

## Feststoffbeobachtung in der Schweiz

Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie

M. Spreafico, Ch. Lehmann, A. Jakob und A. Grasso

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque  
Nr. 8 – Bern 2005



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**  
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**  
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**  
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**  
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

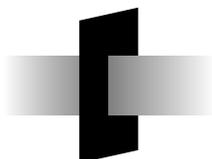
Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,  
Energie und Kommunikation  
Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti,  
dell'energia e delle comunicazioni

## Feststoffbeobachtung in der Schweiz

Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie

M. Spreafico, Ch. Lehmann, A. Jakob und A. Grasso

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque  
Nr. 8 – Bern 2005



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**  
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**  
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**  
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**  
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

## Autoren

Manfred Spreafico, Bundesamt für Wasser und Geologie  
Christoph Lehmann, Hydrologie – Wasserbau, Urtenen-Schönbühl  
Adrian Jakob, Bundesamt für Wasser und Geologie  
Alessandro Grasso, Bundesamt für Wasser und Geologie

## Gestaltung

Thomas Reist, Geographisches Institut der Universität Bern

## Reviewing

Eva Gertsch, Bundesamt für Wasser und Geologie

## Übersetzungen

R. Bandi-Tebbutt, V. Linder, R. Weitnauer

## Impressum

Herausgeber: Bundesamt für Wasser und Geologie

ISSN: 1660-0746

Auflage: 800

Zitiervorschlag: Spreafico, M. et al. (2005): Feststoffbeobachtung in der Schweiz – Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 8, Bern.

Kartendaten: © 2005 swisstopo

Bildnachweis Umschlag: oben: Illgraben (VS). A. Grasso, BWG  
Mitte: Messstation Lütschine – Gsteig (BE). BWG  
unten: Rhone/Rotten bei Susten (VS). A. Grasso, BWG

Gestaltung Umschlag: H.-P. Hauser, AVD

Bezugsadresse: BBL, Vertrieb Publikationen, CH-3003 Bern  
Bestellnummer: 804.508d  
Internet: [www.bbl.admin.ch/bundespublikationen](http://www.bbl.admin.ch/bundespublikationen)

Copyright: © BWG, November 2005

# Vorwort

Feststoffe sind gemäss Definition die Gesamtheit der festen Stoffe, welche im Wasser transportiert oder abgelagert werden.

Die Kenntnis der Menge, der Qualität und der Dynamik der Feststoffe ist unabdingbar nötig für die Bewirtschaftung unserer Gewässersysteme. Feststoffe sind eine wichtige Steuergrösse für die aquatischen Ökosysteme und haben auch einen sozialen und ökonomischen Wert.

Feststoffbeobachtungen sind eine notwendige Grundlage für die Lösung wichtiger wasserwirtschaftlicher Probleme. Sie dienen der optimalen Nutzung und dem Schutz unserer Wasserressourcen als auch dem Schutz der Menschen gegen schädigende Wirkungen.

Der vorliegende Bericht enthält eine Zusammenstellung über den Stand des Wissens in der Schweiz bezüglich Feststoffbeobachtung aus Sicht der Landeshydrologie. Deshalb werden hauptsächlich Messungen, Untersuchungen, Studien, Empfehlungen und Erkenntnisse dargestellt, welche die Landeshydrologie selber oder in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen durchgeführt resp. erarbeitet hat.

Der Bericht enthält auch eine Übersicht über die zukünftigen Schwerpunktaktivitäten der Landeshydrologie auf dem Gebiet der Feststoffbeobachtung.

Wir hoffen, dass die im Bericht enthaltenen Informationen zur Geschichte und Zukunft der Feststoffbeobachtung bei der Landeshydrologie für viele Nutzer von Wert sein werden.

# Avant-propos

Par définition, les matières solides désignent l'ensemble des substances solides qui sont transportées ou déposées dans l'eau.

Pour gérer nos réseaux hydrographiques, il est absolument nécessaire de connaître la quantité, la qualité et la dynamique des matières solides. Celles-ci sont une donnée déterminante pour les écosystèmes aquatiques et ont aussi une valeur sociale et économique.

Les observations des matières solides sont une base indispensable pour résoudre d'importants problèmes liés à l'économie des eaux. Elles servent à utiliser le mieux possible nos ressources en eau, à en assurer la protection, mais aussi à protéger la population des dommages qu'elles pourraient causer.

Ce rapport contient une synthèse sur l'état des connaissances acquises en Suisse dans le domaine de l'observation des matières solides du point de vue du Service hydrologique national. Il présente donc principalement les mesures, recherches, études et recommandations que le Service hydrologique national a effectuées, seul ou en collaboration avec d'autres institutions, ainsi que les résultats qu'il a obtenus.

Une vue d'ensemble des activités sur lesquelles le Service hydrologique national souhaite mettre l'accent à l'avenir dans le domaine de l'observation des matières solides se trouve également dans ce rapport.

Nous espérons que ces informations sur l'histoire et l'avenir de l'observation des matières solides par le Service hydrologique national seront utiles à de nombreux lecteurs.

Bundesamt für Wasser und Geologie

Der Direktor



Dr. Ch. Furrer

## Introduzione

La definizione di materiali solidi sottintende la totalità delle sostanze solide che nell'acqua vengono trasportate o depositate.

La conoscenza della loro quantità, qualità e dinamica è indispensabile per il governo dei nostri corsi d'acqua. Oltre a possedere un valore sociale ed economico, i materiali solidi costituiscono una grandezza gestionale critica degli ecosistemi acquatici.

L'osservazione dei materiali solidi è alla base della soluzione di problematiche primarie di economia idrica. Essa serve per uno sfruttamento calibrato delle nostre risorse idriche e per la loro protezione, così come per la difesa dell'uomo contro i relativi effetti nocivi.

Il presente resoconto mostra il quadro generale dello stato dell'arte in Svizzera sulla rilevazione dei materiali solidi nell'ottica del Servizio idrologico. A essere rappresentati in modo prevalente sono pertanto misurazioni, indagini, studi, raccomandazioni e cognizioni che il Servizio idrologico ha condotto o elaborato in separata sede e in collaborazione con enti terzi.

Nel rapporto è contenuta anche una panoramica sulle future attenzioni prevalenti del Servizio idrologico nell'ambito della rilevazione dei materiali solidi.

Speriamo che le informazioni riportate nel rapporto sulla storia e sul futuro della rilevazione dei materiali solidi presso il Servizio idrologico possano essere apprezzate da un gran numero di utilizzatori.

## Foreword

Sediment is defined as all the solid particles that are transported or deposited in water.

Knowledge of the quantity, quality and dynamics of sediments is essential for managing our waterway systems. Sediments are an important factor governing the aquatic ecosystems as well as having a social and economic value.

Sediment observations are a necessary basis for solving major water management problems. They help to ensure that our water resources are used to the best advantage and at the same time protected, as well as protecting the population against negative effects.

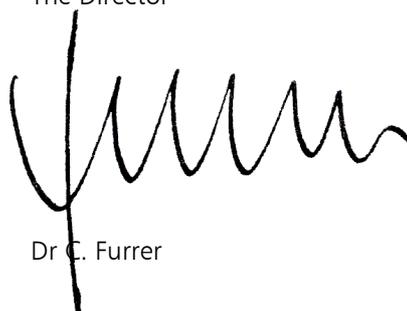
The present report includes a summary of current knowledge in Switzerland in relation to sediment observations carried out as part of the National Hydrological Survey (SNHS). For this reason the emphasis is on measurements, examinations, studies, recommendations and findings that have been carried out or processed by the SNHS itself or in collaboration with other institutions.

The report also contains an overview of the principal tasks that the SNHS will be focusing on in the future in relation to sediment observation.

We hope that the information contained in this report regarding the history and future of sediment observation under the SNHS will be of value to many readers.

Federal Office for Water and Geology

The Director



Dr C. Furrer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort, Avant-propos .....</b>	<b>3</b>	<b>3 Messparameter, -instrumente und</b>	<b>33</b>
<b>Introduzione, Foreword .....</b>	<b>4</b>	<b>-methoden .....</b>	<b>33</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>5</b>	<b>3.1 Messungen in Wildbächen.....</b>	<b>33</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>7</b>	3.1.1 Messung der Feststoffführung.....	33
<b>1.1 Definition .....</b>	<b>7</b>	3.1.2 Erfassung der Feststofffracht in	
<b>1.2 Wildbäche .....</b>	<b>7</b>	Geschiebesammlern .....	34
1.2.1 Beschreibung der Prozesse.....	7	3.1.3 Erfassung von Übermurungen und	
1.2.2 Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen....	8	Erosionsgebieten.....	34
<b>1.3 Flüsse .....</b>	<b>10</b>	<b>3.2 Messungen in Flüssen.....</b>	<b>35</b>
1.3.1 Beschreibung der Prozesse.....	10	3.2.1 Messung der Schwebstoffführung.....	35
1.3.2 Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen..	10	3.2.2 Messung der Schwebstoffkonzentration.	35
<b>1.4 Seen .....</b>	<b>12</b>	3.2.3 Die Probenahme.....	36
1.4.1 Beschreibung der Prozesse.....	12	3.2.4 Geräte für die manuelle Probenahme ....	36
1.4.2 Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen..	12	3.2.5 Schwebstoffprobenentnahmen mit auto-	
<b>1.5 Historischer Überblick, bisherige</b>		matischen Geräten .....	38
<b>Aktivitäten und Publikationen .....</b>	<b>14</b>	3.2.6 Vergleich von Messgeräten der Schweiz	
1.5.1 Beginn der Feststoffbeobachtungen .....	14	mit denjenigen anderer Rheinanlieger ....	39
1.5.2 Stand der Feststoffbeobachtung.....	15	3.2.7 Trübungsmessung.....	39
1.5.3 Publikationen der Landeshydrologie		3.2.8 Analyse der Schwebstoffproben im	
zum Thema Feststoffbeobachtung.....	17	Labor .....	40
<b>2 Die Messnetze .....</b>	<b>19</b>	3.2.9 Bestimmung der Schwebstofffracht.....	40
<b>2.1 Schwebstoffe .....</b>	<b>19</b>	3.2.10 Berechnung der Feststofffracht (Schweb-	
2.1.1 Zielsetzung des Schwebstoffmessnetzes		stoff und Geschiebe) .....	41
der Landeshydrologie .....	19	3.2.11 Korngrößenverteilung des Sohlen-	
2.1.2 Überblick über die Messstationen .....	19	materials .....	41
2.1.3 Charakterisierung der Messstandorte		3.2.12 Korngrößenverteilung der Schweb-	
des Standardnetzes .....	22	stoffe .....	42
<b>2.2 Geschiebe.....</b>	<b>27</b>	3.2.13 Weitere Messgrößen .....	43
2.2.1 Ziele des Messnetzes der GHÖ für die		<b>3.3 Messungen in Seen und Stau-</b>	<b>43</b>
Erfassung von Geschiebefrachten in		<b>haltungen .....</b>	<b>43</b>
Geschiebesammlern.....	27	3.3.1 Feststoffeintrag .....	43
2.2.2 Angaben zum Messnetz .....	27	3.3.2 Schwebstoffkonzentration.....	44
2.2.3 Ergänzende Untersuchungen.....	29	3.3.3 Sedimentationsraten .....	44
<b>2.3 Delta- und Seegrundaufnahmen</b>		<b>4 Ergebnisse.....</b>	<b>45</b>
<b>(Bathymetrie) .....</b>	<b>30</b>	<b>4.1 Schwebstoffe .....</b>	<b>45</b>
2.3.1 Zielsetzungen .....	30	4.1.1 Ältere Auswertungen .....	45
2.3.2 Auswahl der Aufnahmen .....	30	4.1.2 Ausgesuchte Messergebnisse neueren	
<b>2.4 Flussquer- und Längsprofile.....</b>	<b>31</b>	Datums .....	46
<b>2.5 Geschiebeanalysen .....</b>	<b>32</b>	4.1.3 Kornverteilung und mineralogische	
		Zusammensetzung.....	58
		4.1.4 Schwebstofffrachten .....	59
		<b>4.2 Ausgesuchte Messergebnisse</b>	
		<b>bezüglich Geschiebe .....</b>	<b>63</b>
		<b>4.3 Delta- und Seegrundaufnahmen.....</b>	<b>65</b>
		4.3.1 Ausgesuchte Messergebnisse .....	65
		4.3.2 Spezielle Untersuchungen .....	69

<b>5 Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen .....</b>	<b>71</b>	<b>A3 Tabelle Querprofilaufnahmen .....</b>	<b>88</b>
<b>5.1 Ausgangslage .....</b>	<b>71</b>	<b>A4 Beispiele für Korngrössenanalysen.....</b>	<b>91</b>
<b>5.2 Grundsätzliches .....</b>	<b>71</b>	A4.1 Linth – Mollis, Kupfersteg .....	91
<b>5.3 Vorgehensweise .....</b>	<b>71</b>	A4.2 Lüttschine – Gsteig, Bönigen .....	91
5.3.1 Vorarbeiten .....	72	A4.3 Reuss – Seedorf .....	92
5.3.2 Feldaufnahmen .....	72	A4.4 Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke .....	92
5.3.3 Auswertungen .....	72	A4.5 Thur – Halden .....	93
<b>5.4 Ergebnisse aus den Berechnungen .....</b>	<b>73</b>	A4.6 Ticino – Bellinzona .....	93
<b>5.5 Fazit .....</b>	<b>73</b>	<b>A5 Schwebstofffrachten bei einzelnen Stationen .....</b>	<b>94</b>
<b>6 Erhebung von Feststoffen nach Unwettern .....</b>	<b>75</b>	A5.1 Linth – Mollis, Kupfersteg .....	94
<b>6.1 Ausgangslage .....</b>	<b>75</b>	A5.2 Lüttschine – Gsteig, Bönigen .....	95
<b>6.2 Grundsätzliches .....</b>	<b>75</b>	A5.3 Reuss – Seedorf .....	96
<b>6.3 Vorgehensweise .....</b>	<b>75</b>	A5.4 Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke .....	97
<b>7 Fazit und Ausblick .....</b>	<b>77</b>	A5.5 Thur – Halden .....	98
<b>7.1 Projekte .....</b>	<b>77</b>	A5.6 Ticino – Bellinzona .....	99
7.1.1 Datenerhebung und -bereitstellung .....	77		
7.1.2 Datenqualität .....	77		
7.1.3 Prozesskenntnisse .....	77		
7.1.4 Modellierung .....	77		
<b>7.2 Ausblick .....</b>	<b>78</b>		
7.2.1 Mitarbeit beim Betrieb und Auswertung des GHO-Geschiebemessprogrammes .....	78		
7.2.2 Betrieb des Schwebstoffmessnetzes .....	78		
7.2.3 Deltaaufnahmen .....	78		
7.2.4 Zusammenarbeit mit anderen schweizerischen Fachstellen .....	78		
7.2.5 Internationale Zusammenarbeit .....	78		
7.2.6 Beratung und Information .....	79		
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>81</b>		
<b>Bildnachweis .....</b>	<b>83</b>		
<b>Anhang .....</b>	<b>85</b>		
<b>A1 Liste der Geschiebemesstationen der GHO-Datenbank «DB-Solid» .....</b>	<b>85</b>		
<b>A2 Meldeblatt Geschiebefrachten .....</b>	<b>87</b>		

# 1 Einleitung

## 1.1 Definition

Unter dem Begriff Feststoffe wird die Gesamtheit der festen Stoffe verstanden, welche im Wasser transportiert oder abgelagert werden. Feststoffe sind also Geschiebe, Schwebstoffe, Geschwemmsel und Eis.

