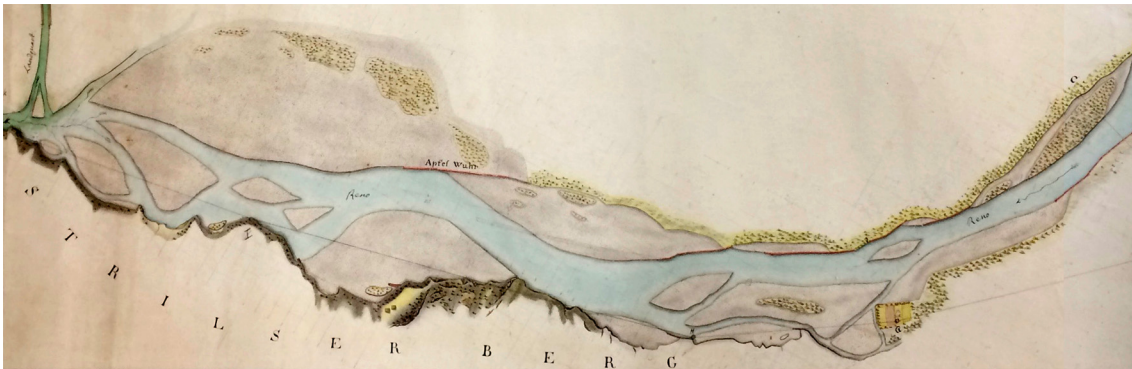




WWF St. Gallen
Merkurstrasse 2
9001 St. Gallen

Alpenrhein, Reichenau bis Illmündung

Sohlenbreite, Abflussverhältnisse, Geschiebehaushalt, Gewässerraum



Zürich, den 16. April 2020



Flussbau AG SAH
dipl. Ing. ETH/SIA flussbau.ch

Holbeinstr. 34, CH-8008 Zürich, Tel. 044 251 51 74, Fax 044 251 51 78, sah.zh@flussbau.ch

Auftraggeber:



WWF St. Gallen
Merkurstr. 2
CH - 9001 St. Gallen

Projektleiter:
Lukas Indermaur
Telefon 071 221 72 30
E-Mail lukas.indermaur@wwf.ch

Werkstatt Faire Zukunft

Heiligkreuz 19
FL - 9490 Vaduz

**Liechtensteinische Gesellschaft
für Umweltschutz LGU**

Dorfstrasse 46
FL - 9491 Rugell

Pro Natura St. Gallen-Appenzell

Lehnstrasse 35
CH - 9014 St. Gallen

Projektverfasser:



Flussbau AG SAH
dipl. Ing. ETH/SIA flussbau.ch

Holbeinstrasse 34
CH - 8008 Zürich

Projektleiter:
Ueli Schälchli
Telefon 044 251 51 74
E-Mail ueli.schaelchli@flussbau.ch

Bild Titelblatt:

Historische Karte von 1820, Trimmis - Landquart. Ausschnitt Abschnitt Mastrils.

Inhalt

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	3
2.1	Aufgabenstellung, Ziele und Vorgehen	3
2.2	Grundlagen	4
3	Referenzzustand	5
3.1	Abschnittseinteilung	5
3.2	Gerinneform	5
3.3	Geschiebehaushalt	9
3.4	Sohlenbreite	13
3.4.1	Historische Karten	13
3.4.2	Empirische Formeln	15
4	Anthropogene Einflüsse	17
4.1	Abflussregime	17
4.2	Geschiebehaushalt	20
4.2.1	Geschiebefracht	20
4.2.2	Vergleich mit dem Referenzzustand	22
4.3	Beispiel Alpenrhein Mastrils	24
5	Revitalisierungsplanung	27
5.1.1	Anforderungen	27
5.1.2	Revitalisierungsstrecken	27
5.1.3	Abflussregime	28
5.1.4	Geschiebehaushalt	28
6	Gewässerraumbreite	30
6.1	Sohlenbreite	30
6.2	Minimaler Gewässerraum	32
6.3	Erhöhter Gewässerraum	33
7	Grenzbreite für das Aufkommen von Auenwald	34

Anhang 1 Mittlere, minimale und maximale Sohlenbreiten gemäss historischen Karten

Anhang 2 Regimebreiten nach empirischen Methoden

Plan 1 Historische Karten, Abschnitte 1 - 8: Reichenau - Trübbach

Plan 2 Historische Karten, Abschnitte 9 - 12: Trübbach - Illmündung

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Fachbericht befasst sich mit dem Alpenrhein zwischen Reichenau und der Illmündung. Anhand von historischen Karten und weiteren Grundlagen wird für den Referenzzustand¹ die Gerinneform, der Geschiebehaushalt und die Sohlenbreite hergeleitet. Der Referenzzustand unterscheidet sich vom Naturzustand nur durch grossräumige Waldrodungen, Trockenlegung von Feuchtgebieten und Gewässerumleitungen in einen See.

Im **Referenzzustand** war die Gerinneform des Alpenrheins mehrheitlich verzweigt mit 2 oder mehr als 2 Gerinnen. Der Alpenrhein war ein auflandendes Gewässer, ausgelöst durch das fortschreitende Wachstum des Deltas in den Bodensee. Bei verzweigten Fliessgewässern ist der Auenwald mehrheitlich seitlich des dynamischen Bereichs angeordnet und es bestehen kaum oder nur wenig mit Gehölz bewachsene Inseln.

Die mittlere Sohlenbreite variierte zwischen 90m (Reichenau - Domat/Ems) und 470m (Bad Ragaz - Trübbach) mit lokalen Maximalwerten bis über 700m (Trimmis, Mastrils, Maienfeld, Sargans, Sevelen).

Die Geschiebefracht lag zwischen Reichenau und Mastrils in der Grössenordnung von 100'000 - 70'000m³/a (Abnahme in Fliessrichtung). Mit der Zufuhr der Landquart stieg die Geschiebefracht auf ca. 170'000m³/a; anschliessend nahm die Fracht infolge von Ablagerungen und Abrieb bis zur Illmündung auf ca. 30'000m³/a ab (alle Angaben im Referenzzustand).

Anschliessend wurden die **anthropogenen Einflüsse** auf das Abflussregime (reduzierte bettbildende Abflüsse infolge der grossen Speicherkraftwerke) und den Geschiebehaushalt (Kiesentnahmen, Kanalisierung) hergeleitet.

Die bettbildenden Abflüsse des Alpenrheins werden durch die Speicherkraftwerke um ca. 20% (Domat/Ems) bis ca. 13% (Rüthi) reduziert.

Die Geschiebefracht des Alpenrheins wird hauptsächlich durch die Kiesentnahmen im Kanton Graubünden (total ca. 225'000m³/a) um bis zu 80% reduziert. Als Folge davon ist der Geschiebehaushalt des Alpenrheins zwischen Reichenau und ca. Trübbach nach Art. 43a GSchG wesentlich beeinträchtigt.

Anhand der noch beschränkt naturnahen Strecke bei Mastrils wird aufgezeigt, wie sich infolge des veränderten Geschiebehaushalts die Gerinneform veränderte (von einem stark verzweigten Gerinne in den Übergangsbereich zu gewundenen Gerinnen mit Inseln und Bänken) und sich die Sohlenbreite von durchschnittlich 360m auf 140m verringerte.

Die geplante **Revitalisierung** und die erforderliche **Sanierung des Geschiebehaushalts** des Alpenrheins sind aufeinander abzustimmen. Dabei hat sich der Geschiebehaushalt an demjenigen im Referenzzustand zu orientieren. Dazu sind die Kiesentnahmen im Kanton Graubünden zu reduzieren und im Kanton St. Gallen neue Kiesentnahmestellen einzurichten.

Der **minimale Gewässerraum** wird anhand der natürlichen Sohlenbreite zuzüglich eines beidseitigen Uferstreifens von 15m berechnet. Der so ermittelte minimale Gewässerraum

¹ Der Referenzzustand ist der naturnahe Zustand bezüglich Morphologie und Breite, Abflussregime und Geschiebehaushalt. Der Referenzzustand unterscheidet sich vom Naturzustand nur durch grossräumige Waldrodungen, Trockenlegung von Feuchtgebieten und Gewässerumleitungen in einen See. Referenz für Abfluss und Geschiebelieferung sind die heutigen klimatischen Bedingungen [8].

variiert zwischen 120m (Reichenau - Domat/Ems) bis 500m (Fläsch - Trübbach). Der minimale Gewässerraum wird zudem mit verändertem Abflussregime und einem Geschiebehaushalt mit erforderlicher Geschiebefracht angegeben.

Der **erhöhte Gewässerraum** wird nach Roulier berechnet für Erfüllungsgrade der natürlichen Funktionen von 100% und 80%. Unter Berücksichtigung der natürlichen Sohlenbreite variiert der erhöhte Gewässerraum (Erfüllungsgrad 80%) zwischen 200m (Reichenau - Domat/Ems) und 890m (Fläsch - Trübbach). Der erhöhte Gewässerraum wird zudem mit verändertem Abflussregime und einem Geschiebehaushalt mit erforderlicher Geschiebefracht angegeben.

Verzweigte Fliessgewässer weisen seitlich des dynamischen Bereichs **Auenwald** auf. Die Breite des dynamischen Bereichs ist abhängig vom Auftreten grosser Hochwasser und von Trockenperioden und variiert daher in Zeit und Raum. Entspricht der Abstand zwischen den Uferverbauungen der mittleren Sohlenbreite im Referenzzustand, so ist im Mittel auf der Hälfte der Fliessstrecke Auenwald zu erwarten. Ist der Abstand zwischen den Uferverbauungen $\leq 75\%$ der mittleren Sohlenbreite, so ist kein signifikantes Aufkommen von Auenwald zu erwarten. Ist der Abstand zwischen den Uferverbauungen $\geq 140\%$ der mittleren Sohlenbreite, so kann auf der gesamten Fliessstrecke Auenwald erwartet werden.

Die Grenzbreiten für das Aufkommen von Auenwald werden auch für die reduzierten Breiten mit verändertem Abflussregime und einem Geschiebehaushalt mit erforderlicher Geschiebefracht angegeben.

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung, Ziele und Vorgehen

Gemäss Gewässerschutzgesetz ist an Fliessgewässern der Gewässerraum auszuscheiden. Für Gewässer mit einer Sohlenbreite von bis zu 15m bestehen in der Gewässerschutzverordnung in Abhängigkeit der natürlichen Sohlenbreite klare Vorgaben. Bei Gewässern mit einer Sohlenbreite $\geq 15\text{m}$ ist zur Bestimmung der Gewässerraumbreite ein Fachgutachten zu erstellen.

Die Flussbau AG wurde vom WWF St. Gallen angefragt, ein entsprechender Fachbericht für den Alpenrhein zwischen Reichenau und der Illmündung mit folgenden Zielen zu erarbeiten:

- (1) Ermitteln der natürlichen Sohlenbreite, des minimalen und erhöhten Gewässerraums.
- (2) Ermitteln der massgebenden anthropogenen Einflüsse auf das Abflussregime und den Geschiebehaushalt.
- (3) Ermitteln der Sohlenbreite, des minimalen und erhöhten Gewässerraums unter Berücksichtigung der grossen Speicherkraftwerke.
- (4) Ermitteln der Sohlenbreite, des minimalen und erhöhten Gewässerraums unter Berücksichtigung der grossen Speicherkraftwerke sowie der erforderlichen Geschiebefracht.
- (5) Ermitteln der Grenzbreite für gesichertes Aufkommen von Weich- und Hartholzaue für alle drei untersuchten Zustände.

Zudem wird der Geschiebehaushalt des Alpenrheins im Referenzzustand und im Istzustand aufgezeigt und beurteilt, ob im Istzustand eine wesentliche Beeinträchtigung gemäss Art. 43a GSchG vorliegt.

Das Vorgehen ist in Bild 1 dargestellt.

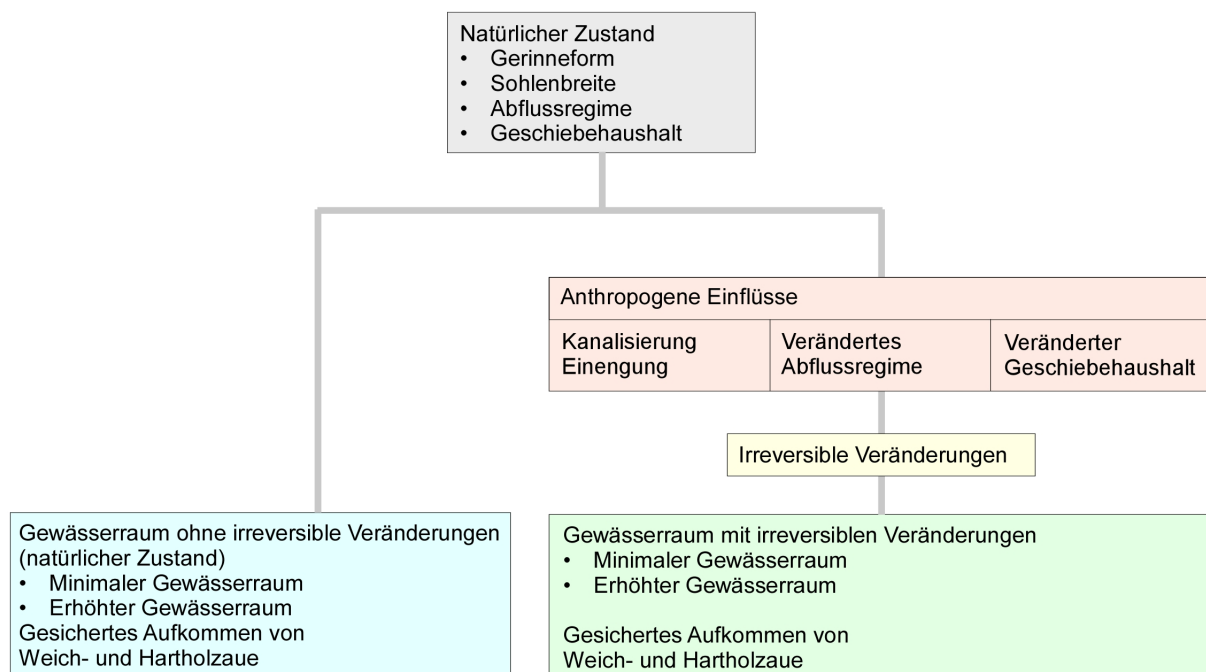


Bild 1 Vorgehen.

2.2 Grundlagen

Für die vorliegende Studie wurden folgende Grundlagen berücksichtigt:

- [1] Bundesamt für Umwelt, BAFU (08.11.2018). Geschiebehaushalt - Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. V15, Version für die Anhörung.
- [2] Flussbau AG SAH (5.11.2018). Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul „Geschiebehaushalt Massnahmen“ der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt.
- [3] Bundesamt für Umwelt (Juni 2019). Gewässerraum. Modulare Arbeitshilfe zur Festlegung und Nutzung des Gewässerraums in der Schweiz. Version zur Verabschiedung durch BPUK, LDK, BAFU, ARE, BLW.
- [4] Service conseil Zones Alluviales, Yverdon-les-Bains (01.07.2013). Espace nécessaire aux grands cours d'eau de Suisse. Travail réalisé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, Division Eaux.
- [5] Hunziker, Zarn & Partner (10.12.2014). Sanierung Geschiebehaushalt, Schlussbericht. Im Auftrag des Amts für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden.
- [6] Planungsgemeinschaft Zukunft Alpenrhein, Flussbau AG SAH. Hochwasserschutz Alpenrhein, Internationale Strecke, km65 - km91. Generelles Projekt, Fachplanung Hydraulik und Geschiebe, **Morphologie** (1.6.2018). Auftraggeber Internationale Rheinregulierung.
- [7] Planungsgemeinschaft Zukunft Alpenrhein, Flussbau AG SAH. Hochwasserschutz Alpenrhein, Internationale Strecke, km65 - km91. Generelles Projekt, Fachplanung Hydraulik und Geschiebe, **Nachweise Hochwasserschutz** (1.6.2018). Auftraggeber Internationale Rheinregulierung.
- [8] Überarbeitungskonzept für die Vollzugshilfe Sanierung Geschiebehaushalt - Massnahmen. Vorschlag für die Begleitgruppe (31.1.2020). Bundesamt für Umwelt.

