Internationale Regierungskommission Alpenrhein
Projektgruppe Gewässer und Fischökologie

Trübung und Schwall Alpenrhein

Einfluss auf Substrat, Benthos und Fische

Fachbericht Trübung, Strömung, Geschiebetrieb und Kolmation

Zürich, im September 2001

Schälchli, Abegg + Hunzinger
dipl. Ing. ETH / SIA, Fluss- und Wasserbau
Reinhardstr. 14, CH-8008 Zürich, Tel. 01 - 251 51 74, Fax 01 - 251 51 78, email: sah.zh@flussbau.ch

Inhalt

1 Auftrag 1

1.1 Einleitung 1

1.2 Fragestellung 2

1.3 Untersuchungsgegenstand und Berichtsaufbau 3

2 Morphologie, Strömung und Geschiebetrieb 4

2.1 Grundlagen Alpenrhein 4

2.1.1 Einzugsgebiet und Geologie 4

2.1.2 Überblick Morphologie 6

2.1.3 Schwall und Sunk im Winterhalbjahr 9

2.1.4 Geschiebehaushalt 13

2.1.5 Grundwasser 15

2.2 Teststrecken 17

2.2.1 Auswahl 17

2.2.2 Morphologie 18

2.2.3 Strömungsverhältnisse 23

2.2.4 Substrat 30

2.2.5 Geschiebetrieb 32

3 Trübung 45

3.1 Einleitung 45

3.1.1 Aufgabenstellung 45

3.1.2 Überblick Messprogramm 46

3.2 Trübeaufkommen im Einzugsgebiet 50

3.2.1 Einflussfaktoren 50

3.2.2 Massgebende Prozesse Trübeaufkommen 52

3.2.3 Massgebende Prozesse Trübetransport 61

3.2.4 Übersicht über die Herkunft der Trübung im Alpenrhein 63

3.3 Trübung im Alpenrhein 67

3.3.1 Messungen und Prozessanalyse 67

3.3.2 Längenprofil Trübung Alpenrhein 73

4 Kolmation 76

4.1 Äussere Kolmation 76

4.1.1 Einflussgrössen und Prozesse 76

4.1.2 Äussere Kolmation in den Teststrecken 80

4.2 Innere Kolmation 83

4.2.1 Einflussgrössen und Prozesse 83

4.2.2 Kolmationsberechnungen 85
4.2.2.1 Teststrecke Bad Ragaz, Profil km 25.8 (Furt) 87
4.2.2.2 Teststrecke Bad Ragaz, Profil km 26.2 (Rinne) 90
4.2.2.3 Teststrecke Buchs, Profil 51.0 (Rinne) 92
4.2.2.4 Teststrecke Diepoldsau, km 76.0 (Kanal, ebene Sohle) 95
4.2.3 Zusammenfassung innere Kolmation und Grundwasserneubildung 97

Anhang

1 Querprofile Teststrecken 102
2 Trübe - Messkampagne Einzugsgebiet (8.2.99) 118
3 Online - Trübemessungen, Zubringer und Alpenrhein, 1999 - 2000 125
4 Quellenverzeichnis 145

Planbeilagen

1.1 Situationsplam Alpenrhein Süd, Massstab 1 : 200’000
1.2 Situationsplam Alpenrhein Nord, Massstab 1 : 200’000
2.1 Teststrecke Mastrils, Massstab 1 : 5’000
2.2 Teststrecke Bad Ragaz, Massstab 1 : 5’000
2.3 Teststrecke Buchs, Massstab 1 : 5’000

1 Auftrag

1.1 Einleitung

Das Projekt „Trübung und Schwall Alpenrhein“ wurde von der Projektgruppe Gewässerökologie der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein initiiert. Anlass des Projekts ist in erster Linie der seit Ende der 70er Jahre sinkende Fischbestand. Das Projekt untersucht neben fischbiologischen Erhebungen die Lebensraumverhältnisse vorab im Winterhalbjahr, das für die Fortpflanzung und die Larvenentwicklung der Fische massgebend ist. Die Lebensraumverhältnisse umfassen die Abfluss- und Strömungsverhältnisse, die Morphologie, die Trübung sowie deren Auswirkungen auf das Lichtklima, die Zusammensetzung und die Kolmation der Flusssohle sowie das Benthos (Nahrungsgrundlage).

Der vorliegende Fachbericht befasst sich mit den physikalischen Verhältnissen[1] des Lebensraums Alpenrhein, welche vorab durch die folgenden Randbedingungen und Prozesse bestimmt werden.

- Morphologie des Alpenrheins (Erscheinungsformen und deren Bedeutung in Bezug auf die Projektziele)
- Kraftwerkschwall im Alpenrhein (Ausmass und Veränderung in den letzten 20 Jahren)
- Strömungsverhältnisse bei den vorherrschenden Winterabflüssen
- Geschiebeumlagerungen und Sohlenveränderungen (Transportbeginn, Transportweg und Geschiebeverfügbarkeit)
- Trübeaufkommen im Einzugsgebiet des Alpenrheins (Ursachen, Konzentrationen und Frachten)
- Transport und Ablagerung von Schwebstoffen im Alpenrhein (Transport, Um- und Ablagerung)
- Kolmation der Rheinsohle (äussere und innere Kolmation)
- Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung (Auswirkung der Kolmation auf das Sickerwasservolumen)

Die Projektstrecke betrifft den Alpenrhein von Reichenau bis zum Bodensee.

Die Felderhebungen (Morphologie und Trübung) wurden zwischen Februar 1999 und März 2001 durchgeführt.

[1] Weitere physikalische Aspekte sind im Fachbericht Limnex enthalten.

1.2 Fragestellung

Mit dem vorliegenden Fachbericht sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

1. Trübung

- Woher stammt die Trübung des Alpenrheins? Welches sind die massgebenden Trübeverursacher? Wie hoch ist der anthropogen bedingte Schwebstoffeintrag?
- Wie werden die Schwebstoffe im Rhein transportiert (Transport, Ablagerung, Resuspension)? Welchen Einfluss hat der Kraftwerkschwall?
- Kann die Trübezufuhr in den Rhein reduziert werden?

2. Kolmation

- Wie entwickelt sich die Kolmation in einem Winterhalbjahr?
- Welchen Einfluss hat der Schwall auf die Kolmation?
- Wie entwickelt sich die Kolmation in morphologisch unterschiedlichen Streckenabschnitten?
- Welchen Einfluss hat die Kolmation der Sohle auf die Grundwasserneubildung? Welchen Einfluss haben Trübung und Schwall?

3. Schwall

- Was geschieht bei einem Kraftwerkschwall mit der Rheinsohle? Ist die Deckschicht stabil? Kann Geschiebe transportiert werden?
- Sind unterschiedliche Schwallganglinien zu erkennen, resp. hat sich der Kraftwerksbetrieb über die vergangenen Jahrzehnte wesentlich geändert?

4. Morphologie

- Sind in morphologisch unterschiedlichen Streckenabschnitten massgebende Unterschiede festzustellen (insbesondere bezüglich Wasserstandsschwankungen, Fliessgeschwindigkeit, Geschiebetransport, Schwebstofftransport, Kolmation)?
- Welche Veränderungen sind bei einer Aufweitung des Rheins zu erwarten?

5. Massnahmen

- Was für Massnahmen sind geeignet, die unerwünschten Einflüsse von Trübung und Schwall zu verringern?

1.3 Untersuchungsgegenstand und Berichtsaufbau

Untersuchungsgegenstand des Auftrages sind alle massgebenden Einflussgrössen und Prozesse im Einzugsgebiet, welche das Trübeaufkommen, den Schwebstoff- und Geschiebetransport sowie die Kolmation des Substrats bestimmen. Dazu gehören

1 die Geologie und die Morphologie des Einzugsgebietes (Verfügbarkeit von Feinsedimenten, Reliefenergie),

2 die Abflussverhältnisse im Fliessgewässersystem (Strömungsverhältnisse, Erosions- und Transportprozesse),

3 die Morphologie der Gewässer (Strömungsverhältnisse, Transportprozesse),

4 die Zusammensetzung des Substrats (Geschiebetransport, Kolmation),

5 die Grundwasserspiegellage (Ex- oder Infiltration beeinflusst die Kolmation) und

6 anthropogene Tätigkeiten, welche das Trübeaufkommen beeinflussen.

In **Kapitel 2** sind die wesentlichen Grundlagen des Einzugsgebiets und des Rheins zusammengestellt (Geologie, Morphologie, Schwall, Geschiebehaushalt, Grundwasser). Für die detaillierte Untersuchung der im Rhein ablaufenden Prozesse wurden 4 Teststrecken mit unterschiedlichen Morphologien ausgewählt (Mastrils, Bad Ragaz, Buchs, Diepoldsau). In Kapitel 2.2 werden die hydraulischen und geschiebemechanischen Verhältnisse der Teststrecken beschrieben.

Kapitel 3 beschreibt das Trübeaufkommen im Einzugsgebiet des Alpenrheins anhand der verfügbaren und durchgeführten Trübemessungen. Daraus werden die massgebenden Trübequellen (natürlich und anthropogen) und die Transportprozesse abgeleitet. In den 4 Teststrecken werden die ablaufenden Um- und Ablagerungsprozesse beschrieben und die Trübung des Rheins im Längenprofil dargestellt.

In **Kapitel 4** werden die massgebenden Einflussgrössen und Prozesse der äusseren und inneren Kolmation dargestellt. In den Teststrecken werden diejenigen Sohlenbereiche bezeichnet, wo äussere Kolmation zu erwarten ist. Die innere Kolmation wird für verschiedene Sohlenbereiche in ausgewählten Querprofilen berechnet und der Einfluss des Kraftwerkschwalls untersucht.

Auf den **Plänen 1.1 und 1.2** sind Karten des Einzugsgebiets (1 : 200’000) mit diversen projektrelevanten Angaben dargestellt.

Auf den **Plänen 2.1 bis 2.3** sind Luftbilder der Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs mit ausgewerteter Morphologie und äusserer Kolmation dargestellt.

Quellenangaben sind im Bericht mit /x/ gekennzeichnet und in Anhang 4 zu finden.

2 Morphologie, Strömung und Geschiebetrieb

2.1 Grundlagen Alpenrhein

2.1.1 Einzugsgebiet und Geologie

Das Einzugsgebiet des Alpenrheins teilt sich in drei grosse, vier mittlere und diverse kleine Teileinzugsgebiete auf (Tabelle 1 und Abbildung 1). Die Einzugsgebiete des Hinter- und des Vorderrheins (Reichenau) umfassen mit 3207 km^2 etwas mehr als die Hälfte des gesamten Einzugsgebiets des Rheins bis zum Bodensee (6123 km^2).
Auf den Kanton Graubünden entfallen etwa 70 %, auf das Land Vorarlberg 23 %, auf den Kanton St. Gallen 5 % und auf das Fürstentum Liechtenstein 2 % des Einzugsgebiets.

Gewässer	Teileinzugsgebiet	Fläche [km^2]
Hinterrhein (HR)	HR bei Thusis	595
	Nolla	30
	Albula	950
	HR bei Reichenau	**1693**
Vorderrhein (VR)	VR bei Ilanz	776
	Glenner	382
	Rabiusa	138
	VR bei Reichenau	**1514**
Ill	Mündung	**1289**
Landquart (LQ)	bis und mit Schlappinbach	199
	Furnerbach	41
	Schraubach	65
	Taschinasbach	74
	LQ bei Landquart	**618**
Plessur		**263**
Tamina		**147**
Frutz		**ca. 130**

Tabelle 1 Teileinzugsgebiete des Rheins, der Grösse nach geordnet.

Abbildung 1 zeigt die Geologie des Einzugsgebiets. Die geologischen und morphologischen Verhältnisse eines Einzugsgebietes bestimmen die Verfügbarkeit von Feinmaterial (Partikel der Ton-, Silt- und Sandfraktion), die als Trübstoffe in das Gewässersystem gelangen können (vgl. Kap. 3.2).

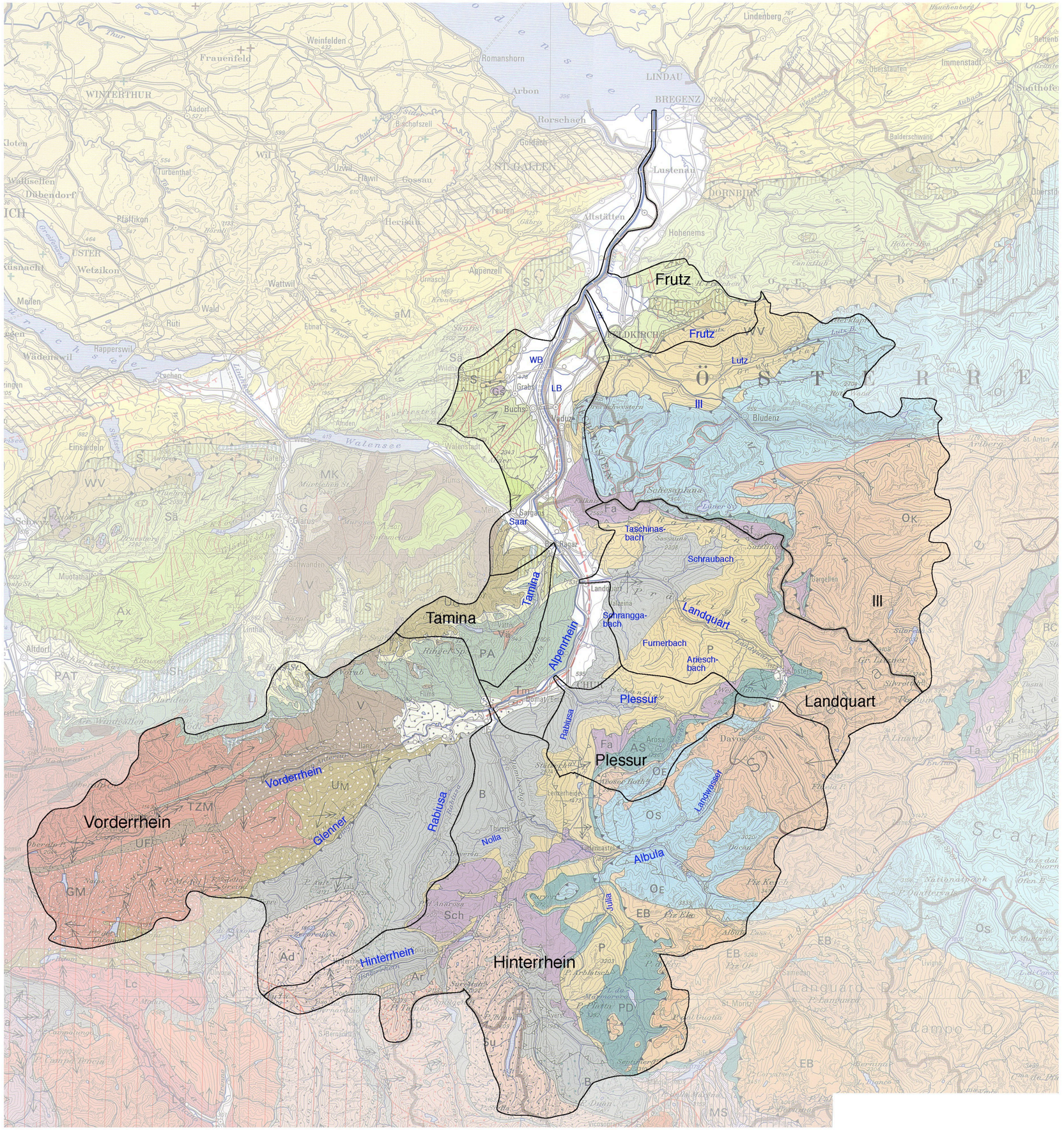


Abbildung 1

Das Einzugsgebiet des Alpenrheins
*Tektonische Karte der Schweiz**
Massstab 1 : 500'000

Legende (stark vereinfacht)

Ostalpin

Oi, OE, OS — Nördliche Kalkalpen / Aroser Dolomiten
vorw. Dolomit und Kalk

Ok — Kristallin

Penninikum

WV, P — Flysch
vorw. Breccien, Sansteine, Tonschiefer

B — vorw. Bündnerschiefer
Kalk- und Tonschiefer

AS, PD — Aroser Schuppenzone / Platta-Decke
Sedimente, Ophiolithe

Sch, Sf, Fa — Jura - Kreide Sedimente
vorw. Kalk

Ad, Su — Kristallin

Helvetikum

V, UF — Verrucano
vorw. Konglomerate, Sandsteine, Schiefer

GM, TZM — Gotthard-Massiv / Tavetscher Zwischenmassiv
Kristallin

Sä — Säntis-Drusberg-Decke
vorw. Kalk

UM — Mesozoische Sedimente des Gotthard-Massivs
vorw. Ton, Mergel, Sandstein, Kalkstein

UG — Flysch

Autochthon und Parautochthon

PA — Mesozoikum
vorw. Kalk

Quartär

Alluvialboden

Bergsturz

Umrandung Einzugsgebiet

* *Herausgegeben von der Schweizerischen Geologischen Kommission, 1980*

Ein sehr hohes Potenzial für die Bildung und Verfügbarkeit von Feinmaterial haben **Bündnerschiefer und Flysch**, die zum grossen Teil aus sehr feinkörnigen Sedimenten entstanden sind. Die stark aufgeschobenen und verfalteten Schichten zeigen eine instabile Struktur mit hoher Verwitterungstendenz. Bündnerschiefer und Flysch sind vor allem südlich und östlich des Vorder- und Alpenrheins zwischen Vals (Einzugsgebiet Glenner) und dem Rätikon (südlich Schesaplana) zu finden.
Einzugsgebiete mit hohem Bündnerschiefer- und Flyschanteil haben der Glenner, die Rabiusa, die Nolla, die Plessur, die Landquart, die Tamina sowie die Lutz (Zufluss der Ill).

Gestein mit mässig bis mittlerem Potenzial für die Bildung von Feinmaterial sind **Kalke und Dolomite**. Diese Gesteine bedecken grössere Teile der Einzugsgebiete des Hinterheins, der Plessur (oberes EG), der Tamina und der Ill (Schesaplana bis Rote Wand).

Die verschiedenen **kristallinen Gesteine** im Einzugsgebiet sind als sehr erosions- und verwitterungsresistent zu bezeichnen. Granite und Gneise bedecken grössere Teile der Einzugsgebiete des Vorderrheins, des Hinterrheins, der Landquart (oberes EG) sowie der Ill (oberes EG bis Schruns).

2.1.2 Überblick Morphologie

Der Alpenrhein beginnt beim Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein bei Reichenau (km 0.0) und mündet bei km 94 (mit Vorstreckung) in den Bodensee.

Zwischen Reichenau und Domat Ems befinden sich die Stauhaltung des Kraftwerks Reichenau (km 2.7, Abb. 2) und die rund 1.2 km lange Restwasserstrecke (bis km 3.9).



Abb. 2 Stau, Wehr und Restwasserstrecke KW Reichenau.



Abb. 3 Rhein Felsberg - Rossboden mit Aufweitung Felsberg. Fliessrichtung von rechts nach links.

Von km 3.9 bis km 20.0 (Beginn Mastrilser Auen) hat sich der mehrheitlich kanalisierte Rhein in die fluviale Talebene eingeschnitten (Abb. 3). Die Sohle ist abgesehen von vereinzelten Kiesbänken eben und kaum strukturiert. Die steilen Uferböschungen sind durch Blockwurf gesichert. Nur dort, wo der Rhein die felsige Talflanke erreicht, sind die Ufer noch natürlich (linke Ufer bei Chur und Trimmis). Eine vielfältige Morphologie zeigt die Rheinsohle bei der Aufweitung Felsberg (Abb. 3) und bei den Rodauen (flussab Mündung Oldisbach). Abgesehen von diesen etwas breiteren Flussabschnitten beträgt die Sohlenbreite 70 m.

Die Mastrilser Rheinauen erstrecken sich von km 20.0 bis zur Mündung der Landquart (km 23.3, Abb. 4). Die Morphologie zeigt bei einer Flussbettbreite von bis zu 300 m einen verzweigten Lauf mit kahlen und bewachsenen Kiesbänken und der typischen Abfolge von Rinnen, Furten, Schnellen und Kolken. Das linke Ufer verläuft entlang der felsigen Talflanke und das rechte Ufer wird durch einen gestreckten Hochwasserschutzdamm begrenzt. Dieser Flussabschnitt hat, zumindest im aquatischen Bereich, seinen natürlichen Charakter weitgehend erhalten. Die Mastrilser Rheinauen sind eine Teststrecke des vorliegenden Projekts.



Abb. 4 Rhein Zizers - Landquart mit den Mastrilser Rheinauen. Blick gegen Fliessrichtung.

Von der Landquart bis zum Bodensee ist der Rhein durchgehend begradigt, kanalisiert und die Ufer sind mit massivem Blockwurf gesichert (kleine Ausnahme rechtes Ufer Ellhorn).

Die Strecke zwischen der Landquart (km 23.3) und der Blockschwelle Ellhorn (km 33.9) zeigt eine regelmässige Abfolge von Schrägbänken, die bei Nieder- und Mittelwasserabfluss die Strömung in Rinnen, Furte, Schnellen und Kolke aufteilen (Abb. 5 und 6). Die Flussbettbreite beträgt 90 m und das durchschnittliche Gefälle 2.5 - 3.0 ‰. Der Rheinabschnitt vor Bad Ragaz ist die zweite Teststrecke des Projekts (Abb. 5).

Der rund 31 km lange Rheinstrecke zwischen der Schwelle Ellhorn (km 33.9) und der Illmündung (km 65.1) ist geprägt durch alternierende Kiesbänke, welche den aquatischen

Bereich in Rinnen, Furte, Schnellen und Kolke gliedern (Abb. 7 und 8). Die Flussbettbreite beträgt 100 m und das Gefälle nimmt von 2.5 ‰ auf 1.5 ‰ ab. Bei km 49.6 befindet sich die Blockschwelle Buchs. Der Rheinabschnitt flussabwärts der Schwelle Buchs ist die dritte Teststrecke des Projekts.



Abb. 5 Rhein Mastrils - Bad Ragaz mit Schrägbänken. Blick in Fliessrichtung.



Abb. 6 Rhein Bad Ragaz - Ellhorn mit Schrägbänken. Blick in Fliessrichtung.



Abb. 7 Rhein Triesen - Vaduz - Buchs mit alternierenden Bänken. Blick in Fliessrichtung.



Abb. 8 Rhein Sennwald - Ill mit alternierenden Bänken. Blick in Fliessrichtung.

Die Internationale Rheinstrecke zwischen der Ill und dem Bodensee ist gekennzeichnet durch ein schmales Hauptgerinne (anfänglich 70 - 80 m, weiter flussabwärts 40 - 50 m) und breite Vorländer, die durch Wuhre vom Hauptgerinne abgetrennt sind. Der gesamte Flussraum zwischen den Hochwasserschutzdämmen erreicht 200 - 300 m (Abb. 9).

Die Rheinsohle ist eben und zeigt keine Strukturen. Das Gefälle bewegt sich um 1 ‰ bevor es nach km 84 bis zum Bodensee auf Null absinkt.

Die Internationale Rheinstrecke ist der am stärksten verbaute und am wenigsten natürliche Abschnitt des Rheins.

Der Abschnitt zwischen Mäder und Diepoldsau ist die vierte Teststrecke des Projekts.



Abb. 9 Rhein Ill - Oberriet - Kummaberg. Flussabwärts der Illmündung ist die Internationale Rheinstrecke mit dem schmalen Hauptgerinne und den Vorländern zu erkennen. Blick in Fliessrichtung.

2.1.3 Schwall und Sunk im Winterhalbjahr

Auf den Plänen 1.1 und 1.2 sind die im Einzugsgebiet des Alpenrheins vorhandenen Wasserkraftwerksanlagen eingezeichnet. Bei allen grösseren Anlagen handelt es sich um Speicherkraftwerke, die auf die Produktion von Spitzenenergie ausgelegt sind. Bei hohem Strombedarf sind die Kraftwerke voll ausgelastet und bei geringem Bedarf (z.B. nachts und am Sonntag) sind die Kraftwerke ausser Betrieb. Die Kraftwerke verfügen über einen oder mehrere Speicher (Saison-, Wochen- oder Tagesspeicherbecken), die das aus dem Einzugsgebiet anfallende Wasser zurückhalten.

Beim tiefstgelegenen Kraftwerk einer Anlage wird das turbinierte Wasser in den Vorfluter zurückgegeben, wodurch der Abfluss ansteigt (Schwallanstieg), während der Volllast auf hohem Niveau mehr oder weniger konstant bleibt (Schwallabfluss) und bei rückläufigem Betrieb wieder abnimmt (Schwallrückgang). Wird kein Wasser turbiniert, so wird der Abfluss im Vorfluter als Sunk bezeichnet (meist Restwasserabfluss).

Während Zeiten mit Spitzenbedarf an elektrischer Energie fahren praktisch alle Kraftwerke auf Volllast, wobei die Triebwasserganglinien in Abhängigkeit der Speichergrösse und dem Füllgrad der Speicher variieren. Diese Schwallabflüsse münden an unterschiedlichen Stellen, und wegen der variierenden Fliessdistanzen zu unterschiedlichen Zeiten, in den Alpenrhein. Nahe den Kraftwerksanlagen resultieren ausgeprägte Schwallganglinien, die mit zunehmender Fliessdistanz und einmündenden Seitengewässern eine unregelmässigere Form annehmen (Abb. 10).

Die Schwallganglinien von Abbildung 10 zeigen einen typischen Wochengang mit hohen werktäglichen Schwallspitzen, einem stark reduzierten Schwall am Samstag (22. Jan.) und fehlendem Schwall am Sonntag (23. Jan.). Am 20. und 21. Januar entsprach der Abfluss bei Sunk dem Basisabfluss vom Wochenende (Domat Ems). An den darauffolgenden Werktagen wurde auch nachts der Sunk nicht auf den Basisabfluss reduziert. Bei Diepoldsau hat sich die Schwallganglinie durch zusätzliche Triebwassereinleitungen und infolge einer leichten Dämpfung des Schwalls soweit verändert, dass der Basisabfluss (wenn überhaupt) nur noch am Sonntag erreicht wird[2].

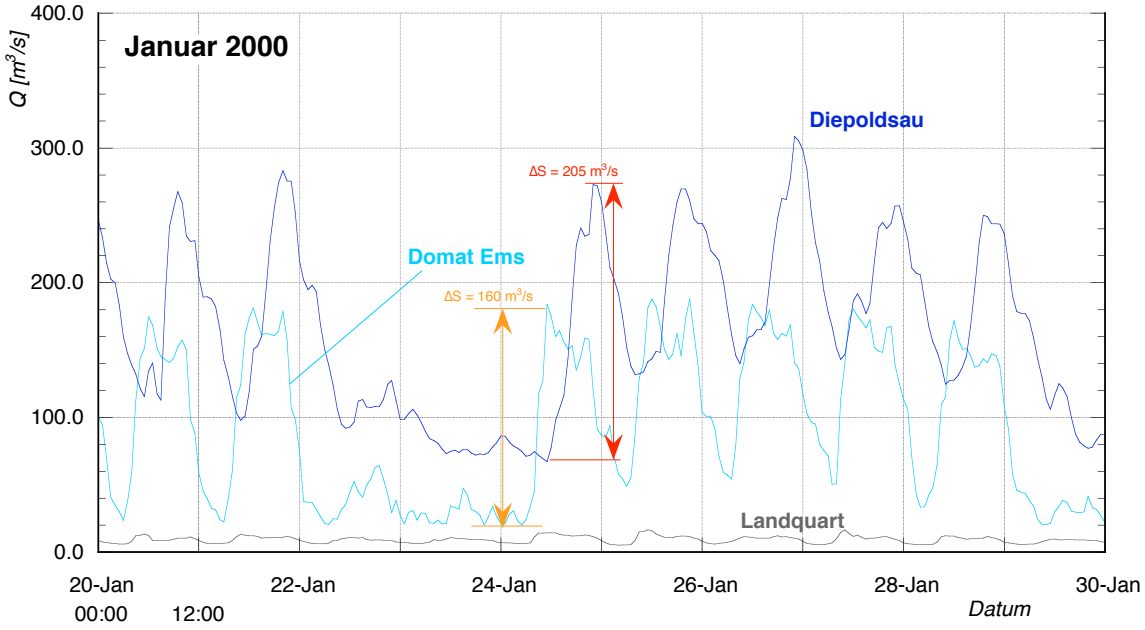


Abb. 10 *Abflussganglinien des Rheins bei Domat Ems und Diepoldsau sowie der Landquart bei Felsenbach vom 20. Januar bis zum 29. Januar 2000.*

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Abflussganglinien bei Domat Ems, Diepoldsau (Rhein) und Felsenbach (Landquart) während der Wintermonate der Jahre 1999 und 2000. Bei Domat Ems ist der Basisabfluss im November mit etwa 40 m³/s noch deutlich höher als während den

[2] Im Gegensatz zum Vorder- und Hinterrhein treten an der Landquart und der Ill auch an den Wochenenden regelmässig Abflussschwälle auf.

ausgeprägten Wintermonaten (Dezember - Februar) mit 20 m^3/s. Um den Jahreswechsel fehlen die ausgeprägten Schwallabflüsse wegen der Feiertage. Mit der einsetzenden Schneeschmelze steigt der Basisabfluss wieder an. Auffallend ist, dass dieser Anstieg bei Diepoldsau und Felsenbach wesentlich stärker ausgeprägt ist als bei Domat Ems (höher gelegenes Einzugsgebiet).

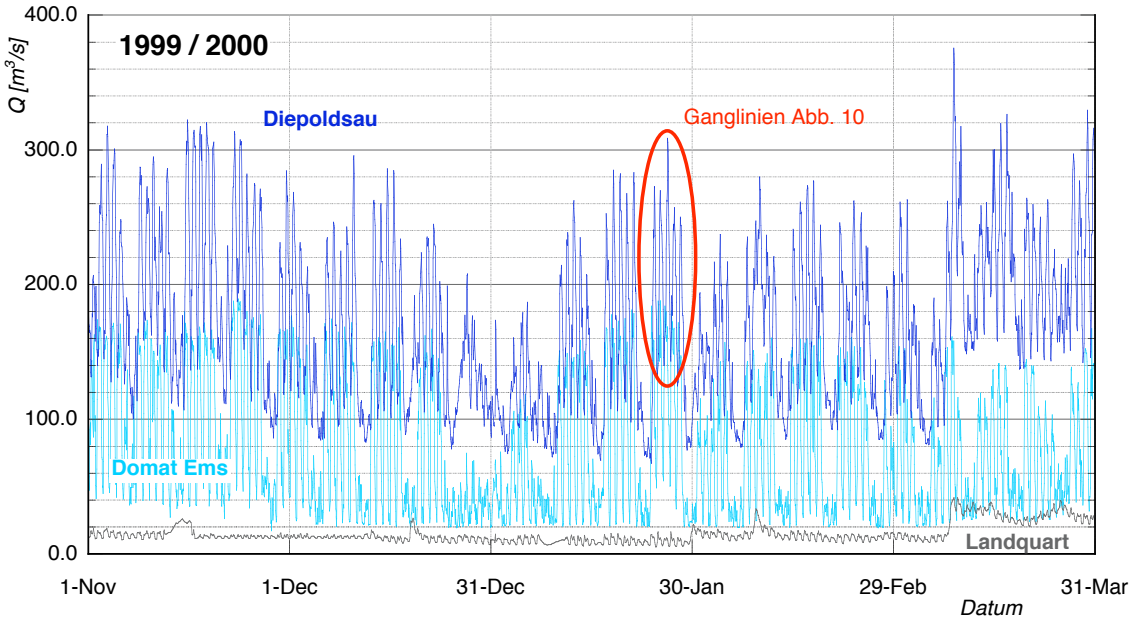


Abb. 11 *Abflussganglinien des Rheins bei Domat Ems und Diepoldsau sowie der Landquart bei Felsenbach vom 1. November 1999 bis zum 31. März 2000.*

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die prozentuale Verteilung der täglichen Schwallanstiege (Abflussschwankungen) und der täglichen Spitzenabflüsse von je 3 Jahren der 70er, der 80er und der 90er Jahre bei Domat Ems. Ausgewertet wurden die Ganglinien der Monate Dezember - Februar[3].

Entsprechend Abbildung 12 lag der Median (50 % aller Werte) aller Schwallanstiege Ende der 70er Jahre zwischen 77 und 102 m^3/s, Ende der 80er Jahre zwischen 65 und 106 m^3/s und Ende der 90er Jahre zwischen 103 und 153 m^3/s. Obschon die dargestellten Verteilungskurven vom vorausgegangenen Niederschlagsgeschehen abhängig sind[4], zeigt die Graphik, dass die Schwallabflüsse vor allem zwischen Ende der 80er Jahre und Ende der 90er Jahre markant zugenommen haben. Im vergangenen Winter 00/01 betrug der durchschnittliche Schwallanstieg über 150 m^3/s gegenüber 70 - 100 m^3/s in den betrachteten 70er und 80er Jahren.

---

[3] Bei den Wintern 77/78, 87/88, 98/99 sind nur die Monate Januar und Februar berücksichtigt.

[4] Die Jahre 78/79, 89/90 und 98/99 waren offensichtlich Trockenjahre mit nur teilgefüllten Speicherseen.

Abb. 12

Summenkurven der täglichen Schwall-abflüsse (Qmax - QBasis) des Rheins bei Domat Ems für 6 ausgewählte Winter.

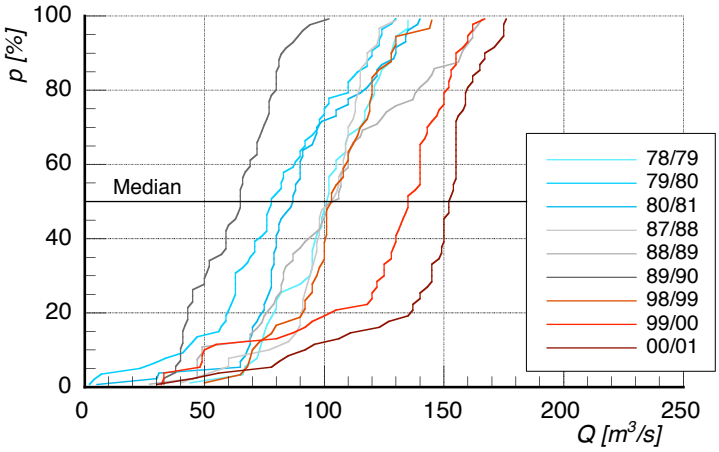
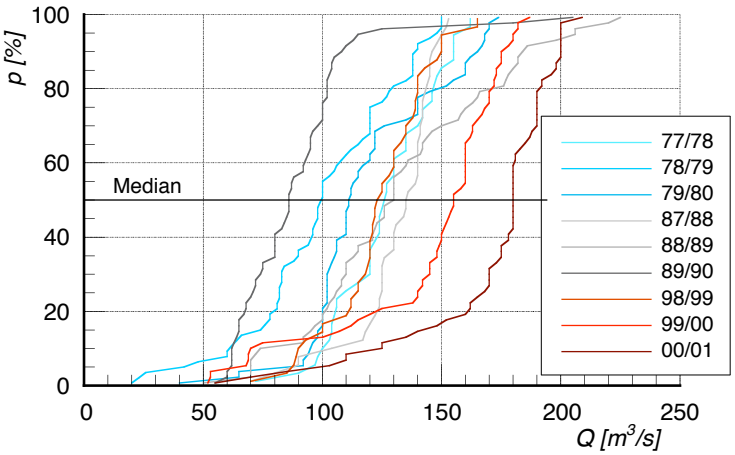


Abb. 13

Summenkurven der täglichen Spitzen-abflüsse (Qmax) des Rheins bei Domat Ems für 6 ausgewählte Winter.



Die täglichen Abflussspitzen setzen sich zusammen aus dem Basisabfluss, dem Schwall und einem eventuellen Abflussanteil infolge Schneeschmelze oder Regen (Abb. 13). Der untere Teil der Kurven (tiefe Abflusswerte) betrifft die Feiertage und die Wochenenden, der mittlere Teil den klassischen Winterschwall (werktags) und, sofern vorhanden, der oberste Teil den infolge Regen oder Schneeschmelze erhöhte Schwallabfluss (z.B. 89/90). Die Graphik zeigt, dass in den letzten zwei Wintern während der Hälfte aller Tage der Rheinabfluss 155 bis 180 m^3/s überstieg, währenddem der Median Ende der 70er Jahre bei 100 - 125 m^3/s lag. Die ausgewerteten Jahresganglinien deuten auf eine anthropogen bedingte, signifikante Zunahme der täglichen Abflussspitzen hin.

Hohe Spitzenabflüsse, die (neben dem Schwall) auf Schneeschmelze oder Regen zurück-zuführen sind, sind nur in den Wintern 88/89 und 89/90 zu beobachten. Dies zeigt, dass sich in den Einzugsgebieten von Vorder- und Hinterrhein nur alle paar Winter abflussrelevante Wetterlagen einstellen.

In den Abbildungen 14 und 15 sind die Verteilungskurven der täglichen Schwallabflüsse und der täglichen Spitzenabflüsse der Landquart bei Felsenbach dargestellt (analog den Abbildungen 12 und 13).

Abb. 14

Summenkurven der täglichen Schwallabflüsse (Qmax - QBasis) der Landquart bei Felsenbach für 6 ausgewählte Jahre.

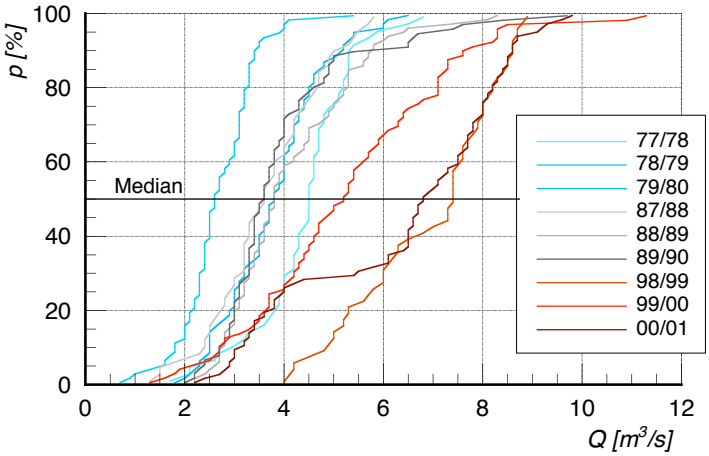
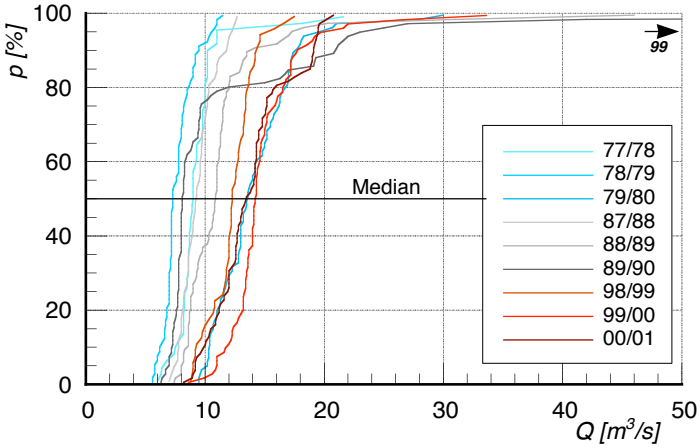


Abb. 15

Summenkurven der täglichen Spitzenabflüsse (Qmax) der Landquart bei Felsenbach für 6 ausgewählte Jahre.



Der 50%-Wert (Median) des Schwallanstiegs lag in den 70er und 80er Jahren bei 2.5 - 4.5 m^3/s und Ende der 90er Jahre bei 5 - 7 m^3/s. Dies deutet darauf hin, dass der KW-Betrieb in Richtung einer höheren Schwallspitze verändert worden ist.

Die Verteilungen der täglichen Spitzenabflüsse (Abb. 15) zeigen für die Winter 77/78, 79/80, 88/89, 89/90 und 99/00 im oberen Ast einen markanten Anstieg (bis 99 m^3/s). In der Landquart können regelmässig natürlich bedingte Winterhochwasser infolge von Schneeschmelze oder Regenereignissen auftreten.

2.1.4 Geschiebehaushalt

In Abbildung 16 sind die Resultate der Prognoseberechnungen des Geschiebehaushalts und der Sohlenveränderungen im Alpenrhein für die nächsten 30 Jahre (1995 - 2025) dargestellt /1/. Dabei wurden die Randbedingungen entsprechend den Verhältnissen zwischen 1974 bis 1995 beibehalten (insbesondere Geschiebezufuhr und Baggerungen).