## 1.2 Wildbäche

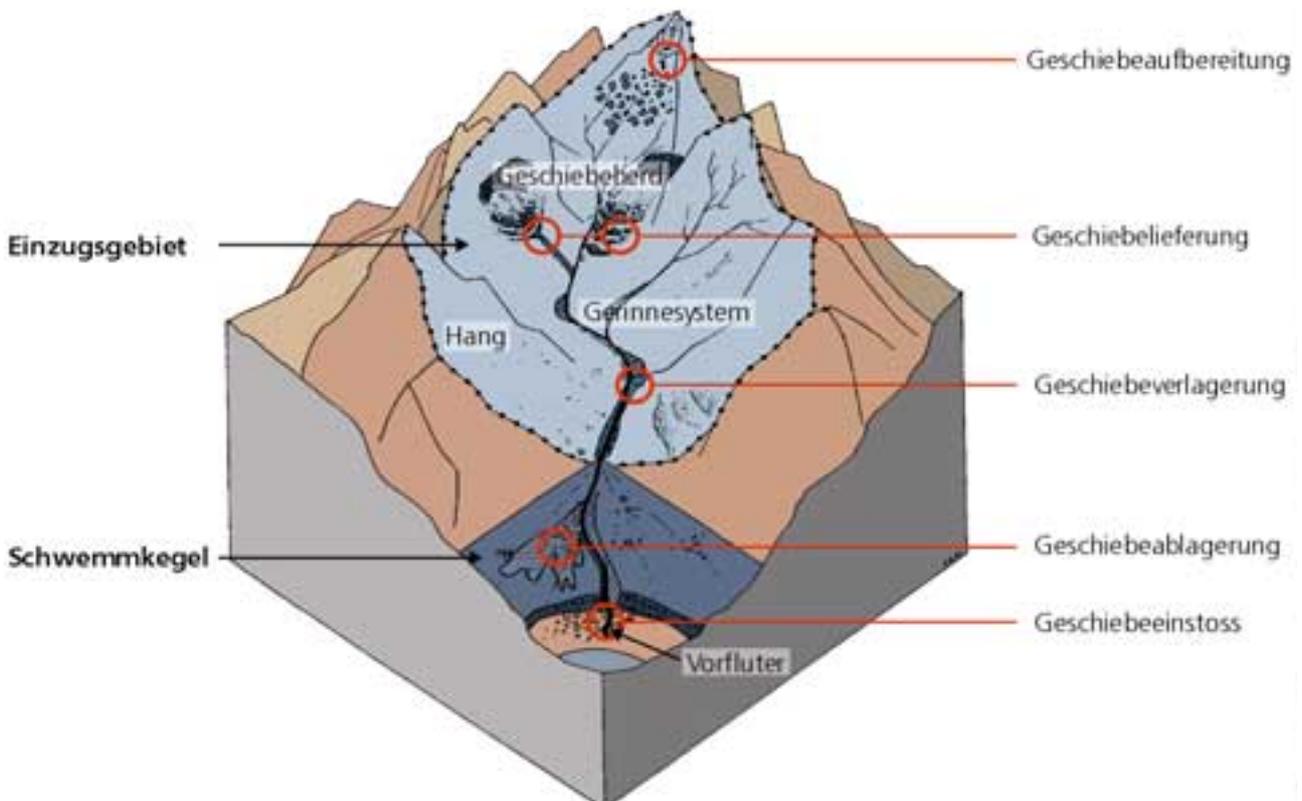
### 1.2.1 Beschreibung der Prozesse

Der Problemkreis Feststoffe umfasst die Generierung, Mobilisierung, Verlagerung und Ablagerung. Unter dem Einfluss der Verwitterung werden die Festgesteine aufgelockert und zersetzt. Das derart entstandene Lockermaterial wird durch Oberflächenabfluss, Sturz- oder Rutschprozesse den Wasserläufen zugeführt. Wildbäche und Flüsse verfrachten diese Feststoffe weiter talabwärts, wobei Material zeitweise in den Gerinnen abgelagert und wieder erodiert wird. In Seen und Reservoiren werden grosse Feststoffvolumen abgelagert.

Wildbäche sind unberechenbar. Ihr Abflussregime ist gekennzeichnet durch äusserst starke Schwankungen der Abflussmenge. Intensive Gewitter sind häufig die Ursache für Hochwasserabflüsse, die sehr hohe Feststoffanteile aufweisen können. In bestimmten Fällen entstehen Murgänge, welche einen noch höheren Feststoffgehalt als Hochwasser aufweisen. Da die Art und Grösse des Feststofftransportes nicht ausschliesslich von Vorgängen im Bachgerinne selbst abhängen, sondern das gesamte Einzugsgebiet des Baches am Abflussgeschehen und deshalb am Feststofftransport beteiligt ist, sind die sich stellenden Probleme äusserst komplex (vgl. Figur 1).

Bei Bächen mit Gefällen bis etwa 30 % lässt sich die Feststoffführung meistens nur noch bei Nieder- und Mittelwasser in einen Geschiebe- und einen Schwebstoffanteil unterteilen. Bei grossen Abflüssen ist eine Trennung nicht mehr möglich. Man fasst deshalb die beiden Teile zusammen und benennt diese Gesamtheit mit «Geschiebe».

Dieses «Geschiebe» stammt nicht nur aus dem Gerinne selbst, sondern wird aus Seitenbächen, Runsen, Lawi-



Figur 1: Wildbachsystem.

nenzügen, Hangrutschungen usw. geliefert. Es handelt sich deshalb auch um gerinnefremdes Material. Falls sich zum Beispiel ein Bach stark eintieft, stammt der Hauptteil des Geschiebes aus den nachrutschenden Bacheinhängen. Das Material ist in der Regel sehr heterogen zusammengesetzt (Grösse, Lithologie). Die Geschiebekornverteilung variiert stark. Diese Variation besteht sowohl zeitlich als auch räumlich. Ausserdem nimmt die maximale transportierte Korngrösse mit steigender Wasserführung oftmals zu. Bei sehr hohen Abflüssen oder bei Murgängen können Blöcke mit einigen Dutzend Kubikmeter Volumen bewegt werden.

Der Geschiebetransport erfolgt in Schüben (nichtstationär), einerseits als Folge hydraulischer Mechanismen und andererseits als Folge von seitlichen Rutschungen, plötzlichen Veränderungen des Gerinnebettes oder kleineren und grösseren Verkläusungen.

Oft werden bei ein und derselben Wasserführung temporär oder dauernd wesentlich kleinere Geschiebemen gen transportiert, als es der Geschiebetransportkapazität entspräche. Dies kann eine Folge von Gerinneabpflästerungen, erhöhter Erosionsresistenz infolge guter Materialfestigkeit im Gerinne oder temporärem oder stetigem Mangel an Geschiebenachschub sein.

Bei hohen Geschiebekonzentrationen kann der Geschiebetransport nicht mehr als rein hydraulisches Phänomen betrachtet werden. Murgänge können mit den üblichen hydraulischen Ansätzen nicht mehr beschrieben werden. Ebenso führt die Geschiebeführung zu einer Verminderung der Fliessgeschwindigkeit gegenüber dem Reinwasserabfluss und entsprechend zu einer Vergrösserung des Durchflussquerschnittes bzw. der Abflusshöhe. Infolge der extrem starken Feststoffführung werden die Abflusstiefe und die Fliessgeschwindigkeit massgeblich von der Grösse der Feststoffkonzentration beeinflusst. Bei extremen Feststoffkonzentrationen verändern sich zusätzlich die viskosen Eigenschaften. Die Viskosität kann so gross werden, dass man nicht mehr von einem Geschiebetransport im hydraulischen Sinne sprechen kann, sondern nur noch von einem Geschiebetransport als Massenfliessen (Murgänge) im Sinne der Rheologie.

### 1.2.2 Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen

Bei der Planung effizienter Wildbach-Schutzmassnahmen für die betroffene Bevölkerung muss der Bachcharakter (insbesondere Abflussverhältnisse und Feststofftransport) als Grundlage erfasst werden. Diese Grundlagenkenntnisse sind besonders wichtig für eine Ab-

schätzung der Wirkung der geplanten Schutzmassnahmen. Die erworbenen Kenntnisse sind ausserdem eine wichtige Voraussetzung für eine möglichst effiziente Gefahrenzonenplanung.

Die für das Auftreten von Schadenereignissen entscheidenden Mechanismen sind generell bekannt. Doch ist die quantitative Erfassung der verschiedenen Prozesse wie Hochwasserentstehung, Abflüsse, Feststofftransport und der damit verbundenen Veränderungen des Bachbettes und der Bacheinhänge nur teilweise möglich. Obwohl beispielsweise eine Prognose über zu erwartende Feststofffrachten für ein grosses Ereignis erstellt werden kann, bleiben immer noch verschiedene Unsicherheiten beim Verständnis einzelner Zusammenhänge. Trotz vieler praktischer Erfahrungen bestehen recht breite Kenntnislücken, die in Zukunft zu reduzieren sind.

Untersuchungen sind deshalb dringend nötig. In den letzten Jahren wurden in dieser Richtung vermehrte Anstrengungen unternommen. Geschiebetransportversuche im Laboratorium und langdauernde Geschiebemessungen in geeigneten Versuchsgebieten sollten dazu dienen, Abfluss- und Geschiebetransportvorgänge bei Hochwasser zu erklären und dafür gültige Gesetzmässigkeiten zu erkennen. Diese wissenschaftliche Tätigkeit muss aber durch Beobachtungen an einer möglichst grossen Anzahl von Wildbächen ergänzt werden, z. B. durch Rekonstruktion von abgelaufenen Ereignissen (vgl. Kapitel 6), mittels Ereigniskatastern, durch Erhebung von Geschiebekubaturen in Ablageungsplätzen oder durch Abfluss- und Geschiebemesungen.

Wegen der Vielfalt der Wildbäche in der Schweiz ist es nur mit Hilfe dieser von der Praxis zu liefernden Daten möglich, ausreichende Unterlagen für den Hochwasserschutz zu beschaffen. Diese Datenerhebung ist wegen der Seltenheit des Auftretens von Extremereignissen und aus statistischen Gründen (z. B. Extremwertstatistik) eine Daueraufgabe.

Es ergeben sich die in Tabelle 1 aufgeführten Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen.

PROBLEMKREISE	NUTZEN/NUTZUNGSZWECKE	WÜNSCHBARE FESTSTOFFBEOBACHTUNGEN	WEITERE BEOBACHTUNGEN
<u>Schutz vor Schäden</u> – Gefahrenerkennung und -beurteilung – Schutz vor Hochwasser durch bauliche Massnahmen – Schutz vor schädigenden Auswirkungen auf die Vorfluter – Abschätzungen über den Feststoffhaushalt  <u>Qualitativer Gewässerschutz</u>  <u>Einwirkungen durch den Menschen auf das Gewässer</u> – Wasserfassungen – Querungen mit Strassen – Bewirtschaftung des Einzugsgebietes – Geschiebeentnahmen – Deponien  <u>Forschung</u> – Grundlagenforschung – Angewandte Forschung	Grundinformation zur Lösung planerischer, baulicher und betrieblicher Probleme auf den Gebieten:  <u>Wasserbau</u> – Stabilisierungsmassnahmen – Rückhaltmassnahmen – Auswirkungen von Wildbächen auf ihre Vorfluter  <u>Verkehrswege</u> – Bachquerungen – Einengungen – Brücken  <u>Siedlungswasserbau</u> – Fassungen, Querungen – Einleitungen – Schutz der Wasservorkommen  <u>Wasserkraftnutzung</u> – Fassungen – Geschiebe-, Holzrückhalt  <u>Einzugsgebietspflege</u> – Erhaltung und Verbesserung der Nutzungsfähigkeit des Einzugsgebietes durch die Land- und Forstwirtschaft – Entwässerungen, Aufforstungen  <u>Landschaftsschutz, Nutzungsplanung, Schutzplanung</u> – Gefahrenerkennung – Gefahrenkartierung – Risikofragen – Gefahrenwarnung	<u>Geschiebe</u> – Geschiebepotential – Höchstmögliche Geschiebeführung (Transportkapazität) – Geschiebeführung bei besonderen Hochwasserereignissen – Ganglinie der Geschiebeführung – Korngrösse bei besonderen Hochwasserereignissen – Geschiebefracht von Hochwassern verschiedener Grösse  <u>Schwebstoffe</u> – Schwebstoffkonzentration – Verhältnis Abfluss – Schwebstoffkonzentration – Schwebstofffrachten  <u>Feststoffcharakteristika</u> – Kornverteilung – Kornform und Petrographie – Spezifisches Gewicht – Raumgewicht von Ablagerungen – Materialzusammensetzung von Murgängen  <u>Geschwemmsele</u> – Transportierte Holzkubatur pro Hochwasserereignis	– Querprofile und Längsprofile der Fliessgewässer und deren zeitliche Veränderungen – Hochwasserspuren – Ablagerungskubaturen innerhalb und ausserhalb des Gerinnes – Rutschungskubaturen – Erosionskubaturen entlang der Gerinne – Wasserqualität – Gerinnerauigkeit   <u>Pro Memoria</u> Für ein ausreichendes Verständnis der Wildbachprobleme benötigt man einen vertieften Einblick in Geologie, Geomorphologie, Hydrologie, Oekologie und Nutzung des Einzugsgebietes.

Tabelle 1: Bedürfniskatalog Feststoffbeobachtung Wildbäche.

## 1.3 Flüsse

### 1.3.1 Beschreibung der Prozesse

Das im Einzugsgebiet abgetragene Feststoffmaterial wird von den Flüssen als Geschiebe, d. h. auf der Sohle rollend, gleitend oder springend, oder als Schwebstoff (in Suspension) verfrachtet. Je nach Strömungsbedingungen und Feststoffzufuhr kann Material im Flussbett abgelagert oder erodiert werden.

Die Geometrie und das Längsgefälle des Gerinnes sowie die Beschaffenheit der Ufer und des Sohlenmaterials, bestimmen für einen gegebenen Abfluss den Wasserspiegelverlauf und damit die Abflusskapazität. Gerinnegeometrie und momentaner Abflusszustand definieren das entsprechende Feststoff-Transportvermögen des Flusses, d. h. je nach Feststoff-Transportkapazität herrscht Ablagerung, Gleichgewicht oder Erosion vor. Da diese Veränderungen der Flusssohle wiederum die Gerinnegeometrie beeinflussen, besteht eine komplexe Wechselwirkung zwischen Abfluss, Gerinneform und Feststoffführung.

### 1.3.2 Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen

Ziele des Flussbaus sind u. a. Hochwasserschutz, Energiegewinnung und Schifffahrt. Je nach Beschaffenheit der Gerinne werden Abflusskapazität, Schutz vor Hochwassern, Grundwasserstand sowie beispielsweise auch die Befahrbarkeit von Flüssen mit Schiffen beeinflusst. Plötzliche und starke Veränderungen innerhalb der Gerinne können Bauwerke in und am Fluss (Brücken, Wasserkraftanlagen, Verkehrswege usw.) gefährden (vgl. Figur 2).



Figur 2: Hochwasser der Weissen Lutschine bei Lutschental nach den Unwettern vom August 2005.

Eine Kontrolle der Gerinnestabilität, der Abflusskapazität sowie der Auswirkungen baulicher Eingriffe ist durch Beobachtung der Flussmorphologie, d. h. durch periodische Ausmessung der Flusstopographie und die Erfassung der Gerinnerauigkeit möglich. Eine Prognose ist jedoch nur über die Kenntnis des Geschiebetransportes möglich. Grundsätzlich kann mit Hilfe von Formeln, Analysen des Sohlenmaterials etc. das Transportvermögen eines Gerinnes grob abgeschätzt werden.

Je komplexer die Verhältnisse an einem Fluss sind (z. B. variable Geometrie, stark unterschiedliche Korngrößen, stark wechselnde Abflüsse, anthropogene Einflüsse wie beispielsweise Kiesentnahmen), umso schwieriger wird die rechnerische Erfassung. In vielen praktischen Fällen ist diese sehr aufwändig und wird deshalb oft nicht durchgeführt. Zudem sind gewisse Phänomene, wie die Entmischung des Geschiebematerials, zuwenig erforscht und verunmöglichen eine zuverlässige Berechnung. Abweichungen von starren Gerinneformen werden im Flussbau in jüngerer Zeit vermehrt praktiziert, bedeuten aber eine weitere Komplikation für die rechnerische Erfassung.

Mit der rasch fortschreitenden Entwicklung von Simulationstechniken kann theoretisch fast jedes Phänomen wenigstens ansatzweise berechnet werden, beispielsweise um das Verhalten von Flussgerinnen und die Auswirkung von Einbauten vorzusagen. Das Problem dabei bildet die Verwendung einzelner Parameter, welche aus messtechnischen Gründen nur ungenau bestimmt oder nur geschätzt werden können. Für die Entwicklung der heute bereits existierenden Ansätze numerischer Modelle und die Beurteilung ihrer Qualität sind deshalb zwingend Vergleiche mit Naturdaten notwendig. Diesbezügliche Messwerte sind jedoch selten und für den fraglichen Zweck oft nicht verfügbar.

Daten sollten langfristig an ausgewählten Flussstrecken erhoben werden, um zuverlässige Vergleiche zu ermöglichen. Anhaltspunkte z. B. über die Erfassung der Geschiebefrachten können zur Zeit nur in Ausnahmefällen gewonnen werden.

Die Erfassung von Schwebstoffführung und Schwebstofffrachten ist wichtig für die Prognose der Entwicklung von Stauräumen. Da die Schwebstoffe mengenmäßig stärker ins Gewicht fallen als das Geschiebe, sind sie auch als Mass für den Gebietsabtrag im Einzugsgebiet von Bedeutung. Der Gewässerschutz seinerseits interessiert sich für die Schwebstofffrachten, weil diese feinkörnigen Feststoffe kolloidale oder gelöste Inhaltstoffe adsorbieren können und weil sie für die

Kolmatierung von Gewässerstrecken verantwortlich sind.

Daraus ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen.