Historische Karten:

- [9] Trimmis bis Trübbach (ca. 1820). Staatsarchiv Kanton Graubünden (P03-R1A/2A.)
- [10] Felsberg bis Plessur (1840). Staatsarchiv Kanton Graubünden (P03-R2).
- [11] Domat/Ems bis Masans (1847). Staatsarchiv Kanton Graubünden (P03-R5B).
- [12] Plessur bis Trübbach (1854). Staatsarchiv Kanton Graubünden (P03-R10B/C).
- [13] Reichenau bis Domat/Ems (1856). Staatsarchiv Kanton Graubünden (P03-R13).
- [14] Domat/Ems bis Chur (ca. 1860). Staatsarchiv Kanton Graubünden (P03-R8B).
- [15] Plessur bis Tardisbrücke (ca. 1880). Staatsarchiv Kanton Graubünden (P03-R59/60/61).
- [16] Pestalozzikarte "Das Rhein- und Seeztal bei Sargans" (1818). Landquart bis Trübbach. Staatsarchiv Kanton St. Gallen.
- [17] Eschmannkarte (1854). Maienfeld bis Illmündung. Staatsarchiv Kanton St. Gallen.
- [18] Rhein-Correction (1862). Maienfeld bis Illmündung. Staatsarchiv Kanton St. Gallen.
- [19] Buchs - Bodensee, Römerkarte (1769). Staatsarchiv Kanton St. Gallen.
- [20] Rheinstromkarte Duile / Negrelli (1825). Staatsarchiv Kanton St. Gallen.

3 Referenzzustand

3.1 Abschnittseinteilung

Für die vorliegende Studie wurde der Alpenrhein zwischen Reichenau und der Illmündung bei bedeutenden Zuflüssen und aufgrund von geomorphologischen Randbedingungen in die Abschnitte gemäss Tabelle 1 und Bild 2 unterteilt.

Tabelle 1 Alpenrhein Reichenau (km0.0) bis Illmündung (km65.4) mit Abschnitten und Charakteristik.

Nr.	von ... bis [km]	Distanz [km]	Ortsbezeichnungen	Charakteristik
1	0.0 - 3.5	3.5	Reichenau - Domat/Ems	Einengung durch Talflanke und Bergsturz
2	3.5 - 9.6	6.1	Domat/Ems - Plessur	Breite Talebene
3	9.6 - 10.7	1.1	Plessur - Masans	Einengung durch Schwemmkegel Plessur
4	10.7 - 16.0	5.3	Masans - Trimmis	Einengung durch mehrere rechtsseitige Schwemmkegel
5	16.0 - 23.4	7.4	Trimmis - Landquart	Breite Talebene
6	23.4 - 28.9	5.5	Landquart - Bad Ragaz	Breite Talebene
7	28.9 - 29.6	0.7	Bad Ragaz - Fläsch	Einengung durch Schwemmkegel Tamina und Feldrüfi
8	29.6 - 35.9	6.3	Fläsch - Trübbach	Breite Talebene
9	35.9 - 40.2	4.3	Trübbach - Säga	Linienführung durch Talflanken bestimmt (links Trübbach / rechts Säga)
10	40.2 - 49.5	9.3	Säga - Buchs	Breite Talebene
11	49.5 - 61.9	12.4	Buchs - Sennwald	Breite Talebene mit lokaler Begrenzung durch Eschenberg und Bergsturz
12	61.9 - 65.4	3.5	Sennwald - Illmündung	Leichte Einengung durch Schwemmkegel Ill

3.2 Gerinneform

Bei geschiebeführenden Fliessgewässern werden gemäss [1] folgende fünf Gerinneformen unterschieden (Bild 3):

- 1 Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen**

Sehr breite Schotterebene mit mehrfach verzweigtem Gerinne. Die Schotterebene wird beidseitig durch Gehölz begrenzt (unterhalb Baumgrenze).
- 2 Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen**

Breite Schotterebene mit (mehrheitlich) zwei bei Mittelwasserabfluss benetzten Gerinnen. Die Schotterebene wird beidseitig durch Gehölz begrenzt. Einzelne Bänke (eher am Rand der Schotterebene) können mit Gehölz bewachsen sein.
- 3 Gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken**

Gewundenes und oft stark pendelndes Gerinne mit Verzweigungen, Seiten- und Nebengerinnen sowie Kiesbänken. Die dazwischen liegenden Inseln sind mit Gehölz bewachsen. Ausserhalb des dynamischen Bereichs bestehen oft breite Auenwaldgebiete mit Altarmen.

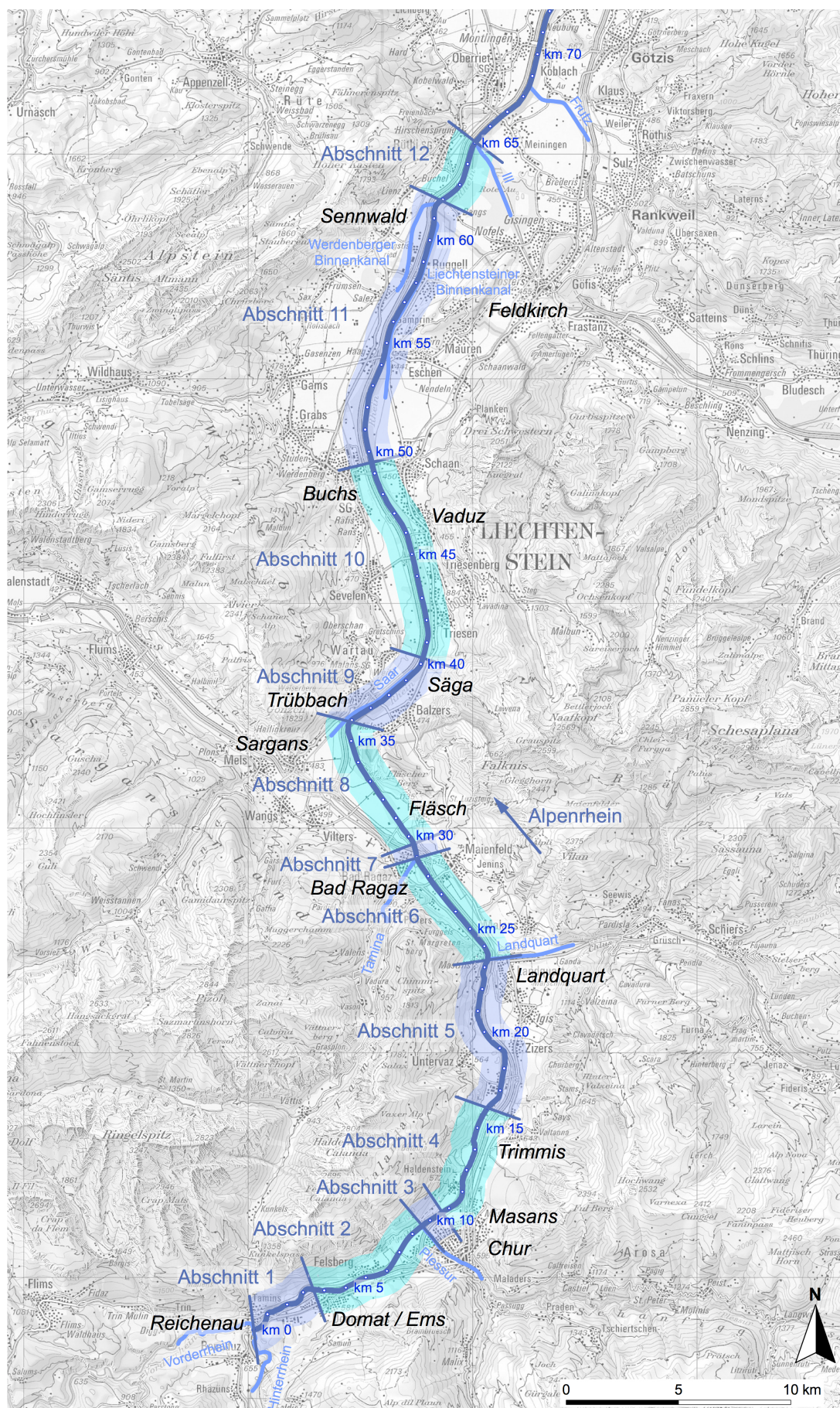


Bild 2 Alpenrhein mit Zuflüssen, Kilometrierung und den Abschnitten 1 - 12.

- | | |
|--|---|
| <p>4 Gewundene Gerinne mit Bänken</p> | <p>Gewundenes Einzelgerinne mit Kiesbänken in morphologisch geeigneten Abschnitten (entlang Gleitufers, lokal auch in Gerinnemitte). Das Gewässer wird beidseitig durch Gehölz begrenzt.</p> <p>Zwischenstrecken können auch eher gestreckt sein mit alternierenden Bänken.</p> |
| <p>5 Gestreckte und gewundene Gerinne</p> | <p>Gerinne, welche infolge der geomorphologischen Verhältnisse eine geringe Breite aufweisen oder sehr steil sind und keine Bänke aufweisen.</p> |

Bild 3

Gerinneformen geschiebeführender Flüsse gemäss [1]. Die Übergänge zwischen den Gerinneformen sind fließend.



Verzweigte Gerinne mit mehr als 2 Teilgerinnen.
Beispiel: Hinterrhein bei Rhäzüns.



Verzweigte Gerinne mit 2 Teilgerinnen.
Beispiel: Alpenrhein bei Kriessern.



Gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken.
Beispiel: Limmat bei Dietikon.



Gewundene Gerinne mit Bänken.
Beispiel: Aare bei Wynau.



Gestreckte und gewundene Gerinne.
Beispiel: Chirel im Dimentigal.

Die Gerinneform im Referenzzustand der 12 untersuchten Abschnitte am Alpenrhein ist aus den historischen Karten ersichtlich. Zusätzlich wurde die Gerinneform mithilfe des modifizierten Ahmari & Da Silva Diagramms bestimmt (Bild 4).

In Tabelle 2 ist für alle 12 Abschnitte die Gerinneform gemäss den historischen Karten und der Einteilung gemäss modifiziertem Ahmari & Da Silva Diagramm angegeben. Dementsprechend war der **Alpenrhein zwischen Reichenau und der Illmündung mit 2 oder mehr als 2 Gerinnen verzweigt**, mit Ausnahme von kurzen Abschnitten, auf welchen seine Breite durch anstehenden Fels, Bergsturzmaterial oder Schwemmkegel stark begrenzt wurde (Reichenau - Domat Ems, Schwemmkegel Plessur und Landquart).

Bild 4

Modifiziertes Ahmari & Da Silva Diagramm mit der Gerinneform der 12 Abschnitte des Alpenrheins.

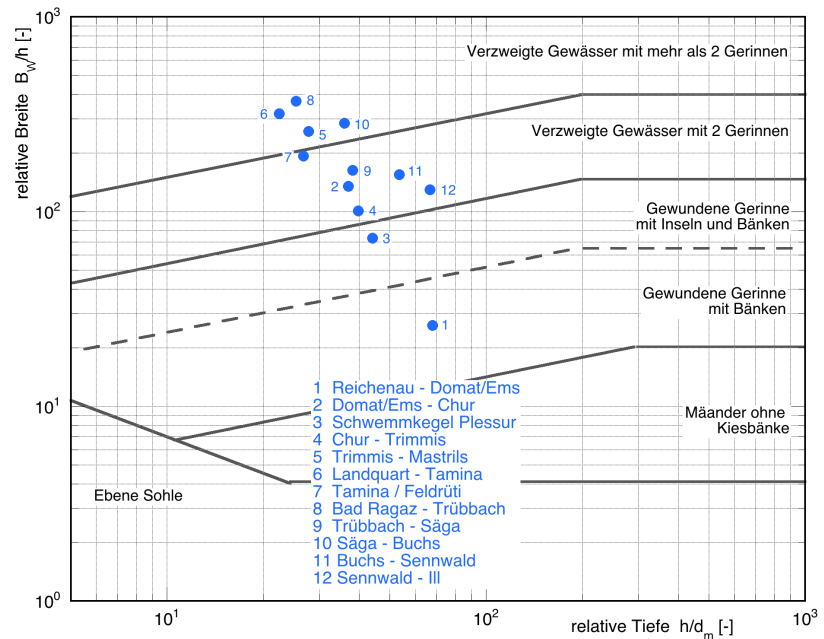


Tabelle 2 Abschnitte des Alpenrheins mit Ø Breite, der Gerinneform gemäss historischen Karten sowie modifiziertem Ahmari & Da Silva Diagramm.

Nr.	Abschnitt	Ø Breite [m]	Historische Karten	Gerinneform gemäss historischen Karten	Gerinneform gemäss modifiziertem Ahmari & Da Silva Diagramm
1	Reichenau - Domat/Ems	90	P03-R13 (1856)	Gewunden mit alternierenden Bänken	Gewunden mit Bänken
2	Domat/Ems - Masans	240	P03-R5B (1847)	Verzweigt mit 2 Gerinnen und 2 kleinen bewachsenen Inseln	Verzweigt mit 2 Gerinnen
3	Plessur - Masans	160	P03-R59/60/61 (ca. 1880)	Gestreckt (Fels) mit 1 bewachsener Insel	Gewunden mit Inseln und Bänken
4	Masans - Trimmis	200	P03-R10B/C (1854) P03-R59/60/61 (1880)	Verzweigt mit 2 Gerinnen / Gewunden mit grossen Bänken und einzelnen bewachsenen Inseln	Verzweigt mit 2 Gerinnen
5	Trimmis - Landquart	360	P03-R1A (1820)	Verzweigt mit 2 Gerinnen, bewachsene Inseln am Rand	Verzweigt mit 3 Gerinnen
6	Landquart - Bad Ragaz	430	P03-R2A (1820)	Verzweigt mit 2-4 Gerinnen	Verzweigt mit 3 Gerinnen
7	Bad Ragaz - Fläsch	310	P03-R2A (1820)	Gewunden mit Bänken bis verzweigt mit 2 Gerinnen	Verzweigt mit 2-3 Gerinnen
8	Fläsch - Trübbach	470	P03-R2A (1820)	Verzweigt mit 3 Gerinnen	Verzweigt mit 3 Gerinnen
9	Trübbach - Säga	280	Eschmannkarte	Nicht ersichtlich	Verzweigt mit 2 Gerinnen
10	Säga - Buchs	410	Eschmannkarte	Nicht ersichtlich	Verzweigt mit 3 Gerinnen
11	Buchs - Sennwald	300	Römerkarte	Verzweigt mit 2 Gerinnen	Verzweigt mit 2 Gerinnen
12	Sennwald - Illmündung	290	Duile-Karte	Verzweigt mit 2 Gerinnen	Verzweigt mit 2 Gerinnen

3.3 Geschiebehaushalt

Im natürlichen Zustand transportierte der Alpenrhein einen Teil seines Geschiebes bis zum Bodensee. Infolge des Deltawachstums und der damit verbundenen Laufverlängerung landete die Rheintalebene zwischen Domat/Ems und dem Bodensee langsam auf. Bei Hochwasser wurde das Geschiebe im Bereich der Alluvion (migrierender Sohlenbereich des Fliessgewässers) abgelagert. Seitlich der Alluvion bestanden zum Teil ausgedehnte Riede. Die geschiebeführenden Zuflüsse bildeten in der Rheintalebene Schwemmkegel, die sich mit der fortschreitenden Auflandung ebenfalls anhoben. Der alluviale Bereich der Rheintalebene ist auf geomorphologischen und hydrogeologischen Karten dargestellt.

Dementsprechend war der Alpenrhein im natürlichen Zustand ein auflandendes Gewässer, dessen Geschiebefracht in Fliessrichtung infolge Ablagerung und Abrieb stark abnahm.

Der Geschiebehaushalt des Alpenrheins im natürlichen Zustand wurde wie folgt abgeschätzt:

- (1) Berechnung der $\emptyset$ transportierbaren Geschiebefracht des Alpenrheins in der Mündungsstrecke vor dem Bodensee [6].
- (2) Abschätzen des $\emptyset$ Deltawachstums in den Bodensee (Länge in [m/a]).
- (3) Planimetrieren der Fläche der Alluvion zwischen Domat/Ems und dem Bodensee in Abschnitten von je 2km Länge und Berechnung des jährlich in den Abschnitten abgelagerten Kiesvolumens (für $\emptyset$ Deltawachstum).
- (4) Abschätzen der Geschiebeeinträge der Zuflüsse auf Basis der aktuellen Einträge [7], der Kiesentnahmen (vgl. Tabelle 9) sowie aufgrund von morphologischen Prozessen im natürlichen Zustand (Ablagerung auf Schwemmkegeln, Auflandungsstrecken).
- (5) Berechnung des Längenprofils der Geschiebefracht unter Berücksichtigung der Geschiebeeinträge, der Geschiebeablagerungen (Auflandung Alluvion), des Abriebs und der $\emptyset$ transportierbaren Geschiebefracht in der Mündungsstrecke.

Um die Unsicherheiten an den Eingabegrößen zu berücksichtigen wurden drei Szenarien mit den Werten und Geschiebeeinträgen gemäss Tabelle 3 untersucht.

Tabelle 3 Berücksichtigte Eingabegrößen zur Ermittlung des Geschiebehaushalts des Alpenrheins im Referenzzustand für die Szenarien 1 - 3. Geschiebezufuhr (GZ) des Alpenrheins bei Reichenau (Vorder- und Hinterrhein) sowie von Plessur, Landquart, Tamina, Ill und Frutz; transportierte Geschiebefracht (GF) in der Mündungsstrecke und berücksichtigtes Deltawachstum. Angegeben ist zudem der berücksichtigte Abriebkoeffizient nach Sternberg.