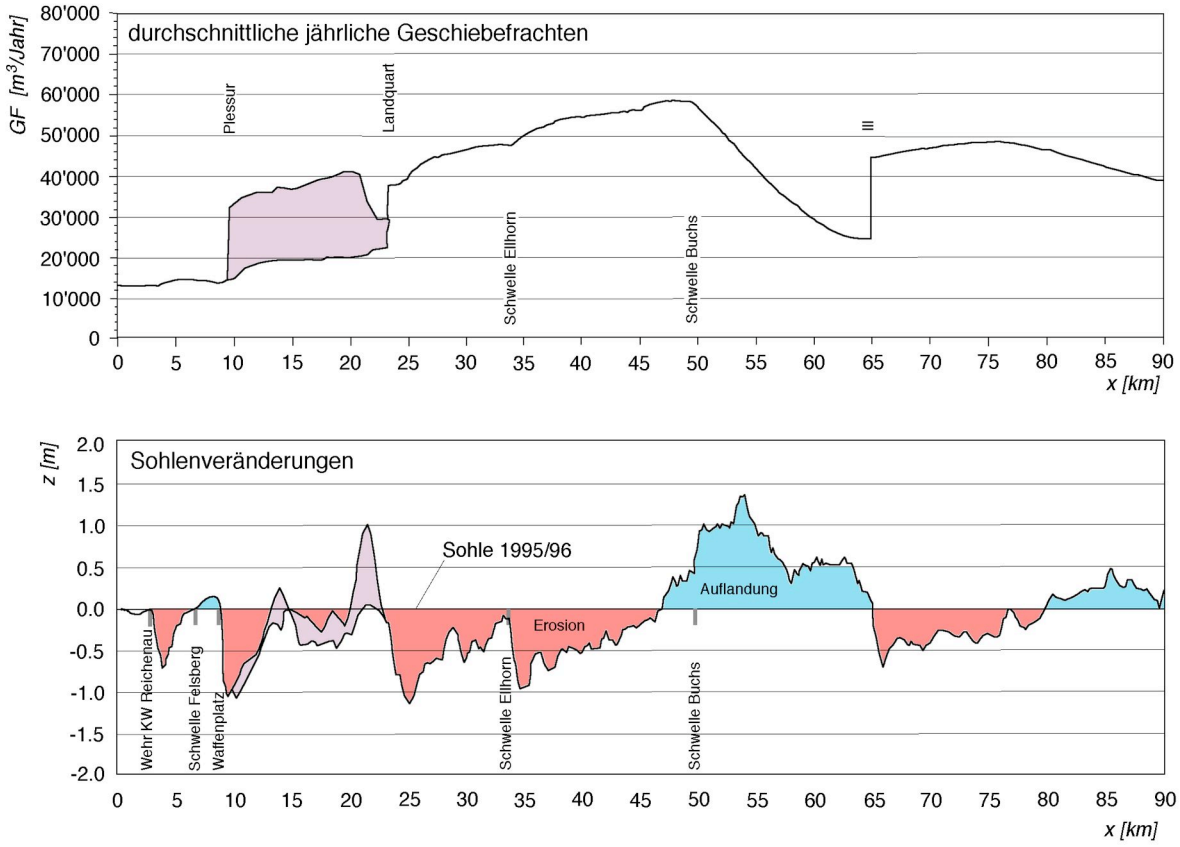


Abb. 16 *Längenprofil Reichenau - Bodensee mit durchschnittlich jährlich transportierten Geschiebefrachten (oben) und Sohlenveränderungen nach der Berechnungsperiode von 30 Jahren (unten). Die lilafarbene Fläche bezeichnet den Schwankungsbereich infolge unsicherer Geschiebezufuhr. Wegen der Verwendung von gleitenden Mitteln über 5 Querprofile sind die Sohlenveränderungen bei den Schwellen nicht Null (aus /1/).*

Aus Vorder- und Hinterrhein werden dem Alpenrhein etwa 14'000 m^3 Geschiebe pro Jahr zugeführt. Das Geschiebe wird bei Hochwasserabfluss und teilentleertem Stau Reichenau durch das Stauwehr und die Restwasserstrecke transportiert. Anschliessend nimmt die transportierte Geschiebefracht infolge seitlicher Zubringer und Sohlenerosion bis Buchs auf knapp 60'000 m^3/Jahr zu. Im Bündner Rheintal wird die Sohlenerosion durch mehrere Blockschwellen begrenzt. Abgesehen von den breiteren Flussstrecken (Trimmis, Mastrils), wo eine grössere Unsicherheit betreffend die zukünftige Entwicklung besteht, kann die gesamte Rheinstrecke zwischen dem KW Reichenau und km 45 (etwas flussaufwärts der Buchser Schwelle) als **Erosionsstrecke** bezeichnet werden.

Von km 45 bis zur Illmündung (km 65) nimmt die transportierte Geschiebefracht von knapp 60'000 m^3/Jahr auf 25'000 m^3/Jahr ab. Das sinkende Transportniveau führt zu einer Auflandung der Rheinsohle um 0.5 - 1.0 m (innerhalb von 30 Jahren). Dieser knapp 20 km lange Rheinabschnitt kann als **Auflandungsstrecke** bezeichnet werden.

Flussabwärts der Illmündung folgt zunächst eine leichte Erosionsstrecke (über 10 km Sohleneintiefungen um 0.4 m) worauf bis zum Bodensee eine leichte Auflandungsstrecke folgt.

2.1.5 Grundwasser

Die fluvialen Schotter des Rheintales beherbergen ein zusammenhängendes Grundwasservorkommen das gesättigt an den Rhein angeschlossen ist. Für die vorliegende Untersuchung von Bedeutung ist, in welchen Streckenabschnitten Rheinwasser ins Grundwasser infiltriert und wo Grundwasser in den Rhein exfiltriert. Bei der Exfiltration von Grundwasser ist keine oder eine nur vernachlässigbare innere Kolmation möglich.

In Plan 1.1 sind die entsprechenden Streckenabschnitte nach /3/ eingezeichnet. Dementsprechend infiltriert der Rhein auf der gesamten Strecke (km 23.3 - km 90) ausser in den Abschnitten Schwelle Ellhorn - Triesen (km 33.9 - km 41.5) sowie Eschen - Koblach (km 53.5 - km 71.5). Insbesondere in den Teststrecken Bad Ragaz, Buchs und Diepoldsau infiltriert der Rhein, so dass hier die innere Kolmation von Bedeutung ist.

Im Bereich der Teststrecken wurden Ganglinien von rheinnahen Grundwasser-Messstellen analysiert (Lage der Messstellen vgl. Pläne 1.1 und 1.2, /4/). Die Abbildungen 17 - 19 zeigen die Ganglinien (Tagesmittelwerte) der Jahre 1994 - 1999 für zwei Stationen bei Bad Ragaz (Abb. 17), eine Station bei Buchs (Abb. 18) und zwei Stationen bei Mäder - Diepoldsau (Abb. 19).

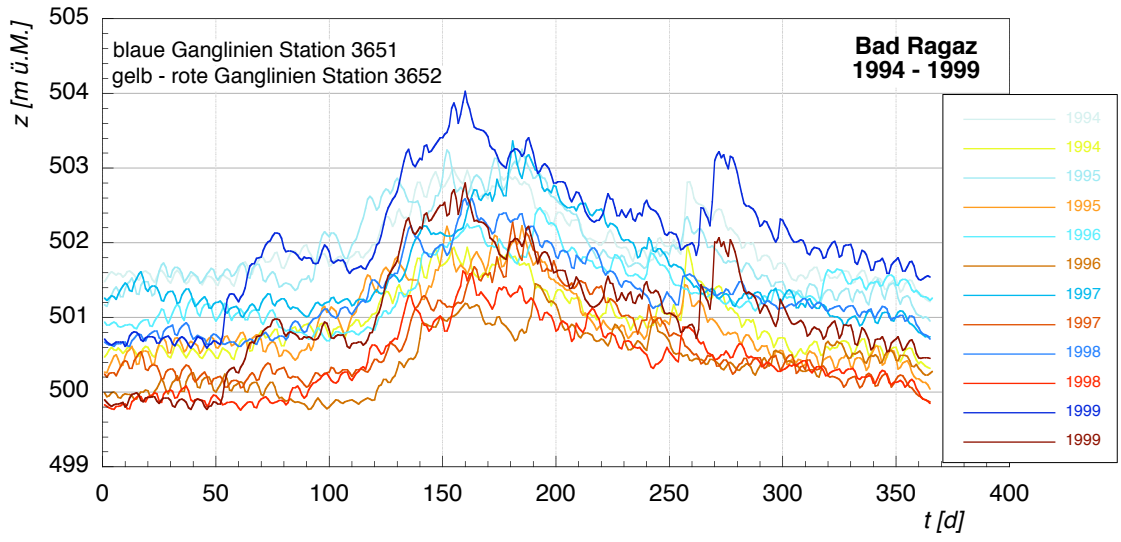


Abb. 17 *Grundwasserganglinien Bad Ragaz 1994 - 1999, Stationen 3651 (blau) und 3652 (gelb - rot), Tagesmittelwerte.*

Alle Messstellen verzeichnen einen tiefen Grundwasserspiegel im Winter und einen hohen Grundwasserspiegel während der Schmelzperiode (Tage 120 - 250). Ausserordentlich hoch liegt der Grundwasserspiegel im Sommer 1999 nach dem extrem schneereichen Winter. Auffallend ist zudem der markante Anstieg des Grundwasserspiegels im Zusammenhang mit dem Rheinhochwasser vom 26. September 99 mit einer Abflussspitze von 990 m^3/s bei Domat/Ems, resp. 1920 m^3/s bei Diepoldsau.

An allen Messstellen widerspiegeln sich die Schwallganglinien des Rheins in schwankenden Grundwasserständen, wobei die Amplituden bei Bad Ragaz am stärksten ausgeprägt sind.

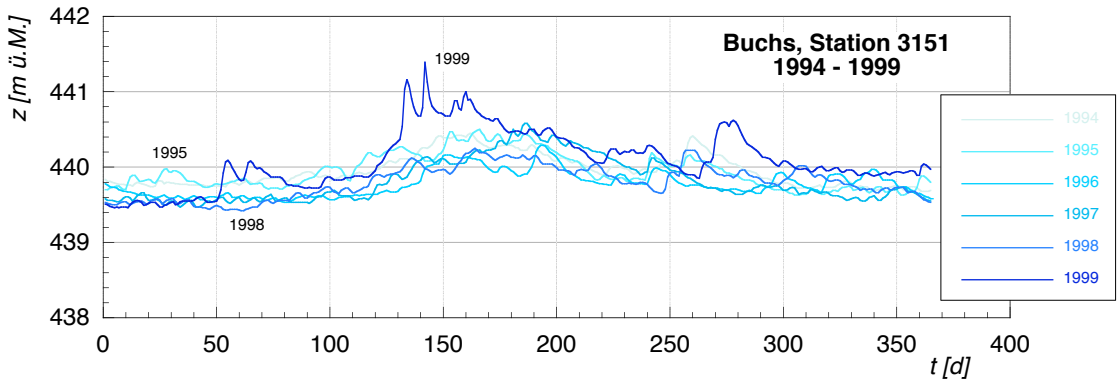


Abb. 18 *Grundwasserganglinien Buchs 1994 - 1999, Station 3151, Tagesmittelwerte.*

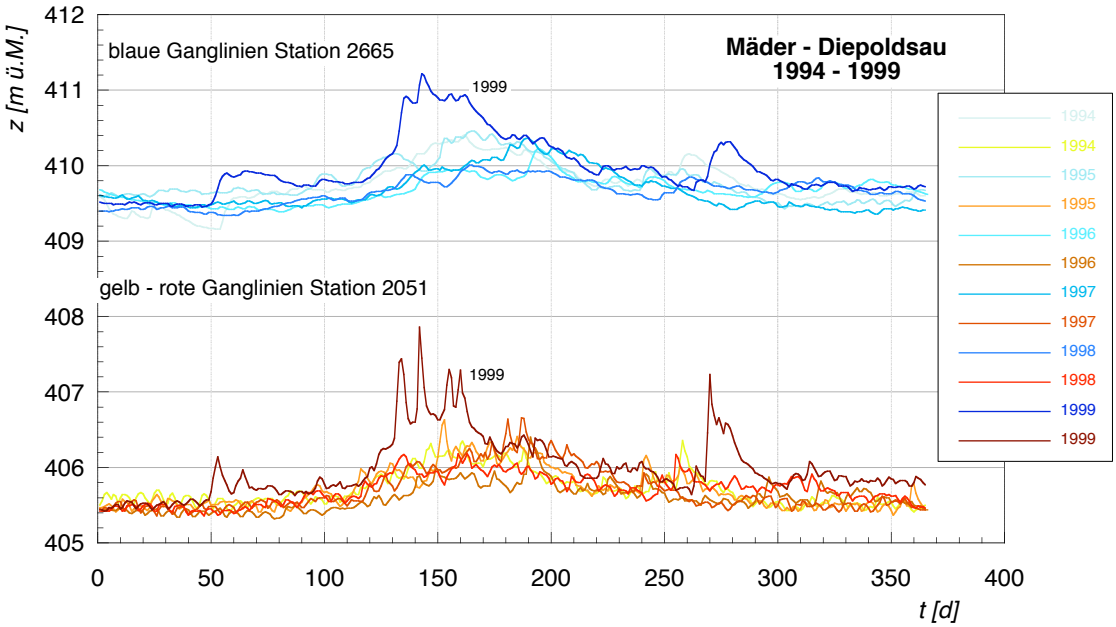


Abb. 19 *Grundwasserganglinien Mäder - Diepoldsau 1994 - 1999, Stationen 2665 (blau) und 2051 (gelb - rot), Tagesmittelwerte.*

Im Bereich der Teststrecke von Mastrils sind keine aktuellen Grundwasserstandsmessungen mit zuverlässigem Höhenanschluss vorhanden /5/. Bei den Messstellen 21B, 23/IA und 23A (Plan 1.1) sind die Angaben von Tabelle 2 verfügbar. In Abbildung 20 sind die Pegelstände der Station 21.3 dargestellt. Bei dieser Station musste der Höhenanschluss über eine benachbarte Messstation geschätzt werden. Ein Vergleich mit dem Rheinwasserspiegel bezüglich In- oder Exfiltration ist als sehr unsicher zu bezeichnen.

Station	Messperiode	Anz. Mess.	Min.-Wert	**Mittelwert**	Max. Wert
21B	1962-1993	114	519.76	**522.78**	524.19
23A	1962-1972	118	516.75	**517.65**	519.10
23IA	1968-1990	22	513.72	**514.82**	516.14

Tabelle 2 *Minimal-, Mittel- und Maximalwert der erfassten Grundwasserstände der Messstationen 21B, 23A und 23IA [Angaben in m ü.M.].*

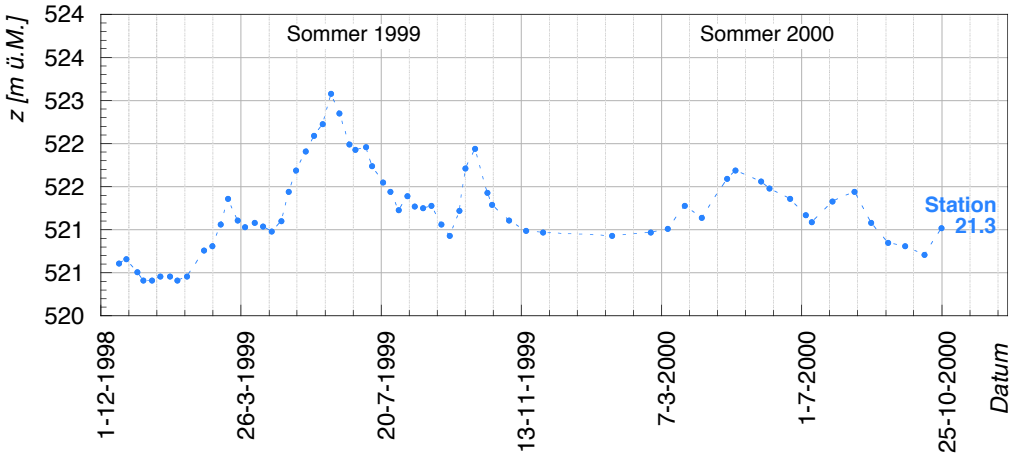


Abb. 20 *Grundwasser-Messstation 21.3 mit den zwischen dem 16.12.98 und dem 25.10.00 erfassten Grundwasserpegeln. Kein Höhenanschluss, nur ungefährer Anschluss an Messstation 21D.*

2.2 Teststrecken

2.2.1 Auswahl

Für detaillierte Systemanalyse des Alpenrheins wurden in Absprache mit den Auftraggebern 4 Teststrecken ausgewählt. Die Teststrecken wurden so ausgewählt, dass Rückschlüsse auf den ganzen Alpenrhein und auch Aussagen bezüglich zukünftiger Aufweitungen möglich

sind. In Tabelle 2 sind die Teststrecken mit der Morphologie und den massgebenden Auswahl-Kriterien zusammengestellt (Lage Teststrecken vgl. Pläne 1.1 und 1.2).

Nr.	Name / Lage	Morphologie	Auswahl-Kriterien
1	Mastrilser Rheinauen km 19.8 - km 23.7	Verzweigt	Natürlichster Abschnitt Repräsentativ für zukünftige Aufweitungen
2	Bad Ragaz km 25.0 - km 27.8	Schrägbänke	Stark ausgeprägte Schnellen, sehr grobe Sohle, Erosionsstrecke Repräsentativ für Abschnitt Landquart - Ellhorn
3	Buchs / Schaan km 49.6 - 52.0	Alternierende Bänke	Charakteristische Abfolge von Bänken, welche die Strömung in Furten, Schnellen und Rinnen gliedern (wie bei Bad Ragaz, aber mit weniger ausgeprägten Schnellen), Auflandungsstrecke Repräsentativ für Abschnitt Ellhorn - Ill
4	Mäder / Diepoldsau km 73.0 - 78.0	Ebene Sohle	Monotone Morphologie, fehlende Strukturen Repräsentativ für Internationale Rheinstrecke

Tabelle 2 Bezeichnung und Lage der Teststrecken mit Morphologie und Auswahl-Kriterien.

2.2.2 Morphologie

In den Plänen 2.1 - 2.3 sind Luftbilder der Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs dargestellt. Von der Teststrecke Diepoldsau wurde wegen fehlender Strukturen (ebene Sohle, vollständig benetzt) kein Luftbild erstellt.

Der Heli-Flug für die Luftbildaufnahmen wurde am Morgen des 7. März 2000 durchgeführt. Der Rheinabfluss bei Domat Ems betrug ca. 50 m^3/s (leicht erhöhter Sunk) und bei Diepoldsau ca. 95 m^3/s (Sunk). Anschliessend wurden die Bilder auf einem Übersichtsplan 1 : 5'000 entzerrt und zusammengesetzt[5].

Die Morphologie der Teststrecken wurde anhand der Luftbilder, der Querprofile, der Strömungsverhältnisse (vgl. Kapitel 2.5.3) sowie von Feldbeobachtungen bezüglich folgender Strukturen ausgewertet (vgl. Pläne 2.1 - 2.3):

[5] Bei der Entzerrung wurde auf eine möglichst massstabsgetreue Abbildung des Gewässerbereichs geachtet.

Aquatischer Bereich:

Rinne	Hauptstromrinne mit grosser Abflusstiefe und kleiner bis mittlerer Fliessgeschwindigkeit
Furt	Beschleunigungsstrecke zwischen Rinne und Schnelle mit kleiner Abflusstiefe und kleinem Sohlengefälle
Schnelle (Riffle)	Schnellfliessender Abschnitt mit hohem Sohlengefälle
Kolk (Pool)	Lokale Sohlenvertiefung im Anschluss an Schnelle oder beim Zusammenfluss zweier Teilgerinne. Grosse Abflusstiefe und kleine bis mittlere Fliessgeschwindigkeit
Ufer und Flachwasser	Randbereiche des benetzten Querschnitts mit kleiner Abflusstiefe, Fliessgeschwindigkeit variabel
Hinterwasser	An das Hauptgewässer angeschlossene Ruhigwasserzonen
Altarm	Vom Hauptgewässer abgetrennte Wasserflächen
Geschiebezungen	Frische Geschiebeablagerungen (soweit sichtbar)

Terrestrischer Bereich:

Schotter, Kies	Schotter- und Kiesbänke
Feinsediment deckend	Feinsedimente (Sand, Silt, Ton), die das darunterliegende Sohlenmaterial vollständig überdecken
Feinsedimente partiell	Feinsedimente (Sand, Silt, Ton), die das darunterliegende Sohlenmaterial teilweise überdecken
Pioniervegetation	
Büsche / Bäume	
Totholz	

Die Flächen der verschiedenen Strukturen wurden planimetriert und für die Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs separat ausgewertet. In Abbildung 21 sind die prozentualen Anteile aller erfassten Strukturen dargestellt. Abbildung 22 zeigt die prozentualen Anteile der Strukturen des aquatischen und Abbildung 23 diejenigen des terrestrischen Bereichs.

Von allen drei Teststrecken zeigt Mastrils die ausgeglichendste Verteilung der erfassten Strukturen (Abb. 21). Bei Bad Ragaz und Buchs fehlen bewachsene Strukturen im terrestrischen Bereich und Altarme sind praktisch nur bei Mastrils zu finden.

Bei Mastrils sind 6140 m^2/km, bei Bad Ragaz 6220 m^2/km und bei Buchs 7490 m^2/km benetzt. Die leicht grössere Fläche bei Buchs dürfte im wesentlichen auf das kleinere Gefälle

und (v.a. gegenüber Mastrils) auf den etwas höheren Abfluss zurückzuführen sein. Bei Mastrils wirkt sich die grössere Breite des Flussraums praktisch ausschliesslich auf den terrestrischen Bereich aus (dies gilt nicht im Sommerhalbjahr).

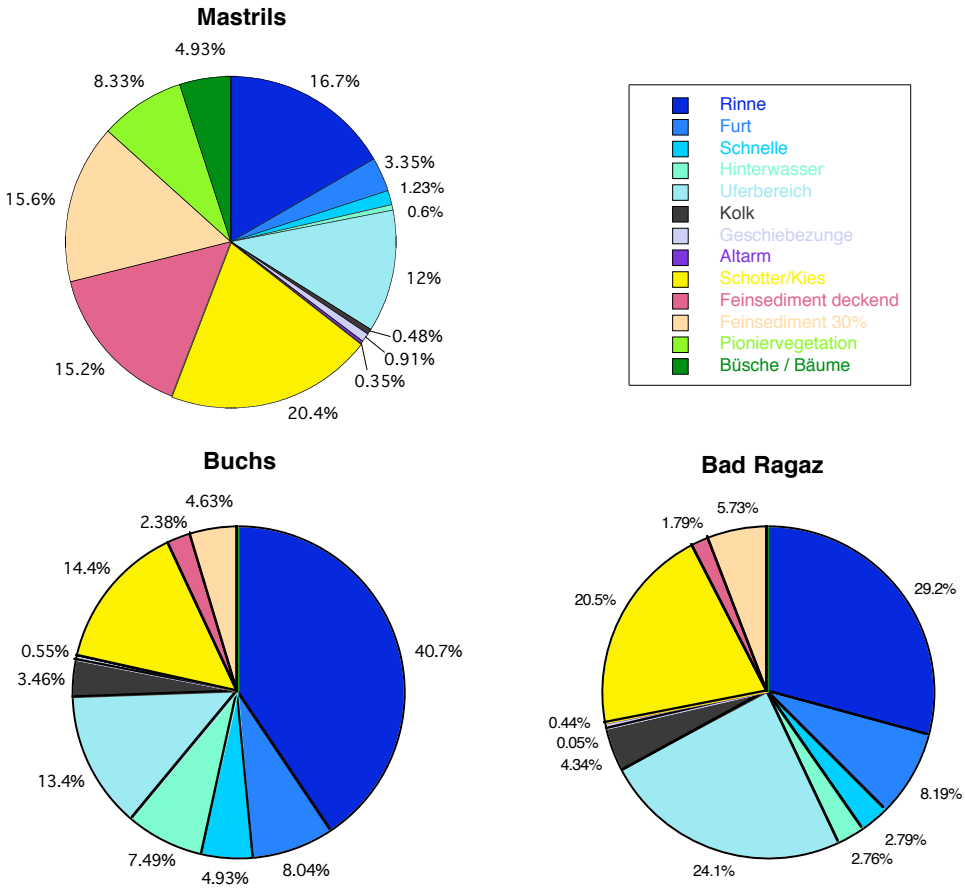


Abb. 21 *Prozentuale Flächenanteile aller erfassten Strukturen in den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs (ohne Totholz).*

Im aquatischen Bereich zeigen alle drei Teststrecken eine ähnliche Verteilung der Strukturen (Abb. 22). Bei Matrils und Bad Ragaz sind deutlich mehr Flachwasserzonen (Uferbereiche) zu finden als bei Buchs, wo Rinnen und Hinterwasser dominieren.

Im terrestrischen Bereich ist bei Mastrils ein wesentlich grösserer Anteil mit Feinsedimenten bedeckt als bei Bad Ragaz und Buchs (Abb. 23). Dies deutet auf eine grössere Speicherkapazität des Flussbetts bezüglich Feinsedimenten hin.

Neben dieser rein statistischen Auswertung sind bei den verschiedenen aquatischen Strukturen zum Teil grössere **qualitative Unterschiede** festzustellen. In Tabelle 3 sind die charakteristischen Eigenschaften einzelner Strukturen und damit die Unterschiede zwischen den Teststrecken zusammengestellt.

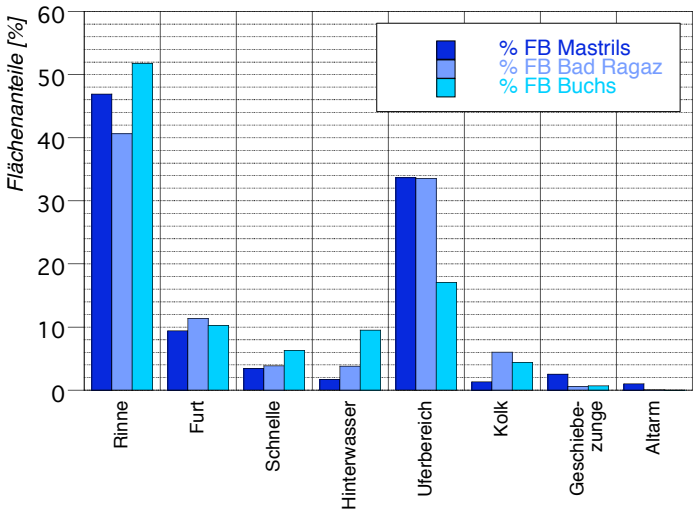


Abbildung 22

Flächenanteile der morphologischen Strukturen im aquatischen Bereich für die Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs (ohne Totholz).

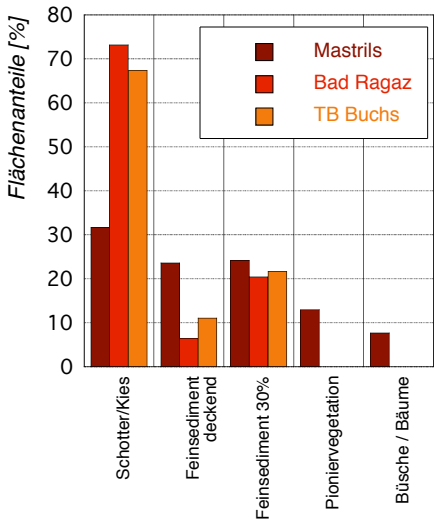


Abbildung 23

Flächenanteile der erfassten Strukturen im terrestrischen Bereich für die Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs (ohne Totholz).

Zusammenfassend fällt folgendes auf:

Die verzweigte Fliessstrecke **Mastrils** zeichnet sich generell durch eine grosse Variation der einzelnen Strukturen auf, sodass eine Zuordnung nicht immer ganz eindeutig ist. Beispielsweise sind Rinnen mit starker Strömung zu finden. Zudem sind die Übergänge zwischen nachfolgenden Strukturen fliessend. Extreme Formen wie bei Bad Ragaz sind kaum zu finden. Flachwasser sind häufig gut überströmt, die Kolke nicht so tief und Hinterwasser von unten her angeschlossen.

Bei **Bad Ragaz** dominieren zwei Schnellenarten, die sich abwechselnd wiederholen. Dabei fallen insbesondere die querliegenden absturzartigen Schnellen mit den anschliessenden, stark durchströmten tiefen Kolken auf. Die Hinterwasser sind oben an die Furt angeschlossen, ansonsten bestehen nur wenig Flachwasserzonen. Die Variation der einzelnen Strukturelemente ist als sehr gering zu bezeichnen.

Die Teststrecke **Buchs** zeichnet sich aus durch breite, vergleichsweise kurze Kiesbänke mit durchschnittlich ausgeprägten Schnellen und breiten Rinnen. Die einzelnen Strukturelemente wiederholen sich jedes zweite Mal (wie bei Bad Ragaz), was zu einer Monotonie der

einzelnen Strukturelemente führt. Hinterwasser können von unten oder oben an die Strömung angeschlossen sein, ansonsten bestehen nur wenig Flachwasserzonen. Auffallend ist zudem der hohe Anteil an verbauter Uferlinie.

In der Internationalen Rheinstrecke (Teststrecke Diepoldsau) sind keine morphologischen Strukturen vorhanden. Die gleichmässige, über die gesamte Gerinnebreite verteilte Strömung entspricht am ehesten einer Furt. Längsstreifen (sauberes Geschiebe, Substrat mit leichtem Bewuchs) deuten auf eine regelmässige Mobilisierung von Geschiebe hin.

Struktur	Mastrils	Bad Ragaz	Buchs
Rinne	Grosse Variation, neben tiefen Bereichen auch schnell strömende Rinnen	Schmale tiefe bis mittelbreite Becken mit eher schwacher Strömung	Schmale tiefe bis eher breite Becken mit mittlerer Strömung.
Furt	Häufig bei Gerinneverzweigungen, Breite stark variabel	Mit ansteigendem Abfluss extrem breit werdend, Abflusstiefe klein	Sowohl grössere Breite mit kleiner Abflusstiefe (wie Bad Ragaz, aber abgeschwächt) als auch eher schmal mit vergleichsweise grosser Abflusstiefe.
Schnelle	Von reiner Wellenbildung bei sehr engen Profilen bis zu langgezogenen Schnellen. Steil abfallende Schnellen sind selten. Strömung mehrheitlich in Hauptfliessrichtung	Jede zweite Schnelle gleicht einer langgezogenen Abbruchkante. Das Sohlengefälle konzentriert sich fast ausschliesslich auf die Schnellen. Strömung fast senkrecht zur Hauptfliessrichtung.	Abwechselnd entweder als deutliche Schnelle ausgebildet (breit mit Abflussaufteilung) oder nur als Beschleunigungsstrecke erkennbar.
Kolk	Tiefe Kolke konzentrieren sich auf felsige oder verbaute Uferabschnitte, sonst eher schwach ausgebildet	Unmittelbar flussabwärts der Schnellen entlang der Uferverbauung. Tief, schmal, langgezogen und mit starker Strömung.	Wie Bad Ragaz, leicht abgeschwächt.
Flachwasser	Häufig gut überströmt mit auffallend hoher Fliessgeschwindigkeit	Die Flachwasser befinden sich im oberen Bereich der Schrägbänke. Meist kleine Fliessgeschwindigkeit bis stehendes Wasser (in Hinterwasser übergehend)	Mehrheitlich im oberen Bereich der Bänke, nur schwach überströmt oder stehendes Wasser.
Hinterwasser	Meistens vom Unterwasser her angeschlossen	Vom Oberwasser her angeschlossen	Vom Ober- und vom Unterwasser her angeschlossen
Wellenlänge (Rinne - Schnelle - Rinne)	Sehr variabel	1450 m	900 m
Uferlinie	Etwa 10 % entlang Blockwurf	Etwa 50 % entlang Blockwurf	Etwa 70 % entlang Blockwurf

Tabelle 3 Variation und Qualität der massgebenden morphologischen Strukturen im benetzten Bereich. Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs.

2.2.3 Strömungsverhältnisse

Für die Untersuchung der Strömungsverhältnisse wurden in den Teststrecken Staukurvenberechnungen für typische Sunk- und Schwallabflüsse durchgeführt. Die vom Kt. Graubünden und der Rheinbauleitung zur Verfügung gestellten Querprofile stammen aus den Jahren 1996 (Mastrils), 1999 (Bad Ragaz), 1997 (Buchs und Diepoldsau). Bei Bad Ragaz stimmen die Profile mit der Morphologie des Luftbildes (Plan 2.2) ziemlich exakt überein. Bei den Teststrecken Mastrils und Buchs hat sich die Morphologie seit den letzten Profilaufnahmen wesentlich verändert, sodass die berechneten Strömungsverhältnisse nicht auf die Situation der Luftbilder übertragbar sind.

Mit den Querprofilen, die alle 200 m vermessen werden, wird die Morphologie an einer zufälligen Stelle aufgenommen (kein charakteristisches Schnellen- oder Rinnenprofil). Zudem ist der Profilabstand zu gross, als dass damit die zum Teil kleinräumigen Gefällsänderungen im Detail erfasst werden. Bei der Modellierung wurde versucht, durch die Interpolation zusätzlicher Profile, die Morphologie naturgetreuer nachzubilden. Dennoch stellen die Berechnungen, insbesondere bei den Furten und Schnellen, eine grobe Annäherung an die effektiven Verhältnisse dar. Bei Mastrils wurde bei der Abflussaufteilung in mehrere Teilgerinne ein Einzelgerinne gebildet. Die berechneten Strömungsverhältnisse repräsentieren hier Durchschnittswerte aller Teilgerinne zusammen.

In den Abbildungen 24 - 27 sind die Längenprofile mit dem Verlauf der Sohle und den Wasserspiegellagen (Abb. 24), den Abflusstiefen (Abb. 25), den mittleren Fliessgeschwindigkeiten (Abb. 26) sowie den benetzten Breiten (Abb. 27) für die 4 Teststrecken dargestellt. In Anhang 1 sind die vermessenen Querprofile mit den Wasserspiegellagen für zwei berechnete Abflüsse dargestellt.

Die Längenprofile gemäss Abbildung 24 zeigen den Verlauf des Talwegs, der mittleren Sohle sowie die berechneten Wasserspiegellagen. Der Vergleich der vier Teststrecken zeigt im wesentlichen Folgendes:

- Das Längenprofil von Mastrils zeigt einen sehr unregelmässigen Verlauf des Talwegs. Bei Bad Ragaz und Buchs fallen die regelmässige Abfolge von Schnellen und Rinnen auf. Demgegenüber zeigt Diepoldsau ein Längenprofil mit praktisch einheitlichem Sohlengefälle und die mittlere Sohle praktisch identisch mit dem Talweg.
- Bei Mastrils liegen die berechneten Wasserspiegel praktisch durchgehend tiefer als die mittlere Sohle, was mit den ausgedehnten, teils bewachsenen Kiesbänken zusammenhängt. (vgl. Querprofile Anhang 1). Bei Bad Ragaz und Buchs liegt der Wasserspiegel bei Schwall über der mittleren Sohle und die Kiesbänke werden teilweise oder ganz überströmt ($Q = 140\ m^3/s$, Anhang 1).

- Von allen Teststrecken zeigt Bad Ragaz den unregelmässigsten Verlauf des Wasserspiegels (extreme Rinnen-Schnellen Abfolgen). Mit zunehmendem Abfluss gleicht sich der Verlauf des Wasserspiegels aus.

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen den Verlauf der Abflusstiefe und der mittleren Fliessgeschwindigkeit. In der Regel korrespondiert mit einer kleinen Abflusstiefe eine hohe Fliessgeschwindigkeit (Schnelle) und umgekehrt (Rinne). Mit ansteigendem Abfluss gleicht sich die Fliessgeschwindigkeit im Längenprofil (Schnellen und Rinnen) zunehmend aus. Die Abflusstiefe steigt bei den (ohnehin tiefen) Rinnen tendenziell stärker an als bei den untiefen Furten und den steilen Schnellen, wodurch die morphologisch bedingten Unterschiede noch akzentuiert werden.

Bei Fliessgeschwindigkeiten < 0.5 m/s (Abb. 26) können Schwebstoffe abgelagert werden, resp. bei höheren Fliessgeschwindigkeiten ist die Gewässersohle frei von Feinsedimentablagerungen (wichtige Kenngrösse der äusseren Kolmation, vgl. Kap. 4.1).

Die Teststrecken zeigen die folgenden Merkmale:

- Bei Mastrils schwankt die Abflusstiefe bei Niederwasserabfluss zwischen 0.6 m und 3 m und die mittlere Fliessgeschwindigkeit zwischen 0.5 m/s und 1.7 m/s. Bei einem durchschnittlichen Schwallabfluss von 140 m^3/s erhöht sich die Abflusstiefe auf 1.4 - 4.4 m und die mittlere Fliessgeschwindigkeit zwischen 1.3 - 2.2 m/s. Die Strömungsverhältnisse sind als sehr variabel zu bezeichnen, ohne dass Extremwerte erreicht werden.
- Bei Bad Ragaz sind extreme Unterschiede zwischen Rinnen und Schnellen festzustellen. Bei Niederwasserabfluss beträgt die Abflusstiefe in den Rinnen etwa 2 m und die Fliessgeschwindigkeit weniger als 0.5 m/s. Demgegenüber variiert in den Schnellen die Abflusstiefe von 0.2 - 0.8 m bei einer mittleren Fliessgeschwindigkeit um 2 m/s. Bei ansteigendem Abfluss erhöht sich die Strömung in den Rinnen und bei einem Abfluss von 200 m^3/s (ausgeprägte Schwallspitze) ist die Fliessgeschwindigkeit über das ganze Längenprofil ziemlich ausgeglichen mit Werten um 2 m/s.
- Bei Buchs wird die Morphologie im oberen Teil der Teststrecke durch die Blockschwelle (km 49.5) beeinflusst. Flussabwärts von km 50.5 haben sich die alternierenden Bänke voll entwickelt. Sowohl Abflusstiefe als auch mittlere Fliessgeschwindigkeit zeigen einen mit Bad Ragaz ähnlichen Verlauf, wobei die Schwankungsbreite der Strömungsparameter kleiner ist. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit liegt in den Rinnen auch bei Niederwasser um 0.5 m/s und in den Schnellen erreicht die Abflusstiefe 0.5 m oder mehr.
- Bei Diepoldsau führt das prismatische Gerinne mit ebener Sohle mit zunehmendem Abfluss zu einem parallelen Anstieg der Längenprofile (h und vm). Im untersuchten Abflussbereich (50 - 300 m^3/s) nimmt die Abflusstiefe von 1.0 m auf 3.8 m zu bei gleichzeitigem Anstieg der Fliessgeschwindigkeit von 0.9 m/s auf 2.0 m/s.