PROBLEMKREISE	NUTZEN/NUTZUNGSZWECKE	WÜNSCHBARE FESTSTOFFBEOBACHTUNGEN	WEITERE BEOBACHTUNGEN
<p><u>Schutz vor Schäden</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Gefahrenerkennung und -beurteilung</li> <li>– Gefahrenkartierung</li> <li>– Schutz vor Hochwasser durch bauliche Massnahmen</li> <li>– Abschätzungen über den Feststoffhaushalt</li> </ul> <p><u>Qualitativer Gewässerschutz</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Kolmatierung</li> </ul> <p><u>Einwirkungen durch den Menschen auf das Gewässer</u></p> <p>Bewirtschaftung des Einzugsgebietes (u. a. Strassenbauten und Brücken, Wasserkraftanlagen, Schifffahrtsanlagen*)</p> <p><u>Forschung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Grundlagenforschung</li> <li>– Angewandte Forschung</li> </ul>	<p>Grundlagen zur Lösung planerischer, baulicher und betrieblicher Probleme auf den Gebieten:</p> <p><u>Wasserbau</u></p> <p>Gerinnestabilisierung unter Berücksichtigung der Zuflüsse und Kiesentnahmen mit und ohne Hochwasserrückhalt</p> <p><u>Verkehrswege</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Strassen- und Bahnanlagen (Flussquerungen, Parallelführungen usw.)</li> <li>– Schifffahrtsanlagen (Schifffahrtsstrasse und Hafenanlagen*)</li> </ul> <p><u>Siedlungswasserbau</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Fassung, Querung, Erweiterungen</li> <li>– Wasseraufbereitung</li> <li>– Gewässerinfiltration und -exfiltration (Grundwasser)</li> </ul> <p><u>Wasserkraftanlagen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Eigentliche Kraftwerksanlagen</li> <li>– Verlandungs-, Spülungs- und Erosionsprobleme</li> <li>– Uferschutzprobleme</li> </ul> <p><u>Fischerei</u></p> <p><u>Passiver Hochwasserschutz</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hochwasserwarnung (inkl. Flutwellenwarnung)</li> <li>– Ausscheidung von Gefahrengebieten (Gefahrenbeurteilung, Risikofragen, Gefahrenkartierung usw.)</li> </ul>	<p><u>Geschiebe</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Geschiebeführung, insbesondere bei Hochwasser</li> <li>– Geschiebefrachten</li> </ul> <p><u>Schwebstoffe</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Schwebstoffführung (Konzentration)</li> <li>– Schwebstofffracht</li> </ul> <p><u>Feststoffcharakteristika</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Kornverteilung (in Funktion von Ort, Zeit und Wassermenge) des ruhenden Geschiebes (Deckschicht, Unterschicht) sowie des laufenden Geschiebes und der Schwebstoffe</li> <li>– Kornform und Petrographie</li> <li>– Spezifisches Gewicht</li> <li>– Raumgewicht der Ablagerungen</li> </ul> <p><u>Geschwemmsele</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Transportierte Holzkubatur pro Hochwasserereignis</li> </ul>	<p><u>Flussmorphologie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Flussform (Grundriss)</li> <li>– Querschnittsform (Querprofil)</li> <li>– Sohlenform (Bänke, Talweg usw.) und deren zeitliche Veränderung und die daraus abzuleitenden Grössen (Gefälle, Ablagerungs- und Erosionskubaturen usw.)</li> <li>– Rauigkeit des Flussbettes (Wasserspiegellängenprofile bei verschiedenen Abflüssen)</li> <li>– Wasserqualität</li> </ul> <p><u>Pro Memoria</u></p> <p>Wasserführung und Hochwasser Spuren (in- und ausserhalb des Flussbettes) **</p>

\*) Bei Flüssen unterhalb von Seen

\*\*) Rutschungen entlang der Gebirgsflüsse, im übrigen siehe «Teilbereich Wildbäche»

Tabelle 2: Bedürfniskatalog Feststoffbeobachtung Flüsse.

## 1.4 Seen

### 1.4.1 Beschreibung der Prozesse

Der weitaus grösste Teil aller Feststoffe wird den Seen durch einmündende Fliessgewässer zugeführt. In sehr untergeordnetem Rahmen können je nach geologischer Situation Feststoffe durch Felsstürze, Gletscherabbrüche, Uferabbrüche, Lawinen, Staubbiederschlag oder durch menschlichen Einfluss (Aufschüttungen, Deponien) in Seen eingetragen werden.

Geschiebe lagert sich in der Regel unmittelbar nach der Einmündung des Zuflusses ab, was zur Deltabildung (Figur 3), bei steilen Seeufnern auch zu subaquatischen Bachkegeln führt. Mit abnehmender Korngrösse nimmt die Sinkgeschwindigkeit der eingetragenen Feststoffpartikel ab, so dass die feinkörnigen Anteile als Schwebstoffe über grössere Distanzen durch seeinterne



Figur 3: Maggia Delta.

Strömungen verfrachtet werden können. Sie gelangen schlussendlich zur Ablagerung, oder verlassen den See wieder über den Ausfluss.

Zunächst bewirkt die Ablagerung der eingetragenen Feststoffe eine Verminderung des Seevolumens, die letztlich zur Auflandung des Seebeckens führt. Namentlich bei der Bewirtschaftung von Stauhaltungen und Speicherseen (Figur 4) kann die Verlandung zu ernsthaften Problemen führen, weil die Speicherkapazitäten verringert werden und technische Einrichtungen wie Grundablässe und Wasserfassungen eingesandet werden können. In den natürlichen Seen sind vor allem seichte Buchten, Schifffahrtrinnen, Hafenbecken und Flachwassergürtel durch den Auflandungsvorgang gefährdet.

Eine wesentliche Rolle im Problemkreis der Wassergüte spielen die Tonmineralien, welche zu den feinstkörnigen Anteilen der Schwebstoffe gehören. Infolge ihrer grossen aktiven Oberfläche verfügen diese Partikel über hervorragende Adsorptionseigenschaften. Dadurch können unter anderem Düng- und Schadstoffe gebunden und dem Wasser durch Sedimentation entzogen werden (Flockungseffekt).

Die namentlich in Flachlandseen vorherrschenden biogen und/oder chemisch ausgefällten Kalke (Seekreide) entstammen letztlich auch den Zuflüssen, welche die entsprechende Lösungsfracht dem See zuführen.

### 1.4.2 Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen

Die Bedeutung von See-Ablagerungen zeigt sich bei der Planung und Verwirklichung von Einbauten im See. Neben der Aufzeichnung der Ablagerungsgeschichte



Figur 4: Speicherbecken Luzzzone.

(Stratigraphie) müssen dann namentlich bodenmechanische Parameter bestimmt werden.

Eine weitere Bedeutung der stratigraphischen Analyse von Sedimentabfolgen ist die Rekonstruktion des Seezustandes im Lauf der Zeit, was auch Rückschlüsse auf die Entwicklung des Einzugsgebietes ermöglicht.

Die im See schwebenden, nur teilweise zur Ablagerung gelangenden Feststoffpartikel stellen für die wirtschaftliche Nutzung der Seen Probleme dar. In Stauhaltungen und Speicherbecken führen diese Schwebstoffe zu

Beschädigungen an Wasserkraftmaschinen (Abrieb der Turbinenräder). Wo das Wasser von künstlichen und natürlichen Seen für die Trinkwasseraufbereitung, als Kühlmittel oder für den Betrieb von Wärmepumpen etc. entnommen wird, führen die Schwebstoffe zu einer beschleunigten Abnutzung der Pumpaggregate und Verstopfung von Filtern.

Daraus ergeben sich die in Tabelle 3 aufgeführten Bedürfnisse an Feststoffbeobachtungen.

PROBLEMKREISE	NUTZEN/NUTZUNGSZWECKE	WÜNSCHBARE FESTSTOFFBEOBACHTUNGEN	WEITERE BEOBACHTUNGEN
<u>Schutz vor Schäden</u> – Volumenänderungen – Sedimentationsvorgänge  <u>Qualitativer Gewässerschutz</u> – Organische und anorganische Stoffe – Trübung  <u>Einwirkungen durch den Menschen auf das Gewässer</u> – Bauliche Eingriffe – Einleitung von Kanalisationen – Baggerungen, Schüttungen  <u>Forschung</u> – Grundlagenforschung – Angewandte Forschung	Basisinformation zur Lösung planerischer, baulicher und betrieblicher Probleme auf den Gebieten:  <u>Wasserbau</u> – Projektierung von Bauwerken  <u>Wasserkraftnutzung</u> – Stauraumverlandung – Versandung technischer Einrichtungen – Steuerung der Anlage  <u>Fischerei, Verkehr</u> – Verlandung von Häfen und Fahrrinnen  <u>Wasserversorgung</u> – Fassungen – Geschiebe, Holzurückhalt  <u>Einzugsgebietssanierung</u> – Trink- und Brauchwassergewinnung – Abnutzung von Pumpen – Wasserfassungen – Verstopfung von Filtern  <u>Energieerzeugung</u> – Wärmegewinnung mit Wärmepumpen  <u>Erholung, Sport</u>  <u>Landschafts- und Naturschutz</u>	<u>Feststoffeintrag/Feststoffaustrag</u> Sind in den Zu- resp. Abflüssen zu bestimmen.  <u>Geschiebe (in Deltas)</u>  <u>Schwebstoffe</u> – Konzentration in Funktion von Zeit und Raum – Trübungsprofile – Zusammensetzung (Kornverteilung, organisch/anorganisch, chemisch/mineralogisch, klastisch/anthropogen) – Adsorptionseigenschaften  <u>Sedimente</u> – Sedimentationsrate – Volumenänderung infolge Umlagerung und Diagenese der Sedimente (Strömungsverhältnisse, Rutschungen, Gas- und Wassergehalt, Lagerungsdichte) – Zusammensetzung (Kornverteilung, organisch/anorganisch, chemisch/mineralogisch, klastisch/anthropogen)  <u>Schwimmstoffe</u> – Menge in Funktion von Zeit und Raum	– Bodenmechanische Parameter – Herkunft der Feststoffe: – Fließgewässer – Ufererosion – Felsstürze – Rutschungen – Lawinen – Staubbiederschlag – Künstliche Aufschüttungen und Einleitungen – Chemische und biogene Produktion – Baggerungen – Aufnahme von Spuren ausserordentlicher Ereignisse – Bathymetrische Aufnahmen, Deltawachstum – Feststoffhaushalt des Einzugsgebietes – Wasserqualität – Trübungsmessungen – Strömungsmessungen

Tabelle 3: Bedürfniskatalog Feststoffbeobachtung Seen.

## 1.5 Historischer Überblick, bisherige Aktivitäten und Publikationen

### 1.5.1 Beginn der Feststoffbeobachtungen

Seit ungefähr hundertfünfzig Jahren werden in der Schweiz Feststoffbeobachtungen durchgeführt. Dabei lassen sich im Laufe der Zeit verschiedene thematische Gewichtungen feststellen:

- Im 19. Jahrhundert wurden praktisch ausschliesslich Seegrund- und Deltaaufnahmen durchgeführt. Dies meistens mit dem Zweck, einerseits Grundlagen für wasserwirtschaftliche Fragestellungen (v. a. Wasserwerke, Verlegung von Kabeln) aufzuarbeiten, andererseits aus geologischem Interesse heraus (Abtrag, Gebietsveränderungen). Offensichtlich wurde damals wenig Wert auf einheitliche Aufnahmemethodik und Beschreibung der angewendeten Verfahren gelegt, was W. Stumpf 1916 zu Klagen veranlasste: «Leider begnügte man sich bisher meistens mit der gewünschten Feststellung der bestehenden Sohlenzustände, und nur selten gibt ein eingehender Bericht Aufschluss über die Art und Weise der Ausführung der betreffenden Vermessungen. Es ist deshalb nicht möglich, ihren Genauigkeitsgrad und den wirklichen Wert richtig einzuschätzen. Es wäre dies aber besonders wichtig für eine zweckmässige Verwertung neuerer Aufnahmen, um unter gleichen Bedingungen die neuen Zustände mit den alten vergleichen zu können. Hierzu gehört nicht nur die Orientierung über frühere Ausgangspunkte, Visurlinien usw., sondern auch die nähere Kenntnis der angewendeten Methode, der Apparate und aller Hilfsmittel, die zu dem betreffenden Resultat geführt haben» (COLLET et al. 1916).
- Ende des 19. Jahrhunderts wurde in der Schweiz zum ersten Mal eine Studie über Schwebstoffe betrieben; untersucht wurde die Arve während eines Jahres. In der Folge wurden verschiedene weitere derartige Untersuchungen durchgeführt, jedoch mit unterschiedlicher Methodik und Qualität. 1904 folgte eine einjährige Untersuchung der Schwebstoffführung der Rhone bei Porte du Scex. An der Drance bei Martigny wurde ab 1909 während fünf Jahren eine erste Reihe von Schwebstoffhebungen gemacht. Im Jahre 1913 veranlasste der damalige Direktor der Landeshydrographie, L.-W. Collet, während 18 Stunden die Sperrung der Rhone, um den Zusammenhang zwischen Schwebstoff- und Geschiebetransport näher zu studieren! Im selben Jahr wurde mit einer 2-jährigen Erhebung der Schwebstoffe an der Massa begonnen.
- Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann man mit Messungen im Einzugsgebiet selbst, wobei hier neben dem Feststofftransport auch abflussrelevante Vorgänge im Vordergrund standen. So wurden durch die Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen die Untersuchungsgebiete Sperbel- und Rappengraben eingerichtet.
- Während und kurz nach dem ersten Weltkrieg wurden die ersten Studien über Feststoffbeobachtungen des damaligen Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft publiziert, beispielsweise über Schwebstoffbeobachtungen (Rhone – Porte du Scex, Massa, Drance, Trient – Trient) und über Geschiebeablagerungen (Aare – Bern, Felsenau). In COLLET et al. (1916) wird der damalige Wissensstand umfassend dargestellt.
- In der Zwischenkriegszeit wurden stellenweise weitere Schwebstoffuntersuchungen und Deltavermessungen durchgeführt. Daneben wurden an verschiedenen Flüssen Querprofilaufnahmen gemacht. Ferner wurde das Versuchsgebiet Melera eingerichtet, wo durch die Eidg. Forschungsanstalt WSL und die Landeshydrologie bis ins Jahr 2002 Geschiebefrachten im Geschiebesammler erhoben worden sind.
- Nach dem 2. Weltkrieg wurden vorerst die bisher durchgeführten Arbeiten erweitert und ergänzt. Insbesondere wurden viele Deltaaufnahmen mit moderneren Messtechniken durchgeführt.
- In den 70er Jahren wurde unter dem Vorsitz der Landeshydrologie eine Untergruppe Feststoffbeobachtung der Gruppe für Operationelle Hydrologie (GHO) gegründet mit dem Ziel, Grundlagen und Informationen über den Feststofftransport für die Praxis bereitzustellen. Die GHO übertrug dieser Gruppe 1979 den Auftrag, ein Konzept für die zukünftigen Aktivitäten auf dem Gebiet des Feststofftransportes zu erarbeiten. Aufgrund dieses Auftrages entstanden verschiedene Studien zur Erfassung des Feststofftransportes in der Schweiz.
- Seit 1987 erfassen LH, WSL und interessierte Kantone Feststoffe in Geschiebesammlern nach einem festgelegten Konzept. Ziel dieses Messprogrammes ist die langfristige und kostengünstige Erfassung des Feststoffaustrags aus kleinen schweizerischen Einzugsgebieten.
- Im Rahmen von Studien, Untersuchungen und Forschungsarbeiten haben zudem Hochschulen und private Institutionen Beobachtungen durchgeführt, um Lösungen für spezifische wasserbauliche Probleme zu finden, resp. um Grundlagen für die Modellkalibrierung oder -verifizierung zu erhalten.

### 1.5.2 Stand der Feststoffbeobachtung

Obwohl Untersuchungen über den Feststofftransport bis ins 19. Jahrhundert zurückreichen, ist der komplizierte Mechanismus des Transportes von festen Stoffen – namentlich bei Hochwasser – weitgehend ungeklärt. Die Vorgänge, welche die Fluss- oder Bettform bestimmen, sind zwar bekannt und theoretisch sowie im Labor nachvollziehbar, im Detail sind die Erkenntnisse aber immer noch ungenügend.

Die Stabilität und Hochwassersicherheit der Gerinne wird durch die Feststoffführung entscheidend beeinflusst (vgl. Figur 5). Dies gilt in besonderem Masse für die Wildbäche, die extrem grosse Feststoffmengen transportieren und entsprechende Verheerungen verursachen können.



Figur 5: Übermurter Wildbachkegel des Glyssibachs in Brienz, nach den Unwettern vom August 2005.

In Seen und Stauräumen wird ein grosser Teil der Feststofffracht abgelagert. Über die ablaufenden Sedimentationsvorgänge ist noch wenig bekannt, obwohl sie bei der Verlandung der Beckenräume entscheidend sind.

Für die zunehmenden Bedürfnisse aus den Fachgebieten Gewässerschutz, Naturschutz und Fischerei, die eng mit dem Feststofftransport verbunden sind (Wahl der optimalen Gerinneform, Selbstreinigung, Kolmatierung, Grundwasseranreicherung, Restwasser, Ökologie usw.), müssen vermehrt Feststoffdaten zur Verfügung gestellt werden.

Die Feststofftransportprozesse sind äusserst komplex. Neben theoretischen Untersuchungen und Laborarbeiten werden es auch in Zukunft nur zuverlässige Messungen an natürlichen Gewässern erlauben, die Wildbachtätigkeit, die Gerinneveränderungen, die Abflusskapazität von Fließgewässern sowie Verlandungsvorgänge in Seen und Stauhaltungen besser beurteilen zu können. Da solche Messreihen aus statistischen Gründen viele Jahre umfassen müssen, und sich diese Problematik durch Klimafluktuationen in Zukunft verschärfen könnte, sollten bisherige Untersuchungen intensiviert und der Beginn neuer Messreihen nicht hinausgezögert werden. Feststoffbeobachtungen sollen dabei nicht isoliert, sondern immer in Verbindung mit weiteren Untersuchungen (Hydrologie, Meteorologie, Geologie usw.) durchgeführt werden.

Da bezüglich Kenntnisse über den Geschiebetransport und dessen messtechnischer Erfassung noch vieles aufzuarbeiten ist, erscheint es sinnvoll, vorerst nur die elementarsten Grössen der Geschiebeführung zu erfassen. In den Wildbächen betrifft dies hauptsächlich die Feststofffracht. Für die wasserwirtschaftliche Planung benötigt man vor allem langjährige Durchschnittswerte und Extremwerte der Ablagerung.

Fortschritte bei den numerischen Simulationstechniken ermöglichen die Entwicklung vielversprechender Voraussagemodelle. Die Weiterentwicklung der heute existierenden Modelle, beispielsweise zur Berechnung des Verhaltens von Flussgerinnen oder der Auswirkung von Einbauten, muss mit Messwerten abgesichert werden. Solche Messwerte sind jedoch selten.

