

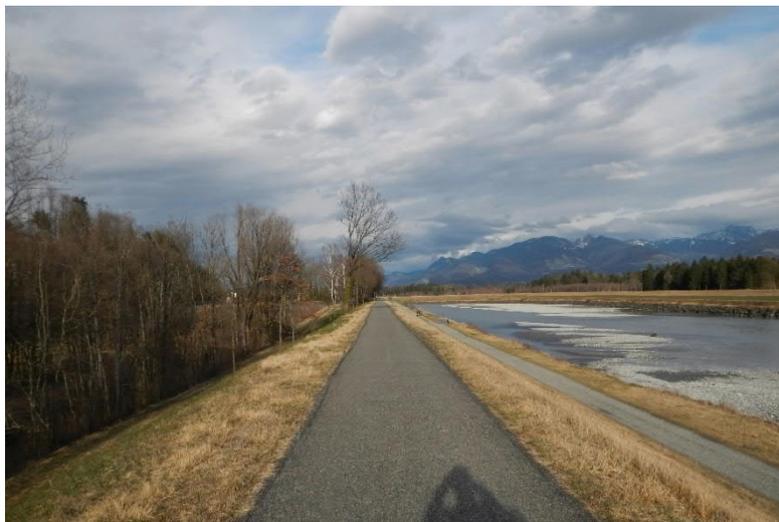


Internationale Regierungskommission Alpenrhein
Projektgruppe Flussbau

Projekt D16:

Vertiefte Untersuchungen zur Systemsicherheit am Hochwasserschutz des Alpenrheins

Phasen I und II



März 2023

Impressum

Auftraggeberin Internationale Regierungskommission Alpenrhein

Auftragnehmerin NIEDERER + POZZI UMWELT AG



Burgerrietstrasse 13, Postfach 365
CH-8730 Uznach
Tel.: 055 / 285 91 80
email: admin@nipo.ch
homepage: www.nipo.ch

Berichtsv Verfasser Roger Kolb

Auftrag U.SG.16.04d-i_Systemsicherheit_Alpenrhein, Vertiefung

Fotos Titelseite Sektor 1: Rhein bei Trimmis/Untervaz, Blickrichtung von der Rheinbrücke flussabwärts, Juni 2017

Sektor 4: linker Damm oberhalb der Mündung des Werdenberger Binnenkanals, rechts im Hintergrund Dammschnitt Bangs, Blickrichtung flussabwärts, Februar 2020

Koordinatensystem Die im vorliegenden Dossier enthaltenen Pläne, Skizzen und Schnitte sind noch genereller Natur. Sie sind daher in der Regel nicht georeferenziert. Karten- und Orthophoto-Grundlagen stammen in der Regel von schweizerischen Quellen, auch für die Massnahmen in der Geländekammer Bangs-Ruggell.

Höhenangaben Die hydraulischen Abschätzungen wurden auf schweizerischen Terrainmodellen aufgebaut. Sämtliche Höhenangaben beziehen sich daher auf den Schweizer Bezugsrahmen.

Verzeichnis der Versionen und Änderungen

Version	Datum	Status/Änderungen
1	09.02.2022	Entwurf zuhanden Projektgruppe Flussbau
2	08.12.2022	Vorabzug Endversion
3	23.03.2023	Endversion

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht dokumentiert das IRKA-Projekt Nr. D16, welches als Ergänzung zur IRKA-Studie D12 von 2019 zur Systemsicherheit am Alpenrhein ausgeführt wurde. Gegenstand war eine vertiefende Untersuchung der baulichen Machbarkeit und der hydrologisch-hydraulischen Wirkung des in der Studie D12 empfohlenen groben Massnahmenkonzepts. Die Projektziele waren:

- Konkretisierung der Massnahmen zur Bewältigung des Überlastfalls und Verbesserung der Systemsicherheit bei Extremereignissen, auf Stufe einer Vorstudie gemäss SIA103.
- Vertiefte hydrologisch-hydraulische Abklärung ihrer Dämpfungswirkung auf den Rheinabfluss und auf das Projekt Rhesi, mit Hilfe einer hydrodynamischen Modellierung.
- Nachweis, dass es durch die verbleibenden Restausuferungen nicht zu einer Mehrgefährdung in den betroffenen Notentlastungsräumen kommt.

Die Optimierung bzw. Konkretisierung des Massnahmenkonzepts zur Verbesserung der Systemsicherheit ist in Kap. 2.1 im Allgemeinen und ab dem Kap. 2.2 für jeden Abschnitt im Einzelnen beschrieben. Es werden Massnahmen bevorzugt, welche mittelfristig im Rahmen von Drittprojekten nach und nach umgesetzt werden können, und neben der Systemsicherheit auch aus Gründen des Hochwasserschutzes, des Gewässerunterhalts oder der Revitalisierung angestrebt werden. Sie sollen sowohl zu einer Verbesserung der lokalen Systemsicherheit (Überlastfall in der lokalen Geländekammer) wie auch der übergeordneten Systemsicherheit (Hochwasserdämpfung und Begrenzung der Extremereignisse für die Internationale Rheinstrecke unterhalb der Illmündung) beitragen.

Gegenüber dem ursprünglichen Massnahmenkonzept der Studie D12 ergaben sich unter anderem die folgenden Optimierungen, welche ab Kap. 2.2 im Detail beschrieben werden:

- Rechter Damm Chur Ost: Neben der Optimierung der Dammhöhe und des Dammquerschnitts muss auch der frühzeitige Rückfluss durch die Mündung des Churer Mühlbachs (km 11.2 rechts; oberhalb ARA) verhindert werden.
- Trimmis-Untervaz: Aufgrund ihres aktuellen Zustands wird neu eine Sanierung der alten Dämme auf der ganzen Länge des beidufrigen Industriegebiets empfohlen.
- Igis – Landquart: Anstelle einer Verstärkung des bestehenden Hochwasserdammes wird eine neue, rückversetzte Dammanschüttung entlang der Westseite der Autobahn ab dem Rastplatz Apfelwuhr bis vor die Landquartbrücke vorgeschlagen, womit der dazwischenliegende Auenwald wieder dem Flussraum zugeordnet werden kann. Die Rückflussverhinderung via Mühlbach ist ohnehin bereits für das HQ₃₀₀ notwendig.
- Bad Ragaz / Maienfeld-Fläsch: Übernahme des Bauprojektentwurfs der Rheinaufweitung. Aufgrund ihrer hydraulischen Verbindung mit der Geländekammer Maienfeld wird die Geländekammer Fläsch neu dem Sektor 2 statt dem Sektor 3 zugeordnet. Auf die rechtsseitige Überströmstrecke unterhalb des Heidilands kann verzichtet werden.
- Sargans: Anstelle der Überströmstrecke links nach der Fläscher Brücke wird die lokale und übergeordnete Systemsicherheit in der geplanten Aufweitung Sargans umgesetzt, indem die linksseitige Dammabrückung unterhalb von km 32.8 überströmsicher ausgebildet wird. Aufgrund des sehr grossen Schadenspotentials springt diese Überströmstrecke nur im äussersten Überlastfall an.
- Trübbach: Die hydraulische Detailabklärung zeigt, dass ab EHQ_B eine dosierte Überströmung des nördlichen Aussendamms des Vilterser-Wangser-Kanals unterhalb von Trübbach erfolgt. Aus diesem Grund wird auf eine vorbereitete Dammscharte für > EHQ_B verzichtet.
- Geländekammer Sennwald: Die niederen Dämme entlang des Werdenberger Binnenkanals müssen weiter nach Süden bis zur Industriezone Hofwald verlängert werden. Eine Dammscharte oberhalb des Zollhauses Lienz ist jedoch nicht mehr notwendig.
- Geländekammer Ruggell – Bangs – Spiersbachmündung: Zur optimalen Beaufschlagung des Rückhaltraums muss die bereits im Massnahmenkonzept der Studie D12 Systemsicherheit vorgeschlagene Überströmstrecke im rechten Rheindamm um 400 m

flussaufwärts verlängert werden. Die beiden Überströmstrecken am Rhein und an der Ill sind miteinander zu koordinieren, damit sie optimal zusammenwirken.

In der Grobkostenschätzung sind nur diejenigen Massnahmenanteile aufgerechnet, welche der Systemsicherheit bei Extremereignissen (EHQ) dienen, ohne die aus Gründen des Hochwasserschutzes, des Gewässerunterhalts oder der Revitalisierung bis zum HQ₃₀₀ ohnehin notwendigen Massnahmen. Über alle Abschnitte von Felsberg bis zur Illmündung ergeben sich Gesamtkosten von rund CHF 37 mio., welche der Systemsicherheit anzurechnen sind. Dieser nun genauer abgegrenzte Betrag ist wesentlich tiefer als in der ersten Grobkostenschätzung der Studie D12, welche noch von CHF 118-236 Mio. ausgegangen war. Die Kosteneinsparung ist jedoch nur möglich, falls die Massnahmen zur Systemsicherheit im Rahmen von ohnehin notwendigen Drittprojekten realisiert werden können.

Die im Kap. 3 vorgestellte vertiefte hydrologisch-hydraulische Abklärung betrachtet in Kap. 3.1 die Spitzenabflüsse EHQ_A und EHQ_B und verfeinert sie im Längenprofil zwischen Felsberg und der Internationalen Rheinstrecke. Die Hydrologie der bisherigen Studien unterschied nur drei Zwischenabschnitte. Neu werden neben Hinter- und Vorderrhein, Landquart und Ill auch die Abflussbeiträge der Zuflüsse Plessur, Tamina, Vilterser-Wangser-Kanal, Liechtensteiner Binnenkanal Werdenberger Binnenkanal und Spiersbach berücksichtigt.

Das bereits im Rahmen der Studie D12 definierte Dämpfungsziel für die übergeordnete Systemsicherheit fordert eine Begrenzung des Extremereignis-Abflusses des Alpenrheins beim Eintritt in die Internationale Rheinstrecke auf einen Grenzabfluss EHQ_A, der möglichst nie überschritten werden soll. Da die verfeinerte Hydrologie bei der Illmündung nur noch den effektiven Abflussbeitrag der Ill selber berücksichtigt, konnte der entsprechende Abflussbeitrag des Rheins bei km 65 oberhalb der Illmündung neu festgelegt werden. Die möglichst nicht zu überschreitenden Grenzabflüsse des Dämpfungsziels EHQ_A betragen nun:

- EHQ_A = 4'700 m³/s bei km 65 vor Zufluss Ill
- EHQ_A = 5'800 m³/s bei km 70 nach Zufluss von Ill, Frutz und Ehbach

Die für die instationäre hydraulische Berechnung erstellten 2d-Modelle Felsberg – Trübbach sowie Bangs/Senwald sind im Detail im Kap. 3.2 beschrieben. Sie werden durch ein instationäres 1d-Modell des Rheingerinnes miteinander gekoppelt, welches das Rheingerinne zwischen Trübbach und Salez abbildet.

Die Modelle wurden sowohl für den Istzustand wie auch für den künftigen Projektzustand erstellt. Letzterer bildet nicht nur die Massnahmen zur Systemsicherheit ab, sondern auch die künftigen Drittprojekte wie zum Beispiel die Aufweitungen Maienfeld – Bad Ragaz sowie Sarganser Au.

Um die bei Extremereignissen vorhandenen Unsicherheiten abzudecken, wurde eine Vielzahl von verschiedenen Szenarien berechnet, nach Eintretenswahrscheinlichkeit grob gewichtet und statistisch ausgewertet (Kap. 3.3ff und Anhang 11). Die insgesamt 23 Szenarien des Istzustands wurden unter Variation der folgenden Einflussgrössen definiert:

- Hydrologie:
 - Hydrologische Abflussspitze: EHQ_A und EHQ_B
 - Breite bzw. Volumen der hydrologischen Ganglinie: Musterganglinien schmal/mittel/breit
- Auftreten von Dammbürchen an den Stellen mit voraussichtlich kritischer Dammsicherheit.

Die insgesamt 39 Szenarien des Projektzustands wurden unter Variation der folgenden Einflussgrössen definiert:

- Hydrologie: Abflussspitze und Ganglinienbreite analog zum Istzustand
- Projektzustand mit den erwarteten wahrscheinlichen Wasserspiegellagen
- Projektzustand mit abschnittsweise zu tiefen oder zu hohen Wasserspiegellagen
- Projektzustand mit abschnittsweise nicht umgesetzten Massnahmen Systemsicherheit

Die Resultate der hydrodynamischen Berechnung erlaubten die Verfolgung der Abflussspitze im Hochwasserverlauf entlang des Rheins für jedes der berechneten Szenarien. Dieser Verlauf der Abflussspitze ist in den Anhängen 12 und 13 im Längenprofil dargestellt. Ein abfallender

Verlauf in den hydraulischen Kurven bedeutet eine Entlastung durch Wasseraustritte aus dem Rheingerinne, ein ansteigender Kurvenverlauf hingegen ein Abflussbeitrag eines einmündenden Zuflusses oder ein Rückfluss aus dem Überflutungsgebiet zurück in den Rhein.

Die bei km 65 und 70 resultierenden, gedämpften Abflussspitzen wurden statistisch ausgewertet und mit den dortigen Dämpfungsziele verglichen (Kap. 3.5). Die für die beiden Kontrollquerschnitte definierten Dämpfungsziele können mit den Massnahmen im Durchschnitt gut erreicht werden. Es ist somit möglich, ein hydrologisches EHQ_B mit unterschiedlichen Ereignisabläufen auf eine Abflussspitze eines EHQ_A zu dämpfen, welche innerhalb der Internationalen Rheinstrecke mit dem Rhesi-Projekt zu bewältigen ist.

Trotz dieses positiven Resultats können sieben der 29 berechneten Projektzustands-Szenarien das Dämpfungsziel bei km 70 nicht erfüllen. Es handelt sich zwar um eher unwahrscheinlichere Ereignisabläufe mit z.B. sehr voluminöser Ganglinie oder mit unplanmässigem, zu tiefem Wasserspiegel. Dennoch kann keine absolute Sicherheit und Garantie gegeben werden, dass die am Oberlauf oberhalb der Illmündung vorgeschlagenen Massnahmen die Extremereignisse in jedem Fall auf ein EHQ_A dämpfen können. Aus diesem Grund sollte das flussabwärts anschliessende hydraulische System der Internationalen Rheinstrecke genügend robust und in der Lage sein, auch Abflüsse grösser als das Dämpfungsziel ohne Systemzusammenbruch zu bewältigen.

Die Modellberechnungen erlaubten auch die Beurteilung der Restgefährdung in den einzelnen Geländekammern des Massnahmenperimeters von Felsberg bis zur Illmündung (Kap. 4). Es war nachzuweisen, dass die Massnahmen auch lokal zur Reduktion des Restrisikos beitragen, oder dieses zumindest nicht signifikant verschärfen. Für den Vergleich des Projektzustands mit dem Istzustand wurde aus dem Set der berechneten Szenarien je ein Szenario für das EHQ_A mit schmaler Ganglinie sowie das EHQ_B mit schmaler und mit mittelbreiter Ganglinie ausgewählt, dessen Eintretenswahrscheinlichkeit im Istzustand und Projektzustand etwa vergleichbar ist. Die entsprechenden Überflutungsflächen sind im Anhang 14 bildlich dargestellt und im Anhang 15 flächenmässig ausgewertet. Die Flächenauswertung insbesondere den von einer Überflutung betroffenen Bauzonen zeigt, dass die Massnahmen die Gefährdung auch in den lokalen Geländekammern massiv reduzieren können, sofern sie zusammen mit den weiteren, in Drittprojekten vorgesehenen Sanierungen ausgeführt werden. Damit resultiert nicht nur ein Dämpfungsgewinn für die flussabwärts liegenden Flussabschnitte, sondern es profitieren auch die Siedlungen in den einzelnen Geländekammern, da sie von katastrophalen Damnbrüchen verschont bleiben.

Die Ergebnisse der vorliegenden Vertiefungsstudie sind im Kap. 5 zusammengefasst und werden dort mit Empfehlungen für das weitere Vorgehen verknüpft. Es wird vorgeschlagen, sämtliche in Kap. 2 untersuchten Massnahmen weiter zu projektieren und nach und nach zu realisieren. Gestützt auf die Kriterien Kostenaufwand, Synergie mit anderen Flussbaumassnahmen, Beitrag zum Dämpfungseffekt auf Unterlieger (übergeordnete Systemsicherheit) sowie lokalem Nutzen in der jeweiligen Geländekammer (lokale Systemsicherheit) wird im Anhang 16 eine grobe Priorisierung für die Umsetzung der Massnahmen in den acht Flussabschnitten vorgenommen.

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	IV
Anhangverzeichnis	VI
Glossar	VII
1. Einleitung	1
1.1 Vorgeschichte und Veranlassung	1
1.2 Aufgabenstellung und Abgrenzungen	1
1.3 Auftrag	2
1.4 Grundlagen	2
1.5 Definitiv gewähltes Vorgehen	2
1.6 Neue verfeinerte Einteilung der Sektoren und Geländekammern	4
2. Optimiertes Massnahmenkonzept	5
2.1 Konkretisierung der Massnahmen und der technischen Machbarkeit	5
2.1.1 Optimierungsschritte	5
2.1.2 Anforderungen an die Massnahmen	6
2.1.3 Generelle hydraulische Auslegung	6
2.1.4 Grobkostenschätzung	7
2.1.5 Optimierter Massnahmenumfang	7
2.2 Abschnitt Felsberg – Chur (Sektor 1)	9
2.2.1 Beschrieb	9
2.2.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz	9
2.2.3 Grobkosten Systemsicherheit	9
2.3 Abschnitt Chur – Haldenstein – Oldis (Sektor 1)	10
2.3.1 Beschrieb	10
2.3.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz	11
2.3.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit	12
2.4 Abschnitt Untervaz/Trimmis (Sektor 1)	12
2.4.1 Beschrieb	12
2.4.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz	14
2.4.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit	15
2.5 Abschnitt Landquart (Sektor 1)	15
2.5.1 Beschrieb	15
2.5.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz	17
2.5.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit	18
2.6 Abschnitt Maienfeld – Bad Ragaz – Fläsch (Sektor 2)	18
2.6.1 Beschrieb	18
2.6.2 Hydraulische Auslegung	21
2.6.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit	22
2.7 Abschnitt Sargans - Trübbach (Sektor 3)	22
2.7.1 Massnahmenbeschrieb bei der Aufweitung Sargans	22
2.7.2 Hydraulische Auslegung	24
2.7.3 Prüfung der weiteren Massnahmenelemente bei Trübbach	25
2.7.4 Grobkostenanteil Systemsicherheit	25
2.8 Geländekammer Sennwald (Sektor 4)	25
2.8.1 Heutige Hochwassersituation	25
2.8.2 Beschrieb der vorgesehenen Massnahmen	26
2.8.3 Hydraulische Auslegung	31
2.8.4 Grosstanklager	31

2.8.5	Grobkostenanteil Systemsicherheit	32
2.9	Geländekammer Ruggell – Bangs – Spiersbach (Sektor 4)	32
2.9.1	Heutige Hochwassersituation	32
2.9.2	Massnahmenbeschrieb	33
2.9.3	Hydraulische Auslegung	36
2.9.4	Überströmstrecke Illspitz.....	38
2.9.5	Grobkostenanteil Systemsicherheit	38
2.10	Grobkostenanteil Systemsicherheit über alle Abschnitte	39
3.	Vertiefte hydrologisch-hydraulische Abklärung	40
3.1	Hydrologie	40
3.1.1	Vorgehen.....	40
3.1.2	Zwischeneinzugsgebiete und hydrologische Abflussbeiträge.....	40
3.1.3	Bemerkung zu den Abflussbeiträgen der Zuflüsse	42
3.1.4	Neudefinition des Dämpfungsziels für die IRR-Strecke	43
3.1.5	Hochwasserganglinien.....	43
3.2	Hydraulische Modelle	45
3.2.1	Übersicht und Modellierungsgrundlagen	45
3.2.2	Modell Felsberg-Trübbach.....	46
3.2.3	Modell Bangs/Sennwald	47
3.2.4	Integration des Rheingerinnes in die 2d-Modelle.....	48
3.2.5	Modellierte Zustände	50
3.2.6	Eichung des Rheingerinnes	50
3.2.7	Kopplung der 2d-Modelle (1d-Kopplungsmodell km 40-60).....	51
3.2.8	Randbedingungen und Inputganglinien	52
3.3	Szenariendefinition	54
3.3.1	Vorgehen im Umgang mit Unsicherheiten.....	54
3.3.2	Variation des Istzustands	55
3.3.3	Variation des Projektzustands	56
3.3.4	Einordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit	56
3.3.5	Zusammenstellung aller berechneten Szenarien	57
3.4	Modellberechnung und Berechnungsergebnisse	57
3.4.1	Modellberechnung und Abriff der Resultate	57
3.4.2	Hochwasserganglinien.....	58
3.4.3	Längenprofil der Abflussspitzen	59
3.4.4	Szenarienvergleich	61
3.5	Statistische Auswertung des hydraulischen EHQ _B	61
3.5.1	Vorgehen.....	61
3.5.2	Resultate bei km 65, vor der Illmündung	61
3.5.3	Resultate bei km 70, nach Ill, Frutz und Ehbach	63
3.5.4	Projektzustand mit sektorweiser Nichtrealisierung	64
3.6	Diskussion der Ergebnisse.....	64
3.6.1	Generelles Systemverhalten.....	64
3.6.2	Fliessretention im Rheingerinne.....	64
3.6.3	Fliessretention in den Sektoren 1 und 2	65
3.6.4	Reserve-Volumenretention im Sektor 3.....	66
3.6.5	Sektor 3: Ausfluss in die Wartauer Ebene.....	67
3.6.6	Volumenretention im Sektor 4.....	68
3.6.7	Dämpfungsvermögen des Gesamtsystems Felsberg – Bangs.....	69
4.	Beurteilung der Restgefährdung mit Massnahmen	71
4.1	Vorgehen	71
4.2	Gesamte Restgefährdung über alle Sektoren	72
4.3	Restgefährdung in den einzelnen Geländekammern	72
4.3.1	Abschnitt Felsberg - Chur	72
4.3.2	Abschnitt Chur – Haldenstein – Oldis.....	72

4.3.3	Abschnitt Untervaz / Trimmis	73
4.3.4	Abschnitt Landquart	73
4.3.5	Abschnitt Maienfeld – Bad Ragaz – Fläsch	73
4.3.6	Abschnitt Sargans – Trübbach	73
4.3.7	Geländekammer Sennwald	74
4.3.8	Geländekammer Ruggell – Bangs – Spiersbach	74
5.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	75
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	75
5.2	Vorschläge und Prioritäten für die weitere Umsetzung.....	75
5.2.1	IRKA-Strecke	75
5.2.2	Internationale Rheinstrecke	76
5.2.3	Offene Fragen	77
5.2.4	Empfehlungen für das weitere Vorgehen	77

ANHANGVERZEICHNIS

Anhang 1:	Verwendete Grundlagen
Anhang 2:	IRKA-Projektantrag vom 01.07.2019
Anhang 3:	Memorandum of Understanding zwischen IRR und IRKA vom 30.09.2019
Anhang 4:	Übersicht Massnahmenkonzept
Anhang 5:	Grobkostenschätzung
Anhang 6:	Hydrologische Grundlagen
Anhang 7:	Ergebnisse der Modelleichung
Anhang 8:	Synchronisierte Inputganglinien
Anhang 9:	Längenprofil Sennwald-Bangs-III
Anhang 10:	Dammbreschen im Istzustand
Anhang 11:	Berechnete Szenarienkombinationen
Anhang 12:	Resultatauswertung zum Istzustand
Anhang 13:	Resultatauswertung zum Projektzustand
Anhang 14:	Vergleich der Restgefährdung im Ist- und Projektzustand: Kartendarstellung
Anhang 15:	Vergleich der Restgefährdung im Ist- und Projektzustand: Flächengrößen
Anhang 16:	Vorschlag Prioritätenliste für die Umsetzung der Massnahmen

GLOSSAR

EHQ	Extremereignis mit Jährlichkeit >300 Jahren.
EHQ _A	Untere Grenze der am Alpenrhein betrachteten Extremereignisse, extrem seltenes Ereignis, Jährlichkeit 301 – 999.
EHQ _B	Obere Grenze der am Alpenrhein betrachteten Extremereignisse, äusserst seltenes Ereignis, Jährlichkeit 1'000 und mehr.
EL	Energielinie (Wasserspiegel plus Energiehöhe des fliessenden Wassers $v^2/2g$).
EZG	Einzugsgebiet.
Freibord	Sicherheitsabstand zwischen dem Wasserspiegel und der Dammkrone bzw. einer Brückenunterkante.
HQ ₁₀₀	im Durchschnitt alle 100 Jahre erreichtes oder übertroffenes Hochwasserereignis (100-jährliches Hochwasser, Jährlichkeit 100).
HQ ₃₀₀	im Durchschnitt alle 300 Jahre erreichtes oder übertroffenes Hochwasserereignis (300-jährliches Hochwasser, Jährlichkeit 300).
HWS	Hochwasserschutz.
IRKA	Internationale Regierungskommission Alpenrhein.
IRR	Internationale Rheinregulierung.
Jährlichkeit X	Wiederkehrperiode X Jahre eines Ereignisses: Dier Hochwasserabfluss wird im Mittel alle X Jahre erreicht oder übertroffen.
LBK	Liechtensteiner Binnenkanal.
Q	Abflussmenge in m ³ pro Sekunde.
RBK	St. Galler Rheintaler Binnenkanal (linke Talebene, Sennwald – St. Margrethen).
RHESI	Projekt Hochwasserschutz Alpenrhein Internationale Strecke, km 65 bis 91.
VWK	Vilterser-Wangser-Kanal (bzw. Saar).
WBK	Werdenberger Binnenkanal.
WSP	Wasserspiegel.

1. EINLEITUNG

1.1 Vorgeschichte und Veranlassung

Die in den Jahren 2016-19 durchgeführte Studie D12 zur Systemsicherheit am Alpenrhein widmete das Verhalten des Hochwasserschutzsystems am Alpenrhein bei einer Belastung durch extreme Hochwasser und stellte einen Handlungsbedarf zur Erhöhung der Bauwerkssicherheit nicht nur beim Bemessungsereignis, sondern auch bei extremen Ereignissen fest, welche das Bemessungsereignis deutlich übersteigen. Angesichts des sehr hohen Schadenspotenzials beidseits des Rheins scheinen sich angemessene schadensbegrenzende Massnahmen auch bei extrem seltenen und äusserst seltenen Ereignissen zu lohnen.

Zur Bewältigung dieser Extremereignisse wurde ausgehend von zwei Eskalationsstufen EHQ_A und EHQ_B (Bandbreite möglicher Extremereignisse) ein grobes Massnahmenkonzept in zwei Bestvarianten vorgeschlagen. Für die Schadensminimierung und bestmögliche Kontrollierbarkeit auch bei extremen Hochwasserereignissen erscheint eine Kombination von robuster Abflusskapazität und gezielter Dämpfung von extremen Hochwasserspitzen erfolgsversprechend.

Die Machbarkeit und die hydrologisch-hydraulische Wirkung der vorgeschlagenen Elemente konnten in der Studie D12 erst mit einfachen Mitteln überprüft werden. Die hydraulischen Unsicherheiten und Unschärfen sind jedoch bei einem Extremereignis am Alpenrhein gross und müssen in die Überlegungen mit einfließen, damit das System möglichst gutmütig und stabil auf Eventualitäten reagieren kann. Im Weiteren dürfen die zukünftig noch tolerierten Ausuferungen im Vergleich mit der heute vorhandenen Hochwassergefährdung nicht zu einer signifikanten Mehrgefährdung in lokalen Notentlastungsräumen führen, was im Rahmen der Studie D12 noch nicht vollständig geprüft werden konnte. Aus diesen Gründen empfahl die Projektgruppe Flussbau im Projektantrag D12.1 vom 1. Juli 2019 eine vertiefende Untersuchung der Machbarkeit und Wirkung des Massnahmenkonzepts (Anhang 2).

Im Memorandum of Understanding vom 30.09.2019 zum Risikomanagement für ein Extremhochwasser am Alpenrhein (Anhang 3) vereinbarten die IRKA und die IRR, die Massnahmenempfehlungen aus der Studie Systemsicherheit Alpenrhein im Hinblick auf deren Umsetzbarkeit zu prüfen. Unter anderem wurde vereinbart, dass eine weitere Verringerung des Hochwasserrisikos und damit auch der Folgen von Extremhochwasserabflüssen im Alpenrheintal anzustreben ist, wobei unter anderem auch bauliche Massnahmen der weitergehenden Hochwasservorsorge und der Sicherheit der Dammbauwerke möglich sind. Dabei ist eine gemeinsame, solidarische Abstimmung zwischen Ober- und Unterliegern sowie Nachbarn wichtig: bei allen zukünftigen Hochwasserschutzmassnahmen ist darauf zu achten, dass das Überflutungsrisiko für Nachbarn und Unterlieger nicht wesentlich verschärft wird.

1.2 Aufgabenstellung und Abgrenzungen

Gegenstand des vorliegend dokumentierten Projekts war eine vertiefende Untersuchung der Machbarkeit und Wirkung des in der Studie D12 [1] empfohlenen Massnahmenkonzepts. Diese Untersuchung erfolgte mittels einer Vorstudie gemäss der SIA-Norm 103 und deckte hauptsächlich die folgenden drei Projektziele ab:

- Konkretisierung der Massnahmen zur Bewältigung des Überlastfalls und Verbesserung der Systemsicherheit bei Extremereignissen, hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit inkl. Grobkostenschätzung Genauigkeit 30%
- Vertiefte hydrologisch-hydraulische Abklärung ihrer Wirkung, Effizienz und Zuverlässigkeit sowie ihrer Dämpfungswirkung auf den Rheinabfluss und auf das Projekt Rhesi
- Nachweis, dass es durch die verbleibenden Restausuferungen nicht zu einer Mehrgefährdung in den betroffenen Notentlastungsräumen kommt.

Die Aufgabenstellung umfasste einen Teil der im Projektantrag [2] formulierten Schritte und konzentrierte sich dabei auf den Alpenrhein oberhalb der Illmündung:

- Untersuchung der für die Bestvariante 2 vorgeschlagenen Massnahmenelemente
- Abschnitt des Alpenrheins oberhalb der Illmündung, d.h. von Reichenau bis nach Rüthi/Bangs

Die Massnahmen zur Systemsicherheit in der Internationalen Rheinstrecke wurden parallel im Rahmen der Bauwerksicherheit zum RHESI-Projekt untersucht und optimiert. Sie waren somit nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Ebenfalls nicht Gegenstand waren allfällige weitere, für das Einzugsgebiet des Alpenrheins vorgeschlagene Massnahmen, insbesondere für die Bewirtschaftung der Speicherseen sowie zur Bewältigung des Überlastfalls an der III. Sie müssen im Rahmen von separaten Arbeiten untersucht werden.

Die vertiefte Untersuchung beschränkte sich auf die Massnahmenelemente der Bestvariante 2, welche in beiden Bestvarianten enthalten sind. Die in Bestvariante 1 zusätzlich enthaltenen Elemente Notentlastungsraum Domleschg (O.O_R_Ner) und Baggerseen Untervaz und Oldis (13.O_L_Ner und 19.O_L_Ner), welche eine gewisse Dämpfungswirkung bereits ab einem HQ₃₀₀ hätten, waren nicht zu untersuchen, da das Überlastfall-Konzept des Generellen Projekts von RHESI in der Internationalen Rheinstrecke unterhalb der III bei HQ₃₀₀ noch keine Entlastungen vorsieht.

1.3 Auftrag

Die Auftragserteilung erfolgte in zwei Phasen:

- Phase I: Grundauftrag vom Mai 2020, basierend auf der Offerte vom November 2019 (Phasen 1-4)
- Phase II: Ergänzungsauftrag vom April 2021, basierend auf der Offerte vom März 2021: hydrologisch-hydraulische Synthese und Verifikation der Auswirkungen der Massnahmen auf die Abflussganglinie des Rheins an der Illmündung.

1.4 Grundlagen

Die Vertiefung greift auf die umfangreiche, aus der Studie D12 [1] verfügbare Grundlagen-sammlung zurück und ergänzt diese mit den im Anhang 1 aufgeführten zusätzlichen Grundlagen.

1.5 Definitiv gewähltes Vorgehen

Das im Projektantrag skizzierte ursprüngliche Vorgehen wurde im Verlauf der Untersuchung mehrmals an die neu gewonnenen Kenntnisse angepasst. Die definitiv durchgeführten Arbeiten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Besichtigung der vorgesehenen Massnahmenstandorte im Feld anlässlich dreier Begehungstage in den Geländekammern von Chur-Felsberg-Haldenstein, Trimmis-Untervaz, Igis-Landquart, Bad Ragaz, Maienfeld, Fläsch, Sargans, Bangs-Ruggell und Sennwald.
- Auswertung der bereits vorhandenen Drittprojektierungen, namentlich in den Geländekammern von Maienfeld, Bad Ragaz und Sargans ([4], [10]).
- Skizzierung der konkreten Implementierung der Massnahmen in das Hochwasserschutzsystem des Alpenrheins auf Stufe Vorstudie.
- Grobdimensionierung der wichtigsten baulichen Elemente der Massnahmen auf Stufe Vorstudie, vor allem im Hinblick auf ihre technische Machbarkeit, hydraulische Wirkung und Leistungsfähigkeit.
- Konsolidierung der bereits vorhandenen Grobkostenschätzung und Vergleich mit den Zahlen aus der Studie Systemsicherheit. Eine umfassende Kosten-Nutzen-Überlegung unter Zuhilfenahme von Econo-Me wurde in der gegenwärtigen allgemeinen Projektierungsphase noch nicht ausgeführt und wird Gegenstand einer kommenden Projektierungsphase werden.

- Übernahme der aus dem Projekt A2 Schadenspotentiale und Sonderrisiken Alpenrhein aus dem Jahre 2007 zur Verfügung stehenden 2d-Modellnetze Sargans sowie Bangs-Ruggell, punktuelle Aktualisierung und Verdichtung dieser Modellnetze insbesondere an hydraulisch wichtigen Stellen.
- Übernahme des aktuellen, aus dem Projekt Gefahrenkarte Rheintaler Binnenkanal von 2019 zur Verfügung stehenden 2d-Modellnetzes und Erweiterung desselben in der Geländekammer von Sennwald.
- 2d-Neumodellierung der Talebene von Felsberg bis nach Bad Ragaz/Fläsch, sowie Ankopplung an das bestehende Modell Sargans.
- Eichung des Flussgerinnes in den 2d-Modellen Felsberg-Trübbach sowie Bangs/Sennwald anhand der 1d-Wasserspiegel aus den früheren Hydraulikstudien.
- Modellberechnung und -auswertung einer Serie von verschiedenen EHQ-Szenarien, welche die Bandbreite der Unsicherheiten im Ablauf von Extremereignissen umfassend und realistisch abbilden. Die Berechnungen erfolgten sowohl für den gegenwärtigen Istzustand wie auch für den Zustand mit realisierten Massnahmen zur Systemsicherheit.
- Für jedes berechnete Szenario Auswertung von:
 - den Überflutungsflächen und -intensitäten
 - Abflussspitzen bzw. -ganglinien an verschiedenen Kontrollquerschnitten
 - der ungefähren Einordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit des jeweiligen Szenarios
- Für die Einordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit insbesondere für den unsanierten Istzustand wurde nicht nur die Abflusskapazität betrachtet, sondern auch die geotechnische Dammstabilität und Uferstabilität.
- Statistische Auswertung der beim Übergang in die IRR-Strecke im Mittel zu erwartenden Abflussspitze sowie des Vertrauensintervalls ihrer Streuung.
- Zusammenfassung und Einordnung der mit den Massnahmen zu erreichenden Hochwasserdämpfung und Vergleich mit den Dämpfungszielen. Letztere konnten im Rahmen des Projekts ebenfalls präzisiert werden.
- Aufzeigen der EHQ-Restgefährdung in den örtlichen Geländekammern nach Realisierung der Massnahmen, sowie Vergleich mit der EHQ-Restgefährdung im Istzustand ohne Massnahmen. Der Vergleich hatte zum Ziel aufzuzeigen, dass die Massnahmen auch in den lokalen Geländekammern zu einer Verbesserung des integralen Hochwasserschutzes führen, und jedenfalls keine relevante Mehrgefährdung verursachen.
- Besprechung der Resultate mit der Projektgruppe Flussbau im Rahmen von 10 Projekt-sitzungen.
- Koordination mit den Planern der Hochwasserschutzprojekte RHESI und an der III.

Sämtliche hydrologisch-hydraulischen Auswertungen wurden für sehr seltene Extremereignisse ausgeführt (EHQ_A - EHQ_B, Jährlichkeit in der Grössenordnung 500 bis über 1'000).

Zu Beginn der Vertiefung war vorgesehen, die hydrologisch-hydraulische Wirkung der Massnahmen im Abschnitt Landquart - III mit einem instationären Routingmodell zu untersuchen und im Abschnitt oberhalb der Landquart lediglich gutachtlich zu beurteilen. Im Verlaufe der Arbeiten zeigte sich jedoch die Notwendigkeit einer präziseren hydraulischen Beurteilung insbesondere auch der Geländekammern des Abschnitts Felsberg - Landquart. Aus diesem Grund wurde nachträglich für die gesamte Rheinstrecke und die Ebene zwischen Felsberg und Trübbach ein aktuelles, zusammenhängendes 2d-Modell erstellt, das sowohl das Rheingerinne wie auch das von einer Überflutung potenziell betroffene Terrain in der Talebene integral umfasst. Dank des instationären Betriebs der beiden Teilmodelle Felsberg-Trübbach und Bangs/Sennwald konnte auf ein Routingmodell verzichtet werden.

1.6 Neue verfeinerte Einteilung der Sektoren und Geländekammern

Im Abschnitt Wartau – Buchs – Salez bzw. Balzers – Vaduz – Bendern – Ruggell wird die Damm- und Gerinnestabilität im Drittprojekt Ertüchtigung Rheindämme SG/FL verbessert, und die Dammhöhen bzw. Abflusskapazität sind so hoch, dass das robuste Durchleiten gemäss Bestvariante 2, Massnahmenelemente 34.0_L/R_Kap und 39.9_L/R_Kap nach Realisierung des Drittprojekts gewährleistet sein wird. Daher konzentrierten sich die Abklärungen in der vorliegenden Vertiefungsstudie auf die Rheinabschnitte von Felsberg bis Trübbach sowie bei Sennwald und Bangs-Ruggell.

Insbesondere für die vertiefte Untersuchung der hydrologisch-hydraulischen Wirkung der Massnahmen war es erforderlich, die Sektoreinteilung weiter zu verfeinern. In der Folge werden vier Sektoren unterschieden:

- Sektor 1: Rheinabschnitt von Felsberg bis zur Landquartmündung. Daran angekoppelt sind die Geländekammern bzw. Abschnitte:
 - Felsberg (L) und Chur oberhalb Plessur (R)
 - Chur unterhalb Plessur (R), Haldenstein (L) und Oldis (L)
 - Trimmis (R) und Untervaz (L)
 - Zizers-Landquart (R).
- Sektor 2: Rheinabschnitt Landquart – Tamina. Daran angekoppelt sind die Geländekammern bzw. der Abschnitt von:
 - Bad Ragaz Sarelli – Giessenpark (L), Maienfeld (R) sowie Fläsch (R)
- Sektor 3: Rheinabschnitt Tamina – Mündung Vilterser-Wangser-Kanal unterhalb Trübbach. Daran angekoppelt ist die grosse Geländekammer von:
 - Sarganser Au – Sargans – Trübbach (L).
- Transitstrecke Wartau – Ruggell ohne weitere Massnahmen
- Sektor 4: Rheinabschnitt von der Brücke Salez – Ruggell bis zur Illmündung. Daran angekoppelt sind die Geländekammern von:
 - Sennwald – Büchel (L)
 - Ruggell – Bangs – Spiersbachmündung (R).

2. OPTIMIERTES MASSNAHMENKONZEPT

2.1 Konkretisierung der Massnahmen und der technischen Machbarkeit

2.1.1 Optimierungsschritte

Das aus der Studie Systemsicherheit Bestvariante 2 hervorgegangene Massnahmenkonzept konnte im Verlauf der Vertiefung optimiert werden. Diese Optimierung erfolgte im Verlauf der Vertiefungsstudie iterativ und parallel zur hydrologisch-hydraulischen Berechnung. Die wichtigsten Optimierungsschritte waren:

- Besichtigung vor Ort und Abklärung der Machbarkeit sowie der Massnahmenimplantierung in die örtlichen Gegebenheiten des Terrains, des Gerinnenetzes sowie der bestehenden Hochwasserschutzanlagen.
- Detailanalyse der Topografie anhand der neuesten hoch aufgelösten Digitalen Terrainmodelle und -oberflächenmodelle:
 - Geländekammern im Kanton St. Gallen: swissSURFACE3D, Aufnahmen 2019
 - Geländekammern im Kanton Graubünden: swissALTI3D, Aufnahmen 2014
- Übernahme der bereits auf Stufe Bauprojekt projektierten Dammabrückungen im Bereich der Rheinaufweitung Maienfeld/Bad Ragaz, sowie der im Rahmen dieses Projektes berechneten Hochwasserspiegel und Sohlenlagen.
- Übernahme der 1d-Hochwasserspiegel und Sohlenlagen aus den neusten hydraulischen Berechnungen des heutigen Rheingerinnes von Reichenau bis zur Illmündung (Istzustand; [7], [8]).
- Übernahme der neusten 1d- Hochwasserspiegel und Sohlenlagen aus dem Projekt RHESI (Istzustand und extrapoliierter Projektzustand, [11]). Dieser Wasserspiegel ist v.a. für die Auslegung der Massnahmen Ruggell-Bangs-Spiersbachmündung entscheidend.
- Konsultation der neuen, im Rahmen des Projekts Ertüchtigung Rheindämme SG/FL ausgeführten geotechnischen Stabilitätsuntersuchungen des Büros Dr. von Moos [9].
- Übernahme des Projektkonzepts für die Aufweitung Sargans aus der hydraulischen und sedimentologischen Machbarkeitsabklärung [10, mittlere Variante].
- Koordination mit den hydrologisch-hydraulischen Untersuchungen an der Ill sowie mit dem Sanierungsprojekt der Ill-Entlastung am Illspitz.
- Detailanalyse der Fliesswege und Überflutungswasserspiegel bei einem EHQ_B im Istzustand anhand der ersten Berechnungen mit den beiden 2d-Modellen. Dies ergab namentlich in folgenden Gebieten neue Erkenntnisse über den Ablauf eines Extremereignisses:
 - Zahlreiche Aus- und Rückflüsse in den kleinen Geländekammern des Abschnitts Felsberg – Landquart
 - Weiterfluss aus der Maienfelder in die Fläscher Geländekammer
 - Hydraulische Prozesse bei einem Rückfluss durch den Knoten beim Trübbach und Vilterser-Wangser-Kanal
 - Ablauf der Überflutungsprozesse in der Geländekammer von Sennwald im Zusammenspiel von Rückstau/Rückfluss des Rheins sowie des Binnenhochwassers des Werdenberger Binnenkanals
 - Optimale Beaufschlagung des Rückhalteraus Bangs-Ruggell unter Berücksichtigung des Hochwasserschutzes der Siedlungsgebiete von Bangs und Ruggell sowie des Binnen-Hochwasserabflusses des Spiersbachs.
- Optimierung der Länge und Höhe bzw. des Anspringpunkts von allen Überströmstrecken, wenn möglich in Synergie mit ohnehin zu sanierenden Dammabschnitten.
- Integration der Überströmstrecke Sargans in das Massnahmenkonzept der Aufweitung Sargans.
- Anpassung des linken Rheindamms bei der Mündung des Werdenberger Binnenkanals.