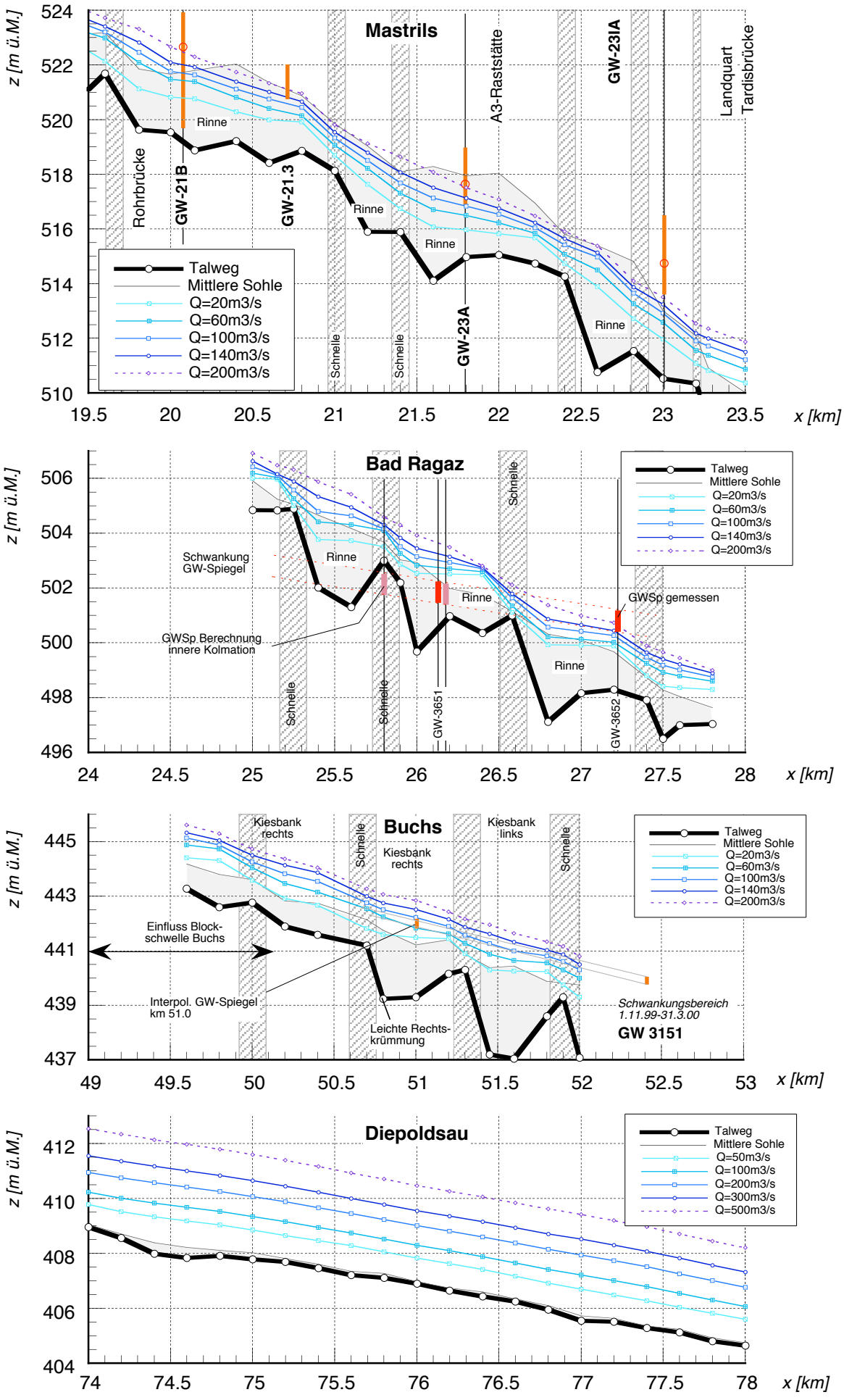


Abbildung 24 *Längenprofile mit Talweg und Wasserspiegellagen verschiedener Abflüsse. Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz, Buchs und Diepoldsau. Die orangen Linien bezeichnen den erfassten Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels bei den Messstellen.*

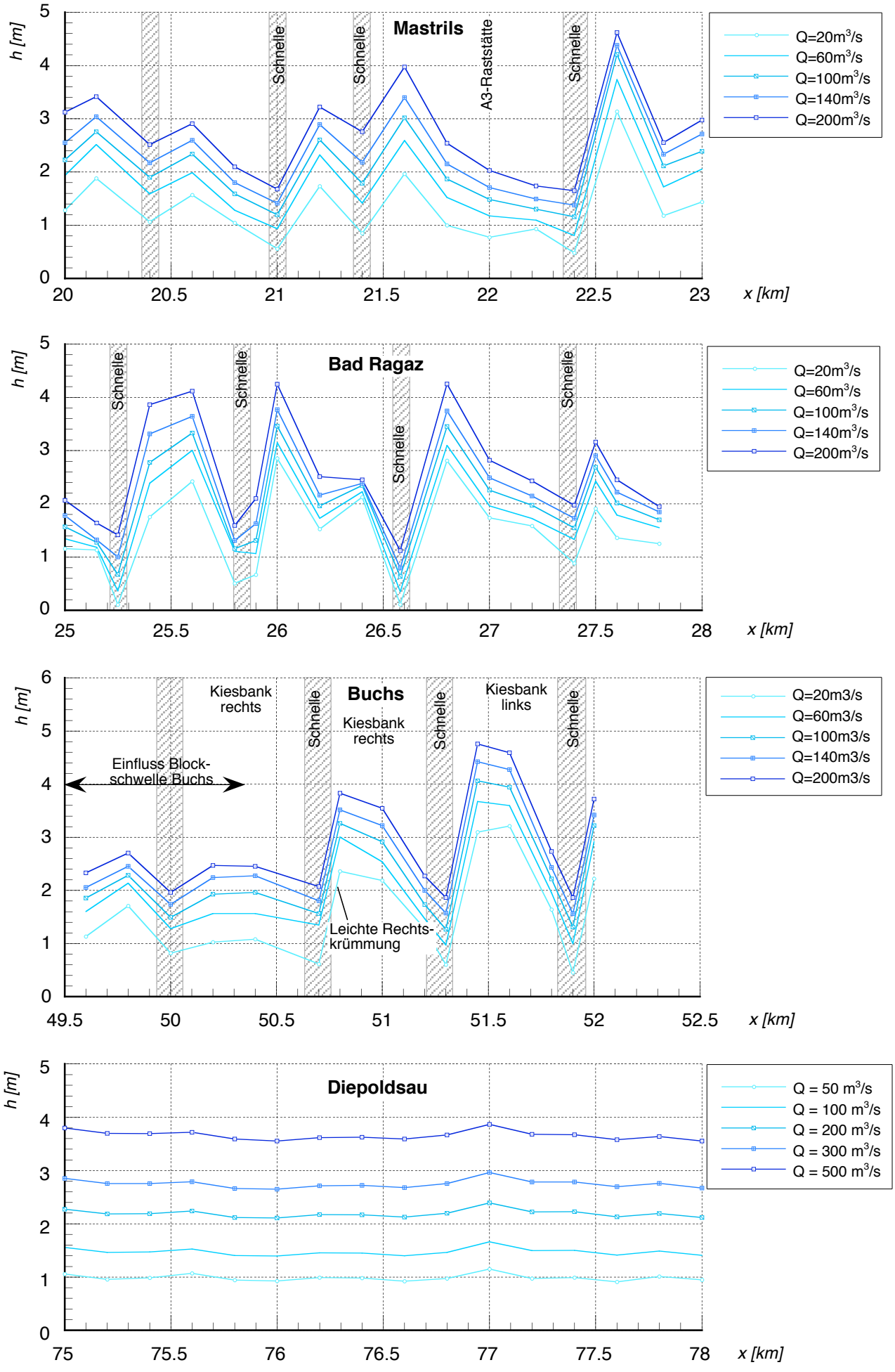


Abbildung 25 *Längenprofile der Abflusstiefe für Abflüsse von 20, 60, 100, 140 und 200 m^3/s (Mastrils, Bad Ragaz, Buchs), resp. 50, 100, 200, 300 und 500 m^3/s (Diepoldsau).*

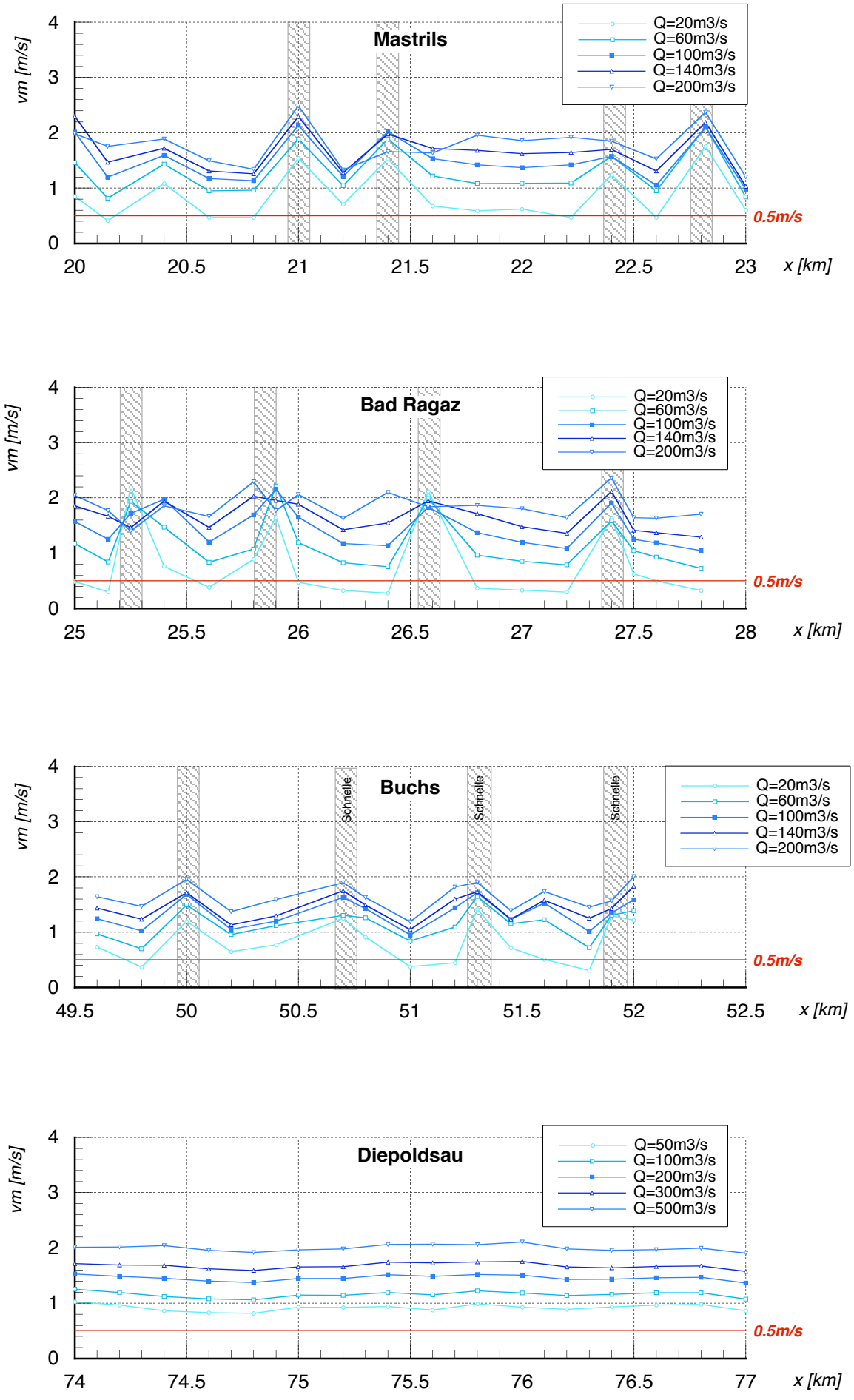


Abbildung 26 *Längenprofile der mittleren Fliessgeschwindigkeit für fünf verschiedene Abflüsse. Die Fliessgeschwindigkeit von 0.5 m/s bezeichnet die Grenzgeschwindigkeit bezüglich der Ablagerung von Sand.*

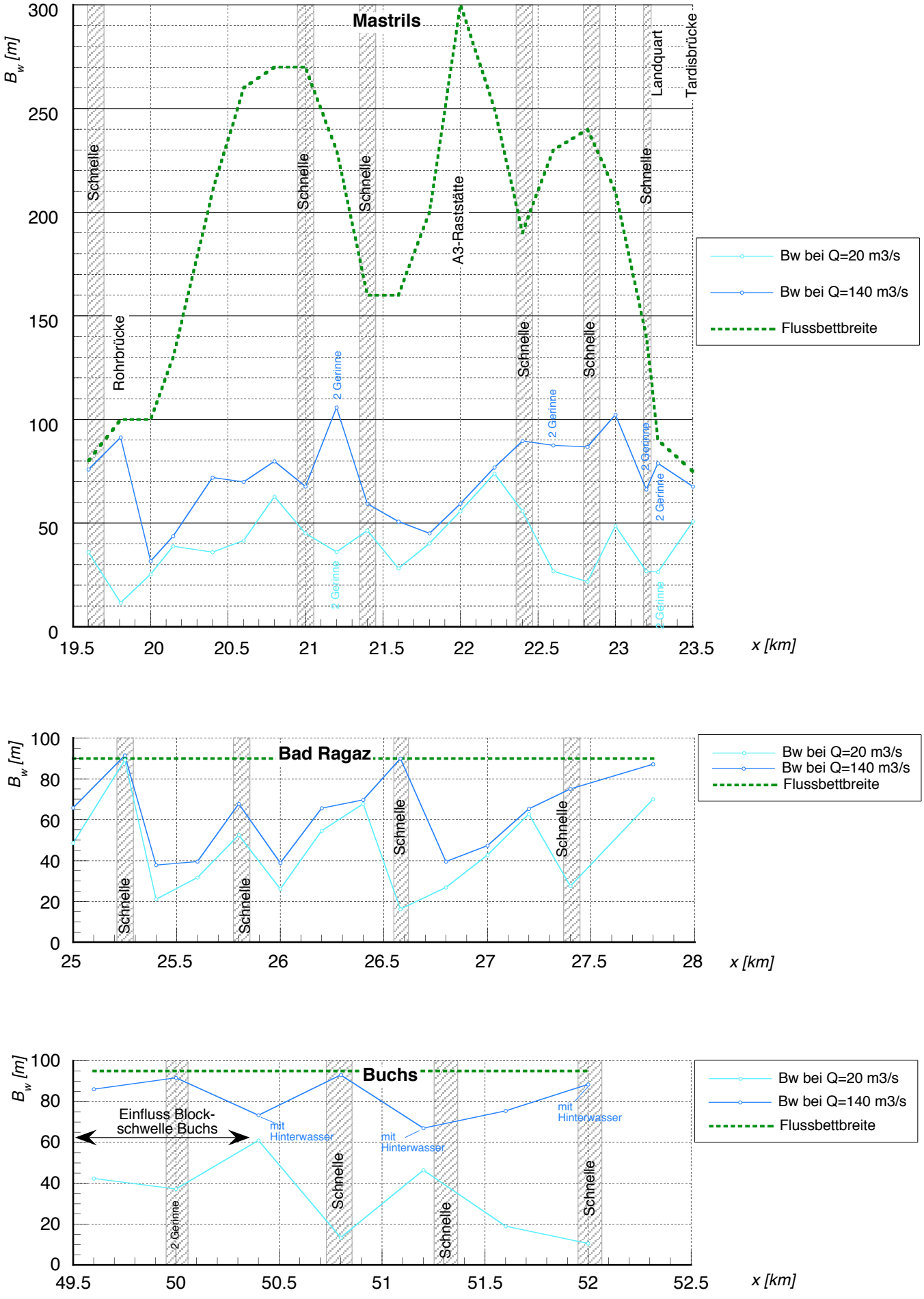


Abbildung 27 *Längenprofile der Wasserspiegelbreite (Bw) für Abflüsse von 20 und 140 m^3/s (Mastrils, Bad Ragaz, Buchs).*

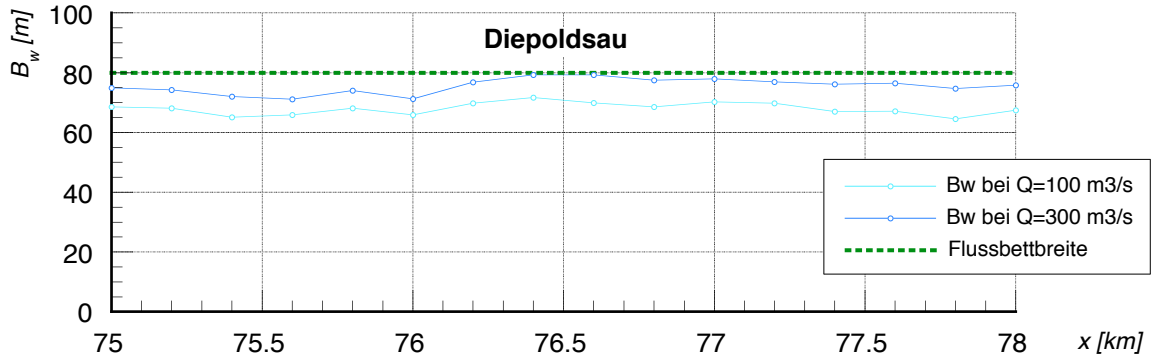


Abbildung 27 *Längenprofile der Wasserspiegelbreite (Bw) für Abflüsse von 100 und 300 m^3/s (Diepoldsau).*

Fortsetzung

Die benetzte Breite (Abstand zwischen den Uferlinien) wurde für Niederwasserabfluss und einen durchschnittlichen Schwallabfluss dargestellt (Abb. 27). Mit steigendem Abfluss nimmt die benetzte Breite vor allem im unteren Teil der Rinnen, den Furten und in den Schnellen zu. Im oberen und mittleren Teil der Rinnen sind die Böschungen der Kiesbänke oft steil und hoch, sodass diese bei den untersuchten Abflüssen noch nicht überströmt werden.

- Bei **Mastrils** schwankt die benetzte Breite bei Niederwasserabfluss zwischen 20 und 70 m und steigt bei Q=140 m^3/s auf 30 - 105 m an. Bei Niederwasser bestehen bei km 21.2 und km 23.2 je zwei Teilgerinne. Bei km 22.6 besteht bei Sunk 1 Gerinne und bei Schwallabfluss 2 Gerinne. Das Aussergewöhnliche an der Strecke Mastrils zeigt sich beispielsweise bei km 21.2 (Profil in Anhang 1 dargestellt), wo zwei Teilgerinne mit unterschiedlichen Morphologien (Rinne links und Furt/Schnelle/Flachwasser rechts) bestehen. Bei ansteigendem Abfluss nimmt die benetzte Breite in der Rinne nur wenig zu, wogegen beim zweiten Gerinne die angrenzende Kiesbank auf einer Breite von 50 m überflutet wird.
- Bei **Bad Ragaz und Buchs** ist bei ansteigendem Abfluss vor allem am oberen Ende der Kiesbänke, wo sich der Abfluss über die Kiesbank ausdehnt und damit die Schnelle verbreitert wird, eine grosse Zunahme der benetzten Breite zu beobachten. Bei Buchs ist die Zunahme der benetzten Breite generell etwas ausgeprägter als bei Bad Ragaz.
- Bei **Diepoldsau** beschränkt sich die Zunahme der benetzten Breite auf den Anstieg des Wasserspiegels beim Blockwurf.

Zusammenfassung Strömungsverhältnisse

Die Strömungsverhältnisse widerspiegeln die Morphologie in den Teststrecken. Bei Mastrils ist eine grosse Variation mit einer unregelmässigen Folge von schneller und langsamer fliessenden Abschnitten vorhanden, wobei keine Extremwerte erreicht werden.

Bei Bad Ragaz ist ein regelmässiger extremer Wechsel der Strömungsverhältnisse zu beobachten. Bei Niederwasser erscheinen die einzelnen Rinnen praktisch als unabhängige Becken, die über einen kurzen Abschnitt (Schnelle) mit Gebirgsbachcharakter miteinander verbunden sind.

Bei Buchs wird ein zu Mastrils ähnlicher Strömungsbereich abgedeckt, wobei sich das Strömungsmuster wie bei Bad Ragaz von Kiesbank zu Kiesbank wiederholt.

Bei Diepoldsau widerspiegelt sich die eintönige Morphologie in allen beschriebenen Strömungsparametern.

2.2.4 Substrat

Der Alpenrhein fliesst auf dem gesamten Lauf zwischen dem KW Reichenau und dem Bodensee in den eigenen fluvialen Ablagerungen. Die Zusammensetzung des Sohlenmaterials im Längenprofil wird durch folgende Einflussgrössen bestimmt:

- Der Kornverteilung des zugeführten Geschiebes aus den Zuflüssen.
- Dem Abrieb infolge Geschiebetransport (massgebend sind der Abriebkoeffizient, resp. die Härte des Gesteins und die Transportdistanz).
- Die Morphologie (Strömungsverhältnisse, Transportmechanismen).
- Transportmechanismen (Sortierung, Deckschichtbildung)

In den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs sowie bei Bangs/Sennwald wurden Volumenproben entnommen und durch die Bautechnische Versuchsanstalt der HTL Rankweil analysiert. Die Lage der Probenahmestellen ist in den Plänen 2.1 bis 2.3 dargestellt. Die Probe Bangs wurde aus einer Kiesbank via à vis der Mündung des Liechtensteiner Binnenkanals entnommen. Die Proben wurden bis zu einem Sieb mit Maschenweite von 0.063 mm ausgesiebt. Sie repräsentieren die Zusammensetzung des groben Sohlenmaterials unter der Deckschicht.

In Abbildung 28 sind die resultierenden Kornverteilungen dargestellt und in Tabelle 4 sind die charakteristischen Korndurchmesser zusammengestellt. Die Korndurchmesser d_{90} und d_m[6] werden für die hydraulischen und geschiebemechanischen Berechnungen (Staukurven, Geschiebetransport), d_m und d_{10} für die Kolmationsberechnungen benötigt.

Abbildung 29 zeigt das Längenprofil des Alpenrheins für die charakteristischen Korndurchmesser d_{90} und d_m von früher entnommenen Proben sowie der Berechnungen aus /2/. Die im Rahmen des vorliegenden Projekts entnommenen Volumenproben (grosse Punkte) passen gut in die dargestellte Punkteschar. Die Proben von Mastrils, Bad Ragaz und Bangs

[6] dm = massgebender Korndurchmesser (dm = Σ(di•pi), p=Gewichtsanteil, d=Durchmesser, i=Fraktion)

repräsentieren die Verfeinerung des Sohlenmaterials infolge Abrieb. Bei der Probe Buchs wurden die Fraktionen von 63 mm bis 125 mm überproportional erfasst, was zu grossen Korndurchmessern d_{90} und d_m führte (Abb. 28). Das Maximalkorn mit 128 mm passt besser in den erwarteten Trend.

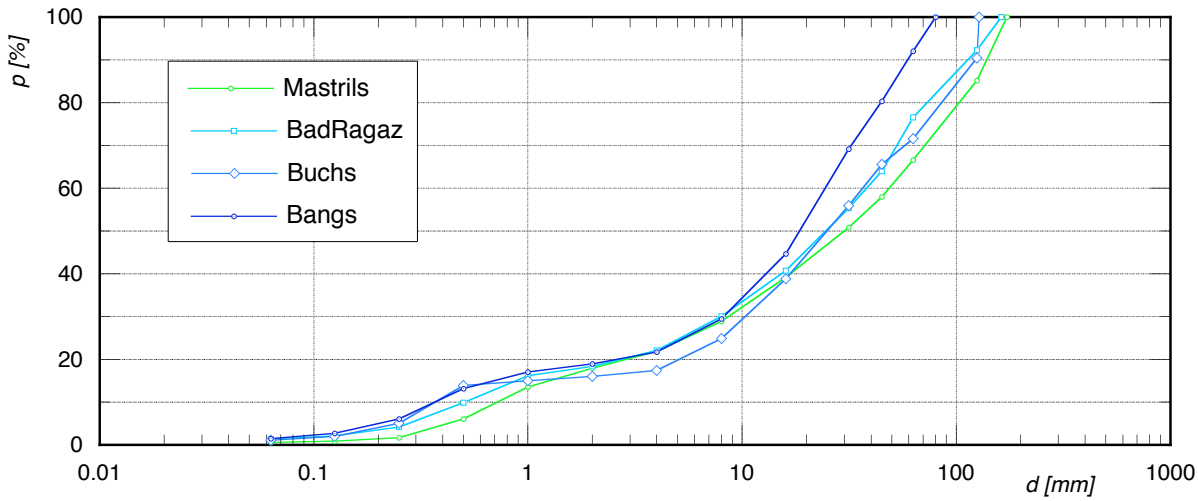


Abb. 28 *Kornverteilungskurven von Volumenproben in den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs sowie bei Bangs.*

	d_{10}	d_m	d_{90}	d_{max}
Mastrils	0.72	51.6	141	173
Bad Ragaz	0.51	41.4	116	162
Buchs	0.37	43.1	124	128
Bangs	0.36	24.5	60.1	80

Tabelle 4 *Charakteristische Korndurchmesser in [mm] der erfassten Kornverteilungen des Sohlenmaterials.*

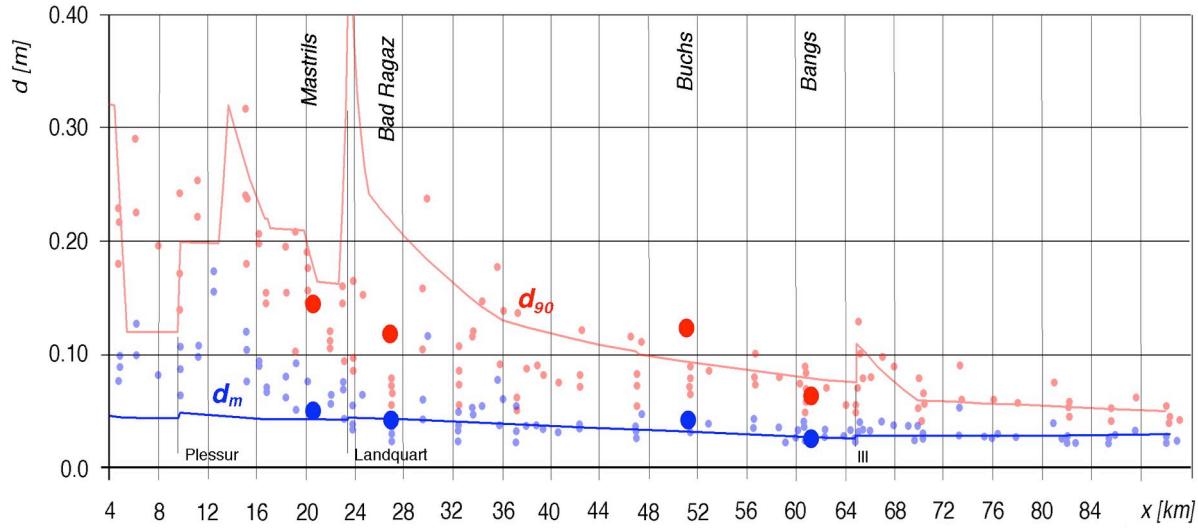


Abb. 29 *Längenprofil des Rheins mit den charakteristischen Korndurchmessern d_{90} und d_m aus /2/ (kleine Punkte) sowie der vorliegenden Untersuchungen (grosse Punkte). Die ausgezogenen Linien geben die in den Prognoseberechnungen von /2/ verwendeten Korndurchmesser an.*

2.2.5 Geschiebetrieb

Unter natürlichen Bedingungen transportierte der Alpenrhein in der Winterperiode kein oder nur äusserst selten Geschiebe. Das nival - glaziale Abflussregime ist durch einen tiefen Winterabfluss charakterisiert, der nur sehr träge auf Temperaturschwankungen und Niederschläge reagiert.

Mit zunehmendem Ausbau der Speicherkraftwerke wurden Sommerabflüsse in die Winterperiode verlagert und durch die konzentrierte Wasserrückgabe in Tageszeiten mit Spitzenbedarf entwickelte sich eine zunehmend stärker ausgeprägte Schwallganglinie (vgl. Abb. 12 und 13).

Im vorliegenden Kapitel wird untersucht, inwieweit bei verschiedenen Schwallganglinien Geschiebe transportiert werden kann. Die im folgenden dargestellten Resultate beziehen sich auf Geschiebe mit den massgebenden Korndurchmessern $d_{m(Mastrils)}$ = 5.2 cm, $d_{m(BadRagaz)}$ = 4.5 cm, $d_{m(Buchs)}$ = 3.3 cm, $d_{m(Diepoldsau)}$ = 2.3 cm (hergeleitet aus Abb. 29).

In Abbildung 30 sind für die vier Teststrecken die Längenprofile der Geschiebetransportkapazität für verschiedene Abflüsse dargestellt. Bei den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs zeigt sich, dass in den Schnellen Geschiebe bereits bei tiefen Abflüssen (40 m^3/s) transportiert werden kann, in den Rinnenstrecken der Geschiebetrieb jedoch erst bei den grösseren betrachteten Abflüssen (140-200 m^3/s) einsetzt.

In der Teststrecke Mäder-Diepoldsau ist die Geschiebetransportkapazität im Längenprofil sehr ausgeglichen. Bei einem Abfluss unter 100 m^3/s kann kein Geschiebe transportiert werden und bei Q=200 m^3/s ist durchgehend Geschiebetrieb möglich. Der Transport dürfte bei einem Abfluss um 150 m^3/s liegen.

Bei allen vier Teststrecken zeigt sich, dass bei den heute auftretenden Schwallspitzen Geschiebetransport möglich ist.

Zur detaillierteren Untersuchung dieser Prozesse wurden für die drei Schwallganglinien der Abbildungen 31 und 32 morphologische Simulationsberechnungen mit dem Programm MORMO durchgeführt. Die Schwallganglinien repräsentieren typische Abflussschwankungen des Winters 78/79 sowie 00/01. Bei Mastrils wurden die Abflusswerte der Messstation Domat Ems (resp. Felsberg) direkt übernommen. Bei Bad Ragaz und Buchs wurde aufgrund der Zuflüsse Landquart und Triebwasser KW Sarelli ein Abfluss von 20 m^3/s dazugezählt (Sunk und Schwall). Bei der Teststrecke Diepoldsau konnten die Abflusswerte der Messstelle Diepoldsau (Abb. 31) verwendet werden.

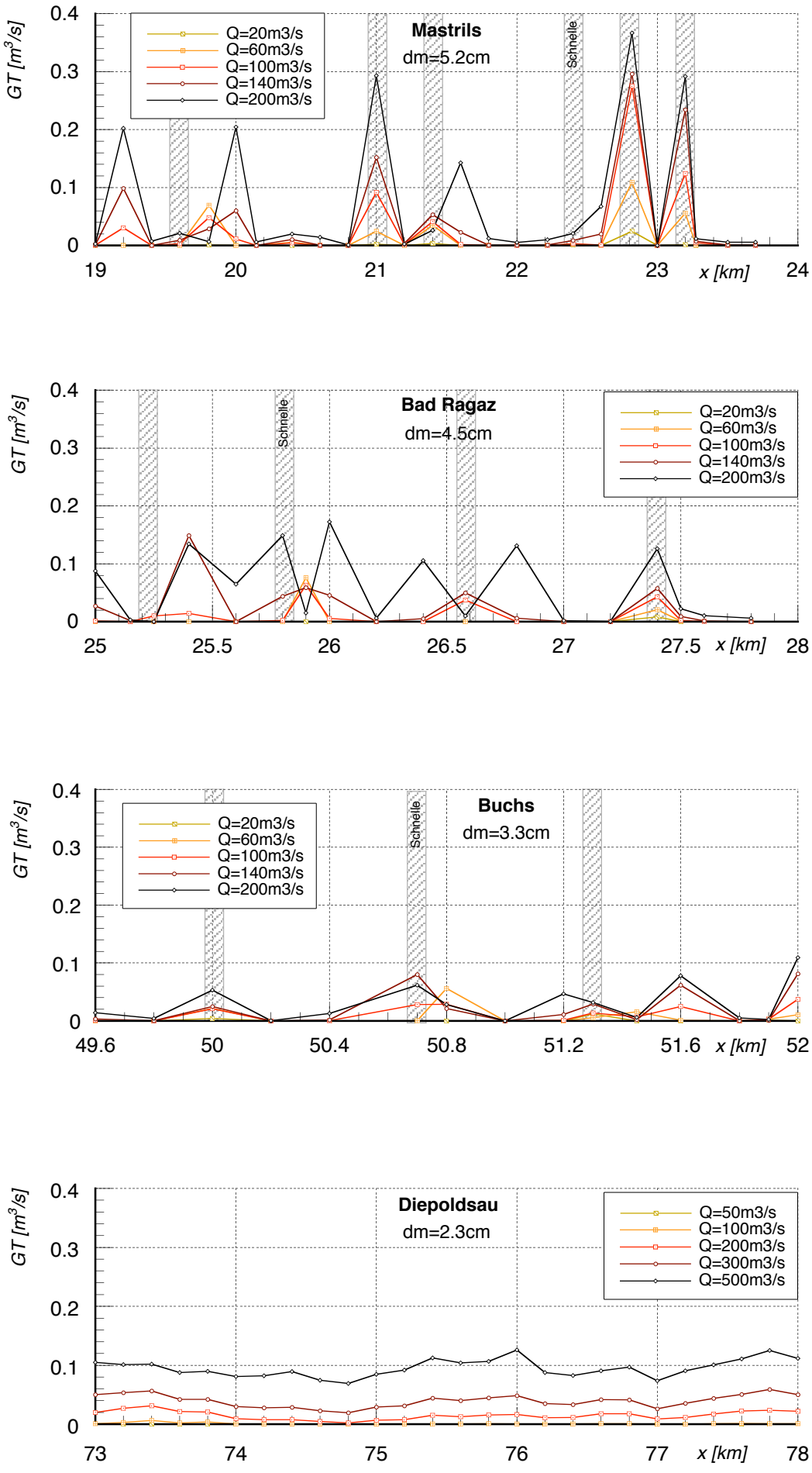


Abb. 30 *Längenprofile der Geschiebetransportkapazität in den vier Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz, Buchs und Diepoldsau.*

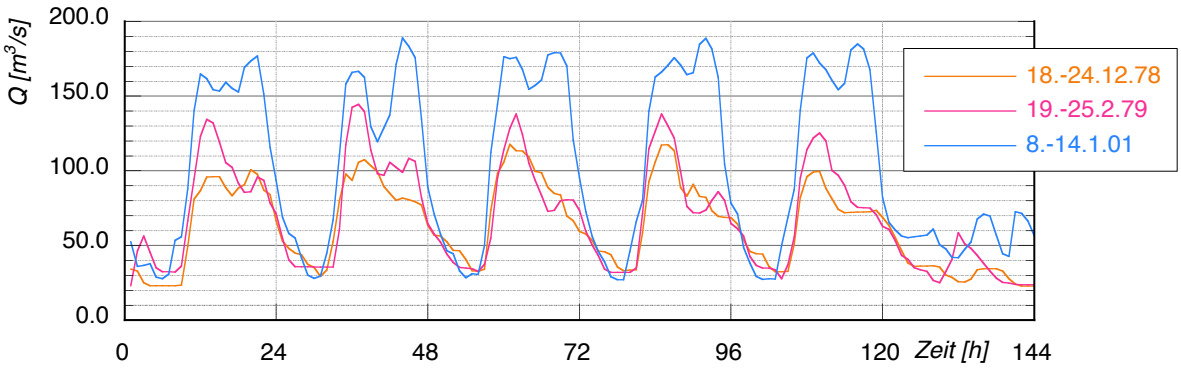


Abb. 31 *Wochenganglinien des Rheins bei Felsberg (1978 und 1979) sowie bei Domat Ems (2001). Die zwei Abflussmessstationen sind vergleichbar.*

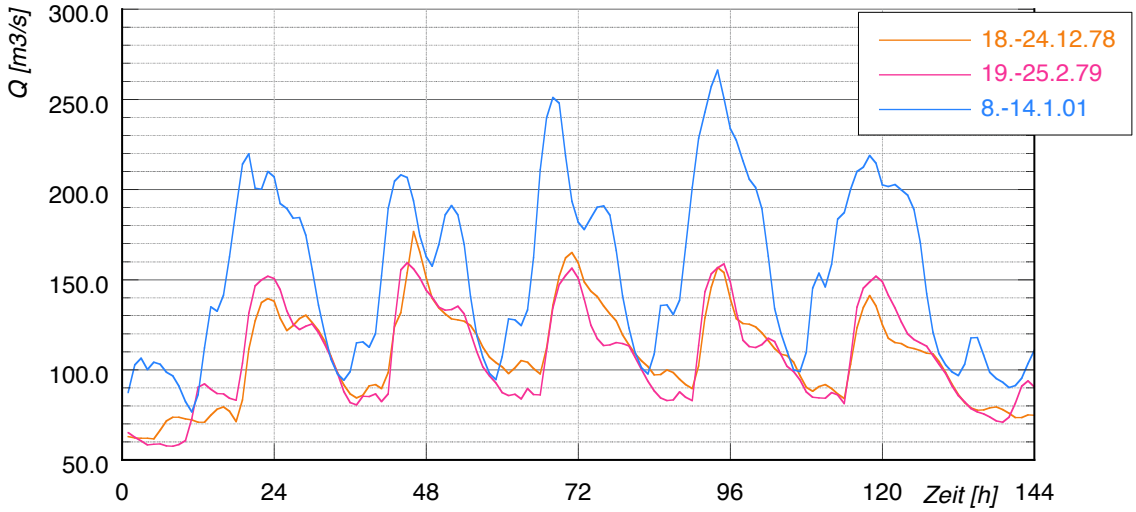


Abb. 32 *Wochenganglinien des Rheins bei Diepoldsau.*

Bei den Simulationsberechnungen wurde vom Montag (erster Tag) um 12 Uhr bis am Dienstag um 10 Uhr bei zwei Profilen je 100 m^3 Geschiebe zugeführt. Anschliessend wurde bis zum Berechnungsende (Freitag) kein Geschiebe mehr zugegeben. Mit den Berechnungen kann aufgezeigt werden, wie das Geschiebe weitertransportiert oder abgelagert wird.

Abbildung 33[7] zeigt die Berechnungsresultate der Teststrecke **Mastrils**. Bei der Ganglinie 1978 (Schwallspitze 130 m^3/s) wird das zugeführte Geschiebe innerhalb von wenigen 100 m abgelagert und kommt auch bei den nachfolgenden Schwällen nicht mehr in Bewegung. Bei der Ganglinie vom Februar 1979, die gegenüber der Ganglinie von 1978 leicht erhöhte

[7] Transportdiagramme. Die Diagramme zeigen die in jedem Profil transportierte Geschiebefracht für verschiedene Zeitpunkte (jeweils am Ende eines Werktags). Eine ansteigende Kurve bedeutet Geschiebezufuhr (oder Geschiebeaufnahme aus der Sohle), eine horizontale Kurve durchgehender Geschiebetransport und eine abfallende Kurve Geschiebeablagerung.

Schwallspitzen bis 145 m^3/s zeigt, wird das bei km 19.6 zugeführte Geschiebe ebenfalls bis km 20.4 vollständig abgelagert. Bei der unteren Zugabestelle bewegen sich die Abflussverhältnisse gerade in einem Bereich, wo ein kleiner Teil des Geschiebes weiter flussabwärts bis km 23 transportiert werden kann. Bei der Schwallganglinie vom Januar 01 (Q_{max} = 188 m^3/s) kann ein durchgehender Geschiebetransport beobachtet werden, wobei sich ein Teil des Geschiebes in den Rinnenstrecken ablagert. Am unteren Ende der Modellstrecke sind die Berechnungsresultate nicht zuverlässig (ungenaue untere Randbedingung).

In Abbildung 34 sind die Transportdiagramme der Teststrecke **Bad Ragaz** dargestellt. Das Geschiebe, das bei den Schnellen zugeführt wird, lagert sich im Kolkbereich unmittelbar flussabwärts der Schnellen wieder ab (Ganglinie 1978). In den Rinnen wird kein Geschiebe transportiert. Bei der Ganglinie 1979 kann ein kleiner Teil des Geschiebes durch die obere Rinnenstrecke transportiert werden, das heisst, dass die entsprechende Abflussspitze von 145 + 20 m^3/s = 165 m^3/s gerade im Bereich des Geschiebetransportbeginns der Rinnen liegen dürfte. Bei der Ganglinie 2001 kann das zugeführte Geschiebe, bei teilweiser Ablagerung flussab der Schnellen, durch die gesamte Teststrecke transportiert werden.

Die Resultate der Berechnungen in der Teststrecke **Buchs** (Abb. 35) sind ähnlich denjenigen von Bad Ragaz, wobei, wegen dem etwas weniger stark abgestuftem Gefälle, die Strecke ohne Geschiebetransport (Ganglinie 1978) etwas kürzer ist. Der kritische Abfluss bezüglich Durchtransport des Geschiebes liegt ebenfalls im Bereich von 165 m^3/s.

Bei der Teststrecke **Diepoldsau** (Abb. 36) wird das am oberen Ende der Teststrecke zugeführte Geschiebe nach 2 Kilometern abgelagert (Ganglinien 1978 und 79). Demgegenüber wird das bei km 76 zugeführte Geschiebe bis zum unteren Ende der Teststrecke durchtransportiert. Auffallend ist, dass das Geschiebe nicht an einem Tag, sondern dosiert (jeder Tag 5 - 10 m^3) weitertransportiert wird. Die Ablagerungen zwischen km 74 und km 75 sind auf die Sohlensenke und den leichten Gefällsknick in diesem Bereich zurückzuführen (vgl. Abb. 14). Bei der Ganglinie 2001 wird das Geschiebe durch die gesamte Strecke transportiert. Ablagerungen sind wiederum zwischen km 74 und km 75 zu beobachten.