Szenario (Sz)	GZ AR Reichenau [m³/a]	GZ Plessur [m³/a]	GZ Landquart [m³/a]	GZ Tamina [m³/a]	GZ Ill [m³/a]	GZ Frutz [m³/a]	GF Mündungsstr. [m³/a]	Delta-wachstum [m/a]
c-Wert	0.012	0.015	0.02	0.012	0.012	0.012		
Sz1	80'000	0	80'000	0	30'000	0	15'000	0.7
Sz2	100'000	5'000	100'000	5'000	38'000	5'000	17'000	1.0
Sz3	120'000	8'000	125'000	8'000	50'000	4'000	20'000	1.25

Der Abrieb nach Sternberg wurde mit c-Werten von 0.012 bis 0.020 berücksichtigt. Der Kiesanteil in der Alluvion wurde zwischen 25% und 55% variiert (Abnahme Kiesanteil longitudinal und lateral).

Die Abschätzung der Geschiebezufuhr der massgebenden Zuflüsse erfolgte unter Berücksichtigung folgender Angaben (Kiesentnahmen vgl. Tabelle 9):

- Hinterrhein**
- Ø Kiesentnahmen im Einzugsgebiet der Albula 49'000m³/a.
 - Gemäss [5] beträgt das Geschiebeaufkommen der Albula insgesamt ca. 55'000m³/a.
 - Im Stausee Solis wird kein Geschiebe mehr zurückgehalten (Umleitstollen). D.h. es dürften ca. 6'000m³/a durch den Stollen transportiert werden².
 - Rückhalt im Stausee Sufers von Ø 11'000m³/a [5].
 - Aufgrund der Kiesentnahmen und des Rückhalts im Stausee Sufers resultiert bei Reichenau eine Fracht von ca. 40'000m³/a (Abrieb berücksichtigt). Zur Abschätzung der Geschiebefracht im natürlichen Zustand muss das Geschiebeaufkommen in den Zwischeneinzugsgebieten (Ferrera-Rhein, Nolla, etc.) dazugezählt und Ablagerungen in der allfälligen Auflandungsstrecke Thusis - Rhäzuns abgezogen werden.
 - Das gesamte Geschiebeaufkommen des Hinterrheins bei Reichenau dürfte in der Grössenordnung von **40'000 - 60'000m³/a** liegen.
- Vorderrhein**
- Aktuelle Kiesentnahmen im Einzugsgebiet 25'000m³/a.
 - Für den Geschiebeeintrag in den Alpenrhein im natürlichen Zustand muss der aktuelle Geschiebeeintrag des Vorderrheins dazugezählt werden (inkl. Rückhalt in den grossen Speicherseen und Geschiebesammeln).
 - Das gesamte Geschiebeaufkommen des Vorderrheins bei Reichenau dürfte in der Grössenordnung von **40'000 - 60'000m³/a** liegen.
- AR Reichenau** Gemeinsamer Eintrag von Hinter- und Vorderrhein.
- Verhinderter Eintrag wegen der Kiesentnahmen und des Rückhalts im Stausee Sufers von knapp 60'000m³/a (inkl. Berücksichtigung Abrieb).
 - In den Szenarien 1 - 3 wird von einer Geschiebefracht von **80'000 bis 120'000m³/a** ausgegangen.
- Plessur**
- Das Geschiebe der Plessur wurde zumindest zum Teil auf dem auflandenden Schwemmkegel abgelagert. Bei einer Fläche des Schwemmkegels von ca. 4km² und einer Auflandungsrate von 3mm/a wird ein Volumen von 12'000m³/a zurückgehalten (Kies und Feinsedimente).
- Für den Geschiebeeintrag in den Alpenrhein wird daher eine Bandbreite von **0 - 8'000m³/a** berücksichtigt.
- Landquart**
- Die aktuellen Kiesentnahmen an den Seitenbächen der Landquart (Arieschbach, Furnerbach und Schraubach) erreichen Ø 115'000m³/a. Diese dokumentierten Kiesentnahmen müssen nicht dem Geschiebeaufkommen in Einzugsgebiet entsprechen. Insbesondere beim Furnerbach ist das Kiesreservoir so gross, dass Entnahmen, die das Geschie-

² Die Abklärungen der VAW ergeben für die Jahre 2012 - 2016 eine Fracht von durchschnittlich 8'700m³/a.

- beaufkommen übertreffen, sich erst nach Jahren bis Jahrzehnten in einer signifikanten Sohlenabsenkung äussern.
- Der Abrieb des Geschiebes der drei Wildbäche ist sehr gross (Bündner Schiefer).
 - Das Geschiebe der Landquart wurde zumindest zum Teil auf dem auflandenden Schwemmkegel abgelagert. Bei einer Fläche des Schwemmkegels von ca. 6km^2 und einer Auflandungsrate von 3mm/a wird ein Volumen von $18'000\text{m}^3/\text{a}$ zurückgehalten (Kies und Feinsedimente).
 - Aktuell werden Kiesentnahmen von $115'000\text{m}^3/\text{a}$ dokumentiert und bei den Modellberechnungen (Kalibrierung 1995 - 2005) wird von einem Geschiebeeintrag von $35'000\text{m}^3/\text{a}$ ausgegangen (total $150'000\text{m}^3/\text{a}$). Bei Ablagerungen von $20'000\text{m}^3/\text{a}$ und einem Abrieb von $30'000\text{m}^3/\text{a}$ resultiert ein Geschiebeeintrag in den Alpenrhein von ca. $100'000\text{m}^3/\text{a}$. Dieser Wert ist in Anbetracht des oberen Einzugsgebietes mit eher durchschnittlicher Geschiebelieferung als eher hoch einzustufen.
 - In den drei Szenarien wird ein Geschiebeeintrag von $80'000$ - $125'000\text{m}^3/\text{a}$ berücksichtigt.

Zusammenfassung Geschiebehaushalt Alpenrhein im natürlichen Zustand (Bild 5)

- Durch **Hinter- und Vorderrhein** wurden durchschnittlich $80'000$ - $120'000\text{m}^3/\text{a}$ Geschiebe in den Alpenrhein eingetragen. Der beste Schätzwert liegt bei **$100'000\text{m}^3/\text{a}$** .
- Die **Plessur** transportierte 0 - $8'000\text{m}^3/\text{a}$ in den Alpenrhein, bester Schätzwert **$4'000\text{m}^3/\text{s}$** . Viel Geschiebe wurde auf dem auflandenden Schwemmkegel abgelagert.
- Die Geschiebefracht nahm bis vor die Landquartmündung (**Mastrils**) auf $55'000$ - $85'000\text{m}^3/\text{a}$ ab. Der beste Schätzwert liegt bei **$70'000\text{m}^3/\text{a}$** .
- Die **Landquart** transportierte $80'000$ - $125'000\text{m}^3/\text{a}$ Geschiebe in den Alpenrhein, bester Schätzwert **$100'000\text{m}^3/\text{a}$** . Auf dem auflandenden Schwemmkegel wurden knapp $20'000\text{m}^3/\text{a}$ Geschiebe abgelagert.
- Unmittelbar **flussabwärts der Landquartmündung** erreichte die durchschnittliche Geschiebefracht $135'000\text{m}^3/\text{a}$ bis $210'000\text{m}^3/\text{a}$, bester Schätzwert **$170'000\text{m}^3/\text{a}$** .
- Die **Tamina** transportierte 0 - $8'000\text{m}^3/\text{a}$ in den Alpenrhein, bester Schätzwert **$4'000\text{m}^3/\text{a}$** . Viel Geschiebe wurde auf dem auflandenden Schwemmkegel abgelagert.
- **Bis vor die Illmündung** nahm die Geschiebefracht des Alpenrheins infolge von Ablagerungen und Abrieb auf $28'000$ - $39'000\text{m}^3/\text{a}$ ab, bester Schätzwert **$33'000\text{m}^3/\text{a}$** .
- Die **Ill** transportierte $30'000$ - $50'000\text{m}^3/\text{a}$ in den Alpenrhein, bester Schätzwert **$38'000\text{m}^3/\text{a}$** . Ablagerungen auf dem Schwemmkegel umfassten ca. $10'000\text{m}^3/\text{a}$.
- **Zwischen der Illmündung und der Mündung in den Bodensee** nahm die Geschiebefracht von $57'000$ - $88'000\text{m}^3/\text{a}$ (bester Schätzwert **$68'000\text{m}^3/\text{a}$**) auf **$15'000$ - $20'000\text{m}^3/\text{a}$** ab. Die Frutz transportierte 0 - $5'000\text{m}^3/\text{a}$ in den Rhein.

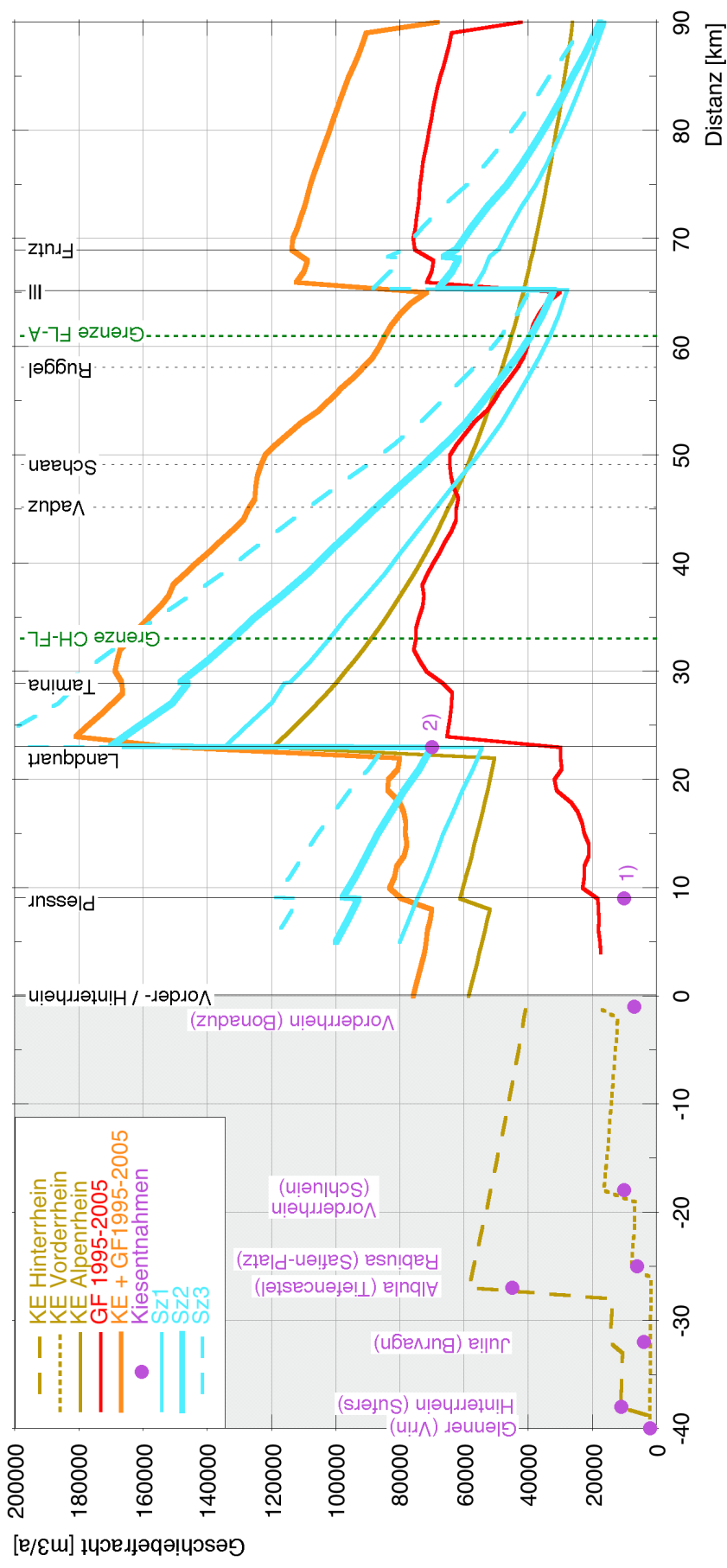


Bild 5 Längsprofil der Geschiebefracht im Alpenrhein (km0 - km90) für folgende Zustände (Abrieb berücksichtigt):

- Blau: Natürlicher Zustand (Szenarien 1 - 3)
- Rot: Aktueller Zustand (1995 - 2005)
- Hellbraun: Geschiebefracht unter alleiniger Berücksichtigung der Kiesentnahmen (an Hinterrhein, Vorderrhein, Alpenrhein und Landquart) sowie des Rückhalts im Stausee Sufers.
- Orange: Aktueller Zustand zuzüglich Geschiebefracht ohne Kiesentnahmen

3.4 Sohlenbreite

3.4.1 Historische Karten

Die natürliche Sohlenbreite wurde anhand der massstäblichen historischen Karten bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Karten mit neuerem Datum zunehmend mehr Uferverbauungen zeigen und daher die Sohlenbreite nicht mehr dem natürlichen Zustand entspricht (vgl. Farbkennzeichnung in der Tabelle im Anhang 1).

Die Gewässersohle umfasst den bei Mittelwasserabfluss benetzten Bereich zuzüglich der gehölzfreien Flächen wie Kiesbänke und Pioniervegetation. Die Sohlenbreite wurde wie folgt bestimmt:

- **Längenprofil der Sohlenbreite mit Minimal- und Maximalwerten** (Bild 6, Tabelle 4): Die Sohlenbreite wurde in regelmässigen Abständen von ca. 250m gemessen.
- **Mittlere Sohlenbreite** (Tabelle 4): Planimetrieren des Sohlenbereichs eines Abschnitts dividiert durch die Länge des Fliessweges.

Die mittlere Sohlenbreite variierte zwischen 90m und 470m. In der Tendenz nahm die mittlere Sohlenbreite von Reichenau bis zum Abschnitt Bad Ragaz - Trübbach zu und anschliessend wieder ab. Die minimale Breite von 57m wurde im obersten Abschnitt (Reichenau - Domat/Ems) und die grösste Breite von 1037m bei Mastrils erreicht. Letztere befindet sich im Rückstaubereich des Landquart-Schwemmkegels.

Tabelle 4 Mittlere (Ø) natürliche Sohlenbreite sowie Minimal- und Maximalwert für die 12 Abschnitte. Mittlere Sohlenbreite gerundet auf 10m.

Nr.	Abschnitt	von ... bis [km]	Ø Breite [m]	Min. Breite [m]	Max. Breite [m]
1	Reichenau - Domat/Ems	0.0 – 3.5	90	57	121
2	Domat/Ems - Plessur	3.5 – 9.6	240	85	466
3	Plessur - Masans	9.6 – 10.7	160	110	248
4	Masans - Trimmis	10.7 – 19.8	200	99	768
5	Trimmis - Landquart	19.8 – 23.4	360 ³	90	1'037
6	Landquart - Bad Ragaz	23.4 – 28.9	430	50	702
7	Bad Ragaz - Fläsch	28.9 – 29.6	310	184	433
8	Fläsch - Trübbach	29.6 – 35.9	470	138	714
9	Trübbach - Säga	35.9 – 40.2	280	107	445
10	Säga - Buchs	40.2 – 49.5	410	234	756
11	Buchs - Sennwald	49.5 – 61.9	300	192	513
12	Sennwald - Illmündung	61.9 – 65.4	290	101	511

³ Ohne Überbreite im Rückstaubereich der Landquart-Schwemmkegels, vgl. Plan 1 (inkl. Überbreite ergibt sich eine Ø Breite von 400m).