- Abklärung der Notwendigkeit einer Regulierung des Rückflusses via Mündung des Vilterser-Wangser-Kanals (Trübbach).
- Optimierung Linienführung und Höhen der Dämme entlang des Werdenberger Binnenkanals in der Geländekammer Sennwald.
- Abklärung der Notwendigkeit und Optimierung von Linienführung und Höhe von Hinterdammstrukturen in den Geländekammern von Sennwald, Fläsch und Trimmis.
- Hauptabmessungen und Funktionsweise des Absperrbauwerks bei der Spiersbachmündung.

2.1.2 Anforderungen an die Massnahmen

In Anlehnung an die in der Studie Systemsicherheit formulierten übergeordneten Entwicklungsziele muss das Massnahmenkonzept die folgenden Grundsätze erfüllen, wobei die Reihenfolge der Auflistung unabhängig von einer Gewichtung erfolgt:

- Das Hochwasserschutzsystem am Alpenrhein soll auch bei einem Extremereignis mit einer angemessenen Restsicherheit funktionieren. Das Restrisiko von unkontrollierbaren oder nicht vorhersehbaren Prozessen, welche schwere und gefährliche Überflutungen insbesondere in Siedlungsgebieten zur Folge hätten, ist auf ein tragbares Minimum zu beschränken.
- Die Hochwasserschutz- und Dammstabilisierungsmassnahmen oberhalb der Illmündung dürfen nicht zu einer weiteren Verschärfung extremer Abflussspitzen im unterliegenden Rheinabschnitt führen.
- Hochwasserdämpfende Massnahmen dürfen in den lokalen Notentlastungsräumen oberhalb der Illmündung zu keinen wesentlichen Mehrgefährdungen führen.
- Die vorzuschlagenden Massnahmen sollen den Hochwasserschutz bei extremen Ereignissen sowohl in den lokalen Abschnitten wie auch übergeordnet für das ganze System des Alpenrheins verbessern:
 - Übergeordnete Systemsicherheit: für extreme Ereignisse ist im Oberlauf oberhalb der Illmündung ein Dämpfungseffekt auf die Abflussganglinie zu erzielen. Es wird angestrebt, die EHQ-Abflussspitze Rhein in der IRR-Strecke nicht höher als ein EHQ_A ansteigen zu lassen. Das entsprechende quantitative Dämpfungsziel wird in Kap. 3.1.3 genauer untersucht.
 - Lokale Systemsicherheit: die Massnahmen sollen auch in den am Oberlauf oberhalb der Illmündung verbleibenden Notentlastungsräumen zu einer Verringerung des Restrisikos und Vergrösserung der Robustheit vor unkontrollierbaren Prozessen beitragen. Der Vergleich des Projektzustands mit dem Istzustand soll sämtliche bei Extremereignissen zu erwartenden Gefährdungsprozesse miteinbeziehen, d.h. neben der Abflusskapazität auch die Damm- und Uferstabilität.
- Es werden in der Regel keine komplizierten technischen Entlastungsanlagen vorgeschlagen, sondern ein einfacher, kostengünstiger, unterhaltsarmer und gleichzeitig robuster Ausbau der Rheindämme auf eine sowohl auf den lokalen wie auch auf den übergeordneten Hochwasserschutz austarierete Höhe, kombiniert mit Dammstabilisierungsmassnahmen für den Fall eines dosierten Überschwappens bei extremen Ereignissen.
- Die Massnahmen müssen trotz der Seltenheit der Ereignisse eine genügende Kostenwirksamkeit aufweisen und sich in bestehende Konzepte (z.B. Entwicklungskonzept) und laufende Projekte (RHESI, Aufweitung Maienfeld/Ragaz) einfügen können.
- Es werden Massnahmen bevorzugt, welche mittel- bis langfristig im Rahmen von Drittprojekten nach und nach umgesetzt werden können, und neben der Systemsicherheit auch aus Gründen des Hochwasserschutzes, des Gewässerunterhalts oder der Revitalisierung angestrebt werden.

2.1.3 Generelle hydraulische Auslegung

Die hydraulische Auslegung der Massnahmenelemente folgt mehrheitlich dem bereits in der Studie D12 vorgeschlagenen und in der Rheinaufweitung Maienfeld / Bad Ragaz weiter konkretisierten Ansatz. Überall dort, wo im Extremereignisfall eine kontrollierte Dammüberströmung zulässig und aufgrund der lokalen und übergeordneten Systemsicherheit erwünscht ist,

wird anlässlich einer Sanierung oder einem Neubau der Dämme die Dammhöhe so austariert, dass die folgenden zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Wasserspiegel des Dimensionierungsereignisses HQ_{300} zuzüglich eines vollen erforderlichen Freibords.
- In der Regel bordvoller Extremereignis-Wasserspiegel bei einem EHQ_A .

Die Abfluss-Wasserspiegel-Relation im Rheingerinne ist häufig so, dass beide Kriterien oft etwa dieselbe Dammhöhe ergeben. Eine optimal austarierte Dammhöhe kann somit einerseits den vollen Schutz beim Dimensionierungsereignis gewährleisten und erlaubt andererseits in einem Überlastfall eines Extremereignisses ein kontinuierlich zunehmender, dosierter Wasseraustritt.

Bei einem EHQ_B wird damit eine bestmögliche Dämpfungswirkung erzielt, indem die rückwärtigen Geländekammern bis und mit dem HQ_{300} möglichst lange vor einer Überflutung geschützt bleiben, dann aber ab dem EHQ_A ihr gesamtes, noch leeres Rückhaltevolumen zur Verfügung stellen können.

In Überströmstrecken wie beispielsweise derjenigen von Sargans, wo die Ausflüsse auf möglichst seltene Ereignisse hinauszuzögern sind, wird auf den Extremereignis-Wasserspiegel EHQ_A zusätzlich ein strategisches Freibord von 20-30 cm dazugeschlagen.

Die Überströmstrecken werden überströmsicher ausgebildet, damit im Überströmungsfall mit Ausnahme einer kontrolliert erodierenden Dammkrone (z.B. in Form eines erodierbaren Wegkoffers) keine Dammbresche entsteht. Bei geringen Dammhöhen genügt in der Regel eine Ausflachung und Rollierung des Dammkörpers. Bei hohem Damm wie z.B. der Überströmstrecke Partenwiesen ist jedoch ein massiver Erosionsschutz notwendig.

2.1.4 Grobkostenschätzung

Im Rahmen der Vertiefung wurde eine erneute Grobkostenschätzung auf Konkretisierungsstufe Vorstudie vorgenommen, wobei nur diejenigen Kosten aufgerechnet sind, welche direkt für die Systemsicherheit entstehen. Die Kosten von ohnehin notwendigen Massnahmen für den Hochwasserschutz oder die Renaturierung sind nicht aufgerechnet.

Die Grobkostenschätzung enthält Baumeisterarbeiten, Planung und Bauleitung (15%), Unvorhergesehenes sowie MWST. Sie quantifiziert lediglich die wichtigsten Hauptpositionen und rechnet für die noch nicht quantifizierbaren Nebenpositionen einen erhöhten Zuschlag für Unvorhergesehenes mit ein.

2.1.5 Optimierter Massnahmenumfang

Das aus der Studie Systemsicherheit [1] hervorgegangene Massnahmenkonzept wurde optimiert und umfasst nun die folgenden Massnahmenelemente, welche in der Übersicht Anhang 4 schematisch dargestellt sind und in den Folgekapiteln pro Geländekammer beschrieben werden.

Die folgende Aufzählung gibt einen Überblick über die vorgenommenen Anpassungen des Massnahmenkonzepts:

Sektor 1 (Chur – Landquartmündung)

7.0_L/R_Kap: zusätzlich zur Bestvariante 2 werden im Raum des Schiess- und Waffenplatzes Oberau / Sand Ufererhöhungen integriert, welche zu einer Effizienzsteigerung der dortigen kleinen Retentionsräume beitragen.

9.6_L/R_Kap: rechter und linker Damm Chur-Haldenstein-Oldis. Neben der Optimierung der Dammhöhe und des Dammquerschnitts muss auch der frühzeitige Rückfluss durch die Mündung des Churer Mühlbachs (km 11.2 rechts) verhindert werden. Zudem werden zusätzliche Dammverstärkungen auf der linken Seite unterhalb der Brücke Haldenstein sowie im Bereich der Geländekammer Oldis integriert, welche einerseits den Schutz von Haldenstein vergrössern und andererseits den Retentionseffekt im Überlastfall verstärken. Hingegen scheint eine Anpassung der linken Dammhöhen oberhalb der Brücke Haldenstein nicht notwendig zu sein.

16.2_L/R_Kap: rechter und linker Damm Trimmis-Untervaz. Neu wird eine Sanierung der alten Dämme auf der ganzen Länge des beidufriigen Industriegebiets empfohlen. Zusätzlich wird der bestehende Hinterdamm-Erdwall bei km 18.15 rechts verstärkt, damit die Geländekammer Trimmis nicht zu früh von Norden her gefüllt wird.

22.4_R_Kap + 22.7_R_Zfl: Die Massnahme entlang der rechten Uferseite ist ohnehin bereits für das HQ₃₀₀ notwendig, kann aber wesentlich verkürzt werden. Anstelle einer Verstärkung des bestehenden Hochwasserdammes wird eine neue, rückversetzte Dammschüttung entlang der Westseite der Autobahn ab dem Rastplatz Apfelwuhr bis vor die Landquartbrücke vorgeschlagen, womit der dazwischenliegende Auenwald wieder dem Flussraum zugeordnet werden kann. Die Rückflussverhinderung via Mühlbach ist ohnehin bereits für das HQ₃₀₀ notwendig.

Sektor 2 (Landquartmündung – Taminamündung):

23.6_L/R_Kap: Die im Auflageprojekt der neuen Aufweitung Maienfeld/Bad Ragaz projektierten Dammbrückungen sind Bestandteil des Massnahmenkonzepts der Systemsicherheit. Auch die Sanierung und Ausflachung der nicht abgerückten Dämme wird in das Massnahmenkonzept der Systemsicherheit aufgenommen.

Eine überströmbare Dammscharte im Bereich Giessenpark links oberhalb der Taminamündung ist nicht mehr notwendig. Zudem zeigen die Modellrechnungen, dass die rechtsseitige Überflutung aus der Geländekammer Maienfeld unterhalb der Autobahnraststätte dosiert und kontrolliert in die Geländekammer Fläsch weiterfliesst. Eine zusätzliche Überströmstrecke Fläsch ist daher nicht mehr notwendig.

Eine Verstärkung des rechtsseitigen niederen Hinterdamms bei km 31.8 schützt das Intensivlandwirtschaftsland und erhöht gleichzeitig die Rückhaltewirkung der Geländekammer im EHQ_B-Überlastfall.

Aufgrund ihrer hydraulischen Verbindung mit der Geländekammer Maienfeld wird die Geländekammer Fläsch neu dem Sektor 2 statt dem Sektor 3 zugeordnet.

Sektor 3 (Taminamündung – Mündung Vilterser-Wangser-Kanal bei Trübbach):

29.0_L/R_Kap + 35.6_L_Rfl: Anstelle der Überströmstrecke links nach der Fläscher Brücke wird die lokale und übergeordnete Systemsicherheit in der geplanten Aufweitung Sargans umgesetzt, indem die linksseitige Dammbrückung unterhalb von km 32.8 überströmsicher ausgebildet wird. Aufgrund des sehr grossen Schadenspotentials springt diese Überströmstrecke nur im äussersten Überlastfall an.

Nach Optimierung der Auslegung der Geländekammer Sargans sowie gemäss hydraulischer Detailabklärung des Knotens beim Trübbach/Vilterser-Wangser-Kanals sind im Rückflussbereich voraussichtlich keine zusätzlichen Massnahmen nötig. Auf eine Schliessung der Militärschützen bei der Unterquerung des Trübbachs wird verzichtet, da diese Manipulation zur effizienten Dämpfung im Unterlauf nicht zwingend nötig ist, möglicherweise zu einer Mehrgefährdung des grossen Schadenspotentials von Sargans führen würde und politisch nicht durchsetzbar wäre.

37.6_L_Kap: Die hydraulische Detailabklärung zeigt, dass ab EHQ_B eine dosierte Überströmung des nördlichen Aussendamms des Vilterser-Wangser-Kanals unterhalb von Trübbach erfolgt. Aus diesem Grund wird auf eine vorbereitete Dammscharte für > EHQ_B verzichtet.

Transitstrecke:

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden keine zusätzlichen Massnahmen abgeklärt.

Sektor 4 (Sennwald / Ruggell-Bangs):

58.0_L_Hda + 58.0_L_Ner + 61.9_L_Zfl + 62.8_L_Hda: Das Massnahmenkonzept im Bereich der Geländekammer Sennwald ist machbar und kann grundsätzlich beibehalten werden. Eine Dammscharte oberhalb des Zollhauses ist nicht mehr notwendig. Für eine optimale hydraulische Ausnutzung des Rückhaltevermögens bei EHQ, bei gleichzeitig verbessertem Schutz bis HQ₃₀₀ müssen die niederen Dämme entlang des Werdenberger Binnenkanals weiter nach Süden bis zur Industriezone Hofwald verlängert werden. Gleichzeitig wird der rechte Damm unterhalb des Zollhauses bis zur Mündung des Werdenberger Binnenkanals abgesenkt. Dadurch wäre eine Revitalisierung des Mündungsbereichs des Kanals möglich, was aber für die Systemsicherheit nicht zwingend erforderlich ist.

59.3_R_Ner2 + 63.4_R_Ent + 64.8_R_Zfl: Das Massnahmenkonzept im Bereich der Geländekammer Bangs-Ruggell ist machbar und kann grundsätzlich beibehalten werden. Die Massnahmen erlauben eine wesentliche Verbesserung des Hochwasserschutzes für Bangs bis HQ₃₀₀, bei gleichzeitig optimaler Ausnutzung der Dämpfungswirkung bei einem EHQ in diesem letzten grossen Rückhalteraum vor der IRR-Strecke.

Zur optimalen Beaufschlagung des Rückhaltraums muss die bereits im Massnahmenkonzept der Studie D12 Systemsicherheit vorgeschlagene Überströmstrecke im rechten Rheindamm um 400 m flussaufwärts verlängert werden. Die Massnahmen am Rhein sind zudem mit denjenigen an der Ill zu koordinieren, damit die dortige Überströmstrecke im linken Illdamm mit derjenigen am Rhein korrespondierend wirkt und den Rückhalteraum nicht zu früh füllt.

2.2 Abschnitt Felsberg – Chur (Sektor 1)

2.2.1 Beschrieb

Km 7.6-8.8 links, Felsberg Schiessplatz Sand: kontinuierlich höher werdender Damm entlang des linken Ufers, Dammhöhen flussabwärts von 0.5 bis 2.0 m zunehmend. Länge total ca. 1'300 m. Anpassungen Strassen und Wege des Schiessplatzes. Detailanpassungen an zwei Gebäuden und zwei Brückenwiderlagern (ohne Brückenanhebung).

Km 7.5-7.9 rechts, Waffenplatz Obere Au: leichte Ufererhöhung 0.3-0.5 m entlang des bestehenden Uferwegs. Länge ca. 450 m.

Langfristige Umsetzung im Rahmen von Drittprojekten.

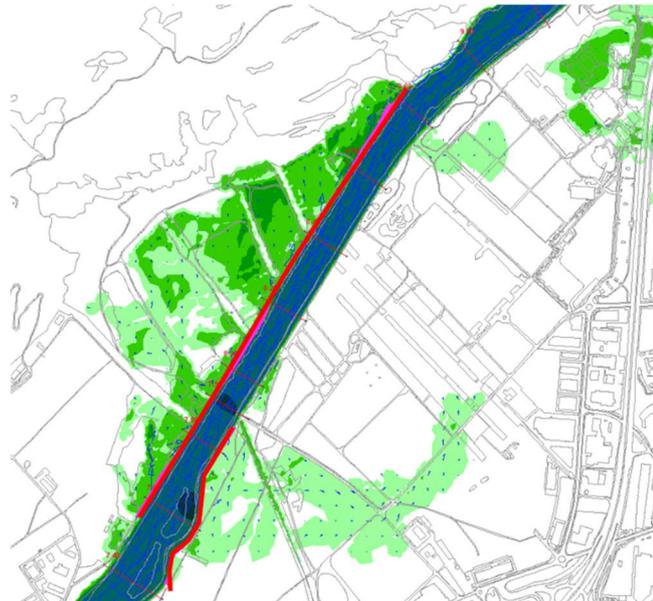


Abbildung 1: Ufererhöhungen (rot) Abschnitt Felsberg – Chur oberhalb der Plessur. Grüne Überflutungsflächen: EHQA im Istzustand

2.2.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz

Damm- bzw. Uferhöhe beidseitig EHQA bordvoll. Aufgrund der niederen Dammhöhe am flussaufwärts liegenden Ende ist kein Überströmenschutz notwendig.

Die Massnahmen dienen dazu, die Wasseraustritte auf EHQA hinauszuzögern und die Rückhaltevolumina bis EHQA leer zu behalten. Es ist jedoch kein örtliches Schutzdefizit und somit kein Handlungsbedarf für den lokalen Hochwasserschutz gegeben, und die Rückhaltevolumen beidseits des Rheins sind eher gering. Wenn die Massnahmen nicht mit einer anderen Nutzung, z.B. Kugelfang, Lärmschutz oder Wegsanierung verbunden werden können, ist ihre Priorität eher gering.

2.2.3 Grobkosten Systemsicherheit

Km 6.6-8.8 links, Felsberg Schiessplatz Sand:
Gesamtkosten Damm:

CHF 2'900'000.--

Km 6.5-7.9 rechts, Waffenplatz Obere Au:
Gesamtkosten Ufererhöhung:

CHF 500'000.--

2.3 Abschnitt Chur – Haldenstein – Oldis (Sektor 1)

2.3.1 Beschrieb

Km 10.0-11.2 rechts, Untere Au Chur: Dammverstärkung mit austarierter Dammhöhe, flussaufwärts leichte Absenkung bis -0.2 m, flussabwärts leichte Erhöhung bis 70 cm. Abflachung Aussenböschung bis zur Autobahn. Länge ca. 1'340 m. Detailanpassungen bei HV-Masten und einem Brückenwiderlager (ohne Brückenanhebung).

Km 11.2 rechts, Mühlbach: Rückflussverhinderung entweder mit Absperrorgan im Rheindamm (mit Verschliessen des Zuflusses von der Plessur her) oder mit Erhöhung des rechten, nördlichen Bachufers

Km 12.1-12.9 links, Haldenstein: Dammverstärkung und leichte Erhöhung um rund 0.5 m. Der heutige Dammquerschnitt ist schmal und in einem schlechten Zustand. Länge ca. 840 m.

Km 13.3-14.3 links, Oldis: Reprofilierung und Verstärkung Damm, Austarierung Dammhöhe mit flussabwärts zunehmender Dammanhebung von 0 bis 1 m. Länge ca. 1'000 m.

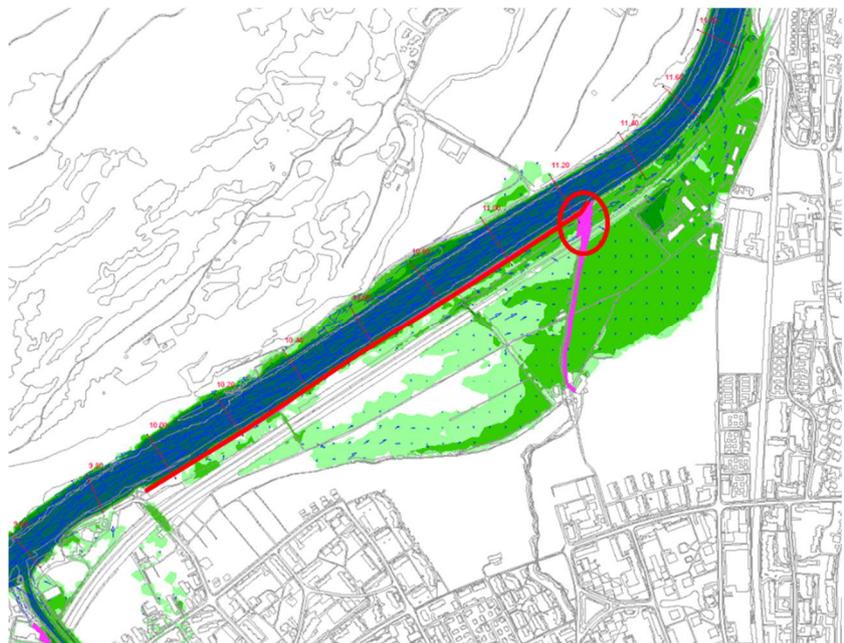


Abbildung 2: Dammverstärkung Chur Untere Au (rot), Rückflussverhinderung Mühlbach (pink). Grüne Überflutungsflächen: EHQA im Istzustand



Abbildung 3: Rechter Damm Untere Au, Blickrichtung flussaufwärts, Autobahn links. Relativ guter Damzustand (Foto NIPO, Jan. 2020)

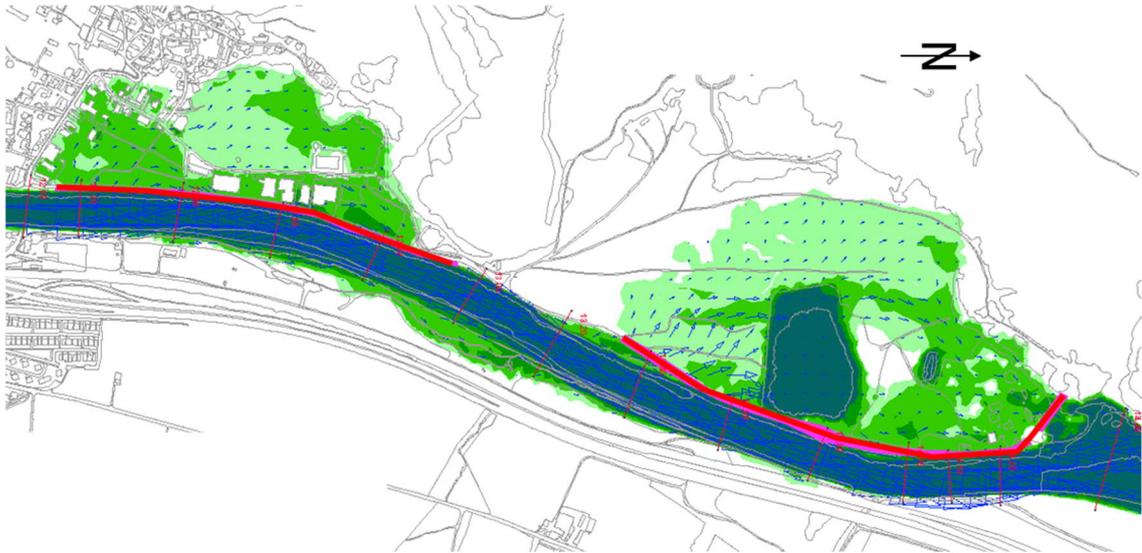


Abbildung 4: Dammverstärkungen Haldenstein und Oldis (rot). Grüne Überflutungsflächen: EHQ_A im Istzustand



Abbildung 5: Linker, zu verstärkender Damm bei Haldenstein. Schlechter Damzustand.

2.3.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz

Dammhöhe = Maximum aus HQ_{300} + Freibord oder EHQ_A bordvoll.

Rechter Damm Untere Au Chur: Überströmsicherung durch ausgeflachte Böschung.

Linker Damm Haldenstein und Oldis: aufgrund der niederen Dammhöhe ist keine zusätzliche Überströmsicherung notwendig.

Die Dammsanierung Untere Au und die Rückflussverhinderung Mühlbach halten das Rückhaltevolumen bis EHQ_A frei und schützen gleichzeitig die ARA Chur bis zu einem HQ_{300} . Aufgrund des relativ guten Dammszustands wird ein geringer Sanierungsbedarf für den lokalen Hochwasserschutz angenommen.

Die Dammverstärkung Haldenstein hält das Rückhaltevolumen bis EHQ_A frei und schützt gleichzeitig das Siedlungs- und Gewerbegebiet bis zu einem HQ_{300} . Der Zustand des schmalen Damms ist schlecht, weshalb mittelfristig ohnehin ein Sanierungsbedarf angenommen wird.

In Oldis ist wahrscheinlich kein Schutzdefizit und kein Handlungsbedarf für den lokalen Hochwasserschutz vorhanden. Die Reprofilierung des Damms dient hier nur dazu, das Rückhaltvolumen bis EHQ_A leer zu behalten. Gemäss Augenschein Januar 2020 wurden der Damm und der Dammweg auf einem Teil des Abschnitts neu profiliert, sind aber noch nicht im DTM abgebildet. Es konnte nicht überprüft werden, ob der neue Zustand bereits der hydraulischen Auslegung entspricht.

2.3.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit

Km 10.0-11.2 rechts, Untere Au Chur: Damm inkl. Mühlbachmündung, Aufrechnung der Gesamtkosten ohne einen Abzug für einen Synergienutzen:	CHF 1'600'000.--
Km 12.1-12.9 links, Haldenstein: nur Zusatzkosten Systemsicherheit, ohne Kosten für Dammsanierung bis HQ_{300} :	CHF 400'000.--
Km 13.3-14.3 links, Oldis: Dammreprofilierung ohne Abzug für einen Synergienutzen:	CHF 1'300'000.--

2.4 Abschnitt Untervaz/Trimmis (Sektor 1)

2.4.1 Beschrieb



Abbildung 6: Beidseitige Dammsanierungen im Abschnitt Untervaz/Trimmis (rot). Grüne Überflutungsflächen: EHQ_A im Istzustand (erste provisorische Rechnung, nur indikativ)

Km 16.2-18.1 links, Untervaz Industrie: linker Damm im schlechten Zustand. Dammsanierung primär zum Hochwasserschutz der Industrie, und zusätzlich unter Berücksichtigung der lokalen und übergeordneten Systemsicherheit.

- Oberhalb der Rheinbrücke Dammsanierung mit Ausgleich der Dammkrone auf einer Länge von ca. 990 m, voraussichtlich wie folgt:
 - Dammabsenkung 0-70 cm und Ausflachung im oberen Abschnitt oberhalb der Industrie bis km 16.6
 - Leichte Dammerhöhung 0-40 cm im unteren Abschnitt von km 16.6 bis zur Brücke.
 - Es wird der bestehende Damm verstärkt und mit einem Fussweg versehen. Die Erschliessungsstrasse am Dammfuss wird belassen.

- Unterhalb der Rheinbrücke Verstärkung und Erhöhung des bestehenden Damms um 1.5-2 m bis zum Ende der Industrie, auf einer Länge von rund 790 m.

Es wird angenommen, dass die entlang des linken Damms verlaufende Gasleitung nicht verlegt werden muss.

Km 16.4-17.7 rechts, Trimmis Industrie: Sanierung des rechtsufrigen Damms mit Ausgleich der Dammhöhe etwa wie folgt:

- Oberhalb der Rheinbrücke: Dammsanierung mit Ausgleich der Dammhöhe zwischen Absenkung 20 cm bis Anhebung 50 cm auf einer Länge von ca. 870 m.
- Überprüfung und nötigenfalls Stabilisierung der Ufersicherung am Prallhang km 16.6 – 16.8.
- Unterhalb der Rheinbrücke: Dammabsenkung und Abflachung um 0-1 m auf einer Länge von ca. 380 m

Km 18.15 rechts, Trimmis unterhalb der Industrie: Erhöhung der Hinterdammstruktur zur Verhinderung einer Überflutung von Norden her, flache Terrainanhebung 0-1m, Länge ca. 160 m.



Abbildung 7: *Linker Damm ca. bei km 16.3 oberhalb der Industrie, Blickrichtung flussaufwärts. Sanierung des schlechten Dammszustands durch leichte Absenkung und Ausflachung (Foto NIPO, Jan. 2020)*



Abbildung 8: *Linker Damm ca. bei km 17.3 unterhalb der Brücke Untervaz, Blickrichtung flussabwärts. Sanierung des schlechten Dammszustands und Dammerhöhung rund 1 m (Foto NIPO, Jan. 2020)*



Abbildung 9: Rechter Damm ca. bei km 16.7, Trimmis Industrie, Blickrichtung flussabwärts. Der Damzustand ist vermutlich mangelhaft, und am wasserseitigen Prallhang ist vermutlich ein starker Erosionsdruck vorhanden. Sanierung Damm und Uferschutz sowie Dammerhöhung rund 30 cm (Foto NIPO, Jan. 2020)

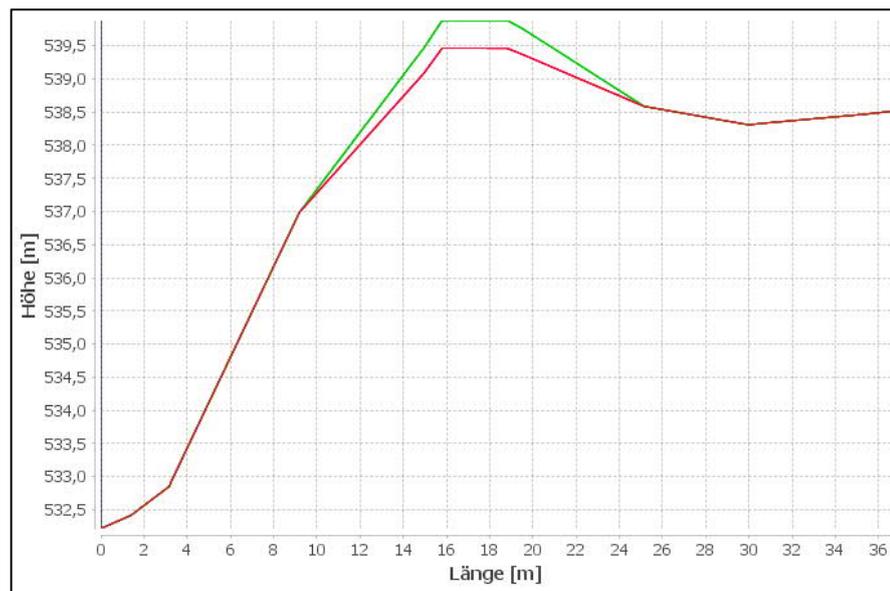


Abbildung 10: Sanierung des rechten Damms Trimmis Industrie, Querschnitt etwa bei km 16.6 mit leichter Dammerhöhung rund 30 cm

2.4.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz

Dammhöhe beidseitig = Maximum aus HQ_{300} + Freibord oder EHO_A bordvoll.

Linker Damm Industrie Untervaz: oberhalb der Industrie wird die Überströmsicherung durch Ausflachung des niederen Damms gewährleistet, unterhalb der Rheinbrücke durch den Einbau einer Überschwappsicherung in den erhöhten Damm. Die Sanierung des linken Damms ist ohnehin zum Schutz der Untervazer Industrie bis zum HQ_{300} notwendig. Zusätzlich wird das Rückhaltevolumen bis zum EHO_A freigehalten.

Rechter Damm Industrie Trimmis: Oberhalb der Rheinbrücke wird eine technische Überschwappsicherung in den niederen Damm eingebaut, da er luftseitig nicht ausgeflacht werden kann. Es ist zumindest teilweise ein Sanierungsbedarf am Damm und an der Ufersicherung

(Prallhang) zum Schutz der Trimmiser Industrie bis zum HQ₃₀₀ vorhanden. Unterhalb der Rheinbrücke wird die Überschwappsicherung durch Dammabsenkung und Ausflachung gewährleistet. Diese Massnahmen dienen dort hauptsächlich der Systemsicherheit.

2.4.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit

Km 16.2-18.1 links, Untervaz Industrie:
nur Zusatzkosten Systemsicherheit ohne Kosten
für Dammsanierung bis HQ₃₀₀: CHF 2'200'000.--

Km 16.4-17.7 rechts, Trimmis Industrie
(inkl. Hinterdamm km 18.15):
nur Zusatzkosten Systemsicherheit ohne Kosten
für Dammsanierung bis HQ₃₀₀: CHF 1'800'000.--

2.5 Abschnitt Landquart (Sektor 1)

2.5.1 Beschrieb

Die tief liegende Ebene südlich des Bahnhofs Landquart wird bereits bei Abflüssen kleiner als EHQ_A teilweise überflutet. Die Wasseraustritte erfolgen sowohl über den rechten Rheindamm ab ca. km 22.2 wie auch durch Rückstau/Rückfluss via Mündung des Igiser Mühlbachs. Betroffen sind Teile des Industriegebiets und des Siedlungsgebiets sowie das Fashion Outlet.

Die Wasseraustritte verursachen vermutlich ein Schutzdefizit bereits bei Abflüssen kleiner als EHQ_A, und führen im Überlastfall zu einer zu frühen Teilfüllung des Rückhalterausms.

Im Rahmen der vorliegenden Studie sind die folgenden Massnahmen vorgesehen, wobei sie zumindest zum Teil ohnehin zur Beseitigung der örtlich vorhandenen Schutzdefizite notwendig sind:

Km 22.4-23.2 rechts, Damm entlang Autobahn A13: Anstelle einer Erhöhung des rechtsufrigen Rheindamms wird eine Dammschüttung entlang der Westseite des Autobahndamms nördlich des Rastplatzes Apfelwuh vorgeschlagen, da diese kürzer ist und langfristig eine Wiederanbindung des Waldes zwischen Autobahn und Rheindamm in die Flussaue Mastrils ermöglicht. Die Dammschüttung ist strassenseitig zwischen 1-2 m hoch und erstreckt sich auf einer Länge von 860 m. Eventuell ist eine Synergie mit dem Lärmschutz möglich.

Möglicherweise sind auch Abschottungs- oder Eindämmungsmassnahmen bei der Strassenunterführung des Rastplatzes Apfelwuh nötig.

Km 23.1 rechts, Rückflussverhinderung Igiser Mühlbach: Es ist zu verhindern, dass der Rhein via Mühlbach ins rückwärtige Gelände östlich der Autobahn auslaufen kann. Es sind grundsätzlich zwei Varianten denkbar, wobei die Wahl der Bestvariante zusätzliche Detailabklärungen benötigen würde:

- Beidseitige Erhöhung der Bachufer bzw. der Ufermauern so weit wie nötig bachaufwärts, rechtsufrig voraussichtlich bis zum Bahnhofdurchlass, linksufrig voraussichtlich bis zur Sägenstrasse hinauf.
- Wehrverschluss¹ im Autobahndurchlass (Beispiel Schattdorf UR: Unterquerung Still Rüss unter den NEAT-Geleisen, Abbildung 13 unten). Während dem Rheinhochwasser muss die Dotierung mit Wasser aus der Landquart abgestellt werden. Das restliche Wasser aus dem Binnen-Einzugsgebiet (z.B. Schlundrüfi) wird während dem Wehrverschluss in das tief liegende Wald- und Landwirtschaftsgebiet zwischen Mülbach und Autobahn ausgeleitet

Parallel zur Rückflussverhinderung des Oberflächengewässers muss auch der Rückstau im unterirdischen Kanalnetz überprüft und nötigenfalls behoben werden.

¹ Beispiel Hochwasserschutz Urner Talboden, Unterquerung Still Rüss unter den NEAT-Geleisen bei Schattdorf.



Abbildung 11: Massnahmen bei Landquart: westseitige Anschüttung an den Autobahndamm Rot, kräftig) sowie Rückflussverhinderung Igiser Mühlbach, entweder durch Wehrverschluss (roter Kreis) oder durch Ufererhöhungen bachaufwärts bis zur Sägenstrasse (rot, dünn). Grüne Überflutungsflächen: EHQ_A im Istzustand (erste provisorische Rechnung, nur indikativ)



Abbildung 12: Autobahndamm nördlich des Rastplatzes Apfelwuh. Dargestellt ist die Ostseite des Autobahndamms. Die Dammschüttung erfolgt auf der gegenüberliegenden, topografisch ähnlichen Westseite (Foto NIPO, Jan. 2020)

Km 23.3 rechts, Terrainerhöhung zwischen Landquart und PP Fashion Outlet: gemäss den hydraulischen Berechnungen zum Istzustand findet bei EHQ_A im Bereich zwischen Bahnhof und Autobahn ein geringer bordvoller Wasseraustritt über das linke Ufer der Landquart statt, siehe Abbildung 11 rechts im Bild. Ob dieser Wasseraustritt effektiv stattfinden kann und ob er bei HQ_{300} zuzüglich Freibord ein Schutzdefizit verursacht, müsste im Detail überprüft werden. Sicherheitshalber ist im Massnahmenkonzept eine einfach zu realisierende Dammschüttung von 50 cm auf dem parkähnlichen Terrain nördlich des Parkplatzes des Fashion Outlets eingerechnet, und es wird angenommen, dass diese für den Hochwasserschutz ohnehin zu erstellen ist.



Abbildung 13: *Oben: Der vor allem mit Landquartwasser gespeiste Igiser Mühlbach beim Durchlass unter der Autobahn A13 hindurch (Foto NIPO, Jan. 2020)*
Unten: Beispiel eines Verschlussstores in einem Bachdurchlass von etwa ähnlichen Dimensionen (Stille Reuss Schattdorf)

2.5.2 Hydraulische Auslegung und lokaler Hochwasserschutz

Dammanschüttung mit Dammhöhe = EHQ_A + Freibord 0.5 m.

Die Dammanschüttung wird nicht überströmbar ausgebildet. Ein dosierter Wasseraustritt findet bei EHQ_B über die tiefer liegende Fahrbahn der A13 im Bereich der Rastplatzes Apfelwuhr statt.

Rückflussverhinderung Mühlbach = Maximum aus HQ_{300} + Freibord oder EHQ_A bordvoll.

Beide Massnahmen dienen primär dem Hochwasserschutz der Bauzone von Landquart bis mindestens zum HQ₃₀₀. Zusätzlich wird das Rückhaltevolumen bis zum EHQ_A freigehalten.

Die Dammschüttung entlang der Autobahn könnte zusätzlich in Lärmschutzmassnahmen integriert werden.

2.5.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit

Da beide Massnahmen vor allem auch dem lokalen Hochwasserschutz dienen, werden nur die halben Gesamtkosten für die Systemsicherheit aufgerechnet.

Km 22.4-23.2 rechts, Damm entlang Autobahn A13:
nur Kostenanteil Systemsicherheit CHF 1'100'000.--

Km 23.1 rechts, Rückflussverhinderung Igiser Mühlbach:
Variante Wehrverschluss, nur Kostenanteil Systemsicherheit: CHF 300'000.--

Km 23.3 rechts, Terrainerhöhung nördlich PP Fashion Outlet,
nur Kostenanteil Systemsicherheit: CHF 40'000.--

2.6 Abschnitt Maienfeld – Bad Ragaz – Fläsch (Sektor 2)

2.6.1 Beschrieb

Im Abschnitt zwischen der Tardisbrücke und der Brücke Bad Ragaz-Maienfeld wird das Konzept der Systemsicherheit im Rahmen der Rheinaufweitung Maienfeld/Bad Ragaz umgesetzt. Dieses Projekt liegt auf Stufe Bauprojekt vor.

Die Rheinaufweitung sieht zwei Teilstrecken mit je einseitiger Dammsbrückung vor. Die abgerückten, neu zu erstellenden Dämme werden nicht mehr auf die ursprüngliche Höhe hochgezogen, sondern auf die Erfordernisse der lokalen Schutzziele sowie der lokalen und übergeordneten Systemsicherheit ausgerichtet und überströmbar gestaltet.



Abbildung 14: Abschnitt Maienfeld – Bad Ragaz mit den nach dem Bau der Rheinaufweitung bei einem EHQ_B verbleibenden Überflutungsflächen. Rot: Dammsbrückungen mit ausgeflachten überströmbareren Dämmen. Blau: bestehenbleibende Dammelinien mit optionaler Ausflachung. Grüne Überflutungsflächen: EHQ_B im Projektzustand

Km 24.17-24.94 rechts, Dammsbrückung Maienfelder Teilaufweitung: Der Damm wird auf einer Länge von rund 770 m abgerückt und als flacher, maximal 1 m hoher und überströmbarer Damm neu aufgebaut.

Km 25.14-26.94 links, Dammabrückung Bad Ragazer Teilaufweitung: Der Damm wird auf einer Länge von rund 1'800 m abgerückt und als flacher, maximal 1.5 m hoher und überströmbarer Damm neu aufgebaut.

Da auch die auf der alten Uferlinie bestehenbleibenden Dämme (blau in Abbildung 14) Stabilitätsprobleme aufweisen und sanierungsbedürftig sind, wird gegenwärtig die Option geprüft, im Rahmen des Aufweitungsprojekts auch diese Dämme bis zur Kantonsstrassenbrücke Bad Ragaz-Maienfeld auf die erforderliche Höhe abzusenken und auszufachten.