In den vier Teststrecken liegt der kritische Abfluss Q_0, wo Geschiebe im Bereich der Hauptströmung durchtransportiert werden kann, innerhalb folgender Grenzen:

Mastrils	Q_0 = 140 - 150 m^3/s
Bad Ragaz	Q_0 = 160 - 170 m^3/s
Buchs	Q_0 = 150 - 180 m^3/s (weniger genau bestimmt als bei Bad Ragaz)
Diepoldsau	Q_0 = 150 - 200 m^3/s

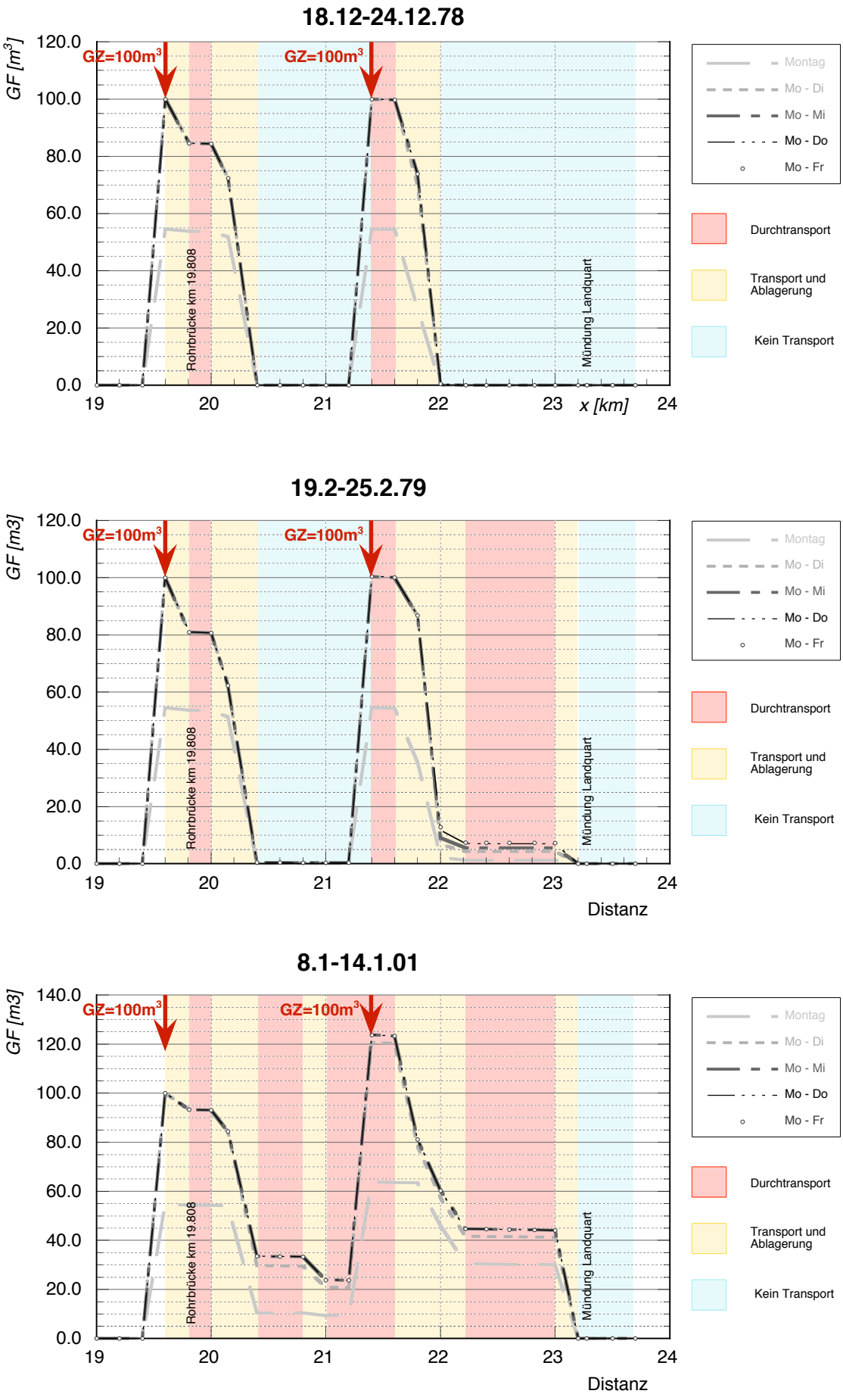


Abb. 33 *Teststrecke Mastrils (Längenprofil). Geschiebe-Transportdiagramme für drei Schwallganglinien. Die Diagramme zeigen die in verschiedenen Berechnungsperioden durch jedes Profil transportierte Geschiebefracht.*

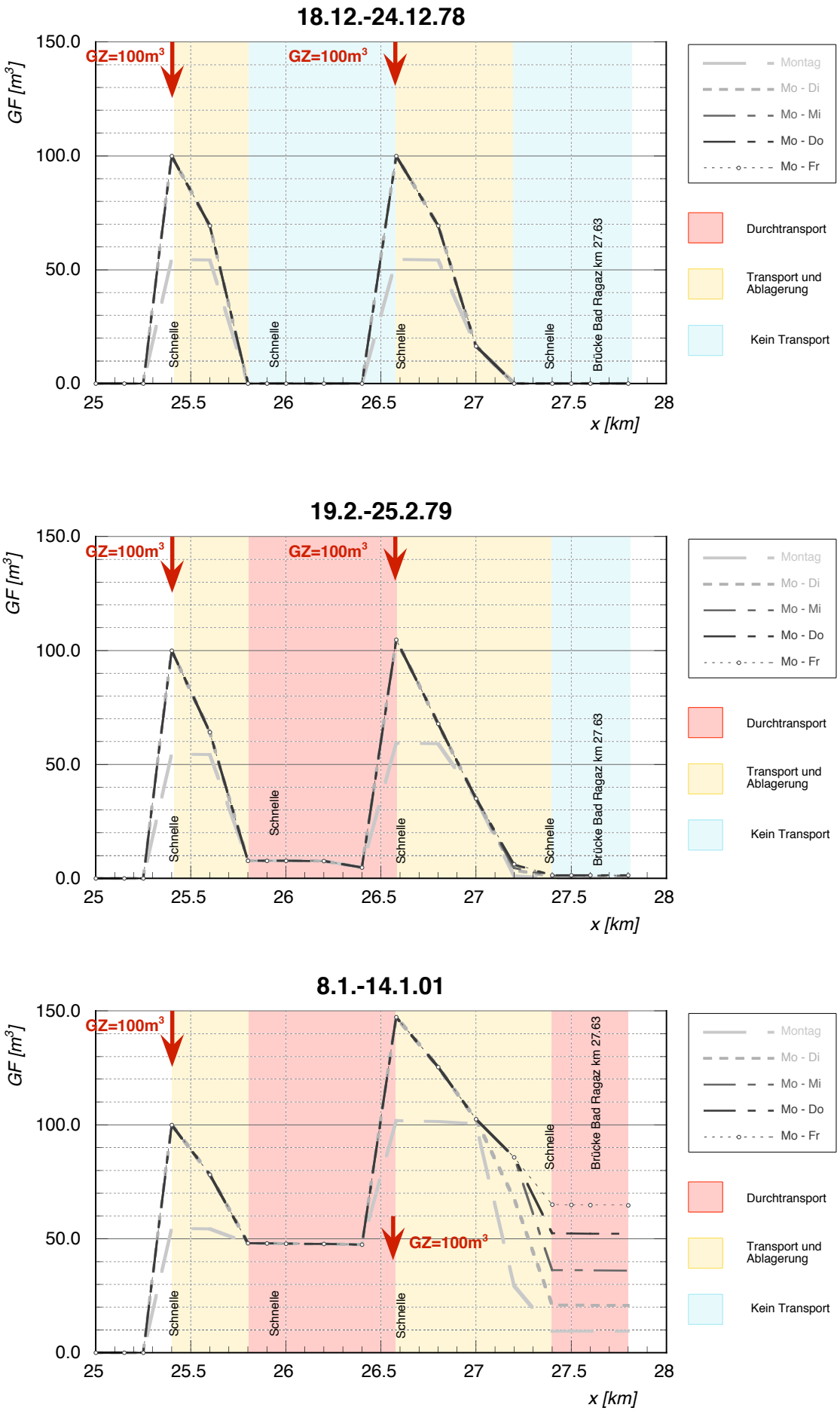


Abb. 34 *Teststrecke Bad Ragaz (Längenprofil). Geschiebe-Transportdiagramme für drei Schwallganglinien. Die Diagramme zeigen die in verschiedenen Berechnungsperioden durch jedes Profil transportierte Geschiebefracht.*

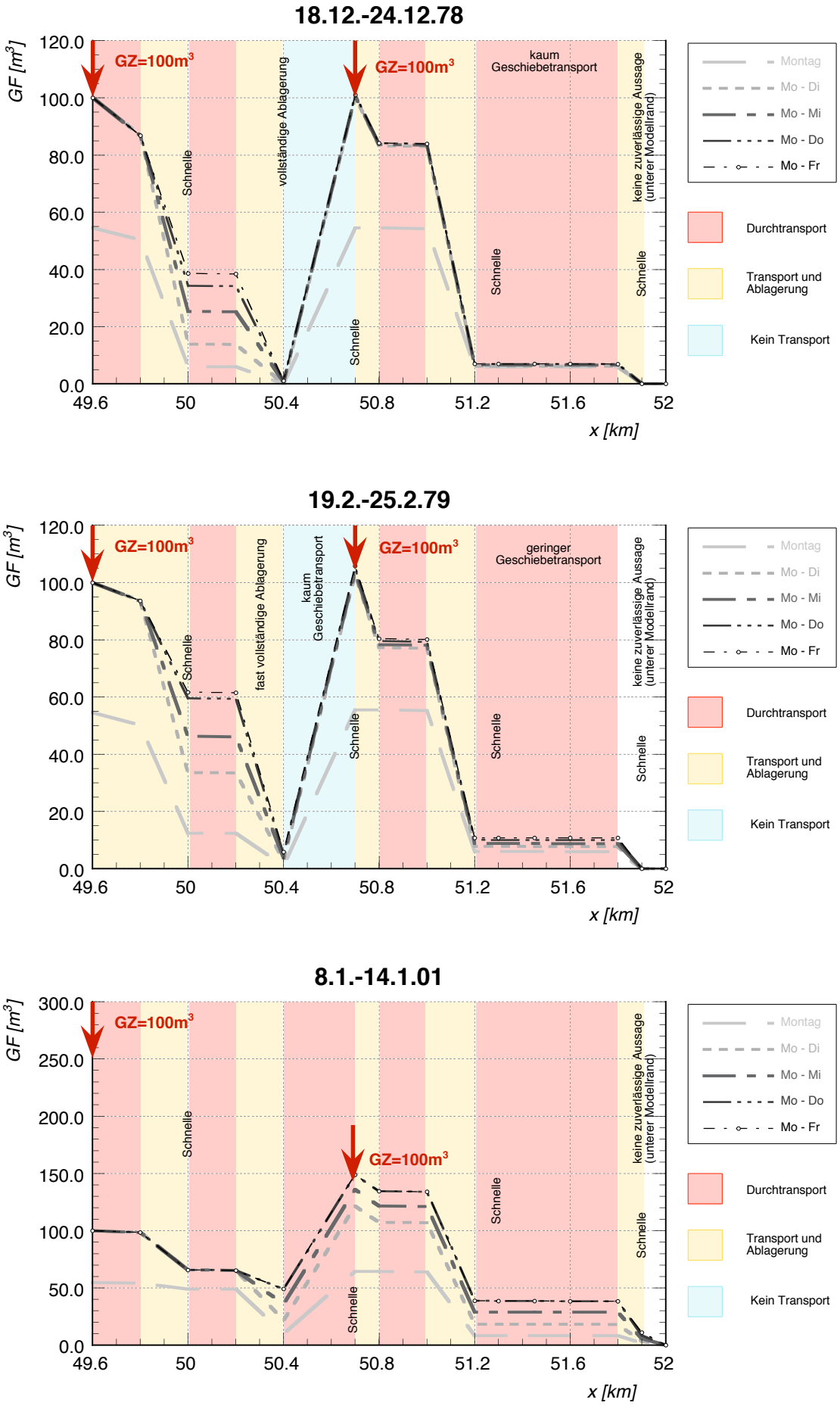


Abb. 35 *Teststrecke Buchs (Längenprofil). Geschiebe-Transportdiagramme für drei Schwallganglinien. Die Diagramme zeigen die in verschiedenen Berechnungsperioden durch jedes Profil transportierte Geschiebefracht.*

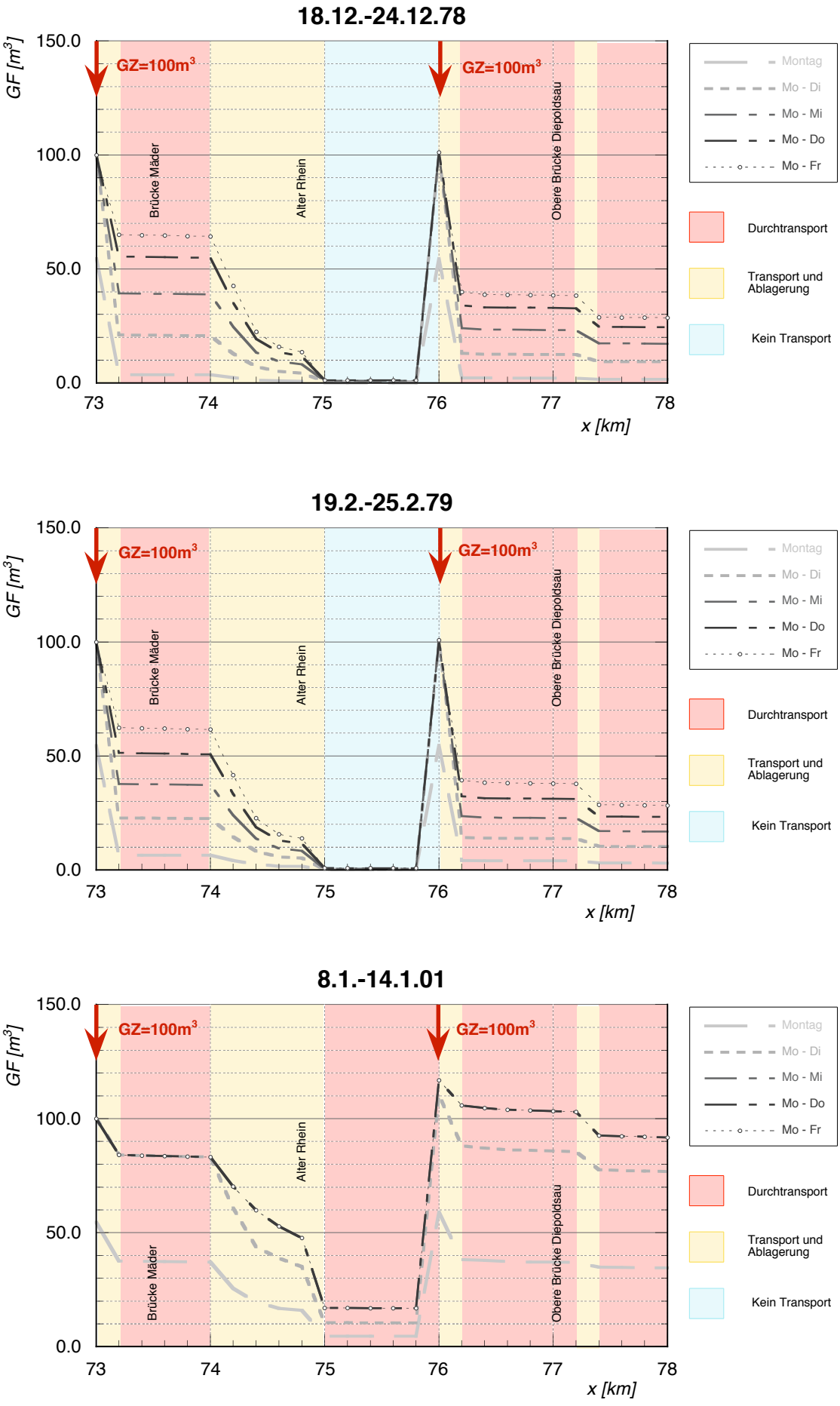


Abb. 36 Teststrecke Diepoldsau (Längenprofil). Geschiebe-Transportdiagramme für drei Schwallganglinien. Die Diagramme zeigen die in verschiedenen Berechnungsperioden durch jedes Profil transportierte Geschiebefracht.

Ob in einer Flussstrecke Geschiebe transportiert wird, hängt neben der Transportkapazität, resp. dem Auftreten von Abflüssen über dem kritischen Abfluss bezüglich Geschiebetriebbeginn, von der Verfügbarkeit von Geschiebe ab, das mobilisiert werden kann.

Ganz allgemein kann die Verfügbarkeit von Geschiebe durch die folgenden Prozesse gewährleistet werden:

1. Durch die Mobilisierung von Geschiebebänken und -ablagerungen. Massgebender Abfluss Q_0, massgebender Korndurchmesser d_m.
2. Durch das Aufreissen der Deckschicht, resp. dem Mobilisieren von Sohlenmaterial. Massgebender Abfluss Q_D, massgebender Korndurchmesser d_{90} und d_m.
3. Durch Ufererosion.
4. Durch Zufuhr aus Seitenbächen.

Beim Alpenrhein kann in der Winterperiode Geschiebe aufgrund folgender Prozesse zur Verfügung stehen:

Strecke Domat Ems - Landquart (Teststrecke Mastrils)

Durch den Stau des KW Reichenau wird kein Geschiebe transportiert. Die Seitenbäche transportieren kein Geschiebe in den Rhein[8] und Ufererosionen sind wegen Blockwurf oder Felsufern nicht möglich.

Die Verfügbarkeit von Geschiebe beschränkt sich damit auf Geschiebeablagerungen aus der vergangenen Sommerperiode oder lokale Erosionserscheinungen der Deckschicht. Feingeschiebeablagerungen, die in der Winterperiode mobilisiert werden können, sind, in beschränktem Mass, in den breiteren Flussabschnitten zu finden (Aufweitung Waffenplatz, Trimmis, Mastrils).

Dass nach den Sommerhochwassern ausgedehnte Feingeschiebeablagerungen verfügbar sein können, zeigen die Abbildungen 37.1 und 37.2.

Lokale Erosionserscheinungen sind vorallem im Bereich von Schnellen zu beobachten. Auf den Luftbildern vom 7.3.00 sind verschiedene Stellen mit relativ frischen Geschiebeablagerungen auszumachen. In Abbildung 38 sind drei Beispiele (Vergrösserungen aus Plan 2.1) dargestellt. Der fehlende Algenbewuchs weist auf Ablagerungen aus der Winterperiode hin. In der Teststrecke Mastrils sind mindestens 7 Stellen identifizierbar. Das Geschiebe stammt zum Teil aus der Erosion von flussaufwärts liegenden Schnellen, zum Teil aus den Kolkbereichen[9].

---

8 In der Plessur dürfte der Schwall für Geschiebetransport nicht ausreichend sein.

9 Die morphologischen Erscheinungsformen (Geschiebeablagerungen und Erosionsformen) auf den Abbildungen 38 und 39 können aufgrund von Beobachtungen an hydraulischen Modellversuchen erkannt werden.



Abb. 37.1 Feingeschiebeablagerungen auf grober Kiesbank. Teststrecke Mastrils flussab Rohrbrücke, Blick gegen Fliessrichtung. 18.8.99.



Abb. 37.2 Detail aus Abb. 37.1.

Die Berechnungsresultate und die Beobachtungen deuten darauf hin, dass bei Schwall regelmässig Geschiebe mobilisiert, während hohem Schwallabfluss flussab transportiert und bei abklingendem Schwall wieder abgelagert wird. Zu Beginn der Winterperiode dürften diese Prozesse stärker ausgeprägt sein als gegen Ende des Winters. Dabei wird das Geschiebe zunehmend an Stellen abgelagert, wo der Schwall zur Mobilisierung nicht mehr ausreicht. Es bildet sich eine Geschiebezunge, die in Fliessrichtung verlängert wird.

Strecke Landquart - Ill (Teststrecken Bad Ragaz und Buchs)

Die Geschiebezufuhr in diesen Abschnitt erfolgt aus der obenliegenden Rheinstrecke und wahrscheinlich aus der Landquart. In der Landquart kann Geschiebe durch die vereinzelt auftretenden Winterhochwasser transportiert werden (vgl. Abb. 15). Ob bereits der Schwall in der Landquart Geschiebe transportieren kann, wurde nicht untersucht. Die zugeführte Geschiebefracht ist verglichen mit der Sommerperiode klein, verglichen mit den natürlichen Verhältnissen der Winterperiode aber nicht vernachlässigbar.

Feingeschiebeablagerungen von Hochwasserereignissen der Sommerperiode dürften verglichen mit der Strecke Domat Ems - Mastrils, wegen der konstanten Gerinnebreite, eine kleinere Bedeutung haben (geringere Sortiereffekte). Ufererosionen sind wegen dem durchgehenden Blockwurf nicht möglich.

Aus dem Rheinbett selbst wird vor allem durch lokale Erosionen im Bereich der Schnellen Geschiebe mobilisiert. In den Abbildungen 39.1 und 39.2 sind je ein Luftbild der Teststrecken Bad Ragaz und Buchs ersichtlich, die zeigen, dass sich im Verlauf des Winters infolge Rückwärtserosion bei den Schnellen verschiedene grössere und kleinere Rinnen ausbilden.

Abb. 38.1

Teststrecke Mastrils. Geschiebezungen zwischen Profil 21.0 - 21.2 (rote Pfeile).

Massstab ca. 1 : 2500.

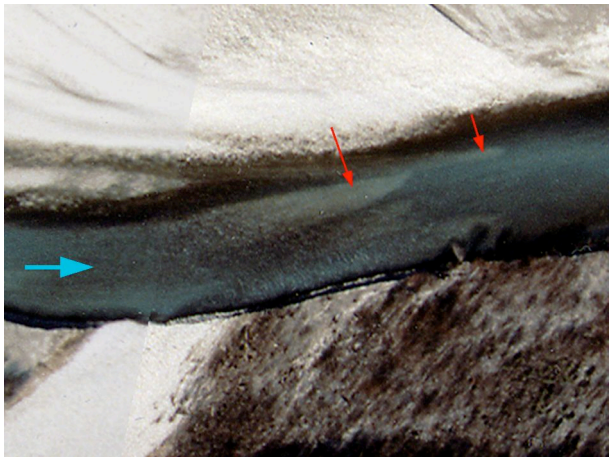


Abb. 38.2

Teststrecke Mastrils. Längsbänke bei Profil 21.6 (rote Pfeile).

Massstab ca. 1 : 2500.

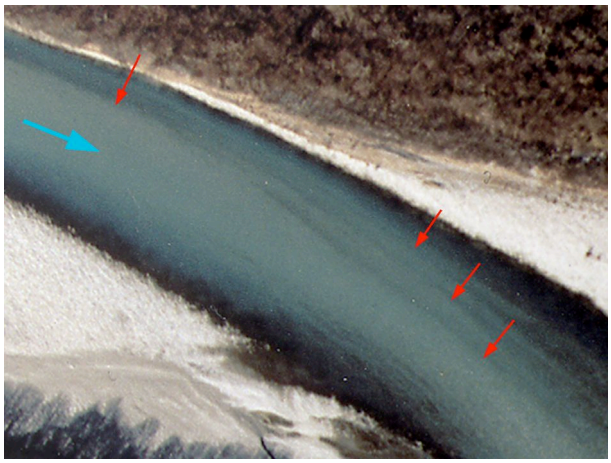
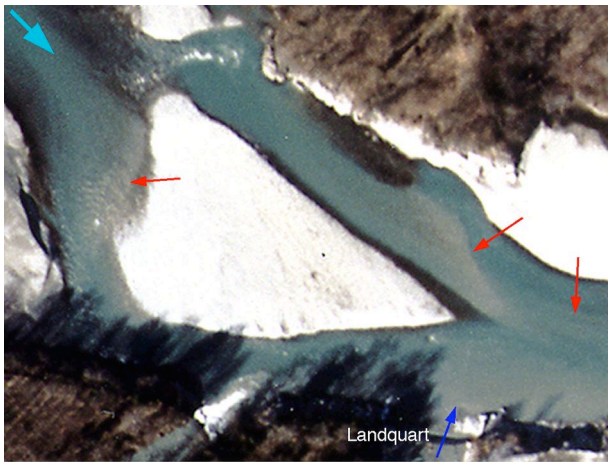


Abb. 38.3

Teststrecke Mastrils. Geschiebezungen zwischen Profil 23.2 - 23.275 (rote Pfeile).

Massstab ca. 1 : 2500.



Das dem Rhein zugeführte sowie das im Bereich der Schnellen erodierte Geschiebe wird bei Schwall transportiert. Dabei dürfte das erodierte Material im Kolkbereich sortiert werden. Das heisst die gröberen Fraktionen bleiben liegen und die feineren Fraktionen werden weiter transportiert. Bei abnehmendem Schwall wird das Geschiebe abgelagert, um beim nächsten Schwall, zumindest teilweise, wieder mobilisiert zu werden.

Auch in dieser Rheinstrecke kann erwartet werden, dass zu Beginn der Winterperiode mehr Geschiebe umgelagert wird, als gegen Ende des Winters. Das regelmässige Umlagern und

Zwischendeponieren des Geschiebes (bei weitgehend fehlender Geschiebezufuhr aus den Zuflüssen) führt dazu, dass die mobilisierbaren Geschiebeablagerungen im Verlauf des Winters in Fliessrichtung ausgeräumt werden. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Distanz vom Stau Reichenau bei Schwall der Geschiebetrieb über den Winter länger andauert.

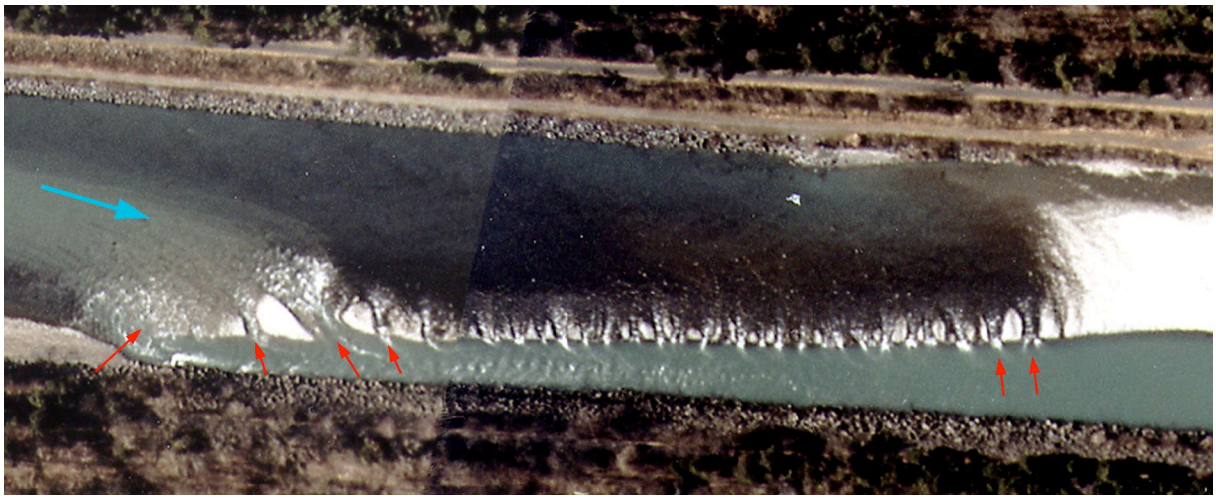


Abb. 39.1 Teststrecke Bad Ragaz, Abfluss bei Sunk (LB vom 7.3.00). Erosionserscheinungen im Bereich einer Schnelle (km 26.6 - km 26.8). Massstab ca. 1 : 2'500.



Abb. 39.2 Teststrecke Buchs, Abfluss bei Sunk (LB vom 7.3.00). Erosionserscheinungen im Bereich einer Schnelle (km 51.0 - km 51.2). Massstab ca. 1 : 2'500.

Strecke Ill - Bodensee

In der Internationalen Rheinstrecke kann entsprechend den Berechnungsresultaten beim werktäglichen Schwall regelmässig Geschiebe transportiert werden. Das Geschiebe wird von der Oberwasserstrecke in kleinen Mengen zugeführt. Ob zudem aus der Ill bei Schwall oder Winterhochwassern Geschiebe zugeführt wird, wurde nicht untersucht. Das Geschiebe dürfte bis in die Mündungsstrecke transportiert werden, wo es auf der Sohle abgelagert wird und langgezogene Feingeschiebeablagerungen bildet.

Weil die Deckschicht bis zu einem Abfluss von 350 - 400 m^3/s stabil ist, können Erosionserscheinungen während der Winterperiode ausgeschlossen werden.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Geschiebetransport haben gezeigt, dass beim aktuellen Schwallregime praktisch in der gesamten Rheinstrecke zwischen dem KW Reichenau und dem Bodensee Geschiebe transportiert werden kann. Dabei ist nicht die gesamte Rheinsohle in Bewegung, sondern das feinere Geschiebe wird in Form von Längsstreifen vorallem im Bereich der Hauptströmung flussabwärts transportiert. Insbesondere in der verzweigten Fliessstrecke Mastrils kommt es in Senken und flussabwärts von Schnellen zur Bildung von flachen Geschiebebänken.

Erosionserscheinungen in den Schnellen sind auf der gesamten Strecke von Domat Ems bis zur Illmündung festzustellen. Dabei wird auch grobes Sohlensubstrat mobilisiert, das in den nachfolgenden Kolken und Rinnen abgelagert werden dürfte.

Bei den weniger ausgeprägten Schwallganglinien von 1978/79 war kein durchgehender Geschiebetrieb im Rhein möglich. Falls Geschiebe durch Erosion der Schnellen mobilisiert wurde, so lagerte sich das Material im nachfolgenden Kolk meist wieder vollständig ab. Die Erhöhung der Schwallspitzen insbesondere in den 90er Jahren führte damit zu einer Aktivierung des Geschiebetriebs in der Winterperiode, was eine grundlegende Veränderung gegenüber dem natürlichen Zustand darstellt.

3 Trübung

3.1 Einleitung

3.1.1 Aufgabenstellung

Die Trübung eines Fliessgewässers beeinflusst den Lebensraum der aquatischen Fauna und Flora in mehrfacher Art:

1 Durch die Trübung des Wassers wird das Lichtklima im Wasser und an der Sohlenoberfläche verändert (vgl. Literaturstudie).

2 Der Transport der Schwebstoffpartikel führt zu einer mechanischen Beanspruchung der Organismen (und des Flussbetts).

3 Schwebstoffe können sich im Interstitial (Porenraum) oder auf der Gewässersohle ablagern (Kolmation), wodurch die Beschaffenheit der Sohlenoberfläche verfeinert und der Lückenraum verkleinert wird.

Die Trübung des Alpenrheins zeigt von Natur aus grosse Schwankungen. Während der Schneeschmelze (Frühling bis Sommer) ist die Trübung generell hoch (mehrere 100 mg/l) und bei Hochwasserereignissen können extreme Schwebstoffkonzentrationen (bis über 10'000 mg/l) erreicht werden. Demgegenüber ist die Trübung in der Winterperiode von Natur aus gering und das Wasser ist mehr oder weniger klar. Nur bei bestimmten Wetterlagen (z.B. Föhn) mit Schneeschmelze oder Regenfällen in den tieferen Lagen kann die Trübung markant ansteigen.

Seit einigen Jahrzehnten hat sich die Abflusstrübung in der Winterperiode zunehmend verändert. Der Rhein zeigt mehrheitlich eine graue Färbung und die Sichttiefe beträgt nur wenige Dezimeter.

Die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführten Untersuchungen haben zum Ziel, die natürlichen und anthropogen bedingten Ursachen des Trübeaufkommens abzuklären (Kap. 3.2) und die Transport- und Ablagerungsprozesse der Schwebstoffe im Rhein zu analysieren (Kap. 3.3). Zu diesem Zweck wurden in verschiedenen Seitenzubringern sowie im Alpenrhein selbst Trübemessungen durchgeführt.

Die Untersuchungen bilden die Grundlage für allfällige Massnahmen zur Reduktion des Schwebstoffaufkommens und zur Trübung des Rheins.

Die Trübung, resp. die Schwebstoffkonzentration, wird in mg/l Trockengewicht angegeben. Die erfassten Partikel entsprechen den gesamten ungelösten Stoffen (GUS) im Abfluss.

3.1.2 Überblick Messprogramm

Zur Erfassung der Schwebstoffkonzentration im Gewässersystem des Alpenrheins wurden in den Wintern 98/99, 99/00 und 00/01 die folgenden Messungen durchgeführt.

Messkampagne Einzugsgebiet (MK1)

In einer ersten Messkampagne vom 7.2. - 9.2.99 wurde die Trübung in den massgebenden Zubringern durch Stichproben (Flaschenproben) und im Rhein durch Sammelproben erfasst[1].

Die Messkampagne verfolgte im wesentlichen die folgenden Ziele:

1 Durch die Simultanmessung der Trübung an allen Zubringern bei derselben Witterung lassen sich die Schwebstoffkonzentrationen vergleichen.

2 Durch die gleichzeitige Messung der Trübung in 5 Rheinquerschnitten lässt sich der Verlauf der Schwebstoffkonzentration in der fliessenden Welle verfolgen.

3 Die Messkampagne begann an einem Sonntag und endete am darauffolgenden Dienstag. Dadurch wurden sowohl die Verhältnisse am Wochenende (ohne Schwall) als auch während dem werktäglichen Schwall erfasst. Die Messungen liefern damit einen Beitrag zur Beurteilung des Schwalleinflusses auf die Trübung des Rheins.

Während der Messkampagne war die Witterung im gesamten Einzugsgebiet kalt (immer unter dem Gefrierpunkt) mit häufig starkem Schneefall. In den Gewässern herrschte ausgeprägter Niederwasserabfluss und natürliche Einflüsse, welche die Trübung erhöhen (Schneeschmelze, Regen) waren nicht vorhanden. Dementsprechend dürften die am Sonntag und Montag Morgen erfassten Trübungen mit den unbeeinflussten natürlichen Werten (bei vergleichbarer Witterung) etwa übereinstimmen. Die höheren Schwebstoffkonzentrationen am Montag Nachmittag und Abend repräsentieren die hohen Trübungen bei Schwallabfluss.

In Tabelle 5 sind die Probenahmestellen mit den erfassten Trübungen am Wochenende und beim Schwall zusammengestellt. Die Lage der Probenahmestellen ist auf den Plänen 1.1 und 1.2 eingezeichnet und die Messdaten in Anhang 2 graphisch dargestellt.

Die Schwebstoffkonzentrationen der Sammelproben im Alpenrhein sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Alle im Einzugsgebiet durchgeführten Trübemessungen werden in Kapitel 3.2.4 zusammengefasst und interpretiert.

1 Das umfangreiche Messstellennetz war nur dank der Mithilfe mehrerer Fischereiaufseher und Behördenvertreter aus allen beteiligten Kantonen und Ländern zu bewältigen.

Zubringer	Basistrübung Wochenende [mg/l]	Trübung bei Schwall [mg/l]	Trübung infolge anderer Ereignisse [mg/l]
Hinterrhein HR			
HR Sufers	< 1		
Averser Rhein	< 1		37 (Granitsteinwerk)
Nolla	< 1		
HR Thusis	< 1		
Albula Filisur	< 1	41	
Landwasser Filisur	0.5 - 3		
Albula Tiefencastel	1 - 2	> 4	
Julia Tiefencastel	1		
Albula Sils	1	2	
HR Reichenau	2	7	
Vorderrhein VR			
VR Disentis	1 - 2		
Medelser Rhein	< 1		
VR Sumvitg	1 - 2	8	
VR Ilanz	1	2.5	
Glenner Surcasti	0.5 - 2		
Valser Rhein Surcasti	< 1		
Glenner Ilanz	1		
VR Castrisch	2	29	
VR Reichenau	4	15	
Plessur PL			
Chur	2 - 4	10	
Landquart LQ			
LQ ob Schiers	2 - 5	8	
Schraubach Schiers	25 - 50		114 (10:15, Baggerung)
Schmitterbach	4 - 6		
Mühlbach	5	32	
SG, FL			
Tamina Bad Ragaz	2		36
Saar-Kanal Vilters	2	20	
Liechtensteiner BK	2		
Werdenberger BK	2 - 3		
Ill, VA			
Ill Schruns	1 - 2		
Ill Nüziders	3	8	
Ill Frastanz	7	11	
Ill Mündung	8	15	
Ehbach, Frutz	3	13	
Kraftwerke			
Sarelli		2	80 (Staublawine in Becken)
Lutz		1.5	

Tabelle 5 *Trübe-Messkampagne 7.2. - 9.2.99. Probenahmestellen an den Zubringern des Alpenrheins mit erfasster Basistrübung (Montag Morgen 4:00 - 7:00 Uhr) und Schwalltrübung (sofern Schwall vorhanden).[2] Werte >= 10 mg/l sind violett, solche über 50 mg/l rot geschrieben.*

[2] Die Messungen im Einzugsgebiet der Ill wurden erst am Montag um 10 Uhr begonnen. Die Angaben zur Basistrübung sind daher unzuverlässig.

Probenahmestelle	Basistrübung Wochenende [mg/l]	Trübung bei Schwall (erfasste Trübespitze) [mg/l]
HR Reichenau	2	7
VR Reichenau	4	15
Felsberg	1 - 2	8
Mastrils	5 (10 Uhr)	15
Trübbach	2 - 3	26
Lienz	2 - 3	25
Diepoldsau	3	26

Tabelle 6 *Trübe-Messkampagne 7.2. - 9.2.99. Probenahmestellen am Alpenrhein mit Basistrübung und erfasster Spitzentrübung während dem Schwall am Montag. Angegeben sind zuden die entsprechenden Werte am Hinter- und Vorderrhein bei Reichenau. Werte >= 10 mg/l sind violett geschrieben. Detaillierte Angaben im Fachbericht Limnex.*

Online - Messungen mit Trübesonden

In den Wintermonaten der Jahre 99/00 und 00/01 wurden an verschiedenen Zubringern und im Alpenrhein mit zwei Trübesonden[3] Online - Messungen (resp. kontinuierliche Messungen) durchgeführt. Die Messungen an einem Standort dauerten etwa 1 Woche mit einem Messintervall von 10 min. Dadurch liess sich eine Zeitreihe mit Wochenende und werktäglichem Schwall erfassen.

In den Tabellen 7 und 8 sind die Messtandorte an den Zubringern und im Alpenrhein mit der erfassten Messperiode sowie den beobachteten Basis- und Schwalltrübungen zusammengestellt. Die verwendeten Abkürzungen entsprechen denjenigen von Tabelle 9 und den Bezeichnungen in den Diagrammen der Anhänge 3 und 4.

Die Messreihen sind in den Anhängen 3 und 4 graphisch dargestellt. Neben dem Verlauf der Schwebstoffkonzentration und dem Wasserstand, sind die Lufttemperatur, der Niederschlag und die Sonnenscheindauer bei Chur angegeben[4].

[3] Die zwei Trübemessgeräte, die mit je 2 Akkumulatoren mit Strom versorgt wurden, bestehen aus folgenden Bausteinen: Sonde und Messwertumformer Staiger Mohilo, Sonde Typ 7530SSN, Messbereich bis 1000 TEF (Trübungseinheiten Formazin), Data-Logger Altecno AG Data-Safe500, Drucksonde zur Aufzeichnung des Wasserstandes. Die Trübesonden wurden anhand von Flaschenproben, bei denen die Schwebstoffkonzentration im Labor in mg Trockensubstanz /l bestimmt wurde, regelmässig geeicht (genaue Angaben im Fachbericht Limnex).

[4] Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich.

Sondenstandort	Datum	Basistrübung [mg/l]	Trübung bei Schwall (erfasste Trübespitze) [mg/l]
Vorderrhein (VR)			
Ilanz (VR1)	16.1. - 22.1.01	2 - 4	1
Reichenau - Tamins (VR2)	16.1. - 21.1.01	0.5 - 1	3.5
Hinterrhein (HR-KWZ)		Hinterrhein	Triebwasser KWZ
Auslauf Kraftwerke Zervreila AG (KWZ), Rothenbrunnen	18.3. - 24.3.00	2	ca. 50
Plessur (PL)			
Mündung (PL-1)	13.1. - 18.1.00	12	26
Arieschbach (AB)			ohne Schwall
Ob Baggerstelle	9.1. - 16.1.01	25	35
Unt. Baggerstelle	9.1. - 15.1.01	15	40
Furnerbach (FB)			ohne Schwall
Ob Baggerstelle	12.2. - 13.2.01	70	?
Unt. Baggerstelle	12.2. - 20.2.01	75	460
Schraubach (SB)			ohne Schwall
Mündung (SB-1)	19.11. - 22.11.99	22	320
Mündung (SB-2)	28.1. - 3.2.00	7	ca. 1000
Mündung (SB-3)	18.2. - 24.2.00	25	360
Ob. Baggerstelle (SB-4)	23.1. - 1.2.01	30	> 500
Mündung (SB-4)	23.1. - 28.1.01	40	> 500
Landquart (LQ)			
Schrau (ob Schraubach) (LQ-1)	28.1. - 3.2.00	1 - 2	410
Mündung (LQ-2)	25.11. - 1.12.99	13	208
Ill (Ill)			
Nenzing	6.1. - 10.1.00	1	30
Mündung	6.1. - 12.1.00	6	37

Tabelle 7 *Sondenstandorte an den Zubringern mit Messperiode, erfasster Basistrübung und Trübespitze. Werte >= 10 mg/l sind violett, solche über 50 mg/l rot geschrieben.*

Sondenstandort	Datum	Basistrübung [mg/l]	Trübung bei Schwall (erfasste Trübespitze) [mg/l]*
Abschnitt D/E			
Domat Ems	4.2. - 12.2.01	< 1	8 (Mo), 36 (NS)
ob Mastrils	4.2. - 7.2.01	2.5	22 (Di)
TS Mastrils (AR-Ma)			
oben	11.2. - 18.2.00	6	43
unten	11.2. - 18.2.00	2 - 3	28
TS Bad Ragaz (AR-BR)			
oben	24.2. - 2.3.00	3 - 10	16 / 90 (MO) / 210 (WE)
unten	24.2. - 1.3.00	4 - 10	14 / 70 (MO) / 175 (WE)
TS Buchs (AR-Bu)			
oben	3.3. - 9.3.00	8 - 10	63 / >325 (NS)
unten	3.3. - 10.3.00	8	50 / 410 (NS)
TS Diepoldsau (AR-Di)			
oben (AR-Di-1)	15.12. - 19.12.99	7 - 8	37 / 122 (NS)
unten	15.12. - 20.12.99	5 - 6	33 / 144 - 430 (NS)
oben (Schneeschmelze) (AR-Di-2)	10.3. - 15.3.00	53	268
unten (Schneeschmelze)	10.3. - 16.3.00	50	258

Tabelle 8 *Sondenstandorte im Alpenrhein mit Messperiode, erfasster Basistrübung und Trübespitze. Werte >= 10 mg/l sind violett, solche >= 50 mg/l rot geschrieben. TS = Teststrecke, NS = Niederschlag, WE = Wochenende, MO = Montag. * ohne Zusatzangaben betreffen die Angaben den werktäglichen Trübeschwall ohne zusätzliche Einflüsse.*

Trübemessungen der LHG

Die Landeshydrologie (LHG) erfasst seit Mitte November 1999 bei der eidgenössischen Messstation Diepoldsau die Trübung mittels Sonde in Intervallen von 2 bis 5 min. Die Messdaten (in TEF) und die Eichwerte wurden dem Projektteam kostenlos zur Verfügung gestellt[5].

