf ein «unbefriedigend» bis «schlecht» aus.

Langwies

Bei Langwies gibt es ausreichend potentielle Laichsubstratflächen für eine selbsterhaltende Population. Jedoch wird das erschwerte Auffinden von geeigneten Laichflächen nicht berücksichtigt. Bei der Abwägung dieser beiden Aspekte überwiegt der negative Einfluss der Auffindbarkeit der Laichflächen auf die Standortwahl der Forellen und es erfolgt eine gutachterliche leichte Abwertung gegenüber der Bewertung nach Vollzugshilfe von einem «gut» zu einem «mässig» bis «gut».

4.2.4 F4* – Jungfischvorkommen

Die Resultate zum Jungfischvorkommen werden detailliert im Bericht von Hydra AG erläutert (siehe Beilage 2). Nachfolgend werden nur die grundlegenden Erkenntnisse wiedergegeben. Die wichtigste Grundlage für die Indikatorenbewertung stellen die Sömmerlingsbefischungen von Hydra im Sommer 2016 dar (siehe dazu Tab. 4.8). Es werden jedoch weitere Fangzahlen von weiteren Befischungen für die Einordnung beigezogen. Gerade die Abfischungen vom Juli 2022 geben gute Hinweise zum Einfluss vom Betriebsregimewechsel im Jahr 2017.

Sömmerlingsbefischungen 2016 durch Hydra

Sömmerlingsbesätze unterhalb Litzirüti fanden 2015 lediglich im Sapünerbach statt. Ansonsten fand zwischen 2015 und Herbst 2016 gemäss den Aussagen des Kantons kein Besatz statt. Daher stammen alle gefangenen Sömmerlinge vom Sommer 2016 und die 1+-Forellen aus Naturverlaichung.

Befischungsstrecke	Gefangene Bachforellen [Anzahl Fische]				Sömmerlinge pro 100 m Uferlänge
	Sömmerlinge 1+	2+	3+		
Litzirüti	0	4	10	2	0
Hauptgerinne	0	4	3	1	
Nebengerinne	0	0	7	1	
Langwies	16	8	0	1	10
Molinis	42	0	0	2	30
Lüen	1	5	2	4	0,3
Meiersboden	4	3	7	0	2

Tab. 4.8 Ergebnisse der Sömmerlingsbefischung in der Plessur vom 1. September 2016. Sowohl die Sömmerlinge als auch die 1+ Fische stammen aus Naturverlaichung. Quelle: Hydra (siehe Beilage 2).

Untersuchungsstrecke Litzirüti

Das weitgehende Fehlen von Jungfischen bei der Untersuchungsstrecke Litzirüti kann einerseits auf den Mangel von grösseren geeigneten Laichhabitaten zurückzuführen

sein. Siehe dazu das Fehlen von Laichgruben in Kapitel 4.2.3 und Beilage 2. Hydra kommt im Bericht von 2023 zum Schluss [7], dass der Mangel an geeigneten Laichflächen nicht die primäre Ursache sein dürfte. Denn die Erfahrung bei anderen Gebirgsbächen wie bei der Moesa hat gezeigt, dass bereits sehr kleine genutzte Laichflächen, welche in der Plessur durchaus vorhanden sind, bereits zu hohen Brüttingsdichten führen können. Daher geht Hydra heute primär davon aus, dass das regelmässige Trockenfallen und Stranden von Jungfischen zu den niedrigen Zahlen an Jungfischen führt (Beilage 3).

Untersuchungsstrecke Langwies

In der Untersuchungsstrecke Langwies wurden 2016 10 Sömmerlinge auf 100 m Uferlänge gefangen. Auch dieses Ergebnis zeugt von einem schlechten Sömmerlingsbestand. Jedoch wurden bei Langwies auch 8 1+ Forellen gefangen, die im Jahr 2015 bereits als Brütling im Gewässer sein mussten und damit trotz einer hohen Mortalitätsrate beim Übergang vom Brütlings- zum Sömmerlingsstadium von ca. 90% überlebt haben. Unter diesem Aspekt ist es vorstellbar, dass in der Plessur die natürliche Reproduktion zumindest stellenweise (Oberhalb Stausee Isel, Langwies, Lünen, Meiersboden) und über längere Zeiträume funktioniert.

Wie bereits in Kapitel 3.4.1 erwähnt, gab es vor 2017 kaum Schwall-Sunk Betrieb, jedoch relativ häufige Abschaltungen und dadurch ebenfalls häufiges Trockenfallen. Möglicherweise auch diesem Grund wurden 2016 allgemein nur sehr wenige Jungfische nachgewiesen. Die höchste Fangdichte lag bei 30 Sömmerlingen auf 100 m Uferlänge bei Molinis. Gemäss der Einschätzung von Hydra können Werte von 100 Brütlinge auf 100 m Uferlänge als gut beurteilt werden. Somit sind alle Werte in der Plessur ausser bei Molinis als schlecht, bei Langwies und vor allem bei Litzirüti, wo kein einziger Sömmerling gefangen wurde, als sehr schlecht zu bewerten.

	Litzirüti	Langwies	Molinis	Lünen	Meiersboden
Gutachterliche Bewertung gemäss [11]	schlecht	schlecht	mässig	schlecht	schlecht

Tab. 4.9 Bewertung Indikator F4 gemäss dem Gutachten von Hydra [11].

Insgesamt kann der Erfolg der Naturverlaichungen in den Wintern 2014/15 und 2015/16 als sehr gering beurteilt werden. Hydra AG ging damals im Bericht von 2017 nicht davon aus, dass sich die Forellenpopulationen in der Plessur langfristig selbst erhalten können (Beilage 2).

Brütlingsbefischungen 2022

Im 2022 fand kein Besatz statt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass alle im 2022 gefangenen Brütlinge aus Naturverlaichung stammen. Bei den Brütlingsbefischungen im Juli 2022 wurden in der Untersuchungsstrecke Litzirüti 3 Brütlinge gefangen (siehe Abb. 4.28). Diese 3 Individuen stammen zwar gesichert aus natürlicher Reproduktion. Es kann aber nicht differenziert werden, ob die Naturverlaichung in der Restwasserstrecke (inkl. Verdriftung in die Schwallstrecke), in der Schwallstrecke selbst oder im Tjierbach stattgefunden hat. Es zeigt jedoch, dass die natürliche Reproduktion auf tiefem Niveau stattfinden kann. Weiter ist auffallend, dass durchaus Adulte in der Plessur in der Schwallstrecke überleben können und teilweise mehrere Jahre alt werden können, wie die gefangenen Adulten von über 20 cm Länge zeigen. Ob die Adulten aus Naturverlaichung oder aus Besatz stammen, ist nicht klar.

Es zeigt jedoch, dass, wenn die Jungfische die ersten Monate überleben, die längerfristigen Überlebenschancen intakt sind.

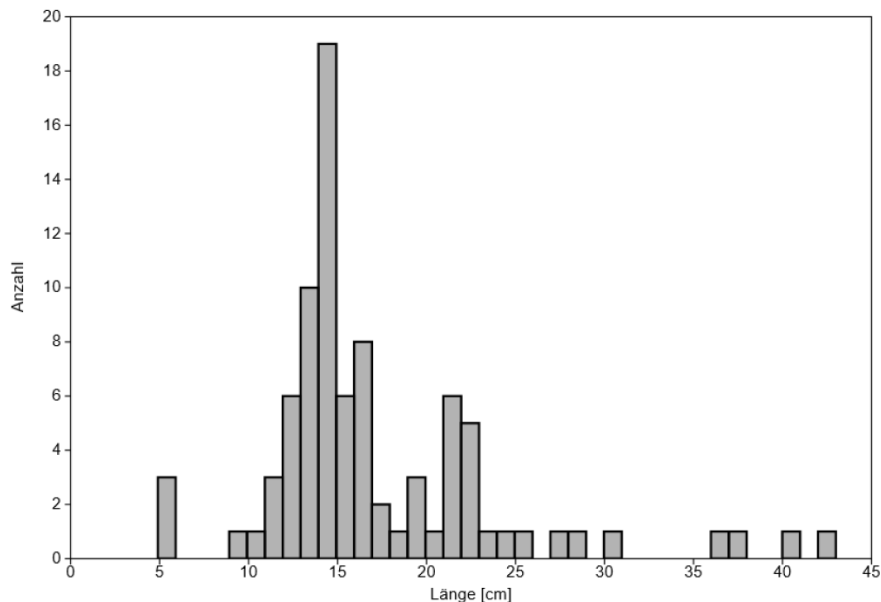


Abb. 4.28 Längen-Frequenzdiagramm von den Abfischungen vom 27. Juli 2022 in der Schwallstrecke bei Litzirüti. Quelle: [7].

In der Restwasserstrecke oberhalb der Wasserrückgabe wurden in Juli 2022 2 Brütlinge festgestellt (siehe Abb. 4.29). Jedoch wurde eine rund doppelt so hohe Fischbiomasse und eine deutlich höhere Fischdichte gegenüber der Schwallstrecke vorgefunden. Der Fischbestand in beiden Abfischungsstrecken (Restwasser- und Schwallstrecke) kann grundsätzlich als vergleichbar beurteilt werden.

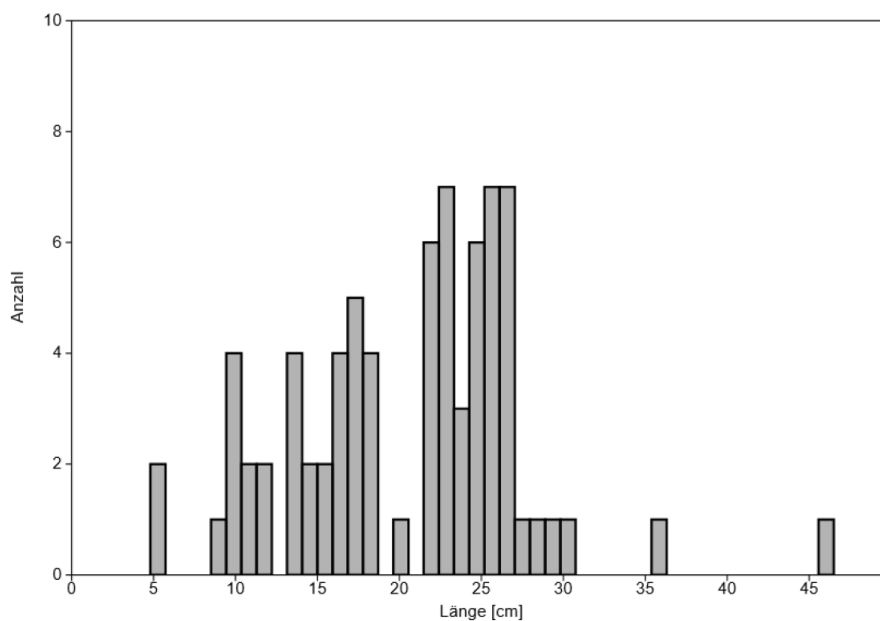


Abb. 4.29 Längen-Frequenzdiagramm von den Abfischungen vom 27. Juli 2022 in der Restwasserstrecke oberhalb Litzirüti. Quelle: [7].

Vergleich zu früheren Befischungen

Wie bereits erwähnt stehen von den Abfischungen, welche in den Jahren 1999 und 2022 im Auftrag des AJF durchgeführt wurden, Kennzahlen zur Verfügung. Während diesen Abfischungen wurden neben Jungfischen auch Adulte gefangen. Bei Sömmerlingsbefischungen werden primär die ufernahen Bereiche abgefischt. Die uferfernen Bereiche, in welchen eher die Adulten vorgefunden werden, wurden bei diesen Erhebungen nicht berücksichtigt. Der Bestand einer Fischpopulation wird dadurch nicht vollständig erfasst.

Abb. 4.30 zeigt die Vergleiche anhand der erhobenen Fischbiomasse in der Restwasserstrecke und in der Schwallstrecke. Auffallend ist, dass sich die Fischdichten in der Schwallstrecke (FSA 313) zwischen den Erhebungen von Februar 1999 und vom August 2022 kaum unterscheiden. Und dies obwohl sich wie bereits weiter oben beschrieben in den letzten Jahren einige gewichtige Veränderungen in der Plessur zuge tragen haben:

- Restwasserdotation seit 1. Februar 2020 mit mindestens 60 l/s mit positiven Auswirkungen auf die Fischbiologie
- Intermittierender Kraftwerkseinsatz je nach Strommarktsituation seit Januar 2017 mit negativen ökologischen Auswirkungen

Die Fischdichten in der Restwasserstrecke (FSA 312) sind erwartungsgemäss leicht höher als in der Schwallstrecke (FSA 313). Ein wesentlicher Unterschied kann jedoch nicht festgestellt werden. Dies dürfte auch damit zusammenhängen, dass noch nicht allzu lange Restwasser abgegeben wird und sich der Fischbestand noch nicht lange entwickeln konnte. Es gilt jedoch auch zu bedenken, dass das Ziel der Restwassersanierung eine Verbesserung der Situation hinsichtlich Makrozoobenthos war und weniger hinsichtlich der Fische.

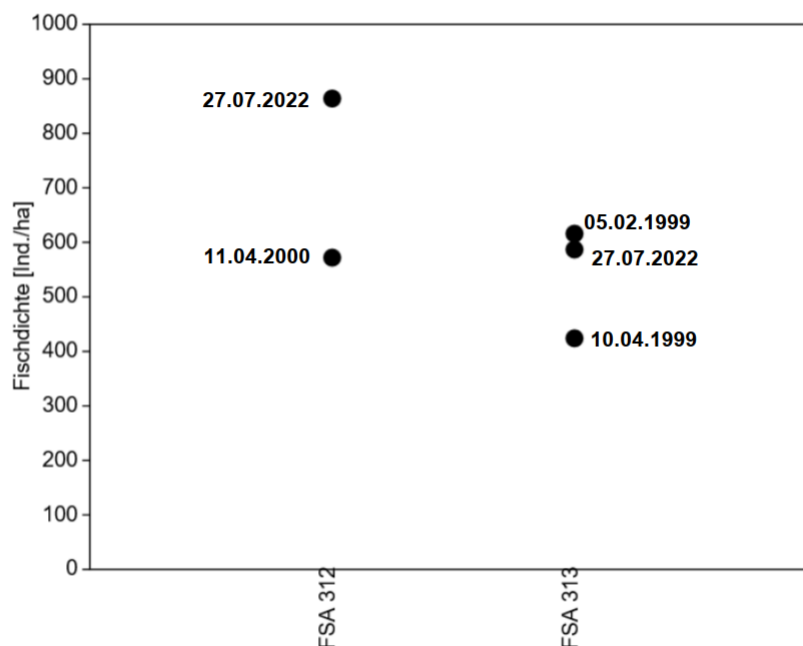


Abb. 4.30 Vergleich der erhobenen Fischbiomasse [kg/ha] in der Restwasserstrecke (FSA 312) und in der Schwallstrecke bei Litzirüti (FSA 313). Quelle: AJF [4].

Wie auch die Indikatoren F3* und F2* aufzeigen, ist das Jungfischvorkommen durch Erosion und Trockenfallen von geeignetem Laichsubstrat beeinträchtigt. Bei einer erfolgreichen Eientwicklung besteht zudem anschliessend ein hohes Risiko bezüglich des Strandens der larvalen Fische. Die geringen Brüttingsdichten in der gesamten Schwall-Sunk Strecke sind ein Indiz dafür, dass der Schwall-Sunk Betrieb sich negativ auf die natürliche Reproduktion auswirkt. Jedoch zeigen die tiefen Brüttingsdichten in der Restwasserstrecke auch, dass Schwall-Sunk nicht die einzige Ursache für die tiefen Vorkommen sein kann.

4.2.5 F6 – Habitateignung Fische

Die Habitatmodellierungen mit der Software CASiMiR-Fish wurden, wie in Kapitel 4.1.5 beschrieben, für Jungfische und Adulte bei Abflüssen in den Monaten Mai, August, November und Februar, repräsentativ für die vier Jahreszeiten durchgeführt. Die berechneten Flächenänderungen gegenüber dem Vergleichszustand sind in Abb. 4.31 dargestellt und gemäss VZH Schwall-Sunk [1] bewertet.

Hydrologische Kenngrössen

Die absoluten Werte sind der Tab. 4.10 zu entnehmen. Aufgrund der verwendeten Methodik bei der Festlegung des Vergleichszustands weisen die berechneten Abflussquantile teilweise hohe Unsicherheiten auf.

Messgrösse	Litzirüti	Langwies
Sunk 40%-Quantil Februar IST	0.19	0.79
Sunk 40%-Quantil Februar natürlich	0.65	1.13
Sunk 40%-Quantil Mai IST	3.78	7.00
Sunk 40%-Quantil Mai natürlich	3.50	6.06
Sunk 40%-Quantil August IST	0.81	2.83
Sunk 40%-Quantil August natürlich	1.96	3.39
Sunk 40%-Quantil November IST	0.36	1.20
Sunk 40%-Quantil November natürlich	0.93	2.75
Schwall 60%-Quantil Februar IST	2.71	3.33
Schwall 60%-Quantil Februar natürlich	0.74	1.29
Schwall 60%-Quantil Mai IST	6.81	10.06
Schwall 60%-Quantil Mai natürlich	5.78	10.00
Schwall 60%-Quantil August IST	3.46	5.32
Schwall 60%-Quantil August natürlich	2.88	4.98
Schwall 60%-Quantil November IST	2.96	3.84
Schwall 60%-Quantil November natürlich	1.74	3.01

Tab. 4.10 **Verwendete Schwall-Sunk Abflüsse [m³/s] für die Grundlage der Bewertung des Indikators F6. Ausgewertet wurden die Daten von Januar 2017 bis Februar 2023.**

Allgemein kann festgehalten werden, dass gemäss Methodik nach VZH Schwall-Sunk [1] relativ geringe Habitatdefizite, verursacht durch Schwall-Sunk, in den Untersuchungsstrecken berechnet wurden.

Bei Litzirüti bestehen die Defizite für Adulte beim Sunk vor allem im Winter («unbefriedigend») und etwas weniger ausgeprägt im Herbst («mässig»). Beim Schwall bestehen bei Litzirüti keine Defizite. Bei den Juvenilen gibt es keine Defizite.

Bei Langwies werden übers ganze Jahr weder bei Schwall noch bei Sunk Defizite festgestellt. Der Einfluss der Wasserkraft ist bei dieser Untersuchungsstrecke allgemein und daher auch gegenüber dem natürlichen Zustand tiefer.

	Litzirueti	Langwies
F6 juvenil sunk (Jahr)	-16	-37
F6 juvenil sunk (Mai)	2	-2
F6 juvenil sunk (Aug)	-24	-10
F6 juvenil sunk (Nov)	-11	-85
F6 juvenil schwall (Jahr)	11	11
F6 juvenil schwall (Mai)	2	0
F6 juvenil schwall (Aug)	3	2
F6 juvenil schwall (Nov)	13	9
F6 adult sunk (Jahr)	33	-2
F6 adult sunk (Feb)	39	4
F6 adult sunk (Mai)	1	9
F6 adult sunk (Aug)	10	-2
F6 adult sunk (Nov)	22	-6
F6 adult schwall (Jahr)	2	7
F6 adult schwall (Feb)	-12	9
F6 adult schwall (Mai)	4	0
F6 adult schwall (Aug)	2	3
F6 adult schwall (Nov)	0	3

Abb. 4.31 Resultate Indikator F6 der heutigen Situation für Forellen.

Negative Werte führen gemäss den Modellierungen zu einer Verbesserung der IST-Situation gegenüber dem natürlichen Zustand. So ist beispielsweise der Sunk bei Litzirüti im August mit $0.81 \text{ m}^3/\text{s}$ deutlich tiefer als im natürlichen Zustand mit $1.96 \text{ m}^3/\text{s}$, was für juvenile Bachforellen zu einer Verbesserung führt (-24 %). Dies liegt daran, dass die in den Fuzzy-Sets hinterlegte, optimale Fliessgeschwindigkeit mit weniger Wasser zu besseren Bedingungen für die noch schwimmschwachen Juvenilen führt.

Grundsätzlich gibt die Bewertung der Habitateignung Hinweise darauf, welche hydrologischen Kenngrössen der Abflussganglinie (Schwall- oder Sunkabfluss) zu Defiziten bei den Habitaten der einzelnen Altersstadien der Fische führen. Zu erwähnen gilt, dass kleinräumige Habitatstrukturen wie Totholz oder ähnliche Unterstände in den Untersuchungen, wie sie im oberen Abschnitt der Plessur in grossem Umfang vorkommen, nicht berücksichtigt wurden. Diese Strukturen führen grundsätzlich zu einer Verbesserung der Habitate. Absolut betrachtet sind daher die modellierten Ergebnisse sowohl für den «natürlichen» wie für den heutigen Zustand tendenziell zu

schlecht bewertet. Die hier betrachteten Ergebnisse sind jedoch immer ein Vergleich zwischen dem heutigen und dem «natürlichen» Zustand, wodurch davon ausgegangen wird, dass dieser Aspekt nicht von Bedeutung ist.

Die Methodik des Indikators F6 ist sehr statisch und beurteilt Schwall- und Sunkabflüsse separat. Eine der Hauptbeeinträchtigungen von Schwall-Sunk ist jedoch der sehr schnelle und häufige Wechsel zwischen diesen zwei Zuständen. Für Fische ist es oftmals sehr schwierig, in so kurzer Zeit und mehrmals täglich vom «Schwall- in das Sunk-Habitat» zu wechseln. Dieser Effekt deckt die Pegelrückgangsraten bei F2* grösstenteils ab, wird sie gedämpft, bleibt auch mehr Zeit für diesen Habitatwechsel. Trotzdem müssen die Fische den Habitatwechsel weiterhin vollziehen, was dazu führt, dass diese Habitate gegenüber Referenzhabitaten ohne Schwall-Sunk stark an Attraktivität für die Fische verlieren.

Aus Sicht HTU ist es schwierig, die Beeinträchtigung eines dynamischen Prozesses wie Schwall-Sunk, mit schnellen Änderungen zwischen den Lebensraumbedingungen bei Schwall und Sunk mit einer solch statischen Betrachtung adäquat zu beschreiben (siehe dazu auch Kapitel 4.5). Zudem ist es aufgrund der Methodik mit der Betrachtung von mittleren Schwall- (60%-Quantil) und Sunk- (40%-Quantil) Abflüssen sehr schwierig, anhand von diesem Indikator konkrete Massnahmen abzuleiten. Aus diesem Grund wird für diesen Indikator keine Zieldefinition gemäss VZH Schwall-Sunk [1] durchgeführt und stattdessen eine gutachterliche Einschätzung zur Habitatverfügbarkeit und dessen Verbesserung erstellt.

Hinsichtlich der Bestandesaufnahmen in den Jahren 2016 durch Hydra und 2022 durch das AJF konnten keine wesentlichen Veränderungen oder gar Verschlechterungen beim Fischbestand festgestellt werden. Zwischen der Restwasserstrecke und der Schwallstrecke konnten dazu keine Unterschiede hinsichtlich Fischbestands eruiert werden. Es kann gemäss den Felderhebungen davon ausgegangen werden, dass beide Strecken als Habitatraum längerfristig genutzt werden können. Diese Erkenntnis deckt sich wiederum relativ gut mit den Modellierungen zum Indikator F6 gemäss Abb. 4.31, welche nur wenige Defizite aufgezeigt haben.

4.2.6 Makrozoobenthos

Die Resultate der Untersuchungen zum Makrozoobenthos werden ausführlich im Bericht von WFN AG dargelegt (Beilage 7). Nachfolgend zeigt eine Zusammenfassung die wichtigsten Erkenntnisse auf.

Makrozoobenthos ist ein sehr guter Indikator für die Bestimmung von Beeinträchtigungen von Fliessgewässern. Die Lebensgemeinschaft reagiert sehr sensibel auf morphologische, hydrologische oder chemische Defizite. Jedoch ist es schwierig die Ursachen für Defizite festzustellen und diese von anderen Effekten abzugrenzen. Die Indikatoren B1*, B3 und B4 gelten allgemein als Schwall-Sunk sensitive Indikatoren.

B1* – Biomasse und Diversität Makrozoobenthos

Beim Indikator B1* wird die Wasserwechselzone wie auch der dauerbenetzte Bereich beprobt, der Flächenanteil an der Wasserwechselzone erfasst und der daraus entstandene Biomassenverlust berechnet. Grundlage sind die Q_{347} -Abflusskennwerte, welche im Ist- und im Vergleichszustand übers ganze Jahr berechnet wurden (Beilage 7).

Die Biomasse des Makrozoobenthos im dauerbenetzten Bereich (Sunk) im Jahr 2020 betrug zwischen 4.8 und 11.7 g/m² (siehe dazu Abb. 4.32). Die grösste Biomasse wurde in der Untersuchungsstrecke Litzirüti festgestellt. In der Wasserwechselzone betrug die Biomasse zwischen 0.5 und 2.2 g/m² und damit deutlich tiefere Werte. Die Biomasse der Wasserwirbellosen war im dauerbenetzten Bereich bei Litzirüti fast 6-mal höher als in der Wasserwechselzone auf. Bei Langwies betrug das Verhältnis sogar 1 zu 20. Die EPT-Ordnungen wiesen stets den grössten Anteil an der Gesamtbiomasse auf.

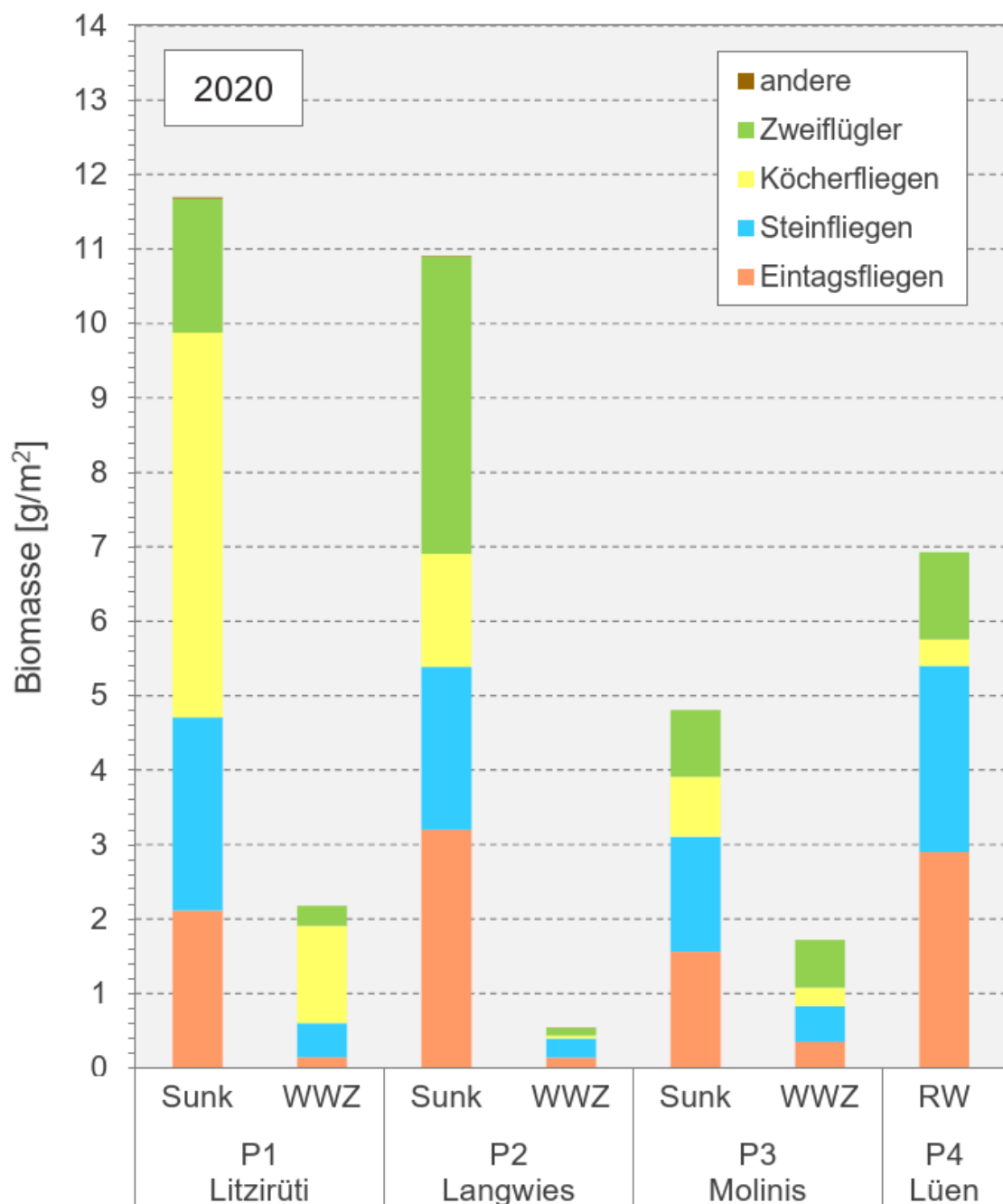


Abb. 4.32 Die Biomasse in den vier Untersuchungsstellen in der Plessur.

Der Verlust der EPT-Biomasse gegenüber dem theoretischen Zustand beträgt bei Litzirüti rund ein Drittel, was der Bewertung «mässig» entspricht und bei Langwies rund 7%, was einem «sehr guten» Zustand entspricht (siehe Abb. 4.33).

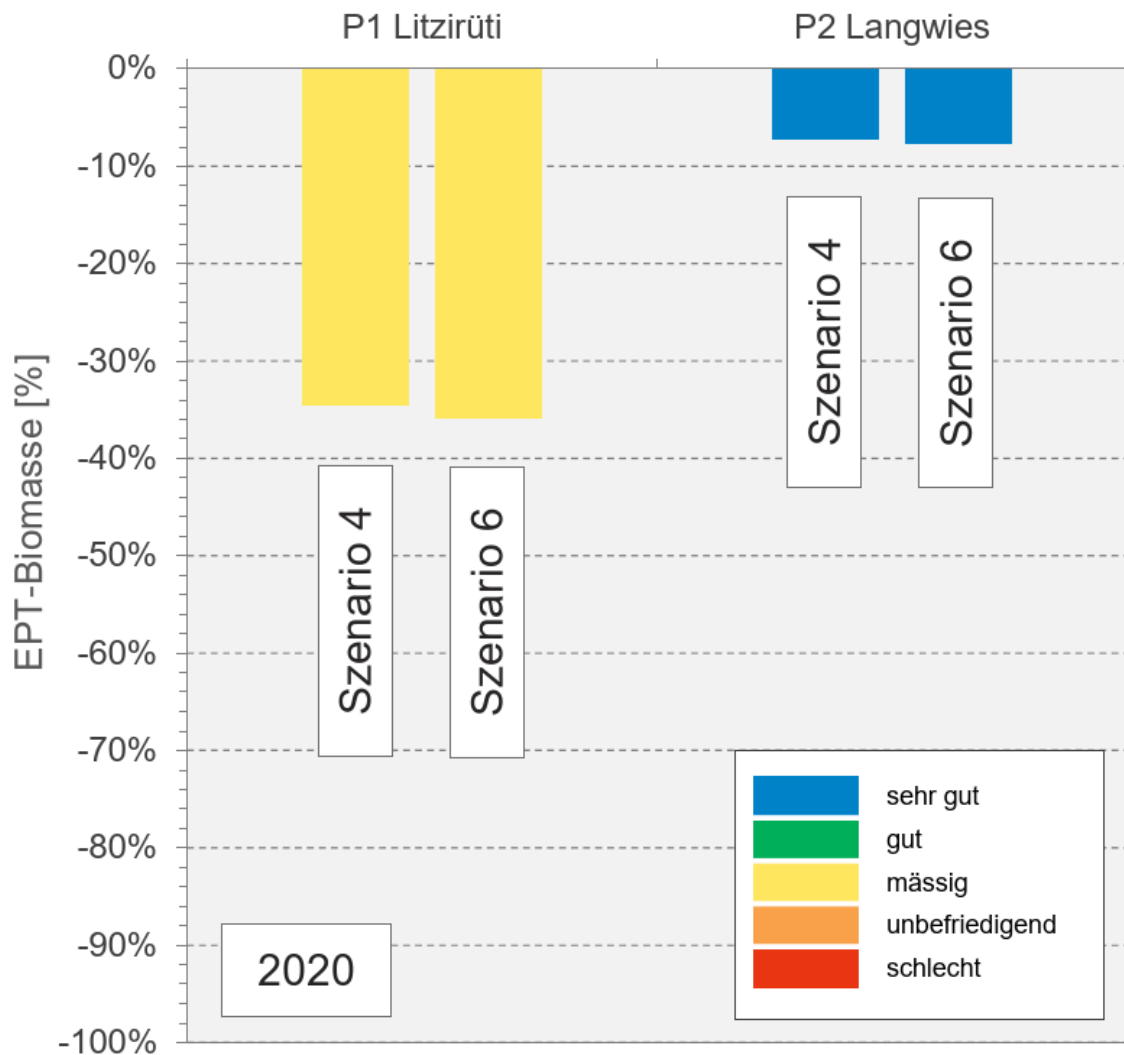


Abb. 4.33 Verlust der EPT-Biomasse gegenüber der theoretischen Biomasse.
Szenario 4: $Q_{\text{Schwall}} 60\%$
Szenario 6: $Q_{\text{Schwall}} 95\%$
Quelle: WFN 2021 (siehe Beilage 7).

Im ganzen Projektperimeter wurden 35 Taxa nachgewiesen. Die höchsten Diversitäten wurden in den Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies festgestellt. Die Diversität war ausser bei Molinis in der dauerbenetzten Fläche grösser als in der Wasserwechselzone.

Der Diversitätsverlust der EPT-Taxa war im Vergleich zur Gesamtdiversität relativ gering. Die Bewertung der Diversität wird bei Litzirüti und Langwies jeweils mit «sehr gut» bewertet.

Mit der Köcherfliege *Metanoea rhaetica* wurde eine Rote-Liste-Art nachgewiesen.

B2 - MSK Modul Makrozoobenthos

In den dauerbenetzten Bereichen der Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies wurden relativ hohe Individuendichten festgestellt (siehe Abb. 4.34). Hinsichtlich Strömungspräferenz dominieren die strömungsliebenden (rheophilen) Arten.

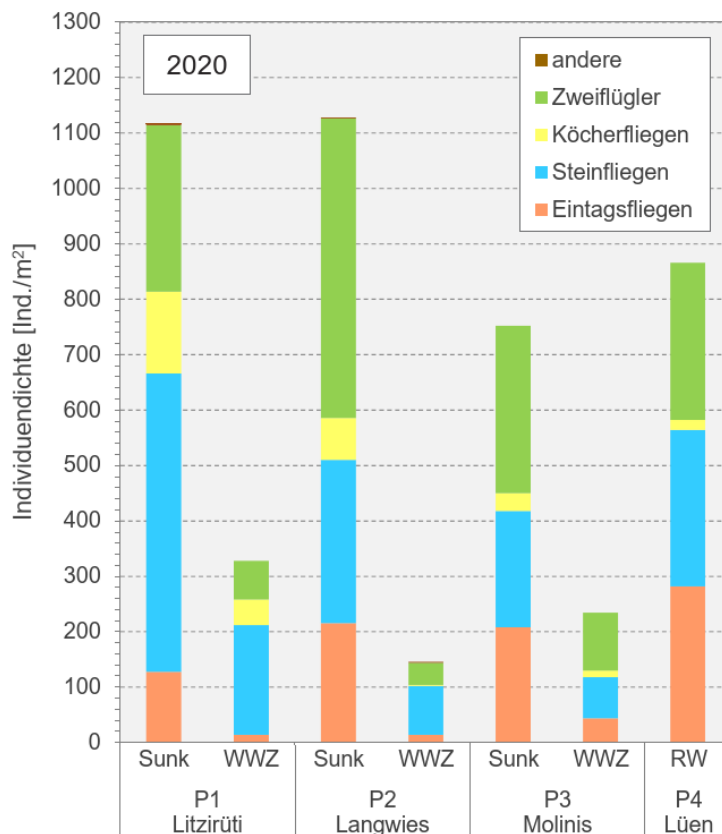


Abb. 4.34 Individuendichten an den vier untersuchten Stellen, aufgeteilt nach Sunk und Wasserwechselzone. Quelle: WFN 2021, siehe Beilage 7.

Der IBCH_2019 der Wasserwechselzone bei den Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies wurde jeweils mit «mässig» beurteilt. Die weiter unten gelegenen Standorte Molinis und Lünen wurden dagegen mit «gut» bewertet.

Die Sunkzonen wurden in allen Untersuchungsstrecken mit «gut» bewertet. Das Vorhandensein mehrerer Familien der sensitiven EPT ist ein wesentlicher Grund für die gute Bewertung dieses Indexes.

B3 – Längenzonation Makrozoobenthos

Für den Indikator «Längenzonation» wird die biozönotische Region anhand der Morphologie (Gefälle und Breite) theoretisch ermittelt und dann mit dem Wert der tatsächlich vorgefundenen Lebensgemeinschaft verglichen. Letzterer lässt sich aus der Zusammensetzung des Makrozoobenthos und den Lebensraumansprüchen der einzelnen Arten berechnen und als Längenzonationsindex (LZI) ausdrücken. Sämtliche Untersuchungsstrecken wurden dem Epirhithral zugeordnet, welches hinsichtlich LZI einen Sollwert von 3 aufweist.

Die Differenzen zwischen der theoretischen und der tatsächlichen Längenzonation sind in den Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies moderat und werden mit «mässig» bewertet.

B4 – EPT-Familien Makrozoobenthos

Die im Wasser lebenden Larven von Eintagsfliegen (Ephemeroptera), Steinfliegen (Plecoptera) und Köcherfliegen (Trichoptera) sind sehr gute Indikatoren für die ökologische Funktionsfähigkeit eines Gewässers. Der Zustand wird ab einer Anzahl grösser acht EPT-Familien als «gut» und ab 12 mit «sehr gut» bewertet. Geringere Anzahlen als acht führen zur Abwertung gegenüber «gut». Da EPT auf viele hydromorphologische Faktoren reagieren – nicht nur Schwall-Sunk – müssen die Bewertungen des Indikators B4 mit Vorsicht verwendet werden.

Die Bewertung des Indikators wurde in die Wasserwechselzonen und Sunkzonen unterteilt. Dabei wurde nur die Wasserwechselzone bei Langwies mit 7 EPT-Familien «mässig» beurteilt. Die übrigen Untersuchungsstellen wurden alle mit mehr als 8 EPT-Familien als «gut» bewertet.

sehr gut

gut

mässig

unbefriedigend

schlecht

Tabelle 6:

Anzahl EPT-Familien, welche in den vier Untersuchungsstellen gefunden wurden.

	P1		P2		P3		P4
	Sunk	WWZ	Sunk	WWZ	Sunk	WWZ	RW
Anzahl Taxa	24	11	25	13	18	19	20
Anzahl EPT-Taxa	16	9	16	9	13	13	14
Anzahl Familien	16	10	18	11	12	14	14
Anzahl EPT Familien	8	8	10	7	8	8	9

Abb. 4.35 Vorgefundene Anzahl EPT-Familien gemäss den Erhebungen von WFN. (Beilage 7)

Untersuchungs- strecke	Indikatoren				
	B1*	B1*	B2	B3	B4
	Biomasse	Diversität	IBCH 2019	Längenzon- ation	EPT- Familien
Litzirüti	mässig	sehr gut	mässig	mässig	gut
Langwies	sehr gut	sehr gut	mässig	mässig	gut

Tab. 4.11 Übersicht der Resultate der Makrozoobenthos-Indikatoren.

WFN kommt zum Schluss, dass die Auswirkungen von Schwall-Sunk auf das Makrozoobenthos in allen Untersuchungsstrecken bemerkbar ist. Unterhalb des Sapünerbachs wird der Einfluss jedoch durch den erhöhten Basisabfluss gedämpft.

Vergleich der Resultate

WFN hat, wie bereits erwähnt, im Jahr 2016 und damit vor der Umstellung auf das neue Betriebsregime (siehe Kapitel 3.4.1) erste Feldaufnahmen gemacht. Diese Vorher- und Nachheruntersuchungen sind daher von grosser Bedeutung, da sie den Einfluss des neuen Schwall-Sunk Regimes auf das Makrozoobenthos aufzeigen können. Der Vergleich beschränkt sich auf die absolute Biomasse, die Individuendichte und die Kolmation (im nachfolgenden Kapitel 4.2.7). Weitere Vergleiche können nicht

herangezogen werden, da seit 2016 einige Indikatoren-Bewertungen angepasst wurden.