Das transportierte Geschiebe muss an ausgewählten Flussstrecken über mehrere Jahre hinweg erhoben werden, um zuverlässige Vergleiche zu ermöglichen. Anhaltspunkte können zur Zeit nur in wenigen Fällen über die Erfassung der Geschiebefrachten gewonnen werden. Das Messnetz für die Abschätzung dieser Geschiebefrachten wäre deshalb nach Möglichkeit auszubauen.

Im Zusammenhang mit Seen und Stauhaltungen ist die Kenntnis des Feststoffeintrages, der Schwebstoffbilanz, der Feststoffcharakteristika, der Schwebstoffkonzentration und der Sedimentationsraten notwendig. Hier bestehen grosse Lücken.

In Tabelle 4 ist eine generelle Übersicht der bis heute ausgeführten Feststoffbeobachtungen dargestellt.

FESTSTOFFART	WILDBÄCHE	FLÜSSE	SEEN
<u>Geschiebe</u>	<u>Jahresfracht</u> – Schätzungen, systematisch nur in Versuchsgebieten und dem GHO Geschiebemessnetz  <u>Katastropheneignisse</u> – Schätzung der Übermurenkubaturen oder der Ablagerungen in Geschiebesammlern, sporadisch, heute üblich – Abschätzung von Feststofffrachten zukünftiger Ereignisse mit Hilfe des Verfahrens GHO (1996)  <u>Ganglinie des Geschiebes</u> – Nur in Untersuchungsgebieten	<u>Geschiebeführung</u> – Vereinzelt Messungen  <u>Geschiebefrachten</u> – Zusammen mit Schwebstoffen in Speichern und Seen – an Einzelstandorten	—
<u>Schwebstoffe</u>	<u>Schwebstoffführung und -fracht</u> – Systematisch nur in wenigen Versuchsgebieten	<u>Schwebstoffkonzentration</u> – An vielen Messstellen  <u>Schwebstoffführung</u> – Systematisch nur in wenigen Flussstrecken  <u>Schwebstofffracht</u> – Berechnet an Messstationen	<u>Mehrjahresfrachten von Geschiebe und Schwebstoffen</u> – In Seedeltas und Stauräumen, sporadisch  <u>Sedimentationsraten</u> – Spezialuntersuchungen  <u>Zusammensetzung</u> – Spezialuntersuchungen  <u>Schwebstoffbilanz</u> – Spezialuntersuchung
<u>Feststoffcharakteristiken</u>	<u>Kornverteilung, Raumgewicht</u> – Nur in Einzelfällen erfasst, meist Schätzungen	<u>Korngrößenverteilung</u> – Sporadische Messungen	<u>Kornverteilung</u> – Sporadische Messungen
<u>Schwemmstoffe</u>	<u>Geschwemmselfracht</u> – Schätzungen bei spez. Ereignissen	<u>Geschwemmselfracht</u> – Sporadisch nach Hochwasserereignissen  <u>Eisfracht</u> – Sporadische Schätzungen	<u>Geschwemmselfracht</u> – Schätzung bei Hochwasserereignissen
<u>Weitere Beobachtungen</u>	<u>Erosionspotential</u>  <u>Feststoffhaushalt</u> – Spezielles Verfahren zur Abschätzung	<u>Quer- und Längsprofile</u> – Alle 10 Jahre in vielen Flussstrecken  <u>Flussmorphologie</u> – In Einzelfällen	<u>Bathymetrische Aufnahmen</u> – Sporadisch  <u>Trübungsmessung</u> – Spezielle Fragestellungen – Vereinzelt

Tabelle 4: Generelle Übersicht der bis heute ausgeführten Feststoffbeobachtungen.

### 1.5.3 Publikationen der Landeshydrologie zum Thema Feststoffbeobachtung

Verschiedene Tätigkeiten auf dem Gebiet der Feststoffbeobachtung wurden seit längerer Zeit durch das Bundesamt für Wasser und Geologie publiziert. Eine umfassende Liste der in der Schweiz publizierten Arbeiten zum Thema Feststoffbeobachtung von Mitte des 19. Jahrhunderts bis etwa 1980 findet sich bei GHO (1983).

- Die erste wichtige Publikation war «Le charriage des alluvions dans certains cours d'eau de la Suisse» (COLLET et al. 1916). In zwei Teilen werden Ergebnisse der bis zu diesem Zeitpunkt ausgeführten Feststoffbeobachtungen veröffentlicht (Teil 1: «Le charriage des alluvions» von L.-W. Collet; Teil 2: «Méthode der Deltavermessungen» von W. Stumpf). Ferner werden Betrachtungen über die Stauraumverlandungen und durchgeführte Seegrund- und Deltaaufnahmen angestellt.
- Die Publikation «Das Rheindelta im Bodensee» (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1923) berichtet über die bis zum damaligen Zeitpunkt ausgeführten Deltavermessungen.
- Es folgte «Il Delta della Maggia nel Lago Maggiore» (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1926) mit der Darstellung der Vermessungen des Maggiadeltas im Lago Maggiore.
- Die Publikation «Wasserführung, Sinkstoffführung und Schlammablagerung des Alten Rheins» (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1932) beschäftigte sich vorwiegend mit hydrologischen und sedimentologischen Untersuchungen im Rhein vor der Mündung in den Bodensee.
- Eine sehr umfassende und lesenswerte Studie ist «Untersuchungen in der Natur über Bettbildung, Geschiebe- und Schwebstoffführung» (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939a). Untersucht wurde der Geschiebetransport in der Aare im Haslital, insbesondere bei Brienzwiler, um die Geschiebetriebsformel von Meyer-Peter/Müller in der Natur zu überprüfen. Es wurden sehr aufwändige Beobachtungen und Messungen verschiedener relevanter Parameter durchgeführt, insbesondere die Bestimmung des  $k$ -Wertes für die Sohlenrauigkeit, eingehende Geschiebe- und petrografische Analysen gemacht, die Schwebstoff- und Geschiebeführung gemessen und die Sohlenentwicklung abgeschätzt. Ferner wurden die Messungen mit Deltaaufnahmen im Briener See verglichen und sowohl Geschiebe als auch Schwebstofffrachten geschätzt. Die jährliche Feststofffracht (hier noch als Schwerstofffracht bezeichnet) wurde durch Deltavergleiche der Jahre 1898 und 1932 auf 220'000 t/Jahr. Die Gesamtablagerungen werden mit 11 Mio t angegeben.
- «Deltaaufnahmen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft» (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b). In dieser Publikation werden Deltavermessungen und Volumenabschätzungen vorgestellt (Rheindelta – Bodensee, Aaredelta – Briener See, Aaredelta – Bieler See, Linthdelta – Walensee, Delta de la Baye de Montreux – Lac Léman, Delta del Cassarate – Lago di Lugano, Delta del Ticino, della Verzasca e della Maggia – Lago Maggiore).
- In den 60er und 70er Jahren entstanden verschiedene interne Berichte der Landeshydrologie über die Schwebstoffmessungen an den einzelnen Flüssen.
- 1983 veröffentlichte die GHO mit dem «Verzeichnis von in der Schweiz durchgeführten Feststoffbeobachtungen, Delta-, Seegrund- und Querprofilaufnahmen» (GHO 1983) eine Zusammenstellung praktisch aller bekannten Arbeiten auf dem Gebiet des Feststofftransportes.
- «Feststoffbeobachtung in schweizerischen Gewässern» (GHO 1984) enthält Schlussfolgerungen und Empfehlungen an Fachstellen auf dem Gebiet des Feststofftransportes. Die Empfehlungen betreffen in erster Linie Erfahrungen im Umgang mit neuen Messgeräten und Messmethoden, u. a. für die Erfassung von Feststofffrachten in Wildbächen und Schwebstofffrachten in Flussgebieten.
- «Die mengenmässige Erfassung von Schwebstoffen und Geschiebefrachten» (GHO 1987) beschreibt verschiedene Aspekte des Feststofftransportes sowie der Probleme der Erfassung. Ferner gibt die Publikation einen Überblick über bestehende Messgeräte und -methoden sowie eine Darstellung zweckmässiger Erhebungen von Geschiebefrachten.
- Die Publikation «Ursachenanalyse der Hochwasser 1987» (LHG 1991) enthält Studien, welche sich direkt mit dem Feststofftransport während der Ereignisse 1987 befassen.
- Zwei neuere Publikationen: «Empfehlungen zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen» (GHO 1996) sowie «Erhebung von Feststoffen nach Unwettern» (GHO 1999) werden in Kapitel 5 speziell erwähnt.
- Die Tafel «Schwebstoffkonzentrationen und -frachten» aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz (JAKOB & SPREAFICO 1997) stellt die Schwebstoffkonzentrationen aus dem Messnetz der LH und von Stichprobenerhebungen kantonaler Gewässerschutzfachstellen aus den Jahren 1979 bis 1993 dar. Für Stationen des LH-Messnetzes sind zudem die entsprechenden Frachtberechnungen aufgeführt.

- Die Publikation «Trübungsmessungen zur Abschätzung von Schwebstofffrachten» (BINDERHEIM-BANKAY & JAKOB 1999) ist ein Erfahrungsbericht zur Verknüpfung der Schwebstoff- mit Trübungsmessungen. Ein einfacher Umrechnungsfaktor konnte nicht festgestellt werden. Die Trübungsmessungen bilden jedoch eine wertvolle Ergänzung zu den Schwebstoffkonzentrationsbestimmungen.
- In der Veröffentlichung «Charge de sédiments en suspension – Comparaison entre deux méthodes de calcul» (GRASSO & JAKOB 2003) werden die Ergebnisse der Gegenüberstellung der beiden bisher an der Landeshydrologie angewendeten Frachtberechnungsmethoden aufgezeigt. Mit der ab dem Jahre 2000 benutzten Methode scheint die Fracht besser abgeschätzt zu werden.

## 2 Die Messnetze

### 2.1 Schwebstoffe

Die Landeshydrologie (LH) erhebt seit 1962 an ausgewählten hydrologischen Stationen die Schwebstoffkonzentrationen. Das Messnetz stellt ein wichtiges Instrument zur Überwachung der schweizerischen Oberflächengewässer dar.

#### 2.1.1 Zielsetzung des Schwebstoffmessnetzes der Landeshydrologie

Das Programm zur langfristigen Beobachtung des Schwebstofftransportes umfasst sowohl die Erhebung als auch die Auswertung und die Veröffentlichung der Daten. Dabei werden die folgenden Ziele verfolgt:

- Lieferung der Grundlagen für die Erfolgskontrolle der schweizerischen Gewässer- und Umweltschutzgesetzgebung sowie für Nutzer im Bereich der Wasserwirtschaft.
- Ermöglichung von Prozess-, Ursachen- und Wirkungsanalysen verschiedener Art, z. T. durch Kooperation mit entsprechenden Fachstellen (z. B. BUWAL, BLW, ETHZ, EPFL, EAWAG, SMA, WSL).

Nutzungsziele sind:

- Lieferung von Grundlegendaten:
  - zur Erfassung des Gewässerzustandes im Sinne des Gewässerschutzgesetzes und der Gewässerschutzverordnung,
  - zur Kontrolle der Einflüsse durch Aktivitäten wie Flussmaterialausbeutung und Wartung von Stauräumen,
  - zur Abschätzung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Erosions- und Transportprozesse,
  - zur Abschätzung der Sedimentation in Stauräumen und Seen,
  - zur Abschätzung der Kolmatierung von Fließgewässern,
  - zur Abschätzung des Transportes und der Akkumulation der Schwermetalle und
  - zur Abschätzung des Einflusses des Feststofftransportes auf biologische Prozesse.
- Ermöglichung von Analysen:
  - zu regionalen Erosionsraten in Einzugsgebieten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gebietsparameter (mit Hilfsmitteln wie Statistik und GIS) und

- zur Verifikation von Modellen zur Schwebstoffproduktion und zum Schwebstofftransport.
- Sicherstellen:
  - von langfristigen Monitoring-Messreihen und
  - der Frachtberechnungen mit Hilfe von Trübungsmessungen.
- Koordination:
  - mit hydrologischen Untersuchungsgebieten,
  - mit dem Geschiebemessnetz der GHO,
  - mit längerfristigen Forschungsprojekten Dritter,
  - mit Forschungsprojekten Dritter mit einem Bezug zum Schwebstofftransport und
  - mit Messungen kantonaler Fachstellen.

Die Messstationen sind so angelegt, dass eine zuverlässige Aussage über den Schwebstofffluss erreicht werden kann. Daher werden diese Messungen möglichst bei bestehenden Abflussmessstationen durchgeführt.

Weiter wird darauf geachtet, dass der Schwebstofftransport bei möglichst unterschiedlicher Wasserführung erfasst werden kann. Schwebstofftransport bei Niedrigwasser sollte ebenso erhoben werden können wie bei Hochwasser. Ebenso sollten die jahreszeitlichen Schwankungen in der Schwebstoffführung berücksichtigt werden können. Dies bedingt aber eine gewisse Flexibilität bei Planung und Ausführung der Messeinsätze.

Leider ist es aufgrund der personellen und finanziellen Ressourcen nicht möglich, alle der oben genannten Ziele zu verfolgen. Das bestehende Messnetz hat die Minimalgrösse, damit die wichtigsten der oben erwähnten Aufgaben gerade noch erfüllt werden können. Zur Lösung spezieller Problemstellungen werden oftmals Zusatzuntersuchungen notwendig sein.

#### 2.1.2 Überblick über die Messstationen

Das Messnetz deckt die wichtigen Fließgewässer in den Hauptstromgebieten der Schweiz ab. Es ist so angelegt, dass einerseits die Schwebstoffeinträge in die grössten Seen der Schweiz erfasst werden können, andererseits der Schwebstoffaustrag aus der Schweiz hinaus ins nahe Ausland grob ermittelt werden kann. 2003 wurde am BWG ein neues Schwebstoffmesskonzept ausgearbeitet und mit Kunden diskutiert. Einen Überblick über das gesamtschweizerische Messnetz geben Tabelle 5 und Figur 6.

Nr	Station	Standardnetz	Querprofile	Messperiode
1962	Aare – Brienzwiler	✓	1991,92, 93, 98,99	1964–
1814	Aare – Brienzwiler, ASPEG			1993–1998
1969	Aare – Brugg			1962–1974
1967	Aare – Brügg, Aegerten			1962–1974
1966	Aare – Hagneck	✓		1971–1978, 2004–
2043	Aare – Ringgenberg, Goldswil			1995–1996
1964	Aare – Unterseen, Gurben			1964–1974
1970	Aare – Untersiggenthal		1993	1962–1993
2027	Albula – Tiefencastel		1992	1993
2027	Areuse – Boudry		1993, 98	1993
1983	Arve – Genève, Bout du Monde		1991, 92, 93, 98	1992–2003
2037	Arve – Genève, Pont des Acacias			1964–1992
2021	Birs – Münchenstein		1993, 98	1993
1980	Borgne – La Lurette			1966–1974
2026	Broye – Payerne		1992, 93, 98	1993
2032	Doubs – Ocourt		1993, 98	1993
2038	Emme – Wiler, Biberist	✓	1991, 92, 93, 98	1983–
1968	Emme – Wiler, Krälligensteg			1979–1983
0841	Fexbach – Sils Maria			2001–2005
2020	Glatt – Rheinsfelden		1992, 93, 98	1993
1981	Grande Eau – Aigle			1966–1974
2018	Hinterrhein – Fürstenau		1993	1999
1987	Inn – Martinsbruck			1962–1974
2036	Inn – Tarasp/Schuls		1993	1993
2022	Kander – Hondrich		1993	1993
2028	Kleine Emme – Littau	✓	1993, 98	1993, 2004–
1988	Landquart – Felsenbach		1991, 92, 93	1979–2003
1973	Linth – Mollis, Kupfernsteg	✓	1991, 92, 93	1964–
1975	Linth – Weesen			1964–1974
1979	Lonza – Blatten		1969, 91, 92, 98	1966–2003
1815	Lütschine – Gsteig, ASPEG			1993–
1963	Lütschine – Gsteig, Bönigen	✓	1991, 92, 93, 98, 99	1964–
2035	Maggia – Locarno, Solduno	✓	1992, 93, 98	1993, 2004–
2033	Moesa – Lumino		1992, 93, 98	1993
1972	Reuss – Mühlau		1991, 93, 98	1977–2003
1971	Reuss – Seedorf	✓	1991, 92, 93, 98	1979–
1956	Rhein – Bad Ragaz			1963–1974
1957	Rhein – Bad Ragaz, ARA			1979–1991
1958	Rhein – Diepoldsau	✓	1991, 92, 93, 98	1984–
1959	Rhein – Schmitter			1966–1984
1976	Rhône (Rotten) – Brig, Brigerbad			1965–1974
2029	Rhône (Rotten) – Brig, oberhalb Saltinamündung		1992, 93, 98	1992–1993, 2002–2004
1983	Rhône – Genève, Pont Sous-Terre			1964–1974
1982	Rhône – Porte du Scex	✓	1993, 98	1964–
2025	Sarine – Broc		1993, 98	1993
1989	Seez – Mels			1970–1975
2023	Simme – Oberwil		1992, 93, 98	1992–1993
2019	Sitter – St. Gallen		1992, 93, 98	1993
1960	Thur – Bütschwil			1962–1975
1961	Thur – Halden	✓	1991, 92, 93, 98	1975–
1985	Ticino – Bellinzona	✓	1991, 92, 98	1985–
1986	Ticino – Riazino, Gudo			1979–1984
2031	Vispa – Visp		1993, 98	1993
1965	Worble – Ittigen			1988–1991

Tabelle 5: Aktuelle und ehemalige Schwebstoffmessstandorte in der Schweiz.