In Abbildung 40 sind die Trübe-Ganglinien der Monate Nov. - März für die zwei erfassten Winter dargestellt. Eingezeichnet sind zudem der Abfluss bei Diepoldsau und die Messperioden der an den Zubringern und im Rhein durchgeführten Online-Messungen. Damit lassen sich die Messresultate an den verschiedenen Standorten besser vergleichen. Die Messungen werden in Kapitel 3.3.1 interpretiert.

3.2 Trübeaufkommen im Einzugsgebiet

3.2.1 Einflussfaktoren

Das Schwebstoffaufkommen in einem Fliessgewässer wird bestimmt durch
(1) den Eintrag von Feinpartikeln in das Fliessgewässersystem und
(2) den Transport der Schwebstoffe im Fliessgewässer.

Der **Eintrag von Feinpartikeln in ein Fliessgewässer** kann eingeteilt werden in natürliche Prozesse und anthropogene Einflüsse.

a) **Natürliche Prozesse**
- Auswaschung aus dem Boden bei Exfiltration
- Eintrag infolge Niederschlag und Schneeschmelze (v.a. Oberflächenabfluss mit Auswaschung von Feinpartikeln oder Oberflächenerosion)
- Resuspension von Feinsedimentablagerungen im Bachbett
- Eintrag durch Ufererosion, Hangrutsche und Geschiebetransport (resp. aus der Sohle) und infolge Abrieb bei erhöhtem Abfluss (im Winter kaum relevant)
- Eintrag durch Zuflüsse

Das Ausmass des Schwebstoffeintrags aufgrund natürlicher Prozesse wird geprägt durch die geologischen Verhältnisse des Einzugsgebiets und die Vegetation (vgl. Kap. 3.2.2).

[5] Die Eichkurve wurde durch SA+H bestimmt. Später publizierte Werte der LHG können von den hier angegebenen Werten abweichen. Die Eichung liefert bei Konzentrationen zwischen 30 und 500 mg/l gute Resultate.

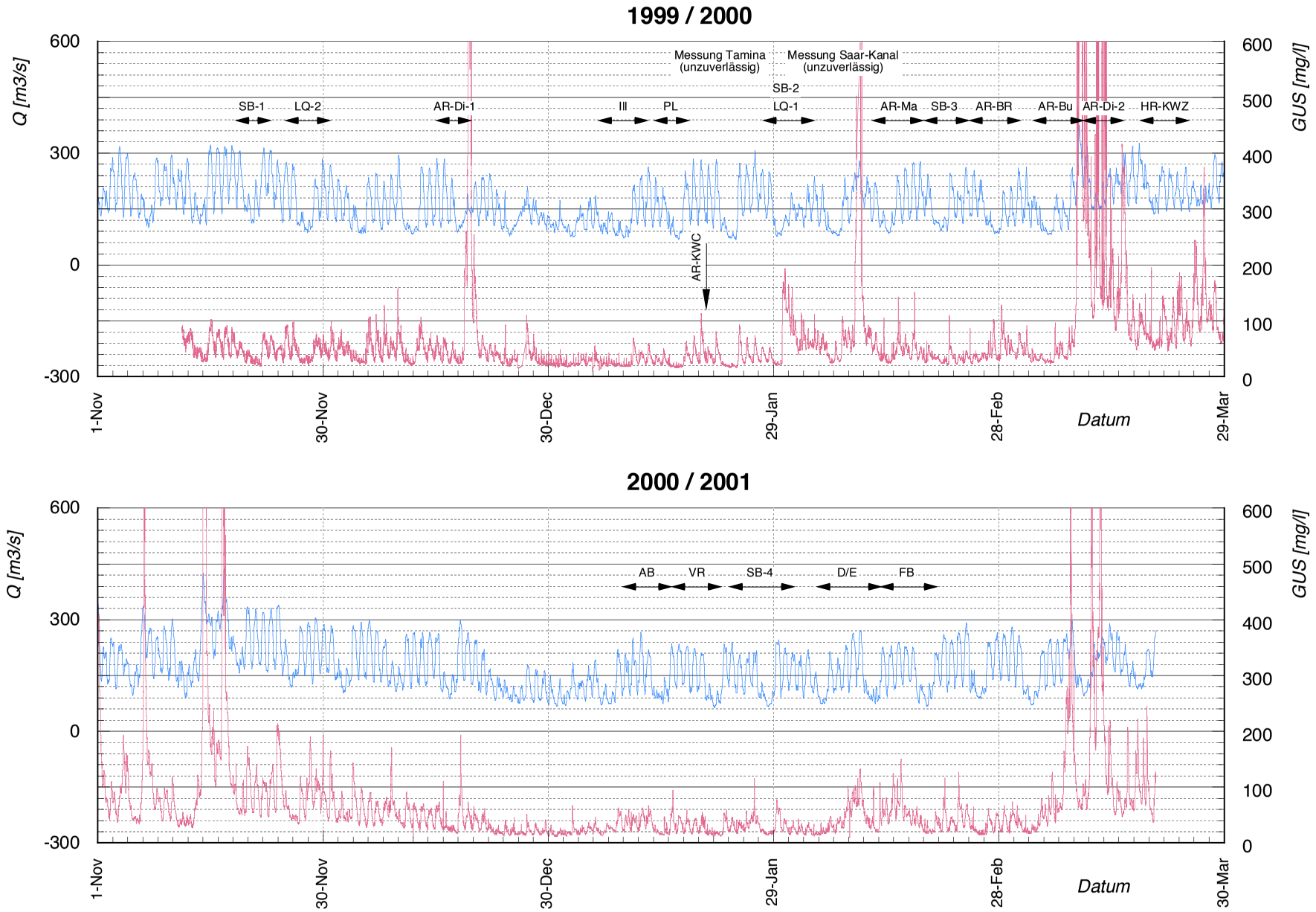


Abbildung 40 *Abfluss- (blau) und Trübeganglinie (rot) der Messstation Diepoldsau (Landeshydrologie) für die Winter 99/00 und 00/01, sowie Perioden der zeitgleichen Messungen an anderen Standorten. Abkürzungen vgl. Tabellen 7 und 8.AR-KWC = Alpenrhein Kieswerk Calanda.*

b) **Anthropogene Tätigkeiten**

- Kiesbaggerungen im Gewässer
- Einleiten von Spülwasser, Reinigungsanlagen, etc. (z.B. aus Granitsteinwerk)
- Wasser- und Flussbauarbeiten
- Direktes Einbringen von Material
- Spülung von Speichern, Ausgleichsbecken und dgl.
- Räumliche Aktivitäten (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Bautätigkeiten)

Der **Schwebstofftransport in einem Fliessgewässer** wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Die Zufuhr von Schwebstoffen (Fracht, Konzentration, Kornverteilung) bestimmt das verfügbare Schwebstoffvolumen.
- Die Morphologie (natürliches Gerinne, eingeengtes Gerinne, Kanal) und die Länge der Fliessstrecke beeinflussen das Speichervermögen des Gewässers bezüglich Feinsedimenten. Schwebstoffe werden in einem Fliessgewässer abgelagert, resuspendiert, umgelagert und weitertransportiert.
- Der Abfluss und die Abflussschwankungen (natürlich und anthropogen) bestimmen die Transport- und Ablagerungsprozesse.

3.2.2 Massgebende Prozesse Trübeaufkommen

Die durchgeführten Trübemessungen und Beobachtungen in Teileinzugsgebieten der Zubringer erlauben es, die massgebenden Prozesse des Trübeaufkommens zu erkennen und die wesentlichen Trübeverursacher zu bestimmen. Die Datananalyse zeigt, dass die Geologie des Einzugsgebietes, die Witterung, die Vegetation, resp. der Bewuchs und anthropogene Tätigkeiten einzeln oder in Kombination einen entscheidenden Einfluss auf das Trübeaufkommen ausüben.

Geologie des Einzugsgebiets

Die Geologie, die Morphologie und das Relief des Einzugsgebietes bestimmen die Entstehung und die Verfügbarkeit von Feinpartikeln.

Weiche, feinkörnige und stark verfaltete Gesteinsschichten zeigen einen kleinen Erosionswiderstand (Verwitterung und Aufspaltung von Fels infolge der Einwirkung von Wind, Wasser und Temperaturschwankungen). Dabei entsteht ein vergleichsweise hoher Anteil an Feinpartikeln (Ton-, Silt- und Sandfraktion), der bei Oberflächenabfluss oder infolge von Rutschungsprozessen in das Gewässersystem gelangen kann. Bei harten Gesteinen sind bei vergleichbarer Morphologie die Erosions- und Verwitterungsraten um Grössenordnungen kleiner.

Unabhängig vom Untergrundgestein begünstigen instabile morphologische Verhältnisse sowie eine hohe Reliefenergie die Mobilisierung von Feinsedimenten. Aus Lockergesteinsformationen (Hangschutt, fluviale Ablagerungen, Moränen, Talverfüllungen) kann bereits bei leicht erhöhtem Abfluss Feinmaterial ausgewaschen werden.

Im Einzugsgebiet des Alpenrheins sind es vor allem die geologischen Zonen mit Flysch und Bündnerschiefer, die ein extrem hohes Potenzial an verfügbaren Feinsedimenten aufweisen. Diese Zonen werden durch die folgenden Gewässer entwässert (Abbildung 1):

Glenner und Valser Rhein	Östliche Talflanke
Rabiusa	Gesamtes Einzugsgebiet
Nolla (Domleschg)	Gesamtes Einzugsgebiet
Plessur mit Rabiusa	Unteres und mittleres Einzugsgebiet
Landquart	Unteres und mittleres Einzugsbiet bis vor Klosters
Tamina	Oberes Einzugsgebiet und nördliche Abdeckung

Witterung

Die Winterperiode ist geprägt durch tiefe Temperaturen und Niederschlag in Form von Schnee. In höheren Lagen (> 1500 m ü.M.) treten kaum oder nur selten Wetterlagen auf, die zu Schneeschmelze und Oberflächenabfluss führen.

Demgegenüber können in tieferen Lagen Temperaturanstiege, Niederschläge in Form von Regen und die direkte Sonneneinstrahlung zu einem bedeutenden Oberflächenabfluss führen. Unter diesen Verhältnissen kann es, vor allem in den bezüglich Trübung geologisch relevanten Einzugsgebieten, zu einem massgebenden Eintrag von Feinsedimenten in das Gewässersystem kommen.

Die Abbildungen 41 - 47 zeigen die Bedeutung der **Schneeschmelze** im Einzugsgebiet des Schraubachs auf das Trübeaufkommen. So führte zum Beispiel die Schneeschmelze im Einzugsgebiet des Schraubachs am 8. März 01 (Föhnlage, wenig Sonne, T > 10°C) zu einer sehr starken Trübung des Gewässers. Die dafür massgebenden Mobilisierungsprozesse sind mit den Abbildungen 41 - 46 dokumentiert.

Abbildung 41 zeigt den Zusammenfluss von Wissbach und Grossbach im hinteren Einzugsgebiet. Die Trübung erreichte hier bereits 8'000 mg/l, was zeigt, dass die Mobilisierung von Schwebstoffen bereits weit oben einsetzte.

Der Oberflächenabfluss infolge Schneeschmelze und der Austritt von Sickerwasser aus Hanganrissen und Hangschutt erodierte grössere Mengen von Feinsedimenten (Abb. 42 und 43). Dabei wurden vor allem die feinen Partikel der Silt- und Tonfraktion mobilisiert (Abb. 44).

In einer kleinen Runse ereignete sich ein kleiner Murgang, der neben Feinsedimenten auch Kies und Steine mit sich führte. Die Abbildungen 45 und 46 zeigen den Ablagerungsbereich vor und nach dem Ereignis.

Die Schwebstoffkonzentration schwankte bis zur Mündung des Salginabachs zwischen 8'000 und 8'500 mg/l. Der Salginabach zeigte eine eine geringere Trübung, die jedoch immer noch 4'500 mg/l erreichte. Weiter bachabwärts wurden keine Stichproben erhoben.

Die am 8. März herrschende Wetterlage ist nicht typisch für die Winterperiode. Im Hochwinter finden die beobachteten Prozesse in abgeschwächter Form mit geringeren Konzentrationen statt.

Abb. 41

Zusammenfluss von Grossbach und Wissbach. 8.3.01.

$C_{Grossbach}$ = *7500 mg/l*

$C_{Wissbach}$ = *8300 mg/l*

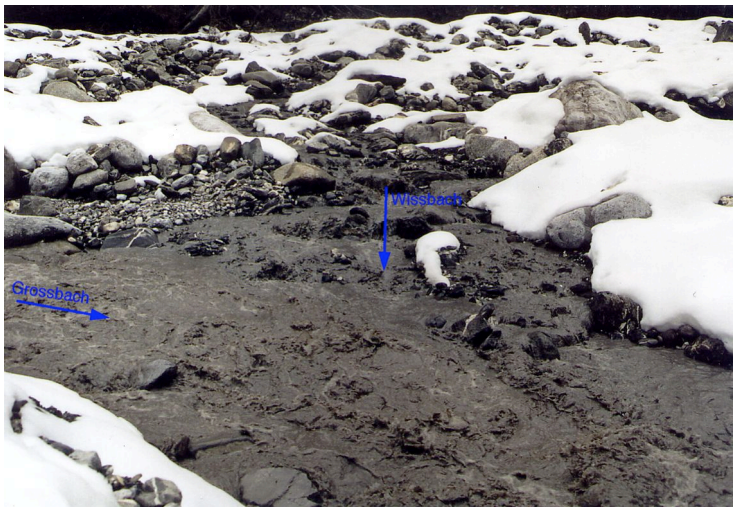




Abb. 42

Hanganriss „Underem Wäschchrut". Schneeschmelze, Oberflächenabfluss und Erosion von Feinsedimenten. 8.3.01.



Abb. 43

Seitenrinne und Hangschutt. Sickerwasseraustritt und Resuspension von Feinsedimenten. 8.3.01.



Abb. 44

Schmelzwasser mit hoher Schwebstoffkonzentration. 8.3.01.



Abb. 45

Seitlicher Graben mit Schwemmkegel (oberhalb Bogensperren, linke Talseite). Die rote Linie bezeichnet das Niveau der Ablagerungen von Abb. 46. 8.3.01.



Abb. 46

Ablagerungen ca. 2 Stunden später nach kleinem Murgang (gegenüber Abb. 45). 8.3.01.

Die Untersuchungen am Ariesch-, Furner- und Schraubach zeigen, dass die direkte **Sonneneinstrahlung** in Taleinschnitte mit Hanganrissen, Schuttkegeln oder Uferanrissen ebenfalls zu einem markanten Anstieg der Trübung führen kann. Die Prozesse, die zum Schwebstoffeintrag in den Vorfluter führen, entsprechen den oben beschriebenen.

Die Abbildungen 47 und 48 zeigen den Verlauf der Temperatur, der Sonneneinstrahlung, des Wasserstandes und der Trübung an ausgewählten Tagen am Furner- und am Schraubach. Die Meteo-Daten beziehen sich auf die ANETZ-Station Chur[6].

Abbildung 47 zeigt, dass an den sonnigen Tagen die Trübung des Furnerbaches um 13 Uhr ansteigt und zwischen 18 und 19 Uhr das Maximum erreicht. Die Schwebstoffkonzentration steigt dabei von 200 auf 450 mg/l. Am 17.2. (Samstag) ist bei bedecktem Himmel kein Anstieg der Schwebstoffkonzentration zu beobachten. Die Lufttemperatur schwankt zwischen 0°C nachts und 4 - 10°C tagsüber.

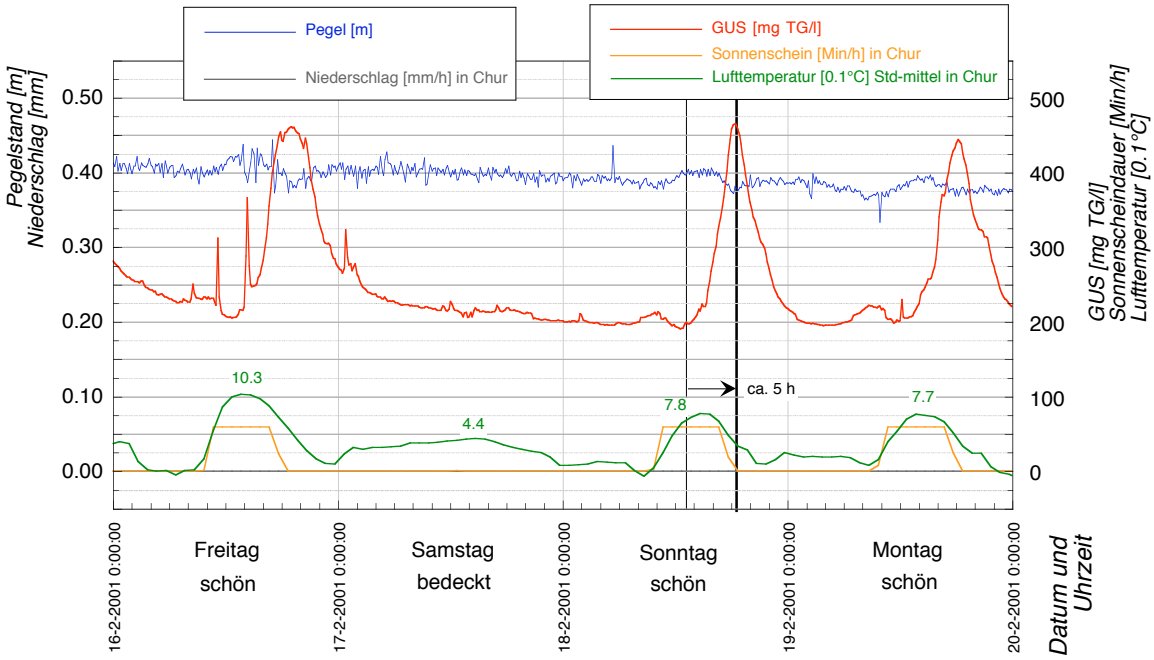


Abb. 47 *Furnerbach, Messstation ob. Kantonsstrasse Prättigau. Verlauf der Temperatur, der Sonneneinstrahlung (Station Chur), des Wasserstandes und der Trübung vom 16.2. - 19.2.01.*

Abbildung 48 zeigt die entsprechenden Beobachtungen für den Schraubach vom 20. und 21.11.99. Nach einem sonnigen Samstag mit einer maximalen Lufttemperatur von 1.6°C (Chur) stieg die Schwebstoffkonzentration innerhalb von gut 4 Stunden von 40 mg/l auf 320 mg/l an. Am darauffolgenden Tag ist bei nur sehr geringer Sonnenscheindauer kein signifikanter Anstieg der Trübung zu verzeichnen.

6 Es kann davon ausgegangen werden, dass die Lufttemperatur etwas überschätzt wird. Die Sonneneinstrahlung ist abhängig von der Exposition des Einzugsgebietes.

Auffallend ist zudem, dass die Trübespitze mit einer Abflussreduktion (leicht sinkender Pegel) zusammenfällt und während der Sonneneinstrahlung ein leicht erhöhter Pegel zu beobachten ist (Schrau- und Furnerbach). Dies deutet darauf hin, dass die Transportgeschwindigkeit der Schwebstoffe kleiner als die Fliessgeschwindigkeit des Wassers ist.

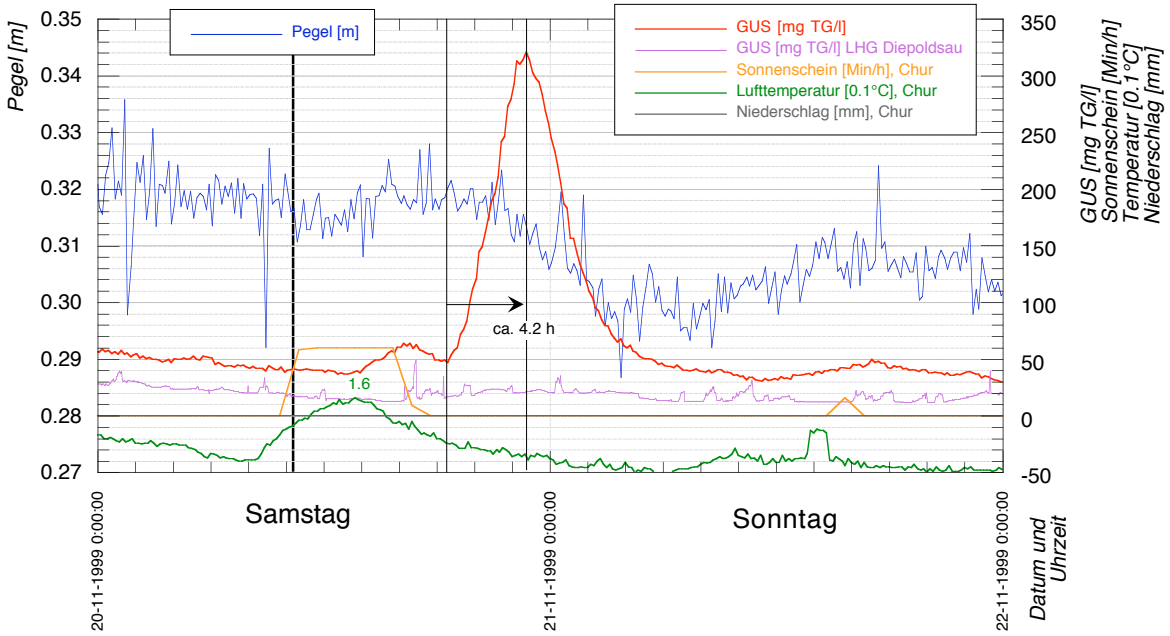


Abb. 48 *Schraubach, Messstation vor Mündung in Landquart. Verlauf der Temperatur, der Sonneneinstrahlung (Station Chur), des Wasserstandes und der Trübung vom 20.11. und 21.11.99.*

Einen ähnlichen Trübeschwall kann durch Regenereignisse ausgelöst werden. Abbildung 49 zeigt die gemessene Trübung an der Mündung des Schraubachs mit dem Verlauf von Temperatur, Niederschlag und Sonneneinstrahlung vom 18.2. bis 23.2.00.

Während den Niederschlägen vom Freitag und Samstag nimmt die Schwebstoffkonzentration von 35 mg/l auf 125 mg/l zu, wobei bei grösseren Niederschlagsintensitäten höhere Trübungen zu beobachten sind.

Am Sonntag ist bei praktisch ausbleibendem Niederschlag und nur geringer Besonnung kein relevanter Anstieg der Trübung festzustellen.

Am Montag ist bei starker Besonnung um 17 Uhr ein markanter Trübeschwall mit einer Spitze von 280 mg/l (17 Uhr) und der Dienstag zeigt 2 Trübespitzen um 16 Uhr (bei leicht erhöhtem Pegel) und 21 Uhr. Die Vorverlagerung der Trübeschwälle könnte auf die Besonnung und Schmelzwasser im Mündungsbereich zurückzuführen sein (kleinere Fliessdistanz).

Am Mittwoch sind bei leicht höherer Tagestemperatur ebenfalls 2 Trübespitzen um 17 Uhr (bei leicht erhöhtem Pegel) und ca. 22 Uhr zu beobachten. Der zweite Trübeschwall dürfte wieder mit der Besonnung zusammenhängen.

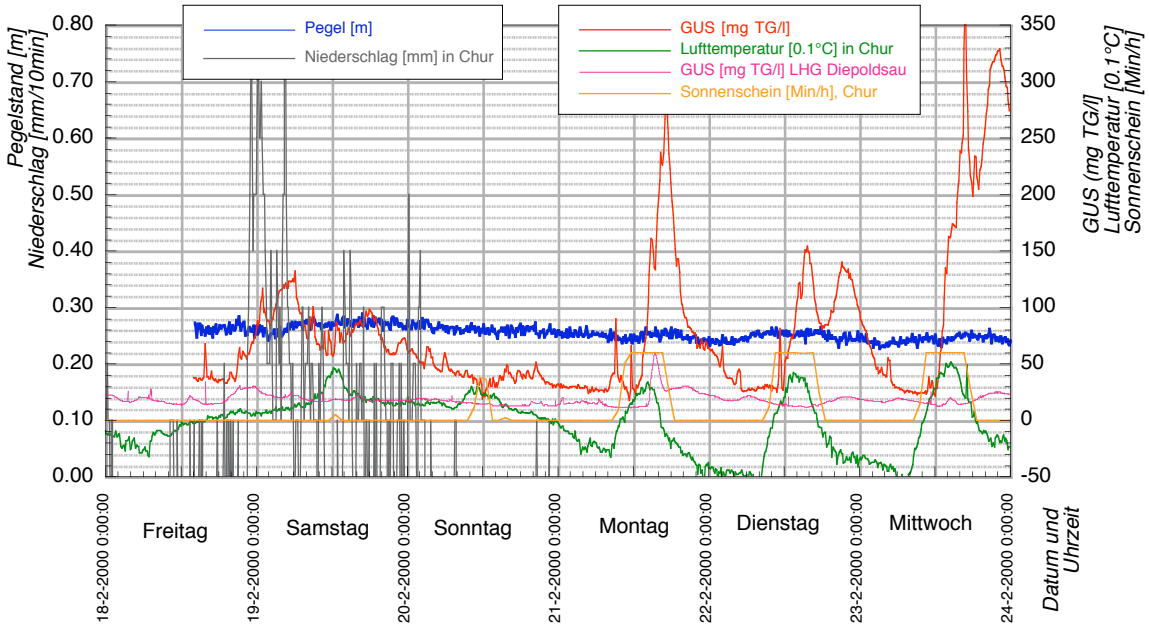


Abb. 49 *Schraubach, Messstation vor Mündung in Landquart. Verlauf der Temperatur, der Sonneneinstrahlung (Station Chur), des Wasserstandes und der Trübung vom 18.2. bis 23.2.00.*

Vegetation

Beim einer geschlossenen Uferbestockung und dem Fehlen von Uferanrissen ist selbst bei weichen Gesteinen (Flysch, Bündnerschiefer) mit einem vergleichsweise geringen Trübeaufkommen zu rechnen. Abbildung 50 zeigt ein Seitengerinne (Gebiet Cavadura), das in ein Nebengerinne des Schraubachs mündet (8.3.01). Die Trübung des Zuflusses ist gering und das Wasser fast klar, währenddem der Schraubach Schwebstoffkonzentrationen von rund 8'000 mg/l aufweist.

Abbildung 50

Seitengerinne des Schraubachs mit geschlossener Vegetationsdecke und fehlenden Uferanrissen. 8.3.01.



Anthropogene Tätigkeiten

In den Wintermonaten beschränken sich anthropogene Tätigkeiten, welche die Trübung des Alpenrheins signifikant beeinflussen können, auf direkte Baggerungen im Fliessgewässersystem. In den Plänen 1.1 und 1.2 sind alle Kiesentnahmestellen und Steinbrüche im Einzugsgebiet eingezeichnet.

Bei den Kieswerken an der Plessurmündung (Calanda) und am Furnerbach sowie beim Granitsteinwerk am Averser Rhein (Parsagna) wurden die Auswirkungen des Baggerbetriebs, resp. der Einleitung von Spülwasser, erfasst.

Beim **Kieswerk Calanda** wurde am 20.1.00 zwischen 11:35 und 12:05 (Schwallabfluss) eine Kiesentnahme mit Schleppbagger durchgeführt. Eine Trübesonde wurde bei der Brücke Haldenstein (ca. 2 km flussabwärts) installiert und der Verlauf der Trübung und des Wasserstandes erfasst (Ganglinien vgl. Anhang 3). Die Baggerung führt zu einem Auswaschen von Feinpartikeln aus dem entnommenen Sohlenmaterial, was bei der Entnahmestelle als Trübefahne in Erscheinung tritt. Bei der Messstelle ist nach 65 Minuten eine leichte Erhöhung der Schwebstoffkonzentration von 4 mg/l auf 5 mg/l festzustellen. Weil der Anstieg mit einer Verzögerung von 65 Minuten registriert wird, kann er nicht direkt auf die Baggerung zurückgeführt werden. Vielmehr ist davon auszugehen, dass der Trübeeintrag durch die Baggerung im Vergleich mit der im Rhein vorhandenen Schwebstofffracht so klein ist, dass sie bei der Messstelle nicht mehr nachweisbar ist.

Beim **Kieswerk Zindel**, unmittelbar flussabwärts der Landquartmündung, dürften die Auswirkungen einer Kiesentnahme, wegen dem hohen Schwebstoffeintrag der Landquart, etwas

deutlicher ausfallen als beim Kieswerk Calanda (im Baggerloch werden mehr Feinsedimente abgelagert).

Beim **Kieswerk am Furnerbach** wurde am 17.11.00 Material aus dem Bachbett entnommen. Eine Flaschenprobe unterhalb der Entnahmestelle ergab einen Schwebstoffgehalt von 4'400 mg/l. Obschon der Furnerbach bereits oberhalb des Kieswerks eine starke Trübung aufwies, kann davon ausgegangen werden, dass die Trübung durch die Kiesentnahme mindestens verdoppelt worden ist (visuelle Schätzung). Kiesentnahmen an den Seitenbächen der Landquart (Ariesch-, Furner- und Schraubach) führen zu einem masiven Schwebstoffeintrag in das Gewässersystem.

Bei der Messkampagne vom 7.2. - 9.2.99 zeigt die Probe am **Schraubach**, die um 10:15 Uhr entnommen wurde, eine markante Zunahme der Trübung auf 114 mg/l. Diese Trübespitze kann nicht mit der Witterung in Zusammenhang gebracht werden, sodern dürfte auf Baggerungen des Kieswerks zurückzuführen sein.

Beim **Granitsteinwerk Parsagna** (Averser Rhein) wurde am 8.2.99 durch das Einleiten von Spülwasser eine Erhöhung der Trübung von 1 mg/l auf 45 mg/l festgestellt. Der Averser Rhein mündet unmittelbar weiter unten in das Ausgleichsbecken Bärenburg. Wegen der verglichen mit dem Stau Reichenau grossen Aufenthaltszeit des Wassers, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Eintrag für die vorliegende Untersuchung nicht von Bedeutung ist.

Im Einzugsgebiet des Alpenrheins befinden sich **weitere Kieswerke**, wie z.B. am Vorderrhein bei Castrisch und Reichenau sowie diverse Entnahmestellen an der Albula, der Julia und am Hinterrhein. Auch bei diesen Kieswerken führt die Kiesentnahme zu einem gewissen Schwebstoffeintrag in das Fliessgewässersystem. Weil sich flussab all dieser Entnahmestellen Ausgleichs- oder Staubecken befinden, wird ein Teil der mobilisierten Trübestoffe in diesen Becken wieder aussedimentiert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Baggerungen im Alpenrhein die Trübung vergleichsweise wenig beeinflussen, Baggerungen in einzelnen Seitenzubringern (Ariesch-, Furner- und Schraubach) hingegen schon. Der Unterschied dürfte darauf zurückzuführen sein, dass das Feinsedimentaufkommen im Einzugsgebiet dieser Bäche gross ist und im Alpenrhein aus einer rasch überströmten alluvialen Kiessohle gebaggert wird und in den erwähnten Bächen das Geschiebe aus grösseren Absetzbecken mit hohem Feinsedimentanteil entnommen wird.

Die Bedeutung des Schwebstoffeintrags durch Kieswerke ist neben der momentanen Erhöhung der Trübung bei einer Baggerung auch bezüglich der Häufigkeit der Entnahmen zu beurteilen. Nach Auskunft einzelner Kieswerkbetreiber sowie aufgrund eigener Beobachtungen wird in den Wintermonaten eher selten Material entnommen.

Bei dem heute in den Wintermonaten vorherrschenden Baggerbetrieb kann eine massgebende Erhöhung der Trübung des Alpenrheins ausgeschlossen werden. Sporadische Baggerungen

bei den Kieswerken im Einzugsgebiet der Landquart führen zu einem Schwebstoffeintrag, der mit dem natürlichen Eintrag bei Regenereignissen oder bei starker Besonnung (Schneeschmelze) vergleichbar ist.

3.2.3 Massgebende Prozesse Trübetransport

Im vorhergehenden Kapitel wurde aufgezeigt, dass Seitenbäche mit geomorphologisch aktiven Einzugsgebieten[7] ein zeitweise extremes Trübeaufkommen auslösen können. Diese Seitenbäche münden in der Regel in ein Hauptgewässer, das seinerseits in den Rhein fliesst.

Die in das Hauptgewässer zugeführte Schwebstofffracht wird in diesem weitertransportiert, um- oder abgelagert. Die massgebenden Prozesse sind abhängig von der Morphologie und vom Abflussgeschehen.

Bei breiten und verzweigten Flussbetten werden tendenziell mehr Feinsedimente aussedimentiert als bei schmalen oder kanalisierten Gerinnen. Ebenso werden bei (natürlichem) Niederwasserabfluss mehr Schwebstoffe abgelagert als bei schwallbeeinflusster Abflussganglinie (vgl. auch Kapitel 3.3).

Dementsprechend werden die aus den Seitenbächen zugeführten Schwebstoffe in Hauptgewässern mit schwallbeeinflusster Abflussganglinie direkt in den Alpenrhein transportiert.

Besonders deutlich zeigt sich dies an der Landquart, wo die extremen Trübeschwälle aus den Seitenbächen auch in der Mündungsstrecke der Landquart erscheinen (Abb. 51). Von Freitag bis Sonntag erscheint die Trübespitze regelmässig um Mitternacht, rund 2 Stunden nach dem Eintreffen der Trübespitze aus dem Schraubach. Bei einer Fliessdistanz von 11 km ergibt dies eine Ausbreitungsgeschwindigkeit der Trübewolke von rund 1.5 m/s.

Am Wochenende zeigt die Landquart einen eingipfligen und werktags einen zweigipfligen Schwall. Die eingipfligen Schwallganglinien zeigen am Abend, wenn die hohen Trübeschübe aus den Seitenbächen kommen, einen abfallenden Verlauf. Es ist denkbar, dass sich unter diesen Verhältnissen ein Teil der zugeführten Schwebstoffe in der Landquart ablagern. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass beim zweigipfligen Schwall (mit höherer Abflussspitze) bereits bei der ersten Schwallspitze hohe Schwebstoffkonzentrationen auftreten (Resuspension dieser Ablagerungen). Für eine zuverlässige Interpretation dieser Phänomene müssten jedoch weitere Trübemessungen durchgeführt werden.

[7] Geologie: Flysch oder Bündnerschiefer. Morphologie: Hang- und Uferanrisse, Schutthalten, etc.

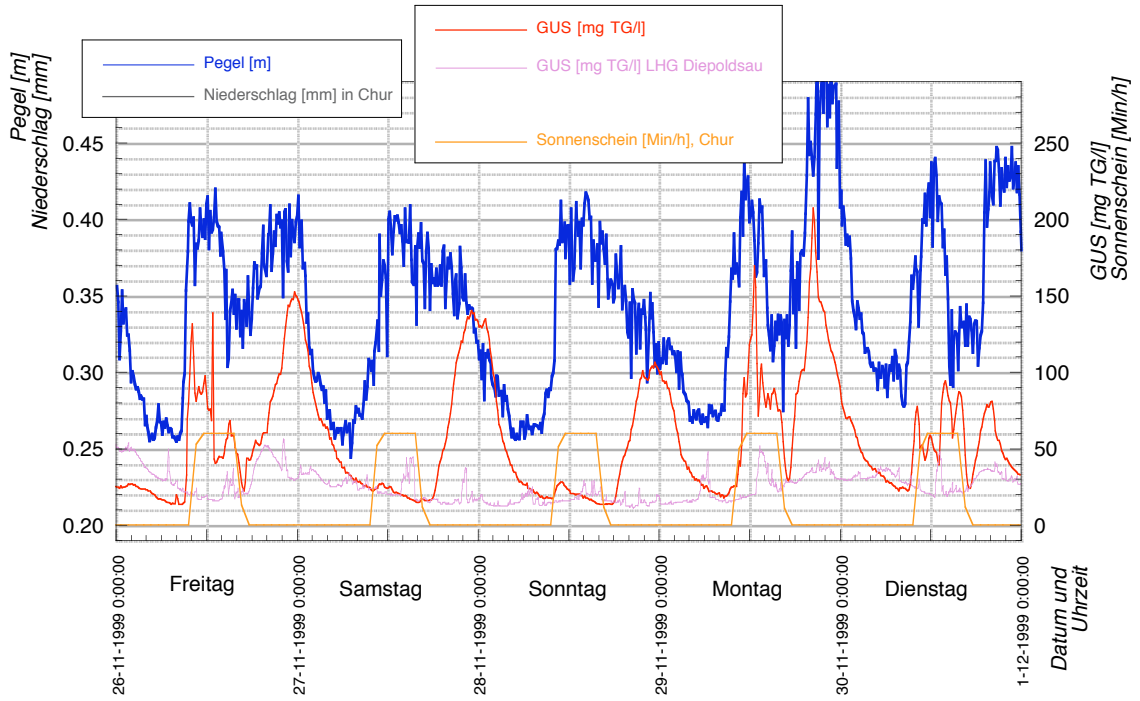


Abb. 51 *Landquart Mündung, 26.11. - 30.11.99. Verlauf der Temperatur, der Sonneneinstrahlung (Station Chur), des Wasserstandes und der Trübung. Dargestellt ist zudem die Trübung des Rheins bei Diepoldsau.*

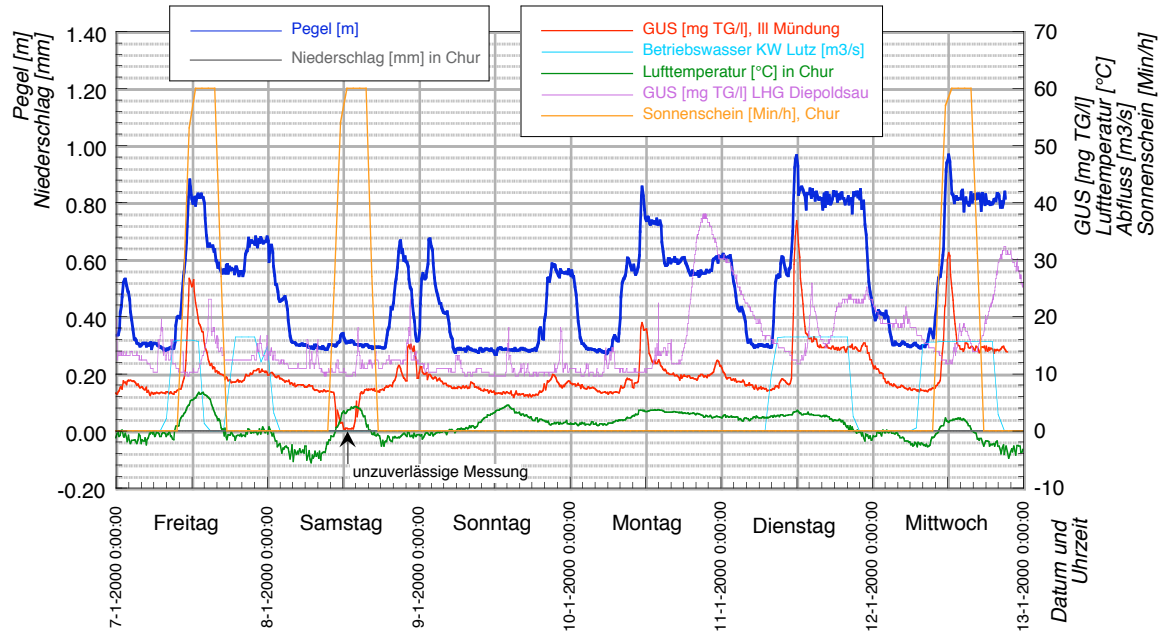


Abb. 52 *Ill Mündung, 7.1. - 12.1.00. Verlauf der Temperatur, der Sonneneinstrahlung (Station Chur), des Wasserstandes und der Trübung. Dargestellt ist zudem die Trübung des Rheins bei Diepoldsau sowie die Triebwasserganglinie des KW Lutz.*

Weil die Landquart täglich (auch am Wochenende und den Feiertagen) einen ausgeprägten Schwall aufweist, konnte nicht untersucht werden, inwiefern unter natürlichen Abflussverhältnissen die der Landquart zugeführten Schwebstoffe in den Alpenrhein transportiert oder in der Zwischenstrecke abgelagert würden. Dazu wären entsprechende Trübemessungen bei eingestelltem Kraftwerksbetrieb erforderlich.

Bei der Ill ist ein direkter Zusammenhang zwischen Abfluss- und Trübeschwall zu beobachten (Abb. 52). Bei einem sich überlagernden Schwall des KW Lutz und des Walgauwerks ist beim Schwallanstieg eine ausgeprägte Trübespitze zu beobachten. Bei anschliessend konstantem Schwallabfluss stellt sich eine ebenfalls konstante Schwebstoffkonzentration auf tieferem Niveau ein. Die der Ill zugeführten Schwebstoffe werden direkt bis in den Rhein transportiert.