- Individuendichte** (siehe Abb. 4.36): Die grösste Veränderung wurde in der Untersuchungsstelle Litzirüti festgestellt. Der Rückgang beträgt im Jahr 2020 gegenüber 2016 rund 69% im Sunkbereich und 87% in der Wasserwechselzone. Den grössten Verlust wiesen die Steinfliegen auf. Die Veränderungen in den unterliegenden Probestellen waren weniger klar. Absolute Vergleiche sind oftmals heikel, da sie weitere Umweltfaktoren wie Hochwasser, Murgänge etc. ausblenden. Daher wurde die Restwasserstrecke Lünen ebenfalls in den Jahren 2016 und 2020 als Referenzstrecke beprobt. 2020 war die Individuendichte in der Restwasserstrecke rund 10-mal höher als 2016. Es kann im Jahr 2020 somit von grundsätzlich besseren Bedingungen für die Individuendichten ausgegangen werden. Umso auffälliger ist das Resultat in der Untersuchungsstrecke Litzirüti mit dem starken Rückgang in der Individuendichte.
- Biomasse** (siehe Abb. 4.37): Bei der Biomasse sind die Unterschiede nicht mehr ganz so ausgeprägt wie bei den Individuendichten, aber der starke Rückgang in der Untersuchungsstrecke Litzirüti ist ebenfalls deutlich sichtbar. Bei den Probestellen Langwies und Molinis sind die Ergebnisse weniger deutlich. Jedoch muss auch hier erwähnt werden, dass die Biomasse in der Referenzstrecke im Jahr 2020 deutlich höher war als im Jahr 2016.

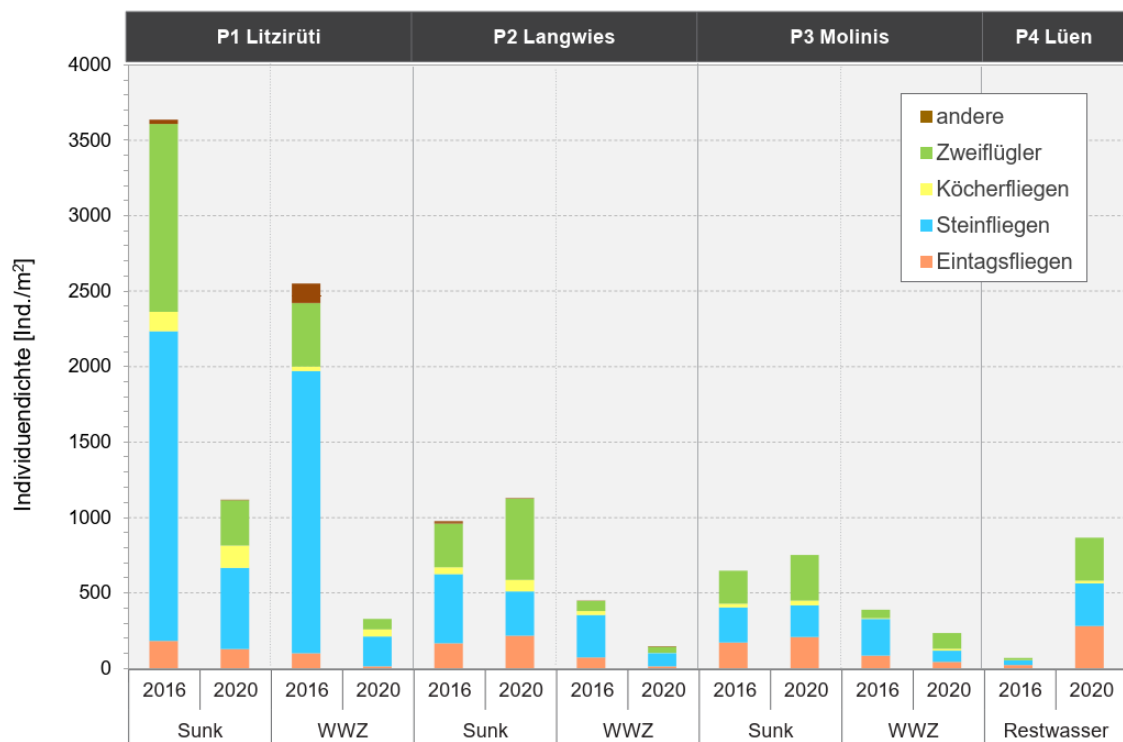


Abb. 4.36 Vergleich der Individuendichten zwischen den Aufnahmen von 2016 und 2020. Quelle: WFN 2021 [8].

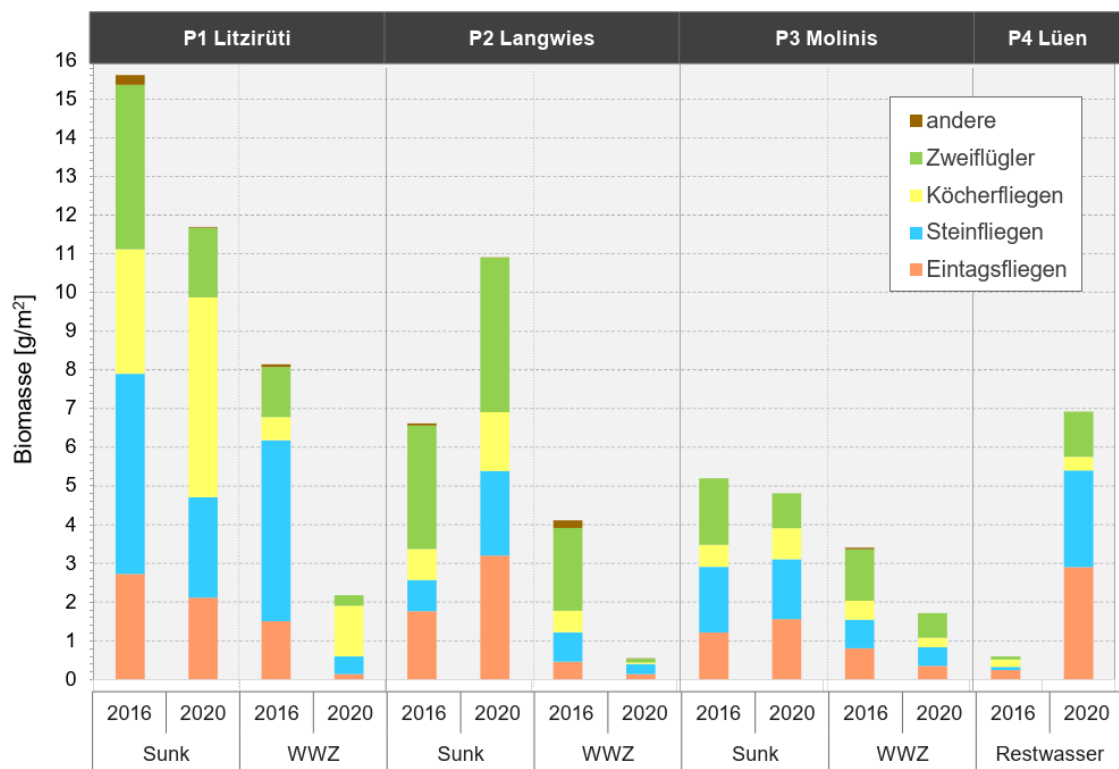


Abb. 4.37 Vergleich der Biomassen zwischen den Aufnahmen von 2016 und 2020.
Quelle: WFN 2021 [8].

Die Unterschiede zwischen den Resultaten vor und nach Regimewechsel im Jahr 2017 zeigen insgesamt eine Verschlechterung des Zustandes des Makrozoobenthos auf, was von WFN auf die zusätzliche hydraulische Belastung durch Schwall-Sunk zurückgeführt wird. Sowohl die Biomasse und Individuendichte sind in der Untersuchungsstrecke Litzirüti nach 2017 stark zurückgegangen. Gerade die Resultate bei Litzirüti zeigen eine deutliche Verschlechterung, welche auf einen grossen Einfluss von Schwall und Sunk hindeuten.

4.2.7 H1*, H2 – Kolmation

Bei der inneren Kolmation H1* wurden bei den Beurteilungen gemäss Schälchli «erhebliche» Ausmasse von innerer Kolmation in den Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies kartiert (siehe Abb. 4.38).

Bei der äusseren Kolmation wurde bei Litzirüti «keine» Kolmation festgestellt, bei Langwies dagegen eine «erhebliche» Kolmation.

Untersuchungsstelle	Innere Kolmation		Äussere Kolmation		Innere Kolmation		Äussere Kolmation	
	2019	2020	2019	2020				
P1 Litzirüti	erhebliche	erhebliche	-	-	keine	-	keine	-
P2 Langwies	erhebliche	erhebliche	++	++	geringe	+	geringe	+
P3 Molinis	starke	starke	+++	++	erhebliche	++	erhebliche	++
P4 Lünen	erhebliche	geringe	+	+	starke	+++	starke	+++
					sehr starke	++++	sehr starke	++++

Abb. 4.38 Kolmationsbeurteilungen von den Jahren 2019 und 2020.
Quelle: WFN 2021 [8].

Vergleich der Resultate

Der Vergleich zu den Kolmationsaufnahmen von 2015 und 2009 zeigt auf, dass sich der Wechsel des Betriebsregimes kaum auf die Kolmation ausgewirkt hat (siehe Abb. 4.39). Bei den Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies hat sich die innere Kolmation gegenüber 2009/2014 minim verschlechtert, weitere unten bei den Probe-stellen Molinis und Lülen dagegen eher verbessert. Auch die äussere Kolmation hat sich bei Molinis und Lülen leicht verbessert. Im Projektperimeter Litzirüti und Langwies wurden dagegen keine Veränderungen festgestellt. Vermutlich ist die Kolmation im Projektperimeter eher von natürlichen Ereignissen wie Hochwasserereignissen abhängig als von Schwall-Sunk.

Untersuchungsstelle	Innere Kolmation					Äussere Kolmation				
	2009	2014	2015	2019	2020	2009	2014	2015	2019	2020
P1 Litzirüti	■	■	■	■	■	-	+	-	-	-
P2 Langwies	■	■	■	■	■	-/+	++	++	++	++
P3 Molinis	■	■	■	■	■	++	++	+++	+++	++
P4 Lülen	■	■	■	■	■	-	++	++	+	+

Abb. 4.39 Kolmationsbeurteilung zwischen 2009 und 2020.
Quelle: WFN 2021 [8].

Da 2017 bei Litzirüti und Langwies sowohl eine erhebliche innere und eine erhebliche äussere Kolmation festgestellt wurden, ist es fraglich, ob das neue Betriebsregime mit dem starken Schwall-Sunk Betrieb überhaupt für die Kolmation verantwortlich ist. Auch das vorherrschende Geschiebedefizit und/oder der Eintrag von Feinsedimenten aus den Seitenbächen können zum Defizit beitragen [8].

Hydra [7] geht davon aus, dass der Sapünerbach zwar Geschiebe, welches als Laichsubstrat genutzt werden kann, im positiven Sinne einbringt, jedoch auch durch den Eintrag von Feinsediment das Interstitial verstopfen kann, was im negativen Sinne die Kolmation fördert. Der Schwall-Sunk-Betrieb kann die durch Feinsediment verursachte (natürliche) Kolmation noch zusätzlich verstärken. Explizit im Bereich Langwies geht Hydra [7] davon aus, dass die Kolmation die Reproduktion zwar behindert, jedoch nicht verhindert. Schwall-Sunk ist damit nicht die Hauptursache für die beobachtete Kolmation, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass Schwall-Sunk die Kolmation begünstigt.

4.2.8 Q1* – Temperatur

Durch die unterschiedliche Wassertemperatur in der Restwasserstrecke und der Wasserrückgabe des KW Litzirüti können im Tagesverlauf hohe Temperaturänderungsraten auftreten. Die Temperaturschwankung unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti wurden sowohl gemessen als auch modelliert.

Messdaten

Eine typische Winter-Ganglinie der Wassertemperaturen in der Plessur unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti im Dezember 2017 ist in Abb. 4.40 aufgezeigt. Die natürliche Tagesganglinie wird ab der Wasserrückgabe der einzelnen Zentralen durch eine Abkühlung oder Erwärmung der Wassertemperatur bei Schwall überlagert. In Winter kühlt die Wassertemperatur aufgrund der kühlen Lufttemperatur ab. Turbinert das

KW Litzirüti das aufgrund der Wasseranomalie vergleichsweise warme Wasser von rund 4 °C, steigt die Wassertemperatur sprunghaft an.

In der warmen Jahreszeit ist das Wasser aus dem Stausee Isel generell kühler als jenes im Gewässer, welches sich durch Sonneneinstrahlung und Reibungsenergie langsam erwärmt. Somit kann die Wasserrückgabe zu einer Reduktion oder zu einer Erhöhung der Wassertemperatur führen. Sobald der Betrieb der Turbinen eingestellt wird und kein Betriebswasser mehr in das Gewässer zurückgegeben wird, gleicht sich die Wassertemperatur in der Schwallstrecke wieder dem Niveau vor der Wasserrückgabe an. Der Einfluss des Schwall-Sunk Betriebs auf die Temperatur des Wassers ist im Sommer aufgrund der grösseren Temperaturdifferenz zwischen dem Restwasser und dem turbinieren Wasser ab Zentrale grundsätzlich grösser als im Winter, wo die Temperaturunterschiede aufgrund der geringeren Erwärmung des Wassers in der Restwasserstrecke kleiner sind.

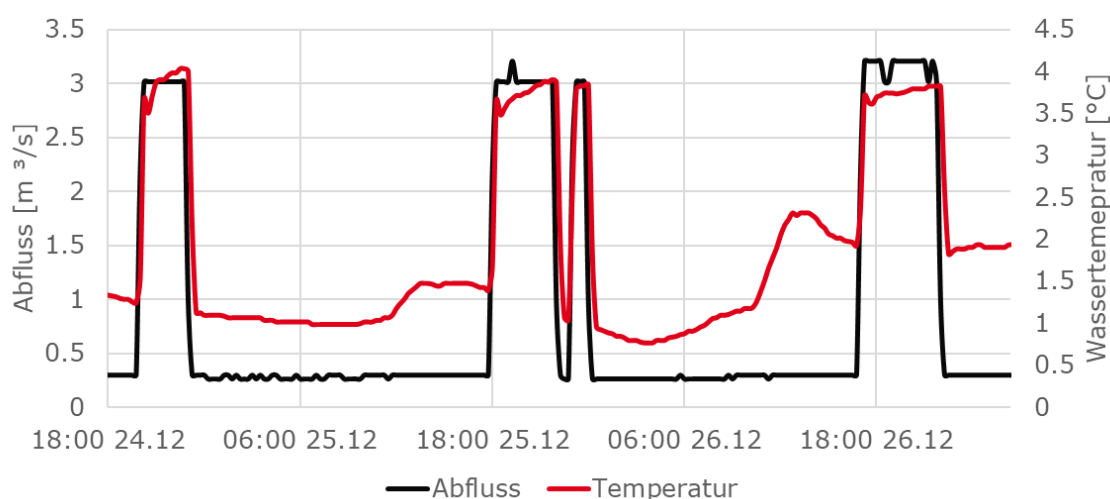


Abb. 4.40 Typischer Temperaturverlauf im Vergleich zum Abfluss bei der Messstelle in der Schwall-Sunk Strecke Litzirüti im Dezember 2017. Das Wasser erwärmt sich im Tagesverlauf natürlich und erreicht einen Peak am späten Nachmittag. Einen viel stärkeren Einfluss hat aber der Schwall-Sunk Betrieb.

Im Gewässer stehen 2 Temperaturmessstellen zur Verfügung: Jene in der Restwasserstrecke vor der Wasserrückgabe des KW Litzirüti und eine Messstelle in der Untersuchungsstrecke Litzirüti kurz nach der Wasserrückgabe. In der Untersuchungsstrecke Langwies steht dagegen keine Messstelle zur Verfügung.

Neben dem Einfluss der turbinieren Wassermengen ist der Temperaturverlauf im Gewässer deutlich durch den Tagesverlauf der Lufttemperatur beeinflusst. So ist dieser Effekt massgebend für die Temperaturamplitude verantwortlich. Wie im Temperaturverlauf der Plessur deutlich ersichtlich, führen die turbinieren Wassermengen jedoch zu schnellen Änderungsraten der Temperatur.

Interessant ist die Bewertung für die Restwasserstrecke oberhalb der Wasserrückgabe. Auch hier finden sich gewisse ökologische Defizite hinsichtlich der Temperaturänderung. Es ist vorstellbar, der Überlauf beim Stausee Isel, welcher gerade während der Schneeschmelze und Sommer regelmässig einsetzt, zu diesen Schwankungen führt. Dazu kommt, dass die tiefen Abflussverhältnisse grundsätzlich stärker im Tagesverlauf schwanken dürften als bei hohen Abflusswerten.

Untersuchungsstrecke	Verfügbarer Zeitraum der Messdaten	Mittlere Temperatur [°C]	dT [°C/h]	Amplitude [°C]	Bewertung
Restwasserstrecke Litzirüti	Jan. 17 - Feb. 21	4.4	2.7	4.1	unbefriedigend
Litzirüti (Untersuchungsstrecke Litzirüti)	Nov. 17 - Feb. 21	4.5	11.8	4.6	schlecht

Tab. 4.12 Auswertung Indikator Q1* anhand der Messdaten für die Periode 2017 bis 2021.
Bei der Temperaturänderungsrate dT [°C/h] werden die maximalen täglichen Änderungen, welche pro Stunde auftreten, berechnet und davon das 90%-Quantil verwendet.
Bei der Amplitude [°C] werden von den maximalen Tagesamplituden das 90%-Quantil verwendet.
Bei beiden Auswertungen wurde ein Korrekturfaktor gemäss VZH Schwall-Sunk [1] angewendet, was zu einer Verschlechterung der Bewertung um eine Stufe führt.

Temperaturmessdaten weisen genau wie Modelldaten gewisse Unsicherheiten auf. Je nach Standort der Sonde kann diese schlecht durchströmt sein und die Wassertemperatur deshalb stark ansteigen (Sonneneinstrahlung) oder stark sinken (Eistage).

Modellierte Werte

Für die Auswertung der modellierten Daten wurde die Periode 2017 bis 2023 berücksichtigt. Im Gegensatz zu den punktuellen Messdaten geben die modellierten Werte, Mittelwerte über die gesamte Untersuchungsstrecken wieder. Die Resultate für die zwei Untersuchungsstrecken sind in Tab. 4.13 dargestellt. Allgemein sind gemäss Bewertung der VZH Schwall-Sunk [1] hohe Temperaturänderungsraten (dT), wie auch hohe Temperaturamplituden in beiden Untersuchungsstrecken feststellbar, diese werden mit «schlecht» bewertet. Durch den Zufluss des Sapünerbachs und die weitere Entfernung zur Wasserrückgabe Litzirüti, sind die Temperaturschwankungen bei Langwies tiefer als bei Litzirüti.

Untersuchungsstrecke	Mittlere Temperatur [°C]	dT [°C/h]	Amplitude [°C]	Bewertung
Litzirüti	3.7	9.8	2.7	schlecht
Langwies	4.0	6.9	1.8	schlecht

Tab. 4.13 Modellerte Auswertung Indikator Q1* für die Periode vom Januar 2017 bis Februar 2023.
Die Erklärung der Variablen findet sich im Beschrieb der Tab. 4.13.

Die Auswertung des Ist-Zustands anhand hydraulischer Modellierungen (vgl. Kapitel 3.7) zeigt, dass beide Untersuchungsstrecken unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti mit «schlecht» bewertet werden. Die Defizite nach hydraulischem Modell sind Grundlage für die Zieldefinition. Temperaturmodellierungen müssen allgemein aufgrund verschiedener Unsicherheiten mit Vorsicht betrachtet werden. So wird in den modellierten Temperaturen die Lufttemperatur nicht berücksichtigt, wodurch teilweise grössere Unterschiede zu den Messdaten auftreten können.

Sowohl die Messdaten als auch die modellierten Werte weisen beide grössere Unsicherheitsquellen auf. Da die Messdaten nur eine punktuelle Auswertung erlauben und

die modellierten Auswertungen flächig über die gesamte Untersuchungsstrecke gemacht worden sind, können die Werte nur bedingt miteinander verglichen werden. Für die Untersuchungsstrecke Litzirüti zeigt sich jedoch eine einigermaßen befriedigende Übereinstimmung mit der Messstelle. Wie zu erwarten war, sind die Temperaturschwankungen bei der Messstelle, welche sehr nahe bei der Wasserrückgabe liegt, grösser als im Durchschnitt für die Untersuchungsstrecke (modellierter Wert), aufgrund der zunehmenden longitudinalen Dämpfung.

Gutachterliche Bewertung Q1* durch Hydra

Die Bewertung von Q1* ist grundsätzlich schwierig, da zu wenig Grundlagenwissen zu letalen oder subletalen Auswirkungen durch die Temperaturschwankungen besteht. Auch gutachterlich kann nur schwer abgeschätzt werden, ob diese Bewertungen strenger oder lockerer ausfallen sollten.

In der Plessur sind die Schwall-Sunk bedingten Temperaturamplituden relativ gering. Die «schlechten» Bewertungen gemäss Vollzugshilfe können gutachterlich auf ein «unbefriedigend» angehoben werden.

4.2.9 Zusammenhang Kraftwerksbetrieb und Trübung

Die Trübungssonden bei Langwies und Pradapunt waren von Mitte Januar bis zur Schneeschmelze Mitte April 2015 und damit auch während den Schwallversuchen in Betrieb. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Standorten Pradapunt und Langwies über den gesamten Zeitraum. Die Trübung in Pradapunt schwankt stärker als jene in Langwies. Weiter weist die Plessur in Pradapunt konstant eine leichte Trübung auf, während das Wasser in Langwies meist sehr klar ist. Dies ist auf die Seitenbäche unterhalb Langwies, insbesondere den Frauentobelbach, zurückzuführen, welche bereits bei sehr kleinem Abfluss viele Feinsedimente in die Plessur eintragen.

Der Abfluss schwankte während der Schwallversuchswoche durch die Schwallereignisse des KW Litzirüti zwar stark, der Effekt auf die Trübung ist jedoch gering (Abb. 4.41). Vor dem ersten Schwall liegt die Trübung in Pradapunt unerklärlich hoch und korreliert nicht mit der Temperatur oder der turbinieren Wassermenge. In Litzirüti hingegen ist die Trübung vor dem ersten Schwall am 9. März 2015 bei null, was vermutlich auf einen Messfehler zurückzuführen ist.

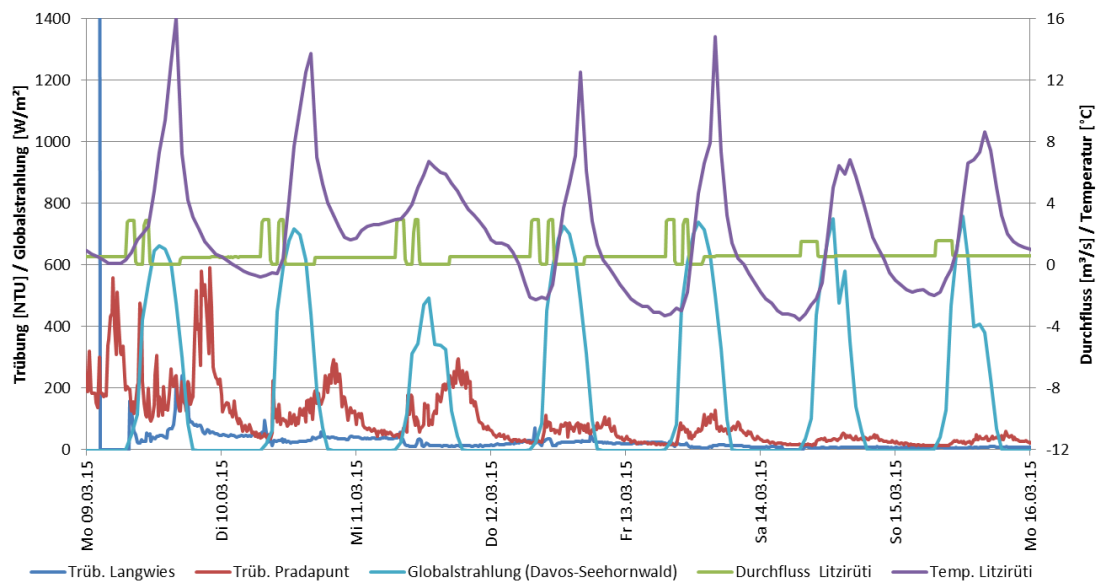


Abb. 4.41 Verlauf der Trübung an den Standorten Pradapunt (Wehr) und Langwies (Brücke bei ARA) [NTU] während der Schwallversuchswoche. Ebenfalls dargestellt sind die Lufttemperatur bei der Pegelmesssonde in Litzirüti [°C], die Globalstrahlung in Davos [W/m²] und die Turbinenwassermenge bei der Zentrale Litzirüti [m³/s]. Die Datumsangaben entsprechen jeweils Mitternacht.

Nach dem ersten Schwall am Morgen des 9. März 2015 sind die Trübungswerte für beide Standorte plausibel. So steigt die Trübung sowohl in Pradapunt als auch in Litzirüti nach dem ersten Schwall leicht an. Die aufgrund des ersten Schwalls erreichten Trübungswerte liegen hingegen unter den Werten, welche am Nachmittag des 9. März 2015 natürlicherweise aufgrund des Temperaturanstiegs auftreten. Auch in den darauffolgenden Tagen ist nach dem ersten Schwall eine Erhöhung der Trübung bei Pradapunt und Langwies sichtbar. Diese Erhöhungen sind jedoch im Vergleich zu den natürlichen Schwankungen vernachlässigbar. Nach dem zweiten Schwall sind nur vereinzelt Auswirkungen auf die Trübung sichtbar (z.B. am 9. und am 11. März 2015, vgl. Abb. 4.41)

Während sich in Langwies die Trübungswerte im Verlauf der Schwallversuchswoche nach dem ersten Tag (9. März 2015) konstant auf tiefem Niveau bewegen und eher abnehmen, ist bei Pradapunt nach wie vor ein Tagesverlauf sichtbar. Die gemessenen Tagesspitzen der Trübung in Pradapunt nehmen im Verlauf der Schwallversuchswoche aber ab, dies trotz ähnlichen Tagesspitzen bei der Temperatur und der Globalstrahlung. Vermutlich wurden durch den erhöhten Abfluss aufgrund der Schneeschmelze oder durch die Schwallwellen mehr Feinstoffe ausgetragen, als aus den Seitenbächen zugeführt wurde. Dieses Phänomen ist natürlich und zeigt sich auch ausserhalb der Schwallversuchswoche.

Ein Zusammenhang zwischen der turbinieren Wassermenge und der Entwicklung der Trübung lässt sich bei etwa konstant turbinierter Wassermenge nicht erkennen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das turbinierte Wasser relativ klar ist (keine Gletscher im Einzugsgebiet). Zudem ist die Ausbauwassermenge von 3 m³/s vermutlich nicht gross genug, um grössere Feinsedimente von der Gewässersohle aufzuwirbeln und über weite Distanzen in Suspension zu transportieren. Die Entwicklung der Trübung korreliert vielmehr mit der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung. So

verläuft die Trübung ähnlich wie die Lufttemperatur in Litzirüti oder die Globalstrahlung, welche sich aus der Direktstrahlung (auf direktem Weg eintreffende Solarstrahlung) und der Diffusstrahlung zusammensetzt und durch den Bund in Davos gemessen wird. Bei tiefen Temperaturen und tiefer Globalstrahlung steigt die Trübung nicht an. Bei höheren Temperaturen und höherer Globalstrahlung nimmt die Trübung in Pradapunt stark, in Langwies nur sehr leicht zu. Der Effekt ist auf die Schneeschmelze zurückzuführen, welche bei erhöhter Sonneneinstrahlung und der damit zusammenhängenden Temperatur einsetzt. Dies führt zu vermehrtem Zufluss aus den Seitenbächen, welche zwischen Langwies und Pradapunt viele Feinsediment in die Plessur transportieren.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass der Betrieb des KW Litzirüti in der Schwallversuchswoche einen Einfluss auf die Trübung der Plessur hatte. Der Einfluss ist im Vergleich zu den natürlich auftretenden Trübungswerten aber vernachlässigbar.

4.3 Zusammenfassung Indikatoren

Die Ergebnisse der Modellresultate der Defizit- und Ursachenanalyse sind in Abb. 4.42 dargestellt.

	Litzirueti	Langwies
F3 * [%] (Okt.-Ende April)	34	10
Q1 * TR_{SS} [°C/h]	9.8	6.9
F2 * - Agg - larval		
F2 * - Agg - Übergang		
F2 * - Agg - juvenil		
$F2$ * - dF [%] - larval	43.7	14.8
$F2$ * - dF [%] - Übergang	33.7	7.5
$F2$ * - dF [%] - juvenil	42.3	12.7
$F2$ * - dP [cm/min] - larval	1.56	0.39
$F2$ * - dP [cm/min] - Übergang	1.13	0.2
$F2$ * - dP [cm/min] - juvenil	1.35	0.29
F6 juvenil sunk (Jahr)	-16	-37
F6 juvenil sunk (Mai)	2	-2
F6 juvenil sunk (Aug)	-24	-10
F6 juvenil sunk (Nov)	-11	-85
F6 juvenil schwall (Jahr)	11	11
F6 juvenil schwall (Mai)	2	0
F6 juvenil schwall (Aug)	3	2
F6 juvenil schwall (Nov)	13	9
F6 adult sunk (Jahr)	33	-2
F6 adult sunk (Feb)	39	4
F6 adult sunk (Mai)	1	9
F6 adult sunk (Aug)	10	-2
F6 adult sunk (Nov)	22	-6
F6 adult schwall (Jahr)	2	7
F6 adult schwall (Feb)	-12	9
F6 adult schwall (Mai)	4	0
F6 adult schwall (Aug)	2	3
F6 adult schwall (Nov)	0	3

Abb. 4.42 Beurteilungsmatrix der Ist-Situation (2017-2021) für die Bachforelle.

Anhand der Resultate können für die bewerteten Schwall-Sunk Indikatoren die nachfolgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Allgemein** Die massgebenden Defizite beschränken sich auf das Strandungsrisiko für larvale Fische (Indikator F2*) bei Litzirüti und die Wassertemperatur (Indikator Q1*) bei beiden Untersuchungsstrecken. Bezüglich Habitategignung (Indikator F6) konnten nur bei Sunk Defizite bei Litzirüti festgestellt werden. Der Indikator F3* weist bei Litzirüti eine Bewertung von mässig auf.
- F2*** Die Resultate zeigen nur Defizite für die obere Untersuchungsstrecke Litzirüti auf. Sowohl für larvale Forellen als auch für Jungfische im Übergang zum juvenilen Stadium liegen Defizite vor. Für juvenile Bachforellen gibt es in beiden Untersuchungsstrecken keine Defizite.
- F3*/F4*** Die Feldaufnahmen von Hydra AG zeigen, dass eine natürliche Reproduktion von Forellen in der Plessur grundsätzlich möglich ist. Dies haben die gefundenen Laichgruben in der Untersuchungsstrecke Langwies und die Brutboxenversuche im Jahr 2016 aufgezeigt. Bei Litzirüti konnte dagegen im Juli 2022 der Nachweis der natürlichen Reproduktion auf tiefem Niveau erbracht werden (ob die Naturverlaichung dabei in der Restwasser- oder in der Schwall-Sunk Strecke erfolgt ist, kann nicht differenziert werden). Gemäss den Modellierungsergebnissen für den Indikator F3* hat Schwall-Sunk bei Litzirüti einen negativen Einfluss auf das Laichgeschäft und auf die Entwicklung der Larven. Bei Langwies konnte gemäss VZH Schwall-Sunk [1] kein Defizit durch Schwall-Sunk mehr auf die Reproduktion nachgewiesen werden. Die gutachterliche Bewertung von Hydra geht jedoch davon aus, dass auch bei Langwies gewisse Beeinträchtigungen wie die Störung des Laichgeschäfts durch den regelmässigen Schwall-Sunk Betrieb bestehen. Aber auch natürliche Faktoren wie teils sehr steile Abschnitte, das Fehlen von grossen Flächen mit geeignetem Laichsubstrat und die mangelnde Lebensraumvernetzung durch natürliche Wanderhindernisse erschweren die Reproduktion. Die Plessur stellt somit von Natur aus hohe Anforderungen an die Bachforelle. Das Angebot an Laichflächen dürfte gemäss gutachterlicher Einschätzung von Hydra in beiden Untersuchungsstrecken ausreichen, um einen hohen Brütlingsbestand zu garantieren und um eine Population längerfristig erhalten zu können. Die Sommerlingsbefischungen im Jahr 2016 und 2022 haben jedoch klare Defizite beim Bestand der Jungfische aufgezeigt. Eine sich über mehrere Generationen selbst erhaltende Population gilt daher als unwahrscheinlich.
- F6*** Die Defizite beschränken sich auf den Sunkzustand im Herbst und Winter für adulte Forellen in der Untersuchungsstrecke Litzirüti. Bei Langwies und für Juvenile allgemein liegen keine Defizite vor. HTU geht aber wie bereits erwähnt davon aus, dass die Methodik gemäss Vollzugshilfe für den Indikator F6 nicht geeignet ist, um ein vollständiges Bild der Habitategignung zu erhalten.
- Q1*** Die Temperaturänderung wird in beiden Untersuchungsstrecken als «schlecht» beurteilt.

MZB

Die Makrozoobenthosaufnahmen von WFN zeigen allgemein ein moderates Bild mit Bewertungen zwischen «mässig» bis «sehr gut» auf. Bei beiden Untersuchungsstrecken wurden die Indikatoren B4 (mindestens 8 EPT-Familien) und B2 mit «gut» bewertet, bei B1* Diversität wurde der IST-Zustand sogar mit «sehr gut» bewertet. Bei der Längenzonation (B3) liegen mit den Bewertungen «mässig» schlechtere Bewertungen vor, welche durch Schwall-Sunk verursacht sein dürften.

Die Resultate zeigen, dass bezüglich Makrozoobenthos keine, resp. sehr geringe Schwall-Sunk bedingte Defizite vorliegen. Jedoch hat die Umstellung des Betriebsregimes einen deutlich negativen Einfluss auf die Biomasse und Individuendichte des Makrozoobenthos gehabt.

Die innere Kolmation (H1*) wurde in beiden Untersuchungsstrecken mit «mässig» beurteilt. Wobei die äussere Kolmation (H2) bei Litzirüti dagegen mit «sehr gut» keine Defizite aufweist. Die Schwallwellen dürften hier kaum eine äussere Kolmation zulassen.

4.4 Vergleich zur strategischen Planung

Tab. 4.14 vergleicht die Resultate aus der strategischen Planung [2] mit den Bewertungen aus der Defizit- und Ursachenanalyse. Grundsätzlich und vor allem für die Makrozoobenthosaufnahmen und F4 stimmen die Bewertungen relativ gut überein. Auch bei F2* sehen beide Methoden starke Defizite bei Litzirüti und nur geringe bei Langwies. Bei der Kolmation ist die strategische Planung von leicht schlechteren Bewertungen ausgegangen als bei der Defizit- und Ursachenanalyse. Es gibt jedoch teils extreme Widersprüche, wie zum Beispiel bei Q1 und der Untersuchungsstrecke Litzirüti, bei welcher die strategische Planung eine «sehr gute» Bewertung die Defizit- und Ursachenanalyse jedoch eine «schlechte» Bewertung herausgibt. Aufgrund der verschiedenen Auswertungsmethoden kann aber über die Gründe dieser Differenzen nur spekuliert werden, weshalb dies hier nicht weiter vertieft werden soll.

Indikator	Auswertungsmethodik	Litzirüti	Langwies
F2* - Stranden Fische	Strategische Planung	schlecht	gut
	Defizit- und Ursachenanalyse	schlecht	mässig
F3* - Laichareale	Strategische Planung		
	Defizit- und Ursachenanalyse	mässig	sehr gut
F4 - Jungfischvorkommen	Strategische Planung	schlecht	schlecht
	Defizit- und Ursachenanalyse	schlecht	schlecht
B1* Biomasse	Strategische Planung	sehr gut	sehr gut
	Defizit- und Ursachenanalyse	mässig	sehr gut
B2 MSK-Modul Makrozoobenthos	Strategische Planung	gut	gut
	Defizit- und Ursachenanalyse	gut	gut
B3 Längenzonation	Strategische Planung	unbefriedigend	mässig
	Defizit- und Ursachenanalyse	mässig	mässig
H1* Kolmation	Strategische Planung	schlecht	unbefriedigend
	Defizit- und Ursachenanalyse	mässig	mässig
Q1*	Strategische Planung	sehr gut	
	Defizit- und Ursachenanalyse	schlecht	schlecht

Tab. 4.14 Vergleich der Resultate der strategischen Planung und der Defizit- und Ursachenanalyse. Bei F2* wurde der aggregierte Zustand der larvalen Bachforellen eingesetzt. Bei der Kolmation wurde nur die innere Kolmation H1* verglichen. Bei B1 wurde die Bewertung der Biomasse berücksichtigt.

4.5 Unsicherheiten und Schwierigkeiten Indikatoren

Die Defizit- und Ursachenanalyse der Schwall-Sunk Sanierung Plessur wurde gemäss den Empfehlungen der VZH Schwall-Sunk [1] durchgeführt. Durch die breite Anwendung der VZH Schwall-Sunk [1] stellte Axpo einige Lücken und Schwierigkeiten bei der Bewertung der Indikatoren fest. Diese sind nachfolgend ebenfalls bei den entsprechenden Indikatoren aufgelistet.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sind daher einige Aspekte zu beachten:

F2* - Stranden

- Die Frequenz (Häufigkeit der auftretenden Schwall- und Sunkereignisse) wird durch den Indikator nicht berücksichtigt. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, dass das effektive Mortalitätsrisiko der Fische mit der Anzahl Schwallereignisse ansteigt.
- Die Bewertung des Indikators ist stark abhängig von der Wahl der Untersuchungsperiode sowie der untersuchten Jahre.

- Die flächige Betrachtung der Pegelrückgangsraten stellt eine Abweichung der VZH Schwall-Sunk [1] dar. Inwiefern das 80%-Quantil ökologisch sinnvoll ist, kann nur schwer abgeschätzt werden und wurde für die Plessur analog anderer Projekte übernommen.
- Die absolute Strecke, welche ein Fisch bei einem Rückgang zurücklegen muss, bis er wieder im sicheren benetzten Bereich ist, hat sicherlich einen Einfluss auf die Mortalität. Der Einbezug der Wasserwechselzone in absoluter Distanz (anstelle der Fläche) ist jedoch insbesondere in naturnahen Untersuchungsstrecken aus Sicht Axpo sehr schwierig umzusetzen.
- Unterschiede von 1D- und 2D-Modell können schnell Auswirkungen auf die Bewertung einzelner Untersuchungsstrecken haben. Bereits kleine Abweichungen können dazu führen, dass die Resultate des Indikators F2*, aufgrund der Abhängigkeit der Pegelrückgangsraten von der Morphologie des Gewässers, um eine oder im aggregierten Zustand sogar zwei Kategorien schlechter, resp. besser ausfallen.

F3* - Laichareale

- Die Häufigkeit (Frequenz) der auftretenden Schwall- und Sunkereignisse wird im Indikator nicht berücksichtigt. Ohne Berücksichtigung der Frequenz basieren die resultierenden Laichareale auf einer rein statischen Betrachtung. Es wird davon ausgegangen, dass Fische erst dann laichen, wenn sie sicher sind, dass es das richtige Laichareal ist. Bei regelmässiger Störung entscheiden sich die Fische allenfalls für das falsche oder schlechtere Laichareal oder suchen weiter.
- Der natürliche Zustand kann nie direkt gemessen werden und muss deshalb immer hergeleitet werden. Die Berechnung der natürlichen Abflüsse weist aufgrund ungenügender Datenlage (historische Daten) und der Einflüsse der Klimaerwärmung grössere Unsicherheiten auf.
- Habitatmodellierungen sind per se eine starke Vereinfachung der real vorherrschenden Situation und die Ergebnisse sind stark abhängig von der Definition der Fuzzy-Sets und Fuzzy-Regeln durch die Gewässerökologen.
- Eine Validierung der durch die Gewässerökologen definierten Fuzzy-Sets und Fuzzy-Regeln ist aufgrund der sich immer ändernden Morphologie, gerade in den wichtigen natürlichen Gewässerabschnitten, nur begrenzt möglich, da der abgebildete Modellzustand bereits ein Jahr später allenfalls nicht mehr aktuell ist.
- Wie beschrieben, muss aufgrund fehlender Informationen zur Verteilung des Substrats im Vergleichszustand ohne Kraftwerksbetrieb dieser wichtige Aspekt für die Reproduktion der Fische vernachlässigt werden. Gleiches gilt auch für die Unterstände.
- Die Länge der Periode (Embryonalentwicklung) beruht auf Annahmen und Experteneinschätzungen. Diese hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bewertung des Indikators.
- Inwiefern der definierte Grenzwert von 30% für eine Bewertung von «gut» für die Plessur anwendbar ist, ist schwer zu beurteilen.