Der Betrieb des Messnetzes richtet sich insbesondere nach den vorhandenen infrastrukturellen und personellen Ressourcen. So sind die Standorte der Schwebstoffmessstellen an die Nähe von Abflussmessstationen gebunden, damit möglichst präzise auf Schwebstofffrachten geschlossen werden kann. Es ist aber nicht möglich und fallweise auch nicht sinnvoll, an jeder Abflussmessstation Schwebstoffe zu messen.

Die automatische Erfassung von Schwebstoffproben in Fließgewässern ist methodisch noch nicht befriedigend gelöst. Sie ist insbesondere aufgrund der Voraussetzung, dass solche Messungen nur am Rand des Fließgewässers möglich sind, nicht überall anwendbar. Eine weitere wichtige Vorgabe für den Betrieb eines automatischen Gerätes ist ein möglichst gerade ausgerichtetes Gerinne.

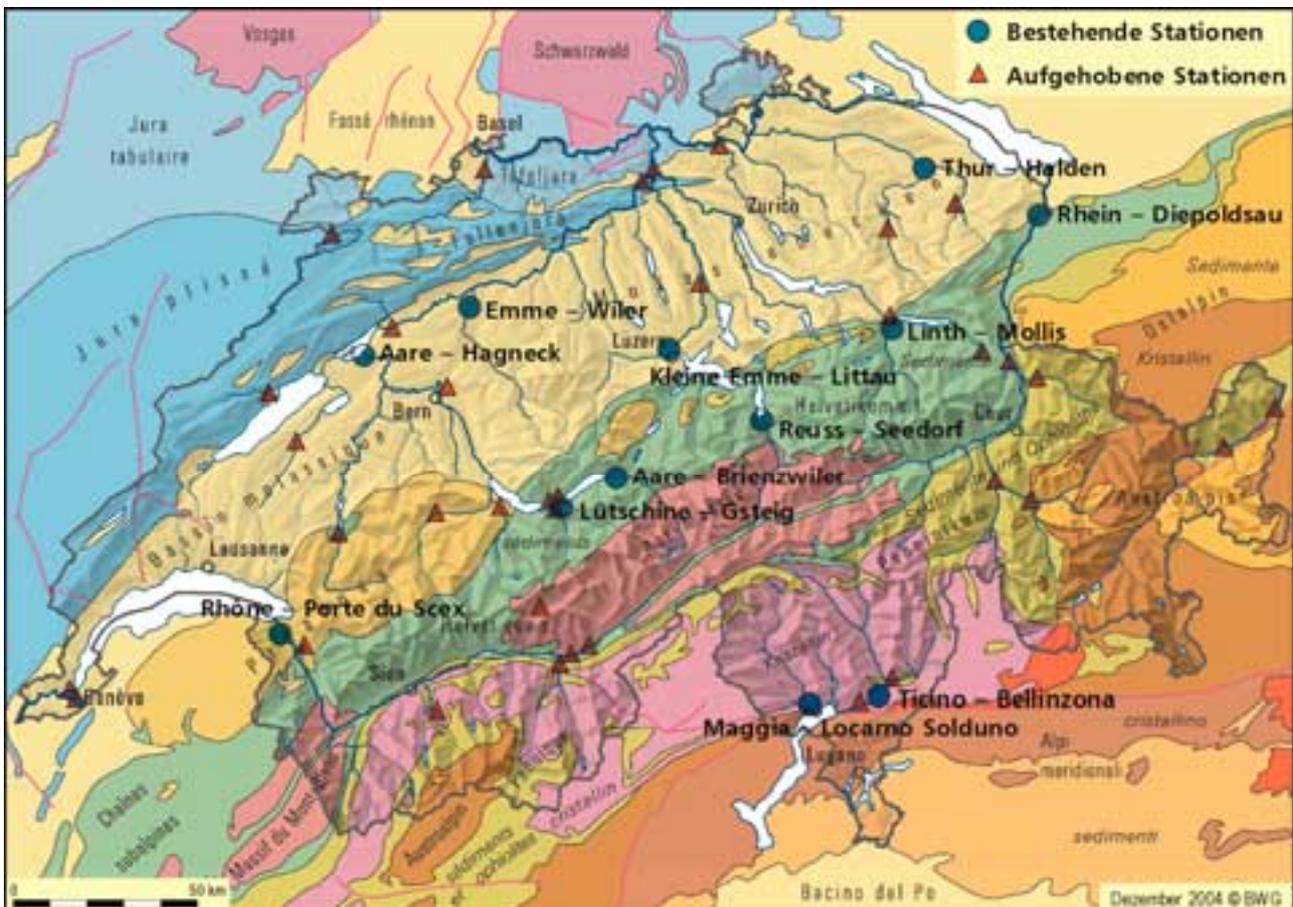
An den Stationen des Standardnetzes wird zweimal pro Woche eine Oberflächenprobe in der Flussmitte erhoben. An den Standorten, welche nur für spezielle

Messkampagnen verwendet werden, wurden seit 1991 2–3 Messkampagnen durchgeführt. Dabei wurden je nach Flussbreite 4 bis 8 Proben im Querprofil entnommen.

Zurzeit umfasst das Schwebstoff-Messnetz:

- 1 Standort, an welchen täglich eine Probe entnommen wird und
- 12 Standorte mit 2-mal wöchentlicher Probeentnahme.

Ferner sind Daten von Standorten vorhanden, welche aufgehoben oder innerhalb desselben Flussgebietes verlegt worden sind. Insgesamt wurden bisher an 53 verschiedenen Standorten Schwebstoffproben entnommen.



Figur 6: Schwebstoffmessnetz der Landeshydrologie: Karte der Messstandorte mit geologischer Zugehörigkeit.

### 2.1.3 Charakterisierung der Messstandorte des Standardnetzes

(Alphabetische Reihenfolge gemäss Tabelle 5)

#### **Aare – Brienzwiler**

Messperiode	ab 1964
Einzugsgebietsfläche	554 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	2150 m ü.M.
Höhe der Station	570 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	34,5m <sup>3</sup> /s
Regime	B-glaciaire
Geologie	Kalkalpen
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 7: Messstandort Aare – Brienzwiler.

#### **Aare – Hagneck**

Messperioden	1971–78, ab 2004
Einzugsgebietsfläche	5128 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1380 m ü.M.
Höhe der Station	437 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	178 m <sup>3</sup> /s
Regime	–
Geologie	Molasse
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 8: Messstandort Aare – Hagneck.

#### **Arve – Genève, Bout du Monde (ersetzt Arve – Genève, Pont des Acacias)**

Messperioden	1964–92, 1992–2003
Einzugsgebietsfläche	1976 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1370 m ü.M.
Höhe der Station	380 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	79 m <sup>3</sup> /s
Regime	Nivo-pluvial jurassien
Geologie	Molasse
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 9: Messstandort Arve – Genève, Bout du Monde.

### **Emme – Wiler, Biberist**

#### **(ersetzt Emme – Wiler, Kräiligensteg)**

Messperioden	1979–83, ab 1983
Einzugsgebietsfläche	940 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	860 m ü.M.
Höhe der Station	458 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	19 m <sup>3</sup> /s
Regime	Mittelländisches Regime
Geologie	Molasse
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 10: Messstandort Emme – Wiler, Biberist.

### **Kleine Emme – Littau**

Messperioden	1993, ab 2004
Einzugsgebietsfläche	477 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1050 m ü.M.
Höhe der Station	431 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	15,8m <sup>3</sup> /s
Regime	Nivo-pluvial préalpin
Geologie	Molasse
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 11: Messstandort Kleine Emme – Littau.

### **Landquart – Felsenbach**

Messperiode	1979–2003
Einzugsgebietsfläche	616 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1800 m ü.M.
Höhe der Station	571 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	24 m <sup>3</sup> /s
Regime	Nival alpin
Geologie	Kalkalpen
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 12: Messstandort Landquart – Felsenbach.

### **Linth – Mollis, Kupfernsteg**

Messperiode	ab 1964
Einzugsgebietsfläche	600 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1730 m ü.M.
Höhe der Station	436 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	32 m <sup>3</sup> /s
Regime	Alpines Regime
Geologie	Kalkalpen
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 13: Messstandort Linth – Mollis, Kupfernsteg.

### **Lonza – Blatten**

Messperiode	1966–2003
Einzugsgebietsfläche	78 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	2630 m ü.M.
Höhe der Station	1520 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	4,6 m <sup>3</sup> /s
Regime	A-glaciaire
Geologie	Kristallin
Gerinne	Wildbach, seitlich verbaut, gekrümmt



Figur 14: Messstandort Lonza – Blatten.

### **Lütschine – Gsteig**

Messperiode	ab 1964
Einzugsgebietsfläche	379 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	2050 m ü.M.
Höhe der Station	585 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	19 m <sup>3</sup> /s
Regime	A-glacio-nival
Geologie	Kalkalpen
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gekrümmt, verbaut



Figur 15: Messstandort Lütschine – Gsteig.

### **Maggia – Locarno, Solduno**

Messperioden	1993, ab 2004
Einzugsgebietsfläche	926 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1530 m ü.M.
Höhe der Station	202 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	24,2 m <sup>3</sup> /s
Regime	nivo pluvial méridional
Geologie	Kristallin
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade



Figur 16: Messstandort Maggia – Locarno, Solduno.

### **Reuss – Mühlau**

Messperiode	1977–2003
Einzugsgebietsfläche	2904 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1380 m ü.M.
Höhe der Station	390 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	130 m <sup>3</sup> /s
Regime	Mittelländisches Regime
Geologie	Molasse
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gekrümmt, verbaut



Figur 17: Messstandort Reuss – Mühlau.

### **Reuss – Seedorf**

Messperiode	ab 1979
Einzugsgebietsfläche	832 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	2010 m ü.M.
Höhe der Station	438 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	44 m <sup>3</sup> /s
Regime	Alpines Regime
Geologie	Kalkalpen
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 18: Messstandort Reuss – Seedorf.

### **Rhein – Diepoldsau (ersetzt Rhein – Schmitter)**

Messperioden	1966–84, ab 1984
Einzugsgebietsfläche	6119 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1800 m ü.M.
Höhe der Station	410 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	229 m <sup>3</sup> /s
Regime	Alpines Regime
Geologie	Kalkalpen
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 19: Messstandort Rhein – Diepoldsau.

### **Rhône – Porte du Scex**

Messperiode	ab 1964
Einzugsgebietsfläche	5220 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	2130 m ü.M.
Höhe der Station	377 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	182 m <sup>3</sup> /s
Regime	Alpines Regime
Geologie	Voralpine Molasse
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gerade, verbaut



Figur 20: Messstandort Rhône – Porte du Scex.

### **Thur – Halden**

Messperiode	ab 1975
Einzugsgebietsfläche	1085 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	910 m ü.M.
Höhe der Station	456 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	38 m <sup>3</sup> /s
Regime	Mittelländisches Regime
Geologie	Molasse
Gerinne	Teilweise kanalisiertes Gerinne, gekrümmt



Figur 21: Messstandort Thur – Halden.

### Ticino – Bellinzona

Messperiode	ab 1985
Einzugsgebietsfläche	1515 km <sup>2</sup>
Mittlere Höhe des EZ	1680 m ü.M.
Höhe der Station	220 m ü.M.
Mittlerer Jahresabfluss	68 m <sup>3</sup> /s
Regime	Südalpines Regime
Geologie	Kristallin
Gerinne	Kanalisiertes Gerinne, gekrümmt, verbaut



Figur 22: Messstandort Ticino – Bellinzona.

## 2.2 Geschiebe

Nach verheerenden Unwettern im Sommer 1987, die im Schweizer Alpenraum grossräumig viele Schäden verursacht hatten, wurde das GHO Geschiebemessnetz ins Leben gerufen. Die Landeshydrologie, die Eidg. Forschungsanstalt WSL und interessierte Kantone erfassen Feststoffe in Geschiebesammlern (Bsp. s. Fig. 23) nach einem gemeinsam festgelegten Konzept.

### 2.2.1 Ziele des Messnetzes der GHO für die Erfassung von Geschiebefrachten in Geschiebesammlern

Um die bestmögliche Ausschöpfung des Informationsgehalts von Erhebungen zu erreichen, arbeiten Bundesstellen, Kantone und Forschung eng zusammen. Dabei verfolgen sie die Ziele:

- Sicherstellen der langfristigen Erfassung von Geschiebefrachten in Geschiebesammlern.
- Vereinheitlichung der Methoden zur Erfassung und Auswertung.
- Gewährleistung der zentralen resp. koordinierten Analyse der Beobachtungen.

Mit dem gesammelten Datenmaterial soll eine Grundlage für die räumliche und zeitliche Extrapolation von Feststoffdaten sowie für die Eichung von mathematischen Modellen geschaffen werden.



Figur 23: Geschiebeablagerungsplatz Schipfenbach, Silenen.

### 2.2.2 Angaben zum Messnetz

#### Planung des Messnetzes

Die Planung des Messnetzes erfolgte in Zusammenarbeit von Bund, Kantonen und Vertretern der Forschung. Das Messnetz sollte die verschiedenartigen Fließgewässer in der Schweiz widerspiegeln. Die idealen Anforderungen an das Messnetz wurden zielgerichtet wie folgt definiert:

- Abdeckung der wesentlichen geologischen Formationen durch das Messnetz.
- Keine ausgesprochenen Karstgebiete.
- Zugehörigkeit zu einer der typischen Klimaregionen der Schweiz.

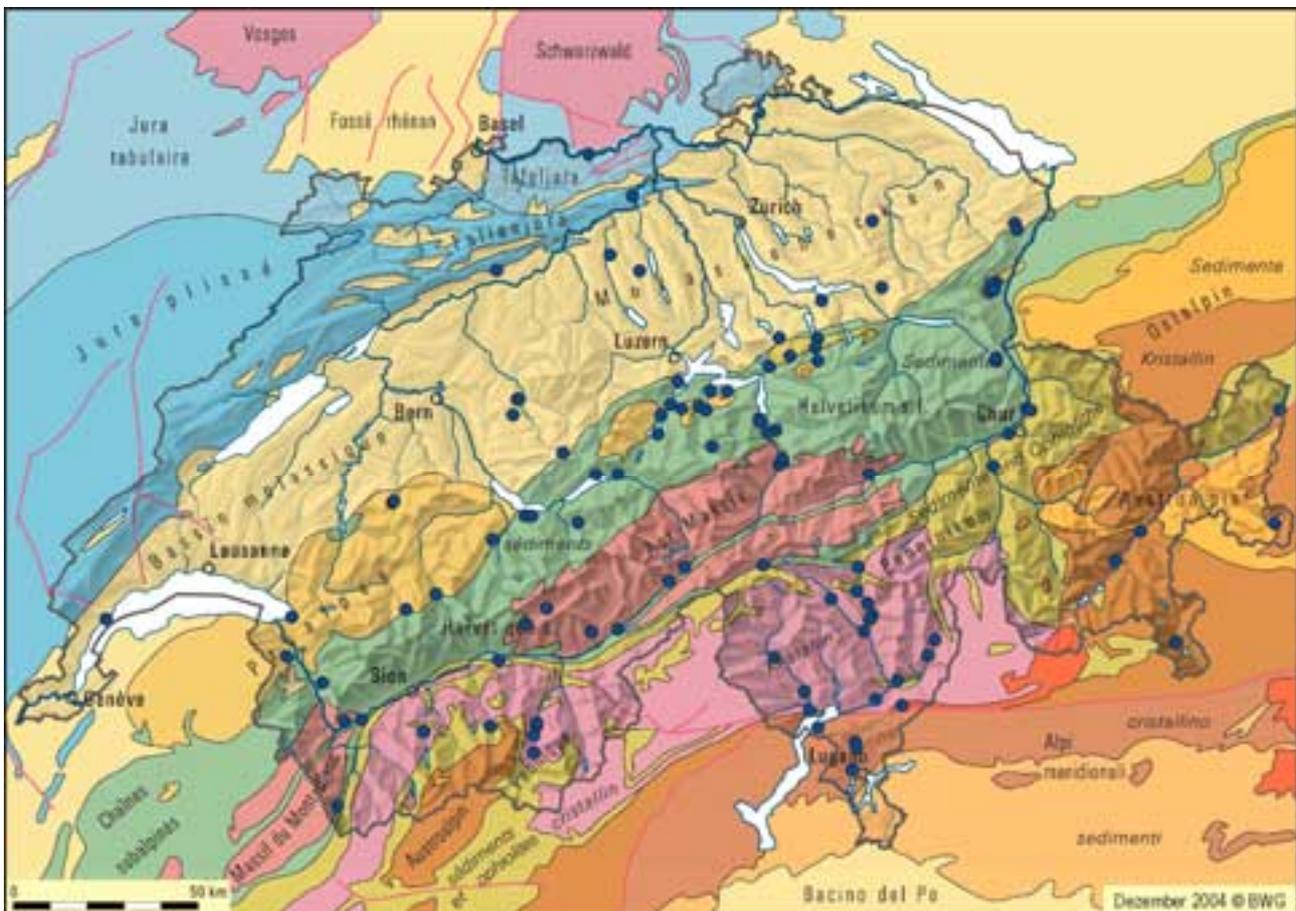
- Bezüglich Niederschlag typisch für «Gewitterregime», «Dauerregenregime» und «Schnee-/Gletscherregime». «Kraftwerksregime» sind weniger geeignet.
- Geringes Speichervermögen der Böden im Einzugsgebiet.
- Dichtes Gewässernetz.
- Vorzugsweise 1–10 km<sup>2</sup> grosse Einzugsgebiete.
- Gebiete, in welchen in absehbarer Zukunft keine wesentlichen Veränderungen (Besiedlung, Erschliessung, Nutzung) anstehen.
- Möglichst hohe Variation der Charaktere der Fließgewässer.
- Gebiete mit schwacher bis starker Geschiebeführung.
- Sowohl nicht murfähige als auch murfähige Bäche.
- Voll wirksamer Geschiebesammler, oder mehrere Sammler in Serie.
- Bachaufwärts des Sammlers keine grösseren Ablagerungen und Ausbrüche.
- Standort der Geschiebesammler am Kegelhals.