3.2.4 Übersicht über die Herkunft der Trübung im Alpenrhein

Aufgrund der erfolgten Trübemessungen (Kap. 3.1.2, Anhang 2 und 3) sowie der Prozessanalysen (Kap. 3.2.2 und 3.2.3) können das Aufkommen und die Herkunft der Trübung im Alpenrhein lokalisiert und beurteilt werden.

Der Eintrag von Feinsedimenten in das Gewässersystem ist in erster Linie ein natürlicher Vorgang. Dabei spielen die geomorphologischen Verhältnisse der Teileinzugsgebiete, die Vegetation und der Verlauf der Witterung die zentrale Rolle.

In Tabelle 9 sind die erfassten Gewässer bezüglich Trübeaufkommen charakterisiert und grob bewertet. Die Bewertungsskala reicht von 1 bis 3, wobei 1 Gewässer mit vernachlässigbarem oder geringem Trübeaufkommen, 2 Gewässer mit mittlerem und 3 solche mit starkem bis extremen Trübeaufkommen bezeichnen.

Entsprechend Tabelle 9 konzentriert sich die Trübezufuhr in den Alpenrhein im wesentlichen auf die folgenden Zuflüsse:

1 Vorderrhein Ilanz-Reichenau. Die bei ungünstiger Witterung vorallem aus den Einzugsgebieten des Glenner und der Rabiusa zugeführten Schwebstoffe werden bei Schwall in (und z.T. durch) die Stauhaltung des KW Reichenau transportiert.

2 Die Plessur zeigt eine gegenüber dem Rhein erhöhte Trübung sowohl beim Basisabfluss als auch während dem Schwall. Bei Niederwasser ist die zugeführte Schwebstofffracht für den Rhein bedeutend, bei Schwall (im Rhein) aber untergeordnet.

3 Landquart ab Küblis. Die verschiedenen Teileinzugsgebiete zeigen ein grosses bis extremes Trübeaufkommen. Bei ungünstiger Witterung werden täglich Schwebstoffkonzentrationen von mehreren 100 mg/l erreicht. Die der Landquart zugeführten Schwebstoffe werden mit dem Schwall praktisch vollumfänglich in den Alpenrhein transportiert.

4 Ill ab KW Lutz. Ein vergleichsweise hoher Anteil des Einzugsgebiets liegt in tieferen Lagen, die bezüglich Trübeaufkommen witterungsempfindlich reagieren (Regen, Schneeschmelze). Daher werden der Ill wiederholt bedeutende Schwebstofffrachten zugeführt, die bei Schwall in den Alpenrhein weitertransportiert werden.

Das anthropogen bedingte Trübeaufkommen beschränkt sich auf vereinzelte, eher seltene Kiesentnahmen im Einzugsgebiet der Landquart (Arieschbach, Furnerbach, Schraubach). Kiesentnahmen aus diesen Gewässern führen zu einem bedeutenden Trübeschwall in die Landquart.

Das in die Hauptgewässer oder den Rhein zurückgeleitete Triebwasser der grösseren Kraftwerksanlagen zeigt in den Wintermonaten eine geringe bis vernachlässigbare Trübung. Unmittelbar flussab der Rückleitungen kann es infolge von Verdünnung zu einer Verminderung der Schwebstoffkonzentration kommen (Beispiel KW Ilanz, Vorderrhein. Vor Schwall 3 mg/l, mit Schwall 1 mg/l). Bei einsetzender Schneeschmelze (März) kann die Trübung des Triebwassers einzelner Kraftwerke markant ansteigen (KW Rothenbrunnen, KWZ).

Der Schwallbetrieb der Kraftwerke führt zu einer Mobilisierung der aus den Seitenbächen in die Hauptgewässer zugeführten Schwebstoffe. Besonders deutlich zeigt sich dies bei der Landquart und in reduziertem Umfang am Vorderrhein (Ilanz - Reichenau) und der Ill. Dabei werden die zugeführten oder im Flussbett zwischengelagerten Feinsedimente in Form eines eigentlichen Trübeschwalls in den Alpenrhein transportiert. Die Kraftwerke sind dementsprechend keine Trübequellen, mit der schwallartigen Rückleitung des turbinierten Wassers werden jedoch optimale Voraussetzungen geschaffen, dass die aus den Seitengewässern zugeführten Feinsedimente unmittelbar in den Rhein weitertransportiert werden.

Gewässer	Charakteristik	Trübeaufkommen	Bewertung
Vorderrhein bis Ilanz Messungen: MK1	EG vorw. kristallin Restwasserstrecke kein Schwall	geringe Trübung kleine Schwebstofffracht	1
Glenner Messungen: MK1	EG hoher Anteil Bündnerschiefer leicht reduzierter Abfluss kein Schwall	geringe Trübung, bei Schneeschmelze oder Regen wahrsch. deutlich ansteigende Trübung mittlere Schwebstofffracht	1 - 2
Rabiusa Messungen: MK1	EG vorw. Bündnerschiefer Restwasserstrecke kein Schwall	geringe Trübung, bei Schneeschmelze oder Regen wahrsch. deutlich ansteigende Trübung mittlere Schwebstofffracht	1 - 2

Tabelle 9 Teileinzugsgebiete des Alpenrheins. Charakterisierung und Bedeutung bezüglich Trübeaufkommen. Bewertung: 1 = vernachlässigbares bis geringes Trübeaufkommen, 2 = mittleres, 3 = starkes bis extremes Trübeaufkommen.

Gewässer	Charakteristik	Trübeaufkommen	Bewertung
Vorderrhein Ilanz - Reichenau Messungen: MK1 VR1, VR2	EG heterogen Schwall ab Ilanz wirkt als Umlagerungsstrecke	geringe bis mittlere Trübung bei Sunk Ablagerung von Schwebstoffen (Wasser wird in Fliessrichtung klarer) bei Schwall Resuspension von Schwebstoffen (Wasser wird in Fliessrichtung trüber) mittlere Schwebstofffracht	2
Hinterrhein bis Thusis Messungen: MK1	EG heterogen Restwasserstrecke	geringe Trübung kleine Schwebstofffracht	1
Albula bis Solis Messungen: MK1	EG heterogen abschnittweise Schwall oder Restwasserstrecke	kleine bis mittlere Trübung (Albula) Schwebstoffe lagern sich im Staubecken von Solis ab	1 - 2
Albula Solis bis Sils Messungen: MK1	kleines EG, Schlucht, Bündnerschiefer ausgeprägte Restwasserstrecke	kleine Trübung geringe Schwebstofffracht	1
Nolla Messungen: MK1	kleines EG, Bündnerschiefer Bach massiv mit Schwellen verbaut	geringe Trübung, bei Schneeschmelze oder Regen wahrsch. deutlich ansteigende Trübung geringe bis mittlere Schwebstofffracht	1 - 2
Hinterrhein Thusis - Rothenbrunnen Messungen: MK1	heterogenes EG, im Domleschg Bündnerschiefer, vergleichsweise kleine Reliefenergie Restwasserstrecke mit Schwall (KWH)	geringe Trübung (Hinterrhein wirkt als Umlagerungsstrecke) geringe bis mittlere Schwebstofffracht	1
Hinterrhein Rothenbrunnen - Reichenau Messungen: MK1 HR-KWZ	heterogenes EG ausgeprägte Schwallstrecke (Länge gegenüber Vorderrhein kurz)	geringe Trübung geringe bis mittlere Schwebstofffracht	1 - 2
Plessur Messungen: MK1 PL-1	EG bedeutender Anteil Flysch und Bündnerschiefer Restwasser- und Schwallstrecke (Abschnitt Chur)	mittlere Trübung mittlere Schwebstofffracht	2
Landquart bis Küblis keine Messung	EG kristallin und Flysch Restwasserstrecke kein Schwall	geringe bis mittlere Trübung geringe bis mittlere Schwebstofffracht	1 - 2

Tabelle 9 Fortsetzung
Teileinzugsgebiete des Alpenrheins. Charakterisierung und Bedeutung bezüglich Trübeaufkommen. Bewertung: 1 = vernachlässigbares bis geringes Trübeaufkommen, 2 = mittleres, 3 = starkes bis extremes Trübeaufkommen. Abkürzungen gemäss Tabellen 7 und 8.

Gewässer	Charakteristik	Trübeaufkommen	Bewertung
Ariesch- und Furnerbach Messungen: AB-1, FB-1	EG Flysch, nach Norden exponiert morphologisch aktiv (Hang- und Uferanrisse, Schuttkegel, etc.) natürliches Abflussregime	mittlere bis extrem hohe Trübung mittlere (Arieschbach) bis grosse (Furnerbach) Schwebstofffracht einen wesentlichen Beitrag zur Trübung der LQ hat ev. auch der Schanielabach (Küblis)	3
Schraubach Messungen: MK1 SB-1, SB-2, SB-3, SB-4	EG Bündnerschiefer und Flysch, nach Süden exponiert morphologisch aktiv (Hang- und Uferanrisse, Schuttkegel, etc.) natürliches Abflussregime	mittlere bis extrem hohe Trübung grosse Schwebstofffracht einen wesentlichen Beitrag zur Trübung der LQ haben ev. auch der Taschinasbach (Grüsch) und der Schranggabach	3
Landquart Schiers - Landquart Messungen: MK1 LA-1, LA-2	EG heterogen ausgeprägter Schwall, vorwiegend kanalisiert (geringes Speichervermögen)	mittlere bis extrem hohe Trübung grosse Schwebstofffracht der tägliche Schwall verfrachtet die aus den EG mit hohem Trübeaufkommen zugeführten Schwebstoffe direkt in den Rhein	3
Tamina Messungen: MK1 TA-1 (Sonde vereist)	EG vorw. Flysch und Kalk Restwasserstrecke	geringe bis mittlere Trübung kleine Schwebstofffracht	1
Saar Messungen: MK1 SA-1 (Geschwemmsel)	EG z.T. Flysch abschnittweise Restwasserstrecken	geringe bis mittlere Trübung kleine Schwebstofffracht	1
Liechtensteiner Binnenkanal Messungen: MK1	EG vorw. Kalk morphologisch wenig aktiv lange und flache Mündungsstrecke	geringe Trübung kleine Schwebstofffracht	1
Werdenberger Binnenkanal Messungen: MK1	EG vorw. Kalk morphologisch wenig aktiv, dichte Bestockung lange und flache Mündungsstrecke	geringe Trübung kleine Schwebstofffracht	1
Ill bis Lutz	EG kristallin und Kalk Restwasserstrecke Schwall aus Klostertal	geringe bis mittlere Trübung geringe bis mittlere Schwebstofffracht	1 - 2
Ill Lutz - Rhein	EG kristallin, Kalk, Flysch (Grosses Walsertal) ausgeprägte Schwallstrecke	mittlere Trübung mittlere bis hohe Schwebstofffracht das Schwebstoffaufkommen aus dem Grossen Walsertal setzt sich im Ausgleichsbecken des KW Lutz ab Einfluss der Schneeschmelze in tieferen Lagen von Bedeutung	2

Tabelle 9 Fortsetzung
Teileinzugsgebiete des Alpenrheins. Charakterisierung und Bedeutung bezüglich Trübeaufkommen. Bewertung: 1 = vernachlässigbares bis geringes Trübeaufkommen, 2 = mittleres, 3 = starkes bis extremes Trübeaufkommen. Abkürzungen gemäss Tabellen 7 und 8.

3.3 Trübung im Alpenrhein

3.3.1 Messungen und Prozessanalyse

Mit den Trübemessungen im Alpenrhein sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Welchen Verlauf zeigt die Trübeganglinie in einzelnen Querprofilen?
- Wie reagiert die Trübung des Rheins auf die einzelnen Zubringer?
- Was geschieht in einzelnen Streckenabschnitten? Wo werden Schwebstoffe abgelagert oder resuspendiert?
- Wie ist der Verlauf der Trübung in der fliessenden Welle zwischen Reichenau und dem Bodensee?

In den Abbildungen 53 bis 57 sind die Ganglinien ausgewählter Trübemessungen von verschiedenen Streckenabschnitten dargestellt. Bei den Messungen wurden jeweils zwei Sonden an unterschiedlichen Stellen installiert, sodass Ablagerung und Resuspension in der Zwischenstrecke erfasst werden konnte.

Abbildung 53 zeigt die Messung vom 5.2. - 9.2.01 zwischen Domat Ems und Untervaz. Mit der oberen Sonde wird die Trübung des Wassers aus dem Stau Reichenau erfasst. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Basistrübung von 1 - 2 mg/l bei Domat Ems auf rund 5 mg/l bei Untervaz ansteigt. Die Schwebstoffe werden aus der Plessur zugeführt (meist höhere Trübung als Rhein) und aus der Rheinsohle resuspendiert.

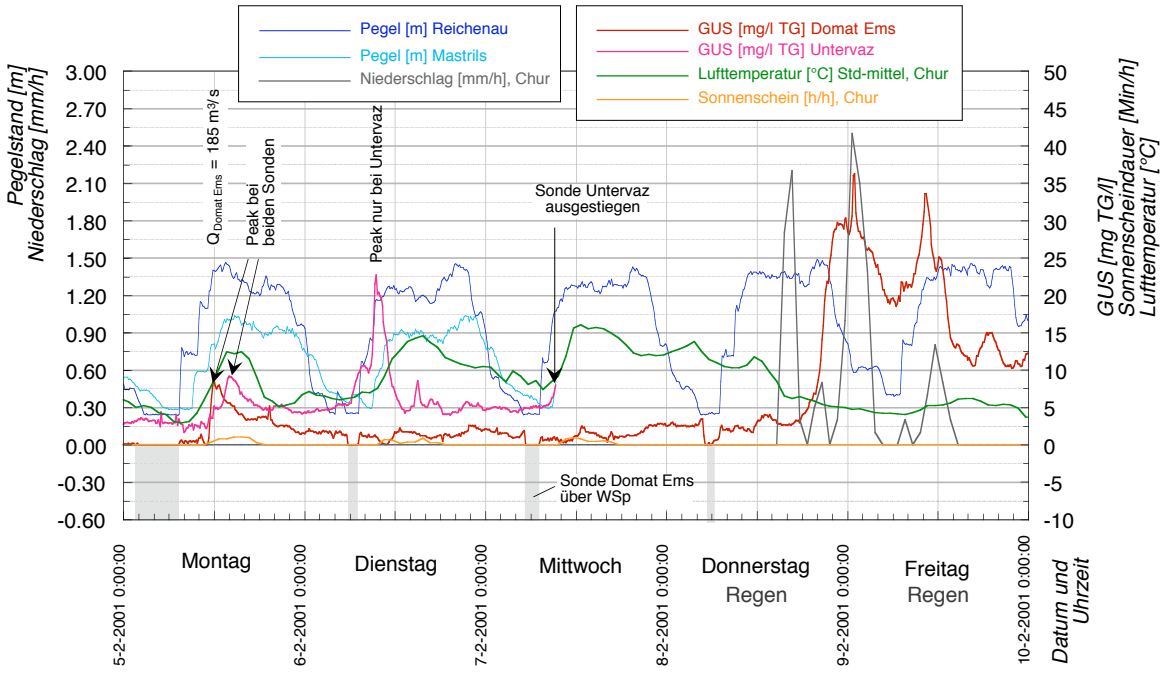


Abb. 53 *Trübe- und Pegelmessungen Domat Ems und Untervaz vom 5.2. - 9.2.00. Dargestellt sind zudem der Verlauf des Niederschlags, der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer in Chur.*

Die Ganglinie bei Domat Ems zeigt zudem eine kleine Trübespitze am Montag Mittag (8 mg/l) sowie eine ausgeprägte Trübeganglinie vom Donnerstag auf den Freitag (36 mg/l). Das erste Ereignis dürfte auf den ersten Schwall nach dem Wochenende und das zweite Ereignis auf den Regen zurückzuführen sein. Dies zeigt, dass Trübeschwälle aus Vorder- und Hinterrhein, trotz teilweiser Sedimentation in der Stauhaltung, auch flussabwärts des KW Reichenau noch deutlich in Erscheinung treten können.

Bei Untervaz ist bei einsetzendem Abflussschwall ein markanter Anstieg der Trübung (von 5 auf 23 mg/l) zu beobachten, der anschliessend, bei konstantem Schwallabfluss, wieder auf den Basiswert absinkt.

Abbildung 54 zeigt die Messungen vom 12.2. bis zum 16.2.00 in der Teststrecke Mastrils. Der Verlauf der zwei Trübeganglinien zeigt eine generelle Ablagerungstendenz in der verzweigten Fliessstrecke, wobei die Schwebstoffkonzentration etwa halbiert wird. Auffallend ist zudem, dass beim werktäglichen Schwall die Trübung ausschliesslich beim Abflussanstieg und in reduziertem Mass bei der Abflussabnahme stark erhöhte Werte zeigt. Dies dürfte auf die Resuspension von abgelagerten Feinsedimenten infolge der Abfluss*änderung* zurückzuführen sein.

Ein Vergleich der Trübungen von Mastrils (Sonde unten) und Diepoldsau zeigt für Diepoldsau Konzentrationen, die um einen Faktor 2 - 3 höher liegen.

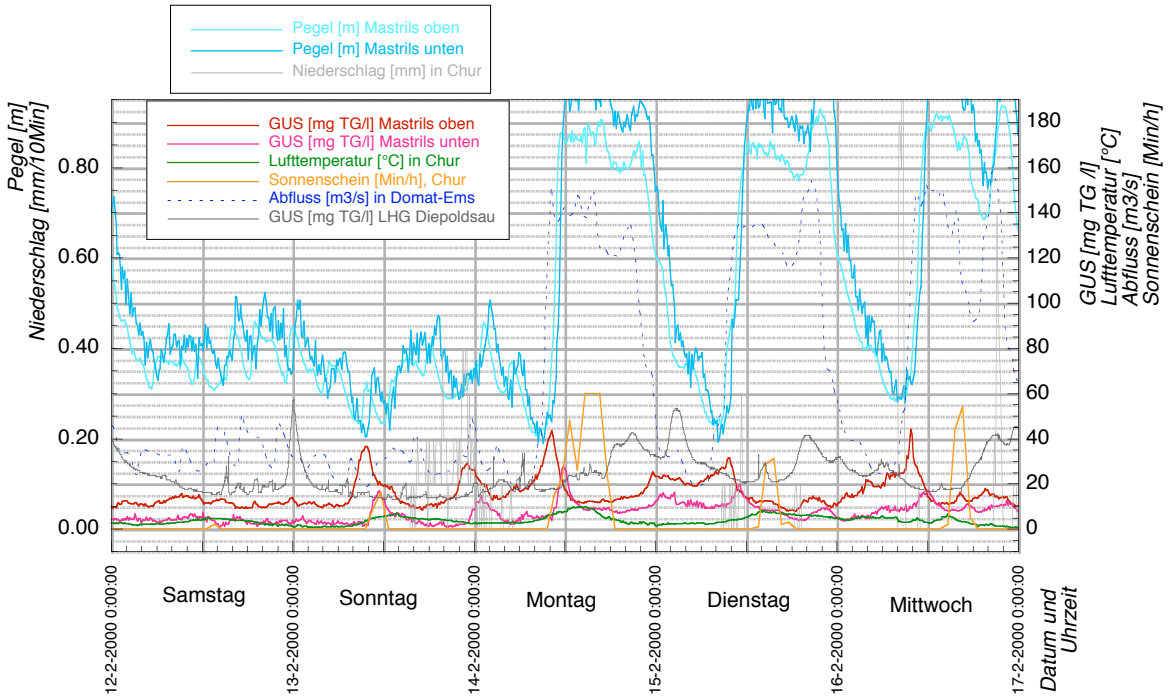


Abb. 54 *Trübe- und Pegelmessungen Teststrecke Mastrils vom 12.2. - 16.2.00. Dargestellt sind zudem der Verlauf des Niederschlags, der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer in Chur, der Abfluss bei Domat Ems sowie die Schwebstoffkonzentration bei Diepoldsau.*

Abbildung 55 zeigt die Trübemessungen in der Teststrecke Bad Ragaz vom 25.2.00 bis zum 28.2.00. Beim Schwall am Freitag ist nur eine leichte Erhöhung der Trübung festzustellen (von 3 mg/l auf 12 mg/l). Demgegenüber sind am Samstag und Sonntag bei nur geringem Abflussschwall extreme Trübeschwälle (bis 210 mg/l) zu beobachten, die aus dem Einzugsgebiet der Landquart stammen und auf die Besonnung zurückzuführen sind (vgl. Kap. 3.2.2).

Bei vergleichsweise kleinen Trübungen ist zwischen den zwei Sondenstandorten kein signifikanter Unterschied der Trübung festzustellen. Dies bedeutet, dass die Schwebstoffe im wesentlichen durchtransportiert werden. Demgegenüber werden bei den Trübeschwällen bedeutende Schwebstoffmengen abgelagert (die untere Sonde zeigt deutlich tiefere Konzentrationen), was zudem dazu führt, dass die Trübespitzen der zwei Sondenstandorte eine deutliche Zeitverschiebung aufweisen. Die abgelagerten Feinsedimente werden bei nachfolgenden Abflussschwällen teilweise wieder resuspendiert (Trübespitze am Montag bei Schwallanstieg).

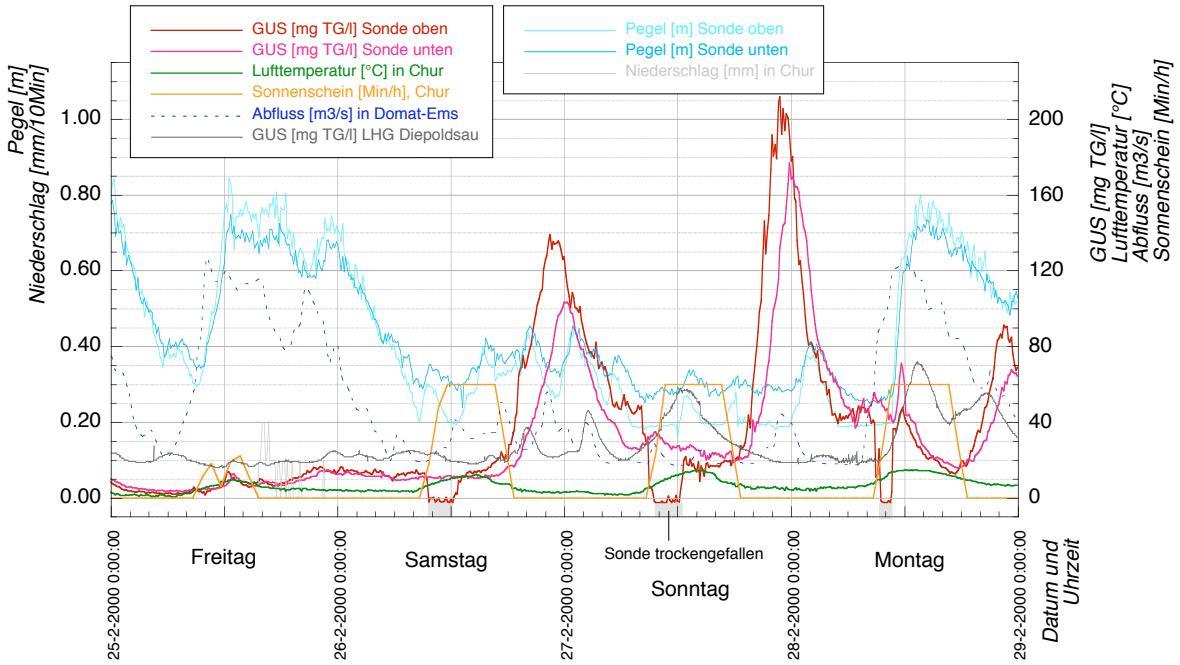


Abb. 55 *Trübe- und Pegelmessungen Teststrecke Bad Ragaz vom 25.2. - 28.2.00. Dargestellt sind zudem der Verlauf des Niederschlags, der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer in Chur, der Abfluss bei Domat Ems sowie die Schwebstoffkonzentration bei Diepoldsau.*

Abbildung 56 zeigt die Trübemessungen in der Teststrecke Buchs vom 4.3. bis zum 9.3.00. Die Trübungen der zwei Sonden zeigen einen ähnlichen Verlauf und vergleichbare Konzentrationen. Wie bereits bei Bad Ragaz, sind nach starker Besonnung deutliche Trübeschwälle zu erkennen, die auf Feinsedimenteinträge aus der Landquart zurückzuführen sind. Während diesen Trübeschwällen werden in der Teststrecke Schwebstoffe abgelagert

(Konzentration sinkt um rund 10 %). Die Spitzen der Trübeschwälle sind deutlich kleiner als bei Bad Ragaz und bei Diepoldsau ist eine weitere Dämpfung zu beobachten.

Nach dem Regen von Mittwoch Nacht ist ein extremer Anstieg der Trübung auf max. 400 mg/l zu beobachten.

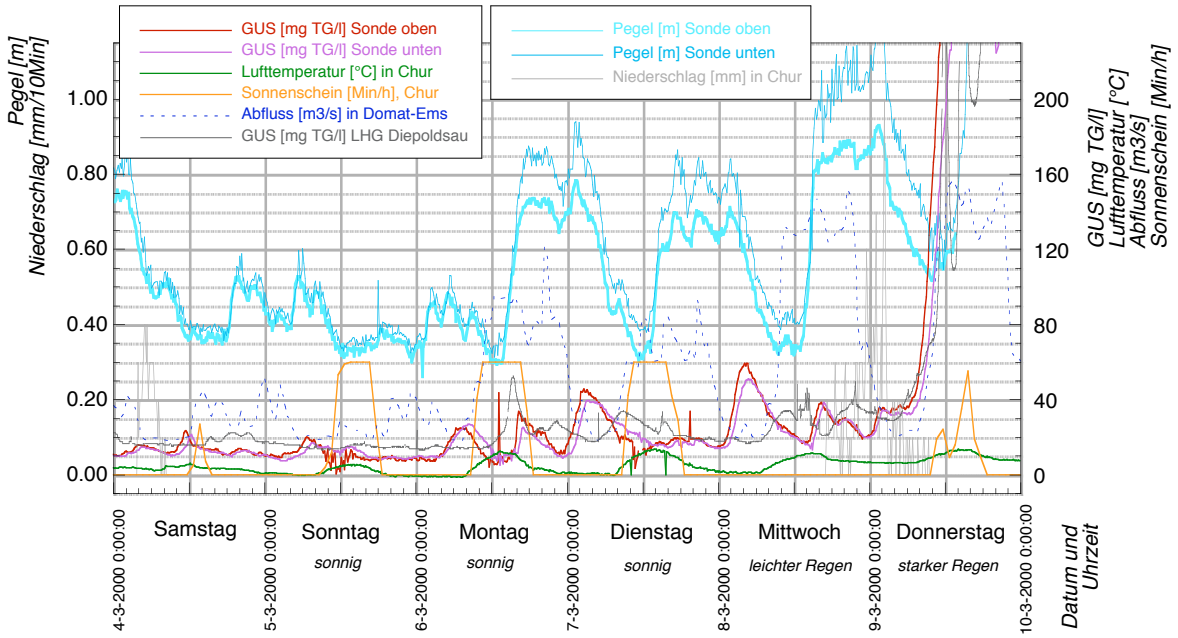


Abb. 56 *Trübe- und Pegelmessungen Teststrecke Buchs vom 4.3. - 9.3.00. Dargestellt sind zudem der Verlauf des Niederschlags, der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer in Chur, der Abfluss bei Domat Ems sowie die Schwebstoffkonzentration bei Diepoldsau.*

Abbildung 57 zeigt die Trübemessungen in der Teststrecke Diepoldsau vom 15.12. bis zum 20.12.99. Die zwei Sonden zeigen einen praktisch identischen Verlauf, was bedeutet, dass Schwebstoffe weder abgelagert noch resuspendiert werden. Während den Schwallganglinien steigt die Trübung von etwa 7 mg/l auf rund 35 mg/l (Faktor 5).

Bei kalter Witterung ist kein Einfluss der Besonnung festzustellen und die Trübespitze aus der Landquart ist nicht mehr sichtbar (der Trübeschwall aus der Landquart müsste etwa Mittags eintreffen, vgl. Abb. 55 und 56).

Nach dem Niederschlag vom Sonntag ist ein starker Anstieg der Trübung mit Spitzenkonzentrationen um 430 mg/l festzustellen (einsetzende Frühjahrs-Schneeschmelze).

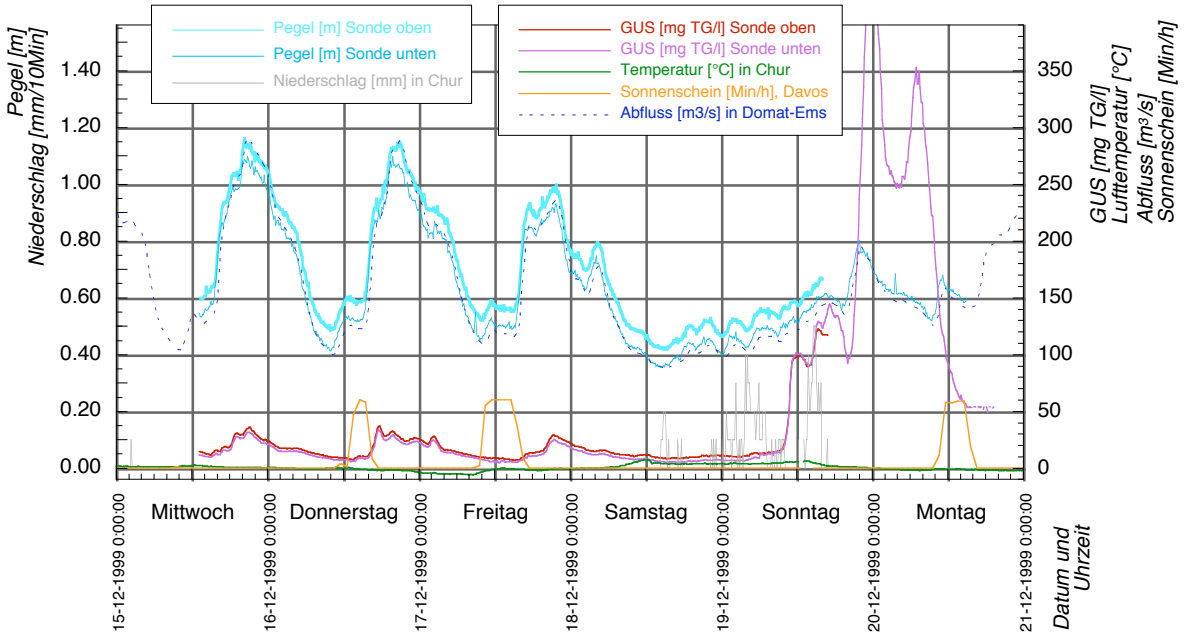


Abb. 57 *Trübe- und Pegelmessungen Teststrecke Diepoldsau vom 15.12 - 20.12.99. Dargestellt sind zudem der Verlauf des Niederschlags und der Lufttemperatur in Chur, die Sonnenscheindauer in Davos sowie der Abfluss bei Diepoldsau.*

In Abbildung 40 (Seite 51) sind die **Abfluss- und Trübeganglinien der Messstation Diepoldsau** (LHG) für die Winter 99/00 und 00/01 dargestellt.

Der Winter 99/00 war geprägt durch einen eher kalten und trockenen November mit einem Basisabfluss von 90 - 100 m^3/s und Schwallspitzen bis 320 m^3/s. Bis in den Januar reduzierte sich der Basisabfluss auf 70 m^3/s, um im Februar wieder auf 90 m^3/s anzusteigen. Ähnlich verhält sich der Verlauf der Basistrübung mit leicht erhöhten Werten im November (20 - 25 mg/l), tiefsten Werten im Januar (15 mg/l) und wieder leicht erhöhten Werten im Februar (20 - 25 mg/l). Daneben sind Einzelereignisse mit extremen Trübungen zu beobachten (20.12.99, 31.1.00, 9.2.00), die auf Niederschläge (Regen in den tieferen Lagen) zurückzuführen sind. Die eigentliche Schneeschmelze setzt am 10.3.00 ein.

Der Winter 00/01 zeigt einen eher feuchten und warmen November mit Basisabflüssen bis 160 m^3/s und Schwallspitzen von 330 m^3/s. Die Basisabflüsse sinken erst im Januar auf 65 - 70 m^3/s ab, um dann bis zur einsetzenden Schneeschmelze (9.3.01) unter 90 m^3/s zu bleiben. Dementsprechend zeigt die Trübeganglinie im November ausgeprägte Trübeschwälle mit Spitzenwerten von über 600 mg/l. Anschliessend sind bis zur Schneeschmelze - abgesehen von leicht erhöhter Trübung Mitte Februar (Wärmeeinbruch) - keine ausgeprägten Trübespitzen mehr festzustellen.

In beiden Jahren ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen Abfluss- und Trübeschwall zu erkennen, wobei die Konzentration mit dem Schwall durchschnittlich auf den 2- bis 3-fachen Wert ansteigt. Dementsprechend ist mit dem Abflussschwall eine massgebende Erhöhung der Trübung verbunden.

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass die Trübung im Alpenrhein hauptsächlich durch nachfolgende Grössen bestimmt wird:

1. Schwebstoffzufuhr

Die Schwebstoffzufuhr bestimmt das Konzentrationsniveau im Alpenrhein. Dabei kann zwischen der zugeführten Basistrübung, regelmässig wiederkehrenden und eher selten auftretenden Trübeschwällen unterschieden werden (Besonnung, resp. Regenereignisse). Ein Trübeschwall aus der Landquart kann beispielsweise die Schwebstoffkonzentration im Alpenrhein um eine Grössenordnung ansteigen lassen.

2. Abfluss

Der Abfluss ist das Transportmedium der Schwebstoffe. Bei Niederwasserabfluss findet häufig eine Ablagerung von Schwebstoffen statt, die sich vorallem bei höheren Konzentrationen in einer deutlichen Abnahme der Trübung in Fliessrichtung auswirkt. Bei grösseren Abflussschwankungen (v.a. Abflusszunahme) werden grossflächig Feinsedimente resuspendiert, wodurch sich ein Trübeschwall bildet. Ein konstant hoher Schwallabfluss führt wegen der Zufuhr von mehr oder weniger klarem Wasser zu einer Verdünnung und damit häufig zu einer Verminderung der Trübung (etwas höher oder vergleichbar mit Trübung bei Niederwasserabfluss). Daneben ist ebenfalls eine gewisse Ablagerungstendenz von Schwebstoffen in Fliessrichtung zu erkennen.

3. Morphologie

Die Morphologie einer Gewässerstrecke bestimmt das Speichervermögen bezüglich Schwebstoffen. Beim Alpenrhein kann unterschieden werden zwischen verzweigten Fliessstrecken (Mastrils), eingeengten Fliessstrecken mit Bänken (Teststrecken Bad Ragaz und Buchs) sowie kanalisierten Strecken (Teststrecke Diepoldsau).

Breite **verzweigte Fliessstrecken** wie die Mastrilser Auen verfügen über ein ausserordentlich grosses Speichervermögen bezüglich Schwebstoffen. Bei den untersuchten Abflüssen werden generell deutlich mehr Schwebstoffe abgelagert als resuspendiert. Die Umlagerung von Schwebstoffen erfolgt vorwiegend bei einer Abflusszunahme, ist aber auch bei einer Abflussabnahme festzustellen. Für die verzweigte Fliessstrecke bedeutet dies, dass bei praktisch allen in der Winterperiode vorkommenden Abflussverhältnissen Feinsedimente akkumuliert werden und weniger trübes Wasser flussabwärts weitergegeben wird (hoher Reinigungseffekt).

Eingeengte Fliessstrecken mit Bänken zeigen ein beschränktes Speichervermögen bezüglich Schwebstoffen. Die ablaufenden Prozesse sind in gedämpfter Form vergleichbar mit denjenigen in verzweigten Fliessstrecken. Unter bestimmten Verhältnissen (v.a. bei Niederwasserabfluss) wird ein Gleichgewicht zwischen Ablagerung und Resuspension erreicht (resp. ist keine Trübeabnahme festzustellen).

Kanalisierte Strecken verfügen über ein sehr kleines, praktisch vernachlässigbares Speichervermögen, das sich auf einen schmalen Uferstreifen (zwischen den Blöcken) beschränkt. In der Regel können auf der Sohle keine Schwebstoffe abgelagert werden. Dies bedeutet, dass die dem Flussabschnitt zugeführten Schwebstoffe mehr oder weniger vollumfänglich durchtransportiert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Alpenrhein bezüglich Schwebstofftransport als ein System von Abschnitten mit unterschiedlichen Speichereigenschaften betrachtet werden kann. Die verschiedenen Abschnitte wirken sich dabei mehr oder weniger stark in einer Reduktion und einer Dämpfung der Trübung aus.

3.3.2 Längenprofil Trübung Alpenrhein

Anhand der im Alpenrhein durchgeführten Trübemessungen wurde ein Längenprofil mit den Schwankungsbreiten der Basis- und der Schwalltrübungen erstellt (Abb. 58). Wegen der begrenzten Anzahl Messungen geben die Berandungen der Schwankungsbreiten keine Absolut- sondern nur Richtwerte an.

Aus Abbildung 58 lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

Basistrübung:

- Die erfasste Basistrübung schwankt flussaufwärts der Landquart zwischen 1 mg/l und 6 mg/l und flussabwärts der Landquart zwischen 2.5 mg/l und 17 mg/l.
- Bereits vor der Landquart ist eine leichte Zunahme der Basistrübung zu beobachten (sie nimmt in der verzweigten Fliessstrecke von Mastrils wieder etwas ab).
- Die Landquart kann die Basistrübung im Rhein markant erhöhen.
- Die Ill zeigt eine mit dem Rhein vergleichbare Basistrübung.
- Bei ausgeprägten Winterverhältnissen ist der Rhein mit Trübungen zwischen 1 und 3 mg/l weitgehend klar (Abb. 59).

Schwalltrübung:

- Ohne Trübeschwall aus der Landquart (infolge Besonnung und Temperaturanstieg, vgl. Kap. 3.2) bewegt sich die Trübung im gesamten Alpenrhein zwischen 10 mg/l und 40 mg/l. Der Abflussschwall führt damit etwa zu einer Vervierfachung der Trübung bei Basisabfluss. Im Längenprofil sind nur kleine Unterschiede festzustellen. Solche Zustände sind vorallem bei ausgeprägten Winterverhältnissen anzutreffen.

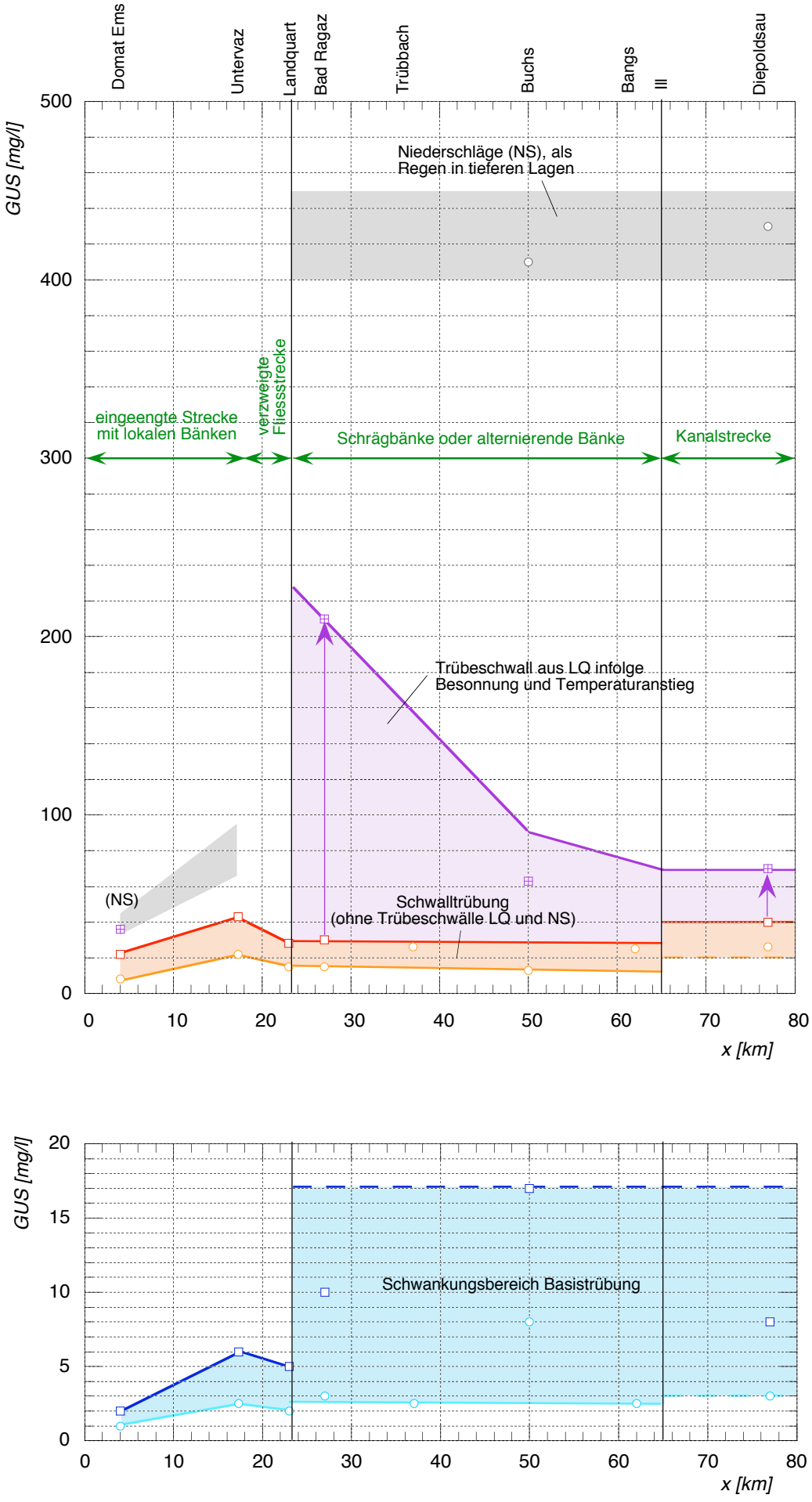


Abb. 58 Schwankungsbereich der Basistrübung (unten) und der Schwalltrübung unter Berücksichtigung von witterungsbedingter Schwebstoffzufuhr (oben).