Km 24.95-27.68 rechts, zusätzliche Dammsanierung Seite Maienfeld: Der auf seiner heutigen Uferlinie bestehenbleibende Damm wird auf einer Länge von rund 2'730 m saniert und dabei in ähnlicher Weise wie in Abbildung 15 abgesenkt und ausgeflacht. Er ist auf rund 2/3 seiner Länge überströmbar.

Km 23.64–24.90 und 26.95–27.68 links, zusätzliche Dammsanierung Seite Bad Ragaz: Der auf seiner heutigen Uferlinie bestehenbleibende Damm wird auf einer Länge von rund 1'990 m saniert und dabei in ähnlicher Weise wie in Abbildung 16 abgesenkt und ausgeflacht. Er ist im oberen Teilabschnitt überströmbar.

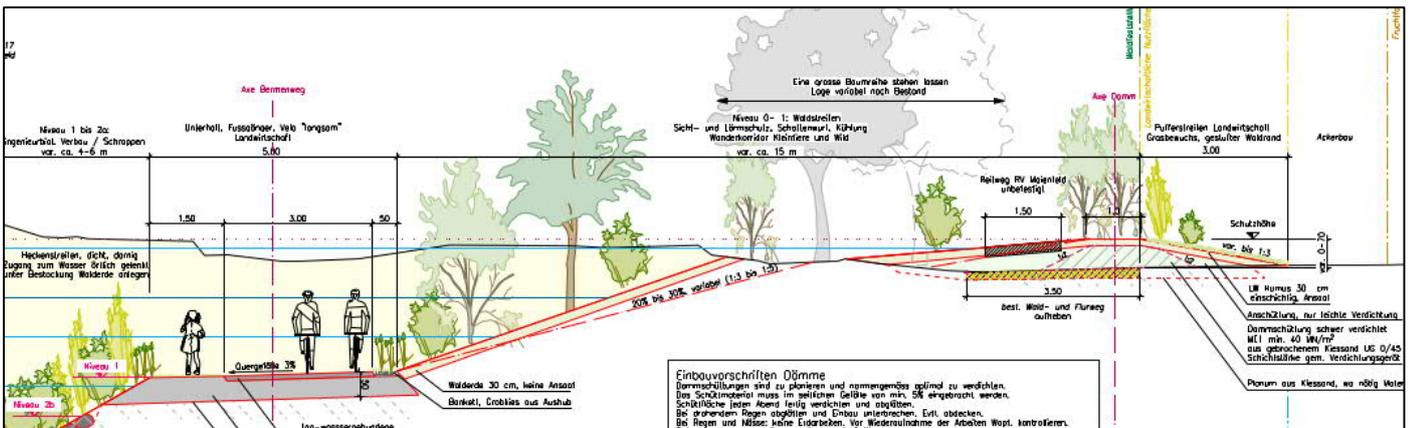


Abbildung 15: Ausgeflichter rechter Damm der Maienfelder Teilaufweitung.

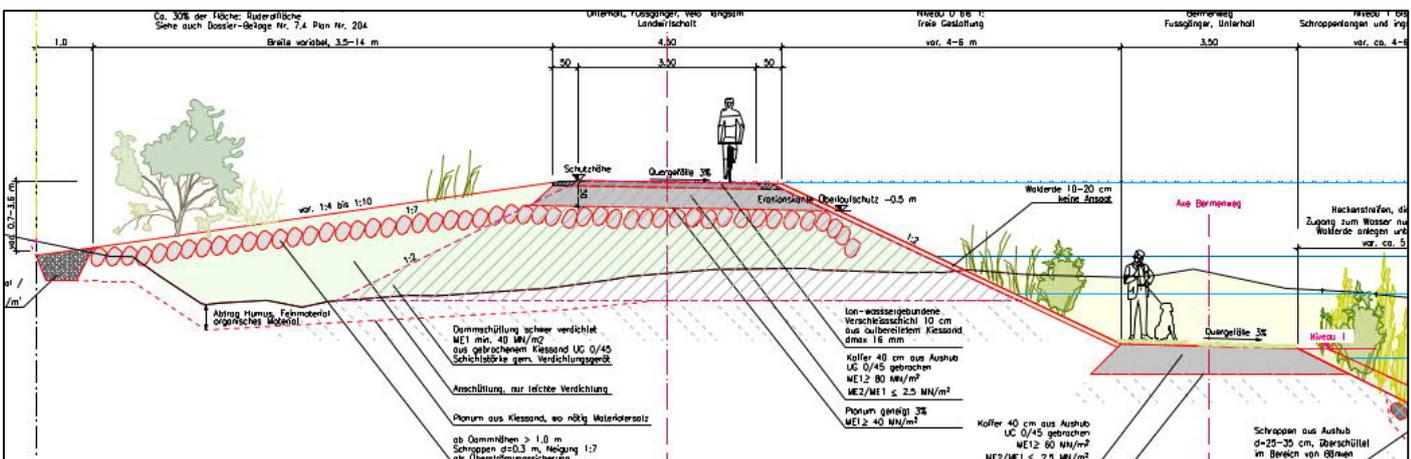
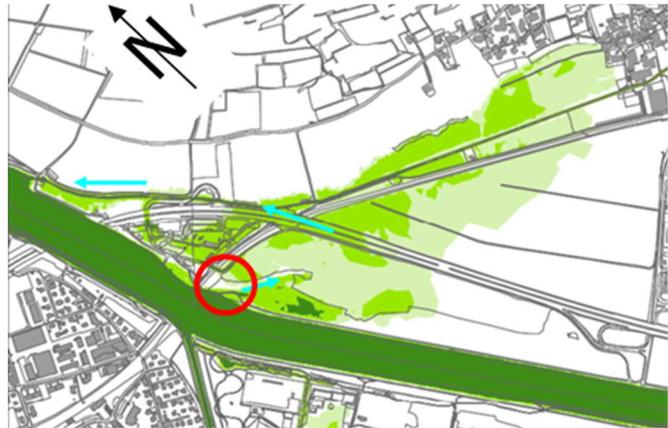


Abbildung 16: Ausgeflichter linker Damm der Bad Ragazer Teilaufweitung.

Km 28.85 rechts, Offenhaltung einer heute bereits bestehenden Dammlücke: Der rechte Damm hat unmittelbar oberhalb der SBB-Brücke eine Lücke, durch die ab EHQ_A ein dosierter Wasseraustritt in die untere Maienfelder Geländekammer erfolgt. Da dieser Wasseraustritt keine Schutzdefizite verursacht und bei Extremereignissen zu einer zusätzlichen Beaufschlagung der Geländekammern von Maienfeld und Fläsch beiträgt, soll die Dammlücke im Interesse der übergeordneten Systemsicherheit auch in Zukunft offengehalten werden.

Abbildung 17:
Bestehende Dammlücke bei
km 28.85 rechts oberhalb
der SBB-Brücke

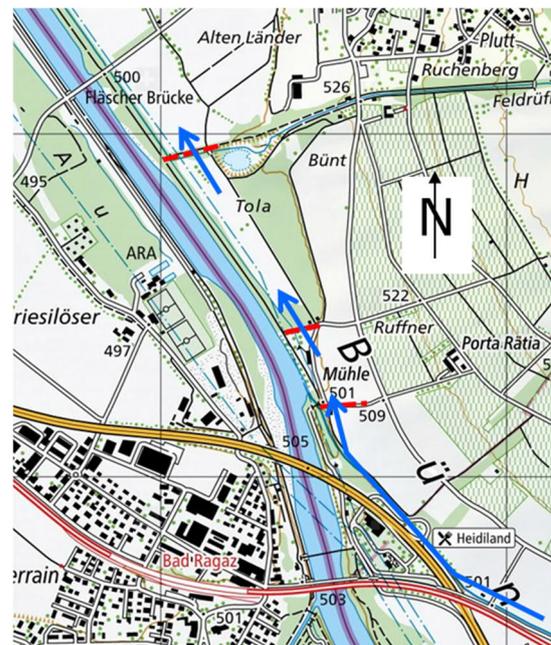


Km 29.5-30.3 rechts, Aufrechterhaltung Verbindungskorridor zwischen den Geländekammern Maienfeld und Fläsch: Die hydraulischen Berechnungen haben gezeigt, dass eine von der Geländekammer Maienfeld herkommende Überflutung unterhalb der Autobahnraststätte Heidiland nur zu einem Teil via Malanser Mühlbach wieder in den Rhein zurückfliesst. Da die hinterdammartigen Strukturen ober- und unterhalb des Restaurants Mühle und bei der Feldrümündung tiefer als der Rheindamm sind, kann ein Teil des Wassers der Luftseite des Rheindamms entlang in die Geländekammer von Fläsch weiterfliessen. Dieser Wasserübertritt von Maienfeld nach Fläsch ist bereits im Sinne einer dosierten Restrisikobewirtschaftung, weshalb auf eine aufwändige zusätzliche Überströmstrecke bei der Fläscher Brücke verzichtet werden kann.

Im Interesse der übergeordneten Systemsicherheit ist dafür zu sorgen, dass dieser Verbindungskorridor langfristig erhalten bleibt. Insbesondere:

- Bei einer Neugestaltung der Mündung des Malanser Mühlbachs dafür sorgen, dass der Durchflussquerschnitt der Dammwegbrücke nicht vergrössert wird, damit der Rückfluss zum Rhein weiterhin dosiert bleibt.
- Bei künftigen Wegganierungen die Hinterdammstrukturen² tiefer als der Rheindamm belassen.

Abbildung 18:
Verbindungskorridor zwischen den Geländekammern Maienfeld und Fläsch



Km 31.8 rechts, Erhöhung Hinterdamm Badguet Fläsch: Der bestehende flache Hinterdamm wird auf 493.0müM erhöht. Dammerhöhung westlich des Bachlaufs um 0-1 m, östlich des Bachlaufs um 1-2 m bis zum Berghang. Sie dient zum Schutz des Intensivlandwirtschaftslands vor Wasserzutritten von Norden her (Auengebiet, künftige Aufweitung Sargans) und gewährleistet die Freihaltung des Rückhalterums Fläsch bis zum EHQ_A. Die Dammböschungen werden wieder flach ausgezogen und rekultiviert. Es sind Anpassungen an einem HV-Mast und an einem Feldweg notwendig. Der Bachlauf sowie ein zweites Entwässerungsrohr sind je mit einem Siel zu versehen. Der Dammfusskanal am Rheindamm muss voraussichtlich nicht abgescbiebert werden.

² Der oberste Hinterdamm bei der Mündung des Mühlbachs eher leicht absenken.

Abbildung 19: Erhöhung Hinterdamm Badguet Fläsch, km 31.8 rechts (Foto NIPO, Jan. 2020).



2.6.2 Hydraulische Auslegung

Rheinaufweitung:

- Linker Damm, Seite Bad Ragaz: Dammhöhe = Maximum aus HQ_{300} + Freibord oder EHQ_A bordvoll.
- Rechter Damm Seite Maienfeld: Dammhöhe = Maximum aus HQ_{300} + Freibord oder EHQ_A + Restfreibord 0.2 m.

Es wird der hydrologische Abfluss EHQ_A bzw. HQ_{300} verwendet, ohne Berücksichtigung einer Hochwasserdämpfung im oben liegenden Sektor 1.

Die Wasserspiegellagen HQ_{300} und EHQ_A wurden im Rahmen des Aufweitungsjekts unter Annahme einer Regimebreite von 150 m berechnet, d.h. ohne Berücksichtigung eines Durchflusses in den zugewachsenen Auenwäldern ausserhalb dieser Regimebreite.

Das Aufweitungsjektsieht keine Kippelemente auf den Überströmstrecken vor. Hingegen sind die Flachdämme so gestaltet, dass die obersten rund 30 cm des Wegkoffers erodiert werden können. Bei den Dammabschnitten <1 m kann eine Erosion des Dammkörpers ohnehin toleriert werden.

Die Massnahmen gewährleisten beidseits des Rheins einen vollen Hochwasserschutz bis zum HQ_{300} . Zusätzlich wird das Rückhaltevolumen bis zum EHQ_A freigehalten. Der rechte Damm wird leicht höher ausgeführt, damit die Autobahn A13 im Katastrophenfall als wichtige Notverbindung für Rettungsfahrzeuge befahrbar bleibt.

Zur Gewährleistung der Überströmbarkeit wird der links abgerückte Damm an seiner flachen Aussenböschung mit einer Rollierung aus Grobkies versehen, sobald seine luftseitige Höhe 1 m übersteigt (vgl. Abbildung 16). In Bereichen mit Dammhöhe kleiner als 1 m wird auf die Rollierung verzichtet und eine geringfügige Breschenbildung im Flachdamm akzeptiert.

Der links optional zusätzlich zu sanierende Damm wird in gleicher Weise ausgeführt und ist in seinem oberen Teilabschnitt (km 23.64–24.90) zusätzlich überströmbar.

Der rechts abgerückte Damm weist durchgehend eine Dammhöhe von maximal 1 m auf, weshalb hier auf eine Rollierung verzichtet werden kann.

Der rechts optional zusätzlich zu sanierende Damm wird in gleicher Weise ausgeführt und ist auf rund 2/3 seiner Länge zusätzlich überströmbar.

Hinterdamm Badguet Fläsch, km 31.8 rechts:

- Dammhöhe = EHQ_A bordvoll.

2.6.3 Grobkostenanteil Systemsicherheit

Bei den abgerückten Dämmen entstehen durch die Berücksichtigung der Systemsicherheit keine Mehrkosten. Der Bau von gleich hohen Dämmen wie im heutigen Zustand würde höhere Kosten verursachen.

Da die optionalen Dammstrecken ohnehin einen Sanierungsbedarf aufweisen, werden nur deren halbe Gesamtkosten für die Systemsicherheit aufgerechnet.

Km 24.17-24.94 rechts, Dammabrückung Maienfelder Teilaufweitung:	CHF 0.--
Km 25.14-26.94 rechts, Dammabrückung Bad Ragazer Teilaufweitung:	CHF 0.—
Km 24.95-27.68 rechts, zusätzliche Dammsanierung Seite Maienfeld; nur Kostenanteil Systemsicherheit:	CHF 2'000'000.--
Km 23.64–24.90 und 26.95–27.68 links, zusätzliche Dammsanierung Seite Bad Ragaz; nur Kostenanteil Systemsicherheit:	CHF 2'100'000.--
Km 28.85 rechts, Offenhaltung einer heute bereits bestehenden Damlücke (langfristige Koordination ohne direkte Kostenfolge):	CHF 0.—
Km 29.5-30.3 rechts, Aufrechterhaltung Verbindungskorridor (langfristige Koordination ohne direkte Kostenfolge):	CHF 0.—
Km 31.8 rechts, Erhöhung Hinterdamm Badguet Fläsch Gesamtkosten 100%:	CHF 600'000.--

2.7 Abschnitt Sargans - Trübbach (Sektor 3)

2.7.1 Massnahmenbeschrieb bei der Aufweitung Sargans

In der Studie Systemsicherheit [1] wurde eine Überströmstrecke im linken Damm oberhalb der Fläscher Brücke km 30.0-30.4 vorgeschlagen, welche bei einem EHQ_B eine dosierte Entlastung in das grosse Sarganser Becken ermöglichen würde. Zu diesem Zweck hätte die Dammkrone inkl. Übergangsstrecken auf einer Länge von ca. 800 m um rund 1.2 m Länge abgesenkt werden müssen. Da sich der dortige Damm in einem relativ guten Zustand befindet, einen starken Querschnitt hat und gemäss geotechnischer Zustandsuntersuchung Dr. von Moos [12] an dieser Stelle keinen unmittelbaren Sanierungsbedarf aufweist, ergäben sich keine Synergieeffekte, und die Massnahme würde lokal möglicherweise sogar eine Mehrgefährdung verursachen. Zudem kämen wahrscheinlich zusätzliche bauliche Herausforderungen im Zusammenhang mit der am Dammfuss verlaufenden Gasleitung hinzu.

Aus diesen Gründen wird neu vorgeschlagen, an dieser Stelle auf eine Überströmstrecke zu verzichten und stattdessen eine solche weiter flussabwärts zusammen mit der Dammabrückung der künftigen Rheinaufweitung Sargans zu realisieren. Als Vorlage dient die mittlere Aufweitungsvariante «Dunkelblau» aus der Machbarkeitsstudie von HZP aus dem Jahre 2019 [10]. Sie erstreckt sich von km 32.4 (Rheinau Gemeinde Vilters-Wangs) bis km 35.2 (oberhalb des Rheinknies).

Km 32.8-35.1 links, Überströmstrecken Rheinaufweitung Sargans: Der Damm wird gemäss der mittleren Aufweitungsvariante «dunkelblau» an den Rand des Auenwalds abgerückt. Effektiv als Überströmstrecken wirken zwei Abschnitte:

- der obere, ca. 1'790 m lange Abschnitt oberhalb der Autobahn
- Der untere, 520 m lange Abschnitt zwischen Autobahn und altem Rheindamm.

Im Zwischenabschnitt liegt die Rheinaufweitung am hoch liegenden Autobahntrasse an, weshalb hier keine Überströmung möglich ist.

Der abgerückte Damm muss nicht mehr auf die Höhe des alten Damms hochgezogen werden vgl. folgendes Kap. 2.7.2. Gemäss Längenprofil der ersten hydraulischen und morphologischen Abschätzungen der Aufweitung (HZP, [10]) und nach Implementierung in das Terrain wird die neue luftseitige Böschung im oberen, langen Abschnitt der Überströmstrecke rund 1.5-2 m

hoch³. Der Damm kann hier durch eine luftseitige Ausflachung in Kombination mit einer Grobkiesrollierung oder einem Geogitter überströmsicher gemacht werden. Im unteren, kurzen Abschnitt beträgt die Dammhöhe rund 4 m, weshalb hier eine Flachböschung nicht mehr möglich ist, und die Überströmsicherung mittels eines geeigneten Erosionsschutzes sichergestellt werden muss.

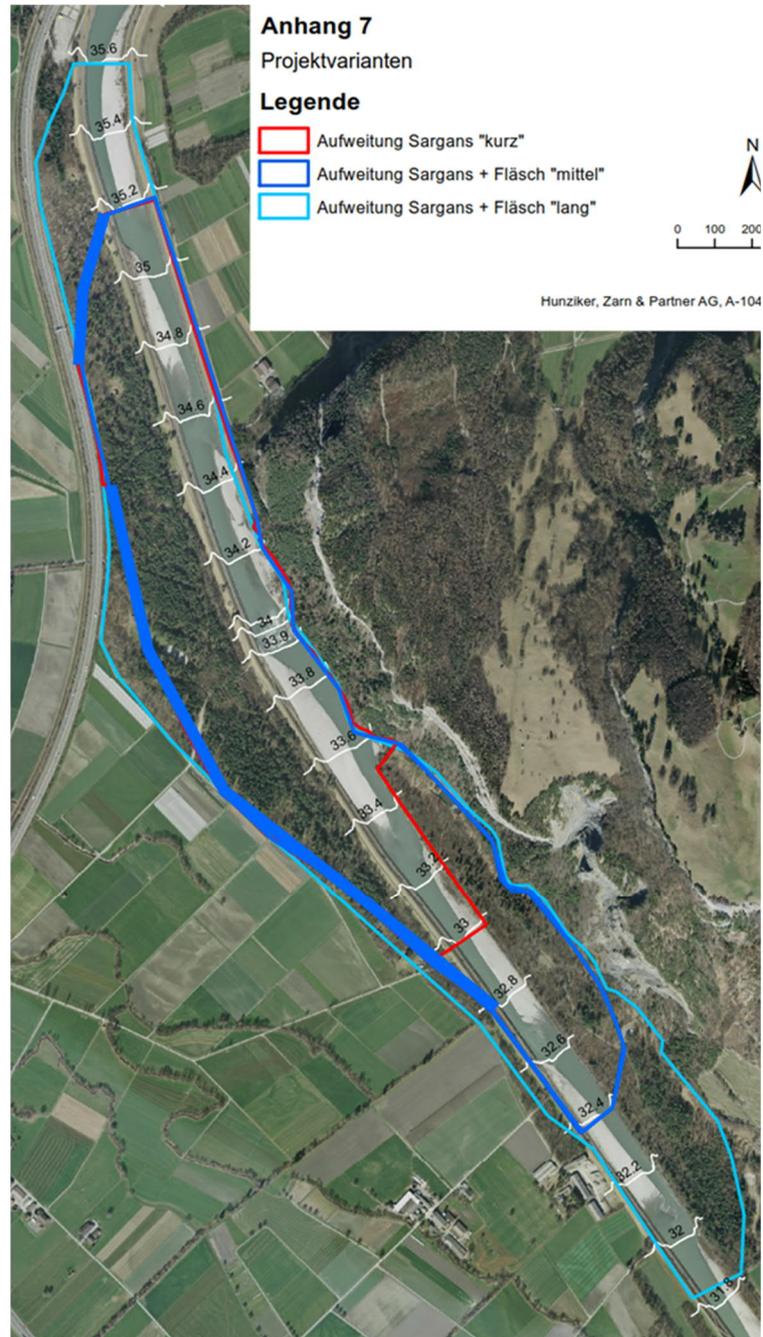


Abbildung 20: Mittlere Variante «dunkelblau» der Rheinaufweitung Sargans gemäss Machbarkeitsstudie HZP aus dem Jahre 2019 [10].
Mit dicker Linie hervorgehoben sind die beiden Abschnitte der Überströmstrecken.

³ Zum Vergleich: luftseitige Höhe des heutigen Damms rund 7 m.

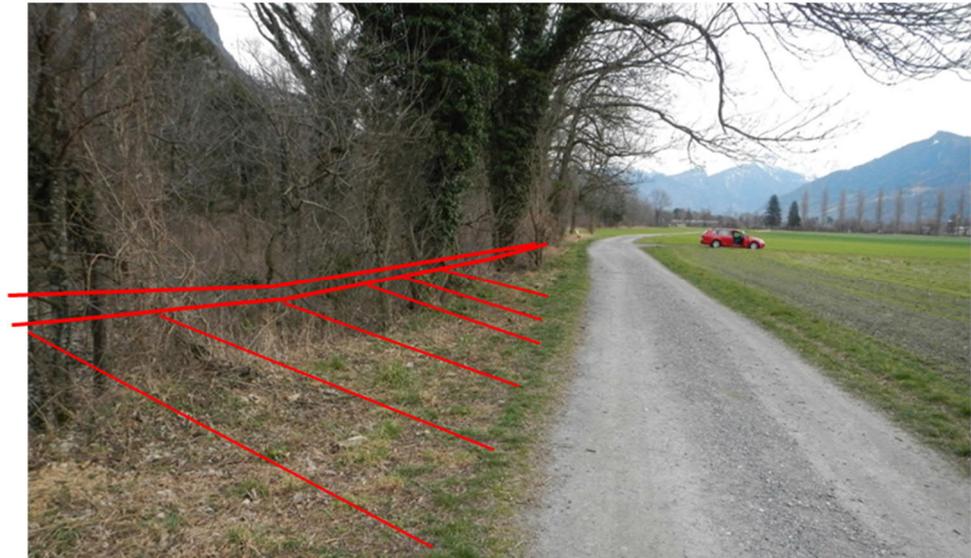


Abbildung 21: Waldrand des Auenwalds mit künftigem Verlauf des rund 1.5-2m hohen Flachdamms der oberen Überströmstrecke (Foto NIPO, Feb. 2020, Blick Richtung Süden).

2.7.2 Hydraulische Auslegung

- Obere und untere Überströmstrecke im linken, abgerückten Damm:
Dammhöhe = E_{HQ_A} unentlastet + Restfreibord 0.2 m.

Es wird der hydrologische Abfluss E_{HQ_A} verwendet, ohne Berücksichtigung einer Hochwasserdämpfung in den oben liegenden Sektoren 1 und 2.

Die Wasserspiegellagen $H_{Q_{300}}$ und E_{HQ_A} werden im 2d-Modell unter Annahme einer Regimebreite von 150 m berechnet, d.h. ohne Berücksichtigung eines Durchflusses in den zugewachsenen Auenwäldern ausserhalb dieser Regimebreite.

Kippelemente sind auf den langen Überströmstrecken nicht zu empfehlen. Allenfalls könnte der Koffer des Damms erodierbar gestaltet werden. Die hydraulischen Berechnungen gehen jedoch vorsichtshalber von einer festen Überströmstrecke aus (Annahme auf sicherer Seite in Bezug auf die Dämpfungswirkung).

Das Restfreibord auf dem unentlasteten E_{HQ_A} dient dazu, das Anspringen⁴ dieser beiden Überströmstrecken so weit wie möglich hinauszuzögern. Aufgrund des sehr grossen Schadenspotentials innerhalb der Geländekammer Sargans soll dieser Wasseraustritt später als bei den übrigen Geländekammern erfolgen. Im Falle eines Sollszenarios mit schmaler Ganglinie und erwarteten Soll-Wasserspiegellagen wird das E_{HQ_B} in den bereits aktiven Sektoren 1 und 2 so stark gedämpft, dass in Sargans noch kaum Wasseraustritte stattfinden. Hingegen sollen die Überströmstrecken bei Sargans dann aktiv werden, wenn ein ungünstiger Ereignisablauf auftritt, z.B.:

- Bei einem E_{HQ_B} mit ungewöhnlich breiter, d.h. voluminöser Ganglinie, bei der die oben liegenden Sektoren nur noch eine kleine Dämpfungswirkung erreichen.
- Bei einem E_{HQ_B} in Kombination mit einer unerwartet hohen Wasserspiegellage innerhalb der Aufweitung.
- Bei einem E_{HQ_B} und ungenügender Dämpfungswirkung in den oben liegenden Überströmstrecken.

In der Geländekammer von Sargans wird durch die Überströmstrecken ein Rückhaltevolumen von bis zu 30 Mio. m³ erschlossen. Die Abbildung 54 und die Kärtchen mit der Überflutungsausdehnung im Anhang 14 lassen erwarten, dass mit der gewählten hydraulischen Auslegung das Siedlungsgebiet von Sargans und Umgebung erst im äussersten Extremfall dosiert überflutet wird.

⁴ Das Restfreibord 20 cm kann ein lokales Überschwappen nicht verhindern. Die dabei austretenden geringen Wassermengen führen aber nicht sofort zu einer Überflutung des entfernt liegenden Siedlungsgebiets.

2.7.3 Prüfung der weiteren Massnahmenelemente bei Trübbach

Die Studie Systemsicherheit [1] sah zusätzliche Massnahmen bei Trübbach im Rückflussbereich aus der Geländekammer zurück in den Rhein vor. Diese wurden im Rahmen der vorliegenden Vertiefung vor Ort und mit dem hydraulischen Modell überprüft. Gemäss aktuellem Kenntnisstand sind sie nicht mehr erforderlich, und zwar aus folgenden Gründen:

Im Projektzustand findet beim Rheinknie kein Rückfluss mehr über den Rheindamm statt. Der Maximaleinstau bleibt bei allen Szenarien unterhalb der Dammkrone.

Ein aktiver Verschluss der militärischen Wehrklappe, welche im Vilterser-Wangser-Kanal im Doppeldurchlass bei der Unterquerung des Trübbachs installiert ist, ist für eine ausreichende Dämpfungswirkung nicht zwingend nötig und wäre im Ereignisfall kaum durchsetzbar, da er einen direkten Mehreinstau der ausgedehnten Siedlungsgebiete bei Sargans verursachen würde.

Unmittelbar nach der Unterquerung des Trübbachs kommt es zu einer Überströmung des linken Kanalufer in das Siedlungsgebiet von Trübbach hinein. Dieses Kanalufer ist bereits im heutigen Zustand überströmsicher und gewährleistet ein dosiertes, kontrolliertes Ausfliessen. Es kann im Sinne einer robusten Bewältigung des Überlastfalls toleriert werden und trägt zu einer Dämpfung des Rheinhochwassers bei.

Die sich als Folge dieser Ausuferung bildende Überflutung in Richtung Azmoos, Grabs und Buchs konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht mehr untersucht werden, da sie den Perimeter des aktuellen 2d-Modells verlässt.

2.7.4 Grobkostenanteil Systemsicherheit

Bei der oberen Überströmstrecke sind durch die Berücksichtigung der Systemsicherheit kaum Mehrkosten zu erwarten. Der Bau eines gleich hohen, nicht überströmsicheren Damms wie im heutigen Zustand würde eher höhere Kosten verursachen als ein niedriger, dafür überströmbarer Flachdamm.

Bei der unteren Überströmstrecke werden lediglich die Mehrkosten für eine massive Erosionssicherung der Dammaussenseite und der Dammkrone aufgerechnet (Kosten für einen überdeckten Steinsatz oder eine überdeckte Sickerbeton-Einlage; ohne die ohnehin notwendige Dammschüttung).

Km 32.8-34.5 links, obere Überströmstrecke: CHF 0.--

Km 34.8-35.1 links, untere Überströmstrecke,
Mehrkosten für die Erstellung der Erosionssicherung: CHF 1'200'000.--

2.8 Geländekammer Sennwald (Sektor 4)

2.8.1 Heutige Hochwassersituation

Die Geländekammer von Salez – Sennwald wird von einem relativ grossen Binnengewässer, dem Werdenberger Binnenkanal (WBK), durchflossen. Der Abflussbeitrag des WBK am EQ_B des Rheins (EQ_{B_Rhein}) entspricht mit 130 m³/s etwa einer 300-jährlichen Hochwasserspitze im WBK selber (HQ_{300_WBK}).

Bei einem extremen Ereignis im Rhein wird die Ebene im heutigen Zustand von zwei Seiten her überflutet:

- Von Norden her durch Rückstau des WBK am Rhein bzw. durch Rückfluss des Rheinwassers via Kanalmündung.
- Von Süden (Salez) her durch die Ausuferungen des Hochwassers im WBK selber.

Während die Extremereignisse des Rheins aufgrund ihrer hohen Jährlichkeit kaum Schutzdefizite in der Ebene verursachen, sind am WBK selber Defizite im Hochwasserschutz zu verorten, welche durch unsere eigenen Berechnungen bestätigt werden: bei einem HQ_{300_WBK} sind auf der ganzen Länge des Kanals Wasseraustritte zu beobachten (d.h. bordvolle Abflusskapazität überschritten). Ein HQ_{100_WBK} wurde zwar im Rahmen der vorliegenden Studie nicht berechnet,

aber es ist damit zu rechnen, dass es auch dann zu örtlichen Wasseraustritten kommen kann, oder dass zumindest das erforderliche Freibord unterschritten wird.

Die Wasseraustritte am WBK selber tangieren das Industriegebiet von Hofwald-Heberriet-Neufeld, die SBB-Linie und die ARA Sennwald. Besonders hohe Überflutungswasserspiegel können zusätzlich zu Überflutungen der Autobahn bei der Überführung Langgass (ca. Rhein-km 60.4) führen.

Auch der hier noch kleine Rheintaler Binnenkanal (RBK) fliesst westlich der Bahnlinie durch die Geländekammer. Es darf jedoch angenommen werden, dass sein eigenes Binnenhochwasser das Rückhaltevolumen der Ebene kaum zusätzlich in Anspruch nimmt, da etwa dieselbe Abflussmenge beim Durchstich Büchel via Rillisschleuse in Richtung Norden weitergeleitet wird und den Rückhalteraum wieder verlässt.

2.8.2 Beschrieb der vorgesehenen Massnahmen

Das für die Sennwalder Geländekammer vorgeschlagene Massnahmenkonzept verfolgt drei Ziele:

- Verbesserung des Hochwasserschutzes am Werdenberger Binnenkanal
- Optimierung der Dämpfungswirkung bei Extremereignissen im Rhein, indem das Rückhaltevolumen effizienter ausgenützt wird.
- Verhinderung eines Weiterfliessens der Überflutung nach Norden in die Ebene von Rüthi-Oberriet-Widnau beim Durchstich durch den Büchel.

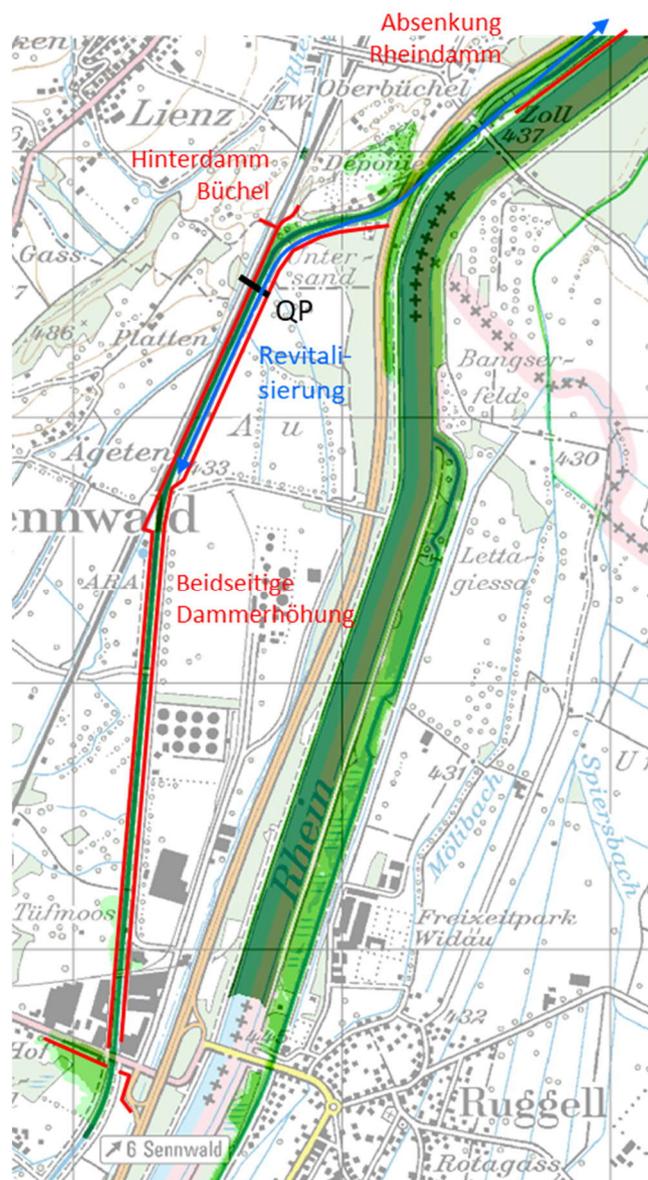


Abbildung 22: Übersicht über die Massnahmen in der Geländekammer Sennwald



Abbildung 23: WBK im Bereich der Industriezone Hofwald; kleine beidseitige Ufererhöhungen und Dammbalkenverschlüsse bei der Gleisbrücke im Hintergrund (Foto NIPO, Feb. 2020, Blickrichtung kanalabwärts).



Abbildung 24: Zufahrtsstrasse zur ARA: Strassenverlegung nach links hinter die Hochspannungsmasten und Dammschüttung im Bereich der ehemaligen Strasse

Dammerhöhung und Renaturierung Werdenberger Binnenkanal: Damit einerseits die Abflusskapazität des Kanalgerinnes bis zu einem bordvollen HQ_{300_WBK} gewährleistet ist und andererseits der Rückhalteraum bis zu einem EHQ_{A_Rhein} leergehalten werden kann, werden die niederen Dämme beidseits des Kanals erhöht, damit Wasseraustritte aus dem Kanal in die Ebene erst ab einem EHQ_{A_Rhein} -Szenario erfolgen.

Die Damm- bzw. Ufererhöhung erfolgt auf der ganzen Länge nördlich der Kantonsstrassenbrücke (auf Höhe des Autobahnanschlusses Sennwald) und umfasst folgende Massnahmen:

- Beim Autobahnanschluss Sennwald ist beidseits der Kanalbrücke mit einem niederen, ca. 50 cm hohen Damm entlang der Kantonsstrasse sicherzustellen, dass die von Süden herkommenden Überflutungen in den Kanal zurückgelangen und nicht über die Kantonsstrasse in die Industrie fließen.

- Im Bereich der Industriezone Hofwald werden beide Kanalufer geringfügig um 30-50 cm erhöht. Dies kann aus Platzgründen z.B. in Form eines schmalen Stellriemens entlang der beidseitigen Erschliessungsstrassen erfolgen. Die Querung der Industriegeleise erfordert beidseitig einen mobilen Dammbalkenverschluss.
- Im Bereich Tüfmoos/Heberriet beträgt die beidseitige⁵ Dammerhöhung rund 70-100 cm. Rechtsufrig steht dafür ein breiter Grünstreifen zwischen Heberrietstrasse und Kanal zur Verfügung. Linksufrig wird vorgeschlagen, den chaussierten Feldweg anzuheben und in die Dammerhöhung zu integrieren.
- Im Abschnitt vom Tanklager bis zur ARA ist bereits heute ein niedriger Damm vorhanden, der um rund 1-1.2 m erhöht werden muss. Um Raum zu schaffen, kann die rechtsufrige Belagsstrasse nach rechts in den schmalen Wiesenstreifen zwischen Hochspannungsleitung und Baumhecke gelegt werden. Linksufrig wird die Strasse zwischen Trafostation und ARA ebenfalls auf die andere Seite der dortigen Hochspannungsleitung verlegt, was dort aber Intensivlandwirtschaftsland benötigt.
- Unterhalb der ARA beträgt die Dammerhöhung 1-1.5m, bezogen auf die heutige Dammhöhe bzw. das Bankett des SBB-Damms, und verläuft linksufrig bis zum Geländeanschluss beim Büchel und rechtsufrig bis zum Geländeanschluss an den Autobahndamm. Linksufrig ist nur wenig Raum für einen Damm zwischen Bahntrasse und Kanalböschung vorhanden. Damit eine Dammerhöhung möglich wird, muss das Kanalbett nach rechts verschoben werden. Diese Verschiebung kann mit einer Revitalisierung kombiniert werden, welche für diesen Abschnitt ohnehin geplant ist. Mit einer Verschiebung des Feldwegs bis zu den Hochspannungsmasten und der Anhebung des Wegs auf die Dammkrone kann insgesamt etwa 10 m zusätzliche Breite gewonnen werden.
- Die Erhöhung der linksufrigen Dammkote erfordert auch bauliche Anpassungen an der Schluchenschleuse, welche noch im Detail zu projektieren sein werden.

Die Binnenentwässerung der durch die Dämme eingefassten Ebene östlich des WBK erfolgt weiterhin über den Undersandgraben, welcher auf der Höhe der Schluchenschleuse gefasst und in einer Rohrleitung parallel zum RBK bis zum Kraftwerk Lienz geführt wird. Dazu sind keine weiteren Massnahmen notwendig.



Abbildung 25: WBK unterhalb der Schluchenschleuse im Abschnitt mit Verschiebung des Kanals nach rechts sowie Revitalisierung (Foto NIPO, Feb. 2020, Blickrichtung kanalabwärts).

⁵ Obwohl linksufrig nur Landwirtschafts- und Rietflächen unmittelbar anschliessen, ist die Dammerhöhung auch rechtsufrig vorzunehmen; zum Schutz der SBB, der ARA und zur Freihaltung des Rückhaltevolumens der Ebene.

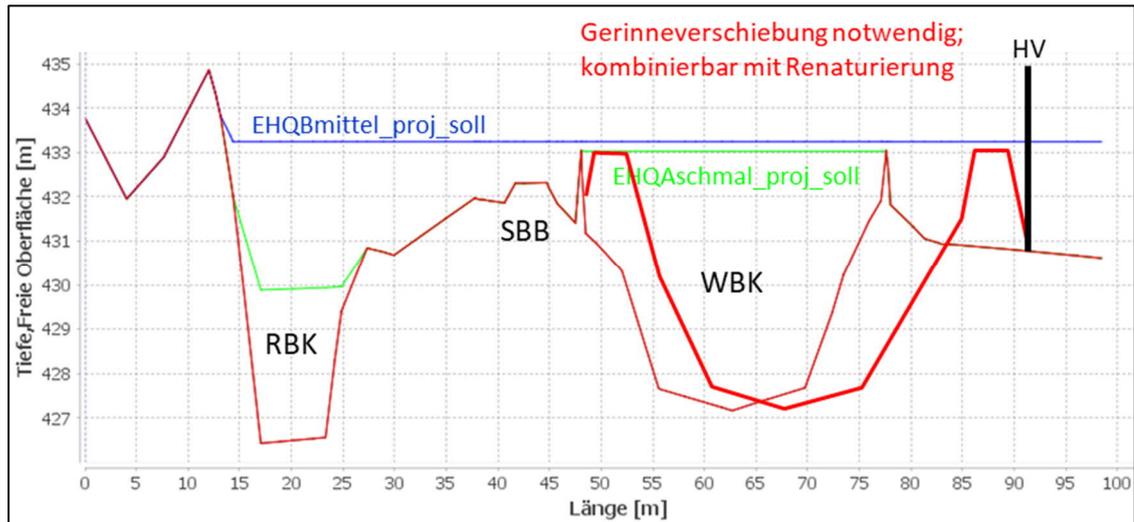


Abbildung 26: Querschnitt unterhalb der Schluchenschleuse (etwa beim Standort Abbildung 25), überhöht. Die Dammerhöhungen sind als schematische schmale Mauern eingetragen. Für den Bau von Erddämmen muss das Gerinne nach rechts verschoben werden, was mit der ohnehin geplanten Renaturierung kombiniert werden kann.

Km 62.1-62.75, Absenkung des Rheindamms zwischen Zollhaus und Kanalmündung: Der rund 650 m lange Trenndamm zwischen Rhein und WBK unterhalb des Zollhauses bis zur Kanalmündung wird dank der Eintiefung des Rheins für den Hochwasserschutz nicht mehr benötigt und kann abgesenkt werden. Dadurch entsteht bei $>EHQ_A$ schon weiter flussaufwärts ein korrespondierender Wasserspiegel und somit bei EHQ_B ein um 70 cm höherer Einstau im Rückhalteraum.

Die durch die Dammabsenkung freiwerdende Aufstandsfläche kann für eine Renaturierung der Kanalmündung verwendet werden.

Die am luftseitigen Dammfuss verlaufende Gasleitung muss für die Dammabsenkung voraussichtlich nicht verlegt werden. Eine solche wäre aber wahrscheinlich für weitergehende Renaturierungs- und Aufweitungsmassnahmen erforderlich.