F6 - Habitateignung

- Es wird davon ausgegangen, dass auch beim Indikator F6 der ständige Wechsel zwischen den Habitaten aufgrund der hohen Frequenzen einen grossen Einfluss auf die Attraktivität des Habitats in der Schwallstrecke hat. Dies kann dazu führen, dass auch wenn der Indikator als gut oder sehr gut bewertet wird, das Habitat von den Fischen nicht genutzt wird.

- Die Berechnung der natürlichen Abflüsse weist aufgrund ungenügender Datenlage (berechnet aus vergleichbarem Einzugsgebiet) grössere Unsicherheiten auf.
- Der Indikator ist stark abhängig von der benetzten Fläche. So werden bei natürlicher Morphologie für sehr hohe Abflüsse auch hohe Habitateignungen erreicht, was in natura nicht zwingend der Fall ist.
- Aufgrund der Methodik mit der Betrachtung von mittleren Schwall- (60%-Quantil) und Sunk- (40%-Quantil) Abflüssen ist es sehr schwierig, anhand von diesem Indikator konkrete Massnahmen abzuleiten. Es handelt sich um eine statistische Betrachtung über Quantile der sehr dynamischen Beeinträchtigung von Schwall und Sunk.
- Defizite entstehen dort, wo die heutigen Abflüsse von der hydrologischen Referenz abweichen, am stärksten im Frühling und Sommer. Die daraus bestimmten Zielwerte können zu riesigem Sanierungsausmass führen.
- Inwiefern der definierte Grenzwert von 20% für eine Bewertung von «gut» für die Plessur anwendbar ist, ist schwer zu beurteilen.

Q1* - Temperatur

- Die Auswertung des Indikators ist aufgrund des Zielwertes in °C/h sehr sensibel auf die Auflösung der Daten. So entspricht z.B. eine Temperaturänderung von 0.625°C in 10 min einer Änderungsrate von 3.75°C/h (Bewertung «unbefriedigend»). Dieselbe Temperaturänderung in 15min entspricht jedoch einer Änderungsrate von 2.5°C/h, was mit «gut» bewertet wird.
- Eine Zieldefinition funktioniert nur, wenn von einer kompletten Durchmischung ausgegangen wird.

4.6 Ursachenanalyse

Nachfolgend werden die möglichen Ursachen für die einzelnen Defizite an der Plessur aufgezeigt. Bei vielen Defiziten scheint der Schwall-Sunk Betrieb des KW Litzirüti die Hauptursache zu sein. Andere Defizite dürften jedoch auf das grobe Substrat oder auf das relativ hohe Gefälle zurückzuführen zu sein. Gerade bei der Untersuchungsstrecke Litzirüti fehlt das geeignete Laichsubstrat aufgrund der steilen Morphologie. Historisch gesehen wurde dieser Abschnitt vermutlich nicht natürlich durch Forellen besiedelt, da zwischen Langwies und Litzirüti zu viele natürliche Wanderhindernisse liegen.

Grundsätzlich haben die Ergebnisse wie die guten Laichboxenversuchsergebnisse und die Ergebnisse zum Makrozoobenthos insbesondere zu den sehr sensiblen EPT-Familien gezeigt, dass die Wasserqualität und der Chemismus der Plessur kein ökologisches Defizit darstellt. Daher kann die Wasserqualität als Ursache für gewisse ökologische Defizite praktisch vollständig ausgeschlossen werden. Nachfolgend werden die Defizite der einzelnen Indikatoren ausgewiesen und diskutiert, ob die Defizite im Zusammenhang mit Schwall-Sunk stehen.

Im vorliegenden Schwall-Sunk Projekt ist eine eindeutige Zuweisung von Ursachen bei den einzelnen Defiziten besonders schwierig, da es keine Referenzuntersuchungsstrecken gibt (siehe dazu auch Kapitel 3.5).

4.6.1 F2* - Stranden von Fischen

Die Defizite bei F2* gemäss Kapitel 4.2.2 treten nur in der Untersuchungsstrecke Litzirüti auf und können eindeutig auf den Kraftwerksbetrieb zurückgeführt werden. Bei

Langwies haben die Zuflüsse von den Seitenbäche einen dämpfenden Einfluss. Jedoch beurteilt Hydra in seiner gutachterlichen Bewertung das Defizit bei Langwies stärker als gemäss Vollzugshilfe.

4.6.2 F3* - Laichareale

Die vorgefundenen Laichgruben in der Plessur zeigen, dass das Gewässer grundsätzlich zur Reproduktion geeignet ist. Die Defizite zwischen dem Stausee Isel und Pradapunt dürfte primär auf das Fehlen geeigneter Laichflächen zurückzuführen sein. Unterhalb der Tobelbäche dürfte die Kolmation, welche auch Schwall-Sunk verstärkt wird, eine weitere Ursache für die Defizite sein. In den steilen Bereichen der Plessur haben natürliche Hochwasser vermutlich einen negativen Einfluss auf das Umlagern von Laichgruben. Hydra geht davon aus, dass mit dem vorhandenen Laichsubstrat genügend Flächen eine langfristig erfolgreiche Reproduktion zur Verfügung stehen.

Die Kiesfärbversuche haben zwar gezeigt, dass der laichrelevante Kies in geringem Masse erodiert werden kann. Es wird aber davon ausgegangen, dass viele Fische in der Schwall-Sunk Strecke gar nicht oder nur beschränkt laichen, da mit dem täglichen Schwall-Sunk während der Laichperiode keine günstigen Laichbedingungen vorherrschen. Daher wird vermutet, dass eher der Laichprozess als die eigentliche Laichentwicklung durch Schwall-Sunk beeinträchtigt wird.

Es muss weiter berücksichtigt werden, dass die Erosion von Laichflächen, aber auch vom Laich an sich, auch auf natürliche Art und Weise mit der Schneeschmelze und/oder Regenereignissen im Winterhalbjahr auftreten kann. Die Reproduktion ist somit auch natürlich starken Fluktuationen ausgesetzt, welche sich mit der fortschreitenden Klimaänderung verschärfen werden.

4.6.3 F4* - Jungfischvorkommen

Die Ursachen für die tiefen Brüttingsvorkommen sind nicht eindeutig zuzuordnen. Der Schwall-Sunk Betrieb und das dadurch bedingte regelmässige Trockenfallen benetzter Flächen dürfte einen negativen Einfluss auf die Jungfische haben. Die vorgefundenen Brütlinge in der Schwall-Sunk Strecke zeigen aber auch auf, dass eine natürliche Reproduktion auf tiefem Niveau möglich ist und dass Jungfische überleben können. Die tiefen Brüttingsbestände in der Restwassertrecke veranschaulichen aber, dass auch weitere Ursachen abgesehen von Schwall-Sunk für den tiefen Zahlen verantwortlich sind.

4.6.4 F6 – Habitateignung Fische

Wie bereits in Kapitel 4.2.5 und Kapitel 4.5 erläutert, macht die vertiefte Analyse und Interpretation beim Indikator F6 kaum Sinn. Mit der Methodik gemäss Vollzugshilfe kann nach Ansicht des Projektteams nicht bestimmt werden, ob durch Schwall-Sunk Defizite bei der Habitateignung für Fische entstehen.

4.6.5 Makrozoobenthos

Wie in Kapitel 4.2.6 beschrieben, bestehen geringe ökologische Defizite beim Makrozoobenthos. Zwar dürften gewisse Individuen bei Schwall verdriftet werden und andere bei Schwall stranden, ein strukturelles Defizit konnte jedoch mit der Methodik gemäss Vollzugshilfe [1] ausgeschlossen werden. Jedoch hat die Umstellung des Betriebsregimes klare negative Auswirkungen auf die Individuendichte und die Biomasse aufgezeigt. Der Schwall-Sunk Betrieb hat somit deutlich negative Auswirkungen auf das Makrozoobenthos.

4.6.6 Q1* - Temperaturen

Hinsichtlich der Temperaturschwankungen besteht gemäss Kapitel 4.2.8 ein Schwall-Sunk bedingtes Defizit. Inwiefern diese Temperaturschwankungen zu konkreten ökologischen Defiziten bei der Fischfauna und Makrozoobenthos in der Plessur führen, lässt sich hingegen nur schwer quantifizieren.

4.7 Gutachterliche Einschätzung Defizit- und Ursachen

In [7] hat Hydra eine gutachterliche Stellungnahme zu mehreren ökologischen Fragestellungen zuhanden HTU geschrieben. In den bisherigen Kapiteln wurde auf den Inhalt dieses Gutachtens bereits teilweise drauf eingegangen. Im vorliegenden Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse nochmals explizit wiedergegeben:

Laichhabitat Forelle

Hydra beurteilt das Laichflächenangebot in der Plessur heute differenzierter als im Bericht von 2017 [11]. Die Erfahrung bei anderen Gewässern und insbesondere im Oberlauf der Moesa hat gezeigt, dass die in der Plessur vorgefundenen möglichen Laichflächen ausreichen, um hohe Brüttingsdichten hervorzurufen und um eine Population erhalten zu können. Hydra geht heute davon aus, dass das Fehlen von Laichgruben und 0+-Jungfischen in der Untersuchungsstrecke Litzirüti vor allem auf Schwall-Sunk zurückzuführen ist.

Brutboxenversuche

Die Erfolgsquote der Brutboxenversuche liegt über 50%. Das heisst, dass zwar gewisse Beeinträchtigungen vorliegen, jedoch bei ausreichend Laichgruben der Erhalt der Population gewährleistet sein sollte. Die relativ tiefen Fliessgeschwindigkeiten können den Sauerstoffeintrag limitieren. Ein erhöhter Sunkabfluss durch ein Ausgleichsbecken könnten dieses Defizit vermindern und damit die Eientwicklung begünstigen.

Jungfische

Eine natürliche Reproduktion findet in der Plessur statt. Die geringe Jungfischdichte reicht jedoch nicht aus, um eine Population selbst zu erhalten. Dies haben auch die Erhebungen durch das AJF von 2022 bestätigt.

Sapünerbach

Der Sapünerbach hat sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Fischbiologie in der Plessur. Als positiv kann der zusätzliche Abfluss und der Eintrag von Geschiebe und damit dem Sicherstellen von Laichsubstrat gewertet werden. Dagegen kann der Eintrag von Feinsedimenten auch die Kolmation fördern, was das Anlegen von Laichgruben erschwert und die Versorgung von Sauerstoff während der Eientwicklung reduzieren kann. Der Schwall-Sunk Betrieb kann den negativen Aspekt der Kolmation zusätzlich verstärken. Aus Sicht HTU überwiegt aber der positive Einfluss des Sapünerbachs den negativen Aspekt mit der Kolmation.

Hydra hat weitere folgende Fragestellungen gutachterlich beantwortet. Manche Fragestellungen gehen über die Defizit- und Ursachenanalyse hinweg und spannen bereits einen Bogen zur Zieldefinition (TP 3) (siehe Kapitel 6).

a. Wie umfangreich wäre eine natürliche Forellenreproduktion in den Abschnitten Litzirüti und Langwies ohne Wasserkraftwerk?

Eine Verringerung des Schwall-Sunk Betriebs hätte diverse positive ökologische Auswirkungen. Unter der Annahme, dass der Sunk angehoben würde, nähme die geeignete Laichfläche zu, der schädliche Einfluss der Feinsedimenteinträge nähme ab und

die Kolmation könnte weniger stark ausfallen. Dazu gäbe es deutlich weniger gestrandete Forellenlarven.

b. Gab es einen historischen Forellenbestand bei Litzirüti?

Durch die vielen natürlichen Hindernisse wird davon ausgegangen, dass oberhalb der Fassung Pradapunt keine Forellenbestand entstand, der vom Alpenrhein alimentiert wurde. Hydra geht davon aus, dass der Forellenbestand daher anthropogen entstanden ist. Die jetzt vorhandene Population ist aber sicher bereits sehr lange Zeit vorhanden. Inwiefern diese Erkenntnis einen Einfluss auf ökologische Forderungen haben kann, ist nicht zuletzt auch eine politische Frage.

c. Gäbe es eine selbsterhaltende Population im Abschnitt Langwies ohne Schwall-Sunk?

Aufgrund höherer Laichsubstratflächen kann davon ausgegangen werden, dass die negativen Kolmationsprobleme durch den Sapünerbach ausgeglichen werden können. Es kann zwar nicht sicher vorhergesagt werden, es ist jedoch davon auszugehen, dass eine selbsterhaltende Population möglich ist.

d. Nur beschränkt mögliche Erhöhung des Sunkabflusses

Eine höhere dauerbenetzte Fläche und eine bessere Durchströmung sowie eine kleinere Pegeländerungsrate hätte einen positiven Einfluss auf die natürliche Reproduktion und das Stranden von Juvenilen. Ob eine selbsterhaltende Population dadurch möglich wäre, lässt sich nicht sicher sagen.

e. Gäbe es eine wesentliche Verbesserung bei Langwies durch Schwall-sanierung?

Auch wenn die Schwall-Sanierung zu einer «guten» Bewertung bei den Indikatoren F2* und F6 führt, gibt es nach wie vor Defizite, welche die Vollzugshilfe nicht abdeckt. Eine weitere Verbesserung hinsichtlich Schwallsanierung würde eine deutliche Aufwertung der Gesamtsituation herbeiführen.

4.8 Fazit Defizit- und Ursachenanalyse

Die Resultate aus den Modellierungen und Feldaufnahmen zeigen die durch Schwall-Sunk verursachten Defizite in der Plessur unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti klar auf. Insbesondere die fischbiologischen Indikatoren weisen Defizite auf.

4.8.1 Natürliche Umweltbedingungen und Referenzzustand

Da bereits die natürlichen Umweltbedingungen in der Plessur zwischen Litzirüti und Pradapunt hohe Anforderungen an die Forellen stellen, stellt sich eine klare Abgrenzung zwischen den durch Schwall-Sunk bedingten Beeinträchtigungen und den weiteren Beeinträchtigungen als schwierig dar.

Die Plessur zwischen Litzirüti bis Pradapunt ist einerseits ein natürlicher Flusslauf mit zahlreichen Auen, womit diesem Abschnitt grundsätzlich ein hohes ökologisches Potential zugeordnet wird. Jedoch ist der Abschnitt zwischen Litzirüti bis zur Einmündung des Sapünerbachs mehrheitlich steil und es existieren nur wenige grössere und zusammenhängende Flächen geeigneten Laichsubstrates. Die Staumauer Isel unterbricht den Kontakt zur bestehenden, selbsterhaltenden Forellenpopulation oberhalb

des Stausees. Auch zwischen Langwies und Litzirüti bestehen verschiedene Wanderhindernisse für die Bachforelle, welche einen Aufstieg unmöglich machen. Im Bereich Langwies gibt es einige grössere und auch zusammenhängende Flächen mit geeignetem Laichsubstrat. Der ab Zufluss des Sapünerbachs und insbesondere ab Zufluss Frauentobelbach erhöhte bis sehr hohe Feinsedimenteintrag aus den Seitenbächen führt zu einer erhöhten Kolmation und einer verminderten Qualität des Laichsubstrats.

Unabhängig von der hydraulischen Belastung durch Schwall-Sunk bestehen somit bereits grössere naturbedingte Erschwernisse für das Aufkommen von Bachforellen in der oberen Plessur. Da keine geeignete Referenzstrecke ausgewählt und ausgewertet werden konnte, besteht keine Vergleichsmöglichkeit mit einer Schwall-Sunk unbeeinflussten Referenz. Das Abflussregime vor Regimewechsel beim Kraftwerk Litzirüti im Jahr 2017 entsprach zwar weitgehend einem Laufwasserbetrieb, jedoch wurden auch vor 2017 in den Wintermonaten wiederholt Kraftwerksabschaltungen durchgeführt (vgl. Kapitel 3.4.1) und gleichzeitig wurde ab 2019 mit der Restwasserdotations ab Stausee Isel auch der Basisabfluss erhöht. Somit kann auch der Zustand vor 2017 nur bedingt als Schwall-Sunk unbeeinflusster Referenzzustand verwendet werden.

4.8.2 Fischbiologische Felddaten

Die Brutboxenversuche aus dem Jahr 2016 (vor dem Regimewechsel) zeigen auf, dass die chemisch-physikalische Wasserqualität bei Litzirüti, Langwies und Molinis grundsätzlich geeignet ist. Auch können andere schädliche Umwelteinflüsse weitgehend ausgeschlossen werden. Die relativ guten Ergebnisse bei den Makrozoobenthosbewertungen bestätigen diese Aussagen.

Die durchgeführten Sömmerlingsbefischungen und Bestandesaufnahmen zeigen grössere Defizite beim Bestand der Jungfische auf, sowohl vor als auch nach dem Regimewechsel im Jahr 2017. Die Sömmerlingsbefischung von 2016, mit dem zuvor geltenden Besatzstopp, zeigen für Molinis einen mässigen Bestand an Jungfischen auf. Für Langwies und Litzirüti wurde der Bestand an Jungfischen 2016 als ungenügend bzw. schlecht bewertet. Bei Litzirüti konnten im Jahr 2016 kein einziger Sömmerling nachgewiesen werden, jedoch haben 4 gefangene 1+Forellen aufgezeigt, dass zumindest im Vorjahr eine natürliche Reproduktion auch bei Litzirüti stattgefunden haben muss. Es ist hervorzuheben, dass die Aufnahmen von 2016 einen Zustand weitgehend ohne Schwall-Sunk abbilden, auch wenn in den Wintermonaten Abschaltungen durchgeführt wurden. In den Wintermonaten im 2014/15 und 2015/16 wurde beim KW Litzirüti mehrheitlich ein Laufwasserbetrieb gefahren, wobei jedoch in beiden Wintern mehrfach mehrstündige Abschaltungen stattfanden, bei denen potentiell Laichgruben hätten trockenfallen können.

Die im Sommer 2022 durchgeführte Bestandesaufnahme bei Litzirüti fand unter einer wesentlich geänderten hydraulischen Situation statt, einerseits mit ausgeprägten Schwall-Sunk im Winter 2021/22 andererseits auch mit erhöhten Basisabflüssen aufgrund der Restwasserdotations ab dem Stausee Isel. Sowohl in der Schwallstrecke als auch in der oberhalb liegenden Restwasserstrecke konnte eine natürliche Reproduktion (3 bzw. 2 Brütlinge) auf sehr tiefem Niveau nachgewiesen werden.

Die Resultate der Befischungen zeigen, dass bei Litzirüti sowohl vor als auch nach dem Regimewechsel eine natürliche Reproduktion zumindest nachgewiesen werden konnte. Für eine sich selbst erhaltende Forellenpopulation ist diese jedoch nicht aus-

reichend. Unterhalb des Sapünerbachs konnten Laichgruben und Jungfische in höheren Dichten als bei Litzirüti vorgefunden werden, ob aber im heutigen Zustand ohne Besatz eine Forellenpopulation sich selbst erhalten könnte, ist unklar.

Die Abfischungsergebnisse aus dem Sommer 2022 haben zudem aufgezeigt, dass die Schwallstrecke bei Litzirüti zahlreiche, mehrere Jahre alte Adulte Bachforelle leben. Ob die Adulten aus Naturverlaichung oder aus Besatz stammen, ist nicht klar. Es zeigt jedoch, dass, wenn die Jungfische die ersten Monate überleben, die längerfristigen Überlebenschancen intakt sind.

Neben den Feldaufnahmen, können auch die Mess- und Modellierungsergebnisse Aufschluss über das durch Schwall-Sunk verursachte Defizit und somit das ökologische Potential bei einer Verringerung dieser hydraulischen Belastung geben.

4.8.3 Messungen und Modellierungen

Der Indikator F3* weist gemäss VZH Schwall-Sunk [1] bei Litzirüti ein leichtes Defizit und bei Langwies kein Defizit auf. Gemäss gutachterlicher Bewertung von Hydra unterschätzt die VZH Schwall-Sunk [1] bei Litzirüti und Langwies jedoch das Defizit des durch Schwall-Sunk verursachten Laichflächenverlusts, insbesondere auch dadurch, als dass die Frequenz bei Indikator F3* nicht berücksichtigt wird.

Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass das Defizit beim Indikator F3* insbesondere auf die zu tiefen Sunkabflüsse gegenüber dem Referenzzustand zurückgeführt werden können. Auch die gutachterliche Einschätzung geht davon aus, dass die gegenüber dem Vergleichszustand wesentlich tieferen Sunkabflüsse und der damit reduzierte Sauerstoffeintrag und die Laichflächenverluste limitierend für den Reproduktionserfolg sind.

Auch die winterlichen Schwallabflüsse sind im heutigen Zustand deutlich höher als die Maximalabflüsse im natürlichen Zustand. Gemäss Modellierungsergebnissen ist das Defizit durch die zu hohen Schwallabflüsse, und somit einer potentiellen Schädigung von Laichgruben durch Erosion, jedoch weniger problematisch als beim Sunkabfluss. Auch die Kiesfärbeversuche bestätigen, dass die Schwallabflüsse des KW Litzirüti im Winter kaum zu einer Mobilisierung von Laichsubstrat führen.

Die Resultate des Indikators F2* zeigen ein deutliches Defizit durch Stranden von larvalen Forellen bei Litzirüti auf, was auch gutachterlich von Hydra bestätigt wird. Sowohl die trockenfallenden Flächen zwischen Schwall und Sunk als auch die Pegelrückgangsraten sind gross. Bei Langwies ist hingegen das Risiko durch Stranden von larvalen Fischen bereits deutlich geringer. Aus gutachterlicher Sicht wird jedoch auch beim Abschnitt Langwies das Stranden in der larvalen Periode als defizitär bewertet.

Die Temperaturschwankungen (Q1*) verursacht durch Schwall-Sunk werden bei Litzirüti und Langwies als zu hoch bewertet.

4.8.4 Makrozoobenthos und Kolmation

Die Defizite beim Makrozoobenthos fallen bei Litzirüti, Langwies und Molinis grundsätzlich gering aus. Die Unterschiede zwischen den Resultaten vor und nach Regimewechsel im 2017 zeigen jedoch insgesamt eine Verschlechterung des Zustandes des Makrozoobenthos auf, was von WFN auch die zusätzliche hydraulische Belastung durch Schwall-Sunk zurückgeführt wird. Sowohl die Biomasse und Individuendichte sind in der Untersuchungsstrecke Litzirüti nach 2017 stark zurückgegangen.

Die Kolmationsaufnahmen zeigen keine nachweisbare Beeinflussung durch Schwall-Sunk auf. Gutachterlich geht Hydra davon aus, dass der Schwallbetrieb durch den Eintrag von Feinsediment verursachte Kolmation verstärken kann.

4.8.5 Zielzustand

Durch eine Sunkanhebung sowie eine Begrenzung der Pegelrückgangsraten können die Defizite der Indikatoren F3* und F2* verringert werden. Weiter können die Schwall-Sunk Beeinträchtigungen durch eine Schwalldämpfung und eine Begrenzung der Pegelanstiegsraten vermindert werden. Die Verringerung von Schwall-Sunk fördert die Reproduktion und könnte gemäss Hydra damit eine selbsterhaltende Population bei Litzirüti zulassen. Eine sichere Vorhersage ist allerdings nicht zu treffen. Auch bei Langwies könnte gemäss Hydra eine Verringerung von Schwall-Sunk noch zu einer wesentlichen Aufwertung der Gesamtsituation führen, auch wenn hier das Potential aufgrund der geringeren Beeinträchtigung deutlich kleiner als bei Litzirüti ausfällt.

In welchem Umfang Schwall-Sunk gedämpft werden muss, um die ökologischen Ziele zu erreichen und welcher Sanierungsumfang dazu erforderlich ist, wird in den nachfolgenden Kapiteln ausgeführt.

5. Definition repräsentativer Ganglinien (TP 2)

Für die Auslegung der Schwall-Sunk Sanierungsmassnahmen ist die Bestimmung der zukünftigen repräsentativen Abflussganglinien infolge des Kraftwerkseinsatzes für das von Schwall und Sunk betroffene Gewässer zentral. Anhand der Gegenüberstellung des hydrologischen Anforderungsprofils aus den ökologischen Zielvorgaben und der repräsentativen Abflussganglinie bei der Wasserrückgabe erfolgt die Planung der Sanierungsmassnahmen. Damit lassen sich beispielsweise das benötigte Volumen und der mögliche Betrieb eines potentiellen Rückhaltebeckens bestimmen.

Gemäss VZH Schwall-Sunk [1] sollen der Massnahmenerarbeitung als Ausgangslage grundsätzlich die Abflussganglinien der letzten 5 bis 10 Jahre zugrunde gelegt werden. Jedoch werden die Inhaber der Kraftwerke aufgefordert, Betrieb, Markt und Hydrologie kritisch zu hinterfragen.

Für das Kraftwerk Litzirüti wurde daher untersucht, ob die Betriebsdaten und die Hydrologie im Einzugsgebiet der letzten Jahre als repräsentativ für den zukünftigen Betrieb erachtet werden oder nicht. Falls dies der Fall ist, können die repräsentativen Ganglinien für die massgebenden Perioden direkt den historischen Daten entnommen werden. Wird stattdessen der Entscheid gefällt, dass der Kraftwerkseinsatz der analysierten historischen Periode nicht repräsentativ für die Zukunft ist, müssen synthetische Ganglinien konstruiert werden, welche realistische zukünftige Szenarien abbilden.

Die Resultate zum Entscheid der Repräsentativität und die gewählten Ansätze zur Festlegung der repräsentativen Ganglinien können Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2 entnommen werden.

5.1 Betriebsanalyse

Der Regimewechsel ab 2017 zeigt auf, wie unterschiedlich der Kraftwerkseinsatz bei Litzirüti gefahren werden kann. Die Berücksichtigung der Betriebsganglinien vor 2017 hätten eine wesentlich geringeren Sanierungsumfang zur Folge gehabt, als die Betriebsganglinien nach 2017 und hätten somit zu einer Unterdimensionierung der Massnahme geführt. Für die Betriebsanalyse und den Entscheid der Repräsentativität wurden aus diesem Grund ausschliesslich die Betriebsganglinien ab 2017 berücksichtigt. Auch führte der Teillastbetrieb vor 2017 zu grossen Energieeinsparungen und somit wird eine solche Betriebsweise für die Zukunft als unrealistisch eingeordnet. In Abb. 5.1 sind die mittleren täglichen Betriebsdurchflüsse sowie der minimale und maximale tägliche Durchfluss dargestellt.

Die Speicherkapazitäten sind zu gering für eine saisonale Umlagerung der Sommerzuflüsse in die Wintermonate. Entsprechend ist der Kraftwerkseinsatz massgeblich von den vorherrschenden Zuflüssen in den Stausee Isel geprägt.

Die Betriebsanalyse zeigt, dass mit Ausnahme der Frühlings- und Sommermonate mit hohen Zuflussmengen, ganzjährig ein intermittierender Kraftwerkseinsatz gefahren wird und somit Schwall-Sunk unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti verursacht wird. Während den Wintermonaten sind die Stillstandzeiten hoch und die geringen Zuflüsse werden in Abhängigkeit der Tagesganglinie der Strompreise konzentriert auf wenige Stunden am Tag verarbeitet. Im Frühling mit Einsetzen der Schneeschmelze und im Sommer während Perioden mit höheren Zuflussmengen wird ein Laufwasserbetrieb gefahren.

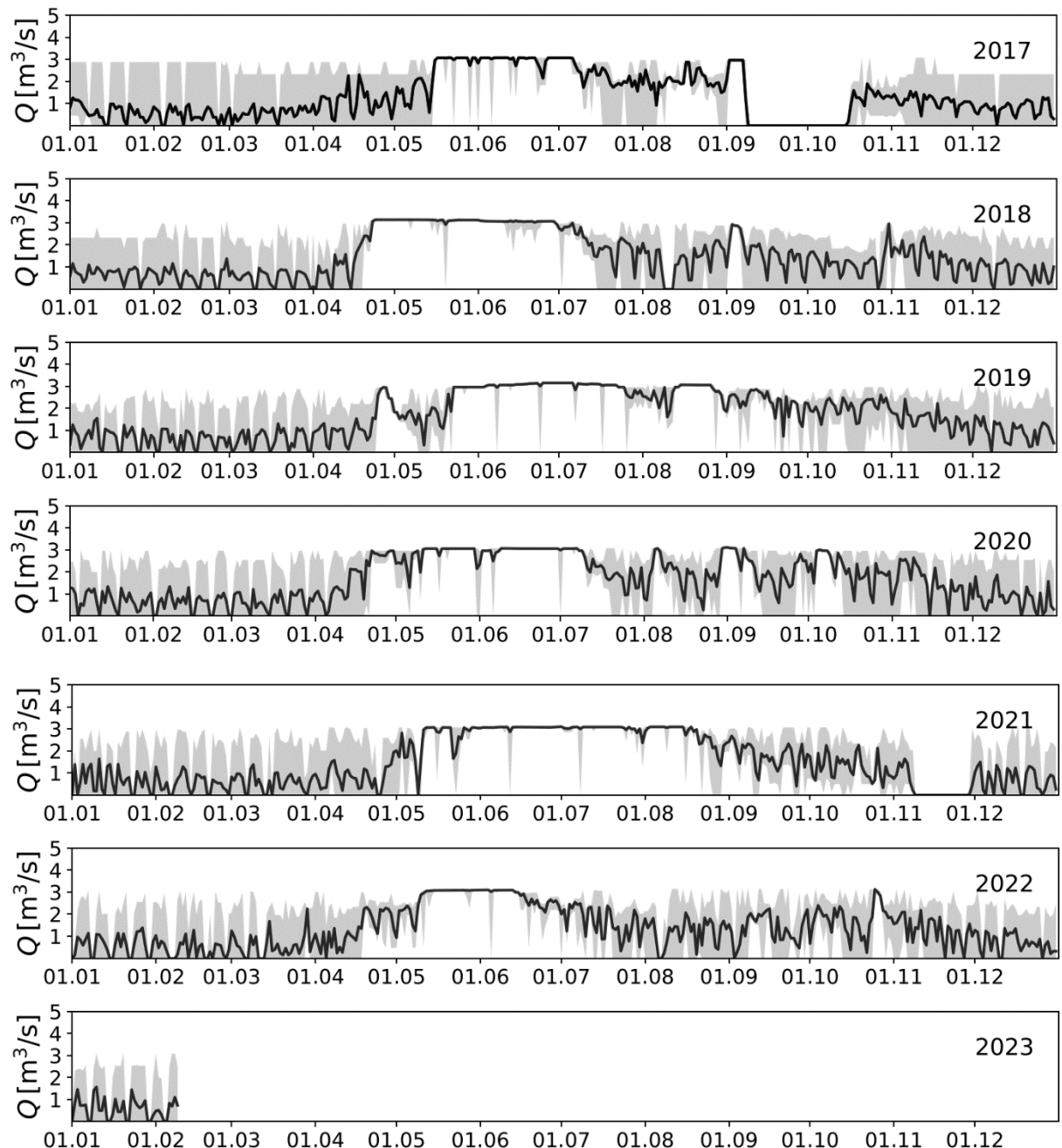


Abb. 5.1 Betriebsdurchflüsse Kraftwerk Litzirüti von 2017 bis 2023 [m^3/s]. Schwarze Linie = mittlere tägliche Durchflüsse. Grauer Bereich = Bereich zwischen minimalem und maximalem täglichem Durchfluss.

5.2 Entscheid Repräsentativität

Das Kraftwerk Litzirüti verfügt mit dem Stausee Isel über genügend grosse Speicherkapazitäten, um über einen beschränkten Zeitraum eine Produktion unabhängig von Schwankungen des Wasserdargebots zu betreiben. Zukünftige Entwicklungen im Strommarkt sowie durch den Klimawandel bedingte Veränderungen der Zuflüsse können zu Änderungen im Kraftwerkeinsatz führen und somit auch zu einem anderen Schwall-Sunk Regime unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti führen. Es stellt sich somit die Frage, ob eine Nichtberücksichtigung solcher Entwicklungen zu einer

wesentlichen Fehleinschätzung des benötigten Sanierungsumfanges führen könnte. Als kritisch wird insbesondere eine potentielle Unterdimensionierung der Sanierungsmassnahme eingestuft.

Die Betriebsanalyse zeigt, dass in den bezüglich Schwall-Sunk kritischen Winter- und Frühlingsmonaten im heutigen Betrieb regelmässige Volllastereignisse mit steilen Rückfahrraten sowie regelmässige längere Nichtbetriebsperioden (während den Wochenenden) stattfinden. Solche «Maximalereignisse» definieren den Sanierungsumfang. Bezüglich Volllasteinsatz und Rückfahrraten, werden die technischen Möglichkeiten der Anlage somit im heutigen Kraftwerkseinsatz bereits ausgeschöpft. Denkbar ist, dass sich in Zukunft bei einer wesentlichen Änderung der Volatilität der Strompreise, die Dauer von Nichtbetriebs- und/oder von Volllastperioden verlängern könnten, was einen Effekt auf den Sanierungsumfang haben könnte. Angesichts der beschränkten Speicherkapazitäten des Stausees Isel und der Abhängigkeit von den hydrologischen Randbedingungen ist jedoch auch hier eine wesentliche Veränderung unrealistisch.

Zum heutigen Zeitpunkt sind, mit Ausnahme des Ausleitkraftwerks Pradapunt, welches eine Schwall-Sunk Sanierungsmassnahme darstellt, keine wasserbaulichen Ausbauprojekte (z.B. Erhöhung der Ausbauwassermengen, neue Wasserkraftwerke, neue Wasserfassungen, etc.) oder weitere technische Projekte, welche sich auf das Schwall-Sunk Regime der Plessur auswirken, bekannt. Die Restwassersanierung nach Art. 80ff. GSchG wurde im Februar 2020 umgesetzt. Die Konzession des Kraftwerks Litzirüti läuft noch bis in das Jahr 2068.

Für das Kraftwerk Litzirüti kann somit davon ausgegangen werden, dass zukünftige Veränderungen im Strommarkt oder in der Hydrologie des Einzugsgebietes keinen wesentlich grösseren Sanierungsumfang bedingen würden. Dies, weil bereits im heutigen Betrieb, bezogen auf Schwall-Sunk, regelmässig «Maximalereignisse» stattfinden und eine wesentliche Anpassung der Dauer von Nichtbetriebs- und/oder von Volllastperioden aufgrund des kleinen Speichers kaum möglich ist. Der Betrieb der Untersuchungsperiode kann somit auch für zukünftige Perioden als repräsentativ angenommen werden. Für die Bestimmung des Sanierungsumfanges werden folglich die Betriebsdaten des Kraftwerks Litzirüti ab 2017 bis Februar 2023 verwendet.

6. Zieldefinition & Sanierungsumfang (TP 3)

6.1 Methodik – Bestimmung hydrologische Kenngrössen

Als Grundlage für die Vorauswahl der Massnahmen müssen die Ziele im Gewässer festgelegt werden. Das Vorgehen hierzu richtet sich im Grundsatz wiederum nach der VZH Schwall-Sunk [1]. Wo angezeigt und fachlich begründet, wurde von dieser abgewichen.

Das übergeordnete Ziel der Sanierung Schwall-Sunk ist gemäss VZH Schwall-Sunk [1] die Erfüllung des in Art. 39a Abs. 1 GSchG gesetzlich festgelegten Ziels, namentlich die Beseitigung der wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk. Eine wesentliche Beeinträchtigung liegt gemäss VZH Schwall-Sunk [1] vor, wenn die Abflussmenge bei Schwall mindestens 1,5-mal grösser ist als bei Sunk und die standortgerechte Menge, Zusammensetzung und Vielfalt der pflanzlichen und tierischen Lebensgemeinschaften nachteilig verändert werden (Art. 41e GSchV). Letzteres ist der Fall, wenn die Mehrheit der für die Beurteilung von Schwall-Sunk in der VZH Schwall-

Sunk [1] vorgesehenen Kernindikatoren einen «mässigen» Zustand oder ein Kernindikator einen «unbefriedigenden» oder «schlechten» Zustand aufweist.

6.1.1 Allgemeines Vorgehen Bestimmung hydrologischer Kenngrössen

Das Vorgehen zur Festlegung der Ziele ist in Abb. 6.1 schematisch dargestellt:

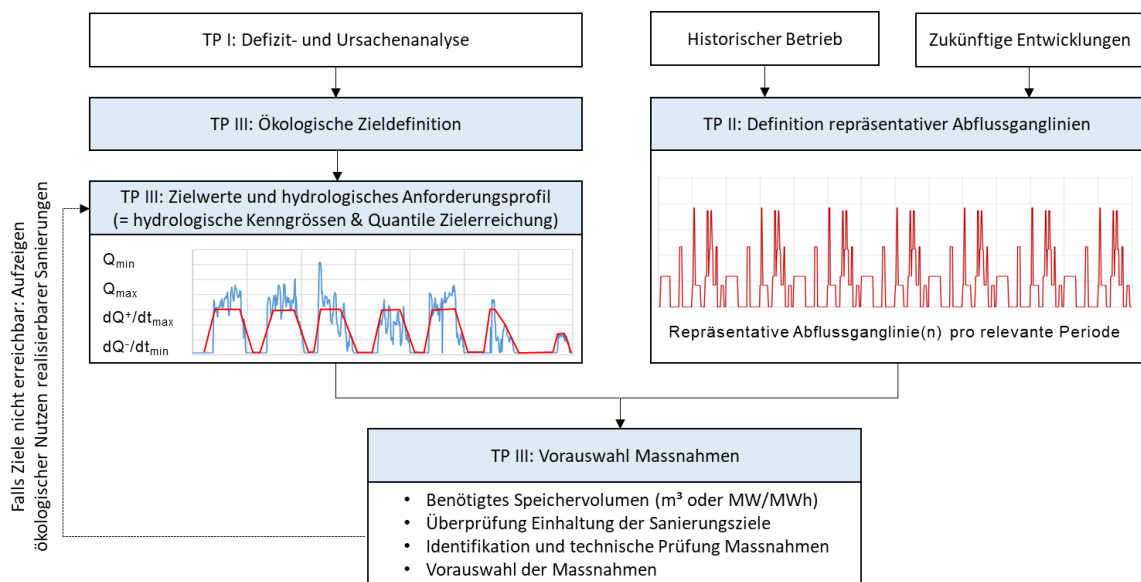


Abb. 6.1 Allgemeines Vorgehen zur Festlegung der Ziele.

Die Festlegung der Sanierungsziele und des Sanierungsumfangs ist ein iterativer Prozess. Anhand der Resultate der Defizit- und Ursachenanalyse werden in einem ersten Schritt die ökologischen Ziele definiert. Grundsätzlich wird für jeden Kernindikator ein Ziel-Zustand von «gut» angestrebt.

Anhand dieser ökologischen Zieldefinition können schliesslich die korrespondierenden hydrologischen Zielwerte und Anforderungsprofile für jede Untersuchungsstrecke definiert werden. Die Zielwerte beziehen sich dabei auf die massgebenden hydrologischen Kenngrössen der Schwall-Sunk Abflussganglinie:

Schwallabfluss [m^3/s]	F2* (benetzte Fläche), F3*, F6
Sunkabfluss [m^3/s]	F2* (benetzte Fläche), F3*, F6
Pegelrückgangsrate [$\text{m}^3/\text{s}/\text{min}$]	F2*, Q1
Pegelanstiegsrate [$\text{m}^3/\text{s}/\text{min}$]	Q1, D1 (Drift – wurde nicht untersucht)

Unter Berücksichtigung der repräsentativen Abflussganglinien aus der TP 2 (Kapitel 5) können die benötigten Volumina sowie die dazu gehörigen angepassten, gedämpften Ganglinien (Abflüsse aus Ausgleichsbecken) zur Einhaltung der Ziele abgeschätzt werden.

Die hydrologischen Kenngrössen werden für die jeweiligen Untersuchungsstrecken definiert. Aufgrund natürlicher Dämpfung des Gewässers oder Überlagerungen der Abflüsse in der Fließsstrecke zwischen der Wasserrückgabe und der Untersuchungsstrecke ist es möglich, dass die Ziele nicht exakt erreicht werden. Daher erfolgt eine Überprüfung der Einhaltung der Ziele anhand der berechneten Ganglinien mittels hydraulischer Modellierung. Sollten die Ziele nicht erreicht werden, so werden diese iterativ angepasst.

Für die untersuchten Kernindikatoren (F2*, F3*, F6, Q1*) wird in einem ersten Schritt davon ausgegangen, dass je Untersuchungsstrecke minimal der Ziel-Zustand «gut» gemäss VZH Schwall-Sunk [1] erreicht werden muss. Hierfür werden gemäss nachfolgenden Ausführungen die dafür nötigen hydrologischen Kenngrössen definiert. Die Definition der benötigten hydrologischen Kenngrössen ist nicht immer eindeutig. So können für die Einhaltung des Ziel-Zustandes der Indikatoren meist verschiedene hydrologische Kenngrössen unterschiedlich variiert werden. Für die Festlegung des optimalen hydrologischen Anforderungsprofils muss daher auch anhand der Volumenberechnungen abgeschätzt werden, mit welchen hydrologischen Anforderungen sich die Zielwerte der Indikatoren am effizientesten (mit dem geringsten Sanierungsumfang) umsetzen lassen.