Anlässlich einer Überprüfung der Fließgewässer im Messnetz hinsichtlich obiger Anforderungen, erfolgte im Jahre 2003 eine Messnetzanpassung und -ergänzung. Figur 24 gibt einen Überblick über die einzelnen Messstandorte. Im Anhang 1 sind die Messperioden und Koordinaten aller Stationen aufgelistet.

### Betrieb

Die Erfassung der Geschiebefrachten erfolgt mit wenigen Ausnahmen durch die Kantone. Die zuständigen Stellen erheben die Daten auf einheitlichen Meldeformularen und übergeben diese alljährlich an die Landeshydrologie. Grundsätzlich wird nach jeder Leerung des Geschiebesammlers einer Messstation ein Meldeformular erstellt (Beispiel s. Anhang 2). Dieses enthält als minimale Information:

- die ausgebaggerte Geschiebekubatur und
- die Erhebungszeitperiode, also der Zeitraum zwischen der letzten und der aktuellen Leerung.



Figur 24: Karte der Messstationen des Geschiebemessnetzes mit geologischer Zugehörigkeit.

Als zusätzliche ergänzende Information können Angaben gemacht werden:

- zur Erhebungsfracht (Jahresfracht, Mehrjahresfracht, Fracht eines Einzelereignisses oder mehrerer Geschiebeschübe)
- zur Ursache des/der Ereignisse/s (Gewitter, langanhaltende Niederschläge),
- zur Zusammensetzung der Geschiebefracht (Anteil Geschiebe, Schwebstoffe, Holz)
- und zum Transportprozess (Murgang, normaler Geschiebetransport).

Dieses Vorgehen erlaubt, dass sowohl gut fundierte Mittelwerte der Geschiebefracht als auch Extremwerte ermittelt werden können.

Es ist vorgesehen, das Messnetz über einen längeren Zeitraum von mindestens 30 bis 50 Jahren zu betreiben. Damit können die Erhebungen sinnvoll statistisch ausgewertet werden und dienen als wichtige Erfahrungswerte bei den nachfolgenden Problemstellungen:

- Abschätzungen von Jährlichkeiten von Geschiebefrachten in Fließgewässern im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen und Risikoanalysen.
- Dimensionierung von Massnahmen wie beispielsweise Geschiebesammler oder Sperren im Rahmen von Schutzkonzepten im Wasserbau.
- Erfahrungswerte für die Validierung und Eichung entwickelter Abschätzmodelle der Forschung.

### **Bearbeitung und Auswertung der Daten**

Bei der Landeshydrologie werden die Meldungen der Kantone in der SOLID-Datenbank gespeichert und archiviert. Nach der Aufbereitung und Auswertung werden die Ergebnisse den involvierten Institutionen (Kantonen und den GHO-Mitgliedern) zur Verfügung gestellt.

### **2.2.3 Ergänzende Untersuchungen**

Das Ziel ist, parallel zur Datenerhebung schrittweise spezielle Studien durchzuführen, die der Verbesserung der Aufnahmetechnik, der Beurteilung von Gewässern und Einzugsgebieten, der Analyse der Daten und dem allgemeinen Kenntnissgewinn auf dem Gebiet des Geschiebetransportes gewidmet sind.

### **Laufende Untersuchungen**

Als erster Schritt werden seit 2003 die Einzugsgebiete

der Messstationen sukzessive beschrieben (ein Beispiel ist unter [www.gho.admin.ch](http://www.gho.admin.ch) veröffentlicht). Dabei werden folgende Aufnahmen gemacht:

- Aufarbeiten der Ereignisgeschichte und Verbautätigkeit des jeweiligen Fließgewässers (in Zusammenarbeit mit kantonalen Tiefbauämtern)
- Kennzahlen zur Morphometrie (GIS-Abfragen)
- Geologische Charakterisierung (Beschreibungen)
- Landnutzung (GIS-Abfragen)
- Hochwasserabschätzung (nach Verfahren HAKESCH, HQx\_meso\_CH)
- Abschätzung des Geschiebepotentials (nach Verfahren GHO 1996)
- Linienzahlanalysen
- Beschreibungen/Inventarisierung der Geschiebesammler
- Fotodokumentation des Einzugsgebiets

Als zweiter Schritt werden in einem externen Forschungsprojekt detaillierte Analysen abgelaufener Grossereignisse in Wildbachsystemen gemacht. Dadurch soll einerseits ein Beitrag zu einem besseren Prozessverständnis geleistet, andererseits ein Klassierungssystem für Wildbachereignisse entwickelt werden. Dieses GIS-basierte Klassierungssystem soll unter Berücksichtigung der naturräumlichen Faktoren im Einzugsgebiet wahrscheinliche Szenarien von Ereignisabläufen liefern und eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Geschiebefracht am Kegelhals möglich machen. Aus diesen Studien werden für die Auswertung und Einordnung der Daten aus dem Geschiebemessnetz wichtige Inputs erwartet.

### **Geplante Untersuchungen**

Geplant sind in Zukunft nach Möglichkeit zusätzliche vertiefende Bestimmungen der bodenmechanischen Geschiebekennwerte, der Abflussdaten von Hochwasserereignissen und eine kurze Beschreibung des Ereignisablaufs.

1. Bestimmung der bodenmechanischen Geschiebekennwerte

Die wichtigste Grösse ist die Kornverteilung. Da die Geschiebeablagerung häufig sehr heterogen aufgebaut ist und sich während des Ablagerungsvorganges das Material oft entmischt, ist es schwierig, eine repräsentative Materialprobe für die Bestimmung der Kornverteilung zu finden.

Eine wichtige Umrechnungsgrösse stellt das Raumgewicht dar, denn verschiedene Auswertemethoden benötigen entweder das Gewicht oder das Volumen der Geschiebefracht. Es handelt sich um das Raumgewicht der (ungestörten) Geschiebeablagerung. Eine weitere wichtige Hilfsgrösse ist in diesem Zusammenhang das spezifische Gewicht des Geschiebes. Das benötigte Materialvolumen der Probe weist allerdings ein Vielfaches des Volumens des Maximalkornes auf.

Da diese Geschiebekennwerte arbeitsintensive Untersuchungen verursachen, können diese Werte normalerweise nur sporadisch bestimmt werden (z. B. alle 5 bis 10 Jahre oder nach Extremereignissen).

## 2. Abflussdaten

Ist unterhalb des Geschiebesammlers eine Abflussmessstation vorhanden, können die für die Messperiode massgebenden Hochwasserabflussganglinien mit den Geschiebefrachtdaten verglichen werden. Auch die an Hochwassergrenzwertpegel beobachteten Pegelstände der Hochwasserereignisse stellen eine wichtige Zusatzinformation dar.

## 3. Beschreibung des Ereignisablaufs

Für die Beschreibung des Ereignisablaufs sind folgende Angaben erwünscht:

- Ursache des extremen Ereignisses (Gewitter, kurze bis lange Dauerregen, mit oder ohne Hagel, mit oder ohne Schneeschmelze usw.).
- Gründe, die zu der beobachteten, starken Geschiebeführung führten (Bacherosionen, Ufer- und/oder Hangrutschungen, Verklausungen, Bruch von Sperren, Verstopfen von Durchlässen, sonstige menschliche Eingriffe usw.).
- Verlauf des Geschiebeflusses (gleichmässiger Abfluss, schubweiser, in einer oder mehreren Wellen erfolgreicher Abfluss als Murgang oder als «Erdlawine», d. h. sehr schwerer Murgang).
- Art und ungefähres Ausmass der angerichteten Schäden.
- Angaben über oberhalb des Geschiebesammlers erfolgte Bachausbrüche oder Geschiebeablagerungen, die die im Geschiebesammler aufgefangene Geschiebefracht stark verminderte; Schätzung der Grössenordnung dieses «Geschiebeverlustes».
- Angaben über antransportiertes Schwemmholz (Zusammensetzung, Volumen).
- Angabe des Füllungsgrades des Geschiebesammlers vor dem Ereignis.

- Schätzung des Geschiebe- resp. Schlammanteils, der infolge Weitertransportes nicht im Geschiebesammler abgelagert wurde («Geschiebe-Verluste») sowie Schätzung des Schlammanteils im aufgefangenen Material.

## 2.3 Delta- und Seegrundaufnahmen (Bathymetrie)

Der weitaus grösste Teil aller Feststoffe wird den Seen durch einmündende Fließgewässer zugeführt. Der Direkteintrag durch Steinschlag, Rutschungen usw. ist meistens unbedeutend.

Informationen zu den meisten in der Schweiz durchgeführten Delta- und Seegrundaufnahmen sind bei der Landeshydrologie vorhanden, auch wenn nicht in jedem Falle eine direkte Beteiligung erfolgte. Bis 1983 wurden die bathymetrischen Aufnahmen von der Landeshydrologie durchgeführt. Die bis dahin durchgeführten Delta- und Querprofilaufnahmen sind in Figur 25 dargestellt (s. auch Tabelle 10, S. 65). Von den grösseren Schweizer Seen sind nur der Neuenburger See, der Murtensee, der Brienzer See, der Vierwaldstätter See sowie der Luganer See nicht vollständig vermessen worden. Wegen fehlender finanzieller und personeller Ressourcen musste die LH diese Dienstleistung einstellen. Seither werden diese Arbeiten leider weniger häufig von Privatfirmen ausgeführt.

### 2.3.1 Zielsetzungen

Bestimmung der Ablagerungsvolumina durch wiederholte Seegrundaufnahmen (Deltavermessungen) als Grundlage zur Lösung von Verlandungsproblemen, Bestimmung von Erosionsraten usw.

### 2.3.2 Auswahl der Aufnahmen

Seegrund- und Deltaaufnahmen wurden in allen grösseren Seen in der Schweiz durchgeführt. Einige Aufnahmen erfolgten isoliert für spezielle Problemstellungen (z. B. Kabelverlegung), andere wurden in regelmässigen Zeitabständen wiederholt, z. B. im Bodensee (Rheindelta), Walensee (Linthdelta), Lago Maggiore (Maggiadelta) und im Neuenburger See.

## 2.4 Flussquer- und Längsprofile

Anhand von Querprofilaufnahmen können Sohlenveränderungen in den Flüssen festgestellt werden, aufgrund welcher sich Erosions- oder Auflandungsvolumen eines bestimmten Abschnittes schätzen lassen. Dafür müssen aber bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein:

- Querprofilaufnahmen sind in definiertem zeitlichem Abstand durchzuführen, damit auch längerfristige Schwankungen erfasst werden können.
- Aufnahmen müssen an derselben Stelle mit denselben Profilpunkten durchgeführt werden.
- Aufnahmen müssen möglichst nach derselben Methodik erfolgen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Die ersten Querprofilaufnahmen wurden ab 1888 im Rhein ausgeführt. Die Flüsse gesamtschweizerischer Bedeutung wurden ab 1980 durch das BWW vermessen (s. Anhang 3). Unter Flüssen gesamtschweizeri-

scher Bedeutung werden Fließgewässer verstanden, welche entweder eine bestimmte Grösse aufweisen (bezüglich Abfluss) oder welche mehrere Kantone durchfliessen. Viele Querprofilaufnahmen werden heute durch die Kantone oder, innerhalb ihres Konzessionsgebietes, durch die Kraftwerke ausgeführt. Ferner erstellen private Ingenieurbüros gezielt Querprofilaufnahmen für wasserbauliche Projekte. Flussquerprofilaufnahmen sind in der Regel beim BWG archiviert. Unmittelbare Ergebnisse aus den Aufnahmen, z. B. Auswertungen im Hinblick auf Volumenberechnungen, sind hingegen nur in Ausnahmefällen vorhanden.

Eine Zusammenstellung der bis 1980 ausgeführten Querprofilaufnahmen findet sich bei GHO (1983) (vgl. Figur 25).

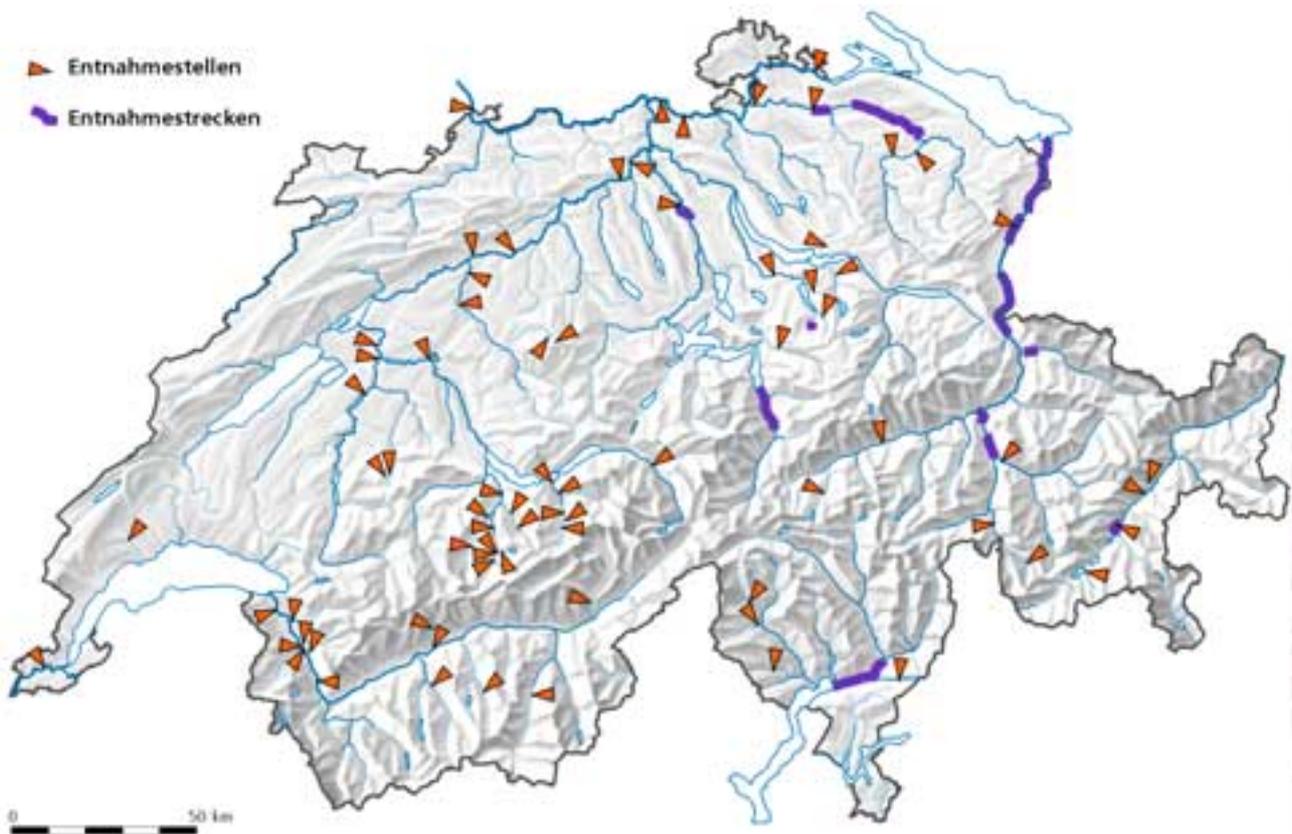


Figur 25: Karte der durchgeführten Delta- und Seegrundaufnahmen (nach GHO 1983).

## 2.5 Geschiebeanalysen

Praktisch alle Projekte im Zusammenhang mit Feststoffen erfordern Informationen über den Geschiebetransport, zu dessen Berechnung die Zusammensetzung des Sohlenmaterials bekannt sein muss. Die am häufigsten angewendete Methode ist die Linienzahlanalyse. Durch Umrechnung beispielsweise nach der Methode von FEHR (1987) erhält man die gewichtsmässige Sohlenzusammensetzung für Deckschicht und Unterschicht.

Die ersten Geschiebeanalysen wurden vermutlich ab 1932 im Rheingebiet (Büchel – See) gemacht. Seither sind an sehr vielen Gewässern Geschiebeanalysen durchgeführt worden. Alleine GHO (1983) zählt mehrere hundert Standorte auf (vgl. Figur 26). Grössere Studien, welche Geschiebeanalysen beinhalteten, wurden für die Aare im Haslital (EIDG. POST- UND EISENBAHN-DEPARTEMENT 1939a), die Emme (VAW & GIUB 1987) sowie den Alpenrhein durchgeführt.



Figur 26: Geschiebeanalysen in schweizerischen Fliessgewässern (nach GHO 1983).