Abbildung 27: Mündungsabschnitt des WBK. Rechts der abzusenkende Rheindamm. An seinem Fuss verläuft eine Swisssgasleitung. Vergleiche auch das Foto auf der Titelseite des Berichts. (Fotos NIPO, Feb. 2020, Blickrichtung kanalabwärts).

Verstärkung des Hinterdamms Büchel: Beim Maximaleinsttau EHO_{B_Rhein} steigt der Wasserspiegel in der Geländekammer über das Niveau der bestehenden Hinterdammstruktur, welche bereits heute quer zum Rheintaler Binnenkanal und der Bahnlinie verläuft («Rillisdamm», mit Schleuse im RBK und Dammbalken in SBB-Gleisen). Damit ein Ausbruch in die grosse Ebene nördlich davon verhindert wird, ist dieser Hinterdamm um rund 0.8-1.3 m zu erhöhen, mitsamt entsprechenden Anpassungen an der Rillisdammschleuse im RBK, des Dammbalkens im SBB-Trasse sowie eines in den Damm eingebetteten Pumpwerkes.



Abbildung 28: Hinterdamm Büchel, Blick Richtung Westen. Im Hintergrund Bahnlinie und Rillisdammschleuse (Foto NIPO, Feb. 2020).



Abbildung 29: Dammbalken in der Bahnlinie (Foto NIPO, Feb. 2020, Blick Richtung Norden).



Abbildung 30: Rillisdammschleuse im Rheintaler Binnenkanal. Tafelschützen an der Oberstromseite, geöffnet (Foto NIPO, Feb. 2020).

2.8.3 Hydraulische Auslegung

- Dämme beidseits des Werdenberger Binnenkanals: Erhöhung bis zur bordvollen Wasserspiegelkote aus der Staukurve des Szenarios EHQ_A :
 - Einstau durch den Rhein mit maximalem Wasserspiegel EHQ_{A_Rhein} von 433.0 müM im Mündungsbereich des WBK
 - Gleichzeitig Abfluss im Werdenberger Binnenkanal von $133 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx HQ_{300_WBK}$)
- Absenkung des Rheindamms zwischen Zollhaus und Kanalmündung: um rund 2.7 m auf 432.9 (WSP EHQ_A bei km 62.5). Vgl. auch Längenprofil Abbildung 37.
- Verstärkung des Hinterdamms Büchel: Erhöhung auf 434.5 müM. Entspricht Maximal-einstau der Geländekammer beim kritischsten Szenario $EHQB_{\text{mittel_proj_hoch4}}$: 434.0 müM zuzüglich 0.5 m Freibord.

Im Rhein wird der hydrologische Abfluss EHQ_{A_Rhein} verwendet, ohne Berücksichtigung einer Hochwasserdämpfung in den oben liegenden Sektoren.

Die Massnahmen erschliessen je nach Szenario bzw. Einstauhöhe ein Volumen von bis zu 8.5 Mio. m^3 , das bei einem EHQ_B für den Hochwasserrückhalt nutzbar wird. Für die Dämpfung des Rheinhochwassers spielt es keine Rolle, ob während eines EHQ_{B_Rhein} der Rückhalteraum durch Rheinwasser geflutet wird, oder ob das Wasser aus dem zurückgestauten WBK in den Rückhalteraum fliesst und dort zurückgehalten wird.

Die Absenkung des linken Rheindamms unterhalb des Zollhauses wirkt sich bis zu einem HQ_{300_Rhein} nicht auf die Geländekammer von Sennwald aus. Bei einem EHQ_{B_Rhein} entsteht bereits nach dem Zollhaus ein korrespondierender Wasserspiegel und damit ein um rund 70 cm höherer Einstau der Geländekammer. Der Höhereinstau ermöglicht ein zusätzliches Rückhaltvolumen von rund 2 Mio. m^3 .

Falls bei EHQ_{B_Rhein} ein dosierter Wasseraustritt beim Hinterdamm Büchel nach Norden in die anschliessenden Geländekammern von Rüthi sowie Oberriet – Widnau tolerierbar wäre, könnte auf die Verstärkung des Hinterdamms Büchel verzichtet werden. Die entsprechenden Auswirkungen auf die nordwärts liegenden Siedlungsgebiete, mit denen bei einem solchen Austritt zu rechnen wären, konnten im Rahmen der vorliegenden Vertiefung nicht abgeklärt werden.

2.8.4 Grosstanklager

Innerhalb der Geländekammer Sennwald befinden sich zwei Grosstanklager für Mineralöle: Tanklager Sennwald AG an der Heberrietstrasse und Tanklager der Eni Suisse S.A. an der Simon Frick Strasse.

Im heutigen Istzustand wird die Ebene rund um die beiden Tanklager spätestens ab einem HQ_{300_WBK} im Binnenkanal oder einem EHQ_{A_Rhein} im Rhein überflutet.

Im Projektzustand wird die Überflutung bis mindestens zum EHQ_{A_Rhein} hinausgezögert, findet dann aber bei einem EHQ_{B_Rhein} unvermindert statt. Der Maximaleinstau beim kritischsten Szenario $EHQB_{\text{mittel_proj_hoch4}}$ beträgt max. 434.0 müM und liegt somit rund 1.5 m über den Sockeln der Tanks.

Alle Tanks sind durch Wannen mit rundum laufenden hohen Mauern geschützt, welche dazu dienen, auslaufendes Mineralöl aufzufangen. Bei einer Überflutung des umliegenden Terrains werden diese Wannen von der Aussenseite her hydrostatisch belastet, wodurch ein Auftrieb entsteht, solange die Wannen nicht durch eindringendes Wasser geflutet werden.

Abbildung 31: Eni S.A., unten links Tanklager Sennwald AG (Foto NIPO, Mai 2017, Blick Richtung Süden)





Abbildung 32: Grosstanklager in der Geländekammer Sennwald: oben rechts Eni Suisse S.A., unten links Tanklager Sennwald AG

Ob und in welchem Mass dieser Lastfall zu einem Risiko werden kann, konnte in der vorliegenden Studie nicht geprüft werden. Im Rahmen weiterer Schritte muss die potentielle Umweltgefährdung im Zusammenhang mit einer Überflutung rund um die beiden Tanklager abgeklärt werden.

2.8.5 Grobkostenanteil Systemsicherheit

Das vorgeschlagene Massnahmenkonzept ist eine Kombination von lokalem Hochwasserschutz, Systemsicherheit und ökologischer Aufwertung. Derjenige Kostenanteil, welcher der Systemsicherheit anzurechnen ist, ist entsprechend schwierig zu bestimmen. In unten stehender Zusammenstellung werden die Grobkosten für die Absenkung des Rheindamms sowie der Verstärkung des Hinterdamms Büchel zu 100% aufgerechnet. Die Kosten für die Dämme und die Kanalverschiebung werden jedoch nur zur Hälfte der Systemsicherheit angerechnet, da diese Massnahmen auch dem lokalen Hochwasserschutz sowie der Renaturierung dienen.

Dammerhöhung und Renaturierung Werdenberger Binnenkanal:
Anteil Systemsicherheit etwa 1/2 der Gesamtkosten: CHF 7'000'000.--

Km 62.1-62.75, Absenkung des Rheindamms;
Gesamtkosten ohne weitergehende Renaturierung/Aufweitung: CHF 2'300'000.--

Verstärkung des Hinterdamms Büchel; Gesamtkosten: CHF 800'000.--

Die Dammerhöhungen und die Revitalisierung am Werdenberger Binnenkanal benötigen rund 10'400 m² Ackerland (1.04 ha).

2.9 Geländekammer Ruggell – Bangs – Spiersbach (Sektor 4)

(alle Höhenangaben beziehen sich auf den Schweizer Höhenhorizont).

2.9.1 Heutige Hochwassersituation

Die grosse Geländekammer zwischen dem rechtsufrigen Rheindamm und dem linken Damm der Ill kann von drei Seiten her überflutet werden:

- Überflutung der tiefen Geländebereiche beim Illspitz und der Partenwiesen durch das Hochwasser des Binnengewässers Spiersbach, das aber ein wesentlich kleineres Einzugsgebiet als jenes des Werdenberger Binnenkanals aufweist.

- Seitliche Entlastung der Ill über den linken Illdamm, welcher oberhalb des Kraftwerkeinstaus tiefer als der rechte Illdamm ist.
- Unmittelbar oberhalb des Kraftwerks Illspitz ist der rechte Rheindamm auf einer Länge von rund 150 m unterbrochen. Innerhalb dieser Lücke bildet das Bachbett des Spiersbachs eine rund 20 m breite, noch tiefere Kerbe. Bei grossen Rheinhochwassern erfolgt in dieser Lücke nicht nur ein Rückstau des Spiersbachs, sondern auch ein massiver Ausfluss von Rheinwasser, welches die grosse Geländekammer parallel zum ansteigenden Hochwasserspiegel fluten kann, wobei sich ein korrespondierender Wasserspiegel zwischen dem Überflutungssee und dem Rhein einstellt.

Während die Überflutung für die tief liegenden Auenwälder und Rietwiesen im Illspitz kaum ein Problem darstellt, besteht für das Siedlungsgebiet von Bangs ein Schutzdefizit, denn das Dorf wird bei einem 100-jährlichen Rheinhochwasser überflutet. Bei einem 300-jährlichen Rheinhochwasser wird auch Ruggell am Nordrand tangiert.



Abbildung 33: Spiersbachmündung, Blick vom Illkraftwerk in Richtung Rhein. Das Absperrbauwerk kommt unmittelbar oberhalb der Bachbrücke zu liegen (Foto NIPO, Feb. 2020)

2.9.2 Massnahmenbeschrieb

Die für die Geländekammer Bangs-Ruggell vorgesehenen Massnahmen dienen sowohl der Systemsicherheit wie auch dem lokalen Hochwasserschutz von Bangs und Ruggell. Beide Dörfer werden neu bis zu einem EHQ_A geschützt. Gleichzeitig wird dieser letzte grosse Rückhalteraum vor der Internationalen Rheinstrecke möglichst leer gehalten, damit er bei noch grösseren Ereignissen bis zum EHQ_B eine maximale Dämpfungswirkung entfalten kann.

Km 64.8 rechts, Absperrorgan in der Mündung des Spiersbachs: Unmittelbar oberhalb der Bachbrücke wird in Verlängerung der Dammachse ein Absperrbauwerk in Form einer 15 m breiten unterströmten Segmentschütze eingebaut. Diese Schütze schliesst oben dicht an eine feste Ortbeton-Mauerblende an, welche bis zu einer Höhe von 431.34 müM (CH-Horizont) hochgezogen wird (Höhe der Überlaufkante der Überströmstrecke, vgl. unten und Längenprofil Abbildung 36).

Die Segmentschütze des Absperrorgans wird wie folgt betrieben:

- Im Normalfall und bei kleinen Hochwassern bleibt die Segmentschütze geöffnet.
- Bei etwas grösseren Hochwassern, sobald der Rhein in den Spiersbach zurückzustauen beginnt, wird die Schütze geschlossen, um ein Eindringen von Rheinwasser zu verhindern.
- Während des Wehrverschlusses wird das Binnenhochwasser des Spiersbachs im tief liegenden Auenwald gestapelt. Sein Volumen ist viel kleiner, als wenn es noch zusätzlich durch Rheinwasser verstärkt würde. Bangs bleibt vor einer Überflutung geschützt.

- Während des ganzen Hochwasserverlaufs bleibt die Schütze so lange geschlossen, bis der Wasserspiegel im Rhein wieder unterhalb desjenigen der rückwärtigen Überflutung fällt.
- Erst danach wird die Schütze wieder geöffnet, um das in der rückwärtigen Überflutung gestapelte Wasser wieder in den Rhein abfließen zu lassen.



Abbildung 34: Situationsskizze mit einer möglichen Implementierung des Absperrorgans bei der Spiersbachmündung und seiner seitlichen Einbindung in die Rhein-Überströmstrecke sowie in den Illdamm beim Kraftwerk Illspitz.

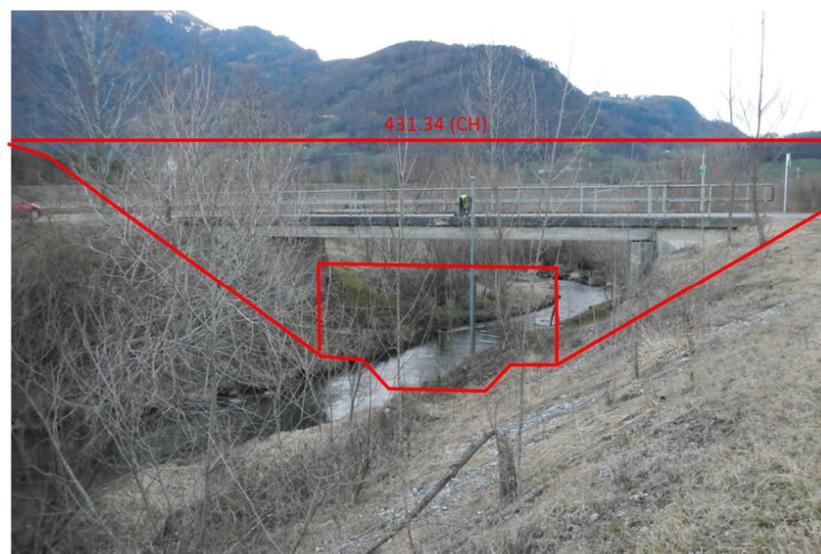


Abbildung 35: Prinzipskizze des Absperrorgans im Spiersbach. Unten: Öffnung der Segment-schütze, oben feste Mauerblende bis zur Höhe der Überlaufkante (Foto NIPO, Feb. 2020).

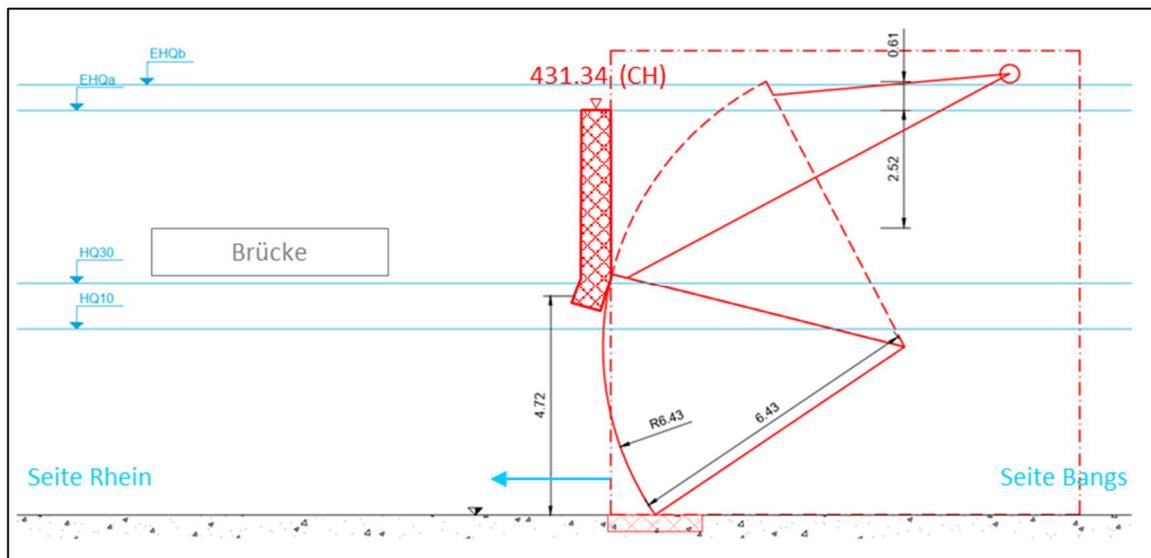


Abbildung 36: Prinzipschnitt der Segmentschütze und der festen Mauerblende bis zur Höhe der Überlaufkante.

Bei extremem Hochwasser im Rhein, oder bei sehr grossem Hochwasser in der III, springen die Überströmstrecken am rechten Rheindamm bzw. am linken IIndamm an, und der Rückhalteraum wird allmählich gefüllt. Auch in diesem Fall bleibt die Schütze geschlossen, und kann erst dann wieder geöffnet werden, sobald der Rhein bzw. die III nicht mehr überströmen, und der Rhein-Wasserspiegel unter den Wasserspiegel im Rückhalteraum sinkt.

Damit die ökologische Längsvernetzung sowohl aquatisch wie auch terrestrisch weiterhin gewährleistet ist, weist die in die Bachsohle eingelegte Schwelle der Segmentschütze keinen Absturz in Längsrichtung auf, und ist in Querrichtung mit einer mittigen Niederwasserrinne und zwei seitlichen Uferbermen gegliedert, sodass sowohl Fische wie auch Landtiere die geöffnete Schütze unterqueren können. Damit die Schütze im geschlossenen Zustand genügend abdichtet, muss deren Unterkante bzw. Dichtungslippe an diese Sohlengeometrie angepasst sein.

Km 63.2-64.8 rechts, Überströmstrecke Partenwiesen: Um bei einem EHQ_B eine Entlastung aus dem Rhein in den Rückhalteraum Bangs-Ruggell zu ermöglichen, wird der rechtsufrige Rheindamm auf einer Länge von rund 1'600 m um bis zu 2 m abgesenkt und auf einer Länge von rund 1'400 m überströmbar gemacht. Die Absenkung erfolgt durch Kappung der Dammkrone ohne Anpassung der Dammböschungen, wodurch die Dammkrone breiter wird und mehr Platz für die Überlaufkante bietet.

Ausgehend vom Absperrbauwerk km 64.8 verläuft die feste, überströmsichere Überlaufkante horizontal auf Höhe 431.34 müM (CH) bis nach km 64.0. Die Höhe dieser Dammkrone bestimmt den maximal möglichen Einstau im Rückhalteraum. Je nach Wasserspiegellage im Rhein und im Rückhalteraum findet bei einem EHQ_B entweder ein Ausfluss aus dem Rhein oder, bei Vollfüllung des Rückhalterausms sowie tieferem Wasserspiegel im Rhein, ein Rückfluss in den Rhein statt.

Die eigentliche Ausflusstrecke schliesst flussaufwärts an und verläuft bis km 63.4. Die Dammkrone bildet hier ein breitkroniges Wehr mit einer 30 cm hohen, erodierbaren Krone, deren Höhe dem Wasserspiegelverlauf des (unentlasteten) EHQ_A entspricht. Da der Dammweg voraussichtlich wieder als Belagsweg angelegt wird, ist ein erodierbarer Wegkoffer nicht möglich, weshalb rheinseitig des Wegs eine schmale erodierbare Dammkrone angeordnet wird. Dank der Absenkung des Damms und der dadurch breiteren Dammkrone steht dafür genügend Platz zur Verfügung.

Von km 63.4 bis km 63.2 findet eine Angleichung an die bestehende Dammkrone statt.

Für die Überströmsicherung des Damms werden die folgenden Massnahmen vorgeschlagen (vgl. Ausführungen im folgenden Kap 2.9.3 zur Überströmung):

- Im untersten Abschnitt km 64.8-64.5 genügt auf der Dammaussenböschung eine leichte Überschwappssicherung. Auf der Dammkrone und der oberen Damminnenböschung ist ein schwerer Erosionsschutz z.B. aus Steinsatz notwendig.
- Im mittleren Abschnitt km 64.5-64.0 ist auf der ganzen Dammaussenböschung, auf der Dammkrone und auf der oberen Damminnenböschung ein schwerer Erosionsschutz notwendig.
- Im oberen Abschnitt km 64.0-63.4, der eigentlichen Entlastung, ist auf der ganzen Dammaussenböschung und auf der Dammkrone ein schwerer Erosionsschutz notwendig. Die Damminnenböschung benötigt jedoch kein Erosionsschutz.
- Im Übergangsbereich km 63.4-63.2 ist kein Erosionsschutz notwendig, sobald auf dem WSP EHQ_B ein genügendes Freibord vorhanden ist.

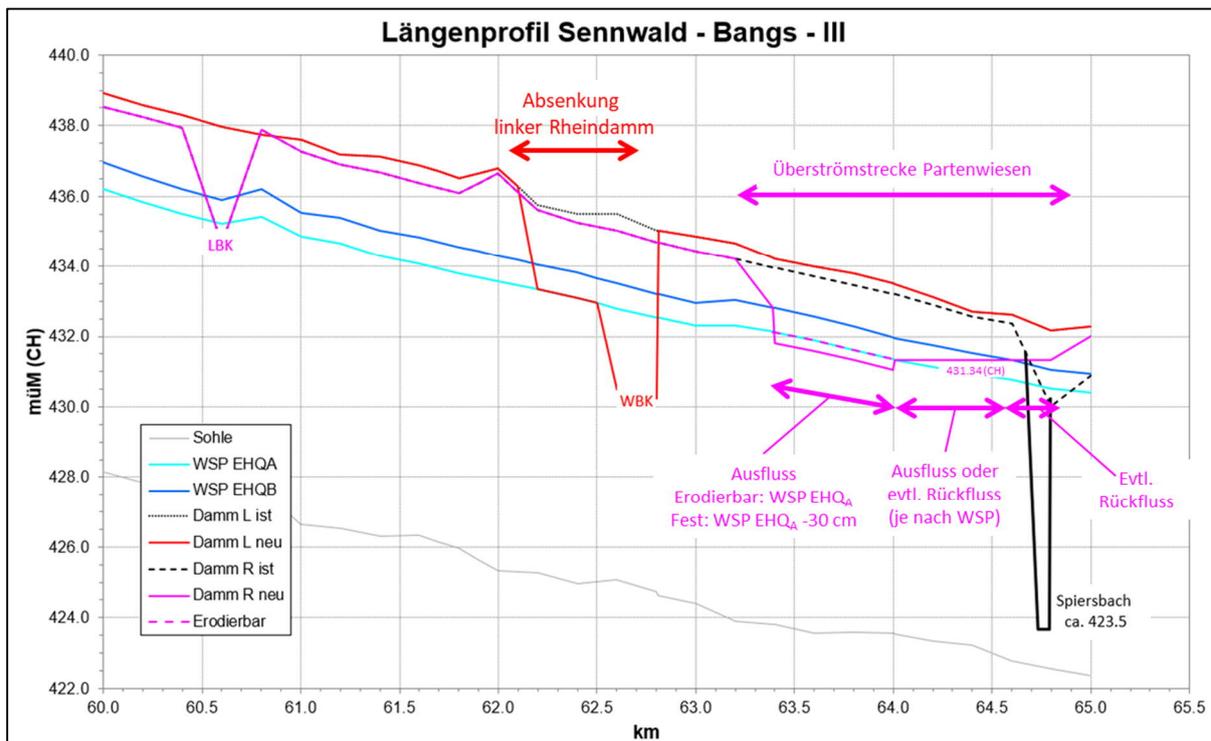


Abbildung 37: Längsenprofil des Sektors 4 mit Absenkung des linken Damms oberhalb der Mündung des Werdenberger Binnenkanals, sowie mit der rechtsufrigen Überströmstrecke Partenwiesen.

2.9.3 Hydraulische Auslegung

Die Geländekammer ist der letzte grosse Rückhalteraum vor dem Eintritt in die Internationale Rheinstrecke. Damit die Dämpfungsziele bestmöglich und für möglichst unterschiedliche Szenarien am Oberlauf erreicht werden, muss die Höhe und Länge der Überlaufkante der Überströmstrecke Partenwiesen optimal austariert sein, damit:

- Die Entlastung nicht zu früh anspringt;
- Der Entlastungsraum vollständig ausgenutzt werden kann, d.h. dass nicht zu früh ein Rückfluss aus dem Entlastungsraum zurück in den Rhein erfolgt;
- Dass unabhängig von der von oben einflussenden Abflussmenge möglichst zuverlässig eine Kalibrierung auf EHQ_A möglich wird.

Die im Längsenprofil Abbildung 37 dargestellte Lösung ist das optimierte Resultat, das in den hydraulischen 2d-Rechnungen das beste Verhalten ergab. In den Sensitivitätsrechnungen zeigte sich, dass bei den Soll-Szenarien mit schmaler Ganglinie das Dämpfungsziel erreicht oder sogar unterschritten wird, obwohl der Rückhalteraum Bangs-Ruggell noch nicht vollständig gefüllt ist und noch eine Volumenreserve aufweist. Diese Reserve kann bei einem ungünstigen Szenarienverlauf in den Sektoren 1-3 oder für breitere Ganglinien in Anspruch

genommen werden. Bei einer nicht optimierten Überlaufkante würde der Rückhalteraum in solchen ungünstigen Fällen nicht optimal wirken: Bei einer zu hohen Überlaufkante würde eine zu kleine Entlastung resultieren, und bei einer zu tiefen Überlaufkante wäre die Volumenreserve schon frühzeitig aufgefüllt, und es käme zu früh zu einem Rückfluss in den Rhein.

Der maximal mögliche Einstau, und damit das maximal mögliche Rückhaltevolumen, ergibt sich aus der Höhe der Überlaufkante beim Rückfluss (431.34 müM CH) zuzüglich die hydraulische Überfallhöhe des Rückflusses. Beim Szenario mit maximaler Beaufschlagung (EHQBmittel_proj_hoch4) wird eine maximale Einstauhöhe von 432.4 müM (CH) erreicht, was einem Rückhaltevolumen von 20.6 Mio. m³ entspricht. Damit konnten Einstauhöhe bzw. Rückhaltevolumen dank der Optimierung gegenüber den Annahmen aus der Studie Systemsicherheit [1] nochmals deutlich gesteigert werden⁶.

Die Überströmstrecke soll einerseits erst bei EHQ_A anspringen, und andererseits eine bestmögliche Kalibrierung auf EHQ_A bewirken. Diese Forderung ist nur mit einer absenkbarer Wehrkante erreichbar. Statt aufwändiger und wartungsintensiver Kippelemente wird eine erodierbare Dammkrone vorgeschlagen, z.B. in Form eines leicht abschwemmbar Wegkoffers oder eines kleinen, erodierbaren Dammaufsatzes. Gemäss den hydraulischen Berechnungen genügt eine erodierbare Höhe von 30 cm.

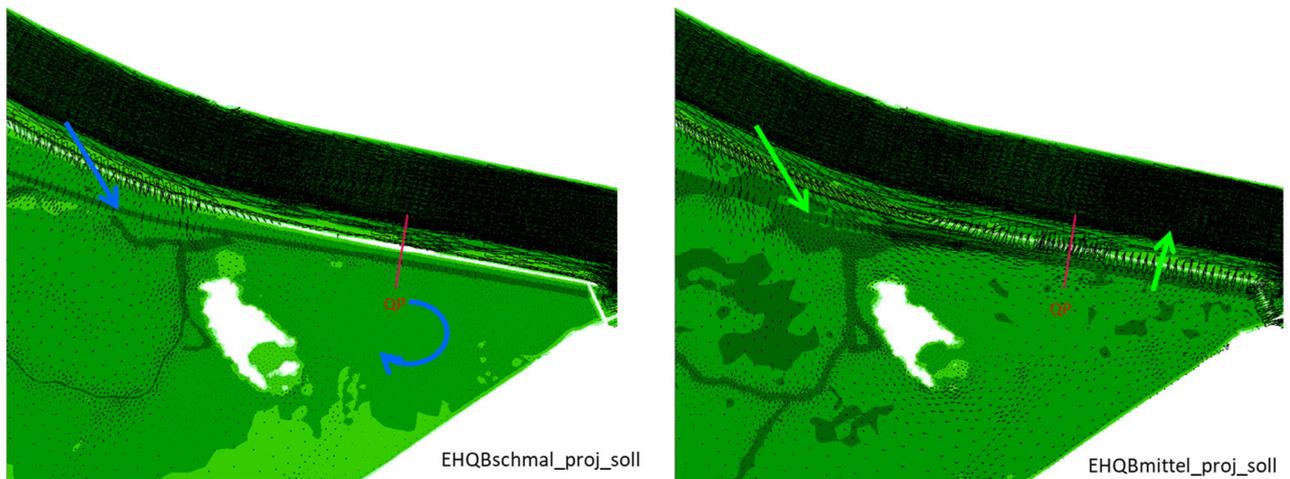


Abbildung 38:
 Detailansicht der 2d-Modellberechnung bei der Überströmstrecke unmittelbar oberhalb der Spiersbachmündung. Oben links: der maximale Einstau beim schmalen Ganglinie EHQ_B schmal führt noch nicht zu einem Rückfluss. Oben rechts: bei der breiteren Ganglinie EHQ_B mittel kommt es im untersten Bereich der Überströmstrecke zu einem Rückfluss zurück in den Rhein. Links: Querschnitt bei «QP» mit maximalen Wasserspiegeln EHQ_B schmal und EHQ_B mittel.



Dammüberströmung: gemäss Längenprofil Abbildung 37 kann die Überströmstrecke in vier Abschnitte unterteilt werden, welche je ein unterschiedliches Verhalten aufweisen:

- Im untersten Abschnitt km 64.8-64.5 sind keine Wasseraustritte aus dem Rhein in den Rückhalteraum zu erwarten. Hingegen kann ab Vollfüllung ein starker Rückfluss zurück in den Rhein stattfinden.

⁶ Die Studie Systemsicherheit ging noch von einer maximalen Einstauhöhe von 432.07 müM bzw. einem entsprechenden Rückhaltevolumen von 17.50 Mio. m³ aus.

- Im mittleren Abschnitt km 64.5-64.0 ist je nach Wasserständen im Rhein und im Rückhalteraum sowohl Aus- wie auch Rückfluss möglich.
- Im oberen Abschnitt km 64.0-63.4, der eigentlichen Entlastung, ist nur noch ein Ausfluss aus dem Rhein möglich, nicht aber ein Rückfluss zurück in den Rhein.
- Im Übergangsbereich km 63.4-63.2 findet weder ein Aus- noch ein Rückfluss statt, sobald auf dem WSP EHQ_B ein genügendes Freibord vorhanden ist.

Ein Ausfluss aus dem Rhein kann auf einen leeren Rückhalteraum treffen und dabei einen Höhenunterschied von bis zu 7m überwinden⁷. Die Energieumwandlung auf der luftseitigen Dammböschung und am luftseitigen Dammfuss ist entsprechend stark.

In den Bereichen mit allfälligem Rückfluss zurück in den Rhein ist umgekehrt die rheinseitige Böschung beansprucht. Allerdings trifft der Rückfluss immer auf ein nahezu gefülltes Flussbett, dessen Wasserspiegel nur wenig tiefer als derjenige im Rückhalteraum ist. Die Energie des Überfallstrahls ist entsprechend gering und wird im Wasserkörper des gefüllten Flussbetts verwirbelt, wodurch die Erosionsbelastung entsprechend gering ist und sich auf die obere rheinseitige Böschung beschränkt.

Die Dammkrone ist auf jeden Fall immer zu schützen, wo Aus- und/oder Rückflüsse möglich sind.

2.9.4 Überströmstrecke Illspitz

Die Überströmstrecke Illspitz an der III entlastet in denselben Rückhalteraum. Wenn die III gleichzeitig mit der Rheinentlastung anspringt, so wird ein Teil des verfügbaren Rückhaltevolumens mit dem Wasser aus der III ausgefüllt und steht nicht mehr für das Wasser aus dem Rhein zur Verfügung. Diese gleichzeitige Beaufschlagung desselben Rückhalterausms schmälert die Dämpfungswirkung in der Internationalen Rheinstrecke nicht, sofern beide Entlastungen aufeinander abgestimmt sind und bei einem Extremereignis im Rhein simultan und gegenseitig unterstützend wirken. Denn für die Dämpfung der Ganglinienspitze im Unterlauf spielt es keine Rolle, ob das Wasser direkt aus dem Rhein entlastet wird, oder aus der III ausfliesst und nicht mehr via Illmündung dem Rhein zuströmt.

Voraussetzung dafür ist allerdings, dass beide Entlastungen aufeinander abgestimmt sind. Die Entlastung Illspitz hätte dann einen optimalen Effekt auf die Dämpfung des EHQ im Rhein, wenn sie ab einem etwa 100-jährlichen Illhochwasser $HQ_{100,III} = 820 \text{ m}^3/\text{s}$ anspringen würde (mit fester Wehrkante ohne Kippelemente oder erodierbarer Krone). Diese Abflussmenge entspricht in der Grössenordnung etwa dem Abflussbeitrag der III an einem EHQ_B des Rheins (vgl. Kap. 3.1.2 und Anhang 5).

Im ihrem heutigen Zustand liegt die Überlaufkante der Überströmstrecke tiefer. Sie würde bei einem EHQ im Rhein zu früh anspringen und den Rückhalteraum zu früh auffüllen. Zudem verursacht nicht nur der Rhein, sondern auch die III ein Schutzdefizit in Bangs, weshalb das Land Vorarlberg eine Anpassung dieser Überströmstrecke beabsichtigt. Entsprechende Massnahmen sind Gegenstand eines Drittprojektes und daher nicht Bestandteil des vorliegenden Massnahmenkonzepts Systemsicherheit.

Aus Sicht der übergeordneten Systemsicherheit Alpenrhein wäre es wichtig, wenn die Überlaufkante der Überströmstrecke Illspitz spätestens nach Realisierung des RHESI-Projekts auf rund $HQ_{100,III}$ angehoben würde.

2.9.5 Grobkostenanteil Systemsicherheit

Das Absperrorgan am Spiersbach dient sowohl der Verbesserung des Hochwasserschutzes von Bangs und Ruggell wie auch der übergeordneten Systemsicherheit. Es wird deshalb nur die Hälfte der Gesamtkosten für die Systemsicherheit aufgerechnet.

Die Überströmstrecke Partenwiesen dient hingegen fast ausschliesslich dem übergeordneten Systemsicherheit und wird daher mit ihren Gesamtkosten aufgerechnet. Aufgrund ihrer grossen Länge von 1'600 m ergeben sich Gesamtkosten von über CHF 7 Mio.

⁷ Der Höhenunterschied ist dort am grössten, wo der Spiersbach unmittelbar am Dammfuss verläuft.

Die Überströmstrecke Illspitz wird nicht aufgerechnet, da es sich um ein separates Drittprojekt an einem Rheinzufuss handelt, dessen Ziel v.a. die Verbesserung des Hochwasserschutzes von Bangs und Ruggell ist.

Km 64.8 rechts, Absperrorgan in der Mündung des Spiersbachs,
Kostenanteil für die Systemsicherheit; 50% der Gesamtkosten: CHF 1'400'000.--

Km 63.2-64.8 rechts, Überströmstrecke Partenwiesen,
100% der Gesamtkosten: CHF 7'600'000.--

2.10 Grobkostenanteil Systemsicherheit über alle Abschnitte

Die folgende Tabelle fasst die Grobkostenschätzung Anhang 5 für jeden der acht Abschnitte zusammen. Darin enthalten sind Baumeisterarbeiten, Planung und Bauleitung, Unvorhergesehenes und MWST. Bei den Zahlen handelt es sich um denjenigen Anteil an den Massnahmen, welcher der Systemsicherheit zuzurechnen ist. Die Massnahmenelemente, welche aus Drittgründen ohnehin auszuführen sind, sind nicht aufgerechnet, und bei Massnahmenelementen mit Drittaufgaben ist für die Systemsicherheit jeweils nur ein Teil ihrer Gesamtkosten aufgerechnet.

Position	Anteil CHF gerundet
Total Abschnitt Felsberg - Chur	3'400'000
Total Abschnitt Chur - Haldenstein - Oldis	3'300'000
Total Abschnitt Untervaz/Trimmis	4'000'000
Total Abschnitt Landquart	1'500'000
Total Abschnitt Maienfeld – Bad Ragaz - Fläsch	4'700'000
Total Abschnitt Sargans	1'200'000
Total Geländekammer Sennwald	10'100'000
Total Geländekammer Ruggell – Bangs – Spiersbach	9'000'000
Gesamttotal Anteil Systemsicherheit	37'000'000

Abbildung 39: Abschnittsweise Zusammenstellung der Kostenanteile, welcher der Systemsicherheit zuzurechnen ist. Die Zahlen beruhen auf der Grobkostenschätzung Anhang 5 und beinhalten Gesamt-Investitionskosten inkl. Baumeisterarbeiten, Planung und Bauleitung, Unvorhergesehenes und MWST.

Aufsummiert über alle Abschnitte ergibt sich ein Grobkostenanteil von CHF 37 Mio., welcher der Systemsicherheit anzurechnen ist. Dieser neue Betrag ist einiges tiefer als die sehr grobe Schätzung in der Studie Systemsicherheit [1], welche die Kosten der Bestvariante 2 (Alternative) in den Sektoren 1 und 2 auf CHF 118-236 Mio. bezifferte. Die Gründe für die tieferen Kosten sind:

- Der detailliertere Entwurf der Massnahmen auf Projektstufe Vorstudie erlaubt eine etwas präzisere Kostenschätzung.
- Dank der hydraulischen Machbarkeitsabklärung konnte aufgezeigt werden, dass mehrere kostenintensive Massnahmenelemente nicht mehr notwendig sind.
- Massnahmen, welche in Drittprojekten und aus anderen Gründen ohnehin notwendig sind, sind nur mit einem allfälligen Mehraufwand aufgerechnet, welcher durch eine zusätzliche Berücksichtigung der Systemsicherheit entsteht. Bei zweckdienlicher Auslegung der Drittprojekte ergeben sich oft gar keine Mehrkosten.
- Massnahmen, welche neben der Systemsicherheit auch anderen wichtigen Zielen dienen, sind nur zu einem Teil aufgerechnet.

3. VERTIEFTE HYDROLOGISCH-HYDRAULISCHE ABKLÄRUNG

3.1 Hydrologie

3.1.1 Vorgehen

Die hydrologischen Verhältnisse am Alpenrhein wurden in der Studie Systemsicherheit [1] umfassend diskutiert. Als Grundlage diente im Wesentlichen die grosse Hydrologiestudie aus dem Jahre 2000 [15] sowie die Notentlastungsstudie von 2009 [16]. Auf der Basis dieser früheren Studien wurden in [1] an den drei Bemessungspunkten Domat/Ems, Bad Ragaz (unterhalb) Taminamündung sowie Diepoldsau je zwei Abflusswerte vorgeschlagen, welche die Bandbreite für die am Alpenrhein möglichen Extremereignisse aufzeigen:

EHQ_A: Untere Grenze der betrachteten Bandbreite eines Extremereignisses:

- Repräsentativer Wert für ein extrem seltenes Ereignis mit Jährlichkeit deutlich über 300 Jahren.
- Der Abflusswert kann sich im heutigen Zustand aus einer möglichen, aber nicht sicheren hydraulischen Abflusskalibrierung an den Zuflüssen ergeben.
- Geeignetes Prüfereignis für den Überlastfall des auf den Bemessungsfall HQ₁₀₀ – HQ₃₀₀ ausgebauten Flussgerinnes, da rund 30-40% grösser als die Bemessungsabflüsse.
- Geeignetes Ereignis für die Dimensionierung allfälliger baulicher Massnahmen zur Bewältigung des Überlastfalls.

EHQ_B: Obere Grenze der betrachteten Bandbreite eines Extremereignisses:

- Repräsentativer Wert für ein äusserst seltenes Ereignis mit Jährlichkeit in der Grössenordnung von $\geq 1'000$ Jahren.
- Eignet sich zum Aufzeigen des Systemverhaltens bei einer äussersten Belastung.

Für die vorliegende vertiefte Untersuchung konnten die Abflusswerte und Hochwasserganglinien aus [1] übernommen werden, aber es war notwendig, die Abflussspitzen entlang des Rheins feiner zu diskretisieren und zwischen den drei Stützstellen Domat/Ems, Bad Ragaz und Diepoldsau weitere Bemessungspunkte einzuführen.

Eine hydraulische Dämpfung der hydrologisch aus dem Einzugsgebiet zuströmenden extremen Abflussspitzen wurde bereits in der Notentlastungsstudie [16] postuliert, aber im Rahmen der Studie Systemsicherheit [1] als noch zu unsicher beurteilt. Dank der Resultate der vorliegenden Vertiefung (Kap. 3.5) ist es nun möglich, diesen Dämpfungseffekt zu belegen und zu quantifizieren, sowohl für den Istzustand wie auch für den Projektzustand mit ausgeführtem Massnahmenkonzept gemäss Kap. 2.

3.1.2 Zwischeneinzugsgebiete und hydrologische Abflussbeiträge

Die zugrunde gelegten hydrologischen Abflussspitzen sowie die entsprechenden Abflussbeiträge der Zuflüsse sind im Anhang 5 zusammengestellt und in hydrologischen Längenprofilen aufgezeichnet.

Die Hydrologie der bisherigen Studien unterschied nur drei Zwischenabschnitte und ordnete diesen die Abflusswerte zu, welche in [15] und [16] für die Pegelstandorte Domat/Ems, Bad Ragaz und Diepoldsau ermittelt wurden. Die gesamte Abflusszunahme wurde damals auf die beiden grössten Zuflüsse Landquart und Ill konzentriert: Abflusszunahme Domat/Ems bis Bad Ragaz an der Landquartmündung km 23.3, Abflusszunahme Bad Ragaz bis Diepoldsau an der Illmündung km 65.4. Entsprechend waren die Abflussbeiträge der Landquart und der Ill an das Extremereignis des Rheins sehr hoch und überstiegen die Abflussspitzen je der eigenen Extremereignisse.