Das Vorgehen zur Bestimmung der hydrologischen Kenngrössen für die einzelnen Indikatoren wird nachfolgend erläutert.

6.1.2 F2* - Stranden von Fischen

Für den Indikator F2* kann sowohl die Pegelrückgangsrates als auch die trockenfallende Fläche vermindert werden, um in der Aggregation den Zielwert zu erreichen. Im Beispiel gemäss Abb. 6.2 liegt im Ist-Zustand des Indikators F2* für das Stadium der larvalen Fische eine «schlechte» Bewertung für die Pegelrückgangsrates, jedoch eine «gute» Bewertung für die trockenfallende Fläche vor. Aggregiert resultiert dies in einer «unbefriedigenden» Bewertung (vgl. Abb. 6.2).

Kriterium: Anteil trocken fallender Fläche an gesamter benetzter Fläche

		sehr gut	gut	mässig	unbefriedigend	schlecht
Kriterium: Pegelrückgangsrates	schlecht	mässig	unbefriedigend	unbefriedigend	schlecht	schlecht
	unbefriedigend	gut	unbefriedigend	unbefriedigend	unbefriedigend	schlecht
	mässig	gut	mässig	unbefriedigend	unbefriedigend	unbefriedigend
	gut	gut	gut	gut	gut	mässig
	sehr gut	sehr gut	gut	gut	gut	gut

Abb. 6.2 Aggregation der Kriterien «trockenfallender Fläche» und «Pegelrückgangsrates» gemäss VZH Schwall-Sunk [1]. Rote Umrandung = exemplarischer Ist-Zustand. Blaue Umrandung = exemplarischer Zielzustand.

Im vorliegenden Beispiel kann die Pegelrückgangsrates von «schlecht» auf «gut» angepasst werden (d.h. Anpassung der Abflussganglinie auf eine Pegelrückgangsrates von maximal 0.3 cm/min), um aggregiert einen Zustand von «gut» zu erreichen. Alternativ kann der Anteil der trockenfallenden Fläche minimiert werden, um eine «sehr gute» Bewertung zu erreichen. Dadurch sind Pegelrückgangsrates bis zu einer Bewertung von «unbefriedigend» zulässig, um den aggregierten Zustand «gut» zu erreichen.

Trockenfallende Fläche - Hydrologische Kenngrössen

Für eine Verbesserung des Kriteriums «trockenfallende Fläche» kann (ohne Anpassung der Morphologie) der Sunk angehoben oder der Schwall vermindert werden. Die Berechnung des minimalen Sunks, resp. des maximalen Schalles für die Verminderung der trockenfallenden Fläche auf den Zielzustand kann über eine stationäre Modellierung verschiedener Abflüsse erhalten werden (vgl. Abb. 6.3).

Abb. 6.3 illustriert die Zieldefinition für die trockenfallende Fläche. Im gezeigten illustrativen Beispiel beträgt der Anteil der trockenfallenden Fläche (dF_{Ist}) im Ist-Zustand rund 39%. Um den Zielwert einer maximalen trockenfallenden Fläche von 30% zu erreichen kann der Sunk von 4 m³/s auf 8 m³/s erhöht werden. Alternativ könnte auch

der Schwall gedämpft, resp. eine Kombination von Sunkerrhöhung und Schwalldämpfung in Betracht gezogen werden.

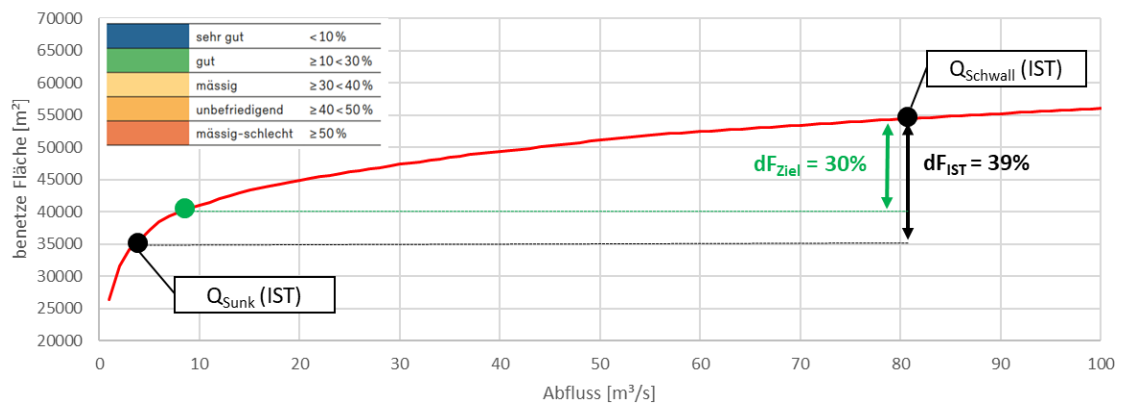


Abb. 6.3 Illustratives Beispiel Anteil trockenfallende Fläche in Abhängigkeit des Abflusses. Farblich dargestellt sind ausgewählte Schwall- und Sunkabflüsse mit Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1]. Schwarz = exemplarischer Ist-Zustand. Grün = exemplarischer Zielzustand.

Pegelrückgangsrate – Hydrologische Kenngrössen

Die in der VZH Schwall-Sunk [1] beschriebene Methodik kann für Messdaten direkt angewendet werden. Bei der Auswertung einer hydraulischen Modellierung können Ganglinien der Pegel für jede Zelle, resp. jedes Querprofil des Modelles ausgewertet werden, was pro Untersuchungsstrecke zu einer hohen Anzahl von Ganglinien führt. Für die effektive Bewertung der Untersuchungsstrecke müssen diese Ganglinien jeweils aggregiert werden.

Für die Einhaltung einer definierten Pegelrückgangsrate können bei höheren Abflüssen höhere Abflussänderungsraten gefahren werden. Zulässige Abflussänderungsraten müssen daher in Abhängigkeit des Abflusses und der Morphologie definiert werden.

In der VZH Schwall-Sunk [1] sind die Wertfunktionen der Pegelrückgangsraten für die larvale und juvenile Phase festgelegt. Diese Phasen sind jedoch nicht weiter erläutert. So erscheint ein rascher Wechsel zwischen diesen zwei Perioden aufgrund des grossen Unterschieds bei der Wertefunktion (Faktor 10) auch nicht sinnvoll. Die Wertfunktionen für eine Übergangsphase sowie die Dauer aller Perioden hat Axpo zusammen mit den Gewässerökologen der Hydra AG erarbeitet. In Absprache mit Hydra AG wurden die gleichen Werte und Perioden wie für die Schwall-Sunk Auswertungen am Vorderrhein verwendet. Die maximal zulässigen Pegelrückgangsraten für die Forellen sind in Tab. 6.1 dargestellt.

Phase	Fischart	Periodendauer	sehr gut	gut	mässig	unbefriedigend	schlecht
Larvale	Forelle	16. März – 15. Mai	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5	>0.5
Übergang	Forelle	16. Mai – 31. Juli	<0.5	<1	<1.5	<2	>2
Juvenile	Forelle	1. Aug. – 30. Sep.	<1.5	<3	<4.5	<6	>6

Tab. 6.1 Wertfunktionen der Pegelrückgangsraten in cm/min für Forellen in der larvalen, juvenilen oder Übergangsphase.

Ausgehend von der definierten maximalen Pegeländerungsrate, kann für jede Zelle (im 2D-Modell) die maximal zulässige Abflussänderungsrate für einen bestimmten

Abfluss berechnet werden. Zur Berechnung wird die PQ-Beziehung jeder Zelle benötigt, welche über die stationäre Modellierung verschiedener Abflüsse ermittelt werden kann. Des Weiteren wird berücksichtigt, dass ein Stranden nur kurz vor dem Trockenfallen möglich ist. Pro Abflussschritt werden daher nur diejenigen Zellen berücksichtigt, welche trockenfallen oder eine kleine Wassertiefe aufweisen. Unter Rücksprache mit Experten wird dies für larvale wie auch für juvenile Fische auf jeweils die letzten 20 cm gesetzt. Tab. 6.2 zeigt ein Rechenbeispiel zur Bestimmung der maximalen Abflussänderungsrate (dQ/dt).

Variable	Q _{Start}	Q _{Ende}	P _{Start}	P _{Ende}	dQ	dP [m]	dt(dP _{max})	dQ/dt
Einheit	m ³ /s	m ³ /s	m	m	m ³ /s	m	sec	m ³ /s/min
	140	120	2.707	2.567	20	0.14	2'800	0.43
	120	105	2.567	2.454	15	0.11	2'260	0.40

Tab. 6.2 Rechenbeispiel maximale zulässige Abflussänderungsrate dQ/dt mit einer maximalen Pegeländerungsrate $dP_{max} = 0.3 \text{ cm/min}$.

Es gilt:

$$dt(dP_{max}) = \frac{dP}{dP_{max}} \quad (\text{I})$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dt(dP_{max})} \quad (\text{II}),$$

wobei dP_{max} die maximale zulässige Pegeländerungsrate beschreibt.

Für die Festlegung der maximalen Abflussänderungsraten je Abfluss für eine gesamte Untersuchungsstrecke muss berücksichtigt werden, dass für jede Zelle innerhalb der Untersuchungsstrecke unterschiedliche Abflussänderungsraten berechnet werden. Je nach Morphologie werden für eine komplette Sanierung über die gesamte Untersuchungsstrecke (Zielerfüllung in jeder Zelle) sehr kleine Abflussänderungsraten benötigt. Ist dies nur auf wenige Zellen zurückzuführen, kann ein Grenzwert eingeführt werden, mit welchem eine gewisse Anzahl von Zellen nicht berücksichtigt werden. In den vom BAFU bereits genehmigten Projekten an der Rhone und der Muota wurden hier jeweils 80% der Zellen berücksichtigt. Dieser Wert wurde auch für die vorliegenden Berechnungen verwendet.

Wird die Berechnung für verschiedene Abflüsse durchgeführt, erhält man ein hydrologisches Anforderungsprofil in m³/s/min, welches die maximalen Abflussänderungsraten je Abflussbereich definiert.

6.1.3 F3* - Laichareale

Der Indikator F3* kann sowohl durch eine Schwallreduktion als auch durch eine Sunkerhöhung verbessert werden. Dadurch können die erodierten Flächen resp. die trockenfallenden Flächen reduziert und die hydrologisch geeigneten Laichareale beeinflusst werden. Abb. 4.26 zeigte am Beispiel der Untersuchungsstrecke Litzirüti die Fläche der hydraulisch geeigneten Laichareale für die Bachforelle in Abhängigkeit des Schwall- und Sunkabflusses.

Um den Einfluss einer Schwallreduktion resp. einer Sunkerhöhung zu evaluieren, wird die Auswertung des Indikators F3* für eine Vielzahl verschiedener Kombinationen von Schwall- und Sunkabflüssen durchgeführt. Daraus können die zulässigen Abflüsse zur Einhaltung eines maximalen Flächenverlustes gegenüber dem hydrologischen Vergleichszustand (vgl. Kapitel 3.8.5) von 30% (Bewertung «gut») gemäss VZH Schwall-

Sunk [1] für die Bachforelle ermittelt werden. Im untenstehenden Beispiel für die Untersuchungsstrecke Litzirüti in Abb. 6.4 kann z.B. mit einer Sunkanhebung von heute 0.16 m³/s auf 0.24 m³/s eine Bewertung von «gut» erreicht werden. Alternativ kann auch eine Kombination von Schwallreduktion und Sunkerhöhung zur gleichen Bewertung führen.

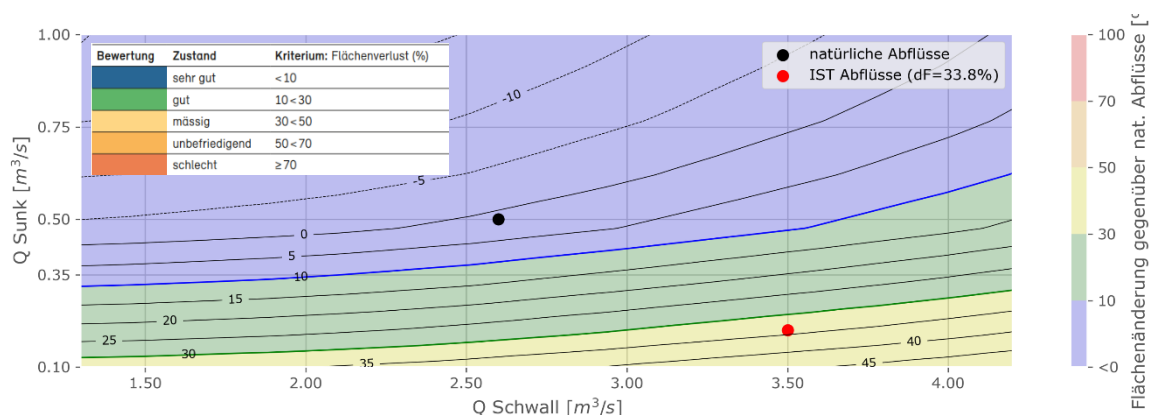


Abb. 6.4 Beispiel Zieldefinition F3* in der Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Bachforelle. Flächenänderung [%] für verschiedene Kombinationen von Schwall- und Sunkabflüssen gegenüber dem Referenzzustand. Die Kombinationen von Schwall und Sunkabflüsse für einen max. Flächenverlust von 30% können direkt aus der Grafik ausgelesen werden.

Inwiefern der definierte Grenzwert von 30% für eine Bewertung von «gut» für die gegenüber der VZH Schwall-Sunk [1] angepassten Methode mit dem Vergleich der Flächen über alle untersuchten Abflüsse und nicht nur der Vergleich zwischen Sunk-Abfluss und einer entsprechenden Referenz anwendbar ist, ist schwer zu beurteilen. Die von Axpo angewendete Methode erscheint jedoch deutlich robuster und weniger anfällig auf die hydrologischen Unsicherheiten (vgl. Kapitel 4.5). Durch den Vergleich aller Abflüsse ist der Flächenverlust tendenziell grösser als beim Vergleich einzelner, ausgewählter Abflüsse. Entsprechend scheint man mit der Anwendung des Grenzwerts von 30% eher auf der vorsichtigen Seite. Gerade in knappen Fällen gilt es dies jedoch zu berücksichtigen und den Flächenverlust entsprechend nicht bis auf die letzte Kommastelle sanieren zu wollen.

6.1.4 F6 – Habitateignung Fische

Abb. 6.5 zeigt die Abschätzung der Zielwerte (Sunkabfluss, Schwallabfluss) bei Schwall und Sunk bei Litzirüti für adulte Forellen im Februar (rote Linie). Im Zustand mit natürlicher Hydrologie wären bei Sunk rund 3'100 m² geeignete Habitatflächen, mit der heutigen Hydrologie rund 1'800 m² verfügbar. Dies resultiert in einer Flächenänderung von 58%. Um einen «guten» Zustand betreffend Habitateignung vorzufinden, darf die Flächenänderung gegenüber dem Vergleichszustand jedoch maximal 20% betragen. Dies entspricht gemäss Abb. 6.5 einem min. Sunkabfluss (40%-Quantil) von rund 0.3 m³/s. Zur Erreichung der Zielklasse gut, müsste somit in den Wintermonaten ein minimaler Sunkabfluss (40%-Quantil) von 0.3 m³/s bei Litzirüti eingehalten werden.

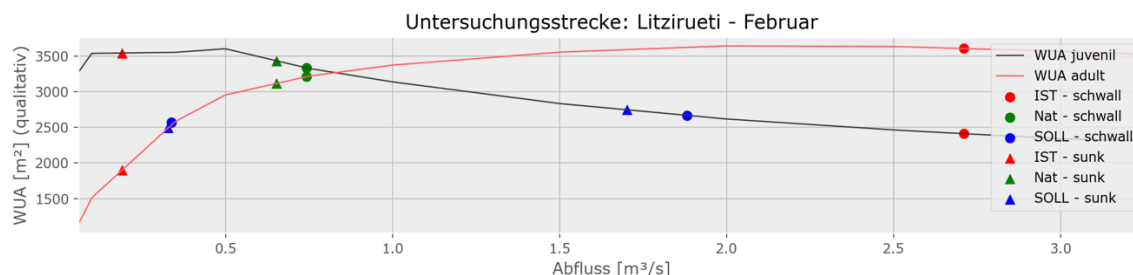


Abb. 6.5 Zieldefinition F6 bei Litzirüti für den Monat Februar.

6.1.5 Q1* - Temperatur

Der Indikator Q1* bewertet die Temperaturänderungsraten in C°/h in Abhängigkeit des Gewässertyps. Diese ist direkt abhängig von den vorherrschenden Abflüssen, deren Wassertemperatur und auch der Tages- und Jahreszeit, wodurch sie durch sämtliche hydrologischen Kenngrößen beeinflusst werden kann. Zur Verbesserung des Indikators Q1* werden jedoch vorzugsweise die Abflussänderungsraten (Anstieg und Rückgang) beeinflusst.

Bei Vorhandensein von Zeitreihen mit Abflüssen $Q(t)$ und Wassertemperaturen $T(t)$ errechnet sich die prognostizierte Temperatur unterhalb der Einleitung des Schwallwassers wie folgt [1]:

$$T(t) \cong \frac{T(t)_{Zufluss} \cdot Q(t)_{Zufluss} + T(t)_{KW} \cdot Q(t)_{KW}}{Q(t)_{Zufluss} + Q(t)_{KW}} \quad (I).$$

Näherungsweise können die Temperaturänderungsraten $TR_{Schwall-Sunk}$ über typische Abfluss- und Temperaturdaten der Jahreszeiten Q_{Sunk} und T_{Sunk} und die Ausbaumassermenge Q_A und die Temperatur des Triebwassers T_{KW} abgeschätzt werden:

$$TR_{Schwall-Sunk} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\frac{T_{Sunk} \cdot Q_{Sunk} + T_{KW} \cdot Q_A}{Q_{Sunk} + Q_A} - T_{Sunk}}{\Delta t} \quad (II).$$

Vereinfacht kann mit Formel II die Temperaturänderungsrate $TR_{Schwall-Sunk}$ berechnet werden, wobei jeweils von einer kompletten Durchmischung ausgegangen wird. Unter Vernachlässigung des Korrekturfaktors wird gemäss VZH Schwall-Sunk [1] eine Temperaturänderungsrate von maximal 2.5°C/h als «gut» bewertet. Mit Hilfe dieser Annahme, kann die maximal zulässige Abflussänderungsrate in m³/s/min anhand Formel II abgeschätzt werden.

6.1.6 Berücksichtigung Vergleichszustand

Die Festlegung der hydrologischen Zielwerte soll grundsätzlich basierend auf der Zieldefinition der Kernindikatoren erfolgen. Jedoch ist es nicht in jedem Fall zielführend, ausschliesslich die Methoden nach Kapitel 6.1.2 bis 6.1.5 anzuwenden. Aus Sicht Axpo soll das Ziel der Schwall-Sunk Sanierung eine Annäherung der Hydrologie an den natürlichen Zustand sein. Neben der Einhaltung der Zielwerte der Indikatoren mit einem möglichst effizienten (bzw. geringem) Sanierungsumfang soll bei der Festlegung des hydrologischen Anforderungsprofils der hydrologische Vergleichszustand berücksichtigt werden.

6.2 Methodik – Abschätzung Sanierungsumfang

Um die wesentliche Beeinträchtigung von Schwall-Sunk mit baulichen Sanierungsmassnahmen zu beheben, wird ein bestimmtes Retentionsvolumen direkt bei oder

nahe der Wasserrückgabe benötigt. Grundsätzlich sind auch andere Sanierungsmassnahmen denkbar (z.B. Ausleitungsstollen bzw. -kraftwerk, morphologische Massnahmen, betriebliche Massnahmen, Batterien etc.), welche nicht in Form eines Volumens ausgedrückt werden können. Um die Grössenordnung des Sanierungsbedarfs zu vergleichen, eignet sich das notwendige Retentionsvolumen jedoch am besten.

Die Abschätzung des erforderlichen Retentionsvolumens und des Betriebs eines Rückhaltebeckens erfolgt durch die Gegenüberstellung der repräsentativen Abflussganglinie (Summe des Basisabflusses in der Plessur und der Betriebsabflüsse des Kraftwerks Litzirüti) mit den hydrologischen Zielwerten in den Untersuchungsstrecken der Plessur. Im Folgenden werden die Methodik und die Grundlagen für die Volumenabschätzung beschrieben.

6.2.1 Abflussganglinien

Wie in Kapitel 5 beschrieben, werden für die Abschätzung des Sanierungsumfangs die Betriebsdaten des Kraftwerk Litzirüti ab 2017 bis Februar 2023 verwendet. Die Abflussganglinien bei den zwei Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies werden mittels instationärer 1D-Modellierung unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.8 getroffenen Annahmen bestimmt.

6.2.2 Hydrologisches Anforderungsprofil

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, ist die Festlegung der einzuhaltenden hydrologischen Anforderungen für die Wasserrückgaben ein iterativer Prozess. Basierend auf den festgelegten hydrologischen Anforderungen zur Erreichung der Indikatorzielwerte werden gemäss Kapitel 6.1.2 bis 6.1.5 für jede Untersuchungsstrecke die hydrologischen Zielwerte definiert. Anschliessend wird für die Wasserrückgabe Litzirüti eine für die Volumenberechnung relevante Untersuchungsstrecke zugeordnet und somit ein hydrologisches Anforderungsprofil definiert. Die Zuordnung muss so erfolgen, dass die Zielwerte in allen Untersuchungsstrecken eingehalten werden kann. Mittels hydraulischer Modellierung erfolgt eine Überprüfung, ob die Ziele mit den berechneten gedämpften Betriebsganglinien eingehalten werden können. Werden die Ziele nicht erreicht, muss das hydrologische Anforderungsprofil iterativ angepasst werden.

6.2.3 Methodik Volumenberechnung

Mathematische Optimierung

Das benötigte Retentionsvolumen wird mit einem auf Python und AMPL basierenden Berechnungstool (nachfolgend Volumencode genannt) bestimmt, welches durch Axpo erstellt wurde. Das Tool basiert auf einer mathematischen Minimierung einer Zielfunktion (Volumen) unter Einhaltung der verschiedenen definierten Randbedingungen gemäss den hydrologischen Anforderungen bei der Wasserrückgabe.

Für ein definiertes Abflussszenario (Kapitel 6.2.1) wird das für die Einhaltung des hydrologischen Anforderungsprofils (Kapitel 6.2.2) benötigte Retentionsvolumen berechnet.

Prognosedauer

Ein wichtiger Parameter bei der Berechnung des benötigten Retentionsvolumens ist der Optimierungszeitraum respektive die Prognosedauer, für welche die zukünftige Fahrweise des Kraftwerks bekannt ist. Je grösser die Prognosedauer, desto optimierter kann ein Retentionsbecken bewirtschaftet werden und desto geringer ist das benötigte Retentionsvolumen. In der Realität sind bereits Wochen vor dem Produktionszeitpunkt die ersten Fahrpläne für die Kraftwerksanlagen erstellt. Je näher der Produktionszeitpunkt kommt, umso detaillierter werden die Fahrpläne ausgearbeitet und

desto grösser wird die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrplan für ein Kraftwerk auch tatsächlich so gefahren wird. Jedoch besteht sogar noch Minuten vor der effektiven Produktion die Möglichkeit, dass ein Fahrplan geändert wird. Eine allgemeine Festlegung der Prognosedauer, für welche die zukünftige Fahrweise vollständig bekannt ist, ist folglich nicht möglich. Zudem ist die Prognosedauer ein Modellparameter für die Volumenberechnung und kann daher auch nicht ausschliesslich basierend auf der in der Realität existierenden Prognosedauer abgeschätzt werden, auch wenn eine solche eindeutige Dauer bekannt wäre.

Für die Wahl der Prognosedauer sind für die Volumenberechnung daher begründete Annahmen zu treffen. Für alle im Bericht dokumentierten Volumenberechnungen wurde eine Prognosedauer von 2 Stunden gewählt. Eine Validierung des Volumencodes mit Betriebsdaten des Kraftwerk Linthals und des bestehenden Ausgleichsbeckens Linthal (wo bereits seit mehreren Jahren Schwall-Sunk Vorgaben eingehalten werden müssen) hat gezeigt, dass die Wahl dieser Prognosedauer eine sinnvolle Annahme ist. Eine Analyse verschiedener Volumenberechnungen hat gezeigt, dass die Wahl einer wesentlich kleineren Prognosedauer als 2 Stunden zu einer als unrealistisch eingeschätzten Fahrweise des Ausgleichsbeckens führen kann. Bei dem Schwall-Sunk Sanierungen am Rhein wurde die für die Volumenberechnungen ebenfalls eine Prognosedauer von 2 Stunden verwendet.

Wochenweise Bilanzierung

Für die Volumenberechnung wird eine wochenweise Bilanzierung durchgeführt. Für jede Woche wird für das verwendete Betriebsszenario der theoretische maximale und minimale Volumenstand berechnet. Die Differenz daraus ergibt das benötigte Retentionsvolumen für jede Woche für die analysierte Periode. Eine Bilanzierung wäre auch über kürzere (z.B. tagesweise) oder längere (z.B. monatsweise) Zeitabschnitte möglich. Wird der Zeitabschnitt zu kurz gewählt, steigt jedoch das Risiko, dass das benötigte Volumina unterschätzt wird. Beispielweise, wenn eine Zu- oder Abnahme des Füllstandes länger als ein Tag dauert. Wird der Zeitabschnitt zu lange gewählt, besteht das Risiko, dass das benötigte Volumina überschätzt wird. Beispielsweise, wenn Perioden mit unterschiedlichen Randbedingungen miteinander verglichen werden.

Damit die gemäss Kapitel 6.1 festgelegten Ziele erfüllt werden können, muss das hydrologische Anforderungsprofil grundsätzlich in jeder Woche im untersuchten Zeitraum eingehalten werden. Folglich entspricht das benötigte Sanierungsvolumen dem 100%-Quantil der berechneten wöchentlichen Retentionsvolumina.

Gedämpfte Abflussganglinie

Neben dem Resultat des benötigten Sanierungsvolumens wird bei der Volumenberechnung auch die gedämpfte Abflussganglinie (unter Einhaltung der hydrologischen Vorgaben) berechnet. Mit dieser Abflussganglinie kann (gemäss Vorgehen in Kapitel 6.1.1) mittels der hydraulischen Modellierungen berechnet werden, wie sich die Dämpfung auf die Bewertung der Indikatoren auswirkt. Anhand der gedämpften Abflussganglinie kann folglich überprüft werden, ob die hydrologischen Zielwerte im Gewässer eingehalten werden können, oder ob das hydrologische Anforderungsprofil bei der Wasserrückgabe angepasst werden muss.

6.2.4 Optimierung Volumenbewirtschaftung

Das erforderliche Sanierungsvolumen wird (im Normalfall) durch einen massgebenden Indikator für eine Woche mit dem maximal berechneten Volumen definiert. Bei-

spielsweise kann das grösste Volumen durch die Vorgaben für die Pegelrückgangsraten für larvale Bachforellen für den Kraftwerkseinsatz in einer Märzwoche definiert werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass für den restlichen Zeitraum bzw. für die Einhaltung eines anderen Indikators auch ein kleineres Sanierungsvolumen ausreichend wäre. Das maximal erforderliche Volumen kann folglich für den restlichen Zeitraum und für die weiteren nicht volumendefinierenden Indikatoren optimiert bewirtschaftet werden.

Um den vollständigen Nutzen eines bestimmten Retentionsvolumens über das ganze Jahr zu evaluieren, wurde basierend auf dem entwickelten Volumencode ein zweiter «Optimierungscode» entwickelt. Ziel des «Optimierungscode» ist die ganzjährige Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Retentionsvolumens, welches im ersten Schritt mit dem Volumencode berechnet worden ist.

Der «Optimierungscode» berechnet die gedämpfte Ganglinie unter Einhaltung des zur Verfügung stehenden bzw. des definierten Retentionsvolumens neu. Dabei werden in jeder Woche schrittweise die hydrologischen Randbedingungen verschärft (oder entschärft), bis das Retentionsvolumen ausgeschöpft ist.

6.3 Resultate – Bestimmung hydrologische Kenngrössen

6.3.1 F2* - Stranden von Fischen

Der Indikator F2* - Stranden der Fische gehört aufgrund seiner ökologischen Relevanz zu den wichtigsten Indikatoren. Die Sanierung dieses Indikators führt zu einer verminderten hydrologischen Beeinträchtigung durch Schwall-Sunk und verringert somit insgesamt die negativen Auswirkungen durch Schwall-Sunk auf das gesamte Ökosystem (und nicht ausschliesslich auf das Stranden von Fischen). Für die Sanierung des Indikators können einerseits die Pegelrückgangsraten reduziert und andererseits die Änderung der benetzten Fläche zwischen Schwall und Sunk vermindert werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen sowie die ermittelten Zielwerte dieser Parameter erläutert.

Die Modellierungsergebnisse haben gezeigt, dass die Ziele für den Indikator F2* mit einer reinen Reduktion der Pegelrückgangsraten wesentlich effizienter erreicht werden können als mit einer Beschränkung der Differenz zwischen Schwall und Sunk (Amplitude). Die Pegelrückgangsraten betreffen immer nur ein Ereignis des Rückgangs von Schwall zu Sunk und sind zeitlich daher klar begrenzt. Der Sanierungsumfang ist dadurch deutlich berechenbarer. Für die Erreichung der Ziele des Indikators F2* wurden daher ausschliesslich hydrologische Kenngrössen für die Pegelrückgangsraten definiert. Durch die Einführung einer Sunkanhebung zur Einhaltung der Ziele für F3* (vgl. Kapitel 6.3.2) und insbesondere durch eine optimierte Volumenbewirtschaftung wird jedoch auch der Anteil trockenfallender Fläche verringert.

Für alle Untersuchungsstrecken und alle Perioden ist der aggregierte Zielwert «gut» zu erreichen. Wird der Anteil trockenfallender Flächen mit «schlecht» bewertet, muss die Pegelrückgangsraten mit «sehr gut» bewertet werden, um aggregiert die Zielklasse «gut» zu erreichen. Wird der Anteil trockenfallender Flächen mit «gut», «mässig» oder «unbefriedigend» bewertet, muss die Pegelrückgangsraten mit «gut» bewertet werden, um aggregiert die Zielklasse «gut» zu erreichen (vgl. Tab. 6.2).

Pegelrückgangsraten

In Abhängigkeit der trockenfallenden Fläche pro Untersuchungsstrecke können entsprechend die Zielwerte (hydrologische Kenngrössen) für die Pegelrückgangsraten

für die Sanierung des Indikators F2* auf den Zustand «gut» in den Untersuchungsstrecken definiert werden (vgl. Tab. 6.3).

Untersuchungsstrecke	Fischart	Beurteilung IST – Zustand (1D-Modell – flächig 80%)						Zielwert max. Pegelrückgangsrates		
		larval		Übergang		juvenil		dP-larval	dP-Übergang	dP-juvenil
		dF	dP	dF	dP	dF	dP	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]
Litzirüti	Bachforelle							0.3	1	3
Langwies	Bachforelle							0.3	1	3

Tab. 6.3 Hydrologische Kenngrössen (maximale Pegelrückgangsrates (dP) und Anteil trockenfallende Flächen (dF)) damit der Indikator F2* aggregiert den Zustand "gut" erreicht.

Anhand der definierten maximalen Pegelrückgangsrates können die korrespondierenden Abflussänderungsrates anhand der PQ-Beziehungen in den jeweiligen Untersuchungsstrecken berechnet werden. Abb. 6.6 zeigt die maximalen Abflussänderungsrates für larvale Fische in Abhängigkeit des vorherrschenden Abflusses in den zwei Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies.

Die berechneten maximalen Abflussänderungsrates sind aufgrund der Morphologie stark abhängig vom vorherrschenden Abfluss im Gewässer. Die Änderung des Abflusses um 0.1 m³/s verursacht bei hohem Abfluss im Gewässer deutlich kleinere Änderungen des Pegels als dies bei tiefen Abflüssen im Gewässer der Fall ist. Aufgrund der Morphologie ergeben sich unterschiedlich strenge Zielwerte für die Abflussrückgangsrates je Untersuchungsstrecke in Abhängigkeit des vorherrschenden Abflusses.

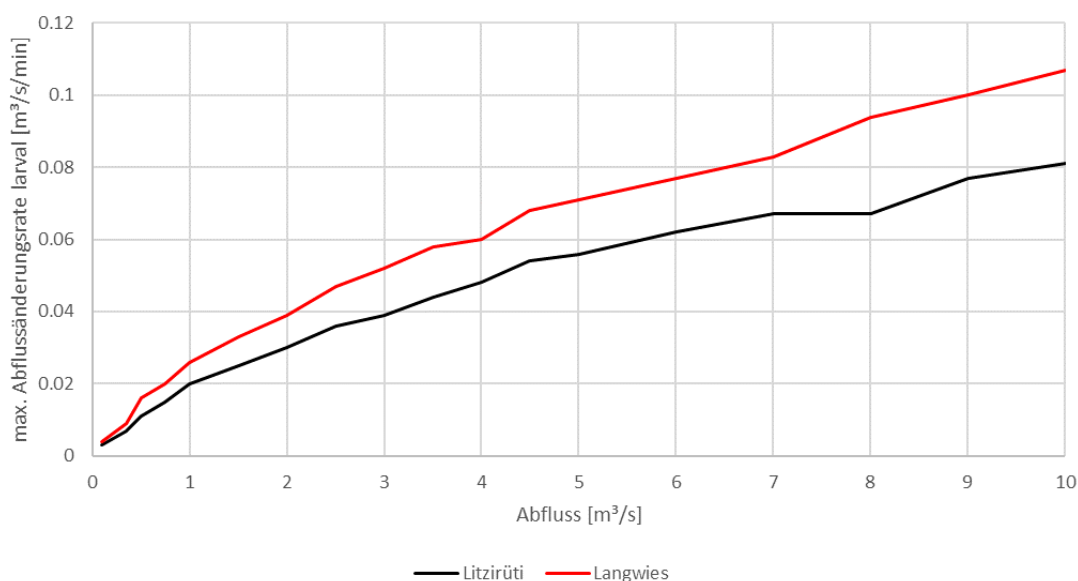


Abb. 6.6 Maximale Abflussänderungsrate in Abhängigkeit des Abflusses für die larvale Periode für die Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies.

Trockenfallende Flächen

Betrachtet man den relativen Flächenverlust an benetzten Flächen in den unterschiedlichen Abflussbereichen (Abb. 6.7), ist ersichtlich, dass bei den tiefen Abflussbereichen die grössten Flächenverluste zwischen Schwall und Sunk entstehen. Die grössten Flächenanteile fallen also ab einem Abfluss unter $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ trocken. Aus diesem Grund weisen insbesondere die tiefen Abflussbereiche ein erhöhtes Strandrungsrisiko für die Fische auf. Für die Zieldefinition des Indikators F2* wurden die trockenfallenden Flächen, wie oben beschrieben, nicht direkt (bzw. nur teilweise über den Indikator F3*) berücksichtigt.

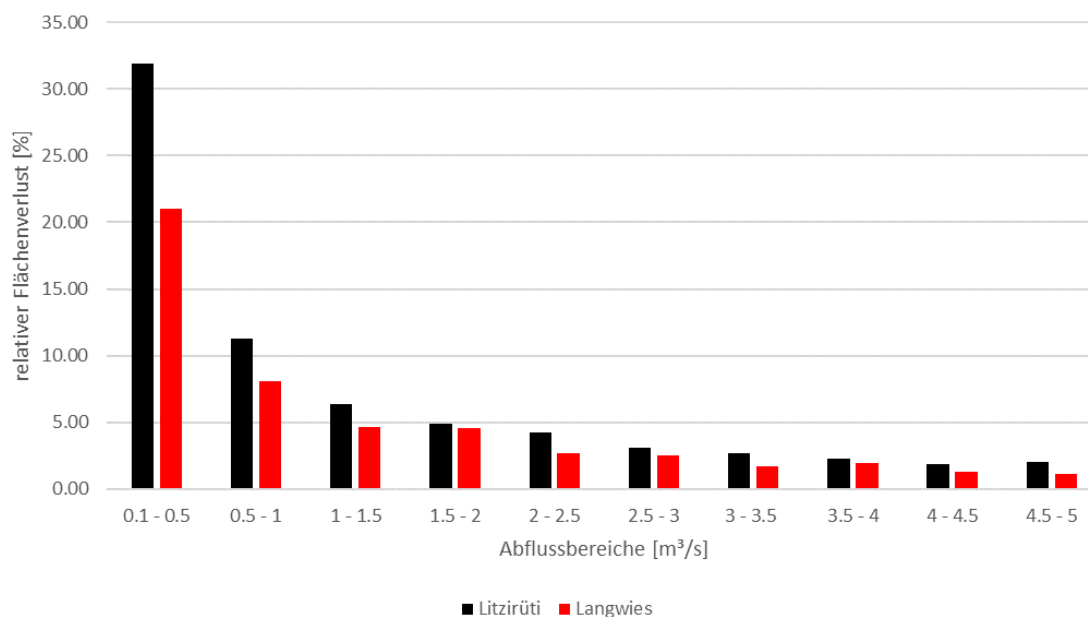


Abb. 6.7 Relativer Flächenverlust je Abflussbereich (in $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ Schritten).

6.3.2 F3* - Laichareale

Die Defizitanalyse zeigt, dass mit dem heutigen Abflussregime bei der Untersuchungsstrecke Litzirüti der Indikator F3* mit «mässig» bewertet wird. Die Untersuchungsstrecke Langwies weist kein Defizit bezüglich dem Indikator F3* auf.

Abb. 6.8 zeigt die Bewertung von F3* gemäss VZH Schwall-Sunk [1] (prozentualer Flächenverlust im Ist-Zustand gegenüber Vergleichszustand) für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Bachforelle sowie verschiedene Kombinationen von Schwall- und Sunk zur Zielerreichung auf. Daraus lassen sich sämtliche mögliche Kombinationen von erforderlichen Schwall- und Sunkabflüssen ableiten, welche zu einer «guten» Bewertung des Indikators F3* führen würden (grüne Linie in den Abbildungen).

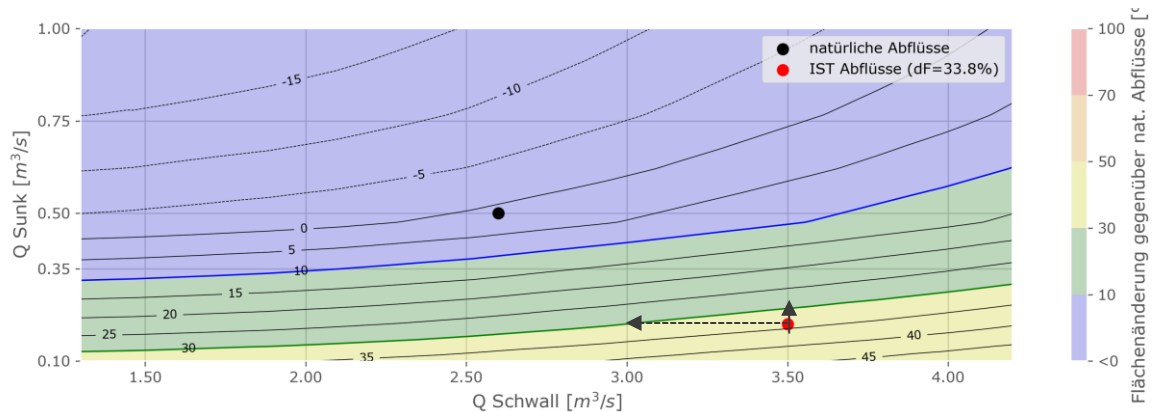


Abb. 6.8 Zieldefinition Indikator F3* für die Untersuchungsstrecke Litzirüti. Flächenänderung [%] für verschiedene Kombinationen von Schwall- und Sunkabflüssen gegenüber dem Referenzzustand.

In Abb. 6.8 ist ersichtlich, dass in der Untersuchungsstrecke Litzirüti mit einer reinen Sunkanhebung um ungefähr $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ auf ca. $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$) der Zustand «gut» erreicht werden kann (schwarzer Pfeil). Alternativ kann der Zustand «gut» auch mit einer Schwallreduktion um ungefähr $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht werden (gestrichelter Pfeil).

Für die Dimensionierung des Sanierungsumfangs und die Einhaltung der Ziele für den Indikator F3* kann folglich eine Sunkanhebung auf mindestens $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ oder eine Schwallreduktion um ungefähr $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ oder eine Kombination berücksichtigt werden. Die Modellierungsergebnisse haben gezeigt, dass die effizienteste Sanierungsvariante für den Indikator F3* die Sunkanhebung auf $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ darstellt (vgl. Kapitel 6.4.3).