Alpenrhein GR / SG / FL: Sohlenbreiten aus historischen Karten

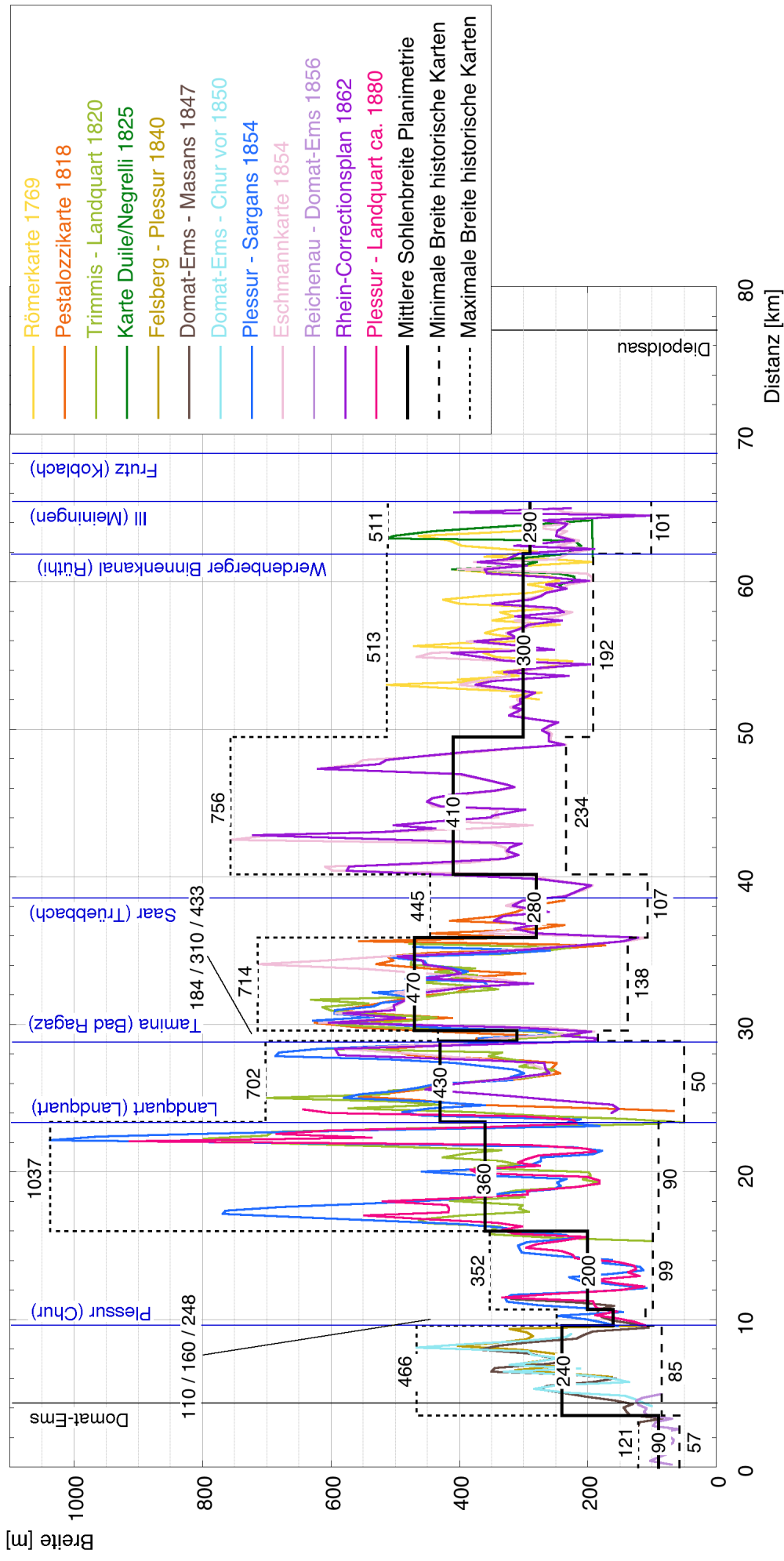


Bild 6 Längenprofil der Sohlenbreite des Alpenrheins gemäss historischen Karten.

3.4.2 Empirische Formeln

Mit empirischen Formeln lässt sich die Regimebreite eines Gewässers berechnen. Die Regimebreite bezeichnet die Gerinnebreite, die sich im Mittel (beim Fehlen von Uferverbauungen) einstellt. Die Formeln basieren auf dem gerinnebildenden Abfluss ($HQ_2 - HQ_5$), einem charakteristischen Korndurchmesser (meist d_{50}) sowie bei einzelnen Formeln auf dem Gefälle. Weitere Einflussgrößen wie die Geschiebefracht werden nicht berücksichtigt.

Für den Alpenrhein wurden die Formeln von Parker, Ikeda, Ashmore und Millar angewandt. In Tabelle 5 sind die berücksichtigten Eingabegrößen angegeben. Weil beim Alpenrhein im oberen Abschnitt das Sohlenmaterial deutlich gröber ist als das Geschiebe, ist die Wahl des massgebenden Durchmessers mit grossen Unsicherheiten behaftet. Das d_{90} wurde zur Wasserspiegelberechnung und Bestimmung der Abflusstiefe verwendet.

Tabelle 5 Eingabegrößen. d_m und d_{90} bezüglich Grobgeschiebe⁴.
RZ: Referenzzustand; IZ: Istzustand.

Nr.	Abschnitt	HQ ₂ [m ³ /s]		HQ ₅ [m ³ /s]		$d_m (>d_{50})$ [cm]	d_{90} [cm]	Gefälle [‰]
		RZ	IZ	RZ	IZ			
1	Reichenau - Domat/Ems	970	790	1'300	1'020	5.0	15	2.3
2	Domat/Ems - Plessur	970	790	1'300	1'020	5.0	15	2.3
3	Plessur - Masans	1'000	820	1'330	1'070	5.0	15	3.1
4	Masans - Trimmis	1'000	820	1'330	1'070	5.0	15	2.8
5	Trimmis - Landquart	1'000	820	1'330	1'070	5.0	15	2.9
6	Landquart - Bad Ragaz	1'070	890	1'380	1'200	6.0	18	2.9
7	Bad Ragaz - Fläsch	1'090	910	1'390	1'230	6.0	18	2.9
8	Fläsch - Trübbach	1'090	910	1'390	1'230	5.0	15	2.8
9	Trübbach - Säga	1'090	910	1'390	1'230	4.5	13.5	2.6
10	Säga - Buchs	1'110	930	1'430	1'260	4.0	12.0	2.2
11	Buchs - Sennwald	1'110	930	1'430	1'260	3.5	10.5	1.6
12	Sennwald - Illmündung	1'160	970	1'480	1'310	3.0	9.0	1.4

⁴ Entsprechend dem Verwendungszweck für die empirischen Formeln und zur Bestimmung der Abflusstiefe h.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse gemäss Tabelle 6 zeigt, dass die berechneten Regimebreiten sowohl mit der Wahl des Abflusses, als auch mit der Wahl der Formel um bis zu einem Faktor 2 variieren. Der Vergleich mit der mittleren Sohlenbreite aus den historischen Karten zeigt zudem, dass mit den empirischen Formeln die Sohlenbreite der verzweigten Abschnitte in der Regel stark unterschätzt wird (rote Felder).

Tabelle 6 **Sohlenbreite** (B_s) gemäss historischen Karten sowie **Regimebreite** für verschiedene empirische Formeln (Referenzzustand mit unveränderten Abflüssen).

Markierungen:

Rot: Berechnete Sohlenbreite ist zu klein.

Blau: Berechnete Sohlenbreite entspricht in etwa den historischen Karten.

Gelb: Berechnete Sohlenbreite ist zu gross.

Nr.	Abschnitt	Bs hist. Karten [m]	Parker [m]		Ikeda [m]		Ashmore [m]		Millar [m]	
			HQ ₂	HQ ₅	HQ ₂	HQ ₅	HQ ₂	HQ ₅	HQ ₂	HQ ₅
1	Reichenau - Domat/Ems	90	144	167	231	308	188	236	190	233
2	Domat/Ems - Plessur	250	144	167	231	308	188	236	190	233
3	Plessur - Masans	160	147	169	338	449	243	303	232	283
4	Masans - Trimmis	200	147	169	300	397	224	280	218	266
5	Trimmis - Landquart	360	147	169	312	414	231	288	223	272
6	Landquart - Bad Ragaz	430	145	165	256	329	214	261	204	243
7	Bad Ragaz - Fläsch	310	146	165	261	331	217	262	206	244
8	Fläsch - Trübbach	470	153	173	326	415	240	290	231	274
9	Trübbach - Säga	280	157	178	349	444	244	294	240	284
10	Säga - Buchs	410	163	185	347	445	236	287	240	286
11	Buchs - Sennwald	300	169	192	291	373	202	246	219	261
12	Sennwald - Illmündung	290	180	203	326	415	210	254	234	278

4 Anthropogene Einflüsse

4.1 Abflussregime

Der Abfluss des Alpenrheins wurde oder wird an folgenden Messstationen erfasst:

- (1) Felsberg und Domat / Ems. Massgebend für Strecke Reichenau - Landquart.
- (2) Bad Ragaz und Bangs (A). Massgebend für Strecke Landquart - III.
- (3) Schmitter und Diepoldsau. Massgebend für Strecke III bis Bodensee.

Die grossen Speicherkraftwerke im Einzugsgebiet wurden mehrheitlich zwischen 1955 und 1965 erstellt. Die Periode vor 1965 wird als wenig beeinflusst (natürlich) und diejenige ab 1966 als Kraftwerk beeinflusst betrachtet. In Bild 7 bis Bild 9 sind für die drei Messstandorte die jährlichen Spitzenabflüsse der zwei Messperioden dargestellt.

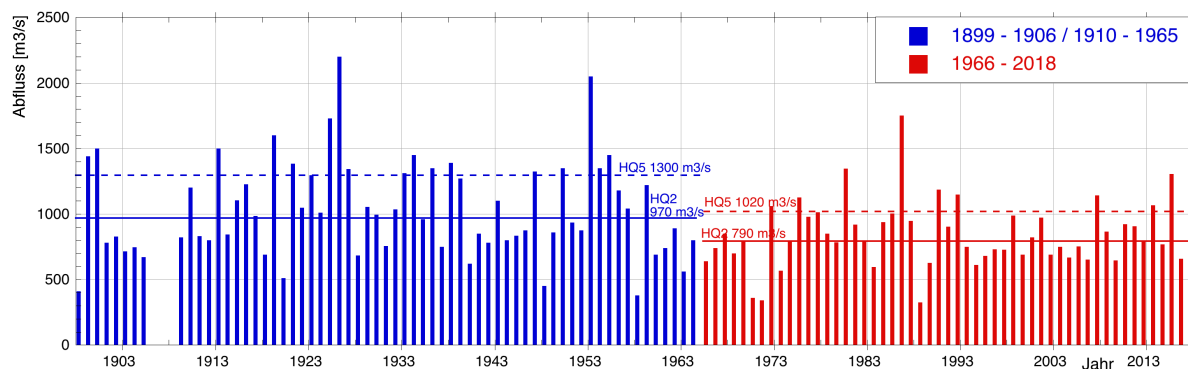


Bild 7 Abflussmessstation Felsberg und Domat/Ems. Jährliche Spitzenabflüsse.

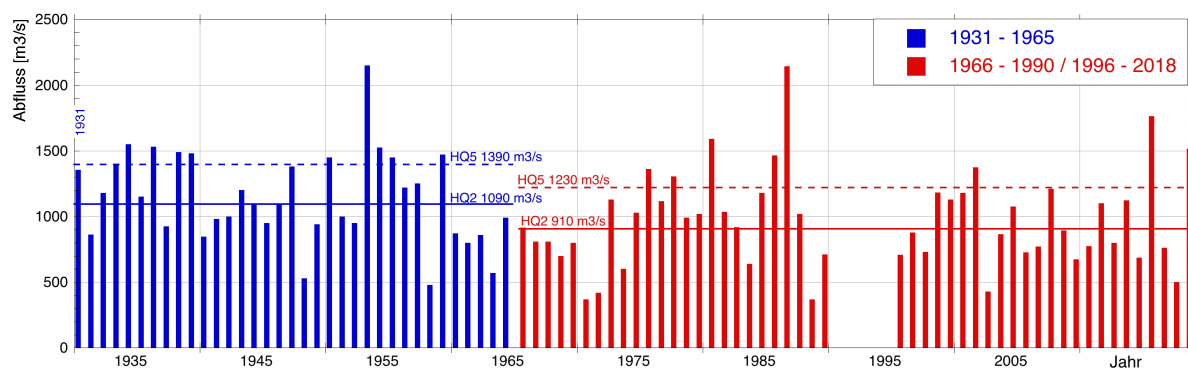


Bild 8 Abflussmessstation Bad Ragaz und Bangs. Jährliche Spitzenabflüsse⁵.
Bad Ragaz 1931 - 1990; Bangs 1996 - 2019.

⁵ Zur Vergleichbarkeit der Daten der zwei Messstationen wurden die Spitzenabflüsse der Station Bangs über das Verhältnis der Einzugsgebietsgrössen auf die Station Bad Ragaz umgerechnet.

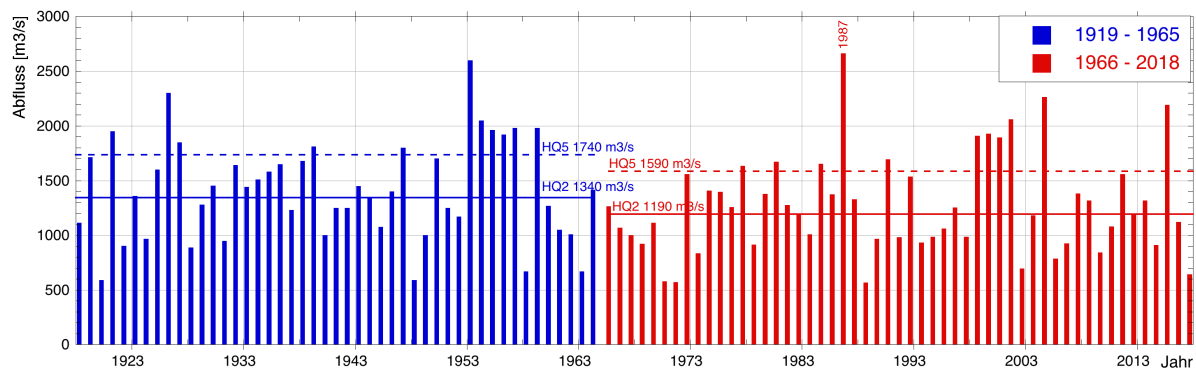


Bild 9 Abflussmessstation Schmitter und Diepoldsau. Jährliche Spitzenabflüsse.

Für die morphologischen Untersuchungen wird der bettbildende Abfluss benötigt. Dieser entspricht einem HQ_2 bis HQ_5 . Diese zwei Abflüsse wurden für die zwei Perioden (bis 1965 / ab 1966) durch Frequenzanalysen bestimmt. Zwischen den Messstationen wurden die Abflüsse unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsgrösse abgestuft. Es resultieren die Werte entsprechend Tabelle 7. In Bild 10 ist das Längenprofil der Abflüsse HQ_2 und HQ_5 (ohne / mit KW-Einfluss) dargestellt. **Dementsprechend wurde infolge des Einflusses der grossen Speicherkraftwerke das HQ_2 um 19 - 11% und das HQ_5 um 22 - 9% reduziert.**

Tabelle 7 Bettbildende Abflüsse HQ_2 und HQ_5 im natürlichen Zustand und im Kraftwerk beeinflussten Zustand für 9 Abschnitte des Alpenrheins. WBK: Werdenberger Binnenkanal; KW = Kraftwerk. Fett: Messstation.