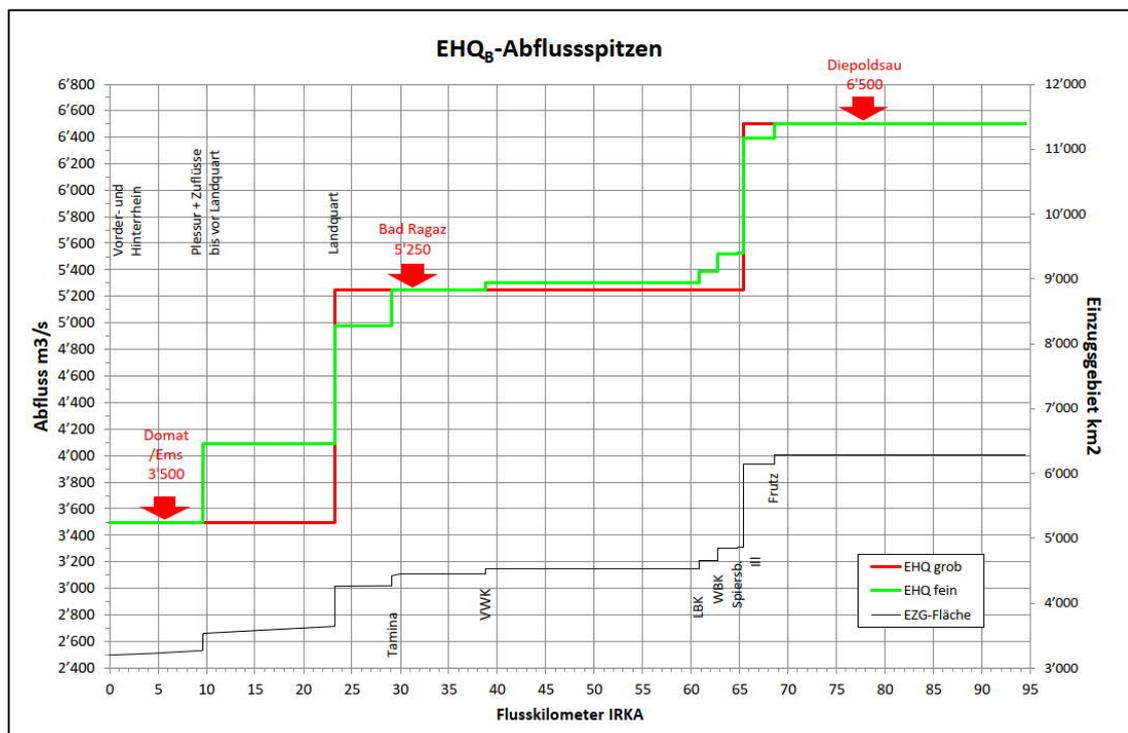
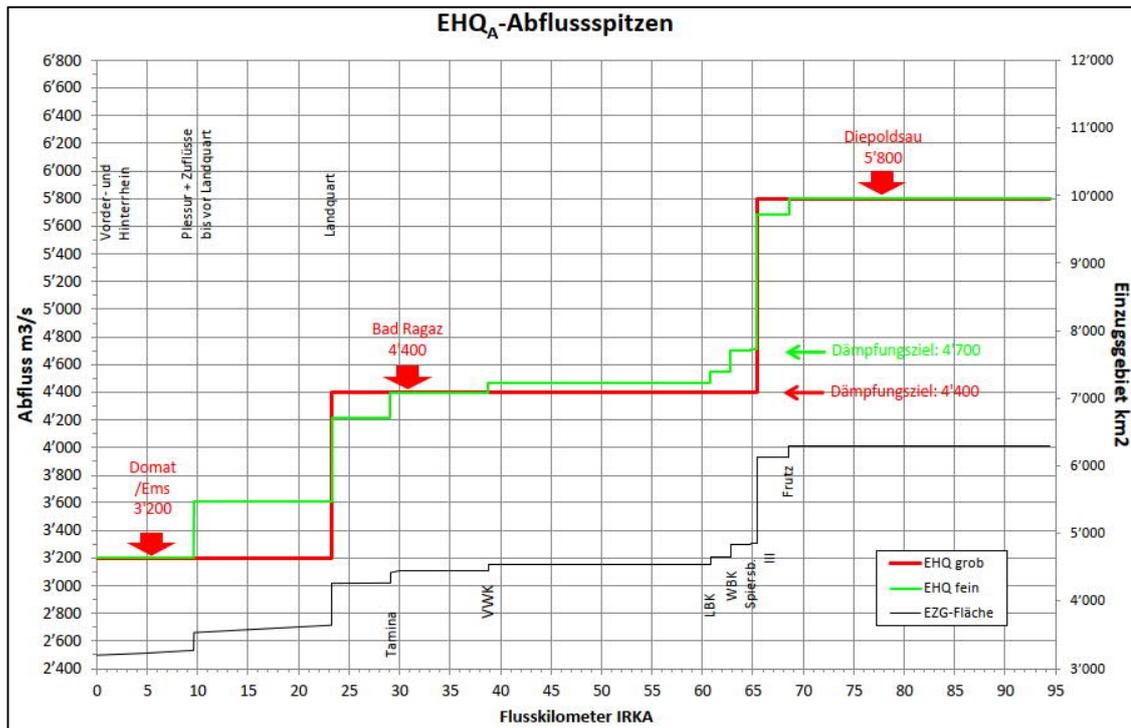


Abbildung 40: Längenprofil der hydrologischen Extremereignis-Abflussspitzen von Reichenau bis zum Bodensee. Oben: EHQ_A, unten: EHQ_B. Rot: bisherige grobe Einzugsgebietseinteilung. Grün: neue verfeinerte Einzugsgebietseinteilung.

Die vertiefte hydrologisch-hydraulische Untersuchung erfordert nun eine feinere Unterteilung der Zwischeneinzugsgebiete und ihrer hydrologischen Abflussbeiträge, vor allem auch im Hinblick auf die korrekte Einspeisung von Randbedingungen in die hydraulischen Modelle. Es werden neu die folgenden verfeinerten Zwischeneinzugsgebiete unterschieden, deren hydrologische Abflussbeiträge an folgenden Stellen mit dem Rhein verknüpft werden:

- Km 4.59: Einzugsgebiet bis zum Pegel Domat/Ems, insbesondere Vorder- und Hinterrhein.

- Km 9.64: Zwischeneinzugsgebiet von Domat/Ems bis vor die Landquartmündung, insbesondere Plessur.
- Km 23.3: Zwischeneinzugsgebiet von der Landquart bis vor die Taminamündung, insbesondere Landquart (ohne Auslauf Kraftwerk Sarelli; während EHQ ausgeschaltet).
- Km 29.10: Zwischeneinzugsgebiet von der Tamina bis zum ehemaligen Pegel Bad Ragaz (inkl. natürliches Einzugsgebiet Maienfelder Mühlbach), insbesondere Tamina.
- Km 38.80: Zwischeneinzugsgebiet vom ehemaligen Pegel Bad Ragaz bis und mit dem Vilterser-Wangser-Kanal VWK (inkl. Trübbach).
- Km 60.8: Einzugsgebiet des Liechtensteiner Binnenkanals LBK⁸ (Der Rhein hat zwischen VWK und LBK kein weiteres Zwischeneinzugsgebiet).
- Km 62.8: Einzugsgebiet des Werdenberger Binnenkanals WBK (Der Rhein hat zwischen LBK und WBK kein weiteres Zwischeneinzugsgebiet).
- Km 64.81: Einzugsgebiet des Spiersbachs (Der Rhein hat zwischen WBK und Spiersbach kein weiteres Zwischeneinzugsgebiet).
- Km 65.4: Einzugsgebiet der III, Gesamtabfluss inkl. turbinierte Wassermenge.
- Km 68.6: Zwischeneinzugsgebiet von unterhalb der III bis zum Pegel Diepoldsau, insbesondere Frutz und Ehbach.
- Keine weitere Abflusszunahme zwischen Diepoldsau und dem Bodensee.

Die Extremereignis-Abflussspitze des Rheins wurde flächenproportional zwischen Domat/Ems, Bad Ragaz und Diepoldsau interpoliert. Die hydrologischen Abflussbeiträge der einzelnen Zwischeneinzugsgebiete (Höhe der grünen «Treppenstufen» in Abbildung 40) ergaben sich dabei aus der Abflussspende der jeweiligen roten «Treppenstufe», multipliziert mit der Grösse des Zwischeneinzugsgebiets:

- Abflussspende q des «roten» Zwischeneinzugsgebiets Domat/Ems – Bad Ragaz für die Plessurmündung, Landquartmündung und Taminamündung
- Abflussspende q des «roten» Zwischeneinzugsgebiets Bad Ragaz – Diepoldsau für VWK, LBK, WBK, Spiersbach, III und Frutz+Ehbach,

Mit dieser feineren Einteilung der hydrologischen Abflussbeiträge werden einerseits die kleineren, aber nicht zu vernachlässigenden Zuflüsse berücksichtigt und andererseits die Abflussbeiträge der Landquart und der III auf plausible Werte reduziert.

3.1.3 Bemerkung zu den Abflussbeiträgen der Zuflüsse

Die Abflussbeiträge der Zuflüsse zwischen Domat/Ems, Bad Ragaz und Diepoldsau sind als diejenigen Abflüsse zu verstehen, um die sich der Rheinabfluss bei der jeweiligen Einmündung erhöht. Diese Inputs sind statistische Grössen des Rheinhochwassers und nicht identisch mit den realen Hochwasserspitzen und -ganglinien der Zuflüsse selber. Für die statistische Auswertung des Extremereignisses im Rhein ist es nicht sinnvoll oder sogar falsch, die Extremereignis-Spitzen eines jeden Zuflusses aufzuaddieren. Denn es ist statistisch nicht sehr wahrscheinlich und nicht zwingend nötig, dass bei einem extremen Ereignis im grossen Gesamteinzugsgebiet des Rheins gleichzeitig auch ein Extremereignis im jeweiligen kleineren Einzugsgebiet des Zuflusses stattfindet. Und selbst wenn beim selben Ereignis je eine Extremereignis-Ganglinie sowohl im Rhein wie auch im Zufluss entsteht, so ist die Wahrscheinlichkeit klein, dass die beiden Hochwasserspitzen an der Einmündung genau zeitgleich zusammentreffen. Vgl. dazu auch die Ganglinienauswertung an der Landquartmündung in Kap. 3.6.3, wo eine Verschiebung der Rheinganglinie im Vergleich zum Abflussbeitrag der Landquart sofort eine Verringerung der Hochwasserspitze im Rhein nach dem Zusammenfluss zur Folge hat.

Im Weiteren ist zu bemerken, dass die Zuflüsse zwischen Bad Ragaz und Diepoldsau beim häufigeren EHQ_A in der Tabelle Anhang 6 einen leicht grösseren Abflussbeitrag aufweisen als beim selteneren EHQ_B . Dies stammt daher, dass das bereits seit früheren Studien verwendete

⁸ Im 2d-Modell Bangs/Sennwald wird der Abflussbeitrag des LBK bei der Randbedingung des Rheins km 58.8 eingespeist. Aufgrund hydraulischer Dämpfungseffekte in der Liechtensteiner Ebene wird ein hydraulisch auf 65 m³/s gedrosselter Abfluss in das Modell eingespeist.

EHQ_A (damals «hydraulisches EHQ» genannt) eine grössere Abflusszunahme zwischen Bad Ragaz und Diepoldsau aufweist als das EHQ_B.

3.1.4 Neudefinition des Dämpfungsziels für die IRR-Strecke

Das im Rahmen der Studie Systemsicherheit [1] definierte Dämpfungsziel fordert eine Begrenzung des Extremereignis-Abflusses des Alpenrheins beim Eintritt in den unteren Sektor auf einen Grenzabfluss EHQ_A, der möglichst nie überschritten werden soll. In Koordination mit dem RHESI-Projekt wurde vereinbart, dass Überlastfälle bis zu einem EHQ_A innerhalb des RHESI-Projekts bzw. der Internationalen Rheinstrecke bewältigt werden müssen.

Gemäss der damaligen gröberen Hydrologie wurde in der Studie der entsprechende Grenzabfluss unmittelbar oberhalb der Illmündung auf EHQ_A = 4'400 m³/s festgelegt.

Die verfeinerte Hydraulik geht nun von einem kleineren Abflussbeitrag der Ill aus, weil ein Teil der Abflusszunahme ab Bad Ragaz bereits oberhalb der Illmündung durch den Vilterser-Wangser-Kanal, den Liechtensteiner und Werdenberger Binnenkanal sowie den Spiersbach zugegeben wird. Das gleiche Dämpfungsziel, nämlich ein Extremereignis beliebiger Grössenordnung bis zur Internationalen Rheinstrecke auf ein EHQ_A = 5'800 m³/s zu dämpfen, kann aufgrund der feineren Einzugsgebieteaufteilung gemäss Tabelle Anhang 5 mit einem Grenzabfluss von 4'712 m³/s aus dem Alpenrhein erreicht werden.

Aus diesem Grund wird das Dämpfungsziel für die vorliegende Vertiefungsstudie wie folgt präzisiert:



Dämpfung der EHQ_B -Szenarien oberhalb der Illmündung, sodass im Alpenrhein ein Grenzabfluss von:

- EHQ_A = 4'700 m³/s bei km 65 vor Zufluss Ill sowie
- EHQ_A = 5'800 m³/s bei km 70 nach Zufluss von Ill, Frutz und Ehbach

möglichst nicht überschritten wird.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass das nach oben korrigierte Dämpfungsziel bei km 65 oberhalb der Illmündung keine Erhöhung des Dämpfungsziels bei km 70 zur Folge hat. Dieses kann weiterhin bei EHQ_A = 5'800 m³/s belassen werden, denn es setzt sich zusammen aus:

- Rhein km 65 oberhalb Ill: EHQ_A = 4'700 m³/s
- Abflussbeitrag Ill an EHQ Rhein bei Diepoldsau: rund 970 m³/s
- Abflussbeitrag Frutz und Ehbach am EHQ Rhein bei Diepoldsau: rund 120 m³/s
- Rhein bei km 70, Internationale Rheinstrecke bzw. Diepoldsau: EHQ_A = 5'800 m³/s

Der statistische Abflussbeitrag von Frutz und Ehbach am EHQ des Rheins ist wesentlich tiefer als die Hochwasserwerte in der Frutz selber, welche in ihrem kleinen, aber sehr aktiven Einzugsgebiet wildbachähnliche kurze und hohe Ganglinienspitzen entstehen lässt (z.B. HQ₃₀₀ = 350 m³/s an der Messstation Sulz)⁹.

3.1.5 Hochwasserganglinien

Da das Ausmass der Hochwasserdämpfung nicht nur von der Höhe der Abflussspitze, sondern auch vom Volumen der Hochwasserganglinie insbesondere der Dauer ihrer Abflussspitze abhängt, waren die zu berechnenden hydrologischen Szenarien auch in ihrer Ganglinienbreite zu variieren. Es kamen dieselben Musterganglinien «Schmal/Mittel/Breit» zum Einsatz, welche bereits in der Studie Systemsicherheit [1] definiert wurden, wobei aufgrund der Beobachtungen grosser Hochwasser am Alpenrhein sowie aufgrund der Modellrechnungen in den Hydrologiestudien der schmalen Ganglinienform eine deutlich grössere Wahrscheinlichkeit

⁹ Gemäss den Ausführungen in Kap. 3.1.3 wäre es methodisch falsch, die Hochwasserspitze im Rhein mit derjenigen in der Frutz aufzuaddieren. Erstens ist es unwahrscheinlich, dass bei einem EHQ im viel grösseren und zu einem wesentlichen Teil südexponierten Einzugsgebiet des Rheins auch im relativ kleinen wildbachähnlichen und nordexponierten Einzugsgebiet der Frutz ein lokales Extremereignis auftritt, denn dazu sind unterschiedliche meteorologische Szenarien notwendig. Und selbst wenn dies geschähe, dann wäre es sehr unwahrscheinlich, dass dabei die kurze und hohe Hochwasserspitze der Frutz genau zeitgleich zur Abflussspitze des Rheins in den Rhein fliessen würde.

zugeordnet wird als der mittleren oder gar der breiten Ganglinienform (vgl. Szenariengewichtung in Kap. 3.3.5 und Anhang 11).

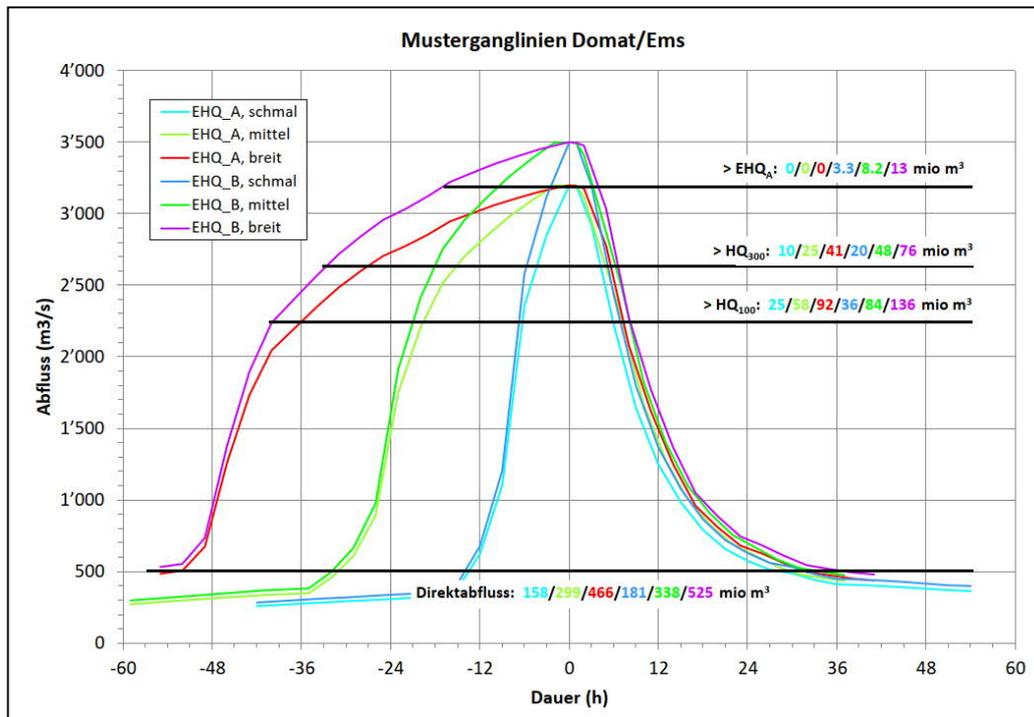


Abbildung 41: Musterganglinien schmal/mittel/breit je für ein EHQ_A und EHQ_B, sowie für den Bemessungspunkt Domat/Ems. Die Volumenangaben entsprechen dem Wasservolumen der Ganglinienspitze oberhalb des durch eine waagrechte schwarze Linie angegebenen Grenzabflusses.

Da die aus der Hydrologiestudie [15] stammenden Ganglinien in Domat/Ems und in Bad Ragaz unterschiedliche Formen aufweisen, musste bei den Modellinputs wie folgt vorgegangen werden, damit im Rhein bei Bad Ragaz dasselbe ungedämpfte Ganglinienvolumen abfließt wie die dortige Musterganglinie aus der Hydrologiestudie [15].

- Für den Rheinabfluss bei Domat/Ems kamen die Musterganglinien Domat/Ems (Abbildung 41) zur Anwendung.
- Für die Zuflüsse von Plessur bis und mit Tamina wurde je die Differenzganglinie zwischen den Musterganglinien Domat/Ems und Bad Ragaz gebildet, und dann auf die flächenproportionalen Abflussbeiträge gemäss Kap. 3.1.2 vertikal gestreckt oder gestaucht.
- Die Zuflüsse unterhalb von Bad Ragaz (VWK, LBK, WBL, Spiersbach) wurden mit derselben Form wie die Musterganglinien Bad Ragaz in das Modell eingespeist, wobei die Zuflussganglinie auf den jeweiligen Abflussbeitrag vertikal gestreckt oder gestaucht wurde.

Für den Liechtensteiner Binnenkanal wurde zusätzlich die Spitze auf einer Höhe von 65 m³/s gekappt, um die wirksame hydraulische Abflussdämpfung in der oben liegenden, nicht modellierten Liechtensteiner Ebene zu berücksichtigen¹⁰.

¹⁰ Information E. Banzer / S. Wohlwend in der Sitzung vom 18.02.2021: Abfluss im LBK kann 65 m³/s nicht übersteigen. Noch grössere Abflüsse werden in der Ebene zwischen Triesen und Bendern zurückgehalten.

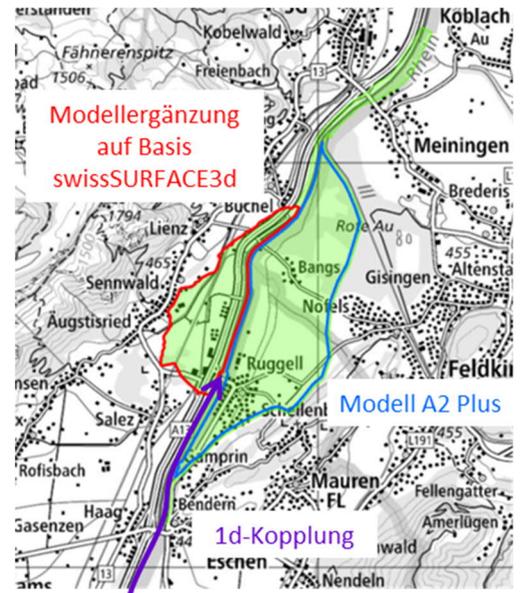
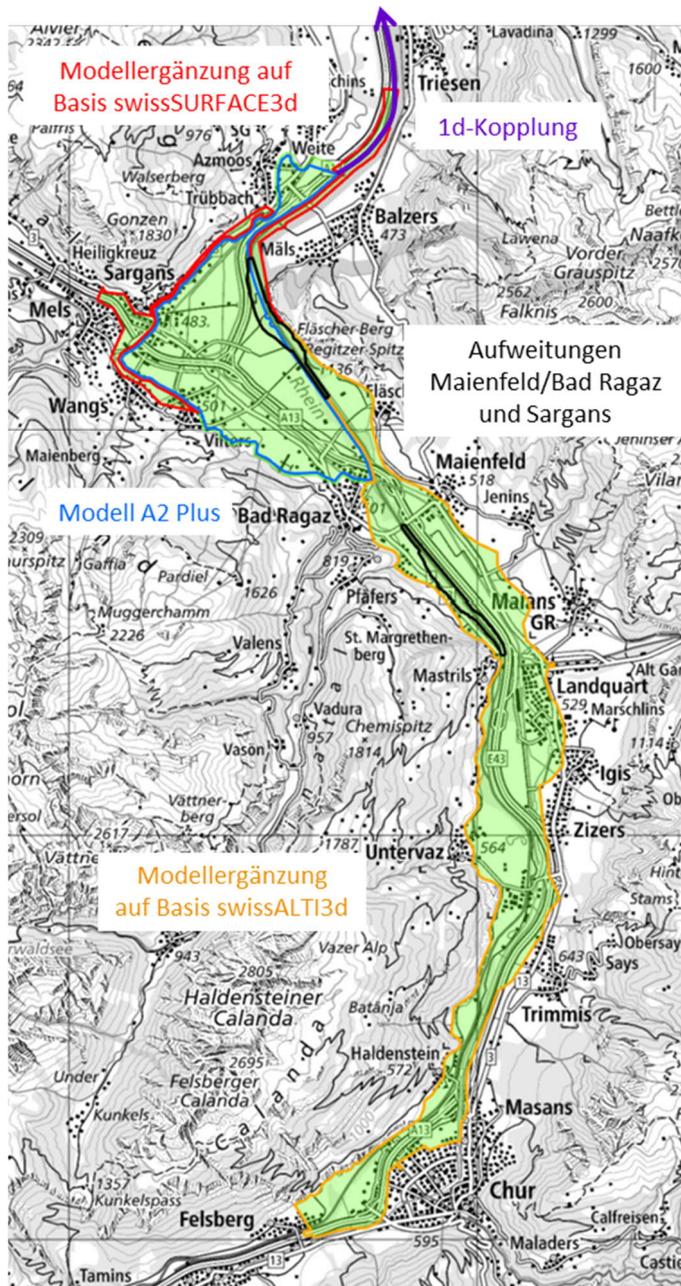
3.2 Hydraulische Modelle

3.2.1 Übersicht und Modellierungsgrundlagen

Für die hydrologisch-hydraulischen Auswertungen wurden drei Modelle erstellt und instationär betrieben:

- 2d-Modell Felsberg – Trübbach
- 1d-Kopplungsmodell km 40-60
- 2d-Modell Bangs/Sennwald

Abbildung 42: Übersicht 2d-Modelle Felsberg-Trübbach und Bangs/Sennwald



Die Abbildung 42 zeigt den Modellierungssperimeter der zwei 2d-Modelle (grün) sowie ihre Zusammensetzung. Basis waren die bereits bestehenden 2d-Modelle aus der Studie A2-Plus mit Stand 2007, welche wie folgt ergänzt wurden:

- Seitliche Bereiche bei Sargans, Mels, Wangs und Vilters, zur Erweiterung bis an die Überflutungsgrenze bei den Dammbuchszszenarien¹¹. Basis für diese Modellierung bildete das aktuelle DTM swissSURFACE3d mit Stand 2019.
- Erweiterung Kanton Graubünden bis Felsberg/Chur: Diese Erweiterung wurde auf Basis des DTM swissALTI3d mit Stand 2014 vorgenommen, da das neuere swissSURFACE3d noch nicht zur Verfügung stand.
- Geländekammer von Sennwald: Das auf der Basis von swissSURFACE3d für die Gefahrenkarte Rheintaler Binnenkanal 2019 erstellte Modell konnte für den interessierenden Bereich des WBK bis Salez erweitert werden.

3.2.2 Modell Felsberg-Trübbach

Das 2d-Modell Felsberg-Trübbach ist als Finite-Elemente-Modellnetz aufgebaut und besteht aus rund 420'000 Knoten und 830'000 Dreieckelementen¹². Die gesamte Modellfläche beträgt rund 52.5 km².

Das integrale 2d-Modellnetz umfasst integral sowohl die Talebenen beidseits des Rheins bis an die Berghänge wie auch das 33.8 km lange Rheingerinne von km 6.8 unterhalb der Brücke Felsberg bis km 40.6 oberhalb von Triesen. Auch das Rheingerinne¹³ ist als Finite-Elemente-Netz aufgebaut.

Die Modellierungsgenauigkeit und Maschendichte wurden auf die vorliegende Fragestellung abgestimmt, welche lautete:

- Instationäre Untersuchung der Dämpfungseffekte und der Speicherwirkung der Überflutung
- Grobe Abgrenzung der Überflutungsausdehnung für das Restrisiko eines EHQ (Jährlichkeit >>300).

Innerhalb des Prozessraums sind alle bei einer Rheinüberflutung wichtigen Elemente wie Aus- und Rückflussbereiche, Dammstrukturen und Verkehrsstrassees sowie die Wegunterführungen und die wichtigsten Bachdurchlässe zuverlässig erfasst. Die übrigen Detailstrukturen und Einzelobjekte wie z.B. Gartenmauern waren nicht systematisch und vollständig zu erfassen, da die Berechnung nicht auf der Genauigkeitsstufe einer Gefahrenkarte erfolgte.

Unter anderem wurden im Modell Felsberg-Trübbach folgende hydraulisch wichtigen Strukturen erfasst:

- Sämtliche Dämme in den Graubündner Geländekammern sauber nachgezeichnet
- Bei Chur nach der Plessurmündung: eine Strassenunterführung und zwei Fussgängerunterführungen sowie der Durchlass Mühlbach unter der Autobahn hindurch.
- Sohlenhebung bei der Maschanser Rüfi km 13.9.
- Damm km 14.4 rechts ergänzt.
- Beidseitige Unterführungen bei der Brücke Untervaz, km 17.25.
- Unterführung beim Autobahnrastplatz Apfelwuhr südlich Landquart, auf Höhe km 22.1 rechts.
- Fussgängerunterführung zwischen Igiser Mühlbach und Autobahn, auf Höhe km 22.9 rechts (unter Autobahnausfahrt).
- Durchlässe des Igiser Mühlbachs unter Autobahn und Bahnhof.
- Sämtliche Unterführungen in der Maienfelder Ebene unter SBB und Autobahn hindurch.

¹¹ Diese nachträgliche Erweiterung wurde für die Modelle mit Dammbuchszszenarien notwendig.

¹² Modellgeometrie Istzustand für Dammbüche

¹³ Auf eine 1d-Modellierung des Flussgerinnes wurde verzichtet, da diese hybriden Modelle an den entscheidenden Schnittstellen zwischen Flussgerinne und Umland numerische Probleme aufweisen.

- Sämtliche Brücken entlang des Maienfelder Mühlbachs von Maienfeld bis zur Mündung nördlich der Autobahnraststätte Heidiland.
- Bäche und Gräben im Bereich Golfplatz und Giessenpark Bad Ragaz, sowie Auslauf in Tamina unmittelbar bei Taminamündung.
- Lücke im rechten Rheindamm bei km 28.8 rechts, oberhalb SBB-Brücke, inkl. alter abgerückter Dammabschnitt.
- Bahnunterführungen rechts- und links der SBB-Brücke km 29.0 (Rheinstrasse und Zufahrt Raststätte).
- Bachdurchlässe und Brücken in der Fläscher Geländekammer: Fläscher Giessen, Feldrüfi, Hinterdamm km 31.8 rechts.
- Sarganser Au: drei Bachdurchlässe und Strassenunterführung im Autobahndamm der A13 nach Buchs.
- Strassenunterführung im Autobahndamm der A13 bei km 35.7 links, beim Rheinknie.
- Diverse Kanaldurchlässe in der Saarebene südlich von Sargans.
- Autobahnunterführungen der A3 Sargans-Mels.
- Ergänzung und Nachzeichnung der durchgehenden Hinterdammstruktur des Trübbachgerinnes bei km 36.35 links mitsamt Dammbalken im Bahntrasse.
- Doppeldurchlass des Vilterser-Wangser-Kanals unter dem Trübbach hindurch sowie nachfolgende Strassendurchlässe unter Autobahn A13 und bei Balzner Brücke.

Sämtliche grösseren Gebäude wurden als undurchlässige Abflusshindernisse mit leicht generalisiertem Grundriss in das Modell eingebaut.

Die Mündungsstrecken der Zuflüsse Plessur, Landquart und Tamina wurden wie folgt mitsamt Dämmen und Flussgerinne in das Modell eingebaut:

- Plessur: letzte 500 m von Myrthenweg bis zur Mündung.
- Landquart: letzte 1'000 m vom Karlihof bis zur Mündung.
- Tamina: letzte 500 m von der Sandbrücke bis zur Mündung.

Allfällige Wasseraustritte, welche auf den Schwemmkegeln dieser Flüsse weiter oben stattfinden könnten, sind in den Modellberechnungen nicht abgebildet und nicht untersucht worden.

3.2.3 Modell Bangs/Sennwald

Auch das 2d-Modell Bangs/Sennwald Felsberg-Trübbach ist als Finite-Elemente-Modellnetz aufgebaut und umfasst sowohl das 9.8 km lange Rheingerinne von km 58.8 bis 68.6, die Gerinne der Binnenkanäle wie auch die beidseitigen Geländekammern von Sennwald und Bangs-Ruggell. Es besteht aus rund 94'000 Knoten und 190'000 Dreieckelementen. Die gesamte Modellfläche beträgt rund 20.5 km².

Die Modellierungsgenauigkeit ist in analoger Weise auf die Modellierungsziele abgestimmt wie im Modell Felsberg-Trübbach (vgl. Kap. 3.2.2). Unter anderem wurden im Modell Bangs/Sennwald folgende hydraulisch wichtigen Strukturen erfasst:

- Diverse Durchlässe im Kanalnetz der Ruggeller und Bangser Ebene, im Rahmen der Modellerstellung A2-Plus.
- Verdichtung des Modellnetzes im Bereich Illspitz, mit neuem Illkraftwerk, Mündung Spiersbach und Lücke im rechten Rheindamm.
- Glättung des Längenprofils der Rheinsohle im Querprofil km 60.8 bei der Mündung des Liechtensteiner Binnenkanals (Korrektur unrealistische Mittelung über die Sohlenbreite bei der Bestimmung der mittleren Sohlenhöhe)
- Autobahnunterführungen beim Autobahnanschluss Sennwald, etwa auf Höhe km 58.2-58.6 links.
- Beidseitige Dämme und Ufer entlang des Werdenberger Binnenkanals sauber nachgezogen.
- Flurwegunterführung unter SBB-Bahnlinie hindurch, etwa auf Höhe km 59.5 links.

- Nachzeichnung Hinterdamm Büchel, mit Rillisschleuse und SBB-Dambalken geschlossen.
- Unterführung Zollstrasse unter der Autobahn bei km 62.0 links: Dammbalken geschlossen.

Sämtliche grösseren Gebäude wurden als undurchlässige Abflusshindernisse mit leicht generalisiertem Grundriss in das Modell eingebaut.

Das Gerinne des Werdenberger Binnenkanals ist von Salez oberhalb des Autobahnanschlusses Sennwald bis zur Mündung mitsamt niederen Dämmen im Modell eingebaut. Die Wasseraustritte entlang dieses Kanalabschnitts werden sowohl im Istzustand wie auch im Projektzustand instationär berechnet, womit der maximal mögliche Einstauereffekt durch extrem hohe Rheinwasserspiegel vollständig abgedeckt ist.

Allfällige Wasseraustritte des WBK weiter kanalaufwärts in der südlich anschliessenden Ebene wurden im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht. Es kann somit keine Aussage darüber gemacht werden, ob auch in dieser Ebene eine Abflusskalibrierung am Binnenkanal wirkt (analog zu derjenigen des Liechtensteiner Binnenkanals; Kap. 3.1.2, 3.1.5 und Anhang 8).

Die Mündungsstrecke der III ist nur in Form der Modellbegrenzung durch den linken IIIdamm im Modell berücksichtigt. Das Gerinne der III war für die vorliegenden Fragestellungen nicht zu modellieren.

Auch die Überströmstrecke IIIspitz (Kap. 2.9.4) wurde der Vorsicht halber nicht in das Modell eingebaut. Sie springt zwar in ihrem heutigen Zustand zu früh an und trägt dadurch zum Hochwasserschutzdefizit von Bangs und zu einer zu frühen Füllung des Rückhalteriums bei, aber die Vollfüllung der Geländekammer bis zum korrespondierenden Wasserspiegel wird bereits durch den massiven Rückfluss vom Rhein her via Spiersbachmündung erreicht. Eine zusätzliche Entlastung aus der III trafe auf einen voll gefüllten Rückhalterium und hätte keinen zusätzlichen Dämpfungseffekt auf den Hochwasserabfluss im Rhein flussabwärts der IIImündung. Im Projektzustand wird empfohlen, die Überströmstrecke an der III so weit anzuheben, bis sie gemäss Kap. 2.9.4 synchron mit derjenigen aus dem Rhein arbeitet, und somit als weiteres Element der Systemsicherheit die Robustheit des Hochwasserschutzsystems erhöht.

3.2.4 Integration des Rheingerinnes in die 2d-Modelle

Damit die zahlreichen Aus- und Rückflüsse entlang der Ufer und Dämme des Rheins hydraulisch korrekt modelliert werden, war eine Integration des Rheingerinnes in die 2d Modelle erforderlich. Zur Begrenzung des entsprechenden Modellierungsaufwands erfolgte dies mit einem vereinfachten Verfahren, das für die abzuklärende Fragestellung dennoch zuverlässige Modellergebnisse ergab.

Eichung der extremen Wasserspiegel an 1d-Resultaten bisheriger Studien: Für die vorliegenden Fragestellungen interessierten lediglich die Abfluss-Wasserspiegel-Beziehungen von sehr grossen bis extremen Abflüssen HQ_{300} , EHQ_A und EHQ_B , welche vor allem im Bereich der Überströmstrecken und Rückflüsse zuverlässig berechnet werden mussten. Dieses Ziel wurde nicht mit einer möglichst detailgetreuen Nachbildung des Rheingerinnes erreicht, sondern mit einer Eichung an den 1d-Wasserspiegellagen HQ_{300} , EHQ_A und EHQ_B aus den Studien [7], [8] und [11]. Es wurde somit ein Gerinne mit einer vereinfachten Trapezgeometrie erstellt und dann im Rahmen der Eichung Kap. 3.2.6 so lange angepasst, bis die Resultate aus den 2d-Berechnungen im Bereich extremer Abflüsse bestmöglich nachgebildet werden konnten.

Vereinfachte Gerinnegeometrie: Für die Konstruktion des vereinfachten Trapezgerinnes standen die Bodenbedeckungsdaten der amtlichen Vermessung, die Orthophotos sowie die aus den hydraulischen und morphologischen Vorgängerstudien ([4], [7], [8], [10], [11]) entnommenen mittleren Sohlenlagen zur Verfügung. Die Ufer- und Dammhöhen wurden aus dem digitalen Höhenmodellen abgegriffen und nur dort mit den Querprofilaten abgeglichen, wo die Höhenmodelle zu wenig präzise und detailtreu waren.

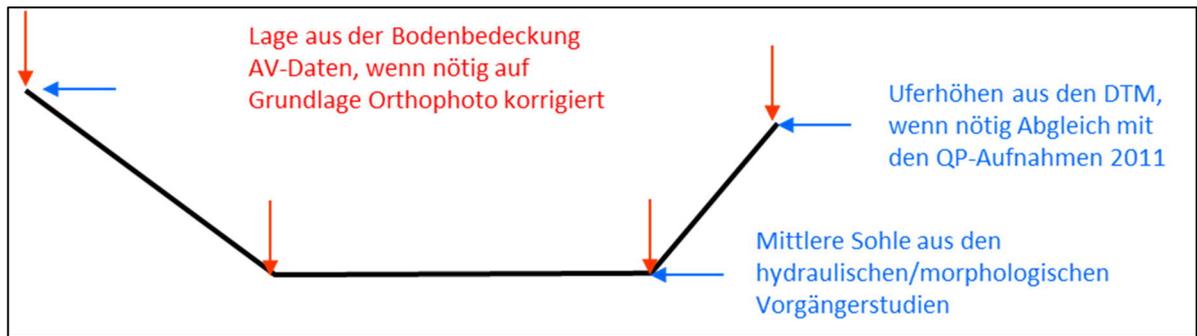


Abbildung 43: Prinzipskizze für die Konstruktion des vereinfachten Rheingerinnes vor der Eichung. Allfällige geometrische Anpassungen erfolgten später im Rahmen der Eichung der extremen Wasserspiegellagen an den Resultaten der 1d-Modelle aus Vorgängerstudien.

Künftige Projektgeometrien: Die Modelle des Projektzustands waren in drei Abschnitten an eine künftige Projektgeometrie anzupassen:

- Km 23.6 – 27.0, Aufweitung Maienfeld/Bad Ragaz: Übernahme der Querprofilgeometrie und der Sohlenlage Endzustand aus dem Auflageprojekt [4] bzw. den entsprechenden Modellresultaten des Büros Hunziker, Zarn + Partner. Berücksichtigung der Vegetation ausserhalb der Regimebreite von 150 m mittels einer sehr hohen Rauigkeit.
- Km 32.4-35.4, Aufweitung Sargans: Übernahme der groben Querprofilgeometrie und der Sohlenlage aus der Machbarkeitsstudie des Büros Hunziker, Zarn + Partner [10]. Berücksichtigung der Vegetation ausserhalb der Regimebreite von 150 m mittels einer sehr hohen Rauigkeit.
- Km 58.8-68.6, Projekt RHESI: Übernahme der Projektsohlenlagen des Projekts RHESI für den Abschnitt inner- und oberhalb der Internationalen Rheinstrecke ([11], Prognosezustand 2066, mit RHESI).

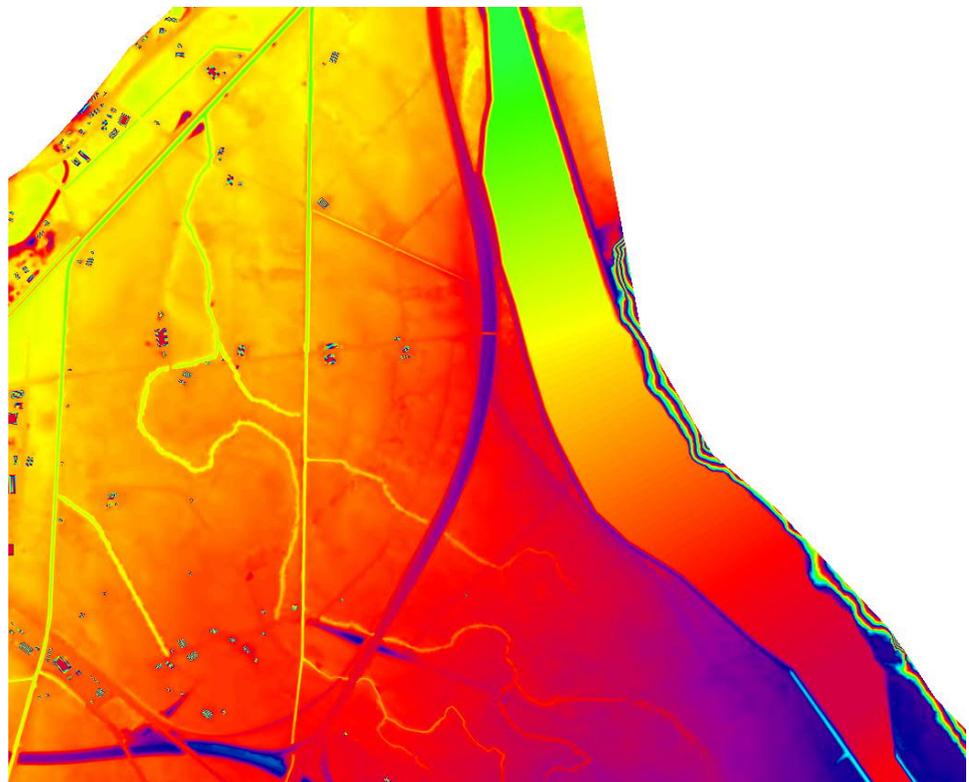


Abbildung 44: Ausschnitt des Höenschichtmodells der Sarganser Geländekammer. Rechts im Bild die eingefügte Projektgeometrie der Rheinaufweitung Sargans gemäss Machbarkeitsstudie HZP [10].

Vorstreckungen des Rheingerinnes: Beide 2d-Modelle Felsberg-Trübbach sowie Bangs/Sennwald wurden zuerst nur bis zum untersten Rand des interessierenden Abschnitts erstellt. Die ersten Modellresultate zeigten falsche Wasserspiegellagen an diesen unteren Rändern, woraus sich die Notwendigkeit ergab, das Rheingerinne bis km 40.6 bzw. km 68.6 zu verlängern. Diese Vorstreckungen erlaubten einen Ausgleich der Stau- oder Senkungskurven, welche von den unpräzisen Wasserspiegelannahmen an den unteren Modellrandbedingungen ausgehen. Im Bereich der interessierenden Kontrollquerschnitte (Mündung Vilterser-Wangser-Kanal km 38.8 bzw. Mündung Spiersbach km 65.0) stellt sich dadurch eine realistische Abfluss-WSP-Beziehung ein, die nicht mehr durch die Modellrandbedingung beeinflusst ist.