Durch die Volumenoptimierung kann der Sunkabfluss jedoch über weite Perioden wesentlich stärker angehoben werden und zusätzlich auch der Schwallabfluss wesentlich reduziert werden.

6.3.3 F6 – Habitateignung

Die Auswertungen für F6 zeigen, dass ein Defizit bei Litzirüti besteht für die adulten Bachforellen in den Wintermonaten bei Sunkabflüssen (Auswertung für den Monat Februar). In den anderen untersuchten Monaten und auch bei Schwallabflüssen sowie bei juvenilen Fischen bestehen für F6 keine Defizite. Auch für die Untersuchungsstrecke Langwies bestehen für F6 keine Defizite.

Um Die Zielklasse «gut» zu erreichen für Sunkabflüsse bei Litzirüti im Februar, müsste das 40%-Quantil der Abflüsse für diese Periode bei Litzirüti auf mindestens $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ angehoben werden (vgl. Kapitel 6.1.4). Um Die Zielklasse «mässig» zu erreichen für Sunkabflüsse bei Litzirüti im Februar, müsste das 40%-Quantil der Abflüsse für diese Periode bei Litzirüti auf mindestens $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$ angehoben werden (vgl. Kapitel 6.1.4).

6.3.4 Q1* - Temperatur

Die Temperaturänderung in einer Untersuchungsstrecke ist grundsätzlich von vier Parametern abhängig. Namentlich sind das die Temperatur des Basisabflusses inkl. der Seitenzuflüsse, die Abflussmenge des Basisabflusses inkl. der Seitenzuflüsse sowie der Temperatur und der Abflussmenge des Triebwassers. Letzterer Parameter kann als einziger z.B. durch ein Ausgleichsbecken beeinflusst werden. Das heisst, wenn Ziele

für diesen Parameter definiert würden, müsste man die anderen drei Parameter kennen (also permanent messen), damit man weiss, welche Abflussänderung eingehalten werden muss. Dies ist in der Realität kaum sinnvoll umsetzbar.

Für die vorliegende Zieldefinition wurde entsprechend auf eine direkte Festlegung von hydrologischen Zielwerten für die Behebung der Defizite des Indikators Q1* verzichtet. Durch die Sanierung des Indikators F2* (Reduktion der Abflussrückgangsänderungsraten) werden auch die unnatürlichen Temperaturschwankungen gedämpft und dementsprechend die Defizite des Indikators Q1* reduziert. Zusätzlich werden für die optimierte Volumenberechnungen auch die Pegelanstiegsraten mit dem verfügbaren Volumen minimiert. Statt einer Zielfestlegung wird daher für den Indikator Q1* über die optimierte Volumenberechnung im Rahmen der iterativen Zieldefinition bestimmt, welches Volumen benötigt wird, damit die Zielklasse «gut» erfüllt werden kann respektive ob das für die Indikatoren F2*, F3* und F6 benötigte Retentionsvolumen ausreicht, damit auch die Ziele für Q1* erfüllt werden können.

6.4 Iterative Bestimmung Zieldefinition und Sanierungsumfang

6.4.1 Wahl relevante Untersuchungsstrecken

Für die Volumenberechnungen ist, wie in Kapitel 6.2.2 erläutert, eine relevante Untersuchungsstrecke zu definieren, welche für die Volumenberechnungen berücksichtigt wird. Wie beschrieben, wird grundsätzlich die nächste unterliegende Untersuchungsstrecke für die Volumenberechnung der jeweiligen Wasserrückgabe berücksichtigt, ausser es zeigt sich im Rahmen der iterativen Zieldefinition, dass die hydrologischen Vorgaben einer weiter unterliegenden Untersuchungsstrecke ein grösseres Sanierungsvolumen erfordern oder diese Untersuchungsstrecke ökologisch relevanter ist.

Für die Wasserrückgabe Litzirüti wurden für die hydrologischen Ziele der Indikatoren F2* und F3* für die Untersuchungsstrecken Litzirüti Volumenberechnungen durchgeführt. Die Zielvorgaben für die Untersuchungsstrecke Litzirüti führen zu einem grösseren Sanierungsumfang als die Zielvorgaben der Untersuchungsstrecke Langwies.

6.4.2 Benötigtes Volumen F2*

Für die Untersuchungsstrecke Litzirüti müssen die Ziele gemäss Tab. 6.3 eingehalten werden. Wie in Kapitel 6.3.1 erläutert, werden die Ziele für den Indikator F2* in der vorliegenden Berechnung rein über eine Reduktion der Abflussrückgangsraten und nicht über eine Vorgabe für einen maximalen Schwall- bzw. minimalen Sunkabfluss erreicht.

Zur ganzjährigen Erreichung des Zielwertes von «gut» für den Indikator F2* in der Untersuchungsstrecke Litzirüti wird bei der Wasserrückgabe unter Berücksichtigung der Betriebsdaten von Januar 2017 bis Februar 2023 ein Retentionsvolumen von 7'000 m³ benötigt.

6.4.3 Benötigtes Volumen F3*

Wie in Kapitel 6.3.2 erläutert, kann die Sanierung des Indikators F3* mit einer Einhaltung einer Mindest- oder Maximalabflussmenge in den Monaten Oktober bis März erreicht werden.

Wie beim Indikator F2* wurde auch beim Indikator F3* geprüft, mit welchem Retentionsvolumina die Ziele am effizientesten eingehalten werden können. Wie anhand

Tab. 6.4 ersichtlich, ist der Zielwert «gut» für den Indikator F3* mittels Sunkanhebung mit einem geringeren Retentionsvolumen realisierbar als mit einer Schwallbegrenzung.

Szenario	Retentionsvolumen [m ³]
Einhaltung Mindestabflussmenge 0.24 m ³ /s	27'000
Einhaltung Maximalabfluss 3 m ³ /s	610'000

Tab. 6.4 Berechnete Retentionsvolumina für die Einhaltung einer Mindest- oder Maximalabflussmenge in den Monaten Oktober bis März.

6.4.4 Benötigtes Volumen F6

Wie in Kapitel 6.3.3 erläutert, kann das Defizit des Indikators bei Litzirüti im Winter für adulte Bachforellen mit einer Sunkanhebung auf 0.3 m³/s behoben werden (Erfüllung Zielklasse «gut»). Bei einer Sunkanhebung auf 0.23 m³/s könnte die Zielklasse «mässig» erfüllt werden. Die dazu benötigten Retentionsvolumina sind in Tab. 6.5 aufgelistet.

Szenario	Retentionsvolumen [m ³]
Einhaltung Mindestabflussmenge 0.23 m ³ /s (Zielklasse «mässig»)	24'000
Einhaltung Mindestabflussmenge 0.3 m ³ /s (Zielklasse «gut»)	45'000

Tab. 6.5 Berechnete Retentionsvolumina zur Einhaltung einer Mindestabflussmenge in den Monaten Januar bis März zur Einhaltung der Zielklassen «mässig» und «gut» für den Indikator F6 bei Litzirüti für Sunkabflüsse für adulte Bachforellen im Winter.

Da das benötigte Sanierungsvolumen für die Einhaltung der Zielklasse «gut» 45'000m³ beträgt und somit das am Ausgleichsbeckenstandort maximal realisierbare Sanierungsvolumen von rund 40'000 m³ übersteigt (vgl. Kapitel 7.1), wird für den Indikator F6 darauf verzichtet die Zielklasse «gut» zu erfüllen. Jedoch soll mit der Sunkanhebung in den Wintermonaten von Januar bis März auf mindestens 0.23 m³/s die Zielklasse «mässig» erreicht werden.

6.4.5 Benötigtes Retentionsvolumen

Massgebend für die Definition des Sanierungsvolumen ist die Einhaltung der Mindestabflussmenge für die Zielerreichung des Indikators F3*. Die reine Einhaltung der Pegelrückgangsraten (F2*) erfordert ein wesentlich kleineres Volumen. Auch die Einhaltung der Mindestabflussmenge für den Indikator F6 (Erreichung Zielklasse «mässig») benötigt ein kleineres Retentionsvolumen. Für die Einhaltung der Mindestabflussmenge wird ein Retentionsvolumen von mindestens 27'000 m³ benötigt.

Für die Volumenbewirtschaftung (Kapitel 6.5) und die Auswahl der Massnahmen (Kapitel 7) wird das erforderliche Volumen eines Ausgleichsbeckens zur Sanierung von Schwall-Sunk gemäss der VZH Schwall-Sunk [1] auf **30'000 m³** festgelegt.

6.4.6 Hydrologische Anforderungsprofile

Entsprechend den erforderlichen Retentionsvolumen und den hydrologischen Anforderungen zur Sanierung der Indikatoren F2*, F3* und F6 gemäss Kapitel 6.4.2, 6.4.3 und 6.4.4 kann das hydrologische Anforderungsprofil festgelegt werden.

Für die Wasserrückgabe Litzirüti gelten die hydrologischen minimalen Anforderungen gemäss Tab. 6.6 und Tab. 6.7:

Periode	Hydrologische Vorgabe
Oktober - April	Einhaltung Mindestabfluss: 0.24 m ³ /s
April - September	Keine Vorgaben für Mindestabfluss
Ganzjährig	Keine fixe Vorgabe für Maximalabfluss

Tab. 6.6 Vorgabe Mindest- und Maximalabfluss nach Wasserrückgabe Litzirüti.

Abfluss bei WR Litzirüti [m ³ /s]	Max. Abflussrückgangsrates [m ³ /s/min] 16.03 – 15.05	Max. Abflussrückgangsrates [m ³ /s/min] 16.05 – 31.07	Max. Abflussrückgangsrates [m ³ /s/min] 01.08 – 15.03	Max. Abflussanstiegsrate [m ³ /s/min] ganzjährig
10	0.079	0.263	0.789	0.789
9	0.077	0.256	0.769	0.769
8	0.063	0.208	0.625	0.625
7	0.065	0.217	0.652	0.652
6	0.064	0.213	0.638	0.638
5	0.056	0.185	0.556	0.556
4.5	0.054	0.179	0.536	0.536
4	0.048	0.161	0.484	0.484
3.5	0.045	0.152	0.455	0.455
3	0.041	0.135	0.405	0.405
2.5	0.036	0.119	0.357	0.357
2	0.030	0.100	0.300	0.300
1.5	0.025	0.082	0.246	0.246
1	0.020	0.068	0.203	0.203
0.75	0.015	0.051	0.153	0.153
0.5	0.010	0.034	0.102	0.102
0.35	0.008	0.025	0.075	0.075
0.1	0.004	0.012	0.035	0.035

Tab. 6.7 Vorgaben für maximale Abflussrückgangs- und Abflussanstiegsraten für verschiedene Abflüsse in der Plessur nach der Wasserrückgabe Litzirüti für unterschiedliche Perioden.

6.4.7 Einordnung des Sanierungsumfangs

Methodische Unsicherheiten und Annahmen, welche für die Volumenberechnung getroffen wurden, und in welche Richtung sie sich auswirken, sind in Tab. 6.8 aufgeführt.

Parameter, Annahme, Unsicherheit	Auswirkung auf das Retentionsvolumen	Begründung
Datengrundlage für die Indikatorenbewertung	↕	Je nachdem welche Datengrundlage zur Verfügung steht, wie hochaufgelöst die Daten sind, welche Messgenauigkeit erreicht wird, welche Quantile und Perioden verwendet werden, hat dies einen Einfluss auf die Bewertung der Indikatoren im Ist-Zustand und demzufolge auch auf die Zieldefinition mit der Festlegung der hydrologischen Kenngrössen. Je strenger / weniger streng die Ziele sind, desto kleiner / grösser das Sanierungsvolumen.
Modelle (1D / 2D)	↕	Modelle sind allgemein nur so gut wie die zugrundeliegenden Annahmen. Je nachdem wie genau die Modelle die Realität abbilden, kann sich das berechnete Volumen als richtig, zu klein oder zu gross bewahrheiten.
Zukünftiger Betrieb	↕	Die hier abgebildeten Volumina wurden mit den historischen Betriebsdaten berechnet. Ändert sich der Betrieb zukünftig, indem er z.B. noch kurzfristiger reagieren muss, würden die Volumina tendenziell grösser.
Klimawandel und Restwasseranierungen	↕	Durch den Klimawandel wird für den (bezüglich Schwall-Sunk kritischeren) Winter eine Abflusszunahme prognostiziert. Für die Frühlingsmonate ist ein früheres Auftreten der Schneeschmelze mit geringerer Intensität prognostiziert. Wie stark sich die Abflussänderungen auf den Sanierungsumfang auswirken ist schwer abzuschätzen und wurde dementsprechend nicht untersucht.
Prognosedauer	=	Sehr kurze Prognosedauern führen zu hohen Volumina. Bis zu einem gewissen Optimum hinsichtlich Prognosedauer wird das Volumen kleiner, anschliessend bleibt es gleich gross. Voraussetzung ist eine optimalen Beckensteuerung. Die Berechnungen haben gezeigt, dass ab einer grösseren Prognosedauer von 8h keine weitere Verbesserung der Indikatorenbewertungen mehr auftritt.

Tab. 6.8 Auswirkungen verschiedener Parameter auf die berechneten Volumina.

6.5 Optimierte Volumenbewirtschaftung

Wie in Kapitel 6.2.4 beschrieben, kann das zur Zielerreichung erforderliche Retentionsvolumen von 30'000 m³ (gemäss Kapitel 6.4.3) ganzjährig optimiert werden. Mit einer ganzjährigen optimalen Volumenbewirtschaftung können auch weitere hydrologische Kenngrössen verbessert werden, welche bei einer reinen Fokussierung auf die Indikatoren F2* und F3* nicht berücksichtigt werden.

Für die optimale Bewirtschaftung des verfügbaren Retentionsvolumens von 30'000 m³ wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Sunkabfluss:
Ganzjährig wird ein Mindestabfluss von $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ unterhalb der Wasserrückgabe Litzirüti eingehalten. Der Sunkabfluss wird zusätzlich ganzjährig weiter angehoben, bis das Retentionsvolumen von $30'000 \text{ m}^3$ ausgeschöpft ist (jeweils wöchentliche Optimierung).
2. Schwallabfluss:
Der maximale Schwallabfluss wird ganzjährige so weit begrenzt, bis das Retentionsvolumen von $30'000 \text{ m}^3$ ausgeschöpft ist (jeweils wöchentliche Optimierung). Während herbstlichen Hochwasserperioden wird eine Schwallbegrenzung als wenig sinnvoll erachtet. Im Spätherbst ist der Füllstand beim Stausee Isel hoch. Fallen in diesem Zeitraum hohe Niederschlagsmengen an, müssen beim Kraftwerk Litzirüti über eine längere Dauer hohe Betriebsabflussmengen verarbeitet werden, damit beim Stausee Isel keine Wasserverluste entstehen. Auch ohne Kraftwerk würden so hohe Abflüsse in dieser Periode vorkommen. Im Zeitraum von Januar 2017 bis Februar 2023 wurden daher insgesamt 42 Tage als Hochwasserperioden definiert und für die Schwallbegrenzung nicht berücksichtigt. Alle 42 Tage liegen im Zeitraum von Oktober bis Dezember. Die 42 Tage entsprechen einem Anteil von knapp 5% der Wintertage zwischen Oktober bis März im betrachteten Zeitraum.
3. Abflussrückgangsraten:
Im Minimum müssen die Abflussrückgangsraten gemäss Tab. 6.7 eingehalten werden. Die einzuhaltenden Abflussrückgangsraten werden zusätzlich ganzjährig weiter verringert, bis das Retentionsvolumen von $30'000 \text{ m}^3$ ausgeschöpft ist (jeweils wöchentliche Optimierung).
4. Abflussanstiegsraten:
Zusätzlich zu den Abflussrückgangsraten werden auch maximale Abflussanstiegsraten definiert, welche ganzjährige eingehalten werden. Es wurde definiert, dass ganzjährig die gleichen Abflussanstiegsraten eingehalten werden müssen, wie die Abflussrückgangsraten, welche im Minimum für die juvenile Periode eingehalten werden müssen (vgl. Tab. 6.7). Die einzuhaltenden Abflussanstiegsraten werden zusätzlich ganzjährig weiter verringert, bis das Retentionsvolumen von $30'000 \text{ m}^3$ ausgeschöpft ist (jeweils wöchentliche Optimierung).

7. Vorauswahl Sanierungsmassnahmen (TP 3)

Gemäss VZH Schwall-Sunk [1] handelt es sich bei der Massnahmenvorauswahl um die Auswahl aller möglichen und weiterzuverfolgenden Massnahmen, mit welchen die ökologischen Ziele erreicht werden können. Ziel ist es, möglichst ökologisch sinnvolle sowie technisch machbare und verhältnismässige Sanierungsmassnahmen auszuwählen, welche im anschliessenden Variantenstudium detaillierter untersucht werden sollen.

Im Rahmen der Massnahmenvorauswahl hat HTU dazu verschiedene bestehende Massnahmenideen zusammengetragen und neue erarbeitet. Wichtige Grundlage bei der Massnahmenvorauswahl bildete die Machbarkeitsstudien für ein Ausgleichsbecken resp. eine Ausgleichskaverne von Pöyry AG vom 25. Juni 2015 (Beilage 9). In der Studie wurde die Machbarkeit von zwei Ausgleichsbeckenstandorten und einer Ausgleichskaverne für verschiedene Volumina untersucht. Für die durchgeführte Massnahmenvorauswahl wurden die Massnahmenideen der Studie aus dem Jahr 2015 übernommen und überarbeitet.

Die verschiedenen Massnahmenideen wurden in Bezug auf Schwall-Sunk, Technik, Umwelt und Umfeld geprüft und bewertet. Die geprüften Massnahmenideen und ihre Bewertungen wurden in einem Massnahmenkatalog dokumentiert (Beilage 5). In einem Begleitbericht (Beilage 6) werden das Vorgehen und die Ergebnisse zur Vorauswahl der Massnahmen zusammengefasst. Zudem beinhaltet der Bericht eine Empfehlung für die im Rahmen des Variantenstudiums weiter zu untersuchenden Massnahmen. Die Massnahmenblätter und der Begleitbericht wurden am 20. Oktober 2022 bei den Behörden eingereicht.

Basierend auf den Massnahmenideen wurde in Absprache mit den Behörden und Arosa Energie die Massnahmenvorauswahl festgelegt (Kapitel 4, Beilage 6). Es wurde vorgeschlagen, einen Ausgleichsbeckenstandort weiterzuverfolgen. Das für die Sanierung erforderliche Retentionsvolumina von 30'000 m³ (vgl. Kapitel 6.4.5) ist gemäss Stand der Untersuchungen am entsprechenden linksufrigen Standort technisch realisierbar.

In den Massnahmenblättern ebenfalls enthalten ist die Sanierungsmassnahme «Ausleitkraftwerk Pradapunt». Es wird erläutert, dass diese Sanierungsvariante, grundsätzlich ebenfalls empfohlen wird, deren Wirtschaftlichkeit jedoch zum heutigen Zeitpunkt noch unklar ist (vgl. Kapitel 4.1 in Beilage 6). Das Ausleitkraftwerk Pradapunt wird im Folgenden neben dem linksufrigen Ausgleichsbecken als Bestvariante für die Schwall-Sunk Sanierung aufgeführt.

Nachfolgend werden die zwei Bestvarianten «Linksufriges Ausgleichsbecken» und «Kraftwerk Pradapunt» zusammenfassend beschrieben. Eine detailliertere Übersicht zu den zwei Massnahmen kann dem Massnahmenkatalog (Beilage 5) entnommen werden.

7.1 Linksufriges Ausgleichsbecken

In Abb. 7.1 ist der vorausgewählte Standort des linksufrigen Ausgleichsbeckens dargestellt. Für diesen Standort zeigt die Beurteilung der Zielkonflikte (Beilage 5), dass die Massnahme als grundsätzlich realisierbar eingeschätzt wird. Es wurden zwei Zielkonflikte im Bereich Naturschutz und Energieproduktion identifiziert:

- Die geplanten Zu- und Ausleitungen führen teilweise durch Auen- und Waldperimeter.
- Für das KW Litzirüti sind keine Einschränkungen hinsichtlich Flexibilität zu erwarten. Durch die Dämpfung der Wasserrückgabe bei Litzirüti wird jedoch der Betrieb der unterliegenden Kraftwerke Lünen und Chur-Sand, welche nur über geringfügige Speichermöglichkeiten verfügen, beeinflusst.

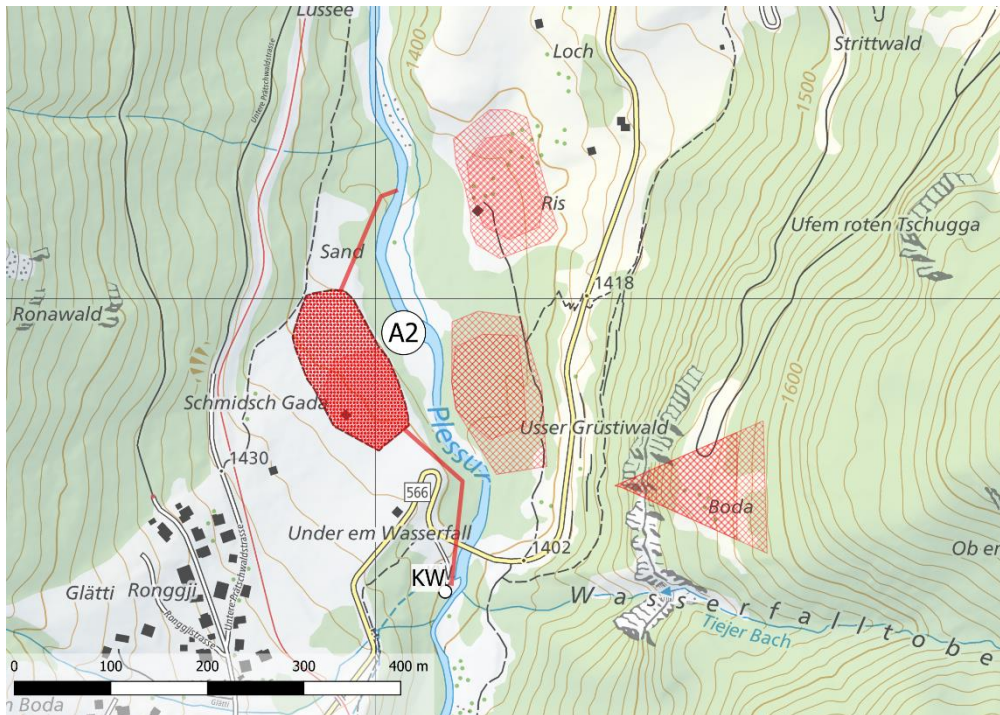


Abb. 7.1 Übersichtskarte des vorausgewählten linksufrigen Ausgleichsbeckenstandort (A2) sowie weiteren verworfenen Massnahmenstandorten (schraffierte Flächen), Quelle Hintergrundkarte: swisstopo.

Für den linksufrigen Ausgleichsbeckenstandort wurde zusätzlich untersucht, welches Retentionsvolumen an diesem Standort unter Berücksichtigung der Zielkonflikte und der Topographie maximal umsetzbar ist. Insbesondere die vorliegende Geländeneigung an diesem Standort wirkt sich limitierend auf das maximale, umsetzbare Retentionsvolumen aus. Die qualitativen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass am linksufrigen Standort ein maximales Retentionsvolumen von rund 40'000 m³ noch mit einem verhältnismässigen Aufwand realisierbar ist.

7.1.1 Kostenschätzung Ausgleichsbecken

Die neuste Kostenschätzung (Genauigkeit +/- 40%) von Axpo aus dem Jahr 2022 (Beilage 6) geht für das linksufrige Ausgleichsbecken inklusive Zu- und Ableitung von Anlagekosten (inkl. Planungskosten) von CHF 9.2 Mio. exkl. MWST aus. Die Schätzung für die jährlichen Unterhaltskosten beträgt CHF 0.12 Mio. exkl. MWST.

7.2 Ausleitkraftwerk Pradapunt

Im Juni 2014 gründeten die Gemeindekorporation Kraftwerk Lünen (GKL, heute übergegangen in die Gemeinde Arosa resp. Arosa Energie), die Gemeinde Arosa, die IBC Energie Wasser Chur (IBC) und die Axpo Power AG (Axpo) das Projektkonsortium Wasserkraft Plessur (Konsortium), um gemeinsam den Ausbau der Wasserkraft im

Schanfigg mittels einer neuen Kraftwerksstufe Litzirüti - Pradapunt und der Sanierung des Kraftwerks (KW) Luen voranzutreiben. Im Februar 2016 wurde der technische Bericht zum Konzessionsprojekt erstellt und der Gemeinde Arosa eingereicht [19]. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurde im Jahr 2017 ein Projektunterbruch beschlossen.

Aufgrund der Änderungen der Rahmenbedingungen forderte die Trägerschaft «Zukunft Wasserkraft Schanfigg» das Projektkonsortium in einer Sitzung vom 6. Dezember 2022 auf, zu prüfen, ob das Projekt KW Pradapunt wieder aufgenommen werden kann. Die Planungsarbeiten zum Vorprojekt werden im Jahr 2023 vom Projektkonsortium Wasserkraft Plessur wieder aufgenommen.

Das Kraftwerk Pradapunt leitet das Betriebswasser ab der Zentrale Litzirüti weiter zur neu geplanten Zentrale Pradapunt, womit die Strecke zwischen Litzirüti und Pradapunt bezüglich Schwall-Sunk saniert ist und neu ein Restwasserabschnitt wäre (Abb. 7.2).

Für das Ausleitkraftwerk Pradapunt zeigt die Einschätzung der Zielkonflikte (Beilage 5), dass die Massnahme als grundsätzlich realisierbar eingeschätzt wird. Ein zentraler Punkt für die Beurteilung und Bewilligung des Ausleitkraftwerks ist die Bestimmung der Restwassermengen, welche im ausgeleiteten Abschnitt der Plessur zukünftig fliessen sollen. Ein Ausleitkraftwerk gilt als neue Wasserentnahme und hat auf der neuen Ausleitstrecke die Restwasseranforderungen von Art. 31 ff. GSchG zu erfüllen. Die Bestimmung der Restwasseranforderungen nach Art. 31 ff. GSchG und eine Abwägung zwischen einer periodischen Erhöhung der Restwassermengen und einer Reduktion der Schwankungen im Gewässer ist sehr aufwändig und übersteigt daher den Detaillierungsgrad der jetzigen Planungsphase. Daher ist eine abschliessende Bewertung dieses Zielkonfliktes zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht möglich.

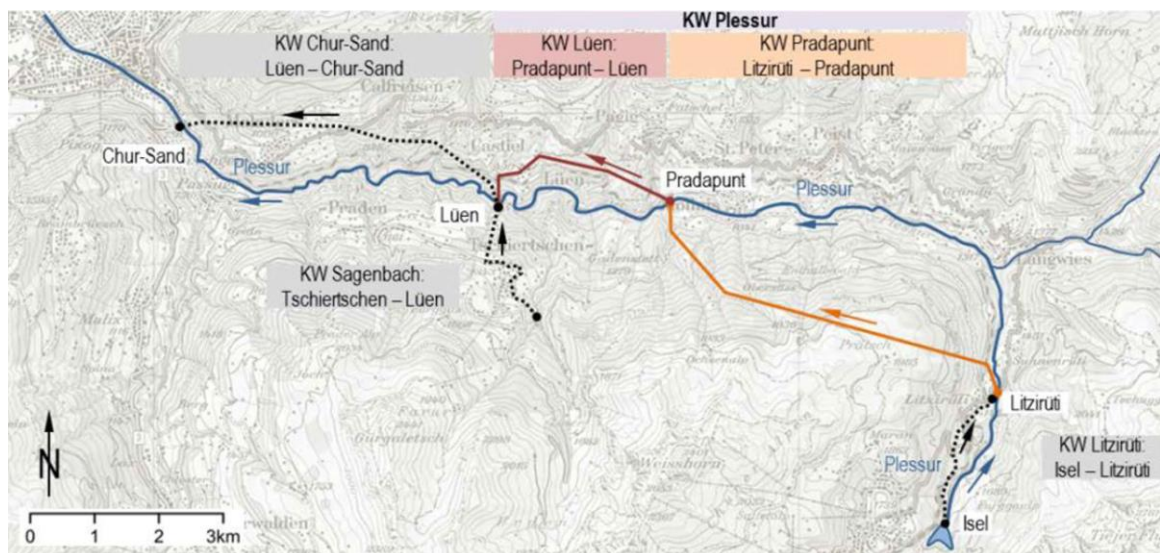


Abb. 7.2 Überblick Ausleitkraftwerk Litzirüti - Pradapunt. Quelle Hintergrundkarte: map.geo.admin.ch.

7.2.1 Kostenschätzung Ausleitkraftwerk

Es existiert keine aktuelle Kostenschätzung zur Realisierung des Kraftwerks Pradapunt. Die Grundlagen für eine Kostenschätzung werden derzeit aktualisiert. Im Jahr 2015 wurde für das Vorprojekt eine Abschätzung der Investitionskosten mit einer

Genauigkeit von +/- 20% durchgeführt [19]. Die Anlagekosten (inkl. Planungskosten) wurden auf rund CHF 74.3 Mio. exkl. MWST geschätzt.

Damit die Gesamtkosten ermittelt werden können, müssen beim Ausleitkraftwerk auch die Aufwände für Betrieb, Unterhalt und Instandhaltung auf der Ausgabenseite, sowie die Einnahmen durch die Produktion berücksichtigt werden. Im technischen Bericht zum Konzessionsprojekt aus dem Jahr 2015 wurde eine mittlere Jahresenergieproduktion des Kraftwerks Pradapunt von rund 41.7 GWh (Sommer 73% / Winter 27%) ausgewiesen. Bei dieser Produktionsabschätzung wurde davon ausgegangen, dass keine weiteren Zuflüsse gefasst werden. Die Schätzung für die jährlichen Unterhaltskosten beträgt CHF 1.25 Mio. exkl. MWST. Dabei inbegriffen sind Personalkosten, Material- und Fremdleistungskosten, Wasserzinsen und sonstige Betriebskosten. Für die ersten 10 Jahre werden für die Barwertberechnung (Kapitel 7.3) keine Wasserzinsen berücksichtigt. Die Ersatzinvestitionen für die Leittechnik betragen CHF 1.13 Mio. exkl. MWST alle 20 Jahre und CHF 3.5 Mio. exkl. MWST nach 40 Jahren.

7.3 Schätzung Gesamtkosten (Barwert)

Damit die Kosten zwischen der zwei Sanierungsmassnahmen miteinander verglichen werden können, wurde auf Grundlage der Barwertmethode die Gesamtkosten (Barwert) ermittelt. Dabei werden neben den Anlagekosten die jährlich anfallenden Kosten für Betrieb, Unterhalt und Instandhaltung sowie allfällige Ertragsausfälle und Erträge aus der Stromproduktion (Ausleitkraftwerk) aufsummiert und mit einem Gesamtkapitalkostensatz (WACC) von 5.0% diskontiert. Der Berechnung zu Grunde gelegt sind folgende zwei unterschiedlichen Zeitperioden:

- a) 40 Jahre für das Ausgleichsbecken: Dieser Wert orientiert sich zum einen an der mittleren technischen Lebensdauer der Massnahmen (was angesichts der verschiedenen Massnahmentypen selbstredend nur eine grobe Annäherung ist) und zum anderen an der in der UVEK-Verordnung zur Entschädigung von betrieblichen Sanierungsmassnahmen (VKSWk)⁵ genannten Zeitperiode.
- b) 60 Jahre für das Ausleitkraftwerk: Dieser Wert orientiert sich an einer für neue Entnahmen mit Wasserkraftnutzung typischen Konzessionsdauer, während derer Erträge aus der Stromproduktion generiert und angerechnet werden können; zusätzlich wird bei den Ausleitkraftwerken der Effekt von Investitionsbeiträgen gemäss Art. 26 EnG⁶ auf die Gesamtkosten ausgewiesen (Annahme: 50% der anrechenbaren Investitionskosten).⁷

Für die Berechnung der Gesamtkosten des Ausleitkraftwerks wurden die Erträge aus der Stromproduktion und allfälliger Investitionsbeiträge evaluiert. Dazu wurden drei verschiedene Strompreisszenarien (50, 80 und 110 CHF/MWh) und ein allfälliger Investitionsbeitrag von 50% mit vereinfachtem Ansatz (Annahme: gleichmässige Verteilung der Stromproduktion übers Jahr) zu Grunde gelegt. Die mit Berücksichtigung der Erlöse und der Investitionsbeiträge resultierenden Gesamtkosten des Ausleitkraftwerks sind bei der Beurteilung der Varianten ausgewiesen. Die berücksichtigten Gewinnsteuern für die Erträge aus der Stromproduktion betragen 14.7% (Kanton Graubünden). Die Kosten für die Erneuerung der Anlagen nach Ablauf dieser Zeitperioden sind nicht berücksichtigt. Zu beachten: die Gesamtkosten sind «exklusive

⁵ SR 730.014.1: Verordnung des UVEK über die Berechnung der anrechenbaren Kosten von betrieblichen Sanierungsmassnahmen bei Wasserkraftwerken (VKSWk) vom 11. März 2016 (Stand am 1. Januar 2018).

⁶ SR 730.0: Energiegesetz (EnG) vom 30. September 2016 (Stand: 15. März 2023); gemäss Art. 26 kann für «die Erstellung von neuen Wasserkraftanlagen mit einer Leistung von mind. 1 MW» (Ziff. 1 Bst. a) ein Investitionsbeitrag in Anspruch genommen werden; dieser beträgt für solche Anlagen «höchstens 60 Prozent der anrechenbaren Investitionskosten [...]» (Ziff. 3 Bst. a).

⁷ Die längere angenommene Zeitperiode für Ausleitkraftwerke führt aufgrund der Diskontierung nur zu einer sehr geringen Reduktion der Gesamtkosten.

MWST» ausgewiesen. Basierend auf diesen Annahmen wurden für das Ausleitkraftwerk verschiedene Barwert-Szenarien berechnet (Tab. 7.1).

Variante	50 CHF/MWh	80 CHF/MWh	110 CHF/MWh
Barwert (Mio. CHF exkl. MWST) Ausleitkraftwerk mit Investitionsbeitrag	-19.4	-4.4	10.5
Barwert (Mio. CHF exkl. MWST) Ausleitkraftwerk ohne Investitionsbeitrag	-46.6	-31.0	-16.1

Tab. 7.1 **Barwerte für das Ausleitkraftwerk mit und ohne Investitionsbeitrag für die verschiedenen Strompreisszenarien.**

Für den Gesamtkostenvergleich wurde das mittlere Preisszenario mit 80 CHF/MWh berücksichtigt. Für die Gesamtkosten des Ausleitkraftwerkes wird der Investitionsbeitrag nicht berücksichtigt. Für die zwei Szenarien ergeben sich unter diesen Annahmen folgende Gesamtkosten (Tab. 7.2).

Variante

Gesamtkosten Ausgleichsbecken (Mio. CHF exkl. MWST)	11.3
Gesamtkosten Ausleitkraftwerk (Mio. CHF exkl. MWST)	31.0

Tab. 7.2 **Gesamtkosten Sanierungsmassnahmen.**

8. Gesamtbeurteilung ökologischer Nutzen

Für die zwei vorausgewählten Sanierungsmassnahme (Kapitel 7) soll aufgezeigt werden, welchen ökologischen Nutzen sie erreichen. Die Wirkung der zwei Massnahmen auf die Kernindikatoren (F2*, F3* und Q1*) wird in Kapitel 8.1 und Kapitel 8.2 aufgezeigt. In Kapitel 8.3 wird kontrolliert, ob die Zielvorgaben erfüllt werden. In Kapitel 8.5 wird der ökologische Nutzen quantifiziert und in Kapitel 8.6 eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. Analog zu den Schwall-Sunk Sanierungen am Rhein und der Moesa wird der Kernindikator F6 aufgrund der methodischen Unsicherheiten (vgl. Kapitel 4.5) für die Beurteilung des ökologischen Nutzens nicht berücksichtigt.

8.1 Sanierter Zustand mit Ausgleichsbecken

8.1.1 Indikatoren

Unter den Annahmen nach Kapitel 6.5 wurden die Berechnungen mit dem «Optimierungscode» durchgeführt und als Resultat die gedämpfte Abflussganglinie mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ berechnet. Für die gedämpften Abflussganglinien (Sanierungszustand) wurden wiederum die Schwall-Sunk Indikatoren ausgewertet.

In Abb. 8.1 und Abb. 8.2 ist die Indikatorbewertung für die Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies für den sanierten Zustand (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte) dargestellt. In Anhang 1 ist die Gesamtauswertung der Indikatoren im sanierten Zustand dargestellt.

F3* [%] (Okt.-Ende April)	30	34
Q1* TR_{SS} [°C/h]	2.3	9.8
F2* - Agg - larval		
F2* - Agg - Übergang		
F2* - Agg - juvenil		
$F2^* - dF$ [%] - larval	36.6	43.7
$F2^* - dF$ [%] - Übergang	27.8	33.7
$F2^* - dF$ [%] - juvenil	35	42.3
$F2^* - dP$ [cm/min] - larval	0.23	1.56
$F2^* - dP$ [cm/min] - Übergang	0.34	1.13
$F2^* - dP$ [cm/min] - juvenil	0.43	1.35

Abb. 8.1 Indikatorbewertung für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für den sanierten Zustand mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).

F3* [%] (Okt.-Ende April)	5	10
Q1* TR_{SS} [°C/h]	2.3	6.9
F2* - Agg - larval		
F2* - Agg - Übergang		
F2* - Agg - juvenil		
F2* - dF [%] - larval	13.5	14.8
F2* - dF [%] - Übergang	6.4	7.5
F2* - dF [%] - juvenil	10.7	12.7
F2* - dP [cm/min] - larval	0.1	0.39
F2* - dP [cm/min] - Übergang	0.13	0.2
F2* - dP [cm/min] - juvenil	0.15	0.29

Abb. 8.2 Indikatorenbewertung für die Untersuchungsstrecke Langwies für den sanierten Zustand mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).

Die Indikatorenbewertungen zeigen, dass mit einem Ausgleichsbecken von 30'000m³ bei Langwies alle betrachteten Indikatoren mindestens den Zielwert «gut» erfüllen.

Bei Litzirüti können die Indikatoren ebenfalls wesentlich verbessert werden. Der Indikator F3* verbessert sich von «mässig» auf «gut». Die Pegelrückgangsrates in der larvalen Periode verbessert sich von «schlecht» auf «gut». Auch die Flächenverluste verbessern sich von «ungenügend» auf «mässig» in der larvalen und juvenilen Periode und in der Übergangsperiode von «mässig» auf «gut». Aggregiert wird der Indikator F2* im sanierten Zustand mit Ausgleichsbecken in allen Perioden mit «gut» bewertet. Der Indikator Q1* verbessert sich von «schlecht» auf «gut».

8.1.2 Hydrologische Kenngrössen und Abflussganglinien

Neben der Bewertung der Indikatoren im sanierten Zustand ist auch die Veränderung der hydrologischen Kenngrössen von Interesse. In Abb. 8.3 und Abb. 8.4 sind verschiedene hydrologische Kenngrössen im sanierten Zustand (Ausgleichsbecken von 30'000 m³) und im Ist-Zustand gegenübergestellt.

Anhand der Werte wird ersichtlich, dass auf Basis der Betriebsperiode von Januar 2017 bis Februar 2023 für Litzirüti von Oktober bis April der minimale Sunkabfluss mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ von 0.13 m³/s auf 0.24 m³/s angehoben und somit beinahe hätte verdoppelt werden können. Der Schwallabfluss von Oktober bis April (95%-Quantil) hätte von 3.5 m³/s auf 3.1 m³/s reduziert werden können. Das Schwall-Sunk Verhältnis (VSS) könnte ganzjährig von 11.7 auf 6.9 reduziert werden. Für Langwies ist der Effekt auf die Kenngrössen weniger stark ausgeprägt als bei Litzirüti, da der Basisabfluss durch den Zufluss des Sapünerbachs bereits wesentlich höher ist.