# 3 Messparameter, -instrumente und -methoden

Im Schlussbericht der Arbeitsgruppe für Feststoffbeobachtung (GHO 1984) und im Bericht Nr. II-11 der KHR (KHR 1996) sind die verwendeten Instrumente und Methoden ausführlich beschrieben. Die wichtigsten Aussagen aus den genannten Publikationen werden hier dargestellt.

## 3.1 Messungen in Wildbächen

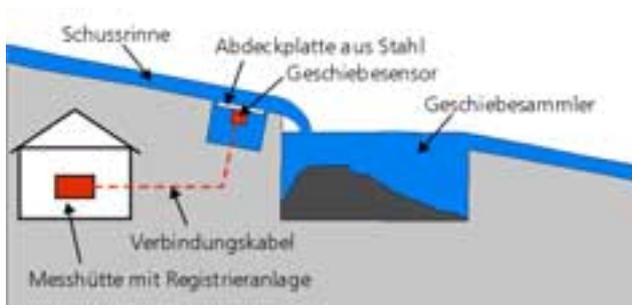
### 3.1.1 Messung der Feststoffführung

Die direkte Messung der Feststoffführung in Wildbächen ist heute auf wenige Forschungsgebiete beschränkt. Messinfrastrukturen sind im Erlenbach im Alptal (Eidg. Forschungsanstalt WSL) und im Spissibach (Geographisches Institut der Uni Bern) eingerichtet.

#### Messung mit Unterwassermikrofonen

Einrichtungen mit Unterwassermikrofonen erlauben eine kontinuierliche Erfassung der Feststoffführung in kleinen Einzugsgebieten.

Der Geschiebesensor ist an der Unterseite einer Stahlplatte angebracht, die in eine Betonsperre eingebaut ist (vgl. Fig. 27). Das wichtigste Element des Sensors ist ein piezoelektrischer Kristall. Rollen bei einem Hochwasser Steine über die Stahlabdeckplatte, so verursachen die Schläge der Steine Schwingungen, die auf den piezoelektrischen Kristall übertragen werden. Die Schwingungen erzeugen im Kristall eine Spannung, welche verstärkt und gemessen wird. Aus der Grösse der Spannung kann auf die Intensität des Schlages geschlossen werden. Bei Hochwasser erfolgt im automatischen Messbetrieb die Datenaufzeichnung und -auswertung der Sensorschwingungen auf vereinfachte Weise. Jedesmal, wenn die Spannung einen minimalen



Figur 27: Schematische Darstellung einer Messanlage mit Hydrophonen (nach WSL 1992).

Wert (Grenzwert) überschreitet, wird ein Impuls registriert. Die pro Zeiteinheit gemessene Anzahl Impulse ist ein Mass für die Intensität des über den Messquerschnitt erfolgten Geschiebetransportes.

**Aufwand:** Der Aufwand für die Wartung der Anlage ist gering. Ist die Anlage konstruktiv gut durchdacht und treten keine grösseren Abnutzungserscheinungen auf, so beschränkt sich der Wartungsaufwand auf eine Kontrolle der Empfindlichkeit der Geschiebesensoren im Abstand von einigen Jahren.

**Genauigkeit:** Die bisherigen Auswertungen zeigen, dass Fehler bei der Umrechnung von aufsummierten Hydrophonimpulsen bis maximal  $\pm 100\%$  einer Geschiebefracht erreichen können. Die Eichbeziehung dürfte auch von den Korneigenschaften des transportierten Geschiebes abhängen. Eine periodische Vermessung des zugehörigen Geschiebesammlers ermöglicht es, die Aufzeichnungen der Geschiebesensoren mit den transportierten Feststoffen zu vergleichen. Auf diese Weise kann diese neuartige Geschiebemessmethode gewissermassen geeicht werden.

**Vor-/Nachteile:** Direkte Messung der Geschiebeführung. Allerdings bedarf es zur Korrelation der Signale mit dem effektiven Geschiebedurchsatz einer genauen Eichung. Da diese nur an Standorten mit Geschiebesammler möglich ist, beschränkt sich die Installation von Hydrophonen auf entsprechend ausgestattete Wildbäche.

**Erfahrungsdauer:** Seit 1986.

#### Gemischstandmessung (Wasser und Feststoff) zur Bestimmung der Feststoffführung

Für die Bestimmung der Feststoffführung wird in kleineren Untersuchungsgebieten als Hilfslösung die Gemischstandmessung durchgeführt.

Die Feststoffführung kann aus der Differenz der Pegelstände oberhalb und unterhalb eines Geschiebesammlers grob abgeschätzt werden. Zur Kontrolle kann die nach einem Hochwasser im Sammler abgelagerte Feststoffmenge erfasst werden.

Aufwand: Hoher Aufwand für Bau und Betrieb.  
Genauigkeit: Unbekannt.  
Vor-/Nachteile: Das Feststoff-Wasserverhältnis bleibt unbekannt, daher können nur grobe Schätzungen durchgeführt werden.  
Erfahrungsdauer: Nur sporadische Ergebnisse bei einzelnen Wildbachereignissen.

### 3.1.2 Erfassung der Feststofffracht in Geschiebesammlern

Zur Erfassung der Geschiebefracht (Volumenbestimmung) kommen Profilaufnahmen (Vermessung) einerseits und Bestimmen der bei der Räumung abtransportierten Kubaturen andererseits in Frage. Obwohl es in der Praxis die Regel darstellt, ist das ausschliessliche Schätzen von Ablagerungskubaturen nicht empfehlenswert.

#### Profilaufnahmen

Aufnahme von parallel angeordneten Profilen im Abstand von 1 bis 2 m. Die Abstände zwischen den Profilmittelpunkten sind gleich gross zu wählen, damit ein Quadratnetz von Punkten entsteht. Es ist von Vorteil, die Profile jedes Jahr standörtlich gleich zu wählen und deshalb die Profilmittelpunkte zu verankern. Wird der Geschiebesammler geräumt, ist auch der entleerte Sammler neu zu vermessen. Bei sehr grossen Geschiebesammlern oder falls Übermürungsflächen aufzunehmen sind, kann die photogrammetrische Aufnahme- und Auswertetechnik geeigneter sein. Je nach Objekt, kann der Aufwand erheblich werden. Aufnahme und Auswertung müssen von spezialisierten Fachpersonen ausgeführt werden.

#### Räumungskubaturen

Das Auszählen der abtransportierten Kubikmeter Geschiebe resp. der abtransportierten Wagenladungen ist eine beliebte Schätzmethode, jedoch verbunden mit entsprechend grossen Ungenauigkeiten. Sie funktioniert nur, wenn das gesamte Ablagerungsmaterial geräumt wird. Es empfiehlt sich deshalb, die Geschiebesammler als Markierung des Leerzustandes mit fester Sohle und Böschung zu versehen, zum Beispiel durch Einbau einer Rollierung oder einzelner, in Sohle und Böschung plan verlegter Blöcke; bei kleinen Sammlern eventuell durch Verlegen einzelner, verankerter Eisenbahnschwellen.

Die Genauigkeit kann weiter verbessert werden, wenn die Lastwagen gewogen werden, z. B. mit Hilfe einer

handelsüblichen, mobilen Gewichtsmessschwelle (Befahren auf horizontaler Wegstrecke im Leerzustand und voll beladen); ferner können der Füllungsgrad des Brennstofftanks und das im Geschiebe mitgeführte Wasser (Wassersättigungsgrad) berücksichtigt werden.

Geschiebesammler, welche als Kieslieferanten dienen und deshalb je nach Bedarf des Unternehmens unsystematisch und nur teilweise geräumt werden, sind für Messzwecke ungeeignet. Diese Entnahmen sind jedoch bei der Bilanzierung der grösseren Einzugsgebiete zu berücksichtigen und sollten daher erfasst werden.

Aufwand: Grosse Aufwand für die Erstellung.  
Genauigkeit: Genügend für viele Fragestellungen. Für eine Gesamterhebung von Geschiebe und Schwebstoffen ungenügend, da letztere in der Regel ausgeschwemmt werden und somit nicht bestimmbar sind. Deshalb werden in ausgesuchten Gewässern Feststoffsammler in Serie betrieben (Geschiebesammler und Schwebstoffsammler).

Vor-/Nachteile: Aus Kostengründen sind entsprechende Standorte an bereits bestehende Sammler gebunden. Da die Sammler meistens zu Schutzzwecken gebaut und betrieben werden, müssen sie nach Hochwassern geräumt werden. Die Erfassung der Fracht verursacht deshalb praktisch keinen Mehraufwand.

Erfahrungsdauer: Langjährig.

### 3.1.3 Erfassung von Übermürungen und Erosionsgebieten

Die Kubaturen werden möglichst kurz nach einem Ereignis erhoben. Sie können ausgemessen oder geschätzt oder aber mittels Räumung bestimmt werden. Ablagerungen und Erosionsgebiete können auch photogrammetrisch erfasst werden.

#### Ausmessen oder Schätzen von Ablagerungen

Die Geschiebeablagerungsflächen auf den Schwemm- oder Murkegeln werden ausgemessen oder unter Annahme einer mittleren Ablagerungsmächtigkeit geschätzt. Die erodierten Kubaturen aus den Erosionsgebieten werden geschätzt.

Aufwand:	Gering.
Genauigkeit:	Für Angabe von Grössenordnungen genügend.
Vor-/Nachteile:	Rasche Erhebung ohne aufwändigen Instrumenteneinsatz. Die Erhebungen müssen sofort nach dem Ereignis durchgeführt werden, weil durch Aufräumarbeiten die Spuren rasch beseitigt werden. Schätzungen sind jedoch immer problematisch, weil die Ergebnisse stark vom Erfahrungsgrad des Ausführenden abhängen. Zudem kann die Ablagerungsmächtigkeit stark variieren, so dass die Angabe eines Durchschnittswertes zu Fehleinschätzungen führen kann.
Erfahrungsdauer:	In Einzelfällen mehrere Jahre, Durchführung eher selten.

### Erfassung der Kubaturen durch Räumung

Hier gilt dasselbe Prinzip wie bei den Geschiebesammlern. Nach Grossereignissen ist die genaue Erfassung der Anzahl Lastwagenladungen jeweils schwierig, was oft auf Koordinationsprobleme zurückzuführen ist.

### Photogrammetrische Erfassung von Ablagerungs- bzw. Erosionskubaturen

Bei der Erfassung von Ablagerungs- oder Erosionskubaturen durch photogrammetrische Aufnahme muss der Zustand vor dem Ereignis bekannt sein. Weiter ist der Verlauf des Murgangereignisses möglichst detailliert festzuhalten (insbesondere Aufnahme der Murgangspuren).

Aufwand:	Gross, abhängig von Instrumenten und Ablagerungsfläche sowie der Grösse des Erosionsgebietes.
Genauigkeit:	Das Verfahren liefert eine Grössenordnung für die Feststofffracht.
Vor-/Nachteile:	Gegenüber einer Schätzung viel genauere Resultate. Die Auswertung muss durch spezialisierte Fachleute vorgenommen werden.
Erfahrungsdauer:	Wird seit langem nach Grossereignissen durchgeführt.

## 3.2 Messungen in Flüssen

Durch Forschungsanstalten wurde die Geschiebeführung sporadisch mittels Fangkorb abgeschätzt und die

Geschiebefracht in Geschiebesammlern und Baggerstellen bestimmt. Die Landeshydrologie hat sich auf die Erfassung der Schwebstoffe konzentriert.

### 3.2.1 Messung der Schwebstoffführung

Gemessen wird die Verteilung der Schwebstoffkonzentration im Flussquerschnitt; mit Hilfe der zusätzlich gemessenen Geschwindigkeitsverteilung kann auf die Schwebstoffführung geschlossen werden.

Um die Schwebstoffkonzentration in einem Querschnitt zu bestimmen, müssten idealerweise möglichst viele Proben über das Profil verteilt in verschiedenen Tiefen und erst noch gleichzeitig entnommen werden. Der dazu erforderliche Aufwand an Personal, Geräten und Zeit zwingt jedoch bei Routinemessungen, welche möglichst oft durchgeführt werden sollen, zur Reduktion auf wenige Punkte pro Querschnitt; bei den automatischen Stationen kann sogar nur an einer einzigen Stelle gemessen werden.

Stehen genügend Proben zur Verfügung, kann auf die Schwebstoffführung geschlossen werden. Der Rückschluss auf die Schwebstoffführung bedingt die Annahme, dass die Geschwindigkeit der Schwebstoffe gleich der Fliessgeschwindigkeit des Wassers ist. Die Schwebstoffführung eines einzelnen Hochwassers kann bei einer manuellen Probeentnahme nur in seltenen Fällen erfasst werden (Schwierigkeit, rechtzeitig vor Ort zu sein sowie Unfallrisiken bei Hochwasser).

### 3.2.2 Messung der Schwebstoffkonzentration

Die Schwebstoffkonzentration lässt sich durch direkte Messungen relativ einfach bestimmen. Die Messungen mit den manuellen Entnahmegewichten liefern in einem bestimmten Punkt des Messquerschnittes einen quasi momentanen Konzentrationswert. Für die Bestimmung der mittleren Konzentration im Querschnitt müssten weitere punktuelle Proben genommen werden, was einen grossen Aufwand an Zeit und Personal bedingt.

Die LH suchte deshalb nach Methoden, welche die Bestimmung der mittleren Schwebstoffkonzentration anhand weniger oder einer einzigen Einzelmessung erlauben. Hierzu führte sie eine grosse Anzahl von Untersuchungen durch mit dem Ziel, die momentane Konzentrationsverteilung in einem Flussquerschnitt bestimmen und die Änderung der Schwebstoffkonzentration in einem Punkt des Querschnittes in Funktion der Zeit messen zu können.

Die Auswertungen zeigen, dass sowohl die Konzentrationsverteilung im Flussquerschnitt als auch die Grösse der Konzentration vom Abfluss, also vom Pegelstand und der Fließgeschwindigkeit abhängig ist. Für bestimmte Zeiträume und für einzelne Beobachtungsstellen (Stationen) konnte die Beziehung zwischen Konzentration und Abfluss formuliert werden.

Allerdings wird die Schwebstoffführung auch durch weitere Faktoren wie Vorgeschichte oder künstliche Eingriffe beeinflusst. An einigen Stellen überwiegt deren Einfluss, so dass keine Gesetzmässigkeiten mehr erkannt werden können. Dies ist meist dort der Fall, wo die Abflussmenge durch Rückhalt oder Ableitung so gedrosselt wird, dass zwischen Wettergeschehen und Abfluss kaum mehr eine normale Beziehung besteht. Im Winterhalbjahr 1969 z. B. traten bei der Messstation Rhein – Bad Ragaz Konzentrationsschwankungen zwischen 6 und 3000 g/m<sup>3</sup> auf, obwohl der Abfluss mit 50 bis 80 m<sup>3</sup>/s praktisch konstant blieb.

### 3.2.3 Die Probenahme

Grundsätzlich sind automatische und manuelle Schwebstoffprobenahmen möglich.

Die automatische Entnahme von Wasserproben weist gegenüber der manuellen Methode den Vorteil auf, dass auch kurze Ereignisse mit genügender Probendichte erfasst werden können.

Im Standard-Messnetz der Landeshydrologie werden von vertraglich gebundenen Beobachtern zweimal wöchentlich zu festgelegten Zeiten an 12 Stationen Proben entnommen und an die Zentrale nach Ittigen bei Bern ins Labor gesandt. Die Proben werden in der Regel von einer Brücke aus, möglichst nahe der entsprechenden Abfluss-Messstation, erhoben. Die Probenahme erfolgt mit einem Hand-Schöpfgerät (vgl. Fig. 28/29) in der Mitte des Flusses an der Oberfläche.

In unregelmässigen Abständen werden Messkampagnen durchgeführt. Zusätzlich zu den Standard-Standorten werden dabei auch die ergänzenden Standorte einbezogen. Die Probenahme erfolgt ebenfalls von einer Brücke in der Nähe einer Abfluss-Messstation aus. Es wird darauf geachtet, immer an denselben 4 bis 8 Stellen im Flussquerprofil zu messen. Proben werden entweder von der Oberfläche, integrierend in die Tiefe oder mit einem Messwagen in einem Tiefenprofil erhoben.

Mit dem Handschöpfgerät können Oberflächenproben, aber auch Integrationsproben genommen werden. Bei Integrationsproben wird das Schöpfgerät während einer festgelegten Zeit langsam bis zu einer Tiefe von rund 1 Meter eingetaucht, damit auch Wasser aus mittleren und tieferen Bereichen des Fließgewässers beprobt werden kann. Integrationsmessungen können auf diese Weise nur bis zu einer gewissen Fließgeschwindigkeit ausgeführt werden, da das Schöpfgerät bei starker Strömung an der Oberfläche wegdriftet.

Ein Messwagen ermöglicht die Probenahme auf festgelegten Wassertiefen entlang des Querprofils. Der Messwagen der LH (vgl. Fig. 30) ist jedoch etwas schwerfällig in seiner Handhabung und kann nur an bestimmten Orten (Brücken mit entsprechend breitem Trottoir) eingesetzt werden. Er ist zudem seit 1999 nicht mehr einsatzbereit und sollte durch ein zweckmässigeres Gerät ersetzt werden.

### 3.2.4 Geräte für die manuelle Probenahme

#### Entnahmegrät an Stange, SGS

Das Gerät (vgl. Fig. 28) ist geeignet für kleinere schweizerische Gewässer mit alpinem Charakter, insbesondere für Punktmessungen in Oberflächennähe und tiefenintegrierende Entnahmen. Die Konzentration wird im Labor durch Filtration ermittelt.