3.2.5 Modellierete Zustände

Für die verschiedenen Szenarien des Istzustands (Kap. 3.3.2) und des Projektzustands (Kap. 3.3.3) waren verschiedene Modellgeometrien bereitzustellen:

- Modell Istzustand ohne Ausuferungen (Szenarien istoa_soll): Die Modellgeometrie entspricht dem Istzustand. Das Umland ausserhalb des Rheingerinnes wurde mit einer sehr hohen Rauigkeit nahezu undurchlässig gemacht. Diese fiktive Modellgeometrie wurde für die Eichung des Rheingerinnes sowie für die Abschätzung der Laufzeiten verwendet, da sie die Gerinnehydraulik ohne dämpfende Wasseraustritte wiedergibt.
- Modell Istzustand ohne Dammbürche (Szenarien ist_soll): Die Modellgeometrie entspricht dem Istzustand ohne Breschen in den Rheindämmen.
- Modell Istzustand mit Dammbürchen (Szenarien ist_DB): Die Modellgeometrie entspricht dem Istzustand, welcher mit einer Variation von möglichen Dammbreschen in den Sektoren 1, 2, 3 und/oder 4 versehen wird (vgl. Kap. 3.3.2).
- Modell Projektzustand (Szenarien proj_soll): Die Modellgeometrie entspricht dem Projektzustand mit eingebauten Aufweitungen, der Projektsohlenlage RHESI sowie den optimierten Massnahmen der Systemsicherheit.
- Modell Projektzustand mit tiefem Wasserspiegel: Die Modellgeometrie entspricht dem Projektzustand analog proj_soll, aber die Sohle wird abschnittsweise in den Sektoren 1, 2, 3 und/oder 4 um 60 cm abgesenkt, um einen deutlich tieferen Wasserspiegel zu erzeugen, welcher sich als Folge einer Sohlenerosion oder einer geringeren Rauigkeit lokal einstellen könnte. Dieser Zustand wird für die Szenarien proj_tief verwendet, vgl. Kap. 3.3.3.
- Modell Projektzustand mit hohem Wasserspiegel: Die Modellgeometrie entspricht dem Projektzustand analog proj_soll, aber die Sohle wird abschnittsweise in den Sektoren 1, 2, 3 und/oder 4 um 60 cm angehoben, um einen deutlich höheren Wasserspiegel zu erzeugen, welcher sich als Folge einer Sohlenauflandung, einer einwachsenden Vegetation oder einer höheren Rauigkeit lokal einstellen könnte. Dieser Zustand wird für die Szenarien proj_hoch verwendet.
- Modell Projektzustand mit teilweiser Realisierung der Massnahmen: Die Modellgeometrie entspricht dem Projektzustand analog proj_soll, aber in einzelnen Sektoren wird abschnittsweise wieder die Geometrie des Istzustands ohne Dammbürche (ist_soll) eingesetzt. Dieser Zustand wird für die Szenarien proj_ohne verwendet.

3.2.6 Eichung des Rheingerinnes

Vor Beginn der definitiven Berechnungen waren die 2d-Modelle im Bereich des Flussbetts des Rheins zu eichen. Die für die Eichung des Istzustands verwendeten Referenzwasserspiegellagen stammen im Wesentlichen von [8] für den Bündner Sektor 1, [7] für die Sektoren 2 und 3 sowie [11] für den Sektor 4.

Analog zu den 1d-Modellen berücksichtigte auch das für die Eichung verwendete 2d-Modell keine Wasseraustritte ins Umland (Modell istoa_soll, siehe Kap. 3.2.5).

Für den Projektzustand wurde das vorher geeichte Modell des Istzustands übernommen und in den Abschnitten der Rheinaufweitungen Maiefeld/Bad Ragaz und Sargans sowie im Sektor 4 im Einflussbereich des flussabwärts anschliessenden RHESI-Projekts geometrisch angepasst, mitsamt den für den Endzustand prognostizierten Sohlenlagen. Dann erfolgte nochmals eine Eichung, und zwar an den für den Endzustand prognostizierten Wasserspiegellagen aus den hydraulischen Studien der Projekte [4], [10] und [11]. Die zusätzlichen Massnahmen der Systemsicherheit gemäss Kap. 2 wurden erst am Schluss nach erfolgter Eichung eingebaut.

Während des Eichvorgangs wurde das 2d-Modell mit vereinfachtem Rheingerinne iterativ so angepasst, bis seine Wasserspiegellagen E_{HQ_A} und E_{HQ_B} möglichst gut mit denjenigen aus den 1d-Modellen der Vorgängerstudien in den 2d-Modellen übereinstimmten. Insbesondere im Nahbereich der Überströmstrecken und Rückflüsse war eine möglichst gute Übereinstimmung der Abfluss-Wasserspiegel-Beziehung im Bereich der grössten Abflüsse HQ_{100} - HQ_{300} - E_{HQ_A} - E_{HQ_B} zu erreichen. Das Güteziel war eine Übereinstimmung in einer Toleranz-Bandbreite von ± 20 -30 cm.

Bei grösseren Abweichungen wurde den Wasserspiegeln aus dem 1d-Modellen allgemein Priorität zugeordnet und das 2d-Modell angepasst. Eichgrössen waren je nach den örtlichen hydraulischen Verhältnissen:

- Verdichtung des 2d-Modellnetzes innerhalb des Flussschlauchs.
- Geometrische Anpassung der Gerinnebreite an die örtliche Situation.
- Anpassung der Rauigkeitsbeiwerte des Gesamtgerinnes (Streubereich $k_{str} = 28$ -35; Sohle und Böschungen).
- Berücksichtigung kaum durchflossener Vegetationsflächen.
- Anpassung Sohlenlagen, generell und lokal z.B. im Bereich von Schwellen.

Das Resultat des fertig geeichten Modells des Istzustands ist_soll ist im Anhang 7 wiedergegeben und kann wie folgt kurz kommentiert werden:

Im Allgemeinen werden die Toleranzgrenzen gut eingehalten. Bei einigen Stellen war dies aber mittels plausibler Parametereinstellung nicht möglich. Wenn sich diese Abweichungen ausserhalb der interessierenden Abschnitte mit Überströmstrecken oder Rückflüssen befanden, oder wenn aufgrund der örtlichen Situation eine höhere Zuverlässigkeit der 2d-Resultate zu vermuten ist, konnten die Abweichungen toleriert werden.

Im kanalisiertem Abschnitt Untervaz/Trimmis waren die relativ hohen 1d-Wasserspiegel nur mit einem sehr tiefen k_{str} -Wert von 28 zu erreichen. Zudem ist der hydraulische Einfluss der Rheinbrücke mit ihren Pfeilern sowie des naturnahen variablen Abschnitts km 15.6-17.0 unsicher. Bei einer Weiterprojektierung der Massnahmen gemäss Kap. 2.4 wird die Hydraulik dieses Abschnitts vertieft zu untersuchen sein.

Die untere Mastrilser Rheinaue wird bei extremen Hochwassern von der Landquartmündung her eingestaut. Grund dafür ist die im 2d-Modell gut erkennbare Einschnürung des Rheins durch das im 90°-Winkel schnell einströmende Wasser der Landquart. Bei einer künftigen Weiterprojektierung ist dieser Hydraulik eine spezielle Beachtung zu schenken, denn der eingestaute Rheinwasserspiegel bestimmt die Ausdehnung und Intensität der Überflutung im Landquart-Industriegebiet.

Im wichtigen Abschnitt oberhalb der Illmündung, dessen EHQ-Wasserspiegel für die Beaufschlagung der Rückhalteräume von Bangs-Ruggell und Sennwald von entscheidender Bedeutung ist, zeigten sich Differenzen in den Wasserspiegellagen der 1d-Modelle von [7] und [11]. Für die Eichung wurden die jüngeren Resultate von [11] verwendet, welche im Projektzustand auch das aktuelle RHESI-Projekt berücksichtigen. Diese Wasserspiegellagen konnten im unteren, interessierenden Bereich mit dem 2d-Modell sehr gut nachvollzogen werden.

3.2.7 Kopplung der 2d-Modelle (1d-Kopplungsmodell km 40-60)

Auf der Zwischenstrecke km 40.6 bis km 58.8 zwischen den 2d-Modellen sieht das Massnahmenkonzept im Projektzustand keine Wasseraustritte aus dem Rhein in das Umland vor. Im Rahmen der vorliegenden Vertiefungsstudie waren auch für den Istzustand keine Dammbruchszenarien zu berechnen. Dennoch waren die in dieser Zwischenstrecke zu erwartenden hydraulischen Prozesse abzuschätzen:

- Quantitative Abschätzung der Gangliniendämpfung durch die Fließsretention im Rheingerinne.
- Laufzeit der Ganglinie vom Austritt aus dem Modell Felsberg-Trübbach bis zum Eintritt in das Modell Bangs/Sennwald.

Da in dieser Zwischenstrecke nur das instationäre Abflussverhalten, nicht aber die Wasserspiegellagen von Interesse waren, genügte für die Fragestellung ein grobes 1d-Modell mit ungefähr richtiger Gerinnegeometrie, aber genügend kleinen Querprofilabständen. Das Modell wurde an jedem ganzen Flusskilometer durch das reale BAFU-Querprofil von 2011 konstruiert

und dann zwischen diesen Stützstellen mit neun interpolierten, d.h. virtuellen Zwischenprofilen im Abstand von 100 m ergänzt.

Das Modell wurde mit HEC-RAS im instationären Modus betrieben und mit den drei Ganglinien EHQA schmal, EHQB schmal und EHQB mittel beschickt. Es ergab sich wie erwartet eine vernachlässigbar geringe Dämpfungswirkung von $-36 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $-46 \text{ m}^3/\text{s}$ für die schmalen Ganglinien, was weniger als 1% der Ganglinienspitze entspricht. Bei EHQB mittel wird überhaupt keine Dämpfung mehr festgestellt.

Die Laufzeitverzögerung zwischen km 40 und km 60 beträgt bei allen drei Ganglinien rund eine Stunde.

Aufgrund dieser Resultate wurde entschieden, die im oberen 2d-Modell Felsberg-Trübbach bei km 40.6 ausfliessenden Rheinganglinien ungedämpft und mit 1 h Laufzeit im unteren 2d-Modell Bangs/Ruggell bei km 58.8 wieder einzuspeisen.

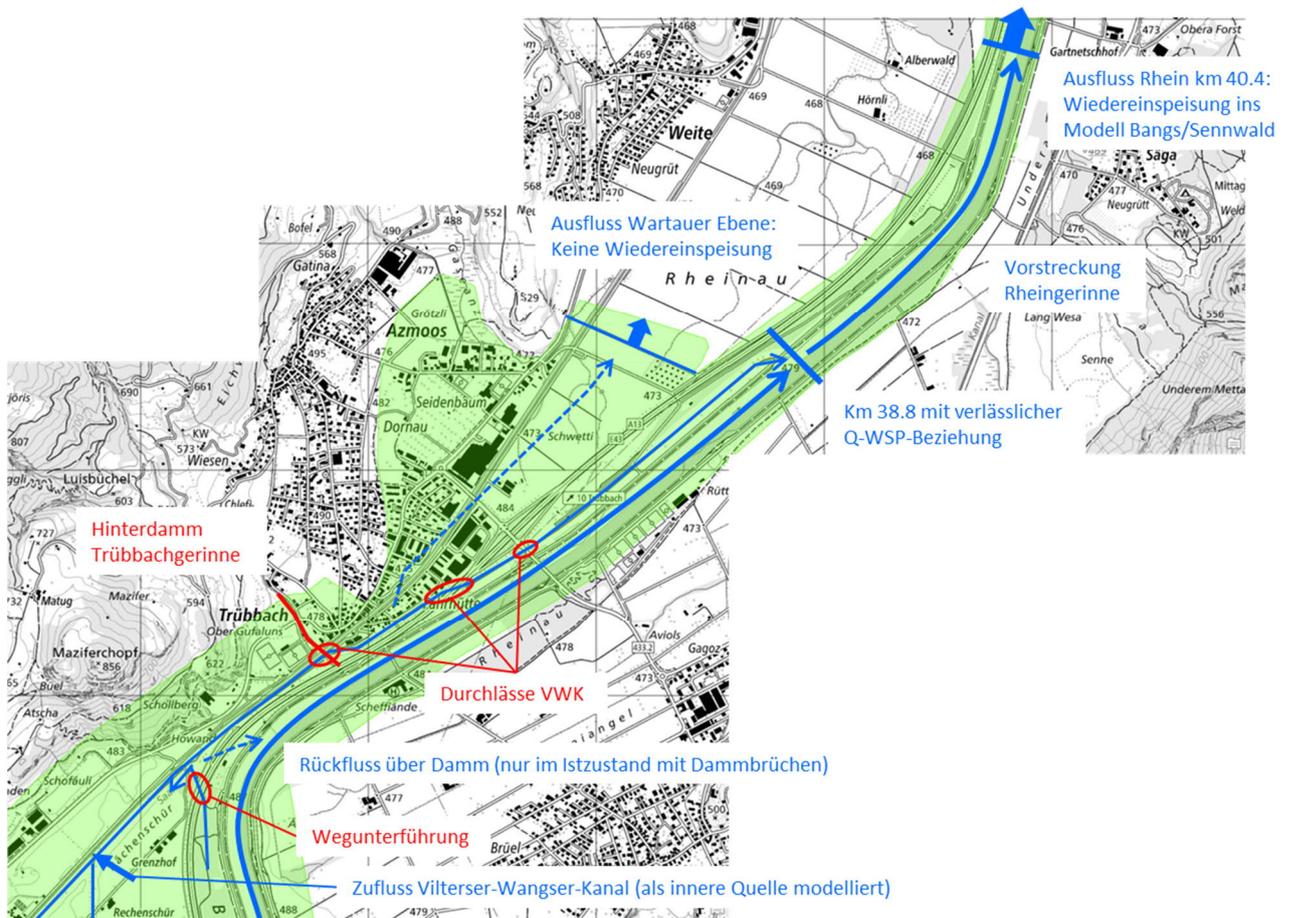


Abbildung 45: Hydraulisch wichtige Elemente am unteren Ende des oberen Modells Felsberg-Trübbach.

3.2.8 Randbedingungen und Inputganglinien

Oberes 2d-Modell Felsberg-Trübbach:

Die Zuflüsse wurden im oberen Modell Felsberg-Trübbach an folgenden fünf Randbedingungen ins Modell eingespeist:

- Rhein Domat/Ems bei km 6.8: äussere Randbedingung im Rheingerinne.
- Plessur: äussere Randbedingung im Plessurgerinne.
- Landquart: äussere Randbedingung im Landquartgerinne.

- Tamina: äussere Randbedingung im Taminagerinne.
- Vilterser-Wangser-Kanal: innere Randbedingung als Quelle beim Zusammenfluss VWK mit der Saar (vgl. Abbildung 45).

Die an diesen Zuflussrandbedingungen angehängten Zwischeneinzugsgebiete sowie die eingespeisten Abflussbeiträge und ihre Ganglinien sind in Kap. 3.1.2 und 0 beschrieben.

Die Ausflüsse aus dem Modell Felsberg-Trübbach werden an folgenden zwei Ausflussrandbedingungen abgegriffen:

- Rhein bei km 40.4, mit Wiedereinspeisung ins untere Modell Bangs/Sennwald bei der Zuflussganglinie, (zeitlich verschoben, vgl. Kap. 3.2.7).
- Linksufrige Ebene bei Azmoos, vgl. Abbildung 45. Es wird angenommen, dass dieser selbst bei EHQ_B moderate Ausfluss in der grossen Ebene von Wartau und Buchs zurückgehalten wird und nicht mehr in Sennwald erscheint.

Ein Ausfluss bei Mels in Richtung Seeztal findet auch bei den grössten modellierten Wasserständen nicht statt.

Unteres 2d-Modell Bangs/Sennwald:

Die Zuflüsse werden im unteren Modell Bangs/Sennwald an folgenden vier Randbedingungen ins Modell eingespeist, wobei nur drei davon aktiv für die Berechnungen genutzt wurden:

- Werdenberger Binnenkanal: äussere Randbedingung oberhalb des Autobahnanschlusses Sennwald, etwa auf Höhe von km 57.9 links.
- Rheintaler Binnenkanal Sennwald: äussere Randbedingung nach Einmündung des Steinenbachs (inaktiv).
- Rhein und LBK: äussere Randbedingung im Rheingerinne bei km 58.8, etwa auf Höhe des Freizeitparks unterhalb Ruggell. Der Zufluss des Liechtensteiner Binnenkanals wird an der gleichen Randbedingung zusammen mit dem Rhein eingespeist¹⁴.
- Spiersbach: innere Randbedingung (Modellquelle beim Zusammenfluss von Spiersbach und Unterriedgraben, etwa auf Höhe km 63.2 rechts).

Die Ausflüsse aus dem Modell Bangs/Sennwald wurden an folgenden zwei Ausflussrandbedingungen abgegriffen, wovon bei den berechneten Szenarien jedoch nur der Rhein einen aktiven Ausfluss erhält:

- Rheintaler Binnenkanal unterhalb der Rillisschleuse, etwa auf Höhe km 61.6 links (inaktiv¹⁵).
- Rhein bei km 68.6.

Eine Überströmung oder ein Bruch des rechten, nördlichen Damms der III wurde in den Modellrechnungen nicht berücksichtigt bzw. untersucht.

Synchronisation der Inputganglinien:

Da bei den Zuflüssen der jeweilige Abflussbeitrag zum EHQ im Rhein eingespeist wird, waren deren Inputganglinien so zu synchronisieren, dass ihre Abflussspitze etwa zeitgleich mit derjenigen des Rheins im Rhein eintrifft. Die Laufzeit der Hochwasserspitz im Rhein, d.h. die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Hochwasserspitz, ist nicht zwingend identisch mit der Fliessgeschwindigkeit des Wassers. Sie wurde am Modell des Istzustands ohne Wasseraustritte (Modell ist_oa) abgegriffen und beträgt rund 4-5.5 m/s. Mit Ausnahme des Werdenberger Binnenkanals, wo eine Laufzeit von rund einer Viertelstunde für den 5.1 km langen Abschnitt bis zu seiner Mündung eingerechnet wurde, waren nur die Laufzeiten im Rhein zu berücksichtigen. Diejenige in den übrigen kurzen Mündungsstrecken war vernachlässigbar.

Sowohl die Form der Inputganglinien (vgl. Kap. 3.1.5) wie auch der Zeitpunkt deren Spitze sind so konditioniert, dass sich im Modell ohne Wasseraustritte entlang des Rheins etwa die

¹⁴ Diese Vereinfachung war zulässig, da in der Zwischenstrecke keine Überströmstrecken oder Rückflüsse stattfinden.

¹⁵ Das Modell Bangs/Sennwald wurde so konditioniert, dass in keinem Szenario ein Ausfliessen über den Hinterdamm Büchel nach Norden auftritt.

ungedämpfte hydrologische Abflussspitze sowie in Bad Ragaz die dort geltende Musterganglinie entstehen.

Die Laufzeit sowie die Inputganglinien schmal/mittel/breit sind im Anhang 8 aufgeführt. Eine Kontrollrechnung mit dem Szenario EHQBschmal_istoa_soll ergab ein ausgezeichnetes gleichzeitiges Zusammentreffen der Abflussspitzen von Zuflüssen und Rhein, sowie eine nur leichte Abnahme der Abflussspitze im Vergleich zur hydrologischen Spitze, welche gut durch eine geringe Fließretention im Rheingerinne selbst erklärbar ist (vgl. Kap. 3.6.2).

Abflussbeiträge von III, Frutz und Ehbach:

Die Abflussbeiträge der III, der Frutz und des Ehbachs gelangen unterhalb der hydraulischen Modelle in den Rhein. Ihr hydraulisches Dämpfungsverhalten war nicht Gegenstand der vorliegenden Abklärungen. Für die Auswertung der Abflussspitzen in Kap. 3.4.2 und Anhängen 12 und 13 werden diese Abflussbeiträge sicherheitshalber in ihrer ungedämpften hydrologischen Grösse gemäss Kap. 3.1.2 und Anhang 6 dem Rhein zugegeben.

Die auf der sicheren Seite liegende Annahme einer vernachlässigbaren Dämpfungswirkung lässt sich für die III wie folgt begründen: Ihr ungedämpfter hydrologischer Abflussbeitrag an das Extremereignis des Rheins entspricht gemäss Kap. 3.1.2 und Anhang 6 in der Grössenordnung einem $HQ_{100III} - HQ_{300III}$ in der III selber. Nach Realisierung der in Feldkirch geplanten Hochwasserschutzprojekte ist anzunehmen, dass das bordvolle Gerinne diese Abflussmenge bis zum Unterlauf durchzuleiten vermag. In der dortigen Überströmstrecke¹⁶ findet dann zwar eine Entlastung der III nach links in den Rückhalteraum Partenwiesen statt. Da diese Entlastung aber im Hochwasserverlauf¹⁷ relativ früh anspringt (ab HQ_{30III}), und da im späteren Hochwasserverlauf auch der Rhein durch die offene Spiersbachmündung massiv ausfließt, ist der Rückhalteraum zum Zeitpunkt der EHQ-Spitze bereits komplett gefüllt und hat kaum mehr eine rückhaltende Wirkung. Das aus der III ausfließende Wasser gelangt somit direkt und ungedämpft wieder in das hydraulische System des Rheins.

Die Rolle der III-Überströmstrecke Illspitz für das hydraulische System des Rheins wurde in Kap. 2.9.4 diskutiert, und wie sie nach Realisierung des RHESI-Projekts angepasst werden sollte, um eine optimale Entlastungswirkung für die Extremereignisse im Rhein zu erzielen.

3.3 Szenariendefinition

3.3.1 Vorgehen im Umgang mit Unsicherheiten

Da der Ablauf eines Extremereignisses von einer Vielzahl von Unsicherheiten und zufälligen, kaum verlässlich berechenbaren Prozessen geprägt ist, sind sämtliche Prognosen zu einer hydraulischen Dämpfungswirkung unscharf und mit einer Streuung behaftet. Es geht nun darum, nicht nur die wahrscheinlichen Mittelwerte dieser Dämpfungswirkung, sondern auch deren Streuung zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurde eine Vielzahl von Szenarien mit Variation der wichtigsten Einflussgrößen berechnet und ausgewertet.

Zur Abdeckung der in der Natur möglichen Streuung wird nicht nur die hydrologische Ganglinie des Extremereignisses, sondern auch dessen hydraulischer Ablauf variiert. Das Ausmass und die Effizienz einer Hochwasserdämpfung ist im Wesentlichen von zwei Prozessen abhängig, welche für ein optimales Dämpfungsergebnis aufeinander abgestimmt sein müssen:

1. Zeitpunkt des Anspringens und Grösse des Entlastungsausflusses bei den Überströmstrecken.
2. Grösse des Rückhaltevolumens in der Geländekammer, bis es wieder zu einem Rückfluss in den Rhein kommt.

Die Relation Wasserstand-Rückhaltevolumen-Rückfluss der Geländekammern ist von der Topografie der Geländekammern sowie vom hydraulischen Verhalten der Rückflussbereiche

¹⁶ Im Unterlauf wird der tiefere linke Ildamm überströmsicher ausgebildet und dadurch eine Überströmstrecke geschaffen. Unter Beibehaltung der heutigen Dammhöhe ufert die III etwa ab einem $HQ_{30,III}$ nach links aus.

¹⁷ Hochwasserszenario EHQ_{Rhein} , Abflussbeitrag der III ca. $HQ_{100III} - HQ_{300III}$

abhängig. Beide Faktoren sind relativ zuverlässig hydraulisch berechenbar und sind in den 2d-Modellen genügend genau nachgebildet. Zudem darf angenommen werden, dass sie sich auch während Extremereignissen einigermassen stabil und voraussehbar verhalten werden.

Hingegen sind die Entlastungsausflüsse mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da sie entscheidend vom Wasserspiegel abhängig sind, welcher sich lokal bei den Überströmstrecken einstellt. Diese Wasserspiegellage ist wiederum abhängig von vielen weiteren, bei einem Extremereignis unsicheren Einflussfaktoren wie Sohlenlage, Vegetation, Rauigkeit, Verklausungen, hydraulisches Abflussverhalten, hydrodynamische Effekte usw. Erfahrungen von Grossereignissen an vergleichbaren Flüssen zeigen, dass die in der Natur gemessenen Wasserspiegellagen durchaus in der Grössenordnung von ± 50 cm um einen mittleren, berechneten Wert variieren können.

Im heutigen Istzustand kommt zusätzlich noch die Unsicherheit bezüglich der Damm- und Uferstabilität hinzu, welche das lokale und zeitliche Auftreten von Dammbürchen steuert. Die Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen in [9] zeigen, dass an den Dämmen SG/FL bei einem Extremereignis über weite Strecken mit einem erheblichen Dammbürchrisiko gerechnet werden muss. An den Dämmen im Kanton Graubünden liegen keine entsprechenden Untersuchungen vor, aber es wird vermutet, dass das Dammbürchrisiko aufgrund ihres alten und schmalen Querschnitts noch deutlich grösser sein wird.

Eine weitere Unsicherheit ergibt sich auch auf der politischen oder wirtschaftlichen Ebene bezüglich der weiteren Umsetzung des vorgeschlagenen Massnahmenkonzeptes. Es war zusätzlich auch abzuschätzen, wie sich das System verhalten wird, wenn nur ein Teil der Massnahmen realisiert werden kann.

3.3.2 Variation des Istzustands

Die Szenarien des Istzustands wurden unter Variation der folgenden Einflussgrössen definiert:

- Hydrologie:
 - Hydrologische Abflussspitze: EHQ_A und EHQ_B
 - Breite der hydrologischen Ganglinie: Musterganglinien schmal/mittel/breit
- Gerinne Istzustand, an den 1d-Wasserspiegellagen geeicht:
 - Ist_{soll} : ohne Ausfluss aus dem Gerinne (hydrologisches Eichszenario ohne Dämpfung)
 - Ist_{soll} : mit Ausfluss aus dem Gerinne in die Ebene, ohne Dammbürche
- Auftreten von Dammbürchen an den Stellen mit voraussichtlich kritischer Stabilität. Die Variation erfolgte sektorweise:
 - DB1: Alle Dammbreschen im Sektor 1 von Felsberg bis Landquart geöffnet
 - DB2: Alle Dammbreschen im Sektor 2 von Landquart bis Tamina geöffnet
 - DB3: Alle Dammbreschen im Sektor 3 von Tamina bis Trübbach geöffnet
 - DB4S: Alle Dammbreschen im Sektor 4 am linksufrigen Damm Seite Sennwald geöffnet
 - DB4B: Alle Dammbreschen im Sektor 4 am rechtsufrigen Damm Seite Bangs-Ruggell geöffnet

Die Lokalisierung der Dammbreschen ist im Anhang 10 ersichtlich. Sie wurden an Stellen mit voraussichtlicher Instabilität platziert, wozu für den Rheinabschnitt SG/FL das geotechnische Längenprofil in [9] konsultiert wurde. Im Bündner Abschnitt erfolgte die Lokalisierung anhand der visuellen Beurteilung des Dammszustands sowie anhand der bei einem EHQ_A stattfindenden Dammüberströmungen.

Eine Breschenbildung nur infolge einer Überströmung ist praktisch nur im Sektor 1 möglich.

Verklausungsszenarien wurden nicht berücksichtigt, da die Brücken entlang des untersuchten Rheinabschnitts wenig verklausungsanfällig sind und ein grosses Freibord aufweisen.

Auflandungsszenarien werden gegenüber den Dammbürchrisikoszenarien als zweitrangig eingeschätzt und deshalb für den Istzustand nicht variiert. Hingegen wurde bei denjenigen Dammbreschen eine Sohlenaufandung angenommen, wo ein massiver Wasserverlust aus dem Rhein stattfindet.

Die Breschenlänge wurde gutachtlich festgelegt und beträgt rund 1.0-1.5x der Gerinnebreite. Es wurde angenommen, dass die Dämme bis zu ihrem Sockel und mit einem Erosionsgefälle von rund 5% erodieren.

3.3.3 Variation des Projektzustands

Die Szenarien des Projektzustands wurden unter Variation der folgenden Einflussgrößen definiert:

- Hydrologie:
 - Hydrologische Abflussspitze: EHQ_A und EHQ_B
 - Breite der hydrologischen Ganglinie: Musterganglinien schmal/mittel/breit
- proj_soll: Gerinne Projektzustand, an den 1d-Wasserspiegellagen geeicht
- proj_tief: Projektzustand mit abschnittsweise zu tiefem Wasserspiegel
 - tief1: Sohleneintiefung 0.6 m im Sektor 1 von Felsberg bis Landquart
 - tief2: Sohleneintiefung 0.6 m im Sektor 2 von Landquart bis Tamina
 - tief3: Sohleneintiefung 0.6 m im Sektor 3 von Tamina bis Trübbach
 - tief4: Sohleneintiefung 0.6 m im Sektor 4 Sennwald / Bangs
- proj_hoch: Projektzustand mit abschnittsweise zu hohem Wasserspiegel
 - hoch1: Sohlenhebung 0.6 m im Sektor 1 von Felsberg bis Landquart
 - hoch2: Sohlenhebung 0.6 m im Sektor 2 von Landquart bis Tamina
 - hoch3: Sohlenhebung 0.6 m im Sektor 3 von Tamina bis Trübbach
 - hoch4: Sohlenhebung 0.6 m im Sektor 4 Sennwald / Bangs
- proj_ohne: Projektzustand mit abschnittsweise nicht umgesetzten Massnahmen System-sicherheit
 - ohne1: ohne Massnahmen im Sektor 1 von Felsberg bis Landquart
 - ohne2: ohne Massnahmen im Sektor 2 von Landquart bis Tamina
 - ohne3: ohne Massnahmen im Sektor 3 von Tamina bis Trübbach
 - ohne4S: ohne Massnahmen im Sektor 4 Seite Sennwald
 - ohne4B: ohne Massnahmen im Sektor 4 Seite Bangs

Eine Sohleneintiefung von 0.6 m verursacht eine Wasserspiegelabsenkung etwa in derselben Grössenordnung. Die Wasseraustritte an den Überströmstrecken springen später an und sind weniger intensiv. Hingegen verbleibt mehr Wasser im Rhein, und die Dämpfungswirkung ist in der Regel geringer.

Eine Sohlenanhebung von 0.6 m verursacht eine Wasserspiegelanhebung etwa in derselben Grössenordnung. An einer Überströmstrecke verursacht dies eine frühere und stärkere Entlastung.

Die Sohleneintiefung bzw. -anhebung erfolgt nicht nur lokal bei den Überströmstrecken, sondern über die ganze Länge des jeweiligen Sektors.

Die Bandbreite der Sohlen- bzw. Wasserspiegelvariation von ± 0.6 m entspricht etwa der Grössenordnung des Teilfreibords f_w (Unschärfe bezüglich Wasserspiegellage) gemäss Freibordempfehlung nach KOHS für ein Extremereignis am Alpenrhein abgeschätzt.

3.3.4 Einordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit

Eine exakte Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeit der Szenarien war im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich und ergäbe wahrscheinlich aufgrund der grossen Unsicherheiten im Ablauf eines Extremereignisses wenig Sinn. Dennoch wurde versucht, die Häufigkeit der Szenarien gutachtlich grob einzuordnen und miteinander zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurde jedes Szenario mit einem Gewicht von 1-9 versehen, welches sich als Produkt aus dem Gewicht 1-3 des hydrologischen Szenarios (EHQ_A/EHQ_B bzw. schmal/mittel/ breit) mal dem Gewicht 1-3 der lokalen Eintretenswahrscheinlichkeit (Dammbruch, hoher/tiefer Wasserspiegel) zusammensetzt. Ein Szenario mit einem höheren Gewicht hat auch eine höhere Eintretenswahrscheinlichkeit als ein Szenario mit kleinerem Gewicht.

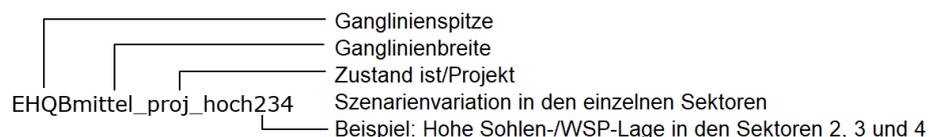
Die gutachtliche Einschätzung der Wahrscheinlichkeits-Gewichte erfolgte etwa entlang der folgenden Argumentationslinien:

- Eine hydrologische Abflussspitze EHQ_A ist häufiger als eine des EHQ_B , war aber für die vorliegende Fragestellung nicht zu gewichten.
- Eine schmale Ganglinienform ist häufiger als eine mittelbreite, und diese wiederum häufiger als eine breite. Das gleichzeitige Auftreten einer extremen Hochwasserspitze verbunden mit einer sehr breiten, voluminösen Ganglinie wird als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt. Die entsprechenden Szenarien mit breiter Ganglinie eignen sich daher als wenig wahrscheinliche Worst-case-Szenarien.
- Ein EHQ_B ganz ohne Damnbrüche wird als unwahrscheinlich eingeschätzt. Aufgrund ihres schlechten Zustands und ihrer Überströmung werden die Dämme im Sektor 1 mit nahezu an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit brechen. Da diese Damnbrüche im Sektor 1 die Hochwasserganglinie kaum dämpfen, verbleibt auch in den übrigen Sektoren ein erhebliches Dambruchrisiko.
- Bei einem EHQ_B mit mittlerer Ganglinie steigt das Risiko für Damnbrüche generell an, weil die Dämme länger belastet sind. Trotzdem resultiert aufgrund der kleineren hydrologischen Wahrscheinlichkeit ein kleineres Gesamtgewicht als bei der schmalen Ganglinienform.
- Im Projektzustand wird der Regellastfall mit Soll-Sohle als wahrscheinlicher als die Abweichungen «hoch» und «tief» eingeschätzt, da es sich bei den Sohlenlagen und 1d-Wasserspiegeln um eine bestmögliche Schätzung handelt.
- Die Wahrscheinlichkeit der Szenarien mit hoher bzw. tiefer Sohlen- und Wasserspiegel-lage hängt von der Einschätzung ab, wie sich der entsprechende Abschnitt im EHQ -Fall verhalten könnte. Entsprechende Hinweise werden in der Bemerkungsspalte in der Tabelle Anhang 11 gegeben.
- Den Szenarien mit unvollständiger Projektrealisierung konnte keine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Sie sind nicht Gegenstand der statistischen Auswertung in Kap. 3.5.

Es ist zu beachten, dass sämtliche untersuchten Szenarien im absoluten Hochwasservergleich extrem seltene Ereignisse darstellen. Selbst die häufigeren, mit 6 oder 9 hoch gewichteten Szenarien haben immer noch eine Jährlichkeit von bis über 1'000 Jahren.

3.3.5 Zusammenstellung aller berechneten Szenarien

Sämtliche mit den hydraulischen Modellen berechneten 62 Szenarien sind in der Tabelle Anhang 11 mitsamt ihrer Gewichtung zusammengestellt. Die Szenarienbezeichnung hat die folgende Systematik:



3.4 Modellberechnung und Berechnungsergebnisse

3.4.1 Modellberechnung und Abgriff der Resultate

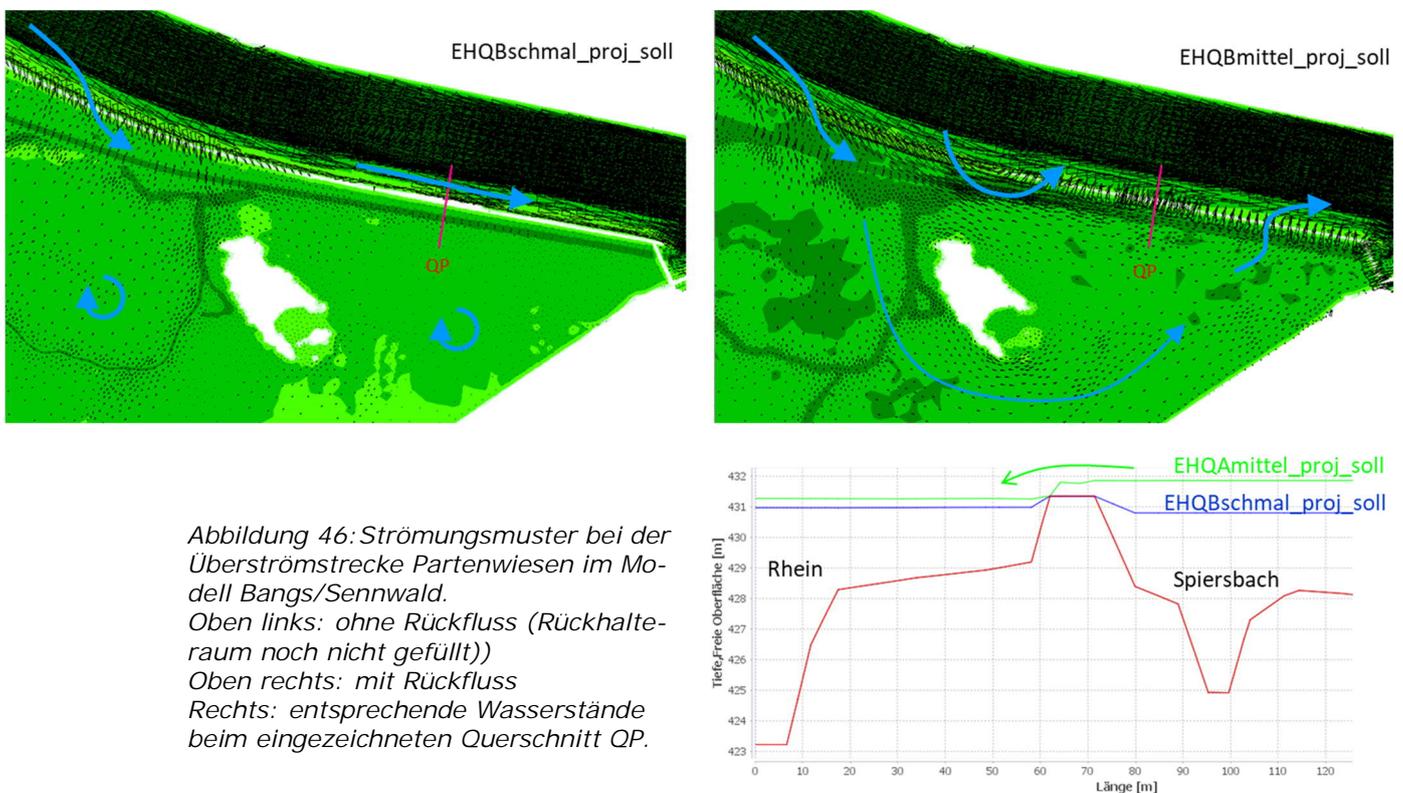
Die Berechnung der 2d-Modelle erfolgte mit dem Programm Telemac-2d. Es wurde instationär und mit Reinwasser und fester Sohle betrieben. Veränderungen in der Topografie wie z.B. Sohlenveränderungen, Damnbrüche oder erodierbare Dammkronen waren bereits zu Beginn der jeweiligen Berechnung fest eingebaut. Diese vorsichtige Vereinfachung erschien vertretbar und lieferte Resultate eher auf sicherer Seite.

Jedes Szenario musste zweimal berechnet werden: zuerst mit dem oberen Modell Felsberg-Trübbach und dann mit dem unteren Modell Bangs/Sennwald, wobei die an der unteren

Randbedingung des oberen Modells abgegriffene Ganglinie unter Berücksichtigung der Laufzeit im unteren Modell wieder eingespeist wurde.

Zur Verfolgung des instationären Hochwasserverlaufs wurde ein Netz von Durchflussquerschnitten über die Modelle gelegt, mit denen der Hochwasserdurchfluss während der Modellberechnung nicht nur entlang des Rheins, sondern auch bei den Aus- und Rückflüssen sowie an wichtigen Stellen innerhalb des Überflutungsgebiets gemessen und herausgeschrieben werden konnte. Im oberen Modell Felsberg-Trübbach erfolgte diese Durchflussmessung an 89 Querschnitten für den Istzustand und 83 Querschnitten für den Projektzustand, im unteren Modell Bangs/Sennwald an 17 Querschnitten sowohl für den Ist- wie auch für den Projektzustand.

Die Modelle speicherten an jedem Modellknoten die Wassertiefe, die Fliessgeschwindigkeit und die Fliessrichtung in Halbstundenschritten ab. Diese Daten erlaubten nicht nur die Abgrenzung der maximalen Überflutungsintensitäten, sondern auch die detaillierte Verfolgung der Überflutungsausbreitung und der entstehenden Strömungsmuster.



3.4.2 Hochwasserganglinien

Die ausgewerteten Hochwasserganglinien und Abflussspitzen werden in den Anhängen 12 und 13 in Form von Ganglinienscharen an vier ausgewählten Querschnitten sowie in einem Längsprofil der Abflussspitzen dargestellt. Diese Grafiken enthalten die folgenden Informationen:

- Schwarze horizontale Linie in den Ganglinien bzw. schwarze Treppenstufe im Längsprofil: hydrologische Abflussspitze gemäss Kap. 3.1.2.
- Graue dünne Linien: Kurvenschar von allen berechneten und ausgewerteten Szenarien.
- Farblich nachgezogene Linien: je nach Fragestellung der Auswertung speziell farblich hervorgehobene Szenarien (siehe Legende in der jeweiligen Grafik)

Die je vier Ganglinien-Diagramme wurden je an einem Knoten am unteren Ende der vier Sektoren abgegriffen, und umfassen jeweils den gesamten benetzten Abflussquerschnitt:

- Nach Sektor 1, km 23.28: Rheinquerschnitt in Verlängerung des linken Damms der Landquart, d.h. unmittelbar nach dem Rückfluss aus der Überflutung Igis-Landquart und dem Zufluss der Landquart.