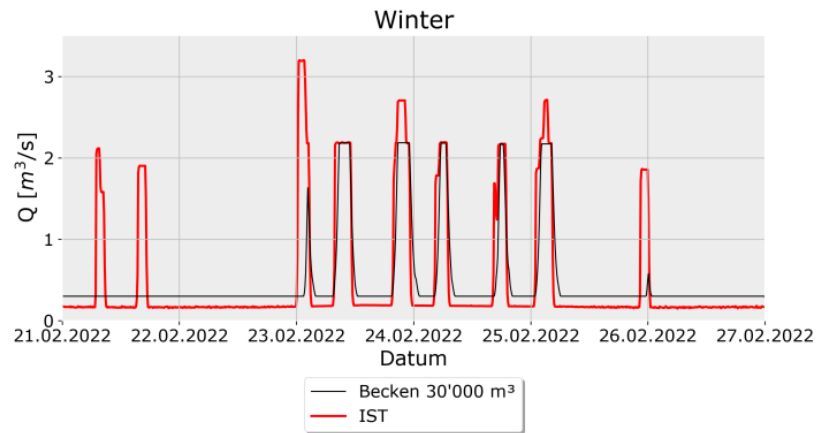
In Abb. 8.5 und Abb. 8.6 sind Beispiele für Wochenganglinien bei Litzirüti und Langwies für den prognostizierten Zustand mit Ausgleichsbecken (30'000 m³) im Vergleich zum Ist-Zustand dargestellt. Weitere Visualisierungen können Anhang 2 entnommen werden.

	F3* - Laichentwicklung Okt.-Ende April	F3* - Laichgeschäft Okt.-Dez	F2* - larval Mitte März - Mitte Mai	F2* - Übergang Mitte Mai - Ende Juli	F2* - juvenil Aug - Ende Sep	Kennwerte ganzjährig
Min (m³/s)	0.24 (0.13)	0.25 (0.17)	0.25 (0.16)	0.4 (0.27)	0.24 (0.13)	0.24 (0.13)
Sunk 5% (m³/s)	0.25 (0.16)	0.29 (0.19)	0.25 (0.18)	0.5 (0.46)	0.44 (0.27)	0.25 (0.17)
Schwall 95% (m³/s)	3.1 (3.5)	2.9 (3.6)	6.6 (6.7)	10.4 (10.4)	8.2 (8.0)	8.2 (8.2)
Amplitude (m³/s)	2.2 (2.7)	2.2 (2.6)	2.2 (2.7)	1.6 (1.8)	2.2 (2.7)	2.1 (2.6)
VSS (-)	7.4 (13.1)	6.9 (10.8)	5.8 (11.7)	1.6 (1.7)	6.3 (12.2)	6.8 (11.7)
Frequenz (-)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	0 (1)	2 (2)	2 (2)

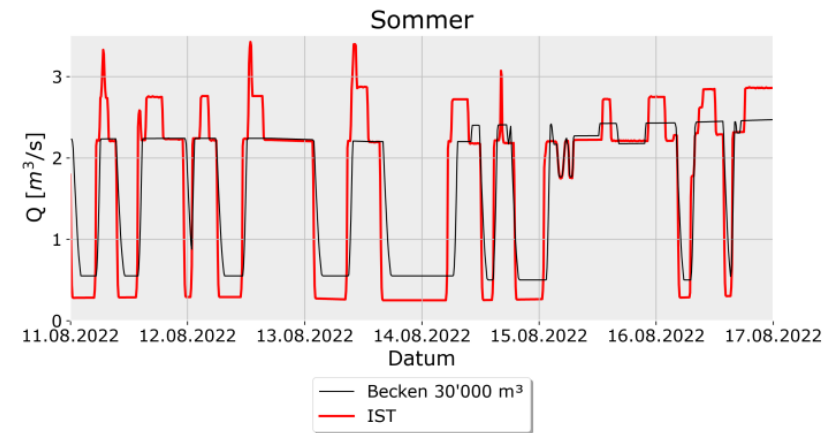
Abb. 8.3 Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausgleichsbecken von 30'000 m³ an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.

	F3* - Laichentwicklung Okt.-Ende April	F3* - Laichgeschäft Okt.-Dez	F2* - larval Mitte März - Mitte Mai	F2* - Übergang Mitte Mai - Ende Juli	F2* - juvenil Aug - Ende Sep	Kennwerte ganzjährig
Min (m³/s)	0.71 (0.68)	0.86 (0.78)	1.13 (1.05)	2.72 (2.54)	0.71 (0.68)	0.71 (0.68)
Sunk 5% (m³/s)	0.81 (0.74)	0.96 (0.83)	1.25 (1.15)	2.98 (2.86)	1.76 (1.68)	0.84 (0.76)
Schwall 95% (m³/s)	5.0 (5.3)	4.0 (4.5)	9.8 (10.0)	13.8 (13.8)	10.1 (10.1)	11.3 (11.4)
Amplitude (m³/s)	2.2 (2.7)	2.3 (2.7)	2.2 (2.8)	1.6 (1.8)	2.2 (2.8)	2.2 (2.7)
VSS (-)	3.1 (3.9)	2.9 (3.6)	2.1 (2.7)	1.2 (1.3)	2.6 (3.5)	2.8 (3.5)
Frequenz (-)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	0 (0)	2 (2)	2 (2)

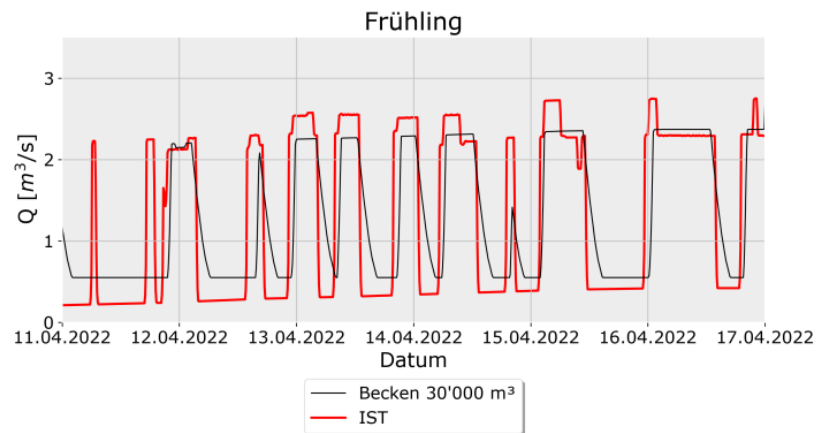
Abb. 8.4 Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Langwies für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausgleichsbecken von 30'000 m³ an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.



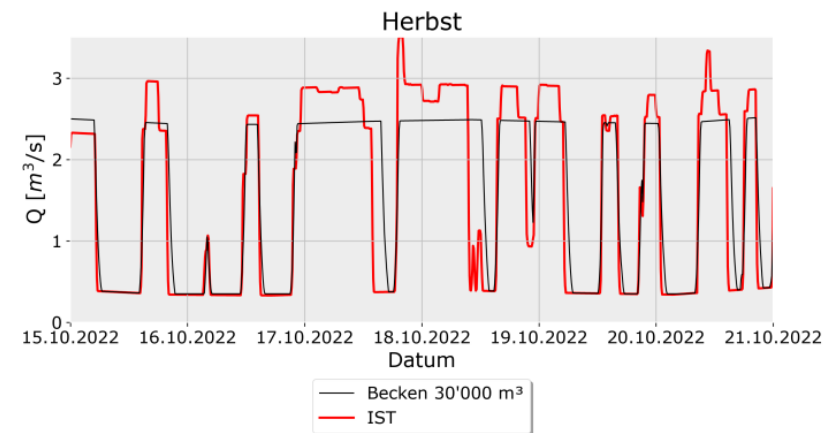
Ganglinie für eine repräsentative Woche im Winter.



Ganglinie für eine repräsentative Woche im Sommer.

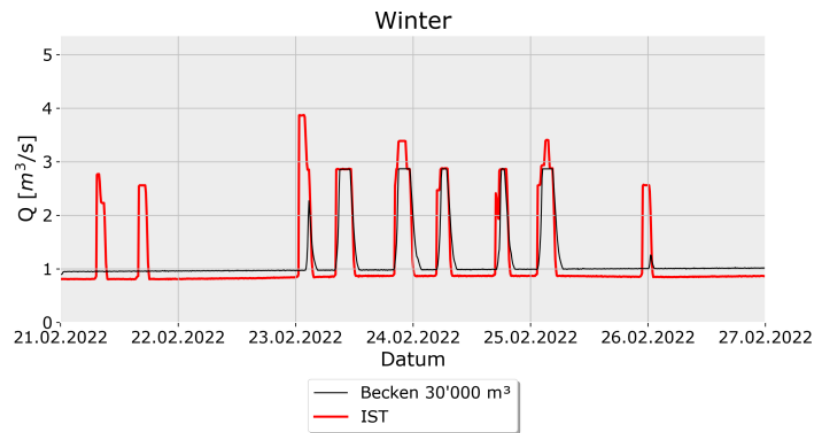


Ganglinie für eine repräsentative Woche im Frühling.

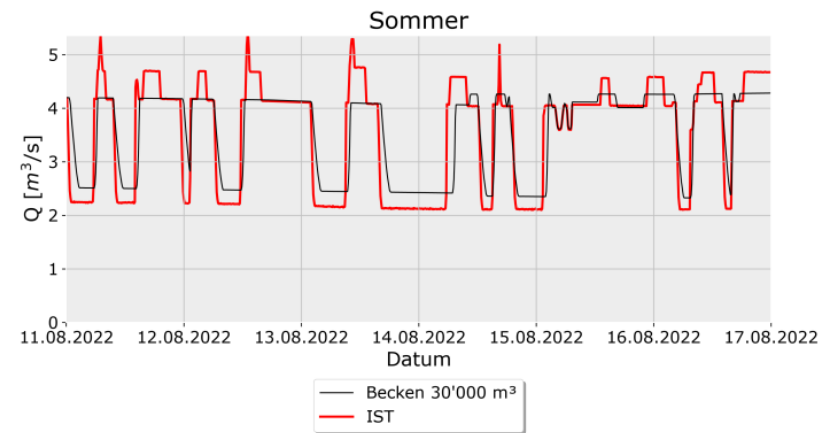


Ganglinie für eine repräsentative Woche im Herbst.

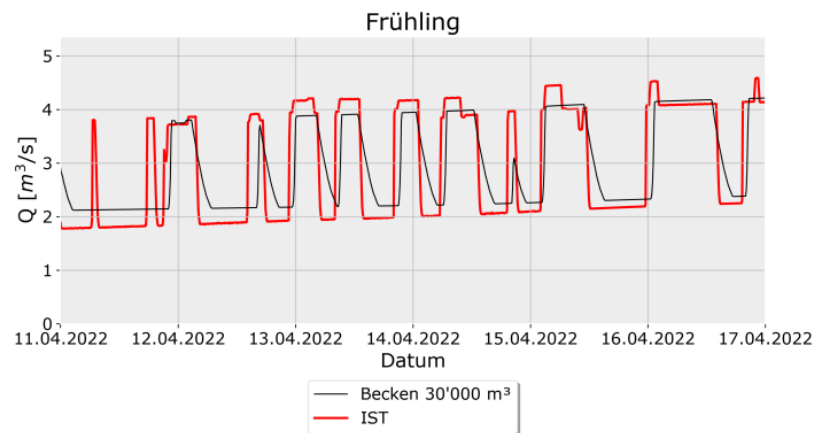
Abb. 8.5 Beispiele Wochenganglinien bei Litzirüti (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausgleichsbecken (30'000 m³) [m³/s].



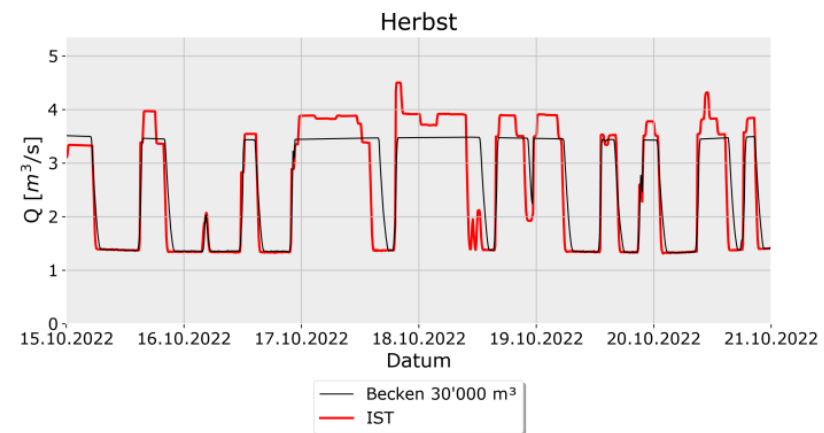
Ganglinie für eine repräsentative Woche im Winter.



Ganglinie für eine repräsentative Woche im Sommer.



Ganglinie für eine repräsentative Woche im Frühling.



Ganglinie für eine repräsentative Woche im Herbst.













Abb. 8.6 Beispiele Wochenganglinien bei Langwies (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausgleichsbecken (30'000 m³) [m³/s]

8.1.3 Gutachterliche Indikatorenbewertung





Aufgrund diverser methodischer Unsicherheiten bei der Bestimmung der Kernindikatoren (vgl. Kapitel 4.5) wurde für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Ausgleichsbecken von 30'000 m³ neben der Bestimmung der Indikatoren nach VZH Schwall-Sunk [1] auch eine gutachterliche Bewertung der wichtigsten Indikatoren durchgeführt. Diese gutachterliche Bewertung wurde von Hydra für die Indikatoren F2*, F3* und Q1* durchgeführt. Der Bericht zur gutachterlichen Bewertung kann der Beilage 4 entnommen werden.

Die gutachterliche Einschätzung des ökologischen Nutzens einzelner Sanierungsvarianten kann versuchen, die Lücken der Vollzugshilfe zu füllen, aber auch hier kann keine gesicherte Prognose des Ist- und des Zielzustands gegeben werden. Neben wissenschaftlichen Erkenntnissen wird auch auf persönliche Erfahrungen mit entsprechenden Gewässern zurückgegriffen und manche Einzelaspekte lassen sich nur abschätzen. Daher ist die aus der gutachterlichen Einschätzung folgende Bewertung des Nutzens nicht als tatsächlich gesicherte Einschätzung zu verstehen, sie dient vor allem der relativen Korrektur der Einschätzung der Vollzugshilfe und dem Vergleich zwischen den unterschiedlichen Varianten.

In Tab. 8.1 und Tab. 8.2 sind die gutachterlichen Bewertungen sowie die Bewertungen nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand für die zwei Untersuchungsstrecken dargestellt.

Indikator	Ist-Zustand nach VZH	Ist-Zustand gutachterliche Bewertung	Zustand mit Becken (30'000 m ³) nach VZH	Zustand mit Becken (30'000 m ³) gutachterliche Bewertung
F2* (larval)				
F3*				
Q1*				

Tab. 8.1 Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Becken von 30'000 m³ für die Untersuchungsstrecke Litzirüti.

Indikator	Ist-Zustand nach VZH	Ist-Zustand gutachterliche Bewertung	Zustand mit Becken (30'000 m ³) nach VZH	Zustand mit Becken (30'000 m ³) gutachterliche Bewertung
F2*				
F3*				
Q1*				

Tab. 8.2 Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Becken von 30'000 m³ für die Untersuchungsstrecke Langwies.
*Zweifarbige Felder entsprechen einem Wert zwischen den zwei Klassen.

Die detaillierten Begründungen für die gutachterlichen Bewertungen können Beilage 4 entnommen werden. Hervorzuheben ist, dass bei Litzirüti entgegen der Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] der Indikator F2* auch im sanierten Zustand mit einem Becken von 30'000 m³ weiterhin mit «mässig» statt «gut» bewertet wird. Dies wird gutachterlich dadurch begründet, als dass es immer noch zu wesentlichen

Gesamtänderungen der Pegel im Tagesverlauf, starken Änderungen bezüglich der benetzten Flächen und damit kumulativ zu vielen gestrandeten Forellen (vor allem Forellenlarven) kommen dürfte. Auch der Indikator F3* wird bei Litzirüti gutachterlich weiterhin als defizitär bewertet entgegen der VZH Schwall-Sunk [1]. Zwar wirkt sich die deutliche Sunkanhebung positiv aus, die Standortwahl für das Laichgeschäft der Forellen wird jedoch weiterhin als stark beeinträchtigt bewertet. Der Indikator Q1* wird bei Litzirüti im sanierten Zustand gleich wie die VZH Schwall-Sunk [1] bewertet. Bei Langwies werden die 3 Kernindikatoren im sanierten Zustand gutachterlich mit «gut» bis «sehr gut» bewertet.

8.2 Sanierter Zustand mit Ausleitkraftwerk

Neben dem sanierten Zustand mit einem Ausgleichsbecken wurde auch der Zustand mit einem Ausleitkraftwerk evaluiert (vgl. Projekt «Kraftwerk Pradapunt» in Kapitel 7). Mit einem Ausleitkraftwerk wird das Betriebswasser des Kraftwerks Litzirüti direkt in den Stollen des Ausleitkraftwerks weitergeleitet. Unklar ist derzeit, ob die Zuflüsse des Zwischeneinzugsgebiet zwischen Stausee Isel und dem Kraftwerk Litzirüti zusätzlich gefasst werden oder nicht. Ebenfalls unklar ist, wie hoch die einzuhaltenen Restwasservorgaben wären. Für die durchgeführte Analyse mussten daher Annahmen getroffen werden. Es wurde angenommen, dass die Zuflüsse des Zwischeneinzugsgebietes zwischen Stausee Isel und dem Kraftwerk Litzirüti nicht gefasst werden und keine zusätzlichen Restwassermengen ab Litzirüti dotiert werden müssen.

Mittels hydraulischer Modellierung wurden die Abflussganglinien für den Zeitraum zwischen 2017 bis Februar 2023 ohne Kraftwerkszuflüsse modelliert und die Indikatoren gemäss VZH Schwall-Sunk [1] ausgewertet. Ebenfalls wurde von Hydra eine gutachterliche Bewertung der drei Kernindikatoren F2*, F3* und Q1* für den Zustand mit Ausleitkraftwerk durchgeführt.

8.2.1 Indikatoren

In Abb. 8.7 und Abb. 8.8 ist die Indikatorbewertung für die Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies für den sanierten Zustand mit Ausleitkraftwerk (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte) dargestellt. In Anhang 1 ist die Gesamtauswertung der Indikatoren im sanierten Zustand dargestellt.

F3* [%] (Okt.-Ende April)	21	34
Q1* TR_{SS} [°C/h]	0.8	9.8
F2* - Agg - larval		
F2* - Agg - Übergang		
F2* - Agg - juvenil		
F2* - dF [%] - larval	12	43.7
F2* - dF [%] - Übergang	7.7	33.7
F2* - dF [%] - juvenil	17.4	42.3
F2* - dP [cm/min] - larval	0.02	1.56
F2* - dP [cm/min] - Übergang	0.01	1.13
F2* - dP [cm/min] - juvenil	0.01	1.35

Abb. 8.7 Indikatorenbewertung für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).

F3* [%] (Okt.-Ende April)	-5	10
Q1* TR_{SS} [°C/h]	0.4	6.9
F2* - Agg - larval		
F2* - Agg - Übergang		
F2* - Agg - juvenil		
$F2^* - dF$ [%] - larval	2.9	14.8
$F2^* - dF$ [%] - Übergang	2.1	7.5
$F2^* - dF$ [%] - juvenil	6	12.7
$F2^* - dP$ [cm/min] - larval	0.02	0.39
$F2^* - dP$ [cm/min] - Übergang	0.01	0.2
$F2^* - dP$ [cm/min] - juvenil	0.01	0.29

Abb. 8.8 Indikatorenbewertung für die Untersuchungsstrecke Langwies für den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).

8.2.2 Hydrologische Kenngrössen und Abflussganglinien

Neben der Bewertung der Indikatoren im sanierten Zustand ist auch die Veränderung der hydrologischen Kenngrössen von Interesse. In Abb. 8.9 und Abb. 8.10 sind verschiedene hydrologische Kenngrössen im sanierten Zustand (Ausleitkraftwerk) und im Ist-Zustand gegenübergestellt.

In Abb. 8.11 und Abb. 8.12 sind Beispiele für Wochenganglinien bei Litzirüti und Langwies für den prognostizierten Zustand mit Ausleitkraftwerk im Vergleich zum Ist-Zustand dargestellt. Weitere Visualisierungen können Anhang 3 entnommen werden.

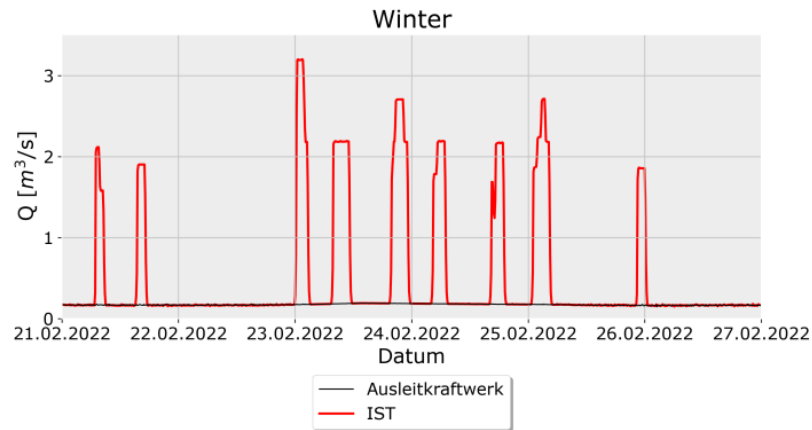


	F3* - Laichentwicklung Okt.-Ende April	F3* - Laichgeschäft Okt.-Dez	F2* - larval Mitte März - Mitte Mai	F2* - Übergang Mitte Mai - Ende Juli	F2* - juvenil Aug - Ende Sep	Kennwerte ganzjährig
Min (m³/s)	0.14 (0.13)	0.17 (0.17)	0.16 (0.16)	0.26 (0.27)	0.14 (0.13)	0.14 (0.13)
Sunk 5% (m³/s)	0.16 (0.16)	0.19 (0.19)	0.18 (0.18)	0.43 (0.46)	0.27 (0.27)	0.17 (0.17)
Schwall 95% (m³/s)	0.7 (3.5)	0.7 (3.6)	4.0 (6.7)	7.5 (10.4)	5.4 (8.0)	5.1 (8.2)
Amplitude (m³/s)	0.0 (2.7)	0.0 (2.6)	0.1 (2.7)	0.6 (1.8)	0.1 (2.7)	0.1 (2.6)
VSS (-)	1.2 (13.1)	1.2 (10.8)	1.2 (11.7)	1.2 (1.7)	1.2 (12.2)	1.2 (11.7)
Frequenz (-)	0 (2)	0 (2)	0 (2)	0 (1)	0 (2)	0 (2)

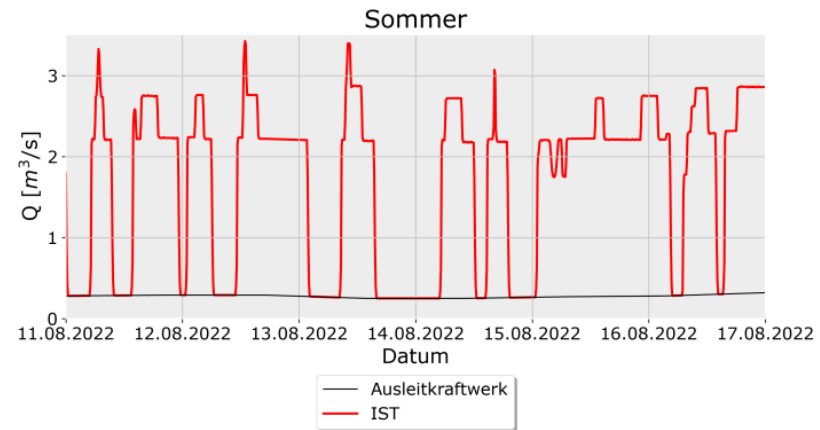
Abb. 8.9 Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.

	F3* - Laichentwicklung Okt.-Ende April	F3* - Laichgeschäft Okt.-Dez	F2* - larval Mitte März - Mitte Mai	F2* - Übergang Mitte Mai - Ende Juli	F2* - juvenil Aug - Ende Sep	Kennwerte ganzjährig
Min (m³/s)	0.68 (0.68)	0.77 (0.78)	1.05 (1.05)	2.52 (2.54)	0.68 (0.68)	0.68 (0.68)
Sunk 5% (m³/s)	0.74 (0.74)	0.83 (0.83)	1.14 (1.15)	2.77 (2.86)	1.64 (1.68)	0.76 (0.76)
Schwall 95% (m³/s)	2.8 (5.3)	1.8 (4.5)	7.2 (10.0)	10.7 (13.8)	7.2 (10.1)	8.3 (11.4)
Amplitude (m³/s)	0.1 (2.7)	0.1 (2.7)	0.1 (2.8)	0.6 (1.8)	0.1 (2.8)	0.1 (2.7)
VSS (-)	1.1 (3.9)	1.1 (3.6)	1.1 (2.7)	1.1 (1.3)	1.1 (3.5)	1.1 (3.5)
Frequenz (-)	0 (2)	0 (2)	0 (2)	0 (0)	0 (2)	0 (2)

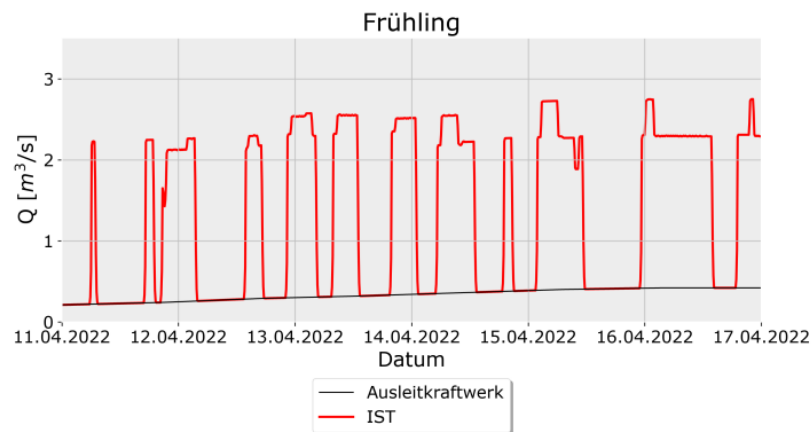
Abb. 8.10 Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Langwies für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.



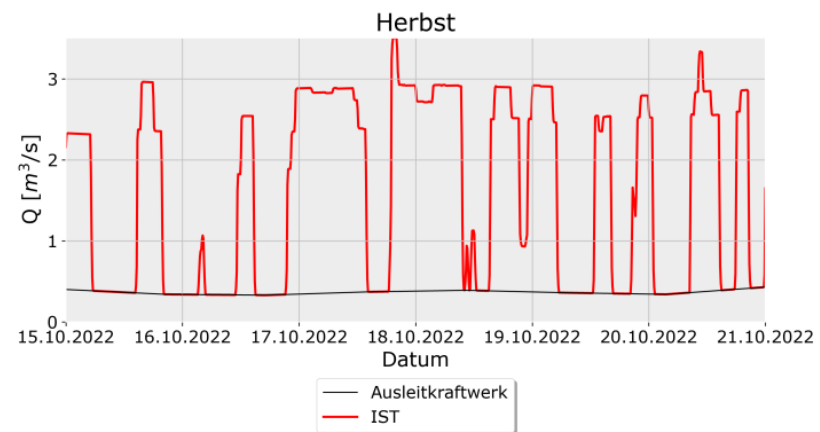
Ganglinie für eine repräsentative Woche im Winter.



Ganglinie für eine repräsentative Woche im Sommer.

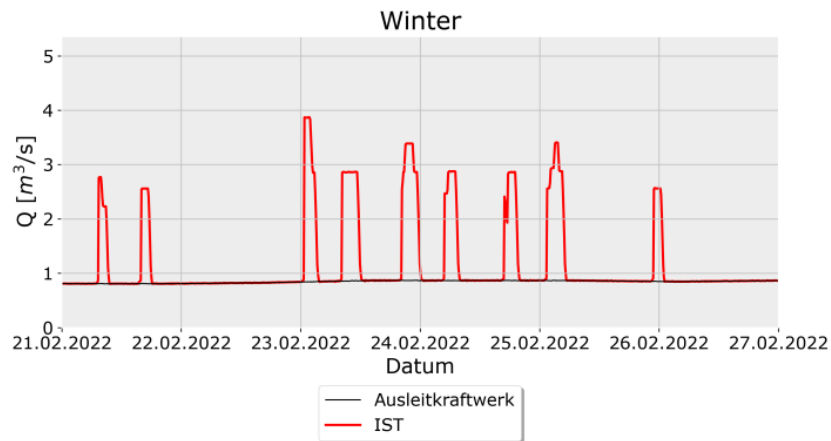


Ganglinie für eine repräsentative Woche im Frühling.

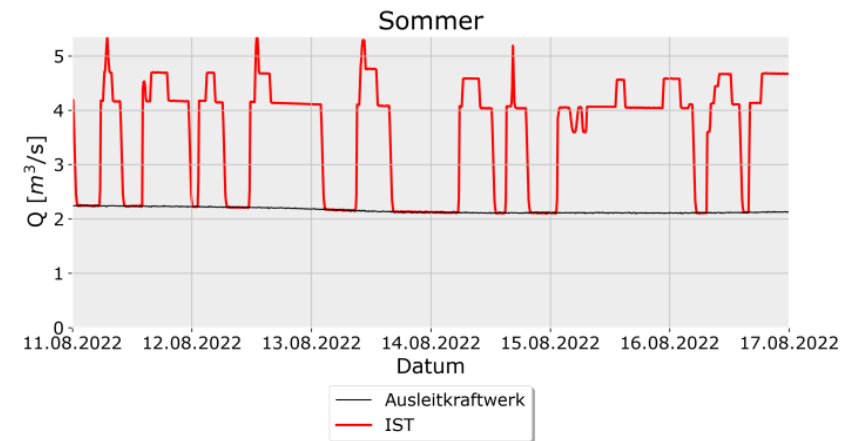


Ganglinie für eine repräsentative Woche im Herbst.

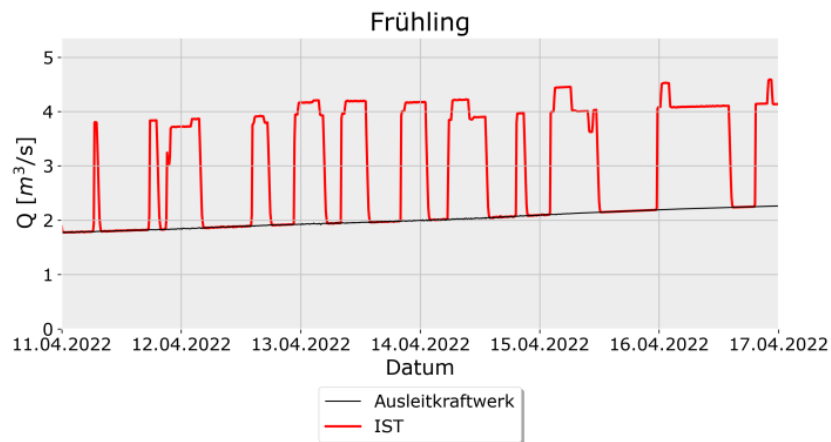
Abb. 8.11 Beispiele Wochenganglinien bei Litzirüti (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausleitkraftwerk [m³/s].



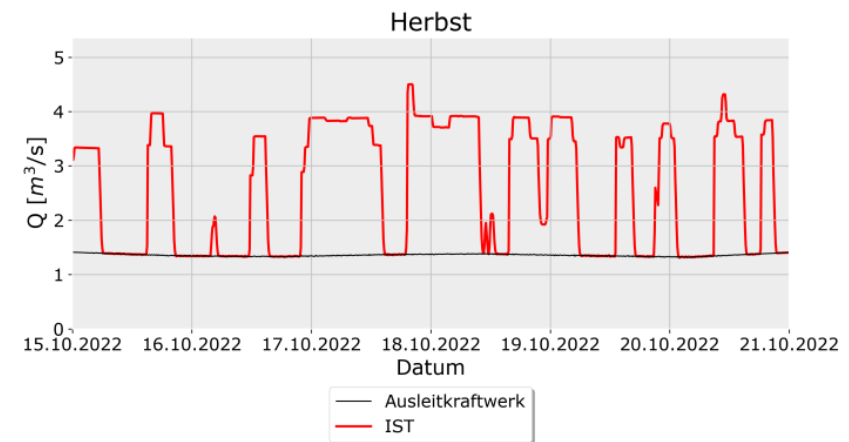
Ganglinie für eine repräsentative Woche im Winter.



Ganglinie für eine repräsentative Woche im Sommer.



Ganglinie für eine repräsentative Woche im Frühling.







Ganglinie für eine repräsentative Woche im Herbst.

Abb. 8.12 Beispiele Wochenganglinien bei Langwies (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausleitkraftwerk [m^3/s].

8.2.3 Gutachterliche Indikatorbewertung

In Tab. 8.1 und Tab. 8.2 sind die gutachterlichen Bewertungen sowie die Bewertungen nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand für die zwei Untersuchungsstrecken dargestellt.

Indikator	Ist-Zustand nach VZH	Ist-Zustand gutachterliche Bewertung	Zustand Ausleitkraftwerk nach VZH	Zustand Ausleitkraftwerk gutachterliche Bewertung
F2* (larval)				
F3*				
Q1*				

Tab. 8.3 Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk für die Untersuchungsstrecke Litzirüti.

Indikator	Ist-Zustand nach VZH	Ist-Zustand gutachterliche Bewertung	Zustand Ausleitkraftwerk nach VZH	Zustand Ausleitkraftwerk gutachterliche Bewertung
F2*				
F3*				
Q1*				

Tab. 8.4 Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk für die Untersuchungsstrecke Langwies.
*Zweifarbige Felder entsprechen einem Wert zwischen den zwei Klassen.

Die detaillierten Begründungen für die gutachterlichen Bewertungen können Beilage 4 entnommen werden. Durch den Entfall von Schwall tritt grundsätzlich eine Komplettsanierung ein. Beim Indikator F3*, wo die Abflussquantile mit dem Referenzzustand (Zustand ohne Kraftwerk) verglichen werden, können jedoch auch bei einer Ausleitung weiterhin Defizite bestehen, auch wenn diese nicht mehr auf Schwall-Sunk zurückzuführen sind. Gemäss gutachterlicher Bewertung wird F3* daher im Zustand mit Ausleitung mit «gut» und nicht mit «sehr gut» bewertet, da gegenüber dem Referenzzustand ein leichter Verlust an Laichflächen besteht.

8.3 Zielerfüllung

Mit der Zielerfüllung wird kontrolliert, ob die Ziele nach VZH Schwall-Sunk [1] erfüllt werden und damit die Sanierung die wesentliche Beeinträchtigung durch Schwall-Sunk beseitigt sind. Dazu müssen die drei berücksichtigten Kernindikatoren (F2*, F3* und Q1*) mit gut oder sehr gut bewertet sein, ausser einer darf noch mässig sein. Die Kontrolle, ob die Ziele nach VZH Schwall-Sunk [1] erfüllt werden, erfolgt für die Bewertung der Indikatoren nach VZH Schwall-Sunk [1] sowie für die gutachterliche Bewertung separat. Dabei wird für jede Untersuchungsstrecke anhand der Bewertung der Kernindikatoren kontrolliert, ob erfüllt oder nicht erfüllt (Ja oder Nein). Falls die Ziele von einer Untersuchungsstrecke als erfüllt eingeordnet werden und von der anderen Untersuchungsstrecke als nicht erfüllt eingeordnet werden, werden die Ziele für die Gesamtstrecke als teilweise erfüllt eingeordnet.

8.3.1 Zielerfüllung Ausgleichsbecken

Nach VZH Schwall-Sunk [1] sind die Zielvorgaben bei beiden Untersuchungsstrecken erfüllt. Gutachterlich sind die Zielvorgaben bei Litzirüti nicht erfüllt und bei Langwies erfüllt. Gutachterlich erfüllt die Sanierungsmassnahme Ausgleichsbecken die Ziele somit nur teilweise.

Untersuchungsstrecke	Ziele nach VZH erfüllt?	Ziele gutachterlich erfüllt?
Litzirüti	Ja	Nein
Langwies	Ja	Ja
Gesamt	Ja	Teilweise

Tab. 8.5 Zielerfüllung Ausgleichsbecken.

8.3.2 Zielerfüllung Ausleitkraftwerk

Die Zielvorgaben sind in beiden Untersuchungsstrecken sowohl nach VZH Schwall-Sunk [1] als auch gutachterlich erfüllt.

Untersuchungsstrecke	Ziele nach VZH erfüllt?	Ziele gutachterlich erfüllt?
Litzirüti	Ja	Ja
Langwies	Ja	Ja
Gesamt	Ja	Ja

Tab. 8.6 Zielerfüllung Ausleitkraftwerk.

8.4 Methodik ökologischer Nutzen

Je stärker sich die Indikatoren durch die Sanierungsmassnahme verbessern, desto grösser wird deren ökologische Nutzen bewertet. In Absprache mit Hydra AG hat HTU eine Methodik zur Quantifizierung des ökologischen Nutzens einer Sanierungsmassnahme entwickelt, welche auch analog bei den Schwall-Sunk Sanierungen am Rhein und der Moesa angewendet wird. Dabei kann der Sanierungsmassnahme eine Punktezahl für den ökologischen Nutzen zugeordnet werden, womit ein quantitativer Vergleich zwischen den Massnahmen möglich wird.

Die Beurteilung des ökologischen Nutzens erfolgt durch eine Gegenüberstellung der Indikatorbewertung im Ist-Zustand und im sanierten Zustand. Sowohl die Bewertung

der Indikatoren nach VZH Schwall-Sunk [1] als auch die gutachterliche Bewertung wird dabei, mit unterschiedlichen Gewichtungen, berücksichtigt. Die Gegenüberstellung wird für die drei Kernindikatoren F2*, F3* und Q1* durchgeführt. Für die Bewertung des ökologischen Nutzens anhand einer Punktezahl wurde wie folgt vorgegangen (vgl. Tab. 8.7).

- 1 Anpassung der Farben rot «schlecht» bis blau «sehr gut» nach VZH Schwall-Sunk [1] der Indikatorenbewertung, in die Werteskala 1 «schlecht» bis 5 «sehr gut»,
- 2 bei Indikator F2* (anders als bei der Aggregation in der Matrix nach VZH Schwall-Sunk [1]), Bildung des Mittelwertes aus der larvalen, Übergangs- und juvenilen Phase bei der Beurteilung der Pegeländerungsrate und der trockenfallenden Flächen,
- 3 Differenz der Bewertung (Verbesserung) des IST-Zustands und des Zustands mit der jeweiligen Massnahme,
- 4 Analog wird auch für die Bewertung der gutachterlichen Beurteilung die Differenz aus der Bewertung des IST-Zustands und der Massnahme gemacht,
- 5 Definition der Gewichtung:
 - F2* gesamt = 40%,**
 Pegeländerungsrate = 20% (Faktor 2),
 trockenfallende Fläche = 10% (Faktor 1),
 gutachterliche Einschätzung F2* = 10% (Faktor 1)
 - F3* gesamt = 40%,**
 Reduktion hydraulisch geeignetes Laichsubstrat = 20% (Faktor 2)
 gutachterliche Einschätzung = 20% (Faktor 2),
 - Q1* gesamt: = 20%,**
 Temperaturänderungsrate = 10% (Faktor 1)
 Gutachterliche Einschätzung = 10% (Faktor 1)
- 6 Multiplizieren der Gewichtungsfaktoren mit der Differenz (Nutzen) der Massnahme und summieren zu einem gewichteten Wert.

Indikator	Gewichtung	IST-Zustand	Massnahme	Differenz
Pegelrückgangsrate (F2*)	20%	3.0	5.0	2.0
<i>Larvale Phase</i>	6.67%	1.0	5.0	
<i>Übergangsphase</i>	6.67%	3.0	5.0	
<i>Juvenile Phase</i>	6.67%	5.0	5.0	
Trockenfallende Fläche (F2*)	10%	2.0	5.0	3.0
<i>Larvale Phase</i>	3.33%	2.0	5.0	
<i>Übergangsphase</i>	3.33%	2.0	5.0	
<i>Juvenile Phase</i>	3.33%	2.0	5.0	
Gutachterliche Einschätzung F2*	10%	1.0	5.0	4.0
Reduktion geeignete Laichflächen	10%	4.0	5.0	1.0
Gutachterliche Einschätzung F3*	20%	2.0	5.0	3.0
Temperaturänderungsrate	10%	1.0	5.0	4.0
Gutachterliche Einschätzung Q1*	10%	2.0	5.0	3.0
Gewichtete Summe Nutzen				25

Tab. 8.7 Beispiel Kombination der Indikatoren- und gutachterlichen Beurteilung, zur Bewertung des Nutzens einer Massnahme.

Die gewichtete Summe des Nutzens kann entsprechend für die Kosten-Nutzen-Analyse verwendet werden.

Der Nutzen wird für beide Untersuchungsstrecken berechnet. Um der Massnahme jeweils einen Punktebetrag zuordnen zu können, werden die Punktezahlen der Massnahmen für beide Untersuchungsstrecken jeweils zu 50% gewichtet.