Strecke	HQ_2 natürlich [m³/s]	HQ_2 mit KW [m³/s]	Reduktion HQ_2 um [%]	HQ_5 natürlich [m³/s]	HQ_5 mit KW [m³/s]	Reduktion HQ_5 um [%]
Domat/Ems - Plessur	970	790	19	1300	1020	22
Plessur - Landquart	1000	820	18	1330	1070	20
Landquart - Tamina	1070	890	17	1380	1200	15
Tamina - Saar	1090	910	17	1390	1230	12
Saar - LBK	1110	930	16	1430	1260	12
LBK - WBK	1120	940	16	1440	1270	12
WBK - III	1160	970	16	1480	1310	11
III - Frutz	1310	1170	11	1710	1560	9
Frutz - Bodensee	1330	1190	11	1740	1590	9

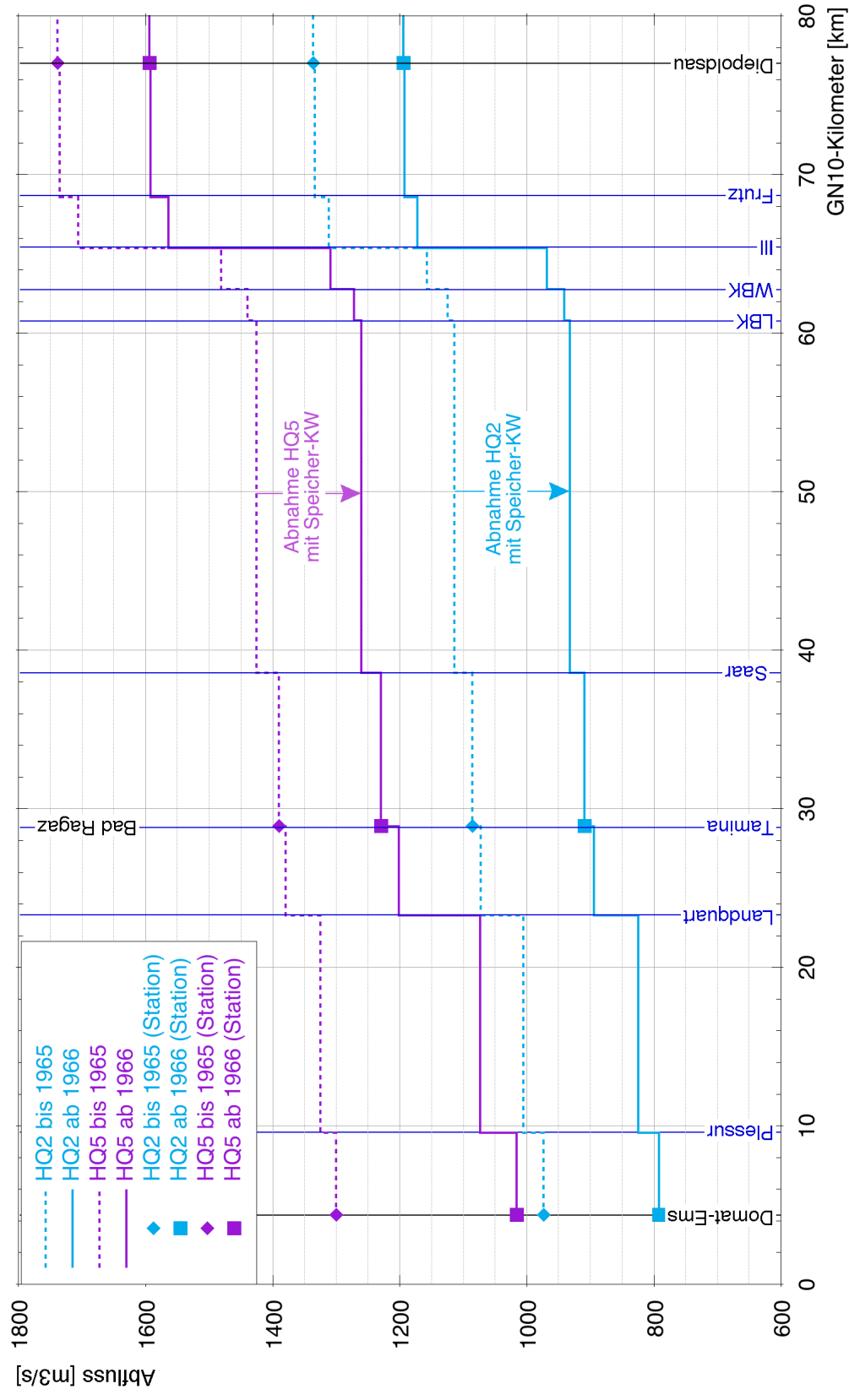


Bild 10 Längsprofil der Hochwasserabflüsse HQ₂ und HQ₅ im natürlichen Zustand (bis 1965) sowie im Zustand mit den Speicherkraftwerken (ab 1966) zwischen Domat/Ems und Diepoldsau.

4.2 Geschiebehaushalt

4.2.1 Geschiebefracht

Der Geschiebehaushalt des Alpenrheins wird durch anthropogene Eingriffe beeinflusst. In Tabelle 8 sind verschiedene Eingriffe, deren direkte Auswirkung auf das betroffene Gewässer sowie deren Bedeutung auf den Geschiebehaushalt des Alpenrheins beschrieben.

Tabelle 8 Eingriffe im Einzugsgebiet mit Auswirkungen auf den Geschiebehaushalt (GH) und Bedeutung für den Alpenrhein (AR). GF: Geschiebefracht.

Eingriff	Direkte Auswirkung	Auswirkung auf GH AR
Grosse Speicherseen im oberen Einzugsgebiet	Vollständiger Rückhalt des Geschiebes	Gering (kleine Einzugsgebiete und grosse Distanz zum Alpenrhein)
Speicherseen in Talgewässern	Stausee Sufers: Vollständiger Rückhalt des Geschiebes Stausee Solis: Geschiebeumleitstollen in Betrieb seit 2012	Gering bis mittel (Reduktion GF AR um ca. 7'500m ³ /a) Keine Auswirkung mehr
Kiesentnahmen	Direkte Kiesentnahme aus Zuflüssen sowie dem Alpenrhein	Gross (Ø Entnahmen total 225'000m ³ , vgl. Tabelle 9)
Wildbachverbauungen	Verhindern von Sohlenerosionen, Reduktion von Ufererosionen und Hangrutschen	Die zwei Massnahmen wirken sich gegenläufig auf den GH des AR aus und kompensieren sich zumindest teilweise (vgl. auch [5]). Daher Auswirkung eher gering
Kanalisation auf Schwemmkegeln	Verhindern von Ablagerungen auf dem Schwemmkegel	
Verbauungen in Talgewässern (exkl. AR)	Durch Einengungen ausgelöste Sohlenerosionen wurden durch Schwellenbau reduziert / gestoppt. Verhindern von Ufererosionen	Eher gering
Gewässerverbauungen im Alpenrhein	Die Kanalisation führte zu einer starken Erhöhung der Transportkapazität / Verhindern von Ablagerungen / Auslösen von Sohlenerosionen	Gross (vgl. z.B. hohes Transportniveau in der IRR-Strecke, Bild 5)

Dementsprechend wird der Geschiebehaushalt insbesondere durch folgende Eingriffe verändert:

- Kiesentnahmen im Einzugsgebiet sowie im Alpenrhein (Tabelle 9). Dadurch wird die Geschiebezufuhr in den Alpenrhein um ca. 160'000m³/a reduziert⁶.
- Kanalisation: Die Geschiebetransportkapazität des Alpenrheins ist stark erhöht. In Fließrichtung wird kaum mehr Geschiebe abgelagert und abschnittsweise tieft sich die Sohle ein.

Die anderen Eingriffe haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Geschiebehaushalt des Alpenrheins.

Der Geschiebehaushalt des Alpenrheins wurde im Auftrag der IRR anhand von morphologischen Modellberechnungen der Periode 1995 - 2005 kalibriert [7]. Das resultierende Längenprofil der Geschiebefracht ist in Bild 5 dargestellt. Seither wurden einzelne Kies-

⁶ Kanton Graubünden. Im Kanton St. Gallen und im Fürstentum Liechtenstein wird kein Kies entnommen.

entnahmen reduziert; der Geschiebehaushalt des Alpenrheins hat sich aber nicht grundlegend verändert. Dementsprechend kann der **aktuelle Geschiebehaushalt** wie folgt charakterisiert werden:

- Bei **Domat/Ems** werden durchschnittlich ca. **20'000m³/a** Geschiebe transportiert.
- Bis **Mastrils** nimmt die Geschiebefracht infolge des Eintrags aus der Plessur sowie von Sohlenerosionen auf ca. **30'000m³/a** zu.
- Mit dem Eintrag der Landquart steigt die Geschiebefracht des Alpenrheins bei **Bad Ragaz** auf ca. **65'000m³/a** an.
- **Zwischen Bad Ragaz und der Illmündung** wird der Geschiebehaushalt geprägt durch die Kanalisierung sowie frühere massive Kiesentnahmen aus der Sohle. In der Kalibrierperiode sind bis zum Ellhorn Erosionen und flussabwärts mehrheitlich Auflandungen zu beobachten. Die Geschiebefracht variierte zwischen **75'000m³/a** (Ellhorn) und **30'000m³/a** (vor der Illmündung). Seither wurde die Sohlenrampe beim Ellhorn saniert und die Sohle im Oberwasser zumindest abschnittsweise stabilisiert.
- Der **Geschiebeeintrag der Ill** beträgt ca. **40'000m³/a**.
- **Zwischen der Illmündung** und dem Bodensee beträgt die durchschnittliche Geschiebefracht ca. **70'000m³/a**. Diese Fracht entspricht in etwa den dokumentierten Kiesentnahmen aus der Vorstreckung (km90 - km91).

Tabelle 9 Durchschnittliche Kiesentnahmen (ca. ab Jahr 2000) aus den Gewässern im Einzugsgebiet des Alpenrheins im Kanton Graubünden (aus [5]). Ebenfalls angegeben ist der Geschieberückhalt im Stausee Sufers. Nur bedeutende Entnahmen berücksichtigt, Zahlen gerundet.

Vorfluter	Gewässer	Ort	Kiesentnahme [m ³ /a]
Hinterrhein	Hinterrhein	Sufers (Stausee)	11'000
	Julia	Burvagn	4'000
	Albula	Tiefencastel	45'000
Vorderrhein	Glenner	Vrin	2'000
	Rabiusa	Safien-Platz	6'000
	Vorderrhein	Schluein	10'000
	Vorderrhein	Bonaduz	7'000
Alpenrhein	Alpenrhein	Plessurmündung	10'000
	Alpenrhein	Landquartmündung	15'000
Landquart	Arieschbach	Fideris	15'000
	Furnerbach	Jenaz	70'000
	Schraubach	Schiers	30'000
Alpenrhein	Alle	Landquart	225'000

4.2.2 Vergleich mit dem Referenzzustand

Die anthropogenen Einflüsse führten zu einer starken Veränderung des Geschiebehaushalts des Alpenrheins. Der Vergleich des Referenzzustandes, Szenario 2, mit dem Geschiebehaushalt der Periode 1995 - 2005 zeigt folgende Veränderungen (Bild 11):

Domat/Ems - Landquart	Abnahme von Ø 85'000m ³ /a auf Ø 25'000m ³ /a (-70%). Massgebende Ursache sind die Kiesentnahmen.
Mastrils	Abnahme von Ø 75'000m ³ /a auf Ø 30'000m ³ /a (-60%). Massgebende Ursache sind die Kiesentnahmen.
Landquart - Ellhorn	Abnahme von Ø 150'000m ³ /a auf Ø 70'000m ³ /a (-55%). Massgebende Ursache sind die Kiesentnahmen.
Ellhorn - Buchs	Abnahme von Ø 100'000m ³ /a auf Ø 70'000m ³ /a (-30%). Massgebende Ursache sind die Kiesentnahmen.
Buchs - Illmündung	Keine signifikante Veränderung der Geschiebefracht.
Illmündung - Vorstreckung	Zunahme von Ø 40'000m ³ /a auf Ø 70'000m ³ /a (+75%). Massgebende Ursache ist die Kanalisierung.

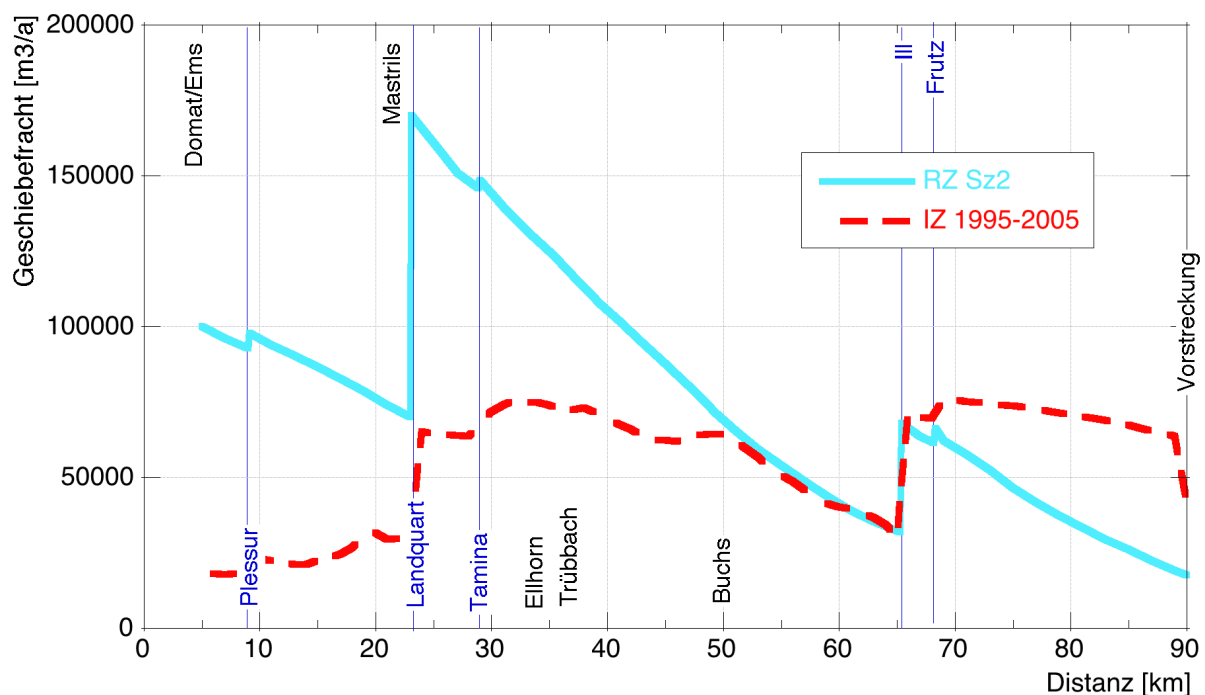


Bild 11 Längsprofil der im Alpenrhein transportierten Geschiebefracht im Referenzzustand (Szenario 2) und im Istzustand (Periode 1995 - 2005). Vgl. auch Bild 5.

Der Vergleich zeigt, dass der Geschiebehaushalt des Alpenrheins durch die Kiesentnahmen und die Kanalisierung stark verändert wurde.

Gemäss Art. 43a GSchG darf der Geschiebehaushalt eines Gewässers nicht so verändert werden, dass die einheimischen Tiere und Pflanzen, deren Lebensräume, der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz wesentlich beeinträchtigt werden. In der Vollzugshilfe Geschiebehaushalt - Massnahmen [1] wird die erforderliche Geschiebefracht in Prozent der Fracht im Referenzzustand für die charakteristischen Gerinneformen angegeben (Bild 12).

Bild 12

Erforderliche Geschiebefracht
für 5 Gerinneformen in [%] der
Geschiebefracht im Referenz-
zustand.



Verzweigte Gerinne mit mehr als 2
Teilgerinnen. 80 %
Beispiel: Hinterrhein bei Rhäzüns.



Verzweigte Gerinne mit 2 Teilgerinnen. 75 %
Beispiel: Alpenrhein bei Kriessern.



Gewundene Gerinne mit Inseln und
Bänken. 70 %
Beispiel: Limmat bei Dietikon.



Gewundene Gerinne mit Bänken. 65 %
Beispiel: Aare bei Wynau.



Gestreckte und gewundene Gerinne. 65 %
Beispiel: Chirel im Diemtigtal.

Bei Gewässern mit verändertem Abflussregime, resp. reduzierten bettbildenden Abflüssen von > 10%, wird die erforderliche Geschiebefracht zusätzlich entsprechend diesen besonderen Rahmenbedingungen angepasst.

In Tabelle 10 ist die Ø Geschiebefracht im Istzustand, im Referenzzustand sowie die erforderliche Geschiebefracht ohne ($GF_{\text{erf-1}}$), resp. mit Berücksichtigung des veränderten Abflussregimes ($GF_{\text{erf-2}}$) angegeben. Dementsprechend ist der Geschiebehaushalt des Alpenrheins (unter Berücksichtigung von $GF_{\text{erf-2}}$) wie folgt zu beurteilen:

AR Reichenau - Landquart	Sehr starke Beeinträchtigung
AR Landquart - Trübbach	Starke Beeinträchtigung
AR Trübbach - Buchs	Keine Beeinträchtigung ⁷
AR Buchs - Illmündung	Keine Beeinträchtigung
AR Illmündung - Vorstreckung	Starke Beeinträchtigung ⁸

Fazit:

Zwischen Reichenau und ca. Trübbach ist die Geschiebefracht im Istzustand deutlich kleiner als die erforderliche Geschiebefracht $GF_{\text{erf-2}}$. **Dementsprechend ist der Geschiebehaushalt des Alpenrheins auf dieser Strecke wesentlich beeinträchtigt gemäss Art. 43a GSchG.**

⁷ Mit der Sanierung der Schwelle Ellhorn werden die Sohlenerosionen im Oberwasser und damit die Geschiebefracht flussabwärts reduziert. Unter Berücksichtigung dieser Prozesse ist auch flussabwärts von Trübbach von einer Beeinträchtigung des Geschiebehaushalts auszugehen.

⁸ Der Hochwasserschutz ist wesentlich beeinträchtigt (Sohlenuflandung). Solange der Alpenrhein nicht revitalisiert wird, besteht jedoch keine Auflandungstendenz.

Tabelle 10 Ø Geschiebefracht des Alpenrheins im Istzustand, im Referenzzustand sowie erforderliche Geschiebefracht gemäss [1] ohne und mit Berücksichtigung des veränderten Abflussregimes.