- Nach Sektor 2:
 - Im Istzustand bei km 30: nach Rückfluss beim Maienfelder Mühlbach und vor den Dammbreschen Fläsch und Sargans_oben.
 - Im Projektzustand¹⁸ bei km 33: nach Rückfluss aus der Geländekammer Fläsch und vor der Überströmstrecke der Sarganser Aufweitung.
- Nach Sektor 3, km 40: Rheinquerschnitt am unteren Ende des Modells Felsberg-Trübbach, nach der Mündung des Vilterser-Wangser-Kanals bzw. des Rückflusses aus der Geländekammer Sargans, sowie nach dem Austritt über das linke Ufer des VVK bei Trübbach in die Wartauer Ebene. Dieser Abflussquerschnitt erfasst nur das Rheingerinne zwischen den Hochwasserdämmen, ohne Überflutung in der Wartauer Ebene.
- Nach Sektor 4, km 65: Nach Spiersbachmündung bzw. Rückfluss aus der Geländekammer Bangs-Ruggell, sowie unmittelbar oberhalb der Illmündung und dem Kraftwerkauflauf.

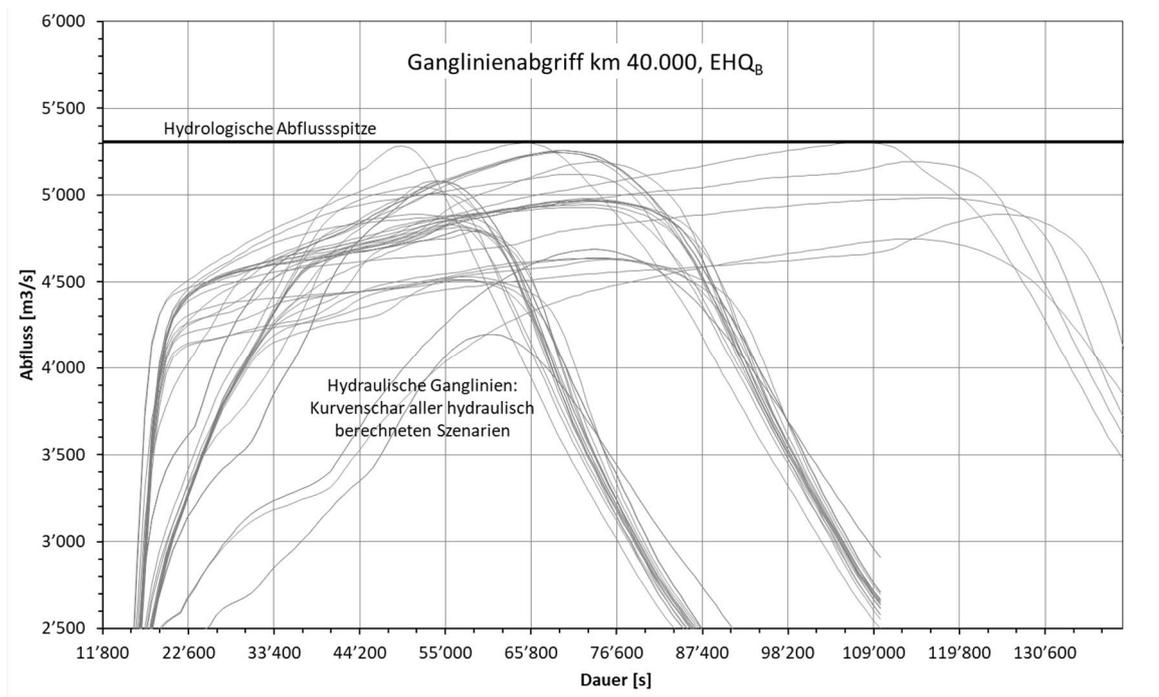


Abbildung 47: Hochwasserganglinien am Knoten km 40.0 (noch ohne farbliche Hervorhebung einzelner Szenarien).

3.4.3 Längenprofil der Abflussspitzen

Das Längenprofil-Diagramm in den Anhängen 12 und 13 ist in ähnlicher Weise aufgebaut wie die Ganglinien gemäss Kap. 3.4.2. Es zeigt nebeneinander die drei Rheinabschnitte:

- Km 6-40: oberes Modell Felsberg-Trübbach.
- Km 58.8-65: unteres Modell Bangs/Sennwald.
- Km 65-70: oberster Abschnitt der Internationalen Rheinstrecke bis und mit Frutz und Ehbach.

Bis km 65 entspricht der Verlauf der hydraulischen Abflussspitzen (graue Kurvenschar) den Ergebnissen aus der hydrodynamischen Berechnung der beiden Modelle. Getreu den Randbedingungen-Vorgaben aus Kap. 3.2.7 wird die bei km 40 aus dem oberen Modell ausfliessende Abflussspitze bei km 58.8 ungedämpft in das untere Modell eingespeist, zusammen mit dem bereits an dieser Stelle zugegebenen Zufluss aus dem Liechtensteiner Binnenkanal.

¹⁸ Im Auswertungsquerschnitt km 33 des Istzustands wurde die rechtsseitige Umströmung bei der Fläscher Badaue noch nicht richtig erfasst.

Zwischen km 65 und 70 werden bei allen Szenarien die hydrologischen Abflussbeiträge aus der Ill und aus der Frutz (gemeinsam mit Ehbach) dem Rhein zugeführt (Treppenstufen in der schwarzen Linie). Eine Untersuchung der hydraulischen Dämpfung dieser Zuflüsse war nicht Gegenstand der Untersuchung, bzw. wird aus den in Kap. 3.2.8 genannten Gründen vorsichtigerweise nicht berücksichtigt.

Alle grauen oder farblich hervorgehobenen Kurven liegen unter der schwarzen Linie, da die hydraulischen Extremereignis-Abflüsse grundsätzlich nicht höher sein können als die hydrologischen Extremereignis-Abflüsse¹⁹.

Ein abfallender Verlauf in den hydraulischen Kurven bedeutet eine Entlastung durch Wasseraustritte aus dem Rheingerinne, ein ansteigender Kurvenverlauf hingegen ein Abflussbeitrag eines einmündenden Zuflusses oder ein Rückfluss aus dem Überflutungsgebiet zurück in den Rhein. Wie die gezackten Linien z.B. in den Sektoren 1 und 2 zeigen, kann ein starker Rückfluss einen Entlastungseffekt weitgehend wieder zunichte machen. Ein Dämpfungseffekt ist nur dann gegeben, wenn sich flussabwärts des Rückflusses eine Netto-Abnahme zwischen der hydraulischen Kurve und der hydrologischen Kurve ergibt. Geeignete Kontrollquerschnitte, welche den gesamten Abfluss erfassen, sind die in Kap. 3.4.2 genannten vier Knoten bei km 23.28, 30 bzw. 33, 40 und 65; je am unteren Ende der vier Sektoren.

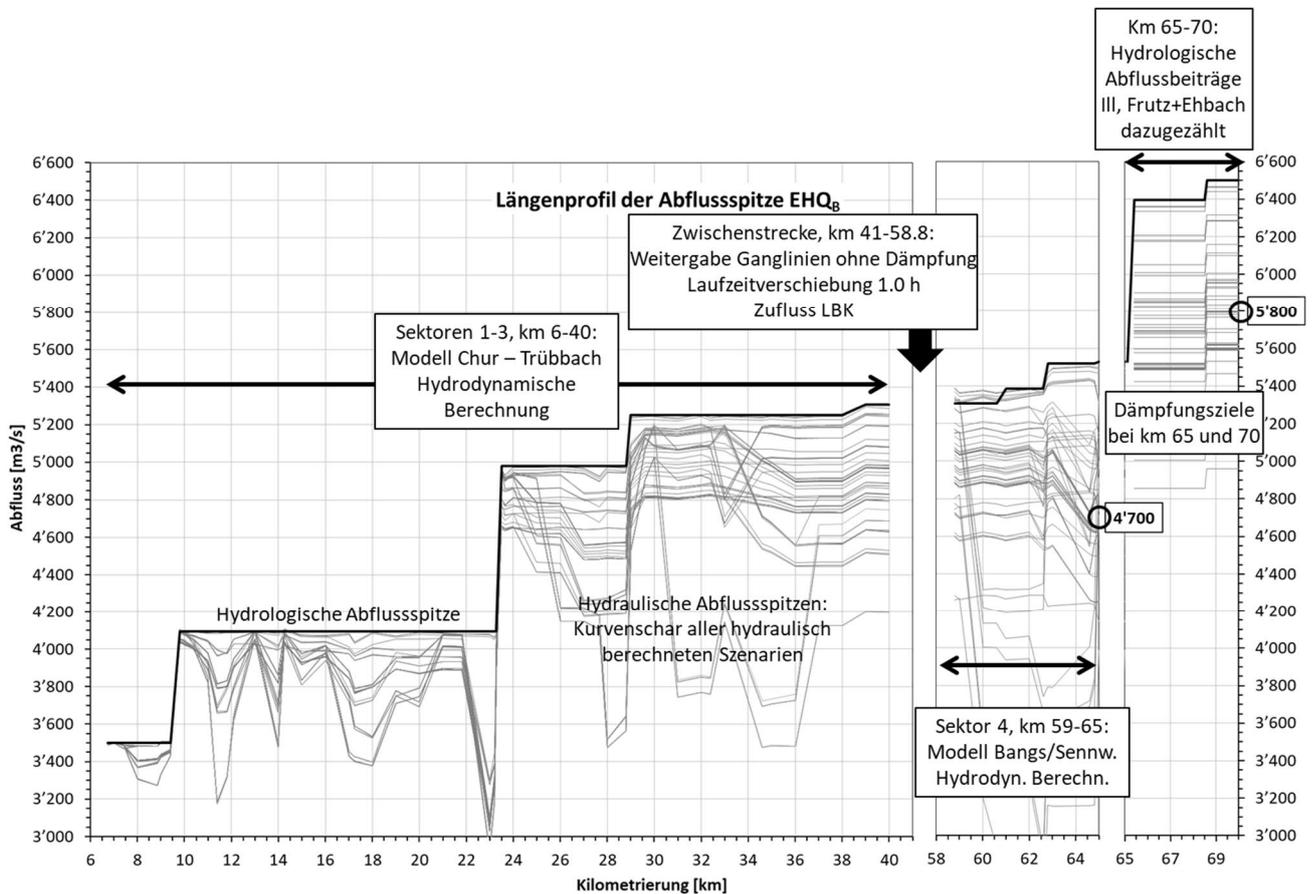


Abbildung 48: Längenprofil der Abflussspitzen (noch ohne farbliche Hervorhebung einzelner Szenarien).

¹⁹ Ausnahme bildet der Abschnitt km 58-60, wo in der hydraulischen Berechnung der Zufluss des LBK vereinfachend bereits dem Rhein zugegeben wird. Aus diesem Grund sind hier die ungedämpften Abflüsse istoa höher als die hydrologischen Werte.

3.4.4 Szenarienvergleich

In den Anhängen 12 und 13 werden zwei Vergleiche zu den Szenarien des Istzustands und sechs Vergleiche zu den Szenarien des Projektzustands vorgenommen:

- Dämpfung EHQ_B im Istzustand; schmale Ganglinie, Dammbuchszszenarien im Vergleich mit dem Istzustand ohne Wasseraustritte (istoa_soll), und dem Istzustand ohne Dammbüche (ist_soll).
- Dito für mittlere Ganglinie.
- Dämpfung EHQ_B im Projektzustand für verschiedene Ganglinienvolumen, Im Vergleich mit den ungedämpften Szenarien (istoa).
- Dämpfung EHQ_B im Projektzustand und Istzustand, schmale und mittlere Ganglinie, Vergleich Soll-Projektzustand zum Istzustand ohne Dammbüche.
- Dämpfung EHQ_B im Projektzustand mit sektorweise zu tiefem Wasserspiegel; schmale Ganglinie.
- Dito für mittlere Ganglinie.
- Dämpfung EHQ_B im Projektzustand mit sektorweise zu hohem Wasserspiegel; schmale Ganglinie.
- Dito für mittlere Ganglinie.

Die aus diesen Vergleichen hervorgehenden Feststellungen werden im folgenden Kapitel diskutiert.

3.5 Statistische Auswertung des hydraulischen EHQ_B

3.5.1 Vorgehen

An den beiden Kontrollquerschnitten km 65, unmittelbar vor der Einmündung der III, sowie km 70, nach Einmündung von Frutz und Ehbach, wurden die gedämpften hydraulischen Abflussspitzen der verschiedenen Szenarien statistisch ausgewertet, damit sie mit dem jeweiligen Dämpfungsziel gemäss Kap. 3.1.4 verglichen werden konnten.

Die statistische Auswertung erfolgte nur mit den EHQ_B -Szenarien, da zu untersuchen war, wie diese grossen hydrologischen Abflusswerte auf höchstens das EHQ_A (Dämpfungsziel; siehe Kap. 3.1.4) hinuntergedämpft werden können.

Die einzelnen Szenarien flossen proportional zu ihrem Wahrscheinlichkeits-Gewicht gemäss Tabelle Anhang 11 in die statistische Auswertung ein. Beispielsweise hatte das Szenario *EHQB-schmal_proj_tief1* mit Gewicht 6 ein doppelt so grosses statistisches Gewicht als das Szenario *EHQB-schmal_proj_tief4* mit Gewicht 3, da die Wahrscheinlichkeit einer Sohlenerosion in der Bündner Strecke als höher eingestuft wird als innerhalb des Sektors 4.

Statistisch ausgewertet wurden alle EHQ_B -Projektszenarien proj_soll, proj_tief und proj_hoch, sowie die EHQ_B -Szenarien des Istzustands. Die Auswertung erfolgte für den Projektzustand und den Istzustand getrennt, wobei für den Letzteren einmal sämtliche Istzustands-Szenarien ausgewertet wurden, und einmal nur die Szenarien Ist_soll ohne Dammbüche.

Die fiktiven Szenarien ohne Wasseraustritte sowie die Szenarien mit nur teilweiser Projektrealisierung waren hingegen nicht Gegenstand der Auswertung.

3.5.2 Resultate bei km 65, vor der III mündung

Beim Knoten km 65 unmittelbar vor dem Zufluss der III ergab die statistische Auswertung der hydraulischen Abflussspitzen EHQ_B die folgenden Resultate.

Es ist zu beachten, dass die Auswertung ohne Dammbüche nur auf einer sehr kleinen «Stichprobe» von zwei Szenarien beruht.

Statistische Auswertung (m^3/s)	$\bar{\emptyset}$	s	m	n	min - max
Istzustand (alle Szenarien)	4'830	± 411	15	78	3'990 - 5'340
Istzustand ohne Dammbürche (kleine Stichprobe)	5'100	± 194	2	5	4'960 - 5'310
Mit Massnahmen Systemsicherheit	4'680	± 224	29	105	4'250 - 5'190
Dämpfungsziel	4'700				

Abbildung 49: Ergebnisse der statistischen Auswertung der hydraulischen Abflussspitzen EHQ_B bei km 65:

$\bar{\emptyset}$: arithmetischer Mittelwert

s: Streuung, Standardabweichung

m: Anzahl ausgewerteter Szenarien (Stichprobe)

n: gewichtete Stichprobe

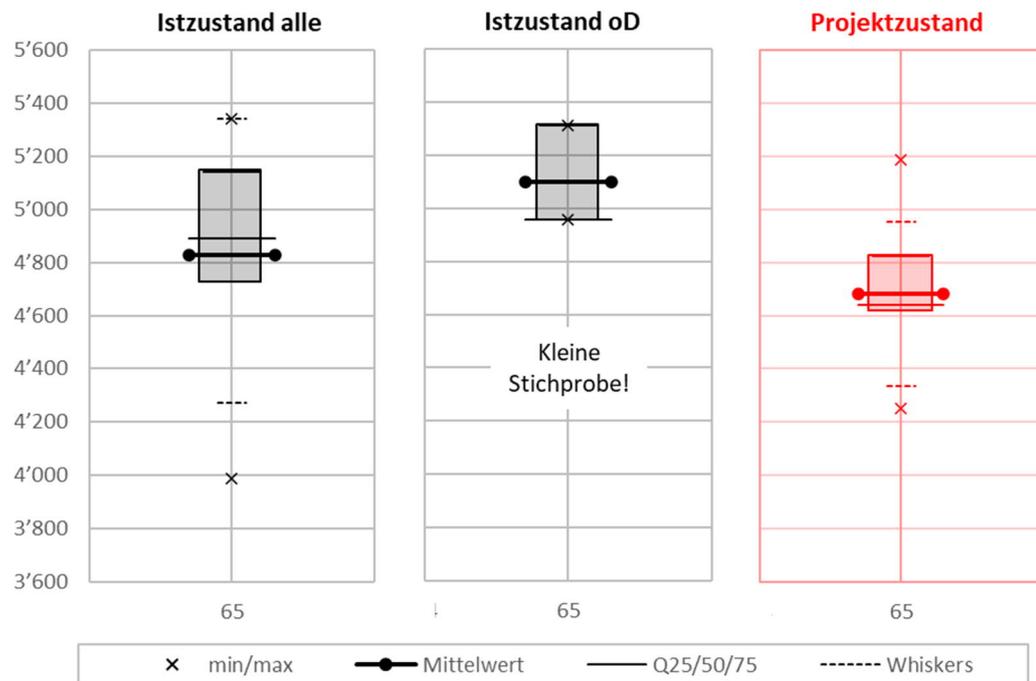


Abbildung 50: Box-Plot der statistischen Auswertung bei km 65. Istzustand: Istzustand alle Szenarien inkl. Dammbürche, Istzustand oD ohne Dammbürchenszenarien sowie Projektzustand.

3.5.3 Resultate bei km 70, nach III, Frutz und Ehbach

Beim Knoten km 70 nach dem Zufluss der Frutz und dem Ehbach ergab die statistische Auswertung der hydraulischen Abflussspitzen EHQ_B die folgenden Resultate.

Die Auswertung des Istzustands ohne Dammbüche beruht auf einer sehr kleinen «Stichprobe» von nur zwei Szenarien.

Statistische Auswertung (m^3/s)	\emptyset	s	m	n	min - max
Istzustand (alle Szenarien)	5'800	± 411	15	78	4'960 - 6'320
Istzustand ohne Dammbüche (kleine Stichprobe)	6'070	± 194	2	5	5'930 - 6'280
Mit Massnahmen Systemsicherheit	5'650	± 224	29	105	5'220 - 6'160
Dämpfungsziel	5'800				

Abbildung 51: Ergebnisse der statistischen Auswertung der hydraulischen Abflussspitzen EHQ_B bei km 70:

\emptyset : arithmetischer Mittelwert

s: Streuung, Standardabweichung

m: Anzahl ausgewerteter Szenarien (Stichprobe)

n: gewichtete Stichprobe

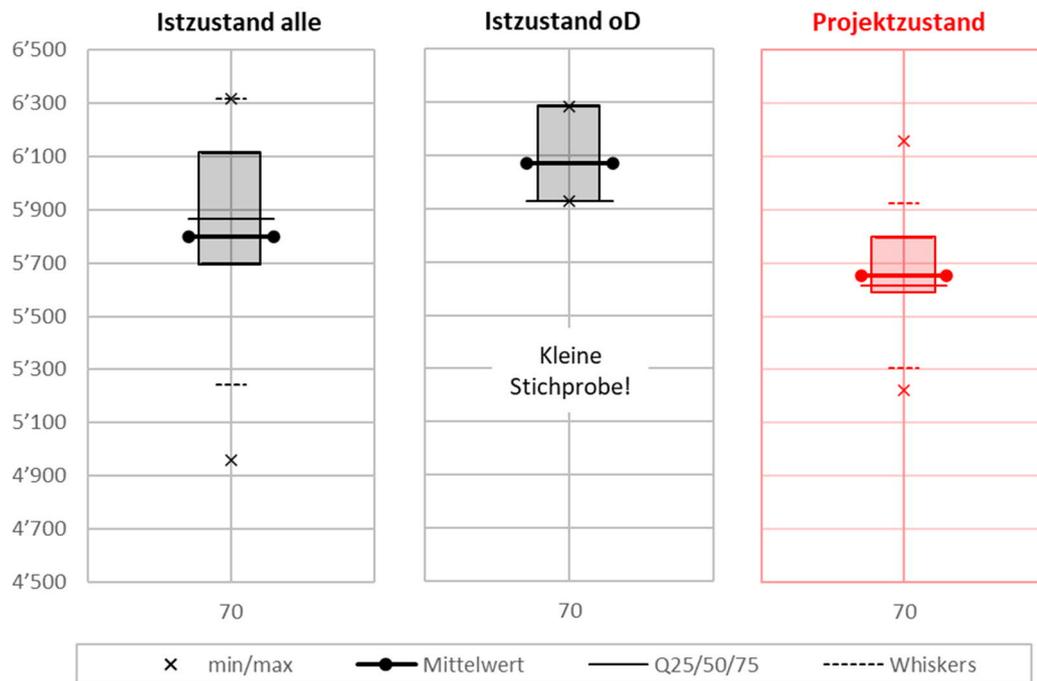


Abbildung 52: Box-Plot der statistischen Auswertung bei km 70. Istzustand: Istzustand alle Szenarien inkl. Dammbüche, Istzustand oD ohne Dammbuchenszenarien sowie Projektzustand.

3.5.4 Projektzustand mit sektorweiser Nichtrealisierung

Die Szenarien mit sektorweiser Nichtrealisierung der Massnahmen flossen zwar nicht in die statistische Auswertung des Projektzustands ein, sie sind aber dennoch im Anhang 13 auf Seite 7 aufgeführt und mit dem Soll-Projektzustand verglichen.

Falls in je einem der drei oberen Sektoren, oder im Sektor 4 entweder in der Geländekammer von Sennwald oder in derjenigen von Bangs, die vorgeschlagenen Massnahmen nicht realisiert würden, so könnten die Dämpfungsziele bei schmaler Ganglinienform immer noch erreicht werden. Die Massnahmen in den übrigen Sektoren gleichen den Verlust teilweise wieder aus.

Bei schmaler Ganglinie würde nur eine Nichtrealisierung von Bangs zu einer spürbaren Abnahme der Dämpfung führen, was die Bedeutung dieser Massnahmen unterstreicht. Liesse man dieses Element weg, so könnten die Dämpfungsziele bei einer etwas breiteren Ganglinie, oder bei einem zusätzlichen schlechten Funktionieren der Massnahmen in den übrigen Sektoren, nicht mehr eingehalten werden.

3.6 Diskussion der Ergebnisse

3.6.1 Generelles Systemverhalten

Das Resultat der Eichung, die detaillierte Prüfung der Berechnungsergebnisse und verschiedene numerische und hydraulische Qualitäts- und Plausibilitätskontrollen zeigen, dass das verwendete, aus verschiedenen Teilmodellen zusammengesetzte hydraulische Gesamtsystem die bei einem EHQ ablaufenden Prozesse realitätsgetreu wiedergeben.

Die als Referenzwasserspiegel vorgegebenen 1d-Berechnungen aus früheren Studien können mit den Modellen des Istzustands ohne Wasseraustritte insbesondere bei den Überströmstrecken und Rückflussbereichen gut nachgebildet werden. Ausnahmen davon sind begründbar.

Die Fliesszeiten der im Modell instationär ablaufenden Hochwasserwelle sind konsistent und plausibel. Wie die Modelle ohne Wasseraustritt zeigen, war die hydrologische Synchronisierung der Abflussbeiträge der Zuflüsse mit der Hochwasserwelle aus dem Rhein erfolgreich und genügend präzise.

Die 2d-Modelle arbeiteten numerisch einwandfrei. Ihre Resultate zeigten keine physikalisch nicht erklärbaren numerischen Probleme z.B. in der Volumenerhaltung der Durchflüsse.

Die Strömungsmuster im Rheingerinne und insbesondere bei den Überströmstrecken und Dammbreschen sind plausibel und realitätsnah. Die Fliesswege in den Überflutungsgebieten werden realistisch nachgebildet, insbesondere auch in den für das Systemverhalten wichtigen Stellen wie z.B. den Rückflüssen bei Landquart, Raststätte Heidiland, Trübbach und bei der Spiersbachmündung, oder bei den überflutungsbestimmenden topografischen Elementen im Gelände wie z.B. Autobahndamm A13 im Sektor 1, Hinterdämmen in der Geländekammer Fläsch, Damm- und Kanalsystem in der Geländekammer Sennwald usw.

Insgesamt dürfen die hydraulischen Berechnungen als zuverlässig beurteilt werden. Die bei Extremereignissen allgemein zu erwartenden erheblichen Unsicherheiten entstehen weniger aus dieser 2d-Hydraulik, sondern sind über die Szenariendefinition abzudecken. Die getroffene Szenarienauswahl berücksichtigt die wichtigsten dieser Unsicherheiten.

3.6.2 Fliessretention im Rheingerinne

Der Beitrag des Rheingerinnes an die Hochwasserdämpfung kann aus den Resultaten der fiktiven Szenarien ohne Wasseraustritte herausgelesen werden (Szenarien istoa_soll; z.B. in Anhang 13, Seite 1). Sie ist wie erwartet relativ gering, und beträgt über die ganze Strecke, d.h. beide 2d-Modelle sowie 1d-Kopplungsmodell km 40-60 (Kap. 3.2.7):

- Schmale Ganglinie: etwa $110 \text{ m}^3/\text{s}$ (1.6% des hydrologischen EHQ_B)
- Mittlere und breite Ganglinie²⁰: etwa $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (0.6% des hydrologischen EHQ_B)

²⁰ Zwischen der mittleren und der breiten Ganglinienform gibt es kaum mehr Unterschiede. Die Fliessretention im Rheingerinne ist auch bei mittleren Ganglinien vernachlässigbar klein.

Die Zahlen beinhalten die effektive Dämpfung durch Fließretention im Rheingerinne, ohne die am Liechtensteiner Binnenkanal angenommene Dämpfung und Zufluss-Kalibrierung auf 65 m³/s (vgl. Fussnote in Kap. 3.1.2).

3.6.3 Fließretention in den Sektoren 1 und 2

Die Rückhaltevolumen in den Sektoren 1 und 2 sind im Vergleich zu den ausfliessenden Wassermengen gering und vermögen die Hochwasserwelle kaum zurückzuhalten. Dies kommt in den zahlreichen massiven Rückflüssen zum Ausdruck (wieder ansteigende Linien im Längenprofil der Abflussspitzen).

Trotzdem lässt sich ab der Landquartmündung eine deutliche Dämpfung feststellen, welche sowohl im Istzustand wie auch im Projektzustand auftritt, aber nur bei der schmalen Ganglinie festzustellen ist. Bei der mittleren und breiten Ganglinie wird der Dämpfungseffekt sehr klein.

Die unerwartet effiziente Dämpfung bei der schmalen Ganglinie wird weniger von einer Volumenretention verursacht, sondern geht vor allem auf eine Fließretention in den Überflutungskorridoren zurück, in denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hochwasserwelle deutlich geringer ist als im Rhein.

Dies lässt sich gut am Beispiel des Szenarios EHQBschmal_proj_soll bei der Landquartmündung zeigen (Abbildung 53). Der Rückfluss vor km 23.28 zurück in den Rhein ist zwar kaum gedämpft, erfolgt aber zeitlich verzögert, wenn die Hochwasserspitze im Rhein bereits vorüber ist. Dieser verzögerte Rückfluss bewirkt bereits bei km 23.28 unmittelbar vor der Landquartmündung eine Dämpfung von rund -160 m³/s. Zudem verschiebt sich dadurch die Hochwasserspitze im Rhein. Das Maximum des Abflussbeitrags der Landquart trifft dann nicht mehr zeitgleich auf das verschobene Maximum im Rhein, wodurch sich nochmals eine deutliche Zunahme der Dämpfung ergibt (-300 m³/s bei km 23.5 unmittelbar nach der Mündung der Landquart).

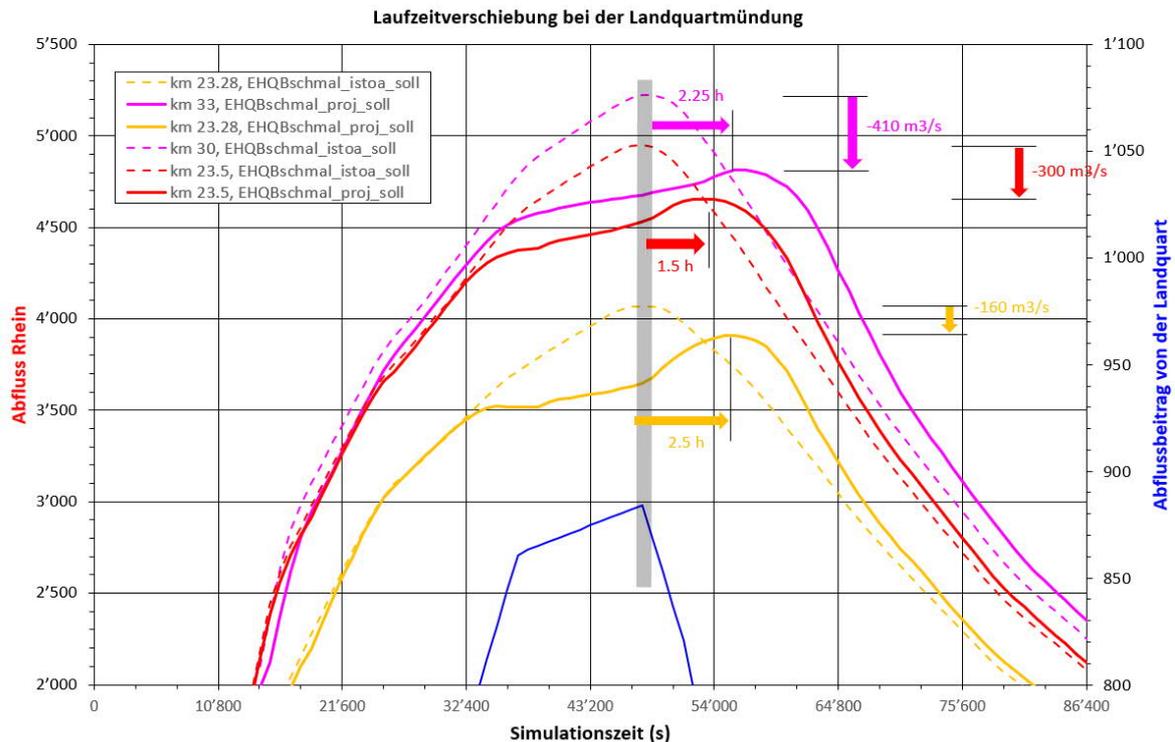


Abbildung 53: Ganglinienauswertung ober- und unterhalb der Landquartmündung sowie am unteren Ende des Sektors 2. Szenario EHQBschmal_proj_soll im Vergleich mit dem weitgehend ungedämpften Szenario ohne Wasseraustritte, EHQBschmal_istoa_soll.

Dieselben Verzögerungseffekte finden auch in den Überflutungskorridoren von Maienfeld und Bad Ragaz sowie beim Abflussbeitrag der Tamina statt, wodurch sich die Dämpfung am unteren Ende des Sektors 2 auf rund -410 m³/s erhöht.

Durch diese Fließretention wird die Hochwasserspitze des Rheins gekappt und gleichzeitig breiter. Sie verändert ihre Form, verliert aber nur wenig an Volumen.

Der Effekt der Fließretention verliert seine Wirkung bei breiter Ganglinienspitze, weshalb bei der mittleren und breiten Ganglinienform die Dämpfung in den Sektoren 1 und 2 sehr gering wird.

Auch bei der schmalen Ganglinienform ist nach den Sektoren 1 und 2 das Potential an Fließretention ausgeschöpft, da die aus dem Sektor 2 ausfliessende Ganglinienspitze bereits flach und breit ist. Eine weitere Dämpfung ist nur noch mittels Volumenrückhalt zu erreichen.

Die Fließretention in den Sektoren 1 und 2 funktioniert auch im Istzustand. Der Dämpfungseffekt ist zwar etwas geringer als im Projektzustand, aber im Längensprofil des Anhangs 12 Seite 1 deutlich sichtbar.

Die Dämpfung durch verschobenes Zusammentreffen der Abflussspitzen von Rhein und Landquart ist unsicher. Im konkreten Hochwasserablauf ist es durchaus möglich, dass die Landquart ihren Abflussbeitrag etwa zwei Stunden später in den Rhein bringt, und dann wieder auf die verzögerte Spitze des Rheins trifft²¹. Dadurch geht rund die Hälfte der Dämpfung durch Fließretention verloren und muss flussabwärts durch verstärkte Volumenretention aufgefangen werden.

3.6.4 Reserve-Volumenretention im Sektor 3

Die Rückhalteräume von Sargans, Bangs und Sennwald arbeiten v.a. mit Volumenretention, d.h. das Wasser der Ganglinienspitze wird über die Überströmstrecken oder durch Rückstau in die Geländekammern entlastet und dort zurückgehalten, bis das Hochwasser vorüber ist. Diese Art der Retention ist zuverlässiger als die Fließretention und sehr effizient, solange der Rückhalteraum noch nicht vollständig gefüllt ist und in den Rhein zurück überläuft. Sie braucht aber ein grosses Rückhaltevolumen vom mehreren Millionen m³, und es sind Siedlungsgebiete betroffen.

Die dicht besiedelte Geländekammer von Sargans funktioniert im Projektzustand nur als Reserve-Rückhalteraum im Falle einer breiteren Ganglinie oder eines unplanmässigen Hochwasserablaufs. Zum möglichst langen Schutz der Siedlungsgebiete von Sargans, Mels, Wangs und Vilters ist die Überströmstrecke im Sektor 3 so eingestellt, dass sie bei schmaler Ganglinienform und planmässigem Hochwasserablauf (EHQBschmal_proj_soll) noch kaum entlastet. Die Überflutungsfläche bleibt noch klein und betrifft kaum Siedlungsgebiet. Bei mittlerer und breiter Ganglinie, oder wenn sich ein zu hoher Wasserspiegel einstellt, findet jedoch ein starker Wasseraustritt statt, welcher einerseits den Rhein effizient dämpft, aber andererseits zu erheblichen Überflutungen ausgedehnter Siedlungsgebiete führt.

Die entsprechenden Szenarien EHQBmittel_proj_soll, EHQBbreit_proj_soll und EHQBschmal_proj_hoch3 werden als weniger wahrscheinlich als EHQBschmal_proj_soll eingestuft.

Im Istzustand finden nur Wasseraustritte im Falle von Damnbrüchen statt. Diese werden bei einem EQ_B an den Abschnitten mit ungenügender Dammstabilität wahrscheinlich. Ein Dammbrechenszenario hat eine Vollenfüllung der ganzen Geländekammer bis auf die Höhe des Rückflusses über den Rheindamm beim Rheinknie zur Folge, mit entsprechend grossen Überflutungsintensitäten. Andererseits führen die Dammbüche zu einer deutlichen Dämpfung des Rheinabflusses.

Falls die Dämme wider Erwarten standhalten würden, würde im Istzustand in diesem Sektor keine Überflutung, aber auch keine Dämpfung stattfinden (EHQBschmal_ist_soll).

Bei Trübbach findet ein Teilrückfluss via Vilterser-Wangser-Kanal zurück in den Rhein statt, zusammen mit dem Abflussbeitrag des Kanals selber. Er wird v.a. durch die eingestauten Durchlässe bei der Autobahn limitiert und beträgt bei der Mündung in den Rhein rund 50-60 m³/s.

Der Rückfluss könnte durch Schliessen der Militärschütze unterbunden werden, welche im Doppeldurchlass bei der Unterquerung des Trübbachs eingebaut ist (vgl. Abbildung 55). Diese Massnahme hätte zwar eine weitere Verstärkung der Dämpfung um bis zu 60 m³/s sowie ein Schutz von Trübbach zur Folge, wird aber als politisch nicht machbar betrachtet, da sie zu

²¹ Ein solches Szenario wurde im Rahmen der vorliegenden Studie noch nicht berechnet.

einer direkten aktiven Mehrgefährdung von Sargans führen würde. Aus diesem Grund wurden alle Szenarien mit geöffneter Schütze und offenem Doppeldurchlass gerechnet.

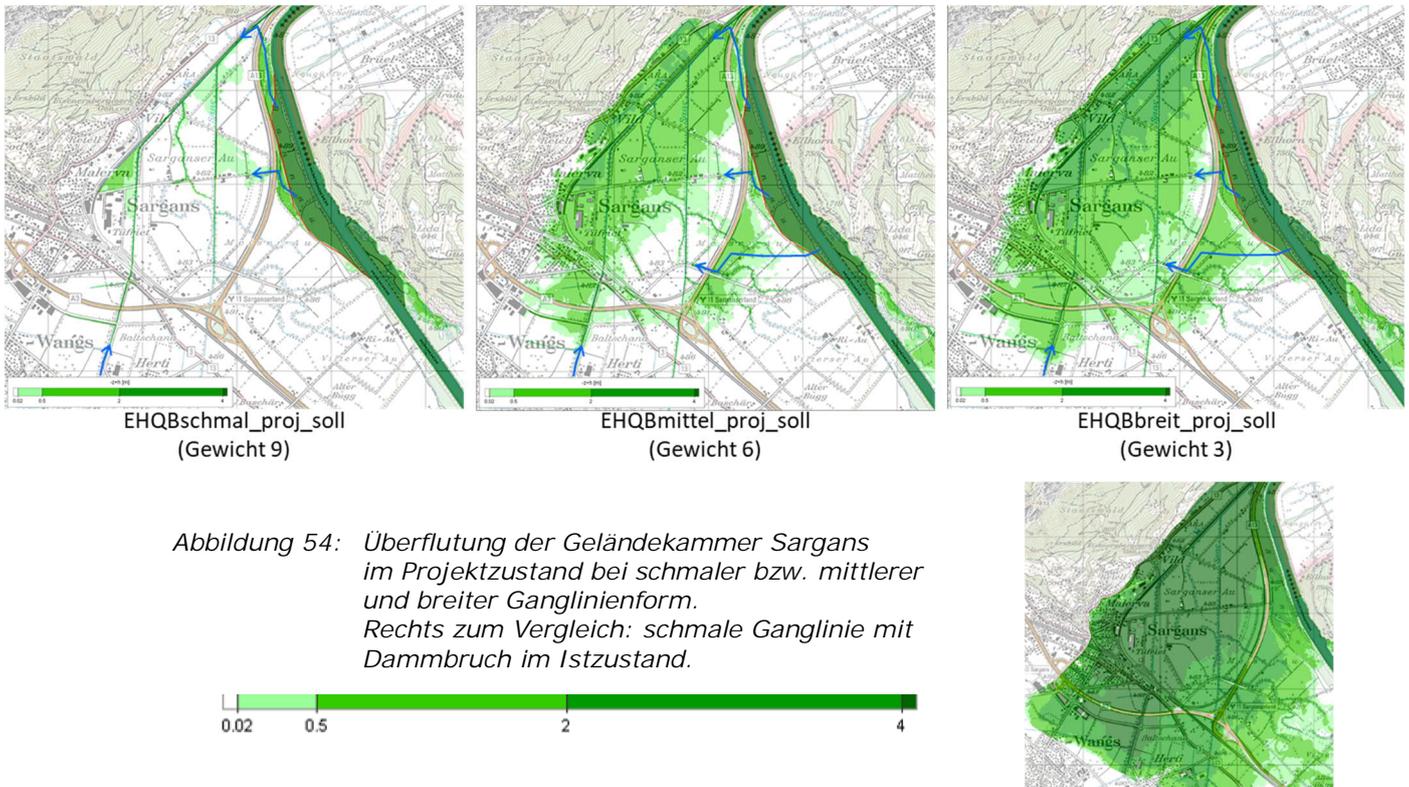


Abbildung 54: Überflutung der Geländekammer Sargans im Projektzustand bei schmaler bzw. mittlerer und breiter Ganglinienform. Rechts zum Vergleich: schmale Ganglinie mit Dammbbruch im Istzustand.

3.6.5 Sektor 3: Ausfluss in die Wartauer Ebene

Während den Berechnungen wurde neu ein Ausfluss über das linke Ufer des Vilterser-Wangser-Kanals festgestellt. Er kommt nach der Unterquerung des Trübbachs zustande, weil der Doppeldurchlass unter dem Trübbach hindurch eine grössere Abflusskapazität hat als die nachfolgende, nach und nach durch den Rhein eingestaute Mündungsstrecke mit ihren zwei Strassendurchlässen.

Der Ausfluss hat zwar eine Überflutung des Dorfs Trübbach und evtl. der weiteren Ebene zur Folge, führt aber zu einer relativ effizienten Dämpfung des Rheinabflusses, da diese Wassermenge kaum mehr oder nur noch stark verzögert via Werdenberger Binnenkanal in den Rhein zurückfliesst.

Die am Modell abgegriffenen Ausflüsse in die Wartauer Ebene betragen im Projektzustand bei schmaler Ganglinie $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (EHQBschnaal_proj_soll) und steigen bei breiterer Ganglinie auf bis zu $90 \text{ m}^3/\text{s}$ an (EHQBbreit_proj_soll).

Im Istzustand mit Dammbbrüchen im Raum Sargans staut sich das Wasser in der Geländekammer Sargans so hoch auf, dass es nicht nur zu einem starken Ausfluss durch den Doppeldurchlass kommt, sondern sogar zu einer massiven Überströmung nicht nur des Rheindamms, sondern auch des Querdamms beim Trübbach. Der Ausfluss in die Wartauer Ebene kann dadurch bis $520 \text{ m}^3/\text{s}$ ansteigen (EHQBmittel_ist_DB123). Er wird somit zum Hauptfaktor der effizienten Dämpfung des Sektors 3 bei den Dammbbruchszenarien ist_DB123 und ist_DB1234, führt aber wahrscheinlich zu einer grossflächigen Gefährdung in der weitläufigen Ebene nördlich von Trübbach.

Der weitere Verlauf des Ausflusses konnte im Rahmen der vorliegenden Studie noch nicht untersucht werden. Es ist daher unbekannt, bis wie weit sich die Überflutung in Richtung Norden fortsetzt. Zumindest bei den grossen Abflussmengen der Dammbbruchszenarien des Istzustands muss befürchtet werden, dass die ganze Ebene bis nach Sennwald mitsamt Sevelen, Buchs, Grabs und Haag betroffen sein könnte.