8.5 Resultate Beurteilung Massnahmen

8.5.1 Ausgleichsbecken 30'000 m³

Indikator	Gewichtung	IST-Zustand Litzirüti	IST-Zustand Langwies	Prognose Litzirüti	Prognose Langwies	Differenz Litzirüti	Differenz Langwies	Differenz Gesamt
Pegeländerungsrate (F2*)	20%	3	4.3	4.7	5.0	1.7	0.7	1.2
Larvale Phase	6.67%	1	3	4	5			
Übergangsphase	6.67%	4	5	5	5			
Juvenile Phase	6.67%	5	5	5	5			
Trockenfallende Fläche (F2*)	10%	2.3	4.3	3.3	5.0	1.0	0.7	0.8
Larvale Phase	3.33%	2	4	3	5			
Übergangsphase	3.33%	3	5	4	5			
Juvenile Phase	3.33%	2	4	3	5			
Gutachterliche Einschätzung F2*	10%	1.5	3	3	5	1.5	1	1.3
Reduktion geeignetes Laichsubstrat	10%	3	4	4	5	1	1	1
Gutachterliche Einschätzung F3*	30%	1.5	3.5	2.5	4.5	1	1	1
Temperaturänderungsrate	10%	1	1	4	4	3	3	3
Gutachterliche Einschätzung Q1*	10%	1	2	4	4	3	2	2.5
Gewichtete Summe ökologischer Nutzen						15.8	12.0	13.9

Tab. 8.8 Resultate Punkte Nutzen für Massnahme Ausgleichsbecken von 30'000 m³.

8.5.2 Ausleitkraftwerk

Indikator	Gewichtung	IST-Zustand Litzirüti	IST-Zustand Langwies	Prognose Litzirüti	Prognose Langwies	Differenz Litzirüti	Differenz Langwies	Differenz Gesamt
Pegeländerungsrate (F2*)	20%	3	4.3	5	5	2.0	0.7	1.3
Larvale Phase	6.67%	1	3	5	5			
Übergangsphase	6.67%	4	5	5	5			
Juvenile Phase	6.67%	5	5	5	5			
Trockenfallende Fläche (F2*)	10%	2.3	4.3	4.3	5	2.0	0.7	1.3
Larvale Phase	3.33%	2	4	4	5			
Übergangsphase	3.33%	3	5	5	5			
Juvenile Phase	3.33%	2	4	4	5			
Gutachterliche Einschätzung F2*	10%	1.5	3	5	5	3.5	2	2.8
Reduktion geeignetes Laichsubstrat	10%	3	4	4	5	1	1	1
Gutachterliche Einschätzung F3*	30%	1.5	3.5	4.5	4.5	3	1	2
Temperaturänderungsrate	10%	1	1	5	5	4	4	4
Gutachterliche Einschätzung Q1*	10%	1	2	5	5	4	3	3.5
Gewichtete Summe ökologischer Nutzen						27.5	15.0	21.3

Tab. 8.9 Resultate Punkte Nutzen für Massnahme Ausleitkraftwerk.

8.6 Kosten-Nutzen Analyse

Basierend auf den Gesamtkosten (Kapitel 7.3) und dem ökologischen Nutzen (Kapitel 8.5) der zwei Massnahmen «Ausgleichsbecken» und «Ausleitkraftwerk» kann ein Kosten-Nutzen Vergleich durchgeführt werden (Abb. 8.13).

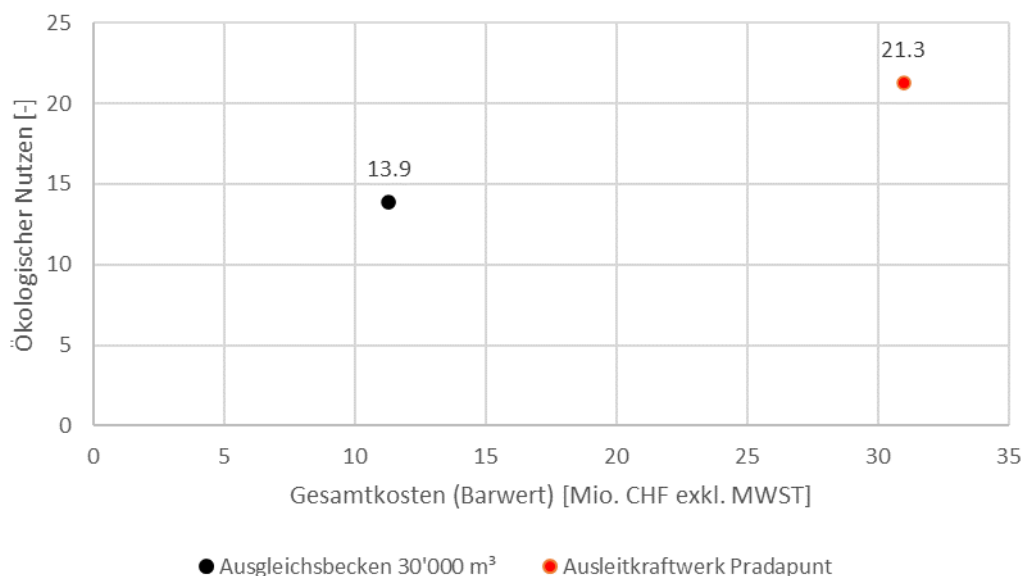


Abb. 8.13 Kosten-Nutzen Vergleich der zwei Massnahmen "Ausgleichsbecken 30'000 m³" und "Ausleitkraftwerk Pradapunt".

Der ökologische Nutzen ist gemäss der durchgeführten Methodik für die Massnahme «Ausleitkraftwerk Pradapunt» etwa 1.5 mal so gross wie für die Massnahme «Ausgleichsbecken». Auf der anderen Seite sind die Gesamtkosten der Massnahme «Ausleitkraftwerk Pradapunt» mehr als 2.5 mal teurer, als die Gesamtkosten des Ausgleichsbeckens.

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis liegt für das Ausgleichsbecken bei rund CHF 0.8 Mio. pro Nutzenpunkt. Beim Ausleitkraftwerk liegt das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei rund CHF 1.5 Mio. pro Nutzenpunkt. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis fällt, für die durchgeführte Methodik, somit zu Gunsten des Ausgleichsbeckens aus.

Für die durchgeführte Kosten-Nutzen-Analyse muss berücksichtigt werden, dass einerseits die Gesamtkostenschätzung grösseren Unsicherheiten unterliegt und andererseits die Methodik zur Bepunktung des ökologischen Nutzens nur eine von verschiedenen möglichen Betrachtungsweisen bietet, diesen zu quantifizieren.

Bei einer anderen Betrachtungsweise des ökologischen Nutzens der zwei Massnahmen, könnte sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis stark verändern. Wird nur die gutachterliche Bewertung der Kernindikatoren berücksichtigt, wären für das Ausgleichsbecken die ökologischen Ziele in der Untersuchungsstrecke Litzirüti nicht erfüllt (vgl. Kapitel 8.3.1). Auch würde bei einer reinen Betrachtung der gutachterlichen Bewertung das Verhältnis des ökologischen Nutzens wesentlich stärker zugunsten des Ausleitkraftwerks ausfallen.

Insbesondere beim Ausleitkraftwerk unterliegt die Gesamtkostenschätzung grossen Unsicherheiten, da eine Vorhersage der Strompreise über einen Zeitraum von 60

Jahren nicht möglich ist. Dazu kommt, dass bei einer Berücksichtigung der Investitionsbeiträge sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis deutlich zu Gunsten des Ausleitkraftwerks verschieben würde.

8.7 Fazit ökologischer Nutzen und Verhältnismässigkeit

Die quantitative Beurteilung zum ökologischen Nutzen zeigt sowohl für das Ausgleichsbecken als auch für das Ausleitkraftwerk eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand auf, wobei bei der Massnahme des Ausgleichsbecken die gutachterliche Einschätzung stark negativ von der Bewertung mit den VZH-Indikatoren abweicht. Wie erwartet, fällt der ökologische Nutzen für die Untersuchungsstrecke Litzirüti deutlich höher aus als für die Untersuchungsstrecke Langwies. Grund dafür ist, dass die Defizite im Ist-Zustand nach VZH Schwall-Sunk [1] wie auch die gutachterliche Bewertung der Defizite bei -Langwies- deutlich geringer ausfallen als bei Litzirüti. Sowohl bei der Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] als auch bei der gutachterlichen Bewertung, wird der ökologische Nutzen eines Ausleitkraftwerks wesentlich höher bewertet als beim Ausgleichsbecken. Der ökologische Nutzen eines Ausleitkraftwerks wird für die Untersuchungsstrecke Litzirüti fast doppelt so hoch bewertet wie für das Ausgleichsbecken. Bei Langwies wird der ökologische Nutzen des Ausleitkraftwerks nur noch geringfügig höher bewertet als mit einem Ausgleichsbecken.

Gemäss Einschätzung von Hydra [7] unterstützt die Umsetzung eines Ausgleichsbeckens von 30'000 m³ durch die Verdopplung des minimalen Sunkabflusses sowie durch die Reduktion der Pegeländerungsraten die Möglichkeit einer natürlichen Reproduktion im Abschnitt Litzirüti. Ob eine selbsterhaltende Population möglich wäre, lässt sich jedoch nicht sicher sagen. Auch mit dem Ausgleichsbecken, bleibt der Abschnitt zumindest bis zum Zufluss des Sapünerbachs stark durch Schwall-Sunk geprägt mit Schwall-Sunk Verhältnissen über 7 und einer weiterhin hohen Frequenz der Schwall-Sunk Ereignisse.

Im Abschnitt unterhalb Zufluss Sapünerbach bei Langwies zeigen zwar die meisten Indikatoren gemäss VZH Schwall-Sunk [1] bei Langwies bereits ohne eine Sanierung einen «guten» Zustand an, trotzdem würde eine weitere Verbesserung mit einem Ausgleichsbecken aus Sicht von Hydra AG eine Aufwertung der Gesamtsituation herbeiführen.

Im Gegensatz zu einem Ausgleichsbecken würde die Variante Ausleitkraftwerk die schwallbedingten Defizite von Litzirüti bis Pradapunt komplett beseitigen. Gemäss Hydra [7] würde dies gegenüber der Variante mit Ausgleichsbecken zu einer deutlichen Verbesserung der natürlichen Reproduktion führen und die Wahrscheinlichkeit einer selbsterhaltenden Population bei Litzirüti weiter erhöhen. Das Ausleitkraftwerk würde zu keinen relevanten neuen Beeinträchtigungen bezüglich der Reproduktion führen und während der Larvalzeit das Strandungsrisiko sogar gegenüber dem Naturzustand reduzieren. Dies unter der Annahme, dass die heutigen Basisabflüsse zumindest in den Wintermonaten nicht verringert werden (vgl. Kapitel 8.2).

Die bestehenden Restdefizite im Abschnitt unterhalb Zufluss Sapünerbach würden nur durch ein Ausleitkraftwerk beseitigt. Eine durch die Restwasserführung verursachte, zusätzliche Einschränkung wäre aufgrund des Zuflusses des Sapünerbachs unwahrscheinlich und höchstens minimal. Der Zufluss würde auch bei ganzjährig konstanter Dotierung zu einer gewissen Abflussdynamik führen.

Während der ökologische Nutzen des Ausleitkraftwerks gegenüber dem Ausgleichsbecken somit deutlich höher ausfällt, sind auch die Gesamtkosten des Ausleitkraftwerks (für das berücksichtigte Strompreisszenario) höher als beim Ausgleichsbecken.

Ob eine Sanierungsmassnahme als verhältnismässig eingeordnet wird oder nicht ist schlussendlich Kompetenz der Leitbehörde (Kanton) unter Anhörung des BAFU. Als Orientierungshilfe dazu dient unter anderem eine vom BAFU erwähnte maximale Verhältnismässigkeitsgrenze von CHF 6 Mio. pro sanierter km Gewässerabschnitt, sofern ein sehr grosses ökologisches Potential und ein grosser ökologischer Nutzen besteht [20]. Beim Ausgleichsbecken betragen die Kosten pro sanierter Gewässerabschnitt rund CHF 1.7 Mio./km (für den Gesamtabschnitt zwischen Litzirüti und Pradapunt). Beim Ausleitkraftwerk betragen die Kosten pro sanierter Gewässerabschnitt rund CHF 4.6 Mio./km (für den Gesamtabschnitt zwischen Litzirüti und Pradapunt).

9. Gesamtbeurteilung

9.1 Einleitung

Der vorliegende Bericht zur Beurteilung der Schwall-Sunk Problematik und deren Sanierungsmöglichkeiten in der Plessur zwischen Litzirüti und Pradapunt basiert auf einer Vielzahl an durchgeführten Untersuchungen, welche sich in verschiedene Projektphasen gliedern.

Im ersten Schritt wurde im Rahmen der Defizitanalyse geprüft, wie gross die ökologischen Defizite in der Plessur sind. Anhand von Feldaufnahmen und Modellierungen wurde das ökologische Defizit der oberen Plessur evaluiert. Anschliessend wurde analysiert, auf welche Ursachen die vorgefundenen Defizite zurückgeführt werden können und es wurden die Schwall-Sunk bedingten Defizite identifiziert. Im Rahmen des nächsten Schritts, der Zieldefinition, wurden die ökologischen Ziele zur Beseitigung der Schwall-Sunk bedingten Defizite festgelegt. Basierend auf den ökologischen Zielen konnte schlussendlich der benötigte Sanierungsumfang ermittelt und parallel dazu verschiedene Sanierungsmassnahmen evaluiert und eine Auswahl an Bestvarianten bestimmt werden. Für die ausgewählten Bestvarianten wurde in einer Kosten-Nutzen-Analyse der ökologische Nutzen und die Gesamtkosten miteinander verglichen.

Basierend auf den Resultaten des vorliegenden Berichtes und der vorgeschlagenen, bereits stark eingeschränkten Auswahl an Bestvarianten ist durch die Behörden ein Entscheid zur Wahl der Bestvariante unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit, der energiepolitischen Ziele sowie der weiteren nach Art. 39a Abs. 2 GSchG definierten Kriterien zu treffen und das weitere Vorgehen zu definieren.

9.2 Defizit- und Ursachenanalyse

Die Defizit- und Ursachenanalyse stützt sich auf die Auswertung mehrerer biotischer und abiotischer Indikatoren gemäss VZH Schwall-Sunk [1]. Basierend auf den durchgeführten Feldaufnahmen und Modellierungen zeigen die Bewertungen der Indikatoren auf, dass verschiedene ökologische Defizite direkt auf den negativen Einfluss von Schwall-Sunk zurückgeführt werden können. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf den zwei definierten Untersuchungsstrecken in Litzirüti und Langwies.

Da bereits die natürlichen Umweltbedingungen in der Plessur zwischen Litzirüti und Pradapunt hohe Anforderungen an die Leitfischart der Bachforellen stellen, stellt sich eine klare Abgrenzung zwischen den durch Schwall-Sunk bedingten Beeinträchtigungen und den weiteren Beeinträchtigungen als schwierig dar. Insbesondere bei der Reproduktion der Fische besteht eine Vielzahl an Defiziten unterschiedlicher Ursachen.

Die Plessur zwischen Litzirüti und Pradapunt ist ein natürlicher Flusslauf mit Auengebieten von nationaler Bedeutung, womit diesem Abschnitt grundsätzlich ein hohes ökologisches Potential zugeordnet wird. Jedoch ist der Abschnitt zwischen Litzirüti bis zur Einmündung des Sapünerbachs mehrheitlich steil und es existieren nur wenige grössere und zusammenhängende Flächen mit geeignetem Laichsubstrat für die Bachforellen. Verschiedene Wanderhindernisse und die Staumauer Isel unterbrechen zudem den Kontakt zur bestehenden, selbsterhaltenden Forellenpopulation oberhalb des Stausees Isel. Auch zwischen Langwies und Litzirüti bestehen verschiedene Wanderhindernisse für die Bachforelle, welche einen Aufstieg unmöglich machen. Im Bereich Langwies gibt es einige grössere und auch zusammenhängende Flächen mit geeignetem Laichsubstrat. Ab Zufluss des Sapünerbachs und insbesondere ab Zufluss

des Frauentobelbach Plessur abwärts besteht jedoch ein erhöhter bis sehr hoher Feinsedimenteintrag aus den Seitenbächen, welcher zu einer verstärkten Kolmation und einer verminderten Qualität des Laichsubstrats führt. Das Potential für die natürliche Reproduktion der Bachforellen ist in der betrachteten Strecke daher aus verschiedenen Gründen eingeschränkt.

Die durchgeführten Brutboxenversuche zeigen auf, dass die chemisch-physikalische Wasserqualität bei Litzirüti, Langwies und Molinis grundsätzlich für die Reproduktion der Bachforellen geeignet ist. Weiter zeigen die Resultate der Befischungen, dass bei Litzirüti sowohl vor als auch nach dem Regimewechsel des Kraftwerks Litzirüti eine natürliche Reproduktion zumindest auf tiefem Niveau nachgewiesen werden konnte. Für eine sich selbst erhaltende Forellenpopulation ist diese jedoch nicht ausreichend. Zahlreiche, mehrere Jahre alte adulte Bachforellen bei Litzirüti zeigen zumindest auf, dass dieser Abschnitt als Habitatraum genutzt wird. Unterhalb des Sapünerbachs konnten Laichgruben und Jungfische in höheren Dichten als bei Litzirüti vorgefunden werden. Ob aber im heutigen Zustand ohne Besatz eine Forellenpopulation sich selbst erhalten könnte, ist unklar.

Der Indikator F3* «Laichareale» weist gemäss VZH Schwall-Sunk [1] bei Litzirüti ein leichtes Defizit und bei Langwies kein Defizit auf. Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass das Defizit beim Indikator F3* insbesondere auf die zu tiefen Sunkabflüsse gegenüber dem Referenzzustand zurückgeführt werden kann. Gemäss gutachterlicher Bewertung unterschätzt die VZH Schwall-Sunk [1] bei Litzirüti und Langwies jedoch das Defizit des durch Schwall-Sunk verursachten Laichflächenverlusts, insbesondere aufgrund der nicht berücksichtigten Frequenz der Schwallereignisse.

Die Resultate des Indikators F2* «Stranden der Fische» zeigen ein deutliches Defizit durch Stranden von larvalen Forellen bei Litzirüti auf, was auch gutachterlich bestätigt wird. Sowohl die trockenfallenden Flächen zwischen Schwall und Sunk als auch die Pegelrückgangsraten sind zu gross. Unterhalb von Langwies ist hingegen das Risiko durch Stranden von larvalen Fischen bereits deutlich geringer. Dies hauptsächlich aufgrund des höheren Abflusses aus den Zuflüssen der Seitenbäche.

Die durch Schwall-Sunk verursachten Temperaturschwankungen (Q1*) werden bei Litzirüti und Langwies als hoch bewertet.

Die Auswertungen des Indikators F6 «Habitateignung» zeigen bei Litzirüti ein Defizit für die adulten Bachforellen in den Wintermonaten bei Sunkabflüssen auf. In den anderen Jahreszeiten und auch bei Schwallabflüssen sowie bei juvenilen Fischen zeigt der Indikator keine Defizite auf. Auch für die Untersuchungsstrecke Langwies bestehen für den Indikator F6, gemäss Modellierungen, keine Defizite.

Die Defizite beim Makrozoobenthos fallen bei Litzirüti, Langwies und Molinis grundsätzlich gering aus. Die Unterschiede zwischen den Resultaten vor und nach Regimewechsel im Jahr 2017 zeigen jedoch insgesamt eine Verschlechterung des Zustandes des Makrozoobenthos auf, was von WFN auf die zusätzliche hydraulische Belastung durch Schwall-Sunk zurückgeführt wird. Die Kolmationsaufnahmen zeigen keine nachweisbare Beeinflussung durch Schwall-Sunk auf.

9.3 Zieldefinition und Sanierungsumfang

Gemäss VZH Schwall-Sunk [1] liegt keine Schwall-Sunk Beeinträchtigung mehr vor, wenn die Mehrheit der Kernindikatoren mindestens einen «guten» Zustand aufweisen und kein Kernindikator mit «unbefriedigend» oder «schlecht» bewertet wird. Für die

Zieldefinition wurde entsprechend angestrebt, für jeden untersuchten und anwendbaren Kernindikator einen Ziel-Zustand von «gut» zu erreichen. Für die Kernindikatoren F2*, F3* und F6 wurden die benötigten hydrologischen Vorgaben in den relevanten Untersuchungsstrecken für die Erreichung der Zielklasse «gut» ermittelt. Für den Kernindikator Q1* wurde auf eine Festlegung von hydrologischen Zielwerten verzichtet und stattdessen iterativ evaluiert, ob mit der für die anderen Kernindikator benötigte Dämpfung, auch die Ziele für Q1* erreicht werden können.

Die Festlegung der hydrologischen Vorgaben und des daraus resultierenden Sanierungsumfangs ist ein iterativer Prozess. Die Definition der benötigten hydrologischen Kenngrössen ist nicht immer eindeutig, womit mehrere hydrologische Anforderungsprofile eine Beseitigung der Defizite erreichen können. Zuerst wurden in jeder Untersuchungsstrecke basierend auf dem Ziel-Zustand die hydrologischen Vorgaben definiert. Anschliessend wurde mittels hydraulischer Modellierung iterativ berechnet, welche hydrologischen Vorgaben bei der Wasserrückgabe zur Einhaltung der Ziele erfüllt werden müssen. Durch eine Gegenüberstellung der Betriebsabflüsse und den hydrologischen Vorgaben bei der Wasserrückgabe wurde das zur Dämpfung benötigte Retentionsvolumen berechnet.

Die Defizite der Kernindikatoren können (gemäss VZH Schwall-Sunk [1]) mit einer Begrenzung der Pegeländerungsraten und einer winterlichen Sunkanhebung auf minimal 0.24 m³/s bei Litzirüti (im Auswertungszeitraum lag der Minimalabfluss bei 0.13 m³/s) erreicht werden. Für die Einhaltung der Sunkvorgabe und die Reduktion der Abflussänderungsraten wird beim Kraftwerk Litzirüti gemäss der Volumenabschätzung basierend auf den Betriebsdaten von Januar 2017 bis Februar 2023 ein Retentionsvolumen von rund **30'000 m³** benötigt. Mit diesem Retentionsvolumen hätten für den Untersuchungszeitraum von 2017 bis 2023 die Zielvorgaben erfüllt werden können. Jedoch kann nicht gewährleistet werden, dass mit diesem Retentionsvolumen auch in Zukunft bei einer anderen Hydrologie und einem anderen Betrieb die Zielvorgaben, insbesondere die Sunkvorgabe, zu jedem Zeitpunkt erfüllt werden können.

Auch mit einer Ausleitung können die Defizite der Kernindikatoren F2*, F3* und Q1* behoben werden. Mit einer Ausleitung fällt der komplette Schwall weg, womit zwischen Litzirüti und Pradapunt kein Schwall-Sunk Regime mehr besteht.

9.4 Vorauswahl Massnahmen

Im Rahmen der Vorauswahl der Massnahmen wurden verschiedene Massnahmenideen erarbeitet und in Bezug auf Schwall-Sunk, Technik, Umwelt und Umfeld geprüft, bewertet und dokumentiert. Basierend auf diesen Massnahmenideen wurde in Absprache mit den Behörden und Arosa Energie eine Massnahmenvorauswahl festgelegt.

Dabei wurde vorgeschlagen zwei Sanierungsmassnahmen weiterzuverfolgen: Ein Ausgleichsbecken linksufrig bei Litzirüti mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ sowie das Ausleitkraftwerk Litzirüti-Pradapunt, welches das Betriebswasser ab der Zentrale Litzirüti weiter zur neu geplanten Zentrale Pradapunt leitet, womit die Strecke zwischen Litzirüti und Pradapunt bezüglich Schwall-Sunk saniert wäre. Unklar ist derzeit, wie hoch die einzuhaltenden Restwasservorgaben bei einer Ausleitung unterhalb Litzirüti wären. Für die vorliegende Einschätzung wurde angenommen, dass die Restwasserabflüsse ab Litzirüti den heutigen Zuflüssen aus dem Zwischeneinzugsgebiet Isel-Litzirüti, einschliesslich der Restwassermengen und Überläufen ab Isel, entsprechen.

Für das linksufrige Ausgleichsbecken inkl. Zu- und Ableitung wird gemäss Grobkostenschätzung von Investitionskosten von **CHF 9.2 Mio. exkl. MWST** (Kostengenauigkeit +/- 40%) aus. Die Schätzung für die jährlichen Unterhaltskosten beträgt **CHF 120'000 exkl. MWST**. Für diesen Standort zeigt die Beurteilung der Zielkonflikte, dass die Massnahme als grundsätzlich realisierbar eingeschätzt wird.

Für das Ausleitkraftwerk Pradapunt existiert keine aktuelle Kostenschätzung. Für das damals vorliegende Vorprojekt wurden die Investitionskosten im Jahr 2015 auf rund **CHF 74.3 Mio. exkl. MWST (Kostengenauigkeit +/- 20%)** geschätzt. Die Schätzung für die jährlichen Unterhaltskosten beträgt **CHF 1.25 Mio. exkl. MWST**. Es wurde eine mittlere Jahresenergieproduktion des Kraftwerks Pradapunt von rund **41.7 GWh** abgeschätzt. Für das Ausleitkraftwerk Pradapunt zeigt die Einschätzung der Zielkonflikte, dass die Massnahme als grundsätzlich realisierbar eingeschätzt wird. Ein zentraler Punkt für die Beurteilung und Bewilligung des Ausleitkraftwerks ist die Bestimmung der Restwassermengen, welche zum heutigen Zeitpunkt noch offen ist.

Damit die Kosten zwischen den zwei Sanierungsmassnahmen miteinander verglichen werden können, wurde auf Grundlage der Barwertmethode für einen Zeitraum von 40 Jahren (Ausgleichsbecken) resp. 60 Jahren (Ausleitkraftwerk) die Gesamtkosten (Barwert) ermittelt. Beim Ausleitkraftwerk wurde dabei für die Produktionseinnahmen ein Preisszenario von 80 CHF/MWh berücksichtigt:

- Gesamtkosten Ausgleichsbecken: **CHF 11.3 Mio. exkl. MWST**
- Gesamtkosten Ausleitkraftwerk: **CHF 31.0 Mio. exkl. MWST**

9.5 Ökologischer Nutzen und Verhältnismässigkeit

Der ökologische Zustand nach Umsetzung der zwei Sanierungsvarianten wurde sowohl nach VZH Schwall-Sunk [1] als auch gutachterlich, auf Basis der berücksichtigten Kernindikatoren F2*, F3* und Q1*, bewertet.

Für das Ausgleichsbecken sind die Zielvorgaben nach VZH Schwall-Sunk [1] in beiden Untersuchungsstrecken erfüllt. Alle berücksichtigten Kernindikatoren erreichen die Zielklasse «gut». Gemäss gutachterlicher Einschätzung unterstützt die Umsetzung des Ausgleichsbeckens durch die Gewährleistung einer minimalen Sunkabflussmenge sowie die Reduktion der Pegeländerungsraten die Möglichkeit einer natürlichen Reproduktion im Abschnitt Litzirüti. Jedoch bleibt der Abschnitt auch mit dem Ausgleichsbecken bis zum Zufluss des Sapünerbachs stark durch Schwall-Sunk geprägt mit Schwall-Sunk Verhältnissen über 7 und einer weiterhin hohen Frequenz der Schwallereignisse. Gemäss gutachterlicher Einschätzung sind daher die Zielvorgaben, (Erreichung Zielklasse «gut» der Kernindikatoren) mit dem Ausgleichsbecken zwar bei Langwies erfüllt, bei Litzirüti wird die Rest-Beeinträchtigung weiterhin als wesentlich eingeordnet. Abweichend von VZH Schwall-Sunk [1] erfüllt die Sanierungsmassnahme Ausgleichsbecken gutachterlich die Ziele der Schwall-Sunk/Sanierung somit nur teilweise.

Das Ausleitkraftwerk erfüllt die Zielvorgaben in beiden Untersuchungsstrecken sowohl nach VZH Schwall-Sunk [1] als auch gutachterlich. Im Gegensatz zu einem Ausgleichsbecken würde die Variante Ausleitkraftwerk die schwallbedingten Defizite von Litzirüti bis Pradapunt komplett beseitigen. Dies würde gegenüber der Variante mit Ausgleichsbecken zu einer deutlichen Verbesserung der natürlichen Reproduktion führen und die Wahrscheinlichkeit einer selbsterhaltenden Population bei Litzirüti weiter erhöhen.

Für die zwei Sanierungsmassnahmen wurde der ökologische Nutzen zur Beseitigung der Schwall-Sunk Defizite mit einer Punktevergabe quantifiziert. Die Beurteilung des ökologischen Nutzens erfolgte durch eine Kombination der Bewertung der einzelnen Kernindikatoren und der gutachterlichen Bewertungen. Anhand dieser Kombination wurde der Nutzen der zwei vorausgewählten Massnahmen in einer Punktzahl definiert.

Die quantitative Beurteilung zeigte sowohl für das Ausgleichsbecken als auch für das Ausleitkraftwerk eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand auf. Wie erwartet, fällt der ökologische Nutzen der Verbesserung für die Untersuchungsstrecke Litzirüti deutlich höher aus als für die Untersuchungsstrecke Langwies. Sowohl bei der Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] als auch bei der gutachterlichen Bewertung, wird der ökologische Nutzen des Ausleitkraftwerkes wesentlich höher bewertet als der des Ausgleichsbeckens. Der ökologische Nutzen des Ausleitkraftwerkes (21.3 Nutzenpunkte) wird rund 1.5 mal höher bewertet als für das Ausgleichsbecken (13.9 Nutzenpunkte).

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis liegt für das Ausgleichsbecken bei rund CHF 0.8 Mio. pro Nutzenpunkt. Beim Ausleitkraftwerk liegt das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei rund CHF 1.5 Mio. pro Nutzenpunkt.

Für die durchgeführte Kosten-Nutzen-Analyse muss berücksichtigt werden, dass einerseits die Gesamtkostenschätzung grösseren Unsicherheiten unterliegt und andererseits die Methodik zur Bepunktung des ökologischen Nutzens nur eine von verschiedenen möglichen Betrachtungsweisen bietet, diesen zu quantifizieren. Bei einer anderen Betrachtungsweise des ökologischen Nutzens der zwei Massnahmen, könnte sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis stark verändern. Wird nur die gutachterliche Bewertung der Kernindikatoren berücksichtigt, wären für das Ausgleichsbecken die ökologischen Ziele in der Untersuchungsstrecke Litzirüti nicht erfüllt. Auch würde bei einer reinen Betrachtung der gutachterlichen Bewertung das Verhältnis des ökologischen Nutzens wesentlich stärker zugunsten des Ausleitkraftwerkes ausfallen. Dazu kommt, dass bei einer Berücksichtigung der Investitionsbeiträge für den Bau des Ausleitkraftwerkes, sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis deutlich zu Gunsten des Ausleitkraftwerkes verschieben würde.

Ob eine Sanierungsmassnahme als verhältnismässig eingeordnet wird oder nicht, ist schlussendlich Kompetenz der Leitbehörde (Kanton) nach Anhörung BAFU. Als Orientierungshilfe dazu dient unter anderem eine vom BAFU erwähnte maximale Verhältnismässigkeitsgrenze von CHF 6 Mio. pro sanierter km Gewässerabschnitt, sofern ein sehr grosses ökologisches Potential und ein grosser ökologischer Nutzen besteht [20]. Beim Ausgleichsbecken betragen die Kosten pro sanierter Gewässerabschnitt rund CHF 1.7 Mio./km (für den Gesamtabschnitt zwischen Litzirüti und Pradapunt). Beim Ausleitkraftwerk betragen die Kosten pro sanierter Gewässerabschnitt rund CHF 4.6 Mio./km (für den Gesamtabschnitt zwischen Litzirüti und Pradapunt).

9.6 Nächste Schritte

Mit dem vorliegenden Bericht reicht Arosa Energie der zuständigen Behörde zwei potentiell bewilligungsfähige und umsetzbare Massnahmen ein, welche die wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk unterhalb der Wasserrückgabe des Kraftwerks Litzirüti beseitigen oder zumindest verringern. Arosa Energie erfüllt damit die ihr mit Verfügung vom 13. Oktober 2015 auferlegte Pflicht zur Planung von Schwall-

Sunk Sanierungsmassnahmen. Basierend auf den Resultaten des vorliegenden Berichtes ist durch die Behörden ein Entscheid zur Wahl der Bestvariante unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit, der energiepolitischen Ziele sowie der weiteren nach Art. 39a Abs. 2 GSchG definierten Kriterien zu treffen und das weitere Vorgehen zu definieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Umwelt (BAFU). 2017. Tonolla D., Chaix O., Meile T., Zurwerra A., Büsser P., Oppliger S., Essyad K. Schwall-Sunk - Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Umwelt-Vollzug Nr. 1701: 133 S.
- [2] Strategische Planung Sanierung Schwall und Sunk: Defizitanalyse, Massnahmenplanung, Massnahmenplanung. Koordinationsgebiet: Alpenrhein und Zuflüsse. Kanton Graubünden, Chur, 11. Dezember 2014
- [3] Amt für Jagd und Fischerei (AJF). 2022. Zusatzdokumentation zu den Bestandskontrollen und Fischereistatistik; Plessur FSA 312 und 313
- [4] Amt für Jagd und Fischerei (AJF). 2022. Beilage zu Zusatzdokumentation: Bestandskontrollen und Fischereistatistik; Plessur, FSA 312 und 313. Fotokatalog
- [5] Amt für Jagd und Fischerei (AJF). 2022. Bericht zur Bestandskontrolle an der Plessur vom 27.07.2022
- [6] Hydra AG, Dezember 2016, Rey P. Fischereibiologisches Reproduktionspotenzial. Unterstützung, Bratung und ökologische Untersuchungen für die Defizit- und Ursachenanalyse sowie Zieldefinition.
- [7] Hydra AG, Mai 2023. Hesselschwerdt J. Gutachterliche Stellungnahme zu Fragenkatalog Schwall-Sunk-Sanierung KW Litzirüti vom 20.02.2023
- [8] WFN - Wasser Fisch Natur AG. 2021, Kraftwerk Litzirüti – Sanierung Schwall-Sunk. Fachbericht Makrozoobenthos und Kolmation, Bern.
- [9] Hydra AG, Mai 2023. Hesselschwerdt J. Ökologische Einschätzung Sanierungsvarianten. Schwall-Sunk Sanierung Plessur.
- [10] Pöyry, M. Bieri. 2015. Machbarkeitsstudie für ein Ausgleichsbecken resp. eine Ausgleichskaverne,
- [11] Hydra AG, Juli 2017. Rey P., Hesselschwerdt J. Reproduktionspotenzial für Bach- und Seeforellen in der Plessur.
- [12] Axpo Power AG. 2015. G. Hirzel. Pflichtenheft Defizit-, Ursachenanalyse und Zieldefinition, Schwall-Sunk Sanierung Plessur, H16207
- [13] Axpo Power AG. 2020. M. Kuhn, L. Cadotsch, Pflichtenheft zur Zieldefinition und Vorauswahl Massnahmen (Teilphase III), Schwall-Sunk Sanierung Vorderrhein, H17249
- [14] Bundesamt für Umwelt (BAFU). 2012. Baumann P., Kirchhofer A., Schälchli U. Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1203: 126 S
- [15] Bundesamt für Landestopographie. swissSURFACE3D, https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/surface3d.html#technische_details
- [16] HYDRA AG. 2021. Hesselschwerdt J., Schwall-Sunk Sanierung Moesa.
- [17] Shields, A. 1936. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitt. der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau, Berlin, Heft 26
- [18] Reproduktion der Seeforelle im Vorderrhein, R. Caviezel, ETH Zürich, 2006
- [19] Projektkonsortium Wasserkraft Plessur. 2016. Gemeinde Arosa, Gemeindegemeinschaft Kraftwerk Lünen, IBC Energie Wasser Chur, Axpo Power AG. Kraftwerk Pradapunt, Konzessionsbericht, Technischer Bericht.
- [20] Bundesamt für Umwelt (BAFU). 2019. Methode zur Bestimmung der Finanzierung von Ausleitkraftwerken als Schwall-Sunk Sanierungsmassnahme

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Wasserefassungen und -rückgaben im Projektperimeter. Quelle Hintergrund: Swisimage (swisstopo).	14
Abb. 3.2	Betriebsdurchflüsse Kraftwerk Litzirüti von 2013 bis 2022 [m³/s]. Schwarze Linie = mittlere tägliche Durchflüsse. Grauer Bereich = Bereich zwischen minimalem und maximalem täglichem Durchfluss.	16
Abb. 3.3	Auengebiete und definierte Untersuchungsstrecken im Projektperimeter. Quelle Hintergrund: Swisimage (swisstopo).	18
Abb. 3.4	Untersuchungsstrecken gemäss dem Grundlagenbericht aus der strategischen Planung [2]. Quelle Hintergrundkarte: Swisimage (swisstopo).	19
Abb. 3.5	Die Bewertungsmethodik gemäss der strategischen Planung [2].	20
Abb. 3.6	Die Untersuchungsergebnisse für die Plessur gemäss der strategischen Planung [2]. Eine wesentliche Beeinträchtigung ist ausser bei P0 bei allen fünf dem KW Litzirüti zugewiesenen Untersuchungsstrecken gegeben.	21
Abb. 3.7	Hydraulisches 2D-Modell der Plessur mit oberer und unterer Randbedingung und den zwei markierten Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies. Quelle Hintergrundkarte: Swisimage (swisstopo).	23
Abb. 3.8	Hydraulisches 1D-Modell der Plessur mit oberer und unterer Randbedingung sowie den drei Seitenzuflüssen und den zwei markierten Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies. Quelle Hintergrundkarte: Swisimage (swisstopo).	24
Abb. 3.9	Messstellen und Untersuchungsstrecken in der Schwallstrecke Litzirüti (von Wasserrückgabe KW Litzirüti bis zur Wasserfassung KW Lünen). Quelle Hintergrund: Swisimage (swisstopo).	26
Abb. 3.10	Visuelle Validierung des Abflusses sowie des Pegels bei der Schwallstrecke Litzirüti.	31
Abb. 3.11	Turbinierte Wassermenge und Stand des Stausees Isel in der Versuchswoche zwischen Montag, 9. und Freitag, 13. März 2015.	33
Abb. 4.1	Beispielganglinie (Abfluss Schwallstrecke Litzirüti) mit eingezeichneten Amplituden, Abflusstagesmaxima und -tagesminima.	36
Abb. 4.2	Beispiel einer Ganglinie mit Zählung der Frequenzereignissen. Die Pfeile dienen dabei als Hilfe und zeigen das 1 zu 1.5 Verhältnis an, wobei violett den Start und türkis das Ende des Ereignisses definiert. An diesem Tag wurden zwei Ereignisse gezählt.	37
Abb. 4.3	Beispiel (Rhein) flächige Betrachtung der Pegelrückgangsraten in einem 2D-Modell. Die dargestellten Farben entsprechen der Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1] (blau: «sehr gut», bis rot: «schlecht»).	41
Abb. 4.4	Beispiel eines Querprofils mit eingezeichneten Stützpunkten.	42
Abb. 4.5	Durchgeführter Vergleich «flächige» Betrachtung 1D- und 2D-Modelle beim Rhein oben: Untersuchungsstrecke mit 13 Querprofilen, unten: Untersuchungsstrecke mit 11 Querprofilen, rot: 2D-Modell, schwarz: 1D-Modell, grün: 80%-Quantil zur Bestimmung der resultierenden Pegelrückgangsrate.	43