1	2	3	4	5
Abschnitt	Ø GF IZ [m³/a]	Ø GF RZ [m³/a]	GF _{erf-1} [m³/a]	GF _{erf-2} [m³/a]
Reichenau - Domat/Ems	20'000	100'000	65'000	53'000
Domat/Ems - Plessur	20'000	95'000	71'000	58'000
Plessur - Masans	20'000	95'000	67'000	55'000
Masans - Trimmis	23'000	88'000	66'000	54'000
Trimmis - Landquart	30'000	77'000	62'000	51'000
Landquart - Bad Ragaz	64'000	154'000	120'000	100'000
Bad Ragaz - Fläsch	70'000	145'000	110'000	91'000
Fläsch - Trübbach	75'000	130'000	100'000	87'000
Trübbach - Säga	73'000	112'000	84'000	70'000
Säga - Buchs	64'000	90'000	72'000	60'000
Buchs - Sennwald	50'000	54'000	40'000	34'000
Sennwald - Illmündung	35'000	35'000	26'000	22'000
Illmündung - Vorstreckung	70'000	40'000	30'000	Abflussänderung ≤ 10%

4.3 Beispiel Alpenrhein Mastrils

Der Rhein bei Mastrils ist der einzige Abschnitt am Alpenrhein, der nicht stark eingeeignet und kanalisiert wurde. Die gewundene Linienführung und die grossen Kiesbänke weisen auf eine noch beschränkt naturnahe Morphologie hin.

Die wasserbaulichen Eingriffe und die Abnahme der Sohlenbreite können anhand von Karten und Luftbildern rekonstruiert werden (Bild 13, Plan 1).

Jahr	Breite [m]	Charakterisierung / Eingriffe / Veränderungen
1820/54 (Plan 1)	360	- Keine signifikanten Uferverbauungen ersichtlich. - Überbreite (bis 800m) im Oberwasser des Schwemmkegels der Landquart.
1853	295	- Keine signifikanten Uferverbauungen ersichtlich. - Grosse Kiesflächen, keine bewachsenen Inseln.
1882	290	- Rechtsseitige Uferverbauung im Lösser. - Grosse Kiesflächen, keine bewachsenen Inseln.
1940	230	- Durchgehender rechtsseitiger Uferschutz, der die Sohlenbreite reduziert. - Buhnenbau (linksseitig) und Einengung des Rheins von km19.8 bis 20.4 (teilweise noch nicht voll wirksam). - Die gesamte Breite zwischen dem Fels (links) und dem Uferschutz (rechts) ist gehölzfrei (nur benetzter Bereich und grosse Kiesflächen, keine bewachsenen Flächen). D.h. der Rhein wird auf der gesamten Länge eingeeignet.
2018	140	- Uferschutz entsprechend 1940. - Aufkommender Auenwald und grosse bewachsene Inseln reduzieren die Sohlenbreite. - Die Sohlenbreite wird abschnittsweise weiterhin durch die rechtsseitigen Uferverbauungen eingeschränkt (im obersten Abschnitt auch linksseitig).

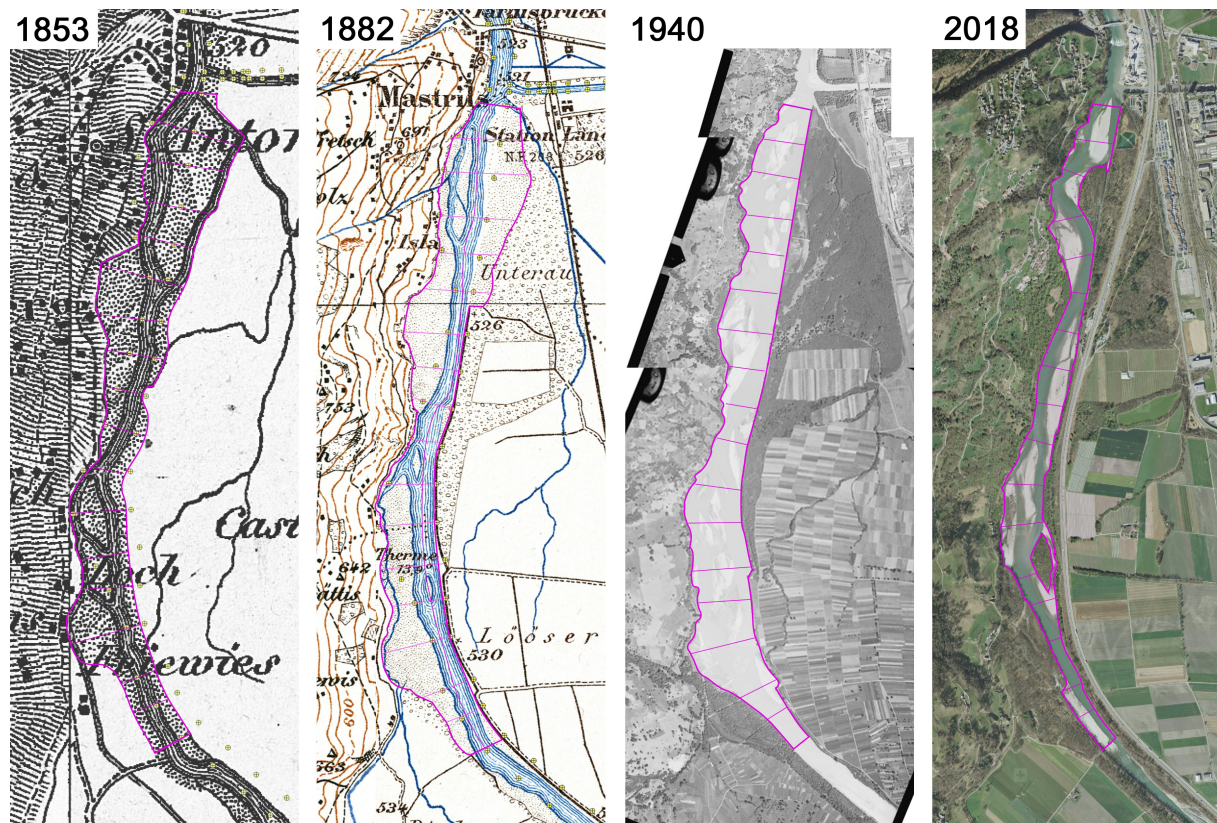


Bild 13 Alpenrhein bei Mastrils gemäss Dufourkarte (1853), Siegfriedkarte (1882), Luftbild 1940 und Orthofoto 2018 mit eingezeichneter Sohlenbreite von km19.8 bis km23.2.

Der Einfluss des veränderten Abflussregimes (grosse Speicherkraftwerke) und des veränderten Geschiebehaushalts (vorwiegend Kiesentnahmen) wirken sich wie folgt auf die Sohlenbreite aus:

Verändertes Abflussregime:

Die Berechnung der Abnahme der Sohlenbreite (infolge verändertem Abflussregime) erfolgt mit folgenden Randbedingungen:

- HQ_2 natürlicher Zustand $1'000\text{m}^3/\text{s}$
- $HQ_{2\text{red}}$ mit Speicherkraftwerken $820\text{m}^3/\text{s}$

Die Reduktion von HQ_2 führt zu einer Abnahme der Sohlenbreite um 9%⁹

Die Sohlenbreite reduziert sich von 360m auf **325m**
(bei Sohlenbreite von 300m Reduktion auf 270m)

Veränderter Geschiebehaushalt:

Die Berechnung erfolgt nach [2] mit folgenden Randbedingungen:

- Reduzierte Sohlenbreite infolge verändertem Abflussregime (siehe oben) 325m
- Ø Geschiebefracht Referenzzustand $70'000\text{m}^3/\text{a}$, Istzustand $30'000\text{m}^3/\text{a}$

Es resultiert eine Sohlenbreite infolge verändertem Geschiebehaushalt von **170m**
(bei Sohlenbreite von 270m Reduktion auf 150m)

⁹ Berechnung der Sohlenbreite nach Parker für $HQ_{2\text{red}}$ und HQ_2 und Ermittlung der prozentualen Reduktion der Breite für $HQ_{2\text{red}}$.

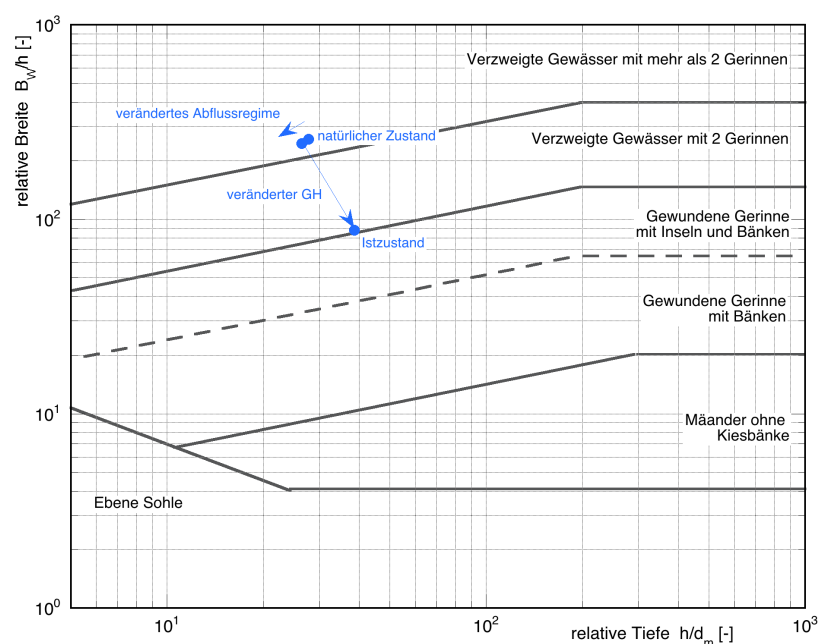
Die berechnete Sohlenbreite von 170m ist leicht grösser als die gemessene Sohlenbreite von 140m im Istzustand. Dies ist auf die lokale Einschränkung der Sohlenbreite durch Uferverbauungen zurückzuführen. Die Tatsache, dass die beobachtete Abnahme der Sohlenbreite nachgerechnet werden kann, bestätigt, dass die hergeleiteten Geschiebefrachten (mit ausreichender Genauigkeit) korrekt sind.

Bild 14 zeigt die Veränderung der Gerinneform im modifizierten Ahmari & Da Silva Diagramm. Dementsprechend hat sich die Morphologie infolge des veränderten Abflussregimes nicht signifikant verändert. Demgegenüber führt die starke Reduktion der Geschiebefracht zu einer Veränderung der Gerinneform von einem verzweigten Gerinne mit mehr als 2 Gerinnen in den Übergangsbereich zu gewundenen Gerinnen mit Inseln und Bänken (entspricht der Gerinneform gemäss Luftbild 2018, Bild 13).

Bild 14

*Alpenrhein, Abschnitt
Mastrils. Breite RZ 300m.*

*Modifiziertes Ahmari & Da
Silva Diagramm mit der Än-
derung der Gerinneform im
Referenzzustand infolge
verändertem Abflussregime
und veränderter Geschie-
befracht.*



Zusammenfassung:

- Das veränderte Abflussregime führt zu einer Abnahme der Sohlenbreite um 35m (9%¹⁰).
- Der veränderte Geschiebehaushalt führte zu einer Abnahme der Sohlenbreite des Alpenrheins bei Mastrils um gut 150m (ca. 50%).
- Gleichzeitig wurde infolge des veränderten Geschiebehaushalts die Gerinneform von einem verzweigten Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen in den Übergangsbereich zu gewundenen Gerinnen mit Inseln und Bänken verändert.

¹⁰ Gilt für Abschnitt Reichenau bis Landquart-Mündung.

5 Revitalisierungsplanung

5.1.1 Anforderungen

Ein Fliessgewässer wird geprägt durch den **Raum**, das **Abfluss-** und das **Feststoffregime**. Im Zusammenhang mit der Revitalisierungsplanung sind allfällige wesentliche Beeinträchtigungen soweit möglich zu beheben. Als Referenzzustand dient der naturnahe Zustand. Dieser unterscheidet sich vom Naturzustand nur durch grosse Waldrodungen, Trockenlegung von Feuchtgebieten und Gewässerumleitungen in einen See (Definition Bafu, aus [8]).

Beim Alpenrhein sind der Raum, das Abfluss- und Feststoffregime stark verändert:

Raum	Der Alpenrhein ist weitgehend stark eingeengt und kanalisiert.
Abflussregime	Durch die grossen Speicherkraftwerke sind die bettbildenden Abflüsse reduziert und das Abflussregime ist geprägt durch einen ausgeprägten Schwall und Sunk.
Feststoffregime	Der Geschiebehaushalt ist infolge der Kiesentnahmen wesentlich beeinträchtigt.

Das Ziel der Revitalisierungsplanung besteht darin, den Gewässern wieder mehr Raum zur Verfügung zu stellen (Revitalisierungsstrecken) sowie wesentliche Beeinträchtigungen des Abflussregimes und des Geschiebehaushalts zu beheben.

5.1.2 Revitalisierungsstrecken

In der Revitalisierungsplanung der Kantone Graubünden und St. Gallen sind in 1. Priorität folgende Abschnitte des Alpenrheins aufgeführt:

<i>Graubünden</i>		Malans - Maienfeld (in Planung)
<i>St. Gallen</i>	km23.8-28.6	Bad Ragaz (identisch mit Bündner Abschnitt)
	km30.0-36.0	Sargans
	km36.6-40.5	Saarmündung
	km43.8-48.0	Sevelen/Vaduz
	km49.5-54.3	Eschner Au (Schaan)

Bei der Planung der Revitalisierungen sollte das Gerinne in ausreichend langen Abschnitten auf die massgebende Sohlenbreite (Kapitel 6.1) aufgeweitet werden. Damit wird gewährleistet, dass sich eine ähnliche Gerinneform und Morphologie wie im Referenzzustand entwickeln kann. Im seitlich anschliessenden Uferbereich kann Auenwald aufkommen. Der Uferschutz ist wenn immer möglich ausserhalb des Uferbereichs anzuordnen. Damit wird gewährleistet, dass das Gerinne migrieren und der Auenwald sich erneuern kann.

5.1.3 Abflussregime

Der Rückhalt von Sommerabflüssen in den grossen Speicherseen und die Reduktion der bettbildenden Abflüsse wird als irreversible Veränderung betrachtet [8].

Die Auswirkungen des Kraftwerkschwallts sind gemäss Art. 39a GSchG zu sanieren.

5.1.4 Geschiebehaushalt

Gemäss den in vorliegender Studie durchgeführten Untersuchungen ist der Geschiebehaushalt des Alpenrheins über weite Strecken wesentlich beeinträchtigt und dementsprechend zu sanieren¹¹.

Bei einem im Referenzzustand auflandenden Gewässer wie dem Alpenrhein nimmt die Geschiebefracht in Fliessrichtung infolge von Ablagerungen stark ab. Auflandungen können aber heute in den intensiv genutzten Talebenen aus Hochwasserschutzgründen nicht mehr zugelassen werden. Dies ist bei der Sanierung des Geschiebehaushalts zu berücksichtigen.

Am Alpenrhein ist folgendes Konzept anzustreben (in Bild 15 ist ein möglicher Verlauf der Geschiebefracht vereinfacht dargestellt):

- Bei Reichenau ist die erforderliche Geschiebefracht zu gewährleisten (ca. $75'000\text{m}^3/\text{a}^{12}$). Die Kiesentnahmen im Einzugsgebiet sind entsprechend zu reduzieren.
- Das Geschiebe wird bis zur Landquartmündung weitertransportiert. Auf dieser Strecke ist im Istzustand der Alpenrhein im Zustand der latenten Erosion (d.h. er könnte viel mehr Geschiebe transportieren, als zugeführt wird; die grobe Sohle verhindert eine Eintiefung). Die neue Sohlenlage ist zu ermitteln (eine Kompensation von früheren Sohlenerosionen ist wahrscheinlich).
- Die Geschiebezufuhr aus der Landquart ist zu erhöhen, so dass die erforderliche Geschiebefracht erreicht wird (ca. $130'000\text{m}^3/\text{a}$). Die Kiesentnahmen im Einzugsgebiet und im Alpenrhein sind entsprechend zu reduzieren.
- Im Fliessrichtung nimmt die Geschiebefracht nur wenig ab (Abrieb). Daher gleicht sich im Längenprofil die Geschiebefracht derjenigen im Referenzzustand an. Damit die Sohle auf einem tolerierbaren Niveau stabilisiert werden kann, ist an geeigneten Stellen Kies zu entnehmen und das Transportniveau wieder auf die erforderliche Fracht abzusenken.

Die Revitalisierung des Alpenrheins erfordert bedeutende Anpassungen der Geschiebewirtschaftung. Im Kanton Graubünden müssen die Kiesentnahmen erheblich reduziert und im Kanton St. Gallen muss an geeigneten Stellen Kies entnommen werden.

Die Sohle des Alpenrheins wird sich an die veränderte Geschiebezufuhr anpassen. Das Projekt Rhesi zeigt, dass dieses Vorgehen möglich und zielführend ist.

¹¹ In der Strategischen Planung des Kantons Graubünden [5] wurde der Geschiebehaushalt des Alpenrheins als nicht wesentlich beeinträchtigt beurteilt. In der Strategischen Planung des Kantons St. Gallen wurde keine abschliessende Beurteilung vorgenommen.

¹² Bei den angegebenen Frachten handelt es sich um Grössenordnungen. Abweichungen von maximal +/- 15% sind denkbar.