Abb. 59

Rhein bei Sennwald (km 60) mit Kiesbank und Schnelle. Fliessrichtung von links nach rechts. Schwebstoffkonzentration um 3 mg/l, 16.1.01.



- Bei Trübeschwällen aus der Landquart, die auf Schneeschmelze infolge Erwärmung und Besonnung zurückzuführen sind, kann die Trübung des Alpenrheins unmittelbar flussab der Landquartmündung auf Konzentrationen von über 200 mg/l ansteigen. Mit zunehmender Fliessdistanz reduziert sich die Trübung infolge von Sedimentation bis zur Illmündung auf rund 70 mg/l. In der Internationalen Rheinstrecke werden die Schwebstoffe durchtransportiert (keine Verminderung der Trübung). Die auf der Sohle abgelagerten Feinsedimente werden bei den nachfolgenden Abflussschwällen zum Teil resuspendiert und weitertransportiert.
- Bei Niederschlagsereignissen mit Regen in tieferen Lagen kann die Trübung des Alpenrheins flussabwärts der Landquart auf Konzentrationen von über 400 mg/l ansteigen. Bei diesen Ereignissen können neben der Landquart auch alle flussabwärts einmündenden Seitengewässer hohe Konzentrationen mit entsprechend hoher Schwebstofffracht liefern.

  Aus dem Stau Reichenau ist bei entsprechenden Wetterlagen (Niederschlag mit Regen in tieferen Lagen) eine leicht erhöhte Trübung (ca. 40 mg/l) festzustellen, die bei den flussab einmündenden Seitengewässern weiter ansteigen dürfte (vgl. Fachbericht Limnex, Driftmessung Untervaz vom 13./14.2.00, Kap. 5.2).

4 Kolmation

4.1 Äussere Kolmation

4.1.1 Einflussgrössen und Prozesse

Die äussere Kolmation betrifft die Ablagerung von Schwebstoffen auf der Fliessgewässersohle. Dabei werden zuerst die geschützten Bereiche zwischen den grösseren Steinen aufgefüllt. Bei fortschreitender Sedimentation wird die Sohle zunehmend von Feinsedimenten überdeckt.

Massgebend für die Ablagerung von Feinpartikeln sind die Schubspannung des Abflusses und die Sinkgeschwindigkeit der Partikel. Die lokale Strömung bestimmt, ob ein bestimmtes Korn in Schweb ist, über die Sohle als Geschiebe transportiert oder abgelagert wird (Abb. 60). Dementsprechend ist beispielsweise ein Sandkorn mit d = 0.5 mm bei v < 0.4 m/s in Ruhe, bei 0.4 < v < 1.3 m/s auf der Sohle in Bewegung und bei v > 1.3 m/s in Schweb.

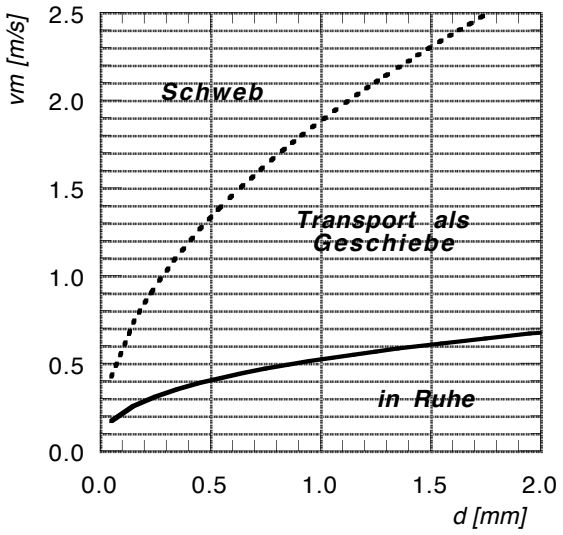


Abb. 60

Grenzgeschwindigkeiten, ob ein Korn als Schweb oder als Geschiebe transportiert wird oder sich in Ruhe befindet (aus /6/).

Aufgrund der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse kann das Flussbett in Bereiche mit unterschiedlichen Absetzeigenschaften eingeteilt werden, was zu einer gewissen Sortierung der Schwebstoffe führt:

- Im Bereich der Hauptströmung werden in der Regel Fliessgeschwindigkeiten > 0.5 m/s erreicht. Unter diesen Strömungsverhältnissen können, abgesehen von Grobsand, keine Schwebstoffe abgelagert werden. Es findet keine äussere Kolmation statt und die Gewässersohle zeigt eine saubere Deckschicht (Abb. 61).
- Bei Fliessgeschwindigkeiten zwischen 0.2 und 0.5 m/s kann sich vorwiegend Sand (0.063 < d < 2 mm) ablagern. Feinere kohäsive Partikel der Silt- und Tonfraktion sind noch in Schweb. Entsprechende Ablagerungszonen sind in den flacheren Uferbereichen entlang gut durchströmten Gewässerabschnitten oder in Rinnen bei Niederwasserabfluss zu finden (Abb. 62). Sandablagerungen werden bei zunehmender Fliessgeschwindigkeit

wieder rasch in Bewegung versetzt, was beispielsweise an der Uferlinie bei leichtem Wellenschlag beobachtet werden kann.

- Bei Fliessgeschwindigkeiten < 0.2 m/s werden die feinen Partikel der Siltfraktion (0.002 < d < 0.063 mm) abgelagert. Entsprechende Sohlenbereiche sind in Hinterwassern sowie in Uferbereichen und Flachwasserzonen, die abseits der Hauptströmung liegen, zu finden. Die kohäsiven Siltablagerungen werden erst bei Fliessgeschwindigkeiten, die deutlich grösser sind als die Grenzgeschwindigkeit der Ablagerung, wieder resuspendiert. Gewässersohlen mit Siltablagerungen zeigen häufig auch eine starke innere Kolmation (Abb. 63).
- In Stillwasserbereichen werden auch Partikel der Tonfration (d < 0.002 mm) ausse-dimentiert (Abb. 64).

Abb. 61

Saubere unkolmatierte Flusssohle im Bereich einer Schnelle. Teststrecke Mastrils. 18.8.99.



Abb. 62

Sandablagerungen entlang der Uferlinie einer Kiesbank. 18.8.99. Teststrecke Mastrils, Blick gegen die Fliessrichtung.



Abb. 63

Äussere und innere Kolmation mit Silt im Bereich einer Flachwasserzone. Teststrecke Mastrils. 18.8.99.



Abb. 64

Ablagerung aller im Wasser enthaltenen Partikel (inkl. Tonfraktion) in einem Stillwasser. Teststrecke Mastrils, 18.8.99.



Die Übergänge zwischen den Bereichen, wo die verschiedenen Schwebstofffraktionen abgelagert werden, sind fliessend. Die Durchmischung und Überlagerung der verschiedenen Fraktionen wird durch Abflussschwankungen verstärkt, wobei sich mit den Strömungsverhältnissen auch die oben beschriebenen Ablagerungsbereiche verlagern:

Bei einer Abflusszunahme werden Sand- und Siltablagerungen zumindest teilweise umgelagert, resuspendiert und flussab transportiert (Abb. 65 und 66). Gleichzeitig bilden sich neue Ablagerungszonen in zurückversetzten oder neu benetzten Uferbereichen.

Umgekehrt können bei einer Abflussabnahme frühere Sandablagerungen durch Silt überdeckt werden (Abb. 67).



Abb. 65

Sandablagerungen entlang einer flachen Kiesbankböschung, Teststrecke Mastrils. 18.8.99.



Abb. 66

Reduzierte Sandablagerungen infolge Resuspension, Fläche entsprechend Abb. 65, Teststrecke Mastrils. 14.9.99.

Abb. 67

Überlagerung von Sandablagerungen durch Silt im Bereich einer trockengefallenen Flachwasserzone. Teststrecke Mastrils, 18.8.99.



Neben der generellen Strömung in einem Profil beeinflussen auch lokale Strukturen die äussere Kolmation:

- Beruhigte Sohlenbereiche im Strömungsschatten grösserer Steine verlagern sich bei einer Abflussänderung, was zur Resuspension und Umlagerung von Feinsedimenten führt. Bei konstanten Abflussverhältnissen können Schwebstoffe abgelagert werden.
- In gewundenen Flussabschnitten verlagert sich die Hauptströmung bei einer Abflussänderung (Streckung der Hauptstromlinie bei zunehmendem Abfluss). Dadurch werden Feinsedimente, die bei Sunk in beruhigten Zonen abgelagert werden, beim Abflussanstieg resuspendiert. Gleichzeitig bilden sich neue beruhigte Zonen. Derselbe Prozess findet auch bei einer Abflussabnahme statt. Dieser Effekt ist beispielsweise beim

Übergang von Schnellen und Kolken, entlang angeströmter Ufer oder beim Zusammenfluss zweier Teilgerinne zu beobachten.

- In Widerwassern (z.B. unteres Ende von Bänken) verlagert sich bei einer Abflussänderung die Wirbelzone (Walze). Dies führt zu Resuspension und Umlagerung von Feinsedimenten. Bei konstantem Abfluss (Sunk und Schwall) werden Schwebstoffe akkumuliert.

4.1.2 Äussere Kolmation in den Teststrecken

Im Alpenrhein führen die täglichen Abflussschwankungen des Winterschwalls zu stark variierenden Strömungsverhältnissen (Kap. 2.2.3). Alle Gewässerbereiche, von der Schnelle über die Rinne bis zum Hinterwasser, sind in verschiedener Art von diesen fast stets ändernden Randbedingungen betroffen.

Für die Beurteilung der äusseren Kolmation wurde die Flussohle aufgrund der Strömungsverhältnisse bei Sunk und Schwall in folgende vier Bereiche eingeteilt:

1 Gewässerbereiche, wo die Fliessgeschwindigkeit immer > 0.5 m/s ist (auch bei Sunk). Auf der Sohle werden keine Schwebstoffe abgelagert (keine äussere Kolmation möglich). In diesen Transportzonen zeigt das Flussbett eine saubere Kiessohle.

2 Gewässerbereiche, wo die Fliessgeschwindigkeit bei Sunk < 0.5 m/s und bei Schwall > 0.5 m/s ist (Resuspensionszonen). Bei Sunk können vor allem Schwebstoffe der Sandfraktion abgelagert werden, die bei Schwall wieder resuspendiert und weitertransportiert werden. Der Deckungsgrad der Sohle mit Feinsedimenten ist wegen der regelmässigen Resuspension klein. Bei stark ausgeprägten Schwallganglinien ist der Flächenanteil der Resuspensionszonen gross.

3 Gewässerbereiche, wo die Fliessgeschwindigkeit immer < 0.5 m/s ist (Ablagerungs- oder Sedimentationszonen). Dabei handelt es sich hauptsächlich um zurückversetzte Flachwasserzonen, Hinterwasser und die nur bei Schwall benetzten, nicht der direkten Strömung ausgesetzten Uferbereiche. In diesen Zonen können immer Schwebstoffe abgelagert werden. Die Sohlenoberfläche wird mit der Zeit vollständig überdeckt und in den Hinterwassern kann Ablagerungsmächtigkeit mehr als 1 m erreichen.

4 Gewässerbereiche, wo die Fliessgeschwindigkeit immer < 0.2 m/s ist (Teilfläche von Nr. 3). In diesen Ruhigwasserzonen werden vorwiegend Schwebstoffe der Silt- und Tonfraktion abgelagert.

In den Plänen 2.1 bis 2.3 ist die äussere Kolmation in den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs dargestellt[1]. Die Festlegung der 4 differenzierten Gewässerzonen stützt sich auf die

[1] Vereinfachte Darstellung, resp. grobe Annäherung an die Verhältnisse in Natur.

Staukurvenberechnungen von Kapitel 2.2.3 (mittlere Fliessgeschwindigkeit) sowie auf Verifizierungen im Feld. Die Darstellungen zeigen, welche Bereiche zunehmend mit Feinsedimenten überdeckt werden, wo wiederholt mit äusserer Kolmation zu rechnen ist und wo über den gesamten Winter eine saubere Kiessohle erhalten bleibt.

Teststrecke Mastrils

In der verzweigten Fliessstrecke von Mastrils konzentrieren sich die Ablagerungszonen vorwiegend auf *Uferbereiche*, die entwedet von der Strömung abgewandt sind oder erst bei Schwallabfluss benetzt werden sowie auf die vom Unterwasser angeschlossenen *Hinterwasser*. In den Uferbereichen wird vorwiegend Sand und in den Hinterwassern tendenziell mehr Silt abgelagert.

Resuspensionszonen sind in der langen Zulaufrinne zwischen der Rohrbrücke (km 19.8) und km 20.6, entlang der Ufer, in gut überströmten Flachwasserbereichen sowie in der kurzen Rinne bei km 23.0 zu finden.

Die Teststrecke Mastrils zeigt im Hauptstrombereich, abgesehen von zwei Rinnenstrecken, eine fast durchgehende Transportzone (verglichen mit Bad Ragaz und Buchs ausgeglicheneres Längenprofil).

Teststrecke Bad Ragaz

Die Teststrecke Bad Ragaz zeigt im oberen Bereich der Bänke (Flachwasser und Hinterwasser) ausgedehnte Sedimentationszonen (Feinsedimentablagerungen mit geringer bis mittlerer Mächtigkeit). Mit zunehmender Distanz von der Hauptströmung lagern sich in diesen Flachwasserzonen vermehrt feine Schwebstoffpartikel (Silt) ab. Weitere Sedimentationszonen befinden sich im Schwankungsbereich der Uferlinie entlang der Bänke (v.a. Sand).

Die Rinnen sind wegen der tiefen mittleren Fliessgeschwindigkeit ausgedehnte Resuspensionszonen. Hier kann bei abnehmendem Abfluss, oder bei den ausgeprägten Trübeschwällen aus der Landquart, Sand abgelagert werden. Weitere Resuspensionszonen befinden sich im Uferbereich der Furten.

Bad Ragaz verfügt über vergleichsweise wenig Transportzonen, die sich auf die Furten, Schnellen und Kolkbereiche konzentrieren.

Teststrecke Buchs

Sedimentationszonen befinden sich am oberen Ende der Bänke in den Flach- und Hinterwasserzonen (Feinsedimentablagerungen mit geringer Mächtigkeit) sowie in den von unten angeschlossenen Hinterwassern (Feinsedimentablagerungen mit grosser Mächtigkeit). In den zurückversetzten Bereichen der Hinterwasser lagert sich vermehrt vorallem Silt ab. Entlang der Ufer ist die Sedimentationszone schmal (viel Blockwurf).

Die Teststrecke zeigt ausgedehnte Resuspensionszonen im Bereich der Rinnen (zentraler Rinnenteil mit angrenzenden Uferbereichen), in der Übergangszone zwischen Furten und Hinterwassern sowie lokal in den oberen Kolkbereichen (variable Hauptstromrichtung).

Die Transportzonen konzentrieren sich auf die Furten, Schnellen und Kolke sowie die rascher fliessenden Rinnenabschnitte. Die Ausdehnung der Transportzonen ist, wegen dem weniger stark abgestuften Gefälle und der damit verbundenen leicht höheren Fliessgeschwindigkeit in den Rinnen, etwas grösser als bei Bad Ragaz.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Teststrecken können wie folgt zusammengefasst werden (vgl. auch Abbildungen 68 und 69):

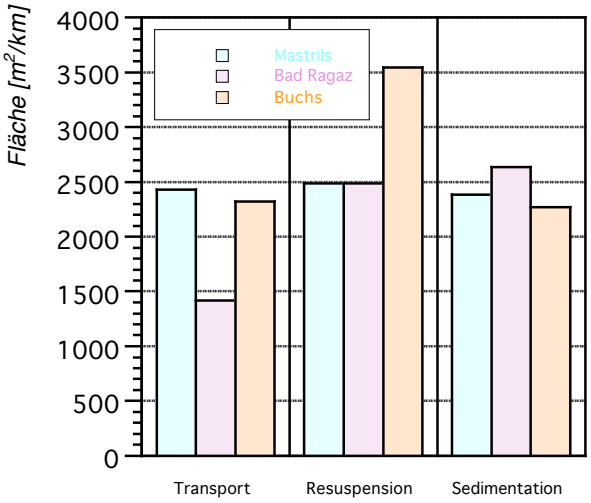


Abb. 68

Transport-, Resuspensions- und Sedimentationsflächen pro km Flusslänge in den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs.

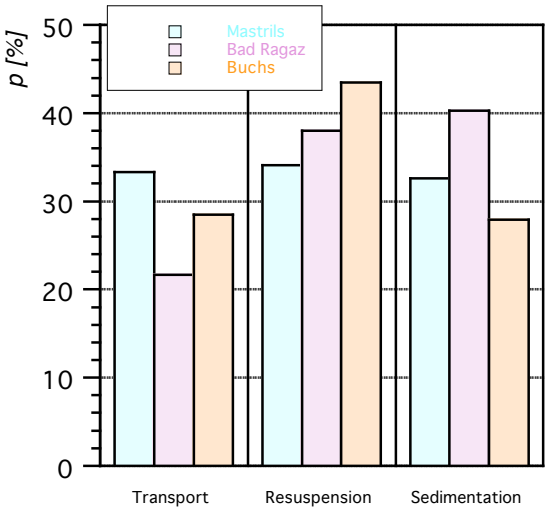


Abb. 69

Prozentuale Anteile der Flächen mit Transport, Resuspension und Sedimentation an der gesamten benetzten Fläche bei den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs.

- Die Teststrecke Mastrils verfügt über eine fast zusammenhängende Transportzone (bei Bad Ragaz und Buchs durch Resuspensionszone unterbrochen).
- Bad Ragaz und Buchs verfügen über ausgedehnte Resuspensionszonen in den Rinnen, Mastrils eher in überströmten Flachwassern. Der hohe Anteil an Resuspensionszonen bei Buchs wird wegen dem Einfluss der Blockschwelle etwas überbewertet (Abb. 68 und 69).
- Bei Bad Ragaz und Buchs liegen die Sedimentationszonen in Flachwassern und oben angeschlossenen Hinterwassern (bei Buchs auch bei unten angeschlossenen Hinterwassern). Bei Mastrils befinden sich die Sedimentationszonen vorwiegend in Uferzonen, die abseits der Hauptströmung liegen, sowie in unten angeschlossenen Hinterwassern.
- Sedimentationszonen mit grosser Mächtigkeit befinden sich in unten angeschlossenen Hinterwassern (v.a. Mastrils, aber auch Buchs).

4.2 Innere Kolmation

4.2.1 Einflussgrössen und Prozesse

Die innere Kolmation betrifft die Einlagerung von Feinpartikeln in den Lückenraum der Gewässersohle. Der Transport der Partikel in das Porensystem erfolgt durch den hydrodynamischen Druck der Sickerströmung (Infiltration von Flusswasser) und infolge der Schwerkraft (nur bei grösseren Partikeln relevant).

Die Feinpartikel werden im oberen Sohlenbereich (Filterschicht) abgelagert, wodurch der Lückenraum verkleinert, die Sohle verfestigt und die Durchströmung (Frischwasserzufuhr) reduziert wird.

Die verschiedenen Fraktionen der im Flusswasser enthaltenen Schwebstoffe sind in unterschiedlicher Art an der inneren Kolmation beteiligt. Die Einlagerung von Sand führt zu einer Verringerung der Porendurchmesser (aber zu keiner massgebenden Durchlässigkeitsabnahme), was die Ab- und Anlagerung der feinen und feinsten Partikel in der obersten Sohlenschicht fördert. Für die Verfestigung und Durchlässigkeitsabnahme massgebend sind vor allem die kohäsiven Partikel der Silt- und Tonfraktion.

Bei kolmatierten Sohlen befindet sich die undurchlässigste Schicht häufig unmittelbar unter der Deckschicht (Abb. 70), kann bei sehr lockeren Sohlenbereichen (sog. Rollkieslagen) aber auch tiefer liegen (Abb. 71).



Abb. 70

Kolmationshorizonte unter der Deckschicht. Fliessrichtung von links nach rechts. Kolmationsversuche VAW-ETHZ, /6/.

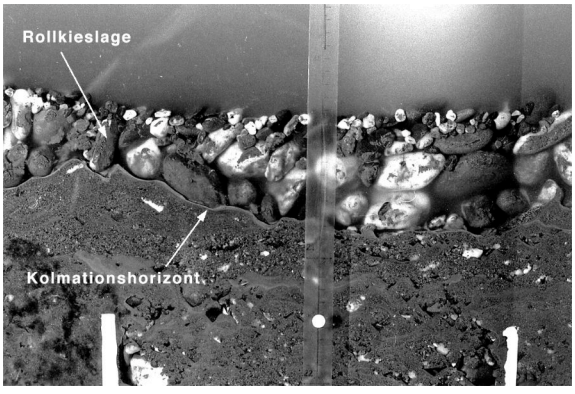


Abb. 71

Kolmationshorizont unter einer Rollkieslage. Fliessrichtung von links nach rechts. Kolmationsversuche VAW-ETHZ, /6/.

Die innere Kolmation von Fliessgewässersohlen wird durch folgende Einflussgrössen bestimmt:

Trübung (Schwebstoffkonzentration)

Die Schwebstoffkonzentration bestimmt die Verfügbarkeit von Feinpartikeln, welche in der Sohle abgelagert werden können (Kolmationsmasse). Bei hohen Schwebstoffkonzentrationen werden bei einer bestimmten Infiltrationsrate mehr Partikel im Porenraum abgelagert als bei kleinen Konzentrationen, d.h. dass hohe Trübungen zu einer beschleunigten Kolmation führen. Bei klarem Wasser (Schwebstoffkonzentration sehr klein) findet keine Kolmation statt.

Grundwasserspiegel (hydraulischer Gradient)

Die Wasserspiegeldifferenz zwischen Fliessgewässer und Grundwasser bestimmt den hydraulischen Gradienten der Sickerströmung. Bei der Infiltration von Flusswasser bewirkt ein hoher hydraulischer Gradient, dass die Feinpartikel tiefer in die Sohle transportiert werden und damit mehr Schwebstoffpartikel für eine bestimmte Durchlässigkeitsabnahme erforderlich sind. Hohe hydraulische Gradienten führen demnach auch zu mächtigeren Kolmationsschichten, die längerfristig zu tieferen Durchlässigkeiten, resp. stärkerer Kolmation der Sohle führen.

Umgekehrt ist bei einer Exfiltration von Grundwasser keine innere Kolmation möglich. Dies ist beispielsweise in Schnellen der Fall, wo durch die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser eine Sickerströmung von der Furt (Infiltration) zur Schnelle (Exfiltration) induziert wird. Bei kleinen negativen (aus der Sohle gerichteten) Gradienten bleibt eine allfällige innere Kolmation erhalten. Bei grösseren negativen Gradienten kommt es zu einem Freispülen der Porengänge und damit zu einer Dekolmation der Sohle.

Abfluss (Sohlenschubspannung)

Die Abflusstiefe und das Gefälle bestimmen die auf die Sohle einwirkende Schubspannung. Eine zunehmende Belastung der Sohle führt zu einer dichteren Lagerung der Deckschicht und der Feinpartikel nahe der Sohlenoberfläche und damit zu einer beschleunigten Kolmationsentwicklung. Dementsprechend kolmatiert die Sohle bei Niederwasserabfluss langsamer als bei höheren Abflüssen (z.B. bei Schwall).

Steigt die dimensionslose Sohlenschubspannung Θ über den Grenzwert Θ_K an, so beginnt die Dekolmation der Sohle (keine flächendeckende Durchlässigkeitszunahme, sondern örtliches Spülen der Filterschicht). Bei weiter ansteigender Schubspannung wird der Grenzwert der Deckschichtstabilität Θ_D erreicht, wo die Sohle vollständig dekolmatiert.

Wassertemperatur (Reynoldszahl)

Die Wassertemperatur beeinflusst die Zähigkeit des Wassers und damit die Reynoldszahl. Bei höherer Wasertemperatur und geringerer Zähigkeit stellt sich eine höhere Filtergeschwindigkeit ein, wodurch die Feinpartikel tiefer in die Sohle transportiert werden. Dies führt zu einer verlangsamten Durchlässigkeitsabnahme (Effekt vergleichbar mit hohen Sicker-Gradienten).

Kornverteilung der Sohlenmaterials

Die Kornverteilung des Sohlenmaterials bestimmt die Porosität, resp. den verfügbaren Porenraum der unkolmatierten Sohle. Schmale Kornverteilungen verfügen über eine höhere Porosität als breite.

Bei Sohlenmaterial mit schmaler Kornverteilung (grösserer Porenraum) werden die Schwebstoffe tiefer in die Sohle transportiert. Zudem sind für das Auffüllen des grösseren Porenvolumens mehr Schwebstoffe erforderlich. Flusssohlen mit schmaler Kornverteilung kolmatieren langsamer als solche mit breiter Kornverteilung. Wegen der mächtigeren Kolmationsschicht sinkt die Durchlässigkeit langfristig jedoch auf einen kleineren Wert ab (als bei Flusssohlen mit breiter Kornverteilung).

Der Einfluss der Kornverteilung auf die Kolmationsentwicklung wird durch das Verhältnis der Korndurchmesser d_{10} und d_m charakterisiert.

4.2.2 Kolmationsberechnungen

Die Entwicklung der inneren Kolmation im Winterhalbjahr wurde für einzelne Querprofile nach /6/ berechnet. Die Kolmationsberechnungen zeigen den zeitlichen Verlauf der folgenden Grössen an:

- Die Durchlässigkeit der Gewässersohle (massgebende Schichtstärke $h_K = 3 \bullet d_m + 0.01$ [m]). Die Durchlässigkeit der unkolmatierten Sohle k_0 lässt sich aus der Kornverteilung bestimmen.
- Die Kolmationsmasse gibt das Volumen der in der Sohle abgelagerten Feinpartikel an (resp. den verminderten Porenraum).
- Das über die Berechnungsdauer integrierte Sickerwasserwasservolumen kann als Mass für die Grundwasserneubildung betrachtet werden.

Als Eingabegrössen der Kolmationsberechnungen dienten die Ganglinien (Periode vom 1. Nov. 99 bis zum 30. März 2000)

- der Schwebstoffkonzentration und der Wassertemperatur bei Diepoldsau (LHG),
- des Abflusses bei Domat Ems (Rhein), Felsenbach (Landquart) und Diepoldsau (Rhein),
- verschiedener Grundwasserpegel
- sowie die Siebanalysen des Sohlenmaterials (HTL Rankweil).

Bei den Berechnungen in allen Teststrecken wurde davon ausgegangen, dass die von der LHG bei Diepoldsau erfassten Ganglinien der Trübung und der Wassertemperatur repräsentativ sind.

In Tabelle 10 sind die durchgeführten Berechnungen zusammengestellt. Die Berechnungen in einem Profil wurden für den Bereich des Talwegs (höhere Schubspannung) und die Böschung (tiefere Schubspannung) durchgeführt.

Neben den Kolmationsberechnungen für den Istzustand (mit den gemessenen Ganglinien) wurden Vergleichsberechnungen für den unbeeinflussten „natürlichen“ Zustand durchgeführt. Dazu wurden bei den Abfluss- und Trübeganglinien die Schwallanteile entfernt und nur dort ein Anstieg belassen, wo dies aufgrund der Witterung nachzuweisen war (insbesondere bei Niederschlagsereignissen mit deutlich erhöhtem Abfluss). Diese Vergleichsberechnungen wurden in allen Profilen durchgeführt.

Bei Bad Ragaz, Profil km 25.8, wurden zudem drei Kontrastberechnungen durchgeführt. Der **erste Kontrastversuch** betrifft eine um 50 % erhöhte Trübeganglinie (gegenüber den in Diepoldsau gemessenen Werten). Damit soll abgeschätzt werden, inwieweit sich die bei Bad Ragaz effektiv höhere Trübung (gegenüber Diepoldsau) auf die innere Kolmation auswirken dürfte. Beim **zweiten Kontrastversuch** wurde der Abflussschwall mit der Ganglinie ohne Trübeschwall kombiniert. Damit kann die Bedeutung der Trübung auf die Entwicklung der inneren Kolmation abgeklärt werden (resp. wie sich die innere Kolmation entwickeln würde, wenn die Trübung bei unverändertem Abflussschwall massiv reduz iert werden könnte). Der **dritte Kontrastversuch** betrifft den umgekehrten Fall mit Trübeschwall bei ausbleibendem Abflussschwall.

In der Teststrecke Mastrils wurde wegen fehlenden Grundwasserstandsmessungen mit Höhenanschluss auf Kolmationsberechnungen verzichtet (vgl. Kap. 2.1.5).

Nr.	Teststrecke	Profil km	Morphologie	Abflussganglinie	Trübeganglinie
1.1	Bad Ragaz	25.8	Furt	$AR_{Domat/Ems}+LQ_{Felsenbach}$	Diepoldsau
1.2				ohne AS	ohne TS
1.3	Kontrastversuch	25.8K	Furt	$AR_{Domat/Ems}+LQ_{Felsenbach}$	1.5 • Diepoldsau
1.4	Kontrastversuch	25.8K	Furt	$AR_{Domat/Ems}+LQ_{Felsenbach}$	ohne TS
1.5	Kontrastversuch	25.8K	Furt	ohne AS	Diepoldsau
2.1		26.2	Rinne	$AR_{Domat/Ems}+LQ_{Felsenbach}$	Diepoldsau
2.2				ohne AS	ohne TS
3.1	Buchs	51.0	Rinne	$AR_{Domat/Ems}+LQ_{Felsenbach}$	Diepoldsau
3.2				ohne AS	ohne TS
4.1	Diepoldsau	76.0	ebene Sohle	$AR_{Diepoldsau}$	Diepoldsau
4.2				ohne AS	ohne TS

Tabelle 10 Überblick der durchgeführten Kolmationsberechnungen. TS = Trübeschwall, AS = Abflussschwall.

4.2.2.1 Teststrecke Bad Ragaz, Profil km 25.8 (Furt)

In den Abbildung 72 und 73 sind der Verlauf des Abflusses (Q), der Trübung (C) und der dimensionslosen Sohlenschubspannung Theta (Θ) mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall dargestellt. Die Ganglinien beginnen am 1. November 1999 und enden am 30. März 2000. Die Abflussganglinie wurde aus der Überlagerung der Ganglinien von Domat Ems und Felsenbach (Landquart) gebildet. Eine Zeitverschiebung wurde nicht berücksichtigt.

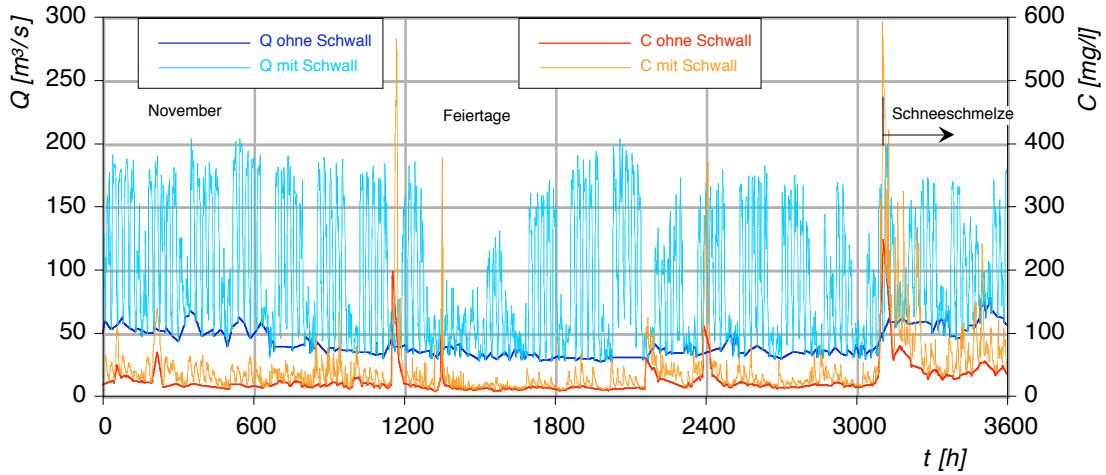


Abb. 72 *Ganglinien des Abflusses und der Trübung mit und ohne Berücksichtigung des Schwalls. Zeitreihe vom 1.11.99 bis zum 30.3.00.*

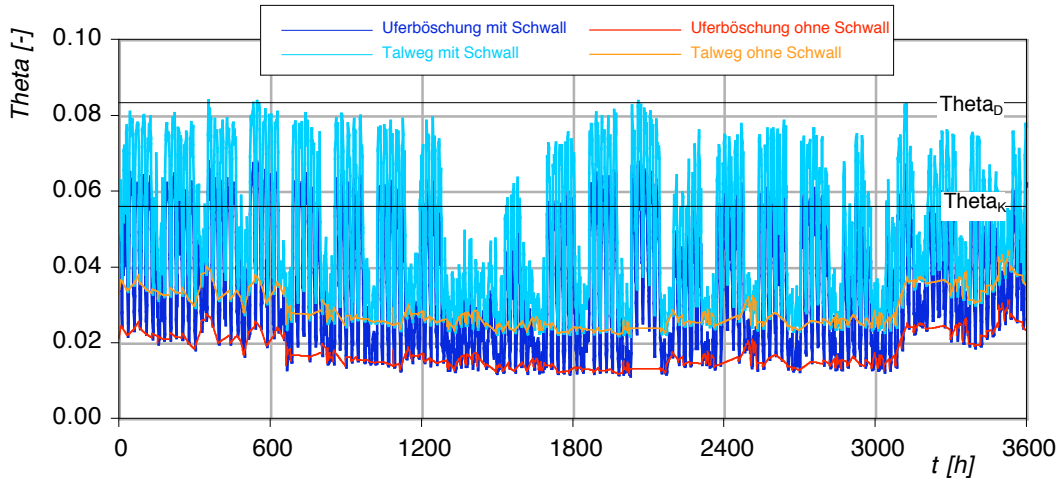


Abb. 73 *Bad Ragaz, Profil km 25.8, Furt. Ganglinien der dimensionslosen Sohlenschubspannung für den tiefen Profilbereich (Talweg) und die Profilböschung mit und ohne Berücksichtigung des Schwalls. Zeitreihe vom 1.11.99 bis zum 30.3.00.*

In Abbildung 72 zu erkennen sind der erhöhte Basisabfluss im November, die Feiertage mit reduziertem Abflussschwall und Trübung, Einzelereignisse mit extremer Trübung sowie die erhöhten Abfluss- und Trübewerte nach einsetzender Schneeschmelze.

In Abbildung 73 sind die Grenzwerte Θ_K und Θ_D eingezeichnet. Die Graphik zeigt, dass bei Schwallabfluss der Grenzwert bezüglich Dekolmationsbeginn (Θ_K) deutlich überschritten wird und im Bereich des Talwegs bis an den Grenzabfluss der Deckschicht reicht. Dies bedeutet, dass es bereichsweise zu einem Freispülen der Filterschicht (einer Dekolmation der Sohle) kommt. Ohne Schwall wird Θ_K nie erreicht.

In den Abbildungen 74 bis 76 sind der berechnete Verlauf der Sohlendurchlässigkeit, der Kolmationsmasse und des integrierten Sickerwasservolumens dargestellt. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass keine Dekolmation der Sohle stattfindet, was (wie oben erwähnt) nicht für die gesamte Furt zutrifft.

Abbildung 74 zeigt einen charakteristischen Verlauf der Kolmationsentwicklung. Anfänglich nimmt die Durchlässigkeit bei hoher Infiltrationsrate rasch ab. Mit fortschreitender Kolmation findet dieser Prozess zunehmend verzögert statt. Erkennbar sind die Einzelereignisse mit hoher Trübung (nach 1150, 2400 und 3150 h), wo die Durchlässigkeit kurzfristig etwas stärker absinkt.

Eine entsprechende Entwicklung zeigt sich in den Abbildungen 75 und 76. Die abgelagerte Kolmationsmasse und das Sickerwasservolumen nehmen anfänglich rasch zu, um mit fortschreitender Kolmation verlangsamt anzusteigen.

Alle drei Abbildungen zeigen einen massgebenden Unterschied zwischen den Berechnungen mit und ohne **Abfluss- und Trübeschwall**. Mit Schwall (Istzustand) sinkt die Durchlässigkeit der Sohle auf tiefere Werte (Abnahme um 33 %), die Kolmationsmasse steigt um 30 % und durch den ständig benetzten Sohlenbereich infiltriert etwa 35 % weniger Wasser[2]. Dies zeigt, dass der im Winter vorherrschende Schwall einen massgebenden Einfluss auf die innere Kolmation ausübt.

Die Kolmationsentwicklung entlang der Uferböschung und im Bereich des Talwegs zeigt nur geringe Unterschiede, die auf die unterschiedliche Sohlenschubspannung zurückzuführen sind. Die im Talweg höhere Belastung führt zu einer grösseren Durchlässigkeitsabnahme und zu einem leicht reduzierten Sickerwasservolumen. Weil weniger Wasser infiltriert, ist die Kolmationsmasse im Bereich des Talwegs kleiner als im Böschungsbereich.

[2] Bezüglich der Grundwasserneubildung nicht berücksichtigt ist das bei Schwall in der Wasserwechselzone infiltrierende Flusswasser.

Abb. 74

Bad Ragaz, km 25.8, Furt.

*Verlauf der **Sohlendurchlässigkeit** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend von der Durchlässigkeit des unkolmatierten Sohlenmaterials für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

Dargestellt sind zudem die Durchlässigkeiten der Kontrastversuche (immer Talweg).

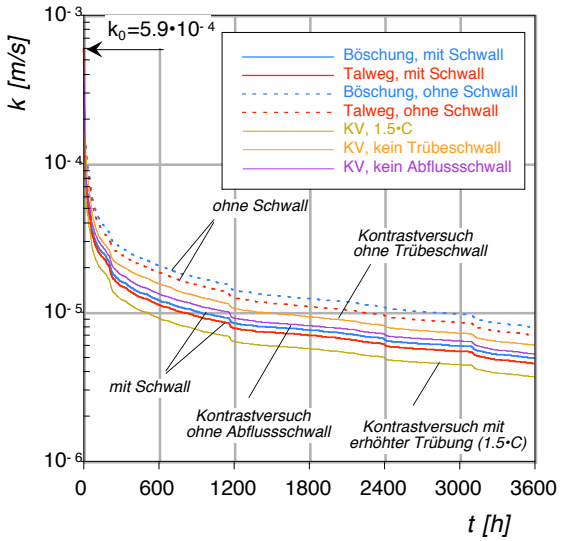


Abb. 75

Bad Ragaz, km 25.8, Furt.

*Verlauf der abgelagerten **Kolmationsmasse** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend vom unkolmatierten Sohlenmaterial für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

Dargestellt sind zudem die Kolmationsmassen der Kontrastversuche (immer Talweg).

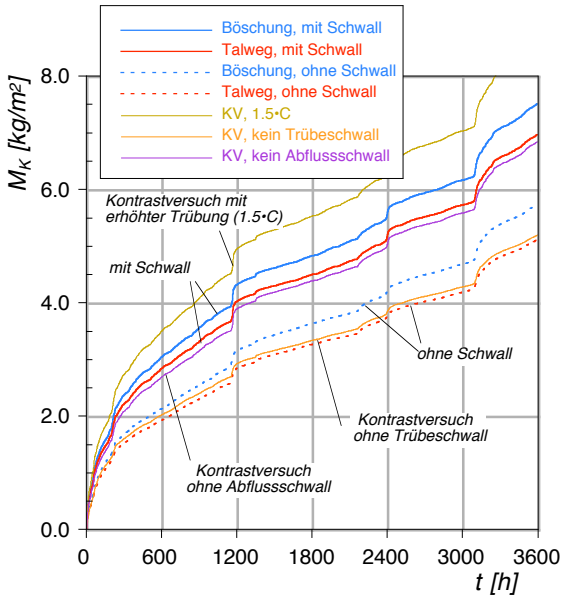
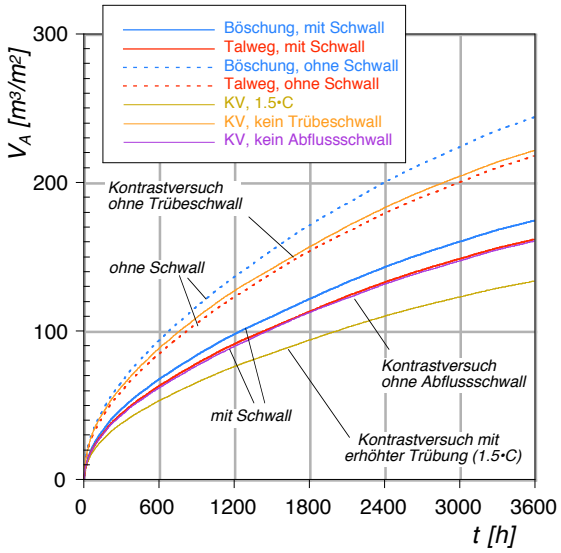


Abb. 76

Bad Ragaz, km 25.8, Furt.