Abb. 4.6	Standorte der Brutboxenversuche. Quelle Hintergrund: Swissimage (swisstopo).	45
Abb. 4.7	Beispiel Bewertung Indikator F3* für die Bachforelle in der Untersuchungsstrecke Langwies. Die graue Fläche zwischen den beiden Kurven stellt den Flächenverlust für sämtliche Abflüsse gegenüber dem natürlichen Abfluss dar.	46
Abb. 4.8	Vier Untersuchungsstellen für Makrozoobenthos und Kolmation [8]. Quelle Hintergrundkarte: Swissimage (swisstopo).	50
Abb. 4.9	Aufgefüllte Lücken der Temperaturdaten in der Restwasserstrecke Litzirüti	52
Abb. 4.10	Eliminiertes Rauschen bei den Temperaturdaten der Wasserrückgabe des KW Litzirüti.	52
Abb. 4.11	Mittlerer täglicher Abfluss und minimale/maximale mittlere Tagesabflüsse sowie das Schwall-Sunk Verhältnis im Jahresverlauf (VSS) der Untersuchungsstrecken Litzirüti (oben) und Langwies (unten) in der Zeitperiode Januar 2017 - Februar 2023.	54
Abb. 4.12	Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Perioden der jeweiligen Indikatoren des Gesamtzeitraums von Januar 2017 bis Februar 2023.	55
Abb. 4.13	Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Langwies für die Perioden der jeweiligen Indikatoren des Gesamtzeitraums von Januar 2017 bis Februar 2023.	55
Abb. 4.14	Anteil täglicher trockenfallender Flächen [%] (95%-Quantil) zwischen Schwall und Sunk für die Forellen für die relevanten Perioden in den Untersuchungsstrecken ausgewertet für die Periode von Januar 2017 bis Februar 2023.	56
Abb. 4.15	Vergleich der benetzten Fläche in der Untersuchungsstrecke Litzirüti bei Schwall (3 m ³ /s) und Sunk (0.1 m ³ /s). Dargestellt sind jeweils die modellierten stationären Abflüsse, welche am nächsten bei den entsprechenden hydrologischen Kenngrössen liegen. Bei Sunk ist zusätzlich die Fliesstiefe [m] dargestellt. Quelle Hintergrund: Swissimage (swisstopo).	56
Abb. 4.16	Vergleich der benetzten Fläche in der Untersuchungsstrecke Langwies bei Schwall (4 m ³ /s) und Sunk (1 m ³ /s). Dargestellt sind jeweils die modellierten stationären Abflüsse, welche am nächsten bei den entsprechenden hydrologischen Kenngrössen liegen. Ausgewertet wurden bei Langwies nur die rot eingerahmten Segmente. Bei Sunk ist zusätzlich die Fliesstiefe [m] dargestellt. Quelle Hintergrund: Swissimage (swisstopo).	57
Abb. 4.17	Resultate Pegelrückgangsraten (Messwerte/Modelliert) für den Ist-Zustand von Januar 2017 bis Februar 2023 für larvale Forellen für alle Querprofile sowie die Pegelmessstellen. Quelle Hintergrundkarte: Swisstopo.	58
Abb. 4.18	Flächig ausgewertete Pegelrückgangsraten [cm/min] bei Litzirüti und Langwies.	58
Abb. 4.19	Aggregierte Bewertung F2*	59
Abb. 4.20	Kartierte potentielle Laichflächen im unteren Projektperimeter an der Plessur zwischen Lünen bis Langwies. Quelle: [11] (bearbeitet).	61
Abb. 4.21	Kartierte potentielle Laichflächen im oberen Projektperimeter an der Plessur zwischen Langwies bis Arosa, Quelle: [11] (bearbeitet).	62

Abb. 4.22	Schlupferfolg befruchteter Bachforelleneier, die in der Plessur exponiert wurden. Legende: 1, 2, 3: Nummer der Brutboxen, MW: Mittelwert Quelle: Hydra AG 2017, Beilage 2,	63
Abb. 4.23	Dokumentation Geschiebebewegung am Standort Litzirüti 4. Aufnahme 9. März 2015, links zu Beginn der Versuchswoche und am Ende der Versuchswoche am 13. März 2015, rechts. Die Kreise kennzeichnen Bereiche, in denen während den Versuchen Geschiebe mobilisiert wurde. Die sich entsprechenden Bereiche wurden mit derselben Kreisfarbe markiert.	64
Abb. 4.24	Beispiel der berechneten, hydrologisch geeigneten Laicharealen in der Untersuchungsstrecke Litzirüti anhand der Abflusswerte 0.5 m³/s, 2.5 m³/s und 6 m³/s. Quelle Hintergrundkarte: Swisstopo.	66
Abb. 4.25	Bewertung für den Indikator F3* für die Bachforelle in den Untersuchungsstrecken Litzirüti (oben) und Langwies (unten). Die graue Fläche zwischen den beiden Kurven stellt den Flächenverlust für sämtliche Abflüsse des Ist-Zustands gegenüber dem Vergleichszustand (natürlich) dar.	67
Abb. 4.26	Hydraulisch geeignete Laichflächen in Abhängigkeit des Schwallabflusses (Q Erosion) und des Sunkabflusses (Q Trockenfallen) bei kraftwerksunbeeinflussten Abflussverhältnissen («natürlich»; schwarzer Punkt) und den heutigen Schwall-Sunk Verhältnissen bei Litzirüti (roter Punkt).	68
Abb. 4.27	Verwendete Abflussganglinien für den Ist-Zustand und den «natürlichen» Zustand für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für einen Ausschnitt im Jahr 2022.	69
Abb. 4.28	Längen-Frequenzdiagramm von den Abfischungen vom 27. Juli 2022 in der Schwallstrecke bei Litzirüti. Quelle: [7].	72
Abb. 4.29	Längen-Frequenzdiagramm von den Abfischungen vom 27. Juli 2022 in der Restwasserstrecke oberhalb Litzirüti. Quelle: [7].	72
Abb. 4.30	Vergleich der erhobenen Fischbiomasse [kg/ha] in der Restwasserstrecke (FSA 312) und in der Schwallstrecke bei Litzirüti (FSA 313). Quelle: AJF [4].	73
Abb. 4.31	Resultate Indikator F6 der heutigen Situation für Forellen.	75
Abb. 4.32	Die Biomasse in den vier Untersuchungsstellen in der Plessur.	77
Abb. 4.33	Verlust der EPT-Biomasse gegenüber der theoretischen Biomasse. Szenario 4: Q _{Schwall} 60% Szenario 6: Q _{Schwall} 95% Quelle: WFN 2021 (siehe Beilage 7).	78
Abb. 4.34	Individuendichten an den vier untersuchten Stellen, aufgeteilt nach Sunk und Wasser- wechselzone. Quelle: WFN 2021, siehe Beilage 7.	79
Abb. 4.35	Vorgefundene Anzahl EPT-Familien gemäss den Erhebungen von WFN. (Beilage 7)	80
Abb. 4.36	Vergleich der Individuendichten zwischen den Aufnahmen von 2016 und 2020. Quelle: WFN 2021 [8].	81
Abb. 4.37	Vergleich der Biomassen zwischen den Aufnahmen von 2016 und 2020. Quelle: WFN 2021 [8].	82
Abb. 4.38	Kolmationsbeurteilungen von den Jahren 2019 und 2020. Quelle: WFN 2021 [8].	82
Abb. 4.39	Kolmationsbeurteilung zwischen 2009 und 2020. Quelle: WFN 2021 [8].	83

Abb. 4.40	Typischer Temperaturverlauf im Vergleich zum Abfluss bei der Messstelle in der Schwall-Sunk Strecke Litzirüti im Dezember 2017. Das Wasser erwärmt sich im Tagesverlauf natürlich und erreicht einen Peak am späten Nachmittag. Einen viel stärkeren Einfluss hat aber der Schwall-Sunk Betrieb.	84
Abb. 4.41	Verlauf der Trübung an den Standorten Pradapunt (Wehr) und Langwies (Brücke bei ARA) [NTU] während der Schwallversuchswoche. Ebenfalls dargestellt sind die Lufttemperatur bei der Pegelmesssonde in Litzirüti [°C], die Globalstrahlung in Davos [W/m²] und die Turbinenwassermenge bei der Zentrale Litzirüti [m³/s]. Die Datumsangaben entsprechen jeweils Mitternacht.	87
Abb. 4.42	Beurteilungsmatrix der Ist-Situation (2017-2021) für die Bachforelle.	89
Abb. 5.1	Betriebsdurchflüsse Kraftwerk Litzirüti von 2017 bis 2023 [m³/s]. Schwarze Linie = mittlere tägliche Durchflüsse. Grauer Bereich = Bereich zwischen minimalem und maximalem täglichem Durchfluss.	102
Abb. 6.1	Allgemeines Vorgehen zur Festlegung der Ziele.	104
Abb. 6.2	Aggregation der Kriterien «trockenfallender Fläche» und «Pegelrückgangsrage» gemäss VZH Schwall-Sunk [1]. Rote Umrandung = exemplarischer Ist-Zustand. Blaue Umrandung = exemplarischer Zielzustand.	105
Abb. 6.3	Illustratives Beispiel Anteil trockenfallende Fläche in Abhängigkeit des Abflusses. Farblich dargestellt sind ausgewählte Schwall- und Sunkabflüsse mit Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1]. Schwarz = exemplarischer Ist-Zustand. Grün = exemplarischer Zielzustand.	106
Abb. 6.4	Beispiel Zieldefinition F3* in der Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Bachforelle. Flächenänderung [%] für verschiedene Kombinationen von Schwall- und Sunkabflüssen gegenüber dem Referenzzustand. Die Kombinationen von Schwall und Sunkabflüsse für einen max. Flächenverlust von 30% können direkt aus der Grafik ausgelesen werden.	108
Abb. 6.5	Zieldefinition F6 bei Litzirüti für den Monat Februar.	109
Abb. 6.6	Maximale Abflussänderungsrate in Abhängigkeit des Abflusses für die larvale Periode für die Untersuchungsstrecken Litzirüti und Langwies.	113
Abb. 6.7	Relativer Flächenverlust je Abflussbereich (in 0.5 m³/s Schritten).	114
Abb. 6.8	Zieldefinition Indikator F3* für die Untersuchungsstrecke Litzirüti. Flächenänderung [%] für verschiedene Kombinationen von Schwall- und Sunkabflüssen gegenüber dem Referenzzustand.	115
Abb. 7.1	Übersichtskarte des vorausgewählten linksufrigen Ausgleichsbeckenstandort (A2) sowie weiteren verworfenen Massnahmenstandorten (schraffierte Flächen), Quelle Hintergrundkarte: swisstopo.	122
Abb. 7.2	Überblick Ausleitkraftwerk Litzirüti - Pradapunt. Quelle Hintergrundkarte: map.geo.admin.ch.	123
Abb. 8.1	Indikatorenbewertung für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für den sanierten Zustand mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).	126
Abb. 8.2	Indikatorenbewertung für die Untersuchungsstrecke Langwies für den sanierten Zustand mit einem Retentionsvolumen von 30'000 m³ (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).	127

Abb. 8.3	Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausgleichsbecken von 30'000 m ³ an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.	128
Abb. 8.4	Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Langwies für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausgleichsbecken von 30'000 m ³ an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.	128
Abb. 8.5	Beispiele Wochenganglinien bei Litzirüti (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausgleichsbecken (30'000 m ³) [m ³ /s].	129
Abb. 8.6	Beispiele Wochenganglinien bei Langwies (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausgleichsbecken (30'000 m ³) [m ³ /s]	130
Abb. 8.7	Indikatorenbewertung für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).	132
Abb. 8.8	Indikatorenbewertung für die Untersuchungsstrecke Langwies für den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk (linke Spalte) im Vergleich zum Ist-Zustand (rechte Spalte).	133
Abb. 8.9	Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Litzirüti für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.	134
Abb. 8.10	Abflusskennwerte für die Untersuchungsstrecke Langwies für die Perioden der jeweiligen Indikatoren. Der erste Wert gibt den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk an, der Wert in Klammern den Ist-Zustand.	134
Abb. 8.11	Beispiele Wochenganglinien bei Litzirüti (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausleitkraftwerk [m ³ /s].	135
Abb. 8.12	Beispiele Wochenganglinien bei Langwies (Februar 2022, April 2022, August 2022 und Oktober 2022) für den Ist-Zustand (rot) und den prognostizierten Zustand mit Ausleitkraftwerk [m ³ /s].	136
Abb. 8.13	Kosten-Nutzen Vergleich der zwei Massnahmen "Ausgleichsbecken 30'000 m ³ " und "Ausleitkraftwerk Pradapunt".	143
Abb. 0.1	Gesamtauswertung Indikatoren im Zustand mit Ausgleichsbecken von 30'000 m ³ .	161
Abb. 0.2	Gesamtauswertung Indikatoren im Zustand mit Ausleitkraftwerk.	162
Abb. 0.3	Litzirüti: Visualisierung Kenngrössen im Zustand mit Ausgleichsbecken (schwarz) im Vergleich zum Ist-Zustand (rot)	163
Abb. 0.4	Langwies: Visualisierung Kenngrössen im Zustand mit Ausgleichsbecken (schwarz) im Vergleich zum Ist-Zustand (rot)	164
Abb. 0.5	Litzirüti: Visualisierung Kenngrössen im Zustand mit Ausleitkraftwerk (schwarz) im Vergleich zum Ist-Zustand (rot)	165
Abb. 0.6	Langwies: Visualisierung Kenngrössen im Zustand mit Ausleitkraftwerk (schwarz) im Vergleich zum Ist-Zustand (rot)	166

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Übersicht der Zentrale Litzirüti. QA: Ausbauwassermenge in m ³ /s IBS: Inbetriebsetzung.	15
Tab. 3.2	Definierte Untersuchungsstrecken im Projektperimeter.	18
Tab. 3.3	Übersicht der Untersuchungsstrecken gemäss der strategischen Planung im Vergleich zu den in der Defizit- und Ursachenanalyse betrachteten Untersuchungsstrecken. Die Untersuchungsstrecken aus der strategischen Planung sind aber nicht immer ganz deckungsgleich mit dem Standort in der Defizit- und Ursachenanalyse.	20
Tab. 3.4	Berücksichtigte Messstationen für die Defizit- und Ursachenanalyse (P: Pegel, Q: Abfluss, T: Temperatur). *Q erst ab Mitte Juli 2021, da erst dann eine PQ-Beziehung hergestellt wurde. Die Sohle ist bei der ARA-Sonde nicht befestigt, weshalb die Messreihe über längere Zeit nicht stabil sein dürfte.	25
Tab. 3.5	Vor- und Nachteile der Methoden zur Bestimmung des Vergleichszustands.	28
Tab. 4.1	Bewertung gemäss VZH Schwall-Sunk [1].	35
Tab. 4.2	Übersicht der hydrologischen Kenngrössen, betrachteten Perioden und angewendeten Quantile für die Auswertung der Indikatoren. * Da insgesamt 42 Tage im Untersuchungszeitraum ausgeschieden worden sind (herbstliche Hochwasserperiode) und erst anschliessend das 95%-Quantil der Abflüsse bestimmt worden ist, entspricht der definierte Schwallabfluss hier dem 90%-Quantil der täglichen Maximalabflüsse (vgl. Kapitel 6.4.3).	38
Tab. 4.3	Koordinaten der Probestellen für die Brutboxen-Versuche gemäss Beilage 2.	45
Tab. 4.4	Übersicht über die Abfischungen aus den letzten Jahren.	48
Tab. 4.5	Laichhabitatflächen und Laichgruben gemäss [11] * Strecken ausserhalb des Projektperimeters.	60
Tab. 4.6	Verwendete Schwall-Sunk Abflüsse [m ³ /s] für den Ist- und den Vergleichszustand für die Periode von anfangs Oktober bis Ende April sowie Auflistung der absoluten Differenzen zwischen Ist- und Vergleichszustand und installierte Ausbauwassermenge für die 2 Untersuchungsstrecken. * Die Hochwassertage wurden manuell entfernt und nicht das 95% Quantil verwendet.	65
Tab. 4.7	Bewertung Indikator F3* (Laichflächenverlust in [%]) für die Bachforelle.	67
Tab. 4.8	Ergebnisse der Sömmerlingsbefischung in der Plessur vom 1. September 2016. Sowohl die Sömmerlinge als auch die 1+ Fische stammen aus Naturverlaichung. Quelle: Hydra (siehe Beilage 2).	70
Tab. 4.9	Bewertung Indikator F4 gemäss dem Gutachten von Hydra [11].	71
Tab. 4.10	Verwendete Schwall-Sunk Abflüsse [m ³ /s] für die Grundlage der Bewertung des Indikators F6. Ausgewertet wurden die Daten von Januar 2017 bis Februar 2023.	74
Tab. 4.11	Übersicht der Resultate der Makrozoobenthos-Indikatoren.	80
Tab. 4.12	Auswertung Indikator Q1* anhand der Messdaten für die Periode 2017 bis 2021. Bei der Temperaturänderungsrate dT [°C/h] werden die maximalen täglichen Änderungen, welche pro Stunde auftreten, berechnet und davon das 90%-Quantil verwendet. Bei der Amplitude [°C] werden von den maximalen	

	Tagesamplituden das 90%-Quantil verwendet. Bei beiden Auswertungen wurde ein Korrekturfaktor gemäss VZH Schwall-Sunk [1] angewendet, was zu einer Verschlechterung der Bewertung um eine Stufe führt.	85
Tab. 4.13	Modellierte Auswertung Indikator Q1* für die Periode vom Januar 2017 bis Februar 2023. Die Erklärung der Variablen findet sich im Beschrieb der Tab. 4.13.	85
Tab. 4.14	Vergleich der Resultate der strategischen Planung und der Defizit- und Ursachenanalyse. Bei F2* wurde der aggregierte Zustand der larvalen Bachforellen eingesetzt. Bei der Kolmation wurde nur die innere Kolmation H1* verglichen. Bei B1 wurde die Bewertung der Biomasse berücksichtigt.	92
Tab. 6.1	Wertefunktionen der Pegelrückgangsraten in cm/min für Forellen in der larvalen, juvenilen oder Übergangsphase.	106
Tab. 6.2	Rechenbeispiel maximale zulässige Abflussänderungsrate dQ/dt mit einer maximalen Pegeländerungsrate $dP_{max} = 0.3$ cm/min.	107
Tab. 6.3	Hydrologische Kenngrössen (maximale Pegelrückgangsraten (dP) und Anteil trockenfallende Flächen (dF)) damit der Indikator F2* aggregiert den Zustand "gut" erreicht.	113
Tab. 6.4	Berechnete Retentionsvolumina für die Einhaltung einer Mindest- oder Maximalabflussmenge in den Monaten Oktober bis März.	117
Tab. 6.5	Berechnete Retentionsvolumina zur Einhaltung einer Mindestabflussmenge in den Monaten Januar bis März zur Einhaltung der Zielklassen «mässig» und «gut» für den Indikator F6 bei Litzirüti für Sunkabflüsse für adulte Bachforellen im Winter.	117
Tab. 6.6	Vorgabe Mindest- und Maximalabfluss nach Wasserrückgabe Litzirüti.	118
Tab. 6.7	Vorgaben für maximale Abflussrückgangs- und Abflussanstiegsraten für verschiedene Abflüsse in der Plessur nach der Wasserrückgabe Litzirüti für unterschiedliche Perioden.	118
Tab. 6.8	Auswirkungen verschiedener Parameter auf die berechneten Volumina.	119
Tab. 7.1	Bartwerte für das Ausleitkraftwerk mit und ohne Investitionsbeitrag für die verschiedenen Strompreisszenarien.	125
Tab. 7.2	Gesamtkosten Sanierungsmassnahmen.	125
Tab. 8.1	Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Becken von 30'000 m ³ für die Untersuchungsstrecke Litzirüti.	131
Tab. 8.2	Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Becken von 30'000 m ³ für die Untersuchungsstrecke Langwies. *Zweifarbige Felder entsprechen einem Wert zwischen den zwei Klassen.	131
Tab. 8.3	Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk für die Untersuchungsstrecke Litzirüti.	137
Tab. 8.4	Vergleich zwischen gutachterlicher Bewertung und Bewertung nach VZH Schwall-Sunk [1] für den Ist-Zustand und den sanierten Zustand mit einem Ausleitkraftwerk für die Untersuchungsstrecke Langwies. *Zweifarbige Felder entsprechen einem Wert zwischen den zwei Klassen.	137

Tab. 8.5	Zielerfüllung Ausgleichsbecken.	138
Tab. 8.6	Zielerfüllung Ausleitkraftwerk.	138
Tab. 8.7	Beispiel Kombination der Indikatoren- und gutachterlichen Beurteilung, zur Bewertung des Nutzens einer Massnahme.	140
Tab. 8.8	Resultate Punkte Nutzen für Massnahme Ausgleichsbecken von 30'000 m ³ .	141
Tab. 8.9	Resultate Punkte Nutzen für Massnahme Ausleitkraftwerk.	142
Anhang 1	Gesamtauswertung Indikatoren im sanierten Zustand	
Anhang 2	Visualisierung hydrologische Kenngrössen Ausgleichsbecken	
Anhang 3	Visualisierung hydrologische Kenngrössen Ausleitkraftwerk	

Anhang 1 Gesamtauswertung Indikatoren im sanierten Zustand

	Litzirueti	Langwies
F3 * [%] (Okt.-Ende April)	30	5
Q1 * TR_{SS} [°C/h]	2.3	2.3
F2 * - Agg - larval		
F2 * - Agg - Übergang		
F2 * - Agg - juvenil		
$F2^* - dF$ [%] - larval	36.6	13.5
$F2^* - dF$ [%] - Übergang	27.8	6.4
$F2^* - dF$ [%] - juvenil	35	10.7
$F2^* - dP$ [cm/min] - larval	0.23	0.1
$F2^* - dP$ [cm/min] - Übergang	0.34	0.13
$F2^* - dP$ [cm/min] - juvenil	0.43	0.15
F6 juvenil sunk (Jahr)	-17	-33
F6 juvenil sunk (Mai)	2	-2
F6 juvenil sunk (Aug)	-14	-5
F6 juvenil sunk (Nov)	-11	-80
F6 juvenil schwall (Jahr)	9	9
F6 juvenil schwall (Mai)	2	0
F6 juvenil schwall (Aug)	2	1
F6 juvenil schwall (Nov)	9	5
F6 adult sunk (Jahr)	21	-2
F6 adult sunk (Feb)	25	2
F6 adult sunk (Mai)	1	10
F6 adult sunk (Aug)	5	-1
F6 adult sunk (Nov)	19	-7
F6 adult schwall (Jahr)	1	5
F6 adult schwall (Feb)	-13	7
F6 adult schwall (Mai)	3	-1
F6 adult schwall (Aug)	1	2
F6 adult schwall (Nov)	-1	1

Abb. 0.1 Gesamtauswertung Indikatoren im Zustand mit Ausgleichsbecken von 30'000 m³.

	Litzirueti	Langwies
F3* [%] (Okt.-Ende April)	21	-5
Q1* TR_{SS} [°C/h]	0.8	0.4
F2* - Agg - larval		
F2* - Agg - Übergang		
F2* - Agg - juvenil		
$F2^* - dF$ [%] - larval	12	2.9
$F2^* - dF$ [%] - Übergang	7.7	2.1
$F2^* - dF$ [%] - juvenil	17.4	6
$F2^* - dP$ [cm/min] - larval	0.02	0.02
$F2^* - dP$ [cm/min] - Übergang	0.01	0.01
$F2^* - dP$ [cm/min] - juvenil	0.01	0.01
F6 juvenil sunk (Jahr)	-16	-38
F6 juvenil sunk (Mai)	-42	-15
F6 juvenil sunk (Aug)	-35	-28
F6 juvenil sunk (Nov)	-11	-85
F6 juvenil schwall (Jahr)	-36	-30
F6 juvenil schwall (Mai)	-11	-7
F6 juvenil schwall (Aug)	-48	-34
F6 juvenil schwall (Nov)	-31	-82
F6 adult sunk (Jahr)	33	-2
F6 adult sunk (Feb)	39	4
F6 adult sunk (Mai)	6	-18
F6 adult sunk (Aug)	24	-6
F6 adult sunk (Nov)	23	-6
F6 adult schwall (Jahr)	18	-6
F6 adult schwall (Feb)	36	3
F6 adult schwall (Mai)	-11	-30
F6 adult schwall (Aug)	15	-14
F6 adult schwall (Nov)	21	-8

Abb. 0.2 Gesamtauswertung Indikatoren im Zustand mit Ausleitkraftwerk.

Anhang 2 Visualisierung hydrologische Kenngrössen Ausgleichsbecken

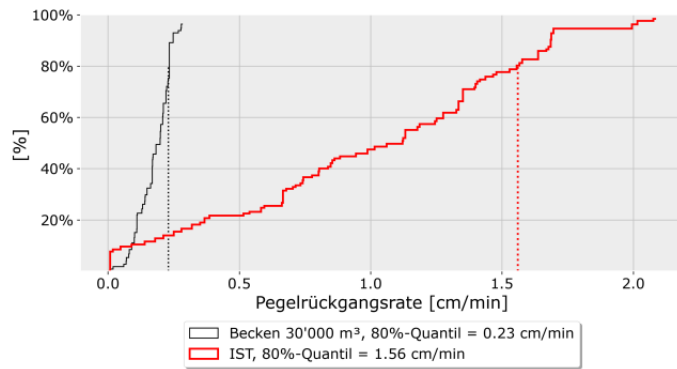


Abb. 2: Summenkurve der flächig betrachteten Pegelrückgangsraten (cm/min) während der larvalen Periode F2*.

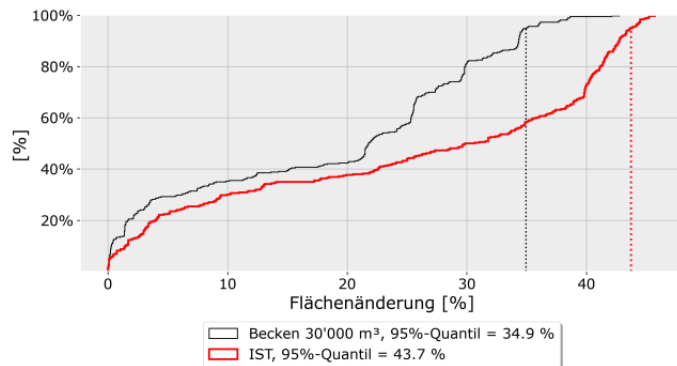


Abb. 3: Summenkurve der täglichen maximalen Flächenänderungen (%) während der larvalen Periode F2*.

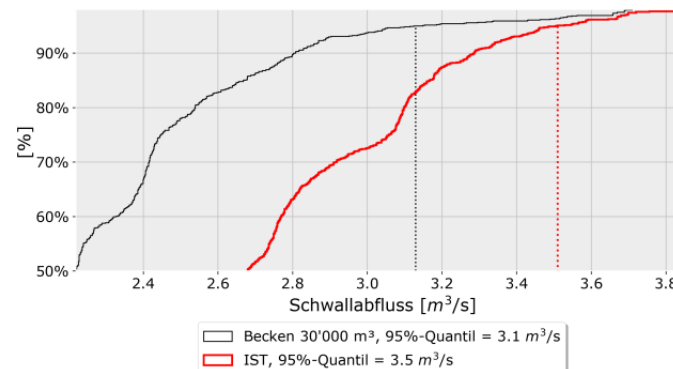


Abb. 4: Summenkurve der Schwallabflüsse (Tagesmaxima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

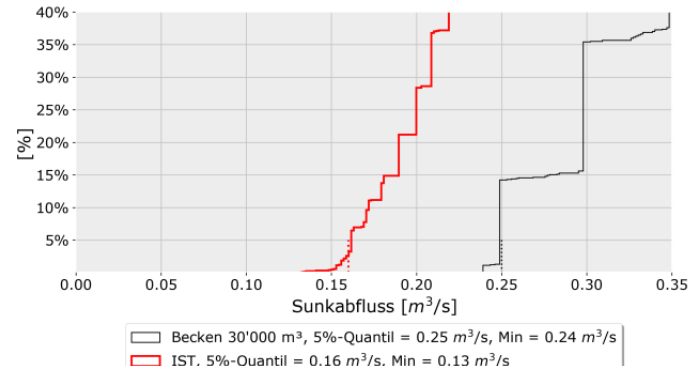


Abb. 5: Summenkurve der Sunkabflüsse (Tagesminima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

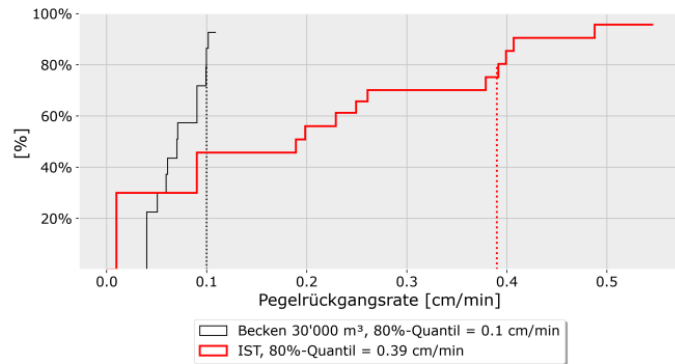


Abb. 2: Summenkurve der flächig betrachteten Pegelrückgangsraten (cm/min) während der larvalen Periode F2*.

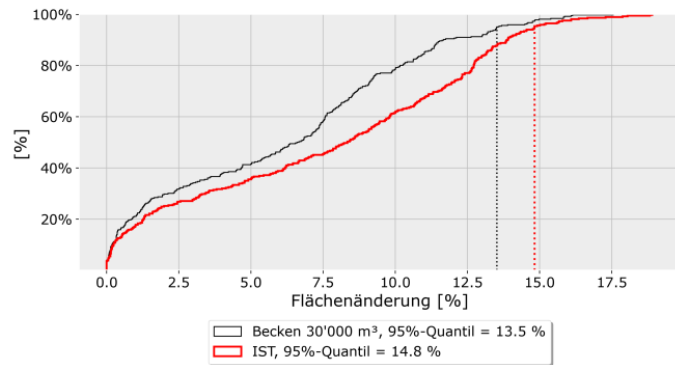


Abb. 3: Summenkurve der täglichen maximalen Flächenänderungen (%) während der larvalen Periode F2*.

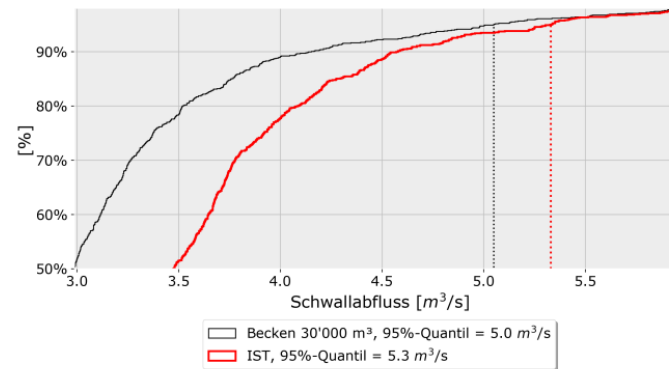


Abb. 4: Summenkurve der Schwallabflüsse (Tagesmaxima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

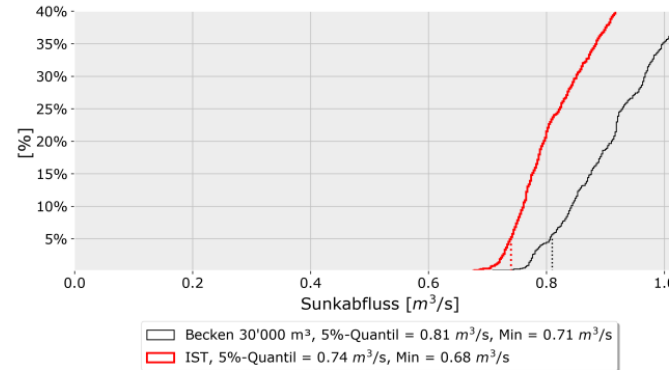


Abb. 5: Summenkurve der Sunkabflüsse (Tagesminima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

Abb. 0.4 Langwies: Visualisierung Kenngrößen im Zustand mit Ausgleichsbecken (schwarz) im Vergleich zum Ist-Zustand (rot)

Anhang 3 Visualisierung hydrologische Kenngrössen Ausleitkraftwerk

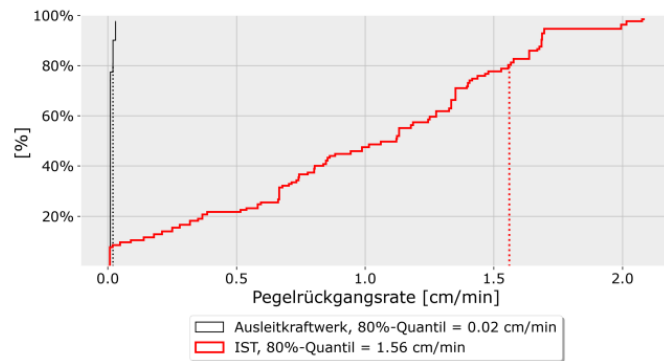


Abb. 2: Summenkurve der flächig betrachteten Pegelrückgangsraten (cm/min) während der larvalen Periode F2*.

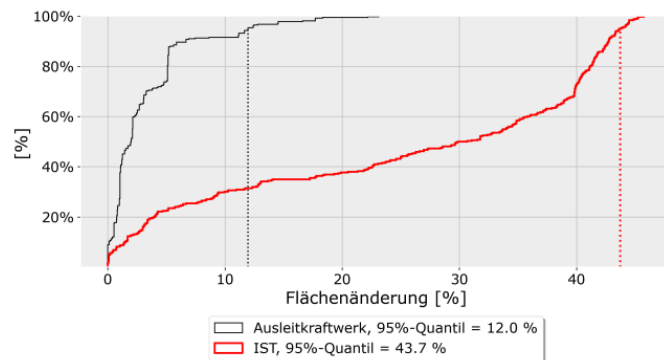


Abb. 3: Summenkurve der täglichen maximalen Flächenänderungen (%) während der larvalen Periode F2*.

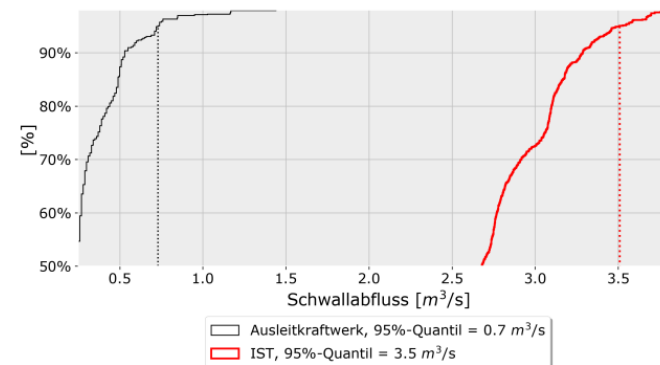


Abb. 4: Summenkurve der Schwallabflüsse (Tagesmaxima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

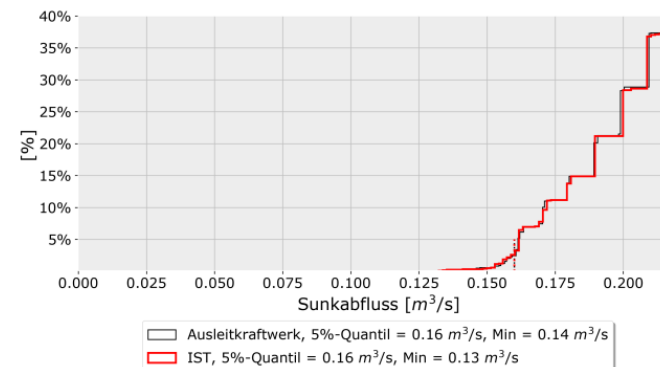


Abb. 5: Summenkurve der Sunkabflüsse (Tagesminima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

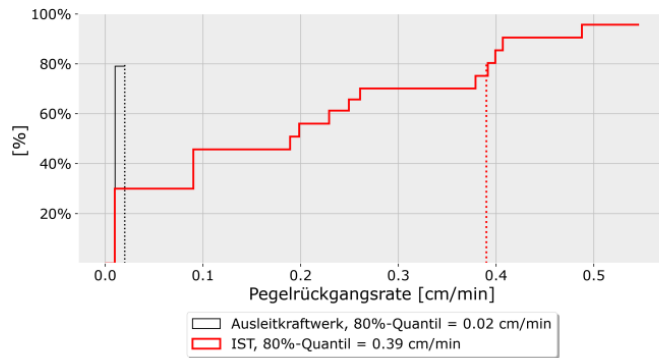


Abb. 2: Summenkurve der flächig betrachteten Pegelrückgangsraten (cm/min) während der larvalen Periode F2*.

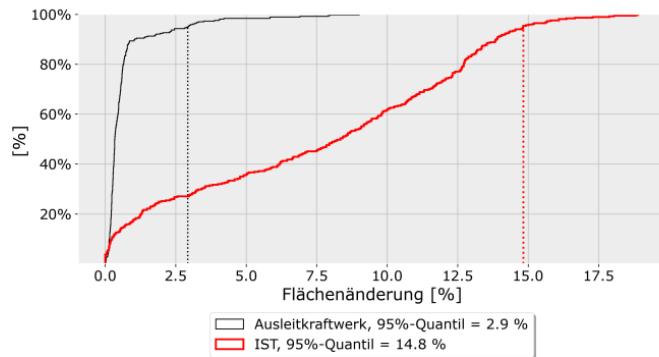


Abb. 3: Summenkurve der täglichen maximalen Flächenänderungen (%) während der larvalen Periode F2*.

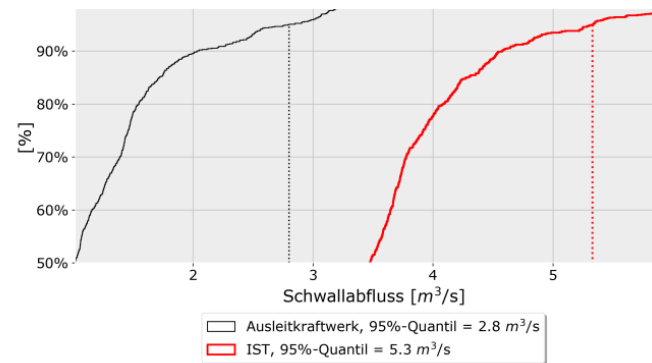


Abb. 4: Summenkurve der Schwallabflüsse (Tagesmaxima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

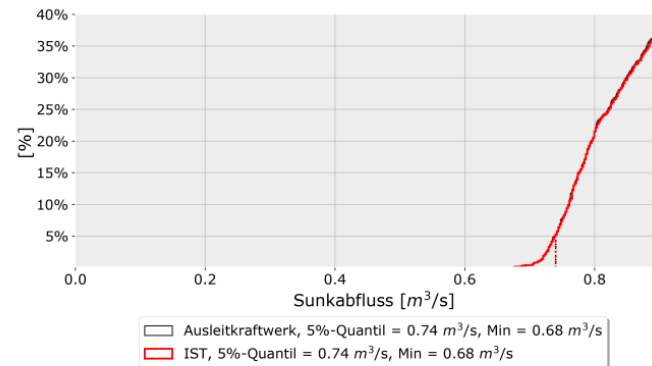


Abb. 5: Summenkurve der Sunkabflüsse (Tagesminima) während der Periode F3* - Laichentwicklung.

Abb. 0.6 Langwies: Visualisierung Kenngrößen im Zustand mit Ausleitkraftwerk (schwarz) im Vergleich zum Ist-Zustand (rot)

Beilagenverzeichnis

Beilage 1	Regierungsbeschluss Kraftwerk Litzirüti Sanierung Schwall und Sunk (13. Oktober 2015), Regierung Kanton Graubünden
Beilage 2	Reproduktionspotential für Bach- und Seeforellen in der Plessur (Juli 2017), Hydra AG
Beilage 3	Gutachterliche Stellungnahme zu Fragenkatalog Schwall-Sunk-Sanierung KW Litzirüti, (20. Februar 2023), Hydra AG
Beilage 4	Schwall-Sunk Sanierung Plessur ökologische Einschätzung Sanierungsvarianten (30. Mai 2023), Hydra AG
Beilage 5	Schwall-Sunk Sanierung Kraftwerk Litzirüti, Vorauswahl Massnahmen, Massnahmeblätter (20. Oktober 2022), HTU Axpo
Beilage 6	Schwall-Sunk Sanierung Plessur, Begleitbericht Vorauswahl Massnahmen (20. Oktober 2022), HTU Axpo
Beilage 7	Fachbericht Makrozoobenthos und Kolmation (2021), WFN AG
Beilage 8	Kurzdokumentation Geschiebetrieb (20. April 2023), HTU Axpo
Beilage 9	Machbarkeitsstudie für ein Ausgleichsbecken resp. eine Ausgleichskaverne (25. Juni 2016), Pöyry AG

Beilage 1 **Regierungsbeschluss Kraftwerk Litzirüti Sanierung
Schwall und Sunk (13. Oktober 2015), Regierung
Kanton Graubünden**

Beilage 2 **Reproduktionspotential für Bach- und Seeforellen in
der Plessur (Juli 2017), Hydra AG**

Beilage 3

**Gutachterliche Stellungnahme zu Fragenkatalog
Schwall-Sunk-Sanierung KW Litzirüti, (20. Februar
2023), Hydra AG**

Beilage 4

**Schwall-Sunk Sanierung Plessur ökologische Einschätzung Sanierungsvarianten (30. Mai 2023),
Hydra AG**

Beilage 5

Schwall-Sunk Sanierung Kraftwerk Litzirüti, Vorauswahl Massnahmen, Massnahmeblätter (20. Oktober 2022), HTU Axpo

Beilage 6

Schwall-Sunk Sanierung Plessur, Begleitbericht Vorauswahl Massnahmen (20. Oktober 2022), HTU Axpo

Beilage 7

**Fachbericht Makrozoobenthos und Kolmation (2021),
WFN AG**

Beilage 8

**Kurzdokumentation Geschiebetrieb (20. April 2023),
HTU Axpo**

Beilage 9

**Machbarkeitsstudie für ein Ausgleichsbecken resp.
eine Ausgleichskaverne (25. Juni 2016), Pöyry AG**