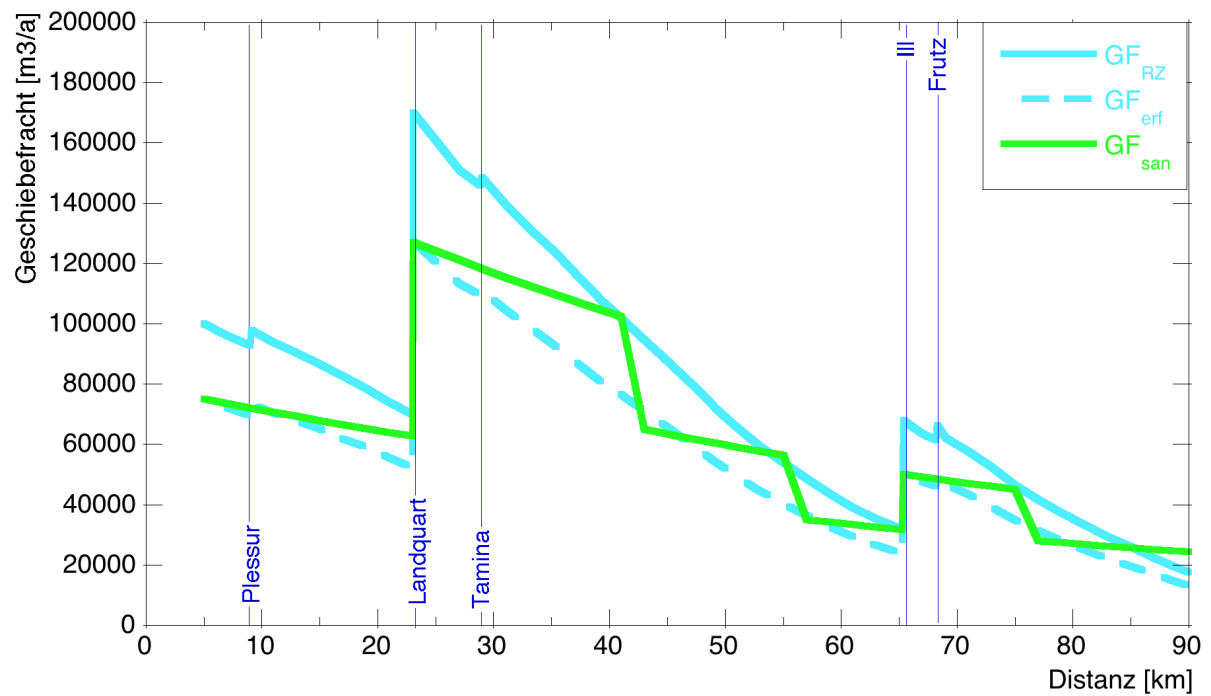


Bild 15 Längsprofil der Geschiebefracht des Alpenrheins im Referenzzustand GF_{RZ} (Sz2, vgl. Bild 5), bei Erreichen der erforderlichen Geschiebefracht $GF_{75\%}$ (vereinfacht als 75% Linie dargestellt) sowie im sanierten Zustand GF_{san} (schematisch).

6 Gewässerraumbreite

6.1 Sohlenbreite

Die natürliche Sohlenbreite bildet die Grundlage zur Berechnung der Gewässerraumbreite. Bei grossen Gewässern sind massstäbliche historische Karten die beste Grundlage zur Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite. Bei Verfügbarkeit von Karten verschiedener Jahre kann zudem die Variation der Breite als Folge des Auftretens grosser Hochwasserereignisse und von Trockenperioden eingegrenzt werden.

Am Alpenrhein bestehen mehrere massstäbliche historische Karten. Empirische Formeln weisen eine sehr grosse Bandbreite auf und sind zur Abschätzung der Sohlenbreite von verzweigten Gewässern wenig geeignet.

Die natürliche Sohlenbreite wird daher auf Basis der historischen Karten bestimmt. Dabei werden diejenigen Karten berücksichtigt, welche keine signifikanten Einengungen infolge von Uferverbauungen aufweisen. Es wird die mittlere Sohlenbreite berücksichtigt. Dies bedeutet, dass Abschnitte, welche eine grössere Breite aufwiesen, in dieser Art nicht mehr auftreten können.

In Tabelle 11 sind folgende Sohlenbreiten angegeben:

- B_s** Natürliche Sohlenbreite.
- B_{sred-1}** Reduzierte Sohlenbreite unter Berücksichtigung der veränderten Abflüsse durch Speicherkraftwerke (Geschiebefracht GF_{red}).
- B_{sred-2}** Reduzierte Sohlenbreite unter Berücksichtigung der veränderten Abflüsse durch Speicherkraftwerke sowie einer reduzierten Geschiebefracht, die der erforderlichen Geschiebefracht nach [1] entspricht (GF_{erf-2}).

Tabelle 11 Sohlenbreite in den 12 Abschnitten:

B_s Natürliche Sohlenbreite (ohne KW und mit GF_{RZ})

B_{sred-1} Reduzierte Sohlenbreite mit KW

B_{sred-2} Reduzierte Sohlenbreite mit KW und erforderlicher Geschiebefracht

Nr.	Abschnitt	HQ ₂ [m ³ /s]	HQ _{2red} [m ³ /s]	GF [m ³ /a]	GF _{red} [m ³ /a]	GF _{erf-2} [m ³ /a]	B_s [m]	B_{sred-1} [m]	B_{sred-2} [m]
1	Reichenau-Domat/Ems	970	790	100'000	81'000	53'000	90	80	75
2	Domat/Ems - Plessur	970	790	95'000	77'000	58'000	240	215	175
3	Plessur - Masans	1000	820	95'000	78'000	55'000	160	145	120
4	Masans - Trimmis	1000	820	88'000	72'000	54'000	200	180	150
5	Trimmis - Landquart	1000	820	77'000	63'000	51'000	360	325	275
6	Landquart - Bad Ragaz	1070	890	154'000	128'000	100'000	430	390	325
7	Bad Ragaz - Fläsch	1090	910	145'000	121'000	91'000	310	285	230
8	Fläsch - Trübbach	1090	910	130'000	109'000	87'000	470	430	355
9	Trübbach - Säga	1110	930	112'000	94'000	70'000	280	255	210
10	Säga - Buchs	1110	930	90'000	75'000	60'000	410	375	315
11	Buchs - Sennwald	1110	930	54'000	45'000	34'000	300	275	225
12	Sennwald - Illmündung	1160	970	35'000	29'000	22'000	290	265	215

Die Sohlenbreite unter Berücksichtigung des veränderten Abflussregimes (irreversible Randbedingung) wird wie folgt ermittelt:

$$\mathbf{Bs_{red-1}} = Bs \cdot (HQ_{2red}/HQ_2)^{0.5}$$

mit Bs = Sohlenbreite im Referenzzustand

Damit sich bei verändertem Abflussregime eine ähnliche Morphologie (wie im Referenzzustand) entwickeln kann, ist die Geschiebefracht (GF) wie folgt zu reduzieren:

$$GF_{red} = GF \cdot HQ_{2red} / HQ_2$$

Die erforderliche Geschiebefracht GF_{erf-2} wird nach [1] unter Berücksichtigung von GF_{red} bestimmt.

$\mathbf{Bs_{red-2}}$ wird mit Bs_{red-1} und mit GF_{red-2} nach [2] berechnet.

6.2 Minimaler Gewässerraum

Der minimale Gewässerraum ergibt sich aus der natürlichen Sohlenbreite zuzüglich eines beidseitigen Uferstreifens von 15m gemäss Schlüsselkurve Bafu¹³. In

Tabelle 12 sind die resultierenden Breiten für die Sohlenbreiten von Tabelle 11 angegeben.

GR_{min} betrifft den minimalen Gewässerraum unter Berücksichtigung der natürlichen Sohlenbreite.

Bei GR_{min_{red-1}} wird der Einfluss der grossen Speicherkraftwerke berücksichtigt. Diese können als irreversible Veränderungen betrachtet werden.

Bei GR_{red-2} wird zusätzlich die Geschiebefracht auf die erforderliche Fracht reduziert. Die Reduktion der Geschiebefracht auf die erforderliche Geschiebefracht basiert nicht auf irreversiblen Veränderungen. Bei Erreichen der erforderlichen Fracht ist aber Art. 43a GSchG erfüllt.

Weil das exakte Einhalten der erforderlichen Geschiebefracht in Fliessrichtung nicht möglich ist, sondern in Stufen angenähert werden muss (vgl. Bild 15), ist eine minimale Gewässerraumbreite anzustreben, die zwischen GR_{min} und GR_{min_{red-2}} liegt.

Tabelle 12 Minimaler Gewässerraum in den 12 Abschnitten:

GR_{min} Minimaler Gewässerraum (ohne KW und mit GF_{RZ})

GR_{min_{red-1}} Minimaler Gewässerraum mit KW

GR_{min_{red-2}} Minimaler Gewässerraum mit KW und erforderlicher Geschiebefracht

Nr.	Abschnitt	GR _{min} [m]	GR _{min_{red-1}} [m]	GR _{min_{red-2}} [m]
1	Reichenau-Domat/Ems	120	110	105
2	Domat/Ems - Plessur	270	250	210
3	Plessur - Masans	190	175	150
4	Masans - Trimmis	230	210	180
5	Trimmis - Landquart	330	300	250
6	Landquart - Bad Ragaz	460	420	360
7	Bad Ragaz - Fläsch	340	310	260
8	Fläsch - Trübbach	500	460	390
9	Trübbach - Säga	310	290	240
10	Säga - Buchs	440	410	340
11	Buchs - Sennwald	330	305	255
12	Sennwald - Illmündung	320	295	245

¹³ Das Bafu erarbeitet zur Zeit einen Bericht "Anforderungen an das Fachgutachten Gewässerraum für die grossen Fliessgewässer". Dabei kann sich die Breite des erforderlichen Uferstreifens noch ändern.

6.3 Erhöhter Gewässerraum

Die Ermittlung des erhöhten Gewässerraums basiert auf der Erfüllung der natürlichen Funktionen im aquatischen, amphibischen und terrestrischen Bereich. Die Berechnung erfolgt nach Roulier [4] auf Basis der natürlichen Sohlenbreite.

In Tabelle 13 sind die resultierenden Breiten für die Erfüllung der natürlichen Funktionen zu 100% und 80% angegeben. Es werden die erhöhten Gewässerraumbreiten für die drei Sohlenbreiten entsprechend Tabelle 11 angegeben.

Weil das exakte Einhalten der erforderlichen Geschiebefracht in Fliessrichtung nicht möglich ist, sondern in Stufen angenähert werden muss (vgl. Bild 15), ist eine erhöhte Gewässerraumbreite anzustreben, die zwischen GR_{erh} und $GR_{erh_{red-2}}$ liegt.

Tabelle 13 Erhöhter Gewässerraum in den 12 Abschnitten¹⁴:

GR_{erh} Erhöhter Gewässerraum (ohne KW und mit GF_{RZ})

$GR_{erh_{red-1}}$ Erhöhter Gewässerraum mit KW

$GR_{erh_{red-2}}$ Erhöhter Gewässerraum mit KW und erforderlicher Geschiebefracht

Nr.	Abschnitt	GR_{erh} [m]	$GR_{erh_{red-1}}$ [m]	$GR_{erh_{red-2}}$ [m]	GR_{erh} [m]	$GR_{erh_{red-1}}$ [m]	$GR_{erh_{red-2}}$ [m]
Erfüllungsgrad		100%			80%		
1	Reichenau-Domat/Ems	450	400	400	200	185	175
2	Domat/Ems - Plessur	600	540	440	460	420	340
3	Plessur - Masans	400	360	300	210	200	190
4	Masans - Trimmis	500	440	370	380	340	290
5	Trimmis - Landquart	750	670	540	570	510	420
6	Landquart - Bad Ragaz	1060	970	820	820	740	630
7	Bad Ragaz - Fläsch	770	700	570	590	530	440
8	Fläsch - Trübbach	1170	1060	880	890	820	680
9	Trübbach - Säga	700	640	520	530	490	400
10	Säga - Buchs	1020	950	770	780	720	590
11	Buchs - Sennwald	750	680	560	570	520	430
12	Sennwald - Illmündung	720	660	530	550	500	410

¹⁴ Ohne Berücksichtigung des Schalters "Aue". Mit Berücksichtigung dieses Schalters erhöhen sich die angegebenen Breiten um weitere 50%.

7 Grenzbreite für das Aufkommen von Auenwald

Das Aufkommen von Auenwald (Weichholz- und Hartholzaue) ist abhängig von der Hochwassergeschichte. Nach einer Abfolge von Trockenjahren wächst das Gerinne seitlich ein und der Auenwald dehnt sich entsprechend aus. Demgegenüber werden bei einem grossen Hochwasser die Ufer mit Auenwald erodiert und die Sohle verbreitert sich in Richtung maximale Werte. Dementsprechend weist die Sohlenbreite örtlich und zeitlich grössere Unterschiede auf.

In Bild 16 ist das Längenprofil für das Aufkommen von Auenwald unter Berücksichtigung der Sohlenbreite im Referenzzustand dargestellt.

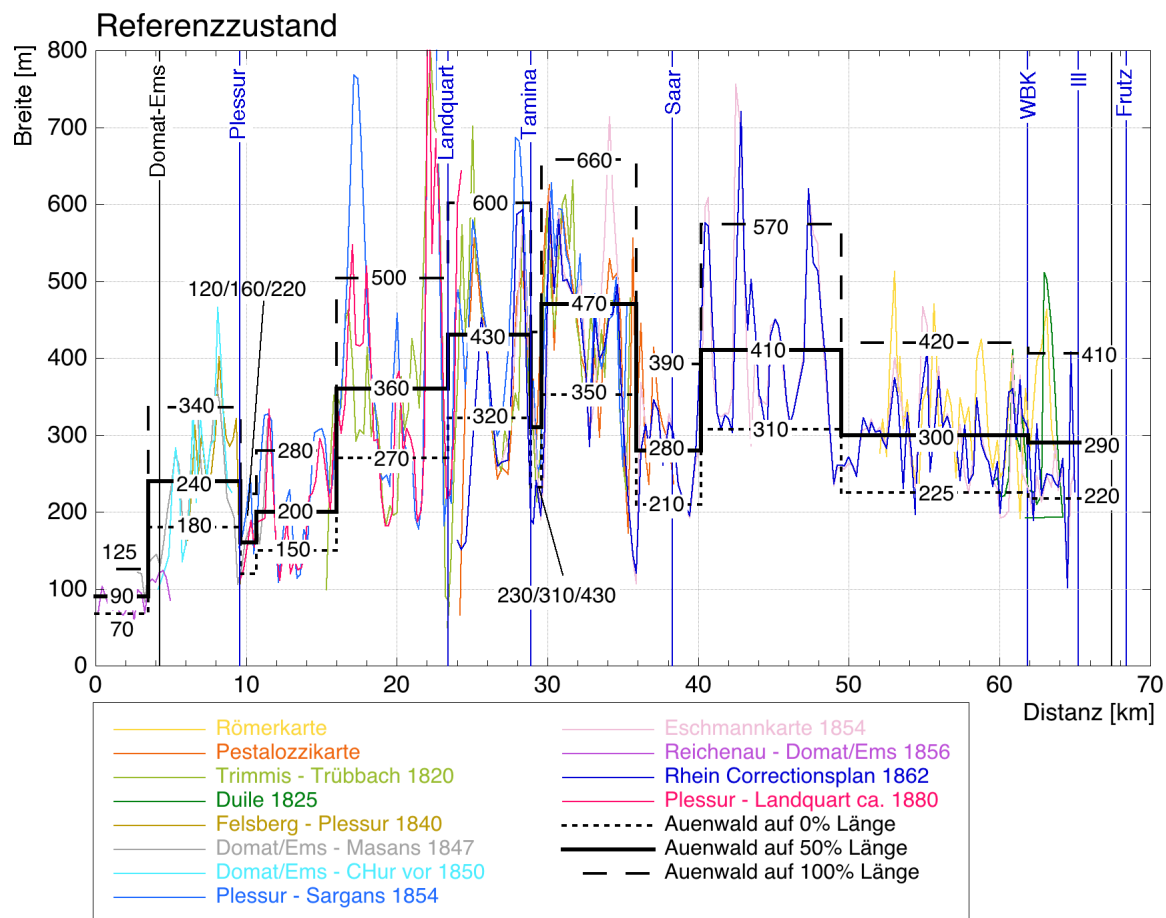


Bild 16 Längenprofil der Grenzbreite für das **Aufkommen von Auenwald** bei Berücksichtigung der **Sohlenbreite im Referenzzustand**.

Es werden folgende drei Fälle unterschieden:

*Auf gesamter Länge kein
Auenwald erwartet
(Auenwald auf 0% Länge)*

Ist der Abstand zwischen den Uferverbauungen kleiner als die angegebene Breite (punktierter Linie), so kann davon ausgegangen werden, dass (zwischen den Uferverbauungen) keine bedeutenden Gehölzbestände (Weichholzaue) aufkommen.