Die Schwebstoffe werden in einer 1-Liter Plastikflasche gesammelt. Die Entnahmeflasche wird hierzu an einem hydrodynamisch geeignet geformten Körper befestigt, der an einer Stange montiert ist. Das Gerät wiegt 1,3 kg bei einer Länge von 33 cm. Die Düsenöffnung beträgt 5 mm.

Aufwand:	Beträchtlich, bedingt durch die grosse Anzahl der notwendigen Probenahmen sowie der zusätzlich notwendigen Geschwindigkeitsmessungen (damit von der Konzentration auf die Schwebstoffführung geschlossen werden kann).
Genauigkeit:	Genügend, setzt aber die Repräsentativität der Messpunkte (im Querprofil, zeitlich und räumlich) voraus.
Auswertung:	Analyse der Proben im Labor, Genauigkeit gut, Aufwand abhängig von Zahl der Proben.
Vor-/Nachteile:	Falls genügend Proben zur Verfügung stehen, kann die Schwebstoffführung relativ verlässlich ermittelt

werden. Durch die Messung wird nur die Konzentration bestimmt. Der Rückschluss auf die Schwebstoffführung bedingt die Annahme, dass die Geschwindigkeit der Schwebstoffe gleich der Fließgeschwindigkeit des Wassers ist und bekannt sein muss. Der Aufwand kann eventuell reduziert werden durch Messungen in repräsentativen Messpunkten des Querprofils (siehe Untersuchungen der LH, Abschnitt 4.1.2).

Erfahrungsdauer: Ca. 30 Jahre.

### Entnahmegesetz an Leine, 1970, SGLN

Das Gesetz (vgl. Fig. 29) wird an einer Leine eingesetzt. Es hat ein Gewicht von 8 kg und eine Länge von 38 cm. Die Öffnung der Eintrittsdüse beträgt 4 mm. Die Entnahmeflasche aus Plastik hat einen Inhalt von 1 Liter und wird im Inneren des Entnahmegesetzes angebracht.

Vor-/Nachteile: Das Gesetz kann aus grösserer Höhe (z. B. von Brücken) eingesetzt werden. Es ist auch für Flüsse mit Fließgeschwindigkeit grösser als 2,5 m/s geeignet. Es ermöglicht eine rasche Probenahme ohne grössere Vorbereitung. Es sind jedoch nur oberflächennahe Punktmessungen möglich. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten besteht die Gefahr des Abdriftens.

### Messwagen der LHG, 1967

Der Messwagen (vgl. Fig. 30), eine Eigenentwicklung der Landeshydrologie, erlaubt automatisch integrierende Messungen über die Wassertiefe. Da die Eintrittsdüse ferngesteuert geöffnet und geschlossen werden kann, ist auch die Entnahme separater Einzelproben aus jeder beliebigen Wassertiefe möglich. Voraussetzung für den Einsatz des Messgerätes ist jedoch eine Brücke mit breitem Trottoir.

Das Entnahmegesetz wiegt ca. 60 kg und hat eine Länge von 188 cm. Die Düsenöffnung beträgt 4 mm. Auf dem Wagen befindet sich zudem ein elektrischer Motorkran zum Heben und Senken des Entnahmegesetzes und ein Steuerpult. Mit dem gleichen Messwagen können auch Fließgeschwindigkeitsmessungen ausgeführt werden, indem anstelle des Entnahmegesetzes ein hydrometrischer Flügel montiert wird.



Figur 28: Entnahmegesetz an Stange, SGS für Schwebstoffe.



Figur 29: Entnahmegesetz an Leine, 1970, SGLN für Schwebstoffe.



Figur 30: Messwagen der Landeshydrologie für Schwebstoffprobenentnahmen, im Einsatz bis 1999.

Genauigkeit: Gut.  
 Vor-/Nachteile: Das hohe Gewicht des Entnahmekörpers verringert die Gefahr des Abdriftens. Probenahmen aus jeder beliebigen Wassertiefe sind möglich. Das Gerät ist jedoch schwer und muss von mindestens zwei Personen bedient werden. Probenahmen sind nur von einer Brücke aus möglich.  
 Erfahrungsdauer: Ca. 25 Jahre.

### 3.2.5 Schwebstoffprobenentnahmen mit automatischen Geräten

Über langjährige Erfahrungen verfügt man in der Schweiz mit den folgenden Geräten:

- ASP9260 und ASP9160
- ISCO 1600
- ASPEG
- ISCO 3700, 6700.

Zur Zeit sind noch die beiden Geräte ASPEG und ISCO 6700 in Betrieb. Sie werden nachfolgend kurz vorgestellt.

#### Entnahmegesetz ASPEG

Dieses Gerät (vgl. Fig. 31) wurde am Geographischen Institut der Universität Bern entwickelt. Im Hinblick auf den Einsatz in schwer zugänglichen Gebieten ist es mit einer autonomen Stromversorgung konzipiert. Das Entnahmegesetz ist zurzeit an einer Stelle im Berner Oberland im Einsatz und hat sich bisher bewährt.



Figur 31: Prototyp des Probeentnahmegesetzes ASPEG für Schwebstoffe.

Das Gerät ist in seiner definitiven Version in einer Aluminiumkiste integriert und wiegt 30 kg bei Abmessungen von 62·60·55 cm. Eine 12 V Batterie liefert den Strom für die Elektronik und die Schlauchquetschpumpe. Die elektronische Schaltung steuert den gesamten Ablauf der automatischen Probeentnahme, vom Ausstoss des Restwassers im Schlauch über die Spülung bis zur Flaschenabfüllung. Ein Unterdruckfühler sorgt bei einer verstopften Zuleitung für das Umschalten der Pumpe (Ausspülen). Es können insgesamt 25 Literflaschen abgefüllt werden. Das Probeentnahmeintervall ist frei wählbar von 5 Minuten bis zu einer Probe pro Tag. Das Gerät kann auch über einen Data-logger angesteuert werden, so dass ereignisabhängige Proben genommen werden können.

Aufwand: Nach Installation des Gerätes gering.  
 Genauigkeit: Zufriedenstellend.

Vor-/Nachteile: Mit dem Entnahmegesetz können auch Hochwasser erfasst werden. Probleme treten auf, wenn die Einlassdüse durch Geschwemmsel verstopft wird.

Erfahrungsdauer: Die Geräte stehen seit Jahren im Einsatz.

#### Entnahmegesetz ISCO 6700

Das Gerät (vgl. Fig. 32) ist in einem mit Fiberglas verstärkten Plastikcontainer untergebracht und wiegt ohne Batterien 15 kg. Die Abmessungen betragen 68,5·50,7 cm. Die maximale Ansaughöhe ist 8,5 m. Das Gerät ist für Einsatztemperaturen von 0 bis 49 °C geeignet.



Figur 32: Entnahmegesetz ISCO 6700 für Schwebstoffe.

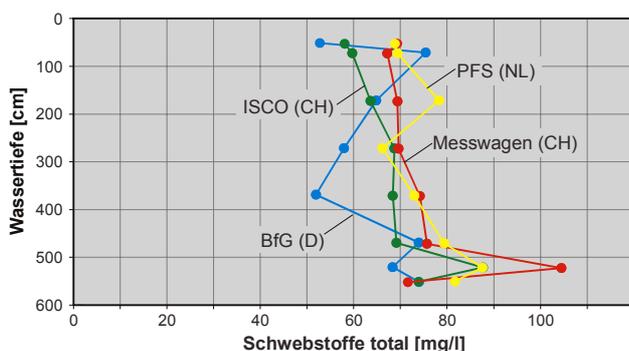
Es können Proben im Minutenintervall über eine maximale Dauer von 100 Stunden genommen werden. Die Probenahme kann über Zeit oder Abfluss gesteuert werden.

Aufwand: Nach Installation des Gerätes gering.  
Genauigkeit: Zufriedenstellend.  
Erfahrungsdauer: Einige Jahre.

### 3.2.6 Vergleich von Messgeräten der Schweiz mit denjenigen anderer Rheinanlieger

Vom 10. bis 12. März 1998 fanden in der Waal (Rhein) bei Pannerden (NL, Rheinkilometer 868,5) Vergleichsmessungen der Rheinanlieger Deutschland, Niederlande und der Schweiz statt (Kos et al. 2000). Ziel der Messungen war der Vergleich der gegenwärtig verwendeten Messgeräte und Messmethoden für die Erfassung der Schwebstoffkonzentrationen, der Schwebstoff- und der Geschiebefrachten. Die Schweiz beteiligte sich im Bereich Schwebstoffmessungen. Eingesetzt wurden der Messwagen der Landeshydrologie, das ISCO-Gerät und das Entnahmegerät an Leine. Die Messungen konnten im Scheitel einer Hochwasserwelle vorgenommen werden. Zur Verfügung standen zwei Messschiffe, die Deutsche «Rheinland» und die Niederländische «Conrad».

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die erhaltenen Werte der Schwebstoffkonzentration relativ ähnlich sind (vgl. Fig. 33). Da keine systematischen Unterschiede feststellbar sind, müssen die Differenzen höchstens in geringem Ausmass in der unterschiedlichen Analytik der beteiligten Labors gesucht werden. Sie lassen sich grösstenteils aus dem unterschiedlichen Zeitpunkt der Messungen erklären.



Figur 33: Ergebnisse der Vergleichsmessungen vom 10. März 1998 (Messpunkt B) (nach Kos et al. 2000).

Dieser Vergleich von Messgeräten und Messmethodik der 3 Rheinanliegerstaaten ist einmalig. Das Fazit für die Schwebstoffmessungen ist, dass unabhängig von den angewandten Mess- und Analysetechniken die Ergebnisse der drei beteiligten Institutionen gut übereinstimmen.

### 3.2.7 Trübungsmessung

Die durch Wasserinhaltsstoffe verursachte Trübung kann als Mass für den Schwebstoffgehalt genommen werden.

#### Feststoffgehaltssensor TurbiMax W CUS 41-W

Das Gerät (Fig. 34) sendet die Anregungsstrahlung eines Infrarotsenders unter einem definierten Öffnungswinkel in das Prüfmedium. Dabei werden die unterschiedlichen Lichtbrechungen zwischen Eintrittsfenster und dem Messmedium Wasser berücksichtigt. Partikel im Wasser erzeugen eine Streustrahlung, die unter einem bestimmten Öffnungswinkel auf die Streulichtempfänger fällt.

Die Messung im Medium wird ständig mit den Werten eines Referenzempfängers abgeglichen. Digitale Filterfunktionen mit Störsignalunterdrückung und Selbstüberwachung des Sensors gewährleisten zusätzliche Messsicherheit. Das 90°-Streulichtverfahren bei einer Messwellenlänge im nahen Infrarotbereich des Lichts (880 nm) gemäss ISO 7027/EN 27027 ermöglicht eine Erfassung der Trübungswerte unter standardisierten, vergleichbaren Bedingungen. Zusätzlich zum Trübungssignal wird ein Temperaturmesssignal erfasst und übertragen.



Figur 34: Feststoffgehaltssensor TurbiMax W CUS 41-W.

Der Trübungsmesser ist vom Werk kalibriert, es können aber auch vom Anwender spezielle Kalibrationen vorgenommen werden. Die Sensoren werden mit einem Scheibenwischer gereinigt.

Aufwand: Klein.  
Genauigkeit: Genügend, aber abhängig von der Eichung.  
Vor-/Nachteile: Gute Eichung vorausgesetzt, kann eine genaue Erfassung der Schwebstoffführung erwartet werden. Allerdings ist das Signal auch Korngrößenabhängig, was die Eichung erschwert oder Koppelung mit anderen Verfahren notwendig macht. Probleme treten auf, wenn die Schwebstoffkonzentration sehr hoch ist.  
Erfahrungsdauer: Langjährig.

### 3.2.8 Analyse der Schwebstoffproben im Labor

Von den Wasserproben wird im Labor der Landeshydrologie die Schwebstoffkonzentration bestimmt. Dazu wird das Probewasser mit einem Membranfilter (Porengrösse  $0,45 \mu\text{m}$ ) filtriert. Der Filter mit dem Rückstand wird im Trockenschrank während 2 Stunden bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet, anschliessend im Exsikkator ausgekühlt und danach gewogen.

Die Filter mit den Schwebstoffen werden nur spezifisch zur Dokumentation von Extremereignissen oder Messkampagnen aufbewahrt.

### 3.2.9 Bestimmung der Schwebstofffracht

Die Schwebstofffracht (Tagesfracht, Jahresfracht) kann entweder anhand der aus dem Fliessgewässer entnommenen Stichproben oder durch Deltavermessungen in Seen, Stauhaltungen und Absetzbecken bestimmt werden. Eine Vermessung muss aber mit Analysen von Bodenproben kombiniert werden.

Bei normalerweise 2 Probenahmen pro Woche stehen 104 Schwebstoffkonzentrationswerte pro Jahr und Station zur Verfügung. Dort wo die Schwebstoffführung bekannt ist, kann die Schwebstofffracht für beliebige Zeitperioden bestimmt werden.

Bei der Abschätzung von Schwebstofffrachten geht man davon aus, dass eine gute Korrelation zwischen Schwebstoffkonzentration und Abfluss besteht. Dies ist aber leider nicht immer der Fall. Zum einen stellt sich

das Problem, dass die Sedimentkonzentrationen mit dem Abfluss-Tagesmittel verbunden werden. Der Abfluss zum Zeitpunkt der Probenahme entspricht in aller Regel aber nicht dem Tagesmittel, welches je nach Verhältnissen ein bis mehrmals am Tag zu verschiedenen Zeitpunkten erreicht wird. Zum andern kann vielfach keine direkte Korrelation zwischen Sedimentkonzentration und Abfluss nachgewiesen werden. Beispielsweise kann eine Probe, welche nach dem Durchfluss einer Hochwasserwelle entnommen worden ist, einen wesentlich tieferen Sedimentgehalt aufweisen als eine Probe bei gleicher Abflussmenge aber vor Erreichen der Hochwasserspitze.

Die heute vielerorts übliche Bestimmung der Schwebstofffracht aufgrund von Stichprobenmessungen der Schwebstoffkonzentration erfolgt nach unterschiedlichen Modellvorstellungen, was zu grösseren Unterschieden in den Resultaten führt. An der Landeshydrologie wurden bislang zwei Berechnungsmethoden angewendet. Die ältere Methode wurde bis 1999 eingesetzt, die neue ab dem Jahr 2000.

#### Berechnungsmethode der LH bis 1999

Für die Bestimmung der Schwebstofffracht über einen bestimmten Zeitraum (Tag, Monat, Jahr) muss die Schwebstoffführung über die entsprechende Zeit integriert werden. Bei Stichprobenmessungen ist eine solche Integration nur indirekt möglich, über die Beziehung der Schwebstoffkonzentration ( $C$ ) zu der Abflussmenge ( $Q$ ).

Die gemessenen Schwebstoffkonzentrationen werden den Abfluss-Tagesmittelwerten in doppelt-logarithmischer Skalierung gegenübergestellt. Für den Niedrigwasserbereich und den zunehmend turbulenten Mittel- und Hochwasserbereich wird je eine Korrelation errechnet. Nach der Rücktransformation ergeben sich somit zwei exponentielle  $C/Q$ -Beziehungen für die unterschiedlichen Abflussmengen, mit deren Hilfe tägliche Frachten geschätzt und zu Monats- und Jahresfrachten zusammengefasst werden. Die  $C/Q$ -Beziehungen weisen jedoch, je nach Station, eher tiefe Korrelationskoeffizienten auf, was unter anderem mit ein Grund war, die Berechnungsmethode zu hinterfragen.

#### Neue Berechnungsmethode ab 2000

Durch Multiplikation der Schwebstoffkonzentrationswerte mit den dazugehörigen Tagesmitteln des Abflusses werden die Schwebstofftagesfrachten abgeschätzt. Diese bilden zusammen mit den dazugehörigen Tages-

mitteln des Abflusses Wertepaare, die als Grundlage für alle weiteren Berechnungen dienen. Für die Tage, an denen keine Probenahme stattfand, können keine Schwebstofftagesfrachten bestimmt werden und die entsprechenden Tagesmittel des Abflusses finden auch keinen Eingang in die Berechnungen.

In der Regel werden einjährige und mehrjährige mittlere Jahresfrachten sowie mehrjährige mittlere Monatsfrachten berechnet (für einjährige Monatsfrachten ist der Stichprobenumfang zu klein). Dazu werden die oben erwähnten Wertepaare nach der Grösse ihrer Abflusstagesmittel absteigend sortiert und mit einer Rangziffer versehen. Die Quotienten aus Rangziffer und totaler Anzahl Probenahmetage werden anschliessend in 29 Klassen eingeteilt. Die Klassenbreiten sind vordefiniert und betragen zwischen 0,02 und 10 % der totalen Anzahl Probenahmetage. Mittels Multiplikation der mittleren Schwebstofffrachten einer Klasse mit deren Intervallbreite als Gewichtungsfaktor wird der Anteil der Klasse an der mittleren Tagesfracht berechnet. Durch Aufsummierung der entstandenen Produkte über alle Klassen ergibt sich die während der Berechnungsperiode vorherrschende mittlere Tagesfracht. Durch Multiplikation dieser mittleren Tagesfracht mit der Anzahl Tage der Berechnungsperiode (Jahr, Monat) wird die transportierte Schwebstofffracht der Berechnungsperiode bestimmt (GRASSO & JAKOB 2003).

Mit der neuen Berechnungsmethode wurden die alten Werte vor 1999 rückwirkend nachgerechnet.

### **3.2.10 Berechnung der