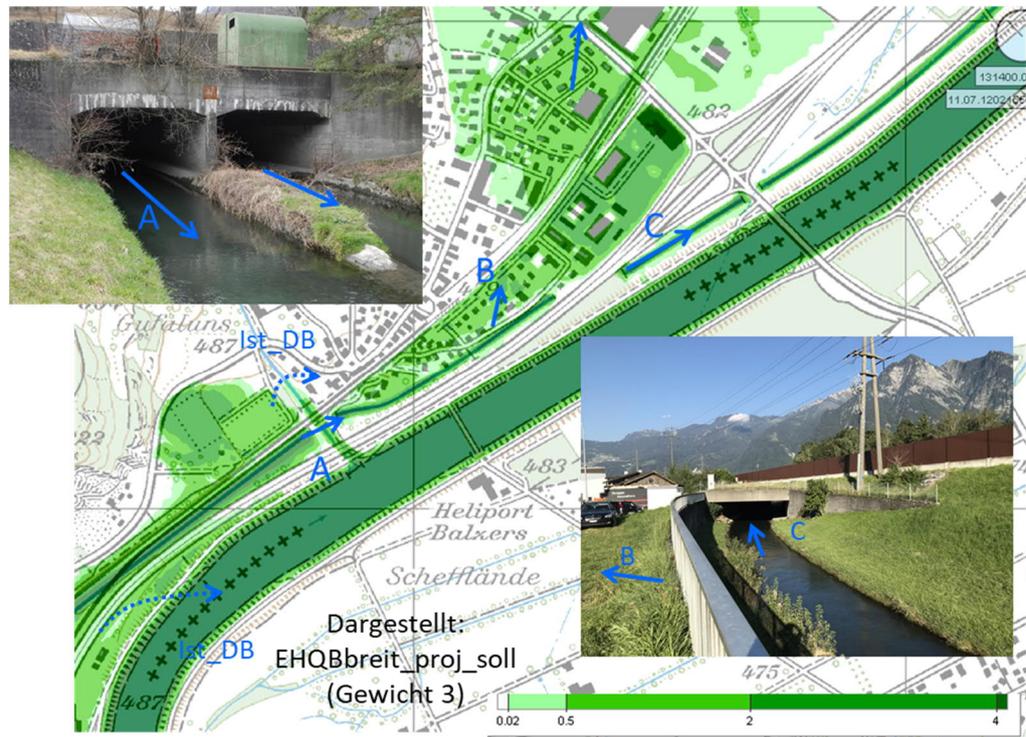


Abbildung 55: Ausfluss via Vilterser-Wangser-Kanal in die Wartauer Ebene.

3.6.6 Volumenretention im Sektor 4

Die beiden grossen Rückhalteräume von Bangs-Ruggell und Sennwald haben nach ihrer Optimierung zusammen ein Rückhaltevolumen von bis zu 29 Mio. m³, womit eine effiziente Volumenretention an dieser strategisch wichtigen Stelle beim Übergang in die Internationale Rhein-strecke möglich wird.

Projektzustand: Während der Einstau des Rückhalteriums Sennwald im 2d-Modell direkt mit dem Wasserspiegel im Rhein gekoppelt ist, erfolgt die Beaufschlagung desjenigen von Bangs-Ruggell mit der Überströmstrecke Partenwiesen. Diese ist so eingestellt, dass beim wahrscheinlichen Szenarienverlauf EHQBschmal_proj_soll die Dämpfungsziele schon erreicht werden, ohne dass das Rückhaltevolumen ganz ausgenutzt wird. Die verbleibende Reserve steht dann zur Verfügung, falls die Hochwasserspitze länger andauern würde: beim EHQBmittel_proj_soll findet zwar bereits ein Überlauf zurück in den Rhein statt, aber der ist noch genügend gering, sodass die Dämpfungsziele dennoch knapp erreicht werden. Bei noch breiterem, aber entsprechend noch seltenerem Ganglinienverlauf EHQBbreit_proj_soll sind die Dämpfungskapazitäten des Gesamtsystems von Felsberg bis Bangs ausgeschöpft. Es kommt beim Spiersbach zu einem starken Rückfluss, und die Dämpfungsziele werden überschritten.

Istzustand: falls bei einem EHQB Dammbüche direkt in die Geländekammern von Bangs-Ruggell oder Sennwald stattfinden, so werden die Rückhalteräume zu schnell gefüllt. Sennwald verliert seine Wirkung weitgehend, während Bangs bei der schmalen Ganglinie das Dämpfungsziel noch knapp zu halten vermag (EHQBschmal_ist_DB124B). Bei breiterer Ganglinie und Dammbuch verliert aber auch Bangs seine Dämpfungswirkung weitgehend: beim Szenario EHQBmittel_ist_DB124B weist das ganze System von Felsberg bis Bangs kaum mehr Dämpfungskapazitäten auf, und es kommt zu einer massiven Überschreitung der Dämpfungsziele.

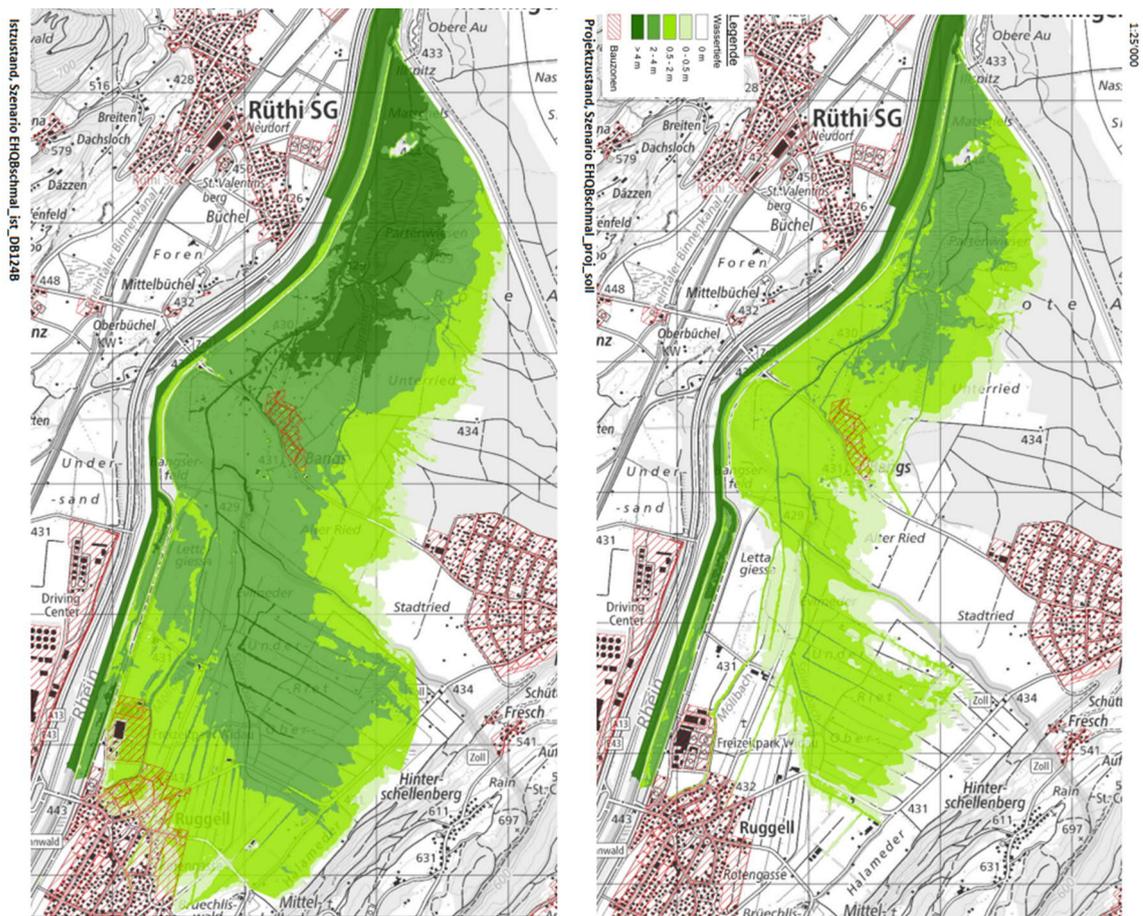


Abbildung 56: Geländekammer Bangs – Ruggell: links Szenario EHQBschmal_ist_DB1248 (EHQ_B im Istzustand mit einem Dambruch), rechts Szenario EHQBschmal_proj_soll (gleiche EHQ_B-Ganglinie im Projektzustand).

Der während der Berechnung eingespeiste Hochwasserbeitrag des Spiersbachs wird bereits vor dem Anspringen des Rückhalteraums eingestaut, sobald das Wehr an der Mündung verschlossen wird. Das dadurch belegte Rückhaltevolumen bleibt jedoch klein und beschränkt sich auf das tiefste Gelände im Bereich Partenwiesen. Es führt nicht zu einem signifikanten Verlust des Dämpfungsvermögens für den Rhein.

Alle Szenarien wurden mit geschlossener Rillisschleuse im Rheintaler Binnenkanal bzw. erhöhtem Hinterdamm beim Büchel gerechnet, um ein Ausbrechen der Überflutung nach Norden zu verhindern. Ein Offenlassen dieses Korridors, sowie dessen Folgen für die Ebene von Rüthi-Oberriet-Widnau wurde im Rahmen der vorliegenden Studie noch nicht untersucht.

3.6.7 Dämpfungsvermögen des Gesamtsystems Felsberg – Bangs

Das durch die im Kap. 2 vorgeschlagenen Massnahmen optimierte System des Alpenrheins ist in der Lage, einen EHQ_B-Abfluss bis zur Illmündung effizient und zuverlässig zu dämpfen. Im statistischen Mittel aller nach Wahrscheinlichkeit gewichteten Szenarien des Projektzustands wird das Dämpfungsziel bei den Kontrollquerschnitten km 65 und 70 gut erreicht bzw. deutlich unterschritten. Die Streubreite der Resultate bewegt sich im zu erwartenden Rahmen, was für eine gewisse Zuverlässigkeit und Robustheit des Gesamtsystems spricht.

Auch im Istzustand findet bereits eine erstaunlich wirksame Dämpfung statt. Der statistische Mittelwert aller Szenarien des Istzustands liegt zwar bei km 65 über dem Dämpfungsziel, erreicht dieses aber bei km 70 knapp. Allerdings weist das statistische Resultat eine doppelt so grosse Streubreite auf wie im Vergleich zum Projektzustand und ist entsprechend unsicherer, und die Dämpfung wird v.a. durch Dambrüche erkauf, welche nicht nur zu schwerwiegenden Überflutungszuständen in den betroffenen Geländekammern führen würden, sondern in ihrem Auftreten unberechenbar sind und sich somit nicht als planmässige «Dämpfungs-massnahme» eignen.

Im Istzustand sind im Wesentlichen die Dammbuchszszenarien im Sektor 3, d.h. in der dicht besiedelten Sarganser Ebene, für den unerwartet tiefen statistischen Mittelwert verantwortlich. Lässt man die Szenarien ist_DB123 und ist_DB1234 in der statistischen Auswertung weg, so steigt der Mittelwert bei km 65 und 70 sofort auf 5'050 bzw. 6'020 m³/s an. Lässt man alle Szenarien mit Dammbüchen weg, betragen die Mittelwerte sogar 5'100 bzw. 6'070 m³/s.

Es ist zu erwähnen, dass für den Istzustand nur zwei Szenarien ohne Dammbüche berechnet wurden. Eine Variation der Sohlen- und Wasserspiegellagen wie im Projektzustand, sowie eine Berechnung der breiten Ganglinie fanden im Rahmen der Studie noch nicht statt. Entsprechend beruht die statistische Auswertung des Istzustands ohne Dammbüche auf einer unzulässig kleinen Stichprobe.

4. BEURTEILUNG DER RESTGEFÄHRDUNG MIT MASSNAHMEN

4.1 Vorgehen

Mit einem Vergleich der Restgefährdung für EHQ-Ereignisse ($>HQ_{300}$) im Projektzustand nach Realisierung mit demjenigen des Istzustands soll aufgezeigt werden, ob die Massnahmen zusätzlich zur Dämpfungswirkung für den Unterlauf auch in der Lage sind, die Restgefährdung in den einzelnen Geländekammern zu verringern. Zudem war der Nachweis zu erbringen, dass die Massnahmen nirgends zu einer signifikanten Mehrgefährdung führen.

Zu diesem Zweck wurde aus dem Set der berechneten Szenarien je ein Szenario für das EHQ_A mit schmaler Ganglinie sowie das EHQ_B mit schmaler und mit mittelbreiter Ganglinie ausgewählt, dessen Eintretenswahrscheinlichkeit im Istzustand und Projektzustand etwa vergleichbar ist. Es handelt sich um die folgenden sechs Szenarien, deren Eintretenswahrscheinlichkeit innerhalb des hydrologischen Ereignisses als am wahrscheinlichsten eingeschätzt wurde (Wahrscheinlichkeits-Gewichte in Tabelle Anhang 11, Spalte «EW»):

- EHQ_A schmal:
 - Istzustand: EHQAschmal_ist_DB1/DB2/DB3/DB4
 - Projektzustand: EHQAschmal_proj_soll
- EHQ_B schmal:
 - Istzustand: EHQBschmal_ist_DB123/DB4S/DB4B
 - Projektzustand: EHQBschmal_proj_soll
- EHQ_B mittel:
 - Istzustand: EHQBmittel_ist_DB123/DB4S/DB4B
 - Projektzustand: EHQBmittel_proj_soll

Für den Istzustand wird aufgrund der aktuellen Zustandsbeurteilung der Dämme ein Ereignisablauf mit Damnbrüchen als wahrscheinlicher als einer ohne Damnbrüche erachtet, nicht nur im Sektor 1 und 2, sondern auch in den Sektoren 3 und 4 (Szenarien ist_DB in den jeweiligen Geländekammern).

Für den Projektzustand wird ein Ereignisablauf mit prognostizierter Sohlen- und Wasserspiegellage als am wahrscheinlichsten angenommen (Szenarien proj_soll).

Die drei ausgewerteten Szenarienpaare sind in den Kartenausschnitten Anhang 14 einander gegenübergestellt. Dargestellt sind die Flächen der maximalen Überflutung, unterteilt in die Fliesstiefenklassen:

- Geringe Fliesstiefe <0.5 m.
- Mittlere Fliesstiefe $0.5-2.0$ m.
- Hohe Fliesstiefe $2.0-4.0$ m.
- Sehr hohe Fliesstiefe >4.0 m.

Die Umrisse der Bauzonen sind als Schraffur darübergerlegt.

Eine detaillierte Auswertung des Schadenspotenzials mit EconoMe war im Rahmen des vorliegenden Auftrags noch nicht möglich und wäre in der gegenwärtigen Projektphase noch wenig sinnvoll. Für einen vereinfachten quantitativen Vergleich wurden die Überflutungsflächen nach Fliesstiefenklassen ausgewertet und mit der Bauzone verschnitten. Die sich daraus ergebenden Flächen sind in Hektarenwerten in den Tabellen Anhang 15 ersichtlich und lassen sich wiederum zwischen Istzustand und Projektzustand vergleichen.

Als besonders relevant für den Flächenvergleich erscheint uns die Gesamtfläche der überfluteten Bauzone, und innerhalb derer besonders die Fläche der Bauzone, welche von einer lebensgefährlichen Überflutung mit hoher und sehr hoher Fliesstiefe >2.0 m betroffen ist. Falls sich im Projektzustand in diesen Klassen eine signifikant grössere Fläche ergäbe, müsste wohl von einer unzulässigen Mehrgefährdung gesprochen werden.

4.2 Gesamte Restgefährdung über alle Sektoren

Die über alle Geländekammern zusammengezählten Gesamtflächen der maximalen Überflutungsausdehnung sind zuhinterst im Anhang 15 und in folgender Tabelle aufgelistet. Alle Zahlen sind in Hektaren à 10'000 m² aufgeführt und nach hydrologischem Szenario, Bauzone und Nichtbauzone sowie Fliesstiefenklassen gruppiert.

Sektoren 1-4, alle Geländekammern						
	EHQA schmal		EHQB schmal		EHQB mittel	
	Ist	Projekt	Ist	Projekt	Ist	Projekt
<i>Überflutete Bauzone</i>	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
Fliesstiefe <0.5 m	157.80	55.73	166.16	172.32	169.31	177.03
Fliesstiefe 0.5-2.0 m	336.27	42.64	431.32	319.23	432.50	479.01
Fliesstiefe 2.0-4.0 m	261.73	1.47	280.79	62.71	294.75	127.69
Fliesstiefe >4.0 m	128.69	0.45	229.62	1.10	252.77	1.72
Gesamte Bauzone	884.49	100.29	1'107.89	555.34	1'149.32	785.44
<i>Überflutete Nichtbauzone</i>						
Alle Fliesstiefen	4'035.52	1'469.48	4'519.97	2'680.82	4'647.17	3'597.41
Gesamte Überflutungsfläche	4'920.02	1'569.77	5'627.86	3'236.17	5'796.49	4'382.85

Abbildung 57: Ausgewertete maximale Überflutungsflächen in allen Geländekammern der Sektoren 1-4.

Neben ihrer Dämpfungswirkung für den Unterlauf bewirken die Massnahmen gemäss Kap. 2 eine deutliche Abnahme des Restrisikos auch lokal am betrachteten Massnahmenperimeter der Sektoren 1-4. Bei allen hydrologischen Ereignissen wird sowohl die gesamte Überflutungsfläche wie auch die Fläche der überfluteten Bauzone stark reduziert. Auch die Bauzone mit hoher und sehr hohen Fliesstiefen wird stark reduziert.

Beim voluminösen Szenario EHQBmittel erfolgt neben der Abnahme der gesamten betroffenen Bauzone zusätzlich auch eine Verlagerung von hoher und sehr hoher Fliesstiefe in geringe und mittlere Fliesstiefe, was letztere beiden Klassen zwar vergrössert, aber trotzdem eine Mindergefährdung darstellt.

4.3 Restgefährdung in den einzelnen Geländekammern

4.3.1 Abschnitt Felsberg - Chur

Mit Ausnahme des Szenarios EHQA schmal, wo die Massnahmen zu einer deutlichen Abnahme der Überflutungsflächen führen, bleibt die Restgefährdung im Projektzustand etwa gleich wie im Istzustand. Die leicht höhere Fläche betroffener Bauzone beim Szenario EHQB schmal liegt im Bereich der zu erwartenden Genauigkeit und gilt nicht als signifikante Mehrgefährdung.

Es resultiert insgesamt eine leichte Risikoreduktion.

4.3.2 Abschnitt Chur – Haldenstein – Oldis

Das Dorf Haldenstein ist dank der Massnahmen bis EHQA bordvoll geschützt. Auch bei der ARA Chur besteht die Chance, dass sie bis und mit EHQA noch nicht überflutet wird, obwohl sie beim berechneten Szenario EHQA bereits betroffen ist (Überströmstrecke springt bei EHQA gerade an).

In Chur Ost, Haldenstein und Oldis ergibt sich bei den Gesamtflächen ebenfalls eine deutliche Reduktion beim EHQA schmal und eine sehr geringe Reduktion bei EHQB schmal und EHQB mittel. Zusätzlich wird die Bauzone mit hoher und sehr hoher Fliesstiefe zugunsten mittlerer Fliesstiefe entlastet.

Es resultiert insgesamt eine Risikoreduktion.

4.3.3 Abschnitt Untervaz / Trimmis

Die Industriegebiete beidseits des Rheins werden neu bis zu EHQ_A bordvoll geschützt, wohingegen im Istzustand mit einem Bruch der schwachen Dämme zu rechnen ist. Beim EHQB-schmal und EHQBmittel werden die Wasseraustritte und Fliesstiefen reduziert.

Die Massnahmen bewirken eine deutliche Abnahme der Überflutungsfläche bei EHQAschmal sowie eine deutliche Abnahme der Bauzone mit hoher und sehr hoher Fliesstiefe bei EHQB-schmal und EHQBmittel.

Es resultiert insgesamt eine deutliche Risikoreduktion.

4.3.4 Abschnitt Landquart

Das im heutigen Zustand bereits bei Ereignissen <EHQ betroffene Industrie- und Siedlungsgebiet wird bis und mit EHQAschmal bordvoll effizient geschützt, was sowohl im Kartenausschnitt wie auch in den Flächenzahlen zum Ausdruck kommt. Bei EHQBschmal bleiben die Überflutungsflächen jedoch etwa gleich wie heute.

Die für EHQBmittel ausgewiesene Mehrgefährdung von +5 ha Bauzone muss bei Weiterführung des Projektes überprüft werden. Sollte sie sich dabei bestätigen, so sollten die Massnahmen so optimiert werden, dass diese Mehrgefährdung nicht mehr auftritt.

Trotz der im Moment ausgewiesenen Mehrgefährdung für den sehr unwahrscheinlichen Fall eines EHQBmittel bewirken die Massnahmen eine starke Verringerung des Hochwasserrisikos, da sie die vorhandenen Schutzdefizite, insbesondere den Rückstau im Mühlbach, nicht nur für ein Extremereignis, sondern auch auf Stufe HQ₁₀₀ – HQ₃₀₀ eliminieren.

Es resultiert insgesamt eine deutliche Risikoreduktion.

4.3.5 Abschnitt Maienfeld – Bad Ragaz – Fläsch

Die Stabilisierung der Dämme und Ufer bewirkt eine weitgehende Reduktion des Restgefährdung bei EHQAschmal. Die Bauzonen bleiben zwar bei EHQBschmal und EHQBmittel weiterhin überflutet, werden aber hinsichtlich Fliesstiefe entlastet.

Die Fläche der betroffenen Bauzone wird bei EHQAschmal stark reduziert, und bei EHQBschmal und EHQBmittel erfolgt eine leichte Reduktion der betroffenen Bauzone sowie eine Verlagerung von hoher und sehr hoher Fliesstiefe auf mittlere und geringe Fliesstiefe.

Es resultiert insgesamt eine deutliche Risikoreduktion.

4.3.6 Abschnitt Sargans – Trübbach

Trotz des im Vergleich zu den Sektoren 1 und 2 deutlich breiteren Dammquerschnitts treten gemäss den neuen Untersuchungen in [12] bei einem Extremereignis erhebliche Stabilitätsdefizite auf. An den besonders kritischen Abschnitten des linken Damms werden Dammbreschen wahrscheinlich, weshalb die Dammbbruchszenarien des Istzustands für einen Vergleich mit dem Projektzustand zulässig sind.

Die Überströmstrecke in der Sarganser Aufweitung ist so ausgelegt, dass sie bei EHQAschmal noch nicht und bei EHQBschmal erst wenig entlastet. Die entsprechenden Überflutungsflächen bleiben noch gering und stammen zu einem grossen Teil auch vom Abflussbeitrag des Vilterser-Wangser-Kanals und beschränken sich v.a. auf Nichtbauzone. Die Geländekammer von Sargans verzeichnet jedoch bei EHQBmittel mit 195 ha die grösste überflutete Bauzonenfläche aller Geländekammern.

Die im heutigen Zustand bei einem Dammbbruchszenario überfluteten Bauzonenflächen sind aber noch viel umfangreicher, und zwar nicht nur beim EHQBmittel, sondern auch bei den anderen beiden Szenarien. Besonders bemerkenswert sind die bis zu 240 ha Bauzonenfläche mit potenziell lebensgefährlichen Fliesstiefen. Es ist zu befürchten, dass ein Dammbbruchszenario in den schnell und tief eingestauten Siedlungsflächen Todesopfer fordern würde.

Im Projektzustand werden die Bauzonenflächen stark reduziert, welche mit hoher und sehr hoher Fliesstiefe betroffen sind, und der Ausfluss über die Überströmstrecke findet allmählich und dosiert statt. Dank der Verbesserung der Stabilität und Robustheit des linken Damms wird die Dammbbruchgefahr wesentlich verringert, und neben den Sachwerten werden insbesondere auch Personen besser vor Extremereignissen geschützt.

Es resultiert insgesamt eine deutliche Risikoreduktion.

4.3.7 Geländekammer Sennwald

Die Dammerhöhungen entlang des Werdenberger Binnenkanals sind so ausgelegt, dass sie erst bei seinem Abflussbeitrag von 133 m³/s an das EHQ_B des Rheins überströmen. Da der Abflussbeitrag an das EHOA des Rheins mit 149 m³/s leicht höher ist, überströmen sie beim berechneten Szenario EHQAschmal bereits ein wenig. Bei EHQBschmal und besonders EHQBmittel füllt sich die Geländekammer zusehends. Trotzdem bleiben die Überflutungsintensitäten bei allen Szenarien geringer als im Istzustand mit Damnbrüchen.

Die Dammabsenkung bei der Mündung des Werdenberger Binnenkanals bewirkt bei EHQ_B ein rund 70 cm höherer Aufstau und somit eine willkommene Zunahme des Rückhaltevolumens um rund 2 Mio. m³ (vgl. Kap. 2.8.3). Dennoch resultiert aus den Massnahmen zusammen mit der Ertüchtigung des Rheindamms eine Mindergefährdung auch bei EHQ_B, da im Istzustand das Szenario mit Dambruch dominant ist und höhere Fliesstiefen ergibt als der Rückstau durch die Mündung des Werdenberger Binnenkanals.

Ein noch näher abzuklärendes Umwelt-Restrisiko besteht bei den beiden Grosstanklagern, welche von der Überflutungsfläche sowohl des Projekt- wie auch des Istzustands tangiert werden. Wenn die Überflutung grosse Mengen von Mineralöl freisetzen würde, hätte dies katastrophale Folgen für den Rhein und den Bodensee.

Es resultiert insgesamt eine deutliche Risikoreduktion.

4.3.8 Geländekammer Ruggell – Bangs – Spiersbach

Die Geländekammer von Bangs-Ruggell wird im Istzustand durch den Rückfluss aus dem Rhein bei der Spiersbachmündung sowie von der Überströmstrecke der III beim IIIspitz überflutet. Während die überflutbare Fläche der Geländekammer zu einem grössten Teil aus unempfindlichen Waldgebieten und wenig empfindlichen Landwirtschaftsflächen besteht, ist bei der Bauzone des Dorfes Bangs im heutigen Zustand bereits bei einem HQ₁₀₀ ein Schutzdefizit zu verzeichnen. Randgebiete des Dorfes Ruggell können im heutigen Zustand ab HQ₃₀₀ – EHOA tangiert werden.

Die in Kap. 2.9 für die Spiersbachmündung und den Rheindamm vorgeschlagenen Massnahmen bewirken in Verbindung mit der Anhebung der Überströmstrecke IIIspitz bis und mit dem HQ₃₀₀ eine weitgehende Elimination der Überflutungsgefährdung im Baugebiet, sowie bei EHOA eine Reduktion der Überflutungsintensitäten.

In den Karten und Flächenauswertungen der Anhänge 14 und 15 zeigt sich eine starke Reduktion der betroffenen Flächen und der Fliesstiefen im Vergleich mit dem Dambruchszenarien des Istzustands. Aber auch im Vergleich mit dem Istzustand ohne Damnbrüche würde eine deutliche Mindergefährdung resultieren, nicht nur bei EHQAschmal und EHQBschmal²², sondern vor allem auch bei häufigeren Ereignissen HQ₁₀₀ – HQ₃₀₀.

Es resultiert insgesamt eine deutliche Risikoreduktion.

²² Z.B. Szenario ohne Damnbrüche EHQBschmal_Ist_soll; Flächen nicht ausgewertet.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Dank der vorliegenden vertiefenden Untersuchung der Systemsicherheit konnten die in den Bestvarianten der Studie Systemsicherheit für den Rhein oberhalb der Illmündung vorgeschlagenen und grob skizzierten Massnahmenelemente weiter geprüft und optimiert werden. Alle vertieft untersuchten Massnahmen erweisen sich als technisch machbar. Dank der Optimierung und groben Projektierung war es möglich, die Investitionskosten einzugrenzen. Es ergibt sich neu ein Investitionsvolumen von rund CHF 37 Mio. für den Anteil, welcher im Rheinabschnitt von Felsberg bis zur Illmündung zur Verbesserung der Systemsicherheit notwendig ist. Wenn die Massnahmen im Rahmen von einzelnen Drittprojekten realisiert werden, ist dieser Kostenanteil zu den ohnehin für die Verbesserung des lokalen Hochwasserschutzes oder für die Renaturierung notwendigen Kosten aufzurechnen.

Die für die vertiefte Untersuchung neu erstellten instationären Berechnungsmodelle ermöglichen die Abklärung der hydraulischen Wirksamkeit der Massnahmen hinsichtlich ihrer Dämpfungswirkung auf die Extremereignis-Abflussspitzen des Rheins. Mit den Modellberechnungen konnte die bereits 2009 in der Studie Vertiefung Notentlastung [16] postulierte Dämpfung der hydrologischen Extremereignis-Spitzen im hydraulischen System des Alpenrheins für den Istzustand nachgewiesen und erstmals quantifiziert werden, und es konnte aufgezeigt werden, dass die Massnahmen des Projektzustands diese Dämpfungswirkung noch deutlich verstärken und vor allem zuverlässiger machen.

Die für die beiden Kontrollquerschnitte km 65 und 70 definierten Dämpfungsziele können mit den Massnahmen im Durchschnitt gut erreicht werden. Im gewichteten Mittel aller Szenarien des Projektzustands ist es somit möglich, ein hydrologisches EHQ_B mit unterschiedlichen Ereignisabläufen auf eine Abflussspitze eines EHQ_A zu dämpfen, welche innerhalb der Internationalen Rheinstrecke mit dem Rhesi-Projekt zu bewältigen ist.

Trotz dieses positiven Resultats können sieben der 29 berechneten Projektzustands-Szenarien das Dämpfungsziel bei km 70 nicht erfüllen. Es handelt sich zwar um eher unwahrscheinliche Ereignisabläufe wie z.B. EHQ_B mit voluminöser Ganglinie oder mit unplanmässigem, zu tiefem Wasserspiegel. Dennoch kann keine absolute Sicherheit und Garantie gegeben werden, dass die am Oberlauf oberhalb der Illmündung vorgeschlagenen Massnahmen die Extremereignisse in jedem Fall auf ein EHQ_A dämpfen können.

Die Modellberechnungen erlaubten auch die Beurteilung der Restgefährdung in den einzelnen Geländekammern des Massnahmenperimeters von Felsberg bis zur Illmündung. Mit dem Vergleich der Überflutungen des Projektzustands mit denjenigen des Istzustands konnte nachgewiesen werden, dass die Massnahmen die Gefährdung auch in den lokalen Geländekammern massiv reduzieren können, sofern sie zusammen mit den weiteren, in Drittprojekten vorgesehenen Sanierungen ausgeführt werden. Damit resultiert nicht nur ein Dämpfungsgewinn für die flussabwärts liegenden Flussabschnitte, sondern es profitieren auch die Siedlungen in den einzelnen Geländekammern, da sie von katastrophalen Dammbrochen verschont bleiben.

5.2 Vorschläge und Prioritäten für die weitere Umsetzung

5.2.1 IRKA-Strecke

Es wird vorgeschlagen, sämtliche in Kap. 2 untersuchten Massnahmen weiter zu projektieren und nach und nach zu realisieren, entweder als eigenständige Massnahmen der Systemsicherheit, oder eingebettet in Drittprojekte des Hochwasserschutzes und der Renaturierung.

Gestützt auf die Kriterien Kostenaufwand, Synergie mit anderen Flussbaumassnahmen, Beitrag zum Dämpfungseffekt auf Unterlieger (übergeordnete Systemsicherheit) sowie lokalem Nutzen in der jeweiligen Geländekammer (lokale Systemsicherheit) wird im Anhang 16 eine grobe Priorisierung für die Umsetzung der Massnahmen in den acht Flussabschnitten vorgenommen. Zusammengefasst lautet der Vorschlag:

Sektor 1, Geländekammern Felsberg und Chur West: eher mittlere bis tiefe Priorität, da kein Hochwasserschutzdefizit, und bescheidener Nutzen für die Systemsicherheit. Die Massnahme hätte jedoch eine relativ gute Wirkung auf das Restrisiko bei EHQ_A .

Sektor 1, Geländekammern Chur Ost, Haldenstein und Oldis: Effiziente Umsetzung der Grundsätze zur Systemsicherheit im Rahmen einer ohnehin notwendig erscheinenden mittelfristigen Sanierung der Rheindämme. Somit mittlere Priorität.

Sektor 1, Geländekammern Untervaz und Trimmis: Effiziente Umsetzung der Grundsätze zur Systemsicherheit im Rahmen einer ohnehin notwendig erscheinenden Sanierung der Rheindämme. Im beidufriq angrenzenden Industriegebiet mit hohem Schadenspotential werden Schutzdefizite bereits bei $<EHQ_A$ vermutet. Somit hohe Priorität.

Sektor 1, Geländekammer Landquart: Die Eindämmung und Rückflussverhinderung beim Igi-ser Mühlbach ist neben der Systemsicherheit wahrscheinlich bereits für Hochwasser $<EHQ_A$ notwendig, und scheint zum Schutz der tief liegenden Bauzone von Landquart vordringlich. Somit hohe Priorität.

Sektor 2, Geländekammern Bad Ragaz, Maienfeld und Fläsch: Die Dämme zwischen der Tardisbrücke und der Brücke Bad Ragaz – Maienfeld werden im Rahmen des Projekts Rheinaufweitung neu gebaut bzw. saniert. Dieses Renaturierungsprojekt soll mit hoher Priorität realisiert werden. Eine Berücksichtigung der Grundsätze der Systemsicherheit ist ohne wesentliche Mehrkosten möglich. Im übrigen Abschnitt wird der linke St. Galler Damm im Rahmen des Dammertüchtigungsprojekts saniert, womit eine robuste Durchleitung ohne zusätzliche Mehrkosten möglich wird. Somit hohe Priorität.

Sektor 3, Geländekammer Sargans: Der linke und der rechte Damm unterhalb des Eilhorns werden im Rahmen der Drittprojekte Rheinaufweitung Sargans und Dammertüchtigung neu gebaut bzw. saniert. Eine Berücksichtigung der Grundsätze der Systemsicherheit ist in diesen Drittprojekten ohne wesentliche Mehrkosten möglich und ist zur Absicherung gegen breite voluminöse Extremereignis-Ganglinien dringend zu empfehlen. Für die Umsetzung dieser Drittprojekte wird hohe Priorität angenommen.

Sektor 4, Geländekammer Sennwald: Entlang des Werdenberger Binnenkanals werden Hochwasserschutzdefizite und ein Renaturierungsbedarf vermutet, wodurch ein Ausbaubedarf am Kanal selbst gegeben ist. Es ist grundsätzlich möglich, die Massnahmen zur Systemsicherheit in Synergie mit diesem Kanalausbau zu realisieren. Ob auch eine Synergie mit einer Sanierung oder einem Doppelspurausbau des Bahntrassees gegeben ist, konnte im Rahmen der vorliegenden Studie nicht abgeklärt werden. Aufgrund der vorhandenen Synergieeffekte mit dem Kanalausbau und aufgrund des relativ grossen nutzbaren Rückhaltevolumens resultiert trotz der Investitionskosten eine mittlere bis hohe Priorität. Da diese Massnahmen direkt auf die Internationale Rheinstrecke wirken, wird zudem eine zeitliche Koordination mit der Realisierung des Rhesi-Projekts empfohlen.

Sektor 4, Geländekammer Bangs-Ruggell: Ein Handlungsbedarf ist für den Hochwasserschutz von Bangs gegeben, auch für Ereignisse $<EHQ_A$. Der Wehrverschluss in der Mündung des Spiersbachs dient sowohl für diesen Hochwasserschutz wie auch für die lokale und übergeordnete Systemsicherheit. Zudem bildet der grosse Rückhalteraum ein zentrales Element für die Bewältigung extremer Hochwasserereignisse. Trotz der relativ hohen Investitionskosten wird eine hohe Priorität vorgeschlagen. Da diese Massnahmen direkt auf die Internationale Rheinstrecke wirken, wird zudem eine zeitliche Koordination mit der Realisierung des Rhesi-Projekts empfohlen.

5.2.2 Internationale Rheinstrecke

Für die Erholung und Sicherheit in der internationalen Rheinstrecke wird das Projekt RHESI mit grosser Dringlichkeit vorangetrieben. Es muss die Grundsätze der Systemsicherheit (im RHESI-Projekt als Bauwerksicherheit bezeichnet) ebenfalls erfüllen.

Da die Kontrollquerschnitte km 65 und 70 für den Überlastfall in der Internationalen Rheinstrecke massgebend sind, sollen die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit den Überlegungen zur Bauwerksicherheit im Rahmen des RHESI-Projekts koordiniert werden.

- Die für das RHESI-Projekt massgebenden Prüfabflüsse für den Überlastfall können auf die statistischen Auswertungen aus der vorliegenden Studie für die Kontrollquerschnitte km 65 und 70 abgestützt werden.
- Da die Dämpfungsziele nicht für alle untersuchten EHQ-Szenarien erreicht werden konnten, soll das flussabwärts anschliessende hydraulische System der Internationalen Rheinstrecke genügend robust und in der Lage sein, auch Abflüsse grösser als das Dämpfungsziel ohne Systemzusammenbruch zu bewältigen. Es wird ein Stresstest mit einem geeignet erhöhten Prüfabfluss vorgeschlagen.

5.2.3 Offene Fragen

Im gegenwärtigen Kenntnisstand verbleiben die folgenden offenen Fragen:

- Ergänzende hydrodynamische Berechnung von Dammbrechungszenarien im Istzustand im Zwischenabschnitt km 40 – 60, beidseits des Rheins, sowie Einschätzung ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit.
- Wie und bis wohin breitet sich der Wasseraustritt aus dem Vilterser-Wangser-Kanal bei Trübbach in der Ebene aus? Wird das Siedlungsgebiet von Buchs tangiert? Kommt es via Werdenberger Binnenkanal in Sennwald wieder zu einem Rückfluss?
- Gibt es am Werdenberger Binnenkanal eine Abflusskalibrierung durch Ausuferungen in der Ebene oberhalb von Salez, analog zur Abflusssdämpfung des Liechtensteiner Binnenkanals auf der rechten Talseite?
- Berechnung von Wasserausbruch-Szenarien über den Hinterdamm bei Büchel, sowohl unkontrolliert im Istzustand wie auch als mögliche dosierte Notentlastung im Projektzustand.
- Abklärung der weiteren offenen Fragen aus der Studie Systemsicherheit sowie aus dem Projektantrag Anhang 2, wie z.B. die Ergänzung der Studie D13, Speicherseen und Hochwasserrückhalt, mit Abschätzungen auf Stufe EHQ statt auf Stufe HQ₁₀₀–HQ₃₀₀.
- Ergänzung und Konsolidierung der teils knappen «Stichproben»-Anzahl der statistischen Auswertung der Abflussspitzen mit weiteren zu berechnenden Szenarien, beispielsweise zum Istzustand ohne Dammbüche, oder breite Ganglinienform auch im Istzustand.
- Soll die Fließretention durch Laufzeitverschiebung an der Landquartmündung ergänzend untersucht werden? Z.B. ergänzende Berechnung mit gleichzeitigem Aufeinandertreffen der Landquart mit der verzögerten Rhein-Abflussspitze.
- Abklärung, ob im Siedlungsgebiet von Landquart tatsächlich eine Mehrgefährdung beim Szenario EHQ_{Bmittel} resultiert, und gegebenenfalls Abklärung von entsprechenden Massnahmen zu deren Vermeidung.
- Abklärung der Umweltrisiken und möglicher Massnahmen zu deren Vermeidung bei den beiden Grosstanklagern in der Geländekammer Sennwald, deren Auffangwannen bei einem EHQ_B von der Überflutung tangiert werden.

Ausserdem stellt sich die Frage, ob die bestehenden Gefahrenkarten am Alpenrhein, welche sich nur auf die bordvolle Abflusskapazität abstützen, überarbeitet werden sollten, damit auch die Gefahr von Dammbüchen infolge von geotechnischen Instabilitäten und Uferinstabilitäten abgedeckt ist.

5.2.4 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Aus Sicht des Studienverfassers werden folgende Empfehlungen für das weitere Vorgehen angegeben:

- Weitere Koordination mit dem Hochwasserschutz an der III und insbesondere mit der Sanierung der Überströmstrecke Illspitz.
 - Der Anspringpunkt der III-Überströmstrecke liegt heute etwa bei einem HQ_{30_III} und ist damit auf eine optimale Dämpfungswirkung für das heutige Rheingerinne ausgelegt. Sobald dessen Abflusskapazität im Zuge des RHESI-Projekts auf ein HQ_{300_Rhein} erhöht wird, sollte gleichzeitig auch der Anspringpunkt der Überströmstrecke an der III auf ein HQ_{100_III} angehoben werden, damit die beiden Überströmstrecken an der III und am Rhein simultan arbeiten, und der Rückhalteraum Bangs-Ruggell bei EHQ_{Rhein} eine optimale Dämpfungswirkung entfalten kann.
- Weitere Koordination mit der Bauwerksicherheit des RHESI-Projekts in der IRR-Strecke, insbesondere auch zeitlicher Abgleich der Massnahmen.
 - Die IRKA-Massnahmen insbesondere auch in Bangs und Sennwald sollten etwa zeitgleich mit den Massnahmen Bauwerksicherheit des RHESI-Projekts erstellt werden.

- Weiterprojektierung auf Stufe Vorprojekt-Bauprojekt v.a. derjenigen IRKA-Massnahmen, welche vorstehend der hohen Priorität zugeordnet wurden. Diese Projektierung soll unter anderem beinhalten:
 - Vertiefung der baulich-technischen Machbarkeit, insbesondere Sennwald, Bangs-Ruggell und Landquart.
 - Ausarbeitung der begleitenden Massnahmen der Notfallplanung und der Raumplanung sowie von allfälligen Objektschutzmassnahmen und organisatorischen Massnahmen parallel zur weiteren Projektierung der baulich-technischen Massnahmen.
 - Die genaue Regelung der solidarischen Tragung von Investition- und Unterhaltskosten sowie die Schadensregulierung sind im Rahmen der weiteren Projektierung zu klären.
- Finanzierung der weiteren Projektierungsarbeiten über die IRKA.

Uznach, 23.03.2023

Niederer + Pozzi Umwelt AG



Roger Kolb