*Auenwald auf ca. 50% der
Gerinnelänge erwartet
(Auenwald auf 50% Länge)*

Bei Erreichen der **Ø Sohlenbreite** (dicke schwarze Linie) kann davon ausgegangen werden, dass auf der Hälfte der Gerinnelänge Auenwald vorhanden ist (auf der Hälfte des

Abschnitts war die Sohle schmäler als die Ø Breite, die andere Hälfte war breiter).

Auenwald auf gesamter Länge erwartet

(Auenwald auf 100% Länge)

Ist der Abstand zwischen den Uferverbauungen grösser als die angegebene Breite (gestrichelte Linie), so kann davon ausgegangen werden, dass (zwischen den Uferverbauungen) auf nahezu der gesamten Länge Auenwald (Weichholz- und Hartholzaue) vorhanden ist.

Die Breiten ohne Auenwald (0% Länge), resp. mit Auenwald auf der gesamten Länge (100% Länge) wurden durch eine Reduktion von 25%, resp. einen Zuschlag von 40% der mittleren Breite ermittelt. Bild 15 zeigt, dass die Sohle (dynamischer Bereich ohne Gehölz) nur in vereinzelt Profilen schmaler war als $0.75 \cdot B_s$, resp. breiter als $1.4 \cdot B_s$.

Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Durchschnittswerte. Nach einer Abfolge von Trockenjahren kann mehr und nach einem grossen Hochwasserereignis weniger Auenwald vorhanden sein.

Ob sich aus der Weichholzaue Hartholzaue entwickelt, ist von den lokalen Verhältnissen abhängig (Linienführung, Migration, Dynamik).

In den Bildern 16 und 17 sind folgende Längenprofile betreffend das Aufkommen von Auenwald dargestellt:

Bild 17 Für Sohlenbreiten mit reduzierten Hochwasserabflüssen (Einfluss Speicherkraftwerke).

Bild 18 Für Sohlenbreiten mit reduzierten Hochwasserabflüssen sowie reduzierter Geschiebefracht (resp. entsprechend erforderlicher Geschiebefracht).

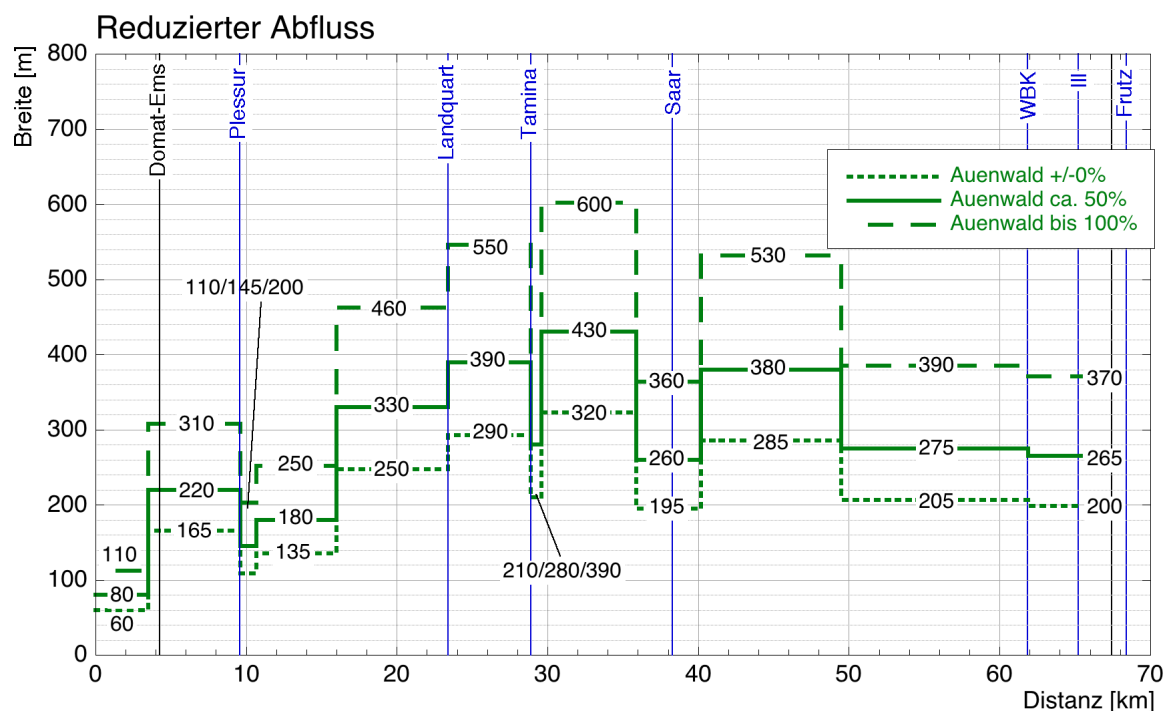


Bild 17 Längenprofil der Grenzbreite für das **Aufkommen von Auenwald** bei Berücksichtigung der **Sohlenbreite mit reduziertem Abfluss**.

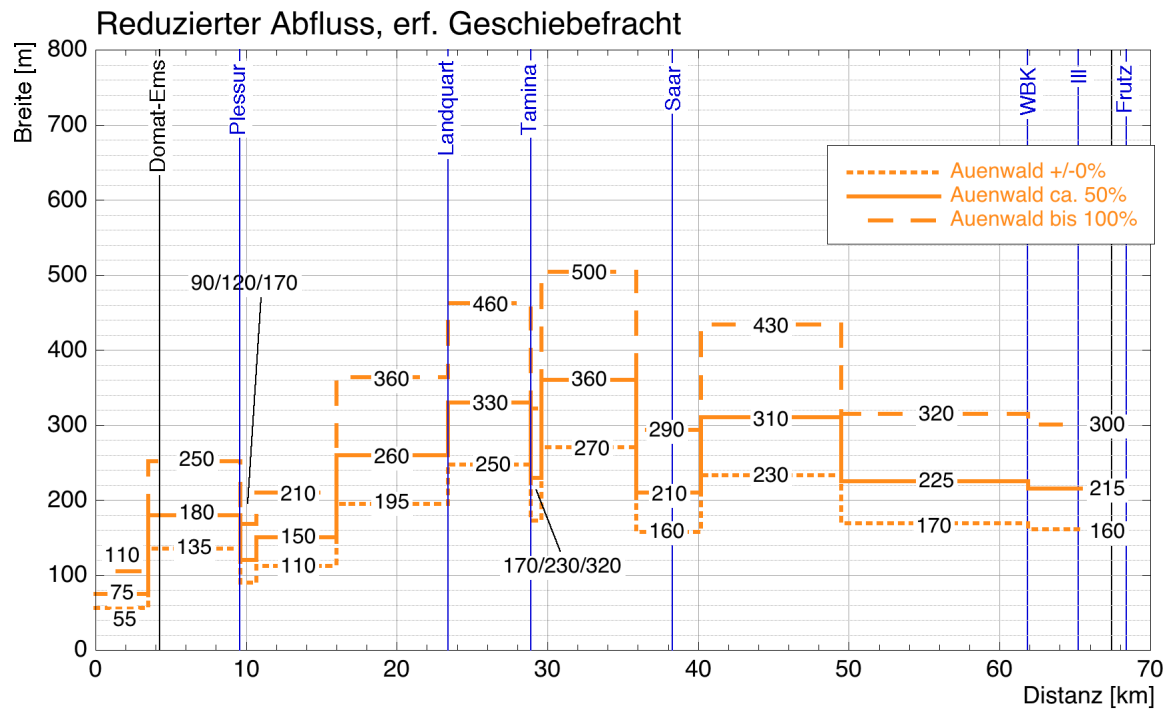


Bild 18 Längsprofil der Grenzbreite für das **Aufkommen von Auenwald** bei Berücksichtigung der **Sohlenbreite mit reduziertem Abfluss und erforderlicher Geschiebefracht**.

Anhang 1

Mittlere, minimale und maximale Sohlenbreiten gemäss historischen Karten

Alpenrhein	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
	Reichenau	Domat-Ems	Plessur	Masans	Trimmis	Landquart	Bad Ragaz	Fläsch	Trübbach	Säga	Buchs	Senwald
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Domat-Ems	Plessur	Masans	Trimmis	Trimmis	Landquart	Bad Ragaz	Fläsch	Trübbach	Säga	Buchs	Senwald	Illimündung
Kilometer GN10 [km]	0.0-3.5	3.5-9.6	9.6-10.7	10.7-16.0	16.0-23.4	23.4-28.9	28.9-29.6	29.6-35.9	35.9-40.2	40.2-49.5	49.5-61.9	61.9-65.4
Historische Karten und Pläne (Zahlen oben: Min./Max.-Werte aus Profilauswertung; Zahlen unten: Ø-Werte aus Planimetrierung; fett geschriebene Ø-Werte: Für Berechnung mittlere Sohlenbreite berücksichtigt)												
Sohlenbreite, Römerkarte 1769 [m]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	192 - 513 327	250 - 463 395
Sohlenbreite, Pestalozzikarte 1818 [m]	-	-	-	-	-	66 - 556 593	283 - 433 369	173 - 625 603	236 - 445 346	-	-	-
Sohlenbreite, Karte Trimmis - Trübbach ca. 1820 [m]	-	-	-	99 - 352 250	90 - 797 331	50 - 702 367	213 - 302 272	227 - 631 431	-	-	-	-
Sohlenbreite, Karte Duille/Negrelli 1825 [m]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	220 - 411 280	192 - 511 294
Sohlenbreite, Karte Felsberg - Plessur 1840 [m]	-	163 - 402 273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sohlenbreite, Karte Domat-Ems - Masans 1847 [m]	84 - 121 110	105 - 367 242	126 - 185 149	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sohlenbreite, Karte Domat-Ems - Chur ca. 1850 [m]	-	100 - 466 246	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sohlenbreite, Karte Plessur - Sargans 1854 [m]	-	-	145 - 248 184	108 - 328 215	178 - 1037 389	211 - 687 397	251 - 370 276	259 - 628 451	-	-	-	-
Sohlenbreite, Eschmannkarte 1854 [m]	-	-	-	-	-	257 - 582 380	190 - 405 311	138 - 714 449	107 - 368 279	234 - 756 407	192 - 467 299	101 - 290 247
Sohlenbreite, Karte Reichenau - Domat-Ems 1856 [m]	57 - 103 77	85 - 124 112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sohlenbreite, Rhein-Correction 1862 [m]	-	-	-	-	-	151 - 593 333	184 - 369 271	144 - 603 425	121 - 346 277	236 - 721 419	197 - 412 299	101 - 408 241
Sohlenbreite, Karte Plessur - Landquart ca. 1880 [m]	-	-	110 - 189 142	111 - 333 192	182 - 913 363	223 - 643 366	-	-	-	-	-	-
Mittlere Sohlenbreite Planimetrierung [m]	90	240	160	200	360	430	310	470	280	410	300	290
Gerinnebildende Abflüsse												
HQ2,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m3/s]	970	970	1'000	1'000	1'000	1'070	1'090	1'090	1'090	1'110	1'110	1'160
HQ2,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m3/s]	790	790	820	820	820	890	910	910	910	930	930	970
HQ5,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m3/s]	1'300	1'300	1'330	1'330	1'330	1'380	1'390	1'390	1'390	1'430	1'430	1'480
HQ5,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m3/s]	1'020	1'020	1'070	1'070	1'070	1'200	1'230	1'230	1'230	1'260	1'260	1'310
Natürlichkeitsgrad des Alpenrheins												
Wenig oder eher wenig Verbauungen mit sehr geringem Einfluss auf die Sohlenbreite												
Verbauungen mit abschnittsweise signifikantem Einfluss auf die Sohlenbreite												
Viele Verbauungen, welche die Sohlenbreite erheblich einschränken												
Die Karte zeigt nur ein Ausschnitt des Abschnitts												

Anhang 2

Regimebreiten nach empirischen Methoden

Alpenrhein	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
	Reichenau Domat-Ems	Domat-Ems Plessur	Plessur Rheinhöhle (Chur)	Rheinhöhle (Chur) Untervaz	Untervaz Landquart	Landquart Tamina	Tamina Bad Ragaz	Bad Ragaz Trübbach	Trübbach Säga	Säga Brücke Buchs/Schaa n	Brücke Buchs/Schaa n Brücke Lienz/Bangs	Brücke Lienz/Bangs III
Kilometer GN10 [km]	0.0-3.5	3.5-9.6	9.6-10.7	10.7-19.8	19.8-23.4	23.4-28.9	28.9-29.6	29.6-35.9	35.9-40.2	40.2-49.5	49.5-61.9	61.9-65.4
Korngrossen und Gefälle (Istzustand)												
dm Sohlenmaterial [cm]	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0
d90 Sohlenmaterial [cm]	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	12.0	12.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0
Gefälle [‰]	2.3	2.3	3.1	2.8	2.9	2.9	2.9	2.8	2.6	2.2	1.6	1.4
Gerinnebildende Abflüsse												
HQ2,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m3/s]	970	970	1'000	1'000	1'000	1'070	1'090	1'090	1'090	1'110	1'110	1'160
HQ2,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m3/s]	790	790	820	820	820	890	910	910	910	930	930	970
HQ5,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m3/s]	1'300	1'300	1'330	1'330	1'330	1'380	1'390	1'390	1'390	1'430	1'430	1'480
HQ5,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m3/s]	1'020	1'020	1'070	1'070	1'070	1'200	1'230	1'230	1'230	1'260	1'260	1'310
Resultate empirischer Ansatz nach Parker												
Gerinnebreite HQ2,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m]	144	144	147	147	147	145	146	153	157	163	169	180
Gerinnebreite HQ2,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m]	130	130	133	133	133	132	134	140	144	150	155	164
Reduktion Gerinnebreite bei HQ2 [um %]	10	10	9	9	9	9	9	9	9	8	8	9
Gerinnebreite HQ5,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m]	167	167	169	169	169	165	165	173	178	185	192	203
Gerinnebreite HQ5,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m]	148	148	152	152	152	154	155	163	167	174	180	191
Reduktion Gerinnebreite bei HQ5 [um %]	11	11	10	10	10	7	6	6	6	6	6	6
hmax für Ikeda et al.												
hmax [m]	1.77	1.77	1.31	1.45	1.40	1.68	1.68	1.45	1.41	1.48	1.78	1.74
Resultate empirischer Ansatz nach Ikeda et al.												
Gerinnebreite HQ2,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m]	231	231	338	300	312	256	261	326	349	347	291	326
Gerinnebreite HQ2,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m]	189	189	278	247	257	214	218	273	292	291	245	274
Reduktion Gerinnebreite bei HQ2 [um %]	18	18	18	18	18	16	16	16	16	16	16	16
Gerinnebreite HQ5,natürlich ohne Kraftwerksanlagen [m]	308	308	449	397	414	329	331	415	444	445	373	415
Gerinnebreite HQ5,reduziert mit Kraftwerksanlagen [m]	243	243	362	320	334	286	293	368	393	393	330	368
Reduktion Gerinnebreite bei HQ5 [um %]	21	21	19	19	19	13	11	11	11	12	12	11
Resultate empirischer Ansatz nach Ashmore												
Wasserspiegelbreite HQ2,natürlich ohne Kraftwerksanlagen	188	188	243	224	231	214	217	240	244	236	202	210
Wasserspiegelbreite HQ2,reduziert mit Kraftwerksanlagen	160	160	208	192	198	185	189	208	212	206	176	183
Reduktion Wasserspiegelbreite bei HQ2 [um %]	15	15	14	14	14	13	13	13	13	13	13	13
Wasserspiegelbreite HQ5,natürlich ohne Kraftwerksanlagen	236	236	303	280	288	261	262	290	294	287	246	254
Wasserspiegelbreite HQ5,reduziert mit Kraftwerksanlagen	196	196	256	236	243	234	238	263	268	260	223	231
Reduktion Wasserspiegelbreite bei HQ5 [um %]	17	17	16	16	16	10	9	9	9	9	9	9
Mü für Millar (2005)												
Mü [-]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Resultate empirischer Ansatz nach Millar (2005)												
Wasserspiegelbreite HQ2,natürlich ohne Kraftwerksanlagen	190	190	232	218	223	204	206	231	240	240	219	234
Wasserspiegelbreite HQ2,reduziert mit Kraftwerksanlagen	164	164	202	190	194	179	182	204	211	212	193	206
Reduktion Wasserspiegelbreite bei HQ2 [um %]	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	12
Wasserspiegelbreite HQ5,natürlich ohne Kraftwerksanlagen	233	233	283	266	272	243	244	274	284	286	261	278
Wasserspiegelbreite HQ5,reduziert mit Kraftwerksanlagen	196	196	243	229	233	221	224	252	261	262	239	255
Reduktion Wasserspiegelbreite bei HQ5 [um %]	16	16	14	14	14	9	8	8	8	8	8	8