*Verlauf des aufsummierten **Sickerwasservolumens** vom 1.11.99 - 30.3.00 für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

Dargestellt sind zudem die Sickerwasservolumen der Kontrastversuche (immer Talweg).



Kontrastversuch 1 (erhöhte Trübung)

Kontrastversuch 1 zeigt, dass mit gegenüber Diepoldsau erhöhter Schwebstoffkonzentration, wie dies zumindest zeitweise in Bad Ragaz beobachtet werden kann, die innere Kolmation verstärkt zunimmt. Besonders deutlich zeigt sich dies bei der Kolmationsmasse und dem Sickerwasservolumen (hellbraune Linie).

Kontrastversuch 2 (ausbleibender Trübeschwall)

Der ausbleibende Trübeschwall führt zu einer stark reduzierten inneren Kolmation, die fast mit den natürlichen Verhältnissen (kein Abfluss- und Trübeschwall) vergleichbar ist. Dies zeigt, dass zur Verringerung der inneren Kolmation in erster Linie die Trübung reduziert werden muss.

Kontrastversuch 3 (ausbleibender Abflussschwall)

Der ausbleibende Abflussschwall (Trübeschwall entsprechend Istzustand) wirkt sich nur geringfügig auf die Entwicklung der inneren Kolmation aus. Die Durchlässigkeit nimmt etwas weniger ab und die Kolmationsmasse ist etwas kleiner als bei den Verhältnissen mit Abflussschwall. Beim Sickerwasservolumen ist kein Unterschied feststellbar. Dies bedeutet, dass der reine Abflussschwall, abgesehen von möglichen örtlichen Dekolmationserscheinungen, keinen namhaften Einfluss auf die innere Kolmation ausübt.

4.2.2.2 Teststrecke Bad Ragaz, Profil km 26.2 (Rinne)

In einer Rinnenstrecke führt das flachere Gefälle zu tieferen Sohlenschubspannungen und der tiefe Wasserspiegel im Längenprofil zu kleinen Gradienten der Sickerströmung. Beide Einflüsse führen gegenüber der Furtstrecke zu einer langsameren Kolmationsentwicklung.

Abbildung 77 zeigt die Ganglinien der dimensionslosen Sohlenschubspannung für den Talweg und die Uferböschung mit und ohne Abflussschwall (Abfluss- und Trübeschwall entsprechend Abb. 72). Die Grafik zeigt die tiefen Schubspannungen bei ausbleibendem Schwall von $\Theta = 0.005 - 0.01$ und die hohen Werte bei Schwallabfluss von $\Theta = 0.04 - 0.08$. Im Talweg wird Θ_K regelmässig überschritten (örtliche Dekolmation), gegen die Böschungen hin jedoch nicht mehr erreicht.

Die Abbildungen 78 bis 80 veranschaulichen die Entwicklung der Durchlässigkeit, der Kolmationsmasse und des Sickerwasservolumens. Verglichen mit der Furt zeigt die Kolmationsentwicklung einen zwar ähnlichen, aber gedämpften Verlauf. Am deutlichsten zeigt sich dies bei der abgelagerten Kolmationsmasse, die (sowohl mit als auch ohne Schwall) um 40 % geringer ausfällt. Dies bedeutet, dass die Sohle in den Rinnenstrecken eine deutlich geringere innere Kolmation aufweist als in den Furten.

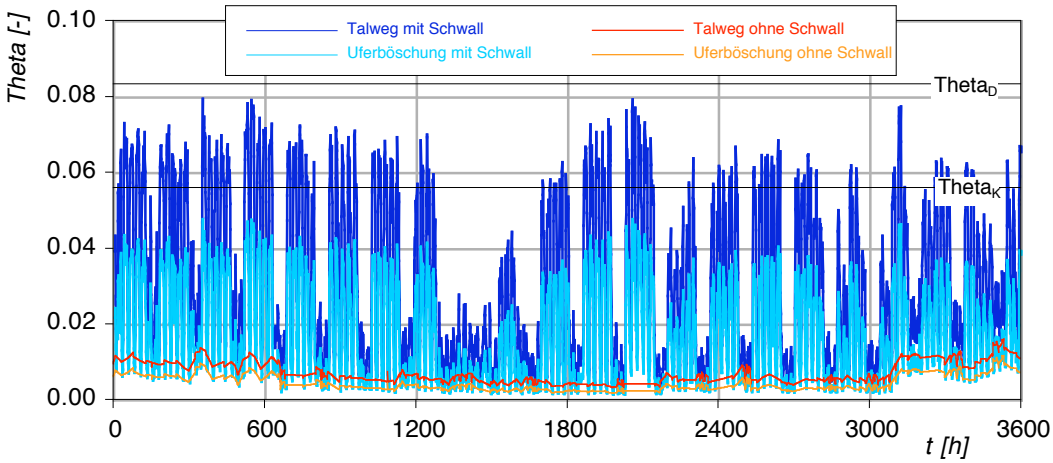


Abb. 77 *Bad Ragaz, Profil km 26.2, Rinne. Ganglinien der dimensionslosen Sohlenschubspannung für den tiefen Profilbereich (Talweg) und die Profilböschung mit und ohne Berücksichtigung des Schwalls. Zeitreihe vom 1.11.99 bis zum 30.3.00.*

Wegen dem kleineren hydraulischen Gradienten (tieferer Flusswasserspiegel) ist trotz geringerer Kolmation das über die Berechnungsperiode infiltrierte Sickerwasservolumen kleiner als in der Furt.

Der Einfluss des täglichen Abfluss- und Trübeschwalls auf die Kolmationsentwicklung äussert sich in einer Abnahme des k-Werts um 43 %, einer Zunahme der Kolmationsmasse um 15 % und einer Abnahme des Sickerwasservolumens um 36 % (gegenüber den natürlichen Abfluss- und Trübeverhältnissen).

Abb. 78

Bad Ragaz, km 26.2, Rinne.

*Verlauf der **Sohlendurchlässigkeit** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend von der Durchlässigkeit des unkolmatierten Sohlenmaterials für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

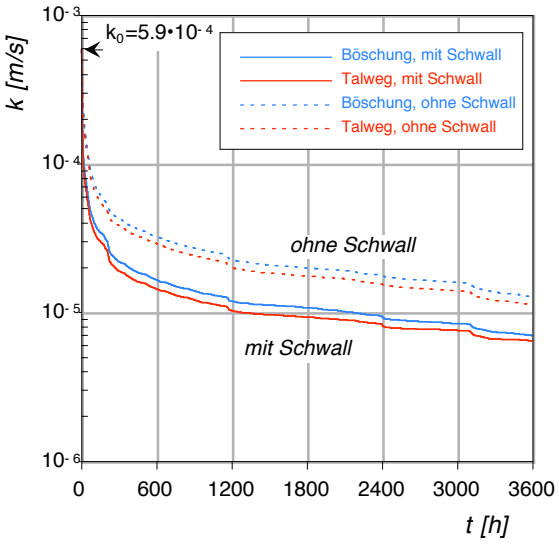


Abb. 79

Bad Ragaz, km 26.2, Rinne.

*Verlauf der abgelagerten **Kolmationsmasse** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend vom unkolmatierten Sohlenmaterial für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

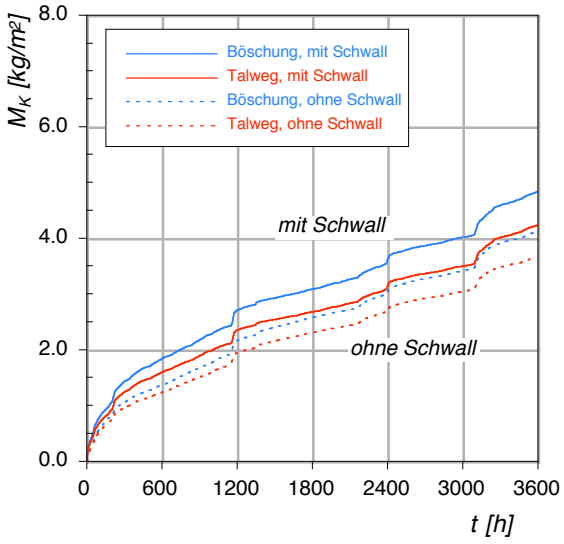
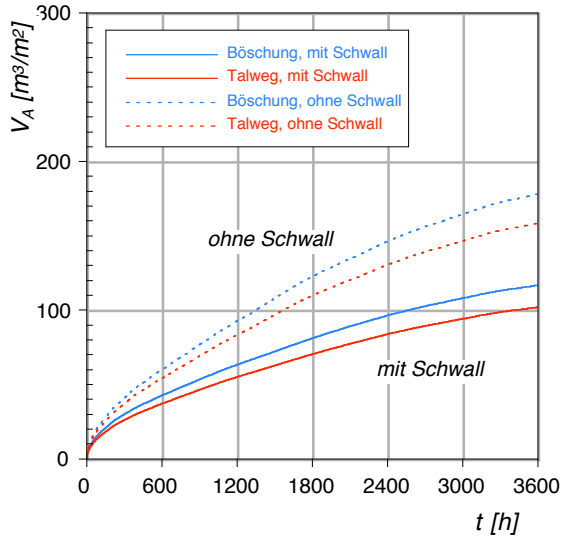


Abb. 80

Bad Ragaz, km 26.2, Rinne.

*Verlauf des aufsummierten **Sickerwasser-volumens** vom 1.11.99 - 30.3.00 für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*



4.2.2.3 Teststrecke Buchs, Profil km 51.0 (Rinne)

Die Teststrecke Buchs befindet sich unmittelbar flussabwärts der Blockrampe Buchs. Der Vergleich der Ganglinien des Rhein- und des Grundwasserspiegels zeigt, dass sich hier bei Schwall und Sunk In- und Exfiltration abwechseln (Abb. 81). Bei Schwall infiltriert Rheinwasser (fortschreitende innere Kolmation) und bei Sunk, resp. bei Niederwasserabfluss, exfiltriert Grundwasser (keine weiterführende innere Kolmation). Unter diesen Verhältnissen können keine zuverlässigen Kolmationsberechnungen durchgeführt werden.

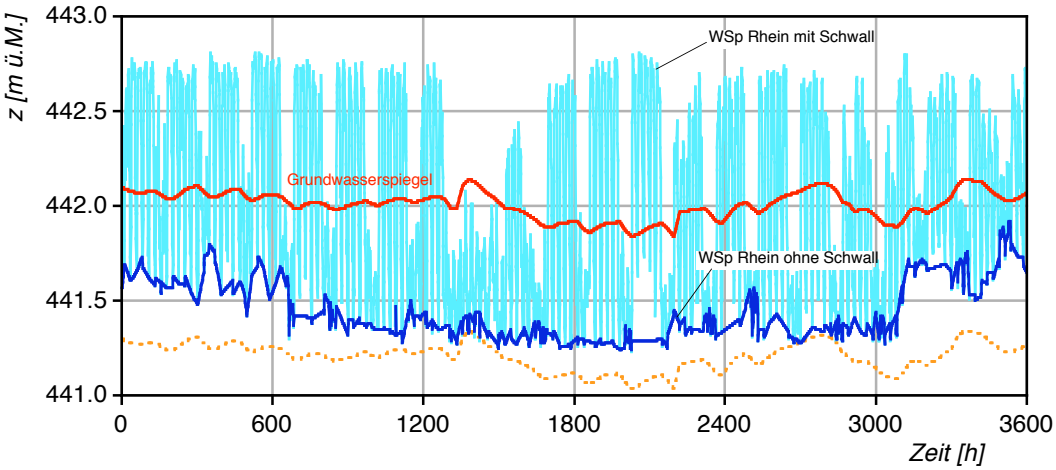


Abb. 81 *Buchs, km 51.0, Rinne. Verlauf des Rheinwasserspiegels mit und ohne Schwall verglichen mit dem Grundwasserspiegel vom 1.11.99 - 30.3.00 (GW-Pegel 3151 mit mittlerem Sohlengefälle extrapoliert, vgl. Abb. 24). Eingezeichnet ist zudem ein um 0.8 m abgesenkter Grundwasserspiegel (orange punktierte Linie).*

Damit dennoch Kolmationsberechnungen für eine Rinne in der Teststrecke Buchs durchgeführt werden konnten, wurde in den Berechnungen der Grundwasserspiegel um generell 0.8 m abgesenkt (Abb. 81). Unter diesen Verhältnissen findet bei allen untersuchten Abflussverhältnissen eine Infiltration von Rheinwasser statt.

Abbildung 82 zeigt den Verlauf der dimensionslosen Sohlenschubspannung für den Talweg und die Kiesbankböschung für Verhältnisse mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall. Auffallend sind die generell tiefen Schubspannungen, die auf das ausgeprägte Rinnenprofil zurückzuführen sind. Verglichen mit dem untersuchten Rinnenprofil in Bad Ragaz nimmt die Fliessgeschwindigkeit (und damit das massgebende Energieliniengefälle) bei steigendem Abfluss nur wenig zu (Abb. 26). Unter diesen Verhältnissen ist jegliche Dekolmation auszuschliessen.

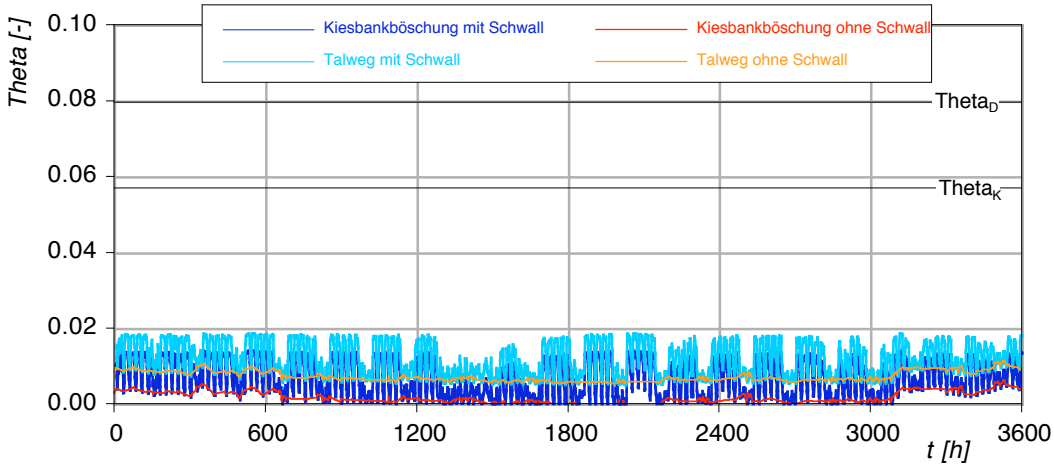


Abb. 82 *Buchs, Profil km 51.0, Rinne. Ganglinien der dimensionslosen Sohlenschubspannung für den tiefen Profilbereich (Talweg) und die Kiesbankböschung mit und ohne Berücksichtigung des Schwalls. Zeitreihe vom 1.11.99 bis zum 30.3.00.*

In den Abbildungen 83 bis 85 sind der Verlauf der Durchlässigkeit, der Kolmationsmasse und des Sickerwasservolumens für den Talweg und die angrenzende Kiesbankböschung für Verhältnisse mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall dargestellt.

Ohne Abfluss- und Trübeschwall bleibt die Durchlässigkeit nach anfänglicher Abnahme fast konstant und nimmt nur bei den Einzelereignissen mit hoher Trübung sprunghaft ab (Abb. 83). Die Ursachen für die praktisch ausbleibende Kolmationsentwicklung sind der kleine Gradient der Sickerströmung um 0.1 - 0.2 (deshalb infiltriert nur wenig Wasser, Abb. 85) sowie die geringe Sohlenschubspannung.

Demgegenüber ist mit Abfluss- und Trübeschwall eine relativ gleichmässige Abnahme der Durchlässigkeit festzustellen (bei halblogarithmischer Skala). Diese unterschiedliche Entwicklung führt zu zeitweise grossen Durchlässigkeitsunterschieden von bis zu 500 % (nach 3000 h). Am Ende der Berechnungsperiode beträgt der Durchlässigkeitsunterschied noch 260 %.

Die deutliche Zunahme des Sickergradienten bei Schwall auf 0.8 - 1.0 führt bei gleichzeitig hoher Trübung zu einem verstärkten Eintrag von Feinpartikeln. Mit Abfluss- und Trübeschwall erreicht die Kolmationsmasse etwas mehr als das Doppelte gegenüber den Verhältnissen ohne Schwälle (Abb. 84).

Beim infiltrierten Sickerwasservolumen sind keine bedeutenden Unterschiede mit oder ohne Schwall festzustellen (Abb. 85). Die kleinere Durchlässigkeit und der höhere Sickergradient gleichen sich etwa aus.

Abb. 83

Buchs, km 51.0, Rinne.

*Verlauf der **Sohlendurchlässigkeit** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend von der Durchlässigkeit des unkolmatierten Sohlenmaterials für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

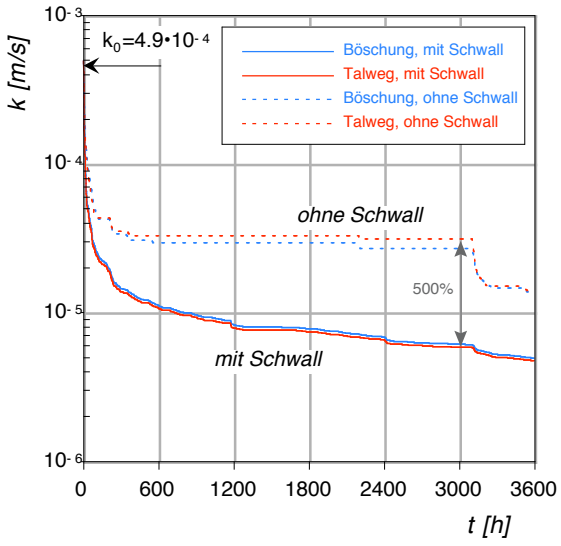


Abb. 84

Buchs, km 51.0, Rinne.

*Verlauf der abgelagerten **Kolmationsmasse** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend vom unkolmatierten Sohlenmaterial für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

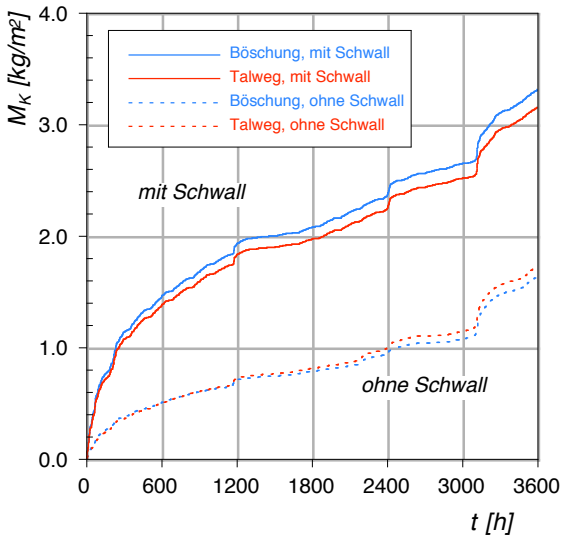
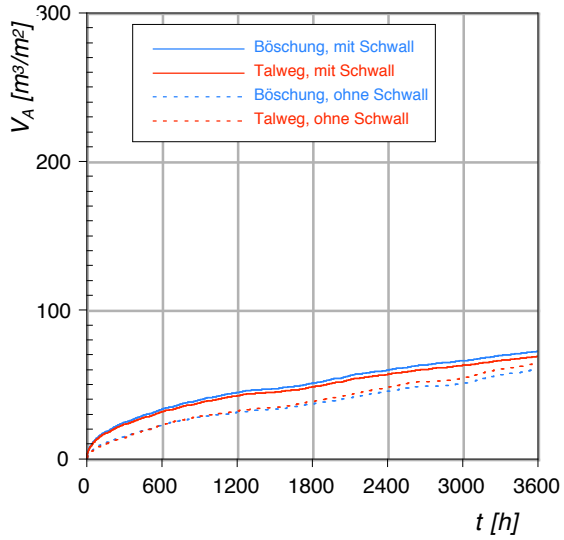


Abb. 85

Buchs, km 51.0, Rinne.

*Verlauf des aufsummierten **Sickerwasser-volumens** vom 1.11.99 - 30.3.00 für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*



4.2.2.4 Teststrecke Diepoldsau, Profil km 76.0 (Kanal, ebene Sohle)

Beim Trapezprofil der Internationalen Rheinstrecke wurden der zentrale Teil des Profils („Talweg“) und der an den Blockwurf angrenzende Sohlenbereich („Böschung“) bei km 76.0 untersucht. Abbildung 86 zeigt den Verlauf der Sohlenschubspannung für die zwei Sohlenbereiche mit und ohne Abflussschwall. In den seitlichen Profilbereichen kann sowohl ohne als auch mit Schwall keine Dekolmation der Sohle festgestellt werden. Demgegenüber ist im mittleren Bereich des Profils bei sehr hohen Schwallspitzenabflüssen örtlich eine Dekolmation möglich.

Die Abbildungen 87 bis 89 zeigen den Verlauf der Durchlässigkeit, der Kolmationsmasse und des aufsummierten Sickerwasservolumens während der Berechnungsperiode. Bei der Durchlässigkeit und der Kolmationsmasse sind die Ergebnisse vergleichbar mit den Resultaten in der Furt bei Bad Ragaz. Gegenüber den unbeeinflussten Verhältnissen führt der Abfluss- und Trübeschwall zu einer Durchlässigkeitsabnahme um 36 % und einer Zunahme der Kolmationsmasse um 48 %.

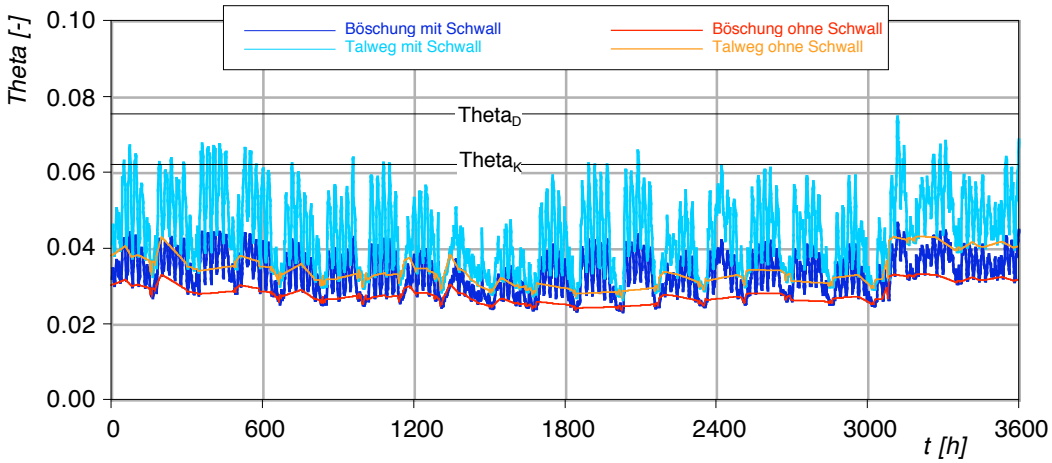


Abb. 86 *Diepoldsau, Profil km 76.0, Kanal mit ebener Sohle. Ganglinien der dimensionslosen Sohlenschubspannung für den zentralen Profilbereich (Talweg) und die seitlichen Profilbereiche (Böschung) mit und ohne Berücksichtigung des Schwalls. Zeitreihe vom 1.11.99 bis zum 30.3.00.*

Beim Sickerwasservolumen ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Verhältnissen mit und ohne Schwall festzustellen. Trotz der geringeren Sohlendurchlässigkeit mit Abfluss- und Trübeschwall infiltriert etwa gleichviel Wasser durch die Rheinsohle wie bei ausbleibendem Schwall. Hier ist ein massgebender Unterschied gegenüber den Teststrecken mit Bänken festzustellen. Die Ursache dürfte darauf zurückzuführen sein, dass sich zwischen Schwall und Sunk bei praktisch gleichbleibendem Gefälle die Sohlenschubspannung nur wenig, der Gradient der Sickerströmung jedoch stark ändert.

Zwischen dem mittleren und dem böschungsnahen Sohlenbereich kann kein wesentlicher Unterschied bezüglich der Kolmationsentwicklung festgestellt werden.

Abb. 87

Diepoldsau, km 76.0, Kanal.

*Verlauf der **Sohlendurchlässigkeit** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend von der Durchlässigkeit des unkolmatierten Sohlenmaterials für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

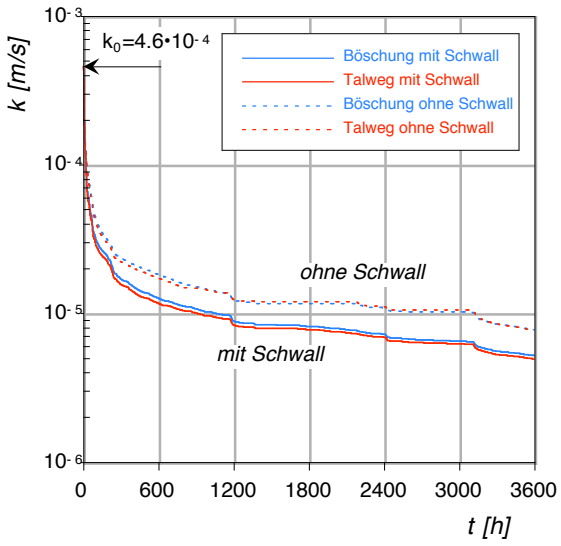


Abb. 88

Diepoldsau, km 76.0, Kanal.

*Verlauf der abgelagerten **Kolmationsmasse** vom 1.11.99 - 30.3.00, ausgehend vom unkolmatierten Sohlenmaterial für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*

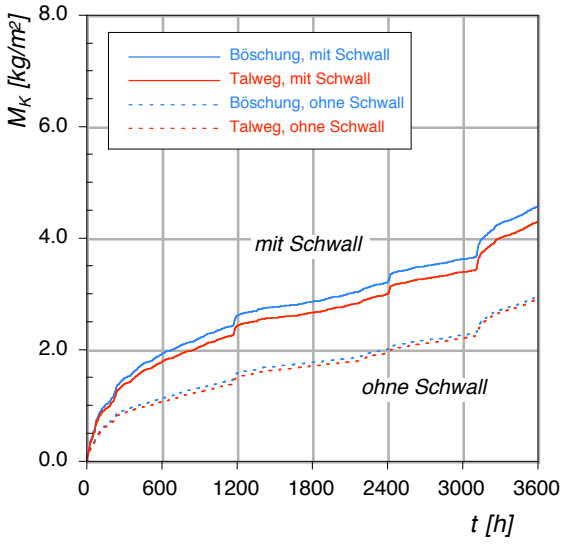
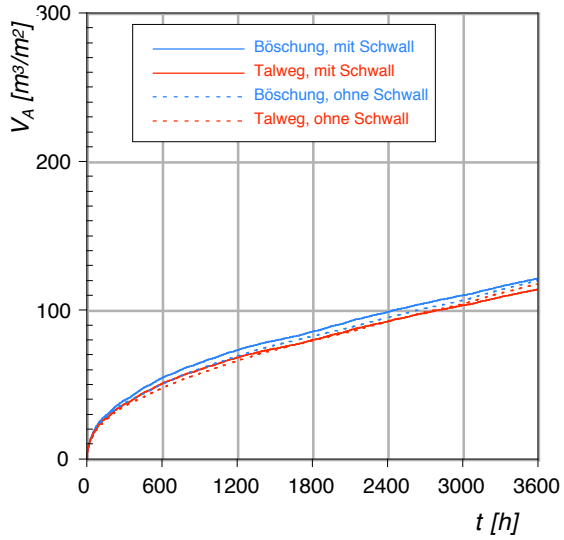


Abb. 89

Diepoldsau, km 76.0, Kanal.

*Verlauf des aufsummierten **Sickerwasser-volumens** vom 1.11.99 - 30.3.00 für die Profilböschung und den Talweg sowie mit und ohne Abfluss- und Trübeschwall.*



4.2.3 Zusammenfassung innere Kolmation und Grundwasserneubildung

In Tabelle 11 sind die Resultate der durchgeführten Kolmationsberechnungen zusammengefasst. Angegeben sind jeweils die am Ende der Berechnungsperiode erreichten Werte im Bereich des Talwegs.

Zum Vergleich der verschiedenen Berechnungsresultate dient die Berechnung bei Bad Ragaz, km 25.8, im Istzustand (d.h. mit Abfluss- und Trübeschwall) als Referenz (gelb markierte Zeile). Die in den unteren Zeilen angegebenen Prozentwerte geben die Veränderung gegenüber der Referenzzeile an.

Blau hinterlegt sind die Felder, wo eine deutliche Zunahme der Durchlässigkeit und des Sickerwasservolumens, oder eine deutliche Abnahme der Kolmationsmasse, festgestellt werden kann (erwünschte Veränderung).

Umgekehrt sind die Felder rot hinterlegt, wo eine deutliche Abnahme der Durchlässigkeit und des Sickerwasservolumens, oder eine deutliche Zunahme der Kolmationsmasse, festgestellt werden kann (unerwünschte Veränderung).

Bei den weissen Feldern ist keine wesentliche Änderung gegenüber dem Referenzfall festzustellen.

Ort	Randbedingungen AS=Abflussschwall TS=Trübeschwall	k-Wert [m/s] Veränderung [%]	KMA [kg/m^2] Veränderung [%]	VA [m^3/m^2] Veränderung [%]
BR / 25.8 / Furt	AS / TS	$4.5 \cdot 10^{-6}$	7.0	162
	ohne AS, TS	$6.9 \cdot 10^{-6}$ +50%	5.1 -27%	219 +35%
KV1 (KV = Kontrastversuch)	Trübung = 1.5•TS	$3.7 \cdot 10^{-6}$ -20%	8.6 +23%	134 -17%
KV2	mit AS, ohne TS	$6.0 \cdot 10^{-6}$ +30%	5.2 -26%	223 +38%
KV3	mit TS, ohne AS	$5.2 \cdot 10^{-6}$ +13%	6.9 -1%	161 -1%
BR / 26.2 / Rinne	AS / TS	$6.5 \cdot 10^{-6}$ +41%	4.2 -40%	102 -37%
	ohne AS, TS	$1.3 \cdot 10^{-5}$ +283%	4.1 -41%	178 +10%
BU / 51 / Rinne	AS / TS	$4.7 \cdot 10^{-6}$ +2%	3.2 -54%	69.2 -57%
	ohne AS, TS	$1.4 \cdot 10^{-5}$ +304%	1.7 -76%	64.7 -60%
DI / 76.0 / Kanal	AS / TS	$4.9 \cdot 10^{-6}$ +6%	4.3 -29%	115 -29%
	ohne AS, TS	$7.6 \cdot 10^{-6}$ +65%	2.9 -59%	118 -27%

Tabelle 11 Vergleich der Durchlässigkeit (k-Wert), der Kolmationsmasse (KMA) und des Sickerwasservolumens (VA) der Kolmationsberechnungen. Angegeben sind die Werte am Ende der Berechnungsperiode (30.3.00). Die gelb markierte Zeile bezeichnet den Referenzfall für den Vergleich mit den anderen Kolmationsberechnungen (Veränderung in Prozent). Angegeben sind nur die Berechnungen für den Talweg. Blau und rot hinterlegte Felder vgl. Text.

Die Resultate der Kolmationsberechnungen zeigen die folgenden Zusammenhänge.

1. Morphologie

Die innere Kolmation bildet sich am stärksten in den Furten aus, was sich besonders deutlich bei der Kolmationsmasse zeigt. Trotz dieser verstärkten Ablagerung von Schwebstoffen ist das Sickerwasservolumen und damit die Durchströmung der Sohle (wegen dem hohen Sicker-Gradienten) meist höher als in den anderen Gewässerabschnitten.

In den Rinnen ist eine reduzierte innere Kolmation festzustellen und in den Schnellen ist wegen der austretenden Sickerströmung keine innere Kolmation möglich.

2. Querprofil

Der tiefe Sohlenbereich in einem Profil (Talweg) zeigt in der Regel eine verstärkte Abnahme der Durchlässigkeit bei tendenziell kleinerer Kolmationsmasse. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich wegen der grösseren Sohlenschubspannung unter der Deckschicht eine dünnere aber stärker verfestigte Kolmationsschicht entwickelt. Im Böschungsbereich infiltriert mehr Wasser als im tiefen Sohlenbereich. Die Unterschiede sind generell aber nicht sehr gross.

3. Einfluss Abfluss- und Trübeschwall

Durch die kombinierte Wirkung von Abfluss- und Trübeschwall wird die innere Kolmation in allen untersuchten Profilen deutlich verstärkt. Die Durchlässigkeit der Flusssohle sinkt um 30 - (>) 200 % und die Kolmationsmasse nimmt um durchschnittlich 40 % zu (2 - 90 %) zu. Dadurch wird der verfügbare Porenraum massgebend verringert und die Sohle verfestigt.

Ausschlaggebend für die deutlich verstärkte Entwicklung der inneren Kolmation ist die erhöhte Trübung, welche die Schwebstoffe liefert, die für die Kolmationsentwicklung erforderlich sind. Beispielsweise werden in der Furt (km 25.8) mit Abfluss- und Trübeschwall 7 kg/m^2 Feinsedimente in der Sohle abgelagert, ohne Abfluss- und Trübeschwall 5.1 kg/m^2, nur ohne Trübeschwall 5.2 kg/m^2 und nur ohne Abflussschwall 6.9 kg/m^2[3].

Dies bedeutet, dass zur Reduktion der inneren Kolmation die Trübung des Alpenrheins reduziert werden muss.

Die alleinige Dämpfung oder Vermeidung des Abflusschwalls zeigt einen nur geringen Einfluss auf die innere Kolmation.

Bezüglich der Teststrecken lassen sich folgende Aussagen machen:

1. Teststrecke Mastrils

Die verfügbaren Grundwasserdaten lassen keine zuverlässige Aussage bezüglich der Sickerströmungsverhältnisse zwischen Fluss- und Grundwasser zu. Die ungefähre Lage des Grundwasserspiegels (Abb. 24) deutet aber darauf hin, dass in den Rinnenstrecken bei fast allen Abflussverhältnissen eine Exfiltration von Grundwasser stattfinden dürfte. Das heisst, dass hier eine geringe Kolmation erwartet werden kann.

Demgegenüber ist in den Furten und im unteren Bereich der Rinnen (höherer Wasserspiegel im Längenprofil) mit einer inneren Kolmation zu rechnen. Die Einlagerung von Feinpartikeln findet vor allem bei Schwall statt (höherer Gradient und Trübung). Das heisst, dass hier ein deutlicher Unterschied zwischen den Verhältnissen mit und ohne Schwall zu erwarten ist.

---

[3] Die Einlagerung von beispielsweise 7 kg/m^2 Feinsedimenten entspricht einem Porenvolumen von ca. 3.5 l, resp. einer Schichtstärke von 3.5 mm (über die gesamte Sohle betrachtet).

2. Teststrecke Bad Ragaz

In der Teststrecke Bad Ragaz (resp. flussabwärts der Landquartmündung) erreicht die Trübung des Alpenrheins die höchsten Werte. Die hohe Trübung führt zu einer verstärkten Ablagerung von Feinpartikeln in der Sohle in allen morphologischen Strukturen (ausser in den Schnellen). Insbesondere die extrem hohen Trübungen (aus der Landquart) lassen die Durchlässigkeit im Verlauf des Winters auf vergleichsweise extrem tiefe Werte absinken.

Die gegenüber Buchs und Diepoldsau erhöhte Trübung wurde durch den Kontrastversuch KV1 simuliert (Erhöhung der Schwebstoffkonzentration um 50 %). Bis zum Ende des Winters nahm die Durchlässigkeit um 20 % ab, die Kolmationsmasse erhöhte sich um 23 % und das Sickerwasservolumen nahm um 17 % ab.

Bei Bad Ragaz entwickelt sich im Verlauf des Winters eine starke (Rinnen) bis sehr starke (Furten) innere Kolmation.

3. Teststrecke Buchs

In der Teststrecke Buchs wechseln sich mit Schwall und Sunk In- und Exfiltration ab. Bei Schwall infiltriert Rheinwasser und die Sohle kolmatiert langsam. Bei der Exfiltration von Grundwasser werden keine Feinpartikel eingelagert, das heisst, dass der Durchlässigkeitsbeiwert konstant bleibt (keine Kolmation, keine Dekolmation).

Flussaufwärts der Blockrampe infiltriert der Rhein bei allen Abflusszuständen. Die Kolmationsberechnungen zeigen, dass sich die Kolmation bei kleinen Sicker-Gradienten nur langsam entwickelt (Buchs, km 51.0, Rinne, Berechnung ohne Abflussschwall). Das Auftreten eines Abflussschwalls kombiniert mit erhöhter Trübung führt bei diesen Verhältnissen zu einer deutlichen Beschleunigung der Kolmationsentwicklung. Die Durchlässigkeit reduziert sich um einen Faktor 3 und die Kolmationsmasse steigt von 1.7 kg/m^2 auf 3.2 kg/m^2, was fast einer Verdoppelung entspricht.

Bei permanenter Infiltration von Rheinwasser ist im Istzustand (Vorhandensein des Abfluss- und Trübeschwalls) mit einer deutlichen (Rinnen) bis starken (Furten) inneren Kolmation zu rechnen. Die Kolmation ist etwas weniger stark ausgeprägt als bei Bad Ragaz.

4. Teststrecke Diepoldsau

Von Koblach bis zum Bodensee infiltriert Rheinwasser durch die Sohle ins Grundwasser (Plan 1.2). Die Berechnungsresultate bei Profil km 76.0 zeigen, dass sich in der ebenen Sohle eine Kolmationsentwicklung einstellt, die mit der Furt bei Bad Ragaz vergleichbar ist, wobei das Ausmass der Kolmation etwas weniger stark ausgeprägt ist.

Die Unterschiede im Längen- und im Querprofil sind gering, sodass sich grossflächig eine gleichmässige Kolmation entwickelt. Im zentralen Profilbereich ist örtlich bei Schwall eine gewisse Dekolmation möglich.

Bei ausbleibendem Abfluss- und Trübeschwall nimmt die Durchlässigkeit um 35 % zu, wobei 33 % weniger Feinpartikel in die Sohle eingelagert werden. Das Sickerwasservolumen verändert sich kaum.

Grundwasserneubildung

Die Infiltration von Flusswasser wird durch den Schwall und die innere Kolmation beeinflusst. Bei Schwall führt der Wasserspiegelanstieg zu einer Zunahme des Sicker-Gradienten und damit zu einer Erhöhung des Sickerabflusses. Gleichzeitig bewirkt der hohe Gradient eine beschleunigte innere Kolmation, womit der k-Wert verringert der Sickerabfluss wieder reduziert wird.

Die Kolmationsberechnungen zeigen, dass hohe Gradienten (gesättigter Anschluss des Grundwasserspiegels an das Fliessgewässer vorausgesetzt), trotz der beschleunigten inneren Kolmation, zu höheren Sickerwasservolumen und damit zu einer verstärkten Grundwasserneubildung führt (Bad Ragaz, km 25.8). Dies bedeutet, dass in Flussabschnitten mit grosser Wasserspiegeldifferenz zwischen Rhein und Grundwasser am meisten Wasser infiltriert (Furt Bad Ragaz in 5 Monaten 160 m^3/m^2). In Flussabschnitten mit alternierenden Bänken infiltriert am meisten Wasser bei den Furten (höchster Flusswasserspiegel im Längenprofil).

Bei kleinen Sicker-Gradienten oder Abschnitten mit wechselnden Sickerströmungen infiltriert trotz geringerer innerer Kolmation weit weniger Wasser (noch ca. 40 - 70 %) durch die Rheinsohle als in Abschnitten mit permanenter Infiltration.

Der Abfluss- und Trübeschwall führt bei mittleren bis grösseren hydraulischen Gradienten zu einer Abnahme des Sickerwasservolumens um 35 - 75 % (Bad Ragaz km 25.8 und km 26.2), wobei sich diese Abnahme auf die Infiltration im ständig benetzten Bereich bezieht. Nicht berücksichtigt ist die Infiltration in der Wasserweckselzone, also dem nur bei Schwall überfluteten Bereich.

Bei kleinen bis mittleren hydraulischen Gradienten ist mit und ohne Schwall keine wesentliche Änderung des Sickerwasservolumens festzustellen, das heisst dass sich der grössere Gradient bei Schwall und der kleinere k-Wert infolge verstärkter innerer Kolmation in etwa kompensieren (Berechnung Buchs, km 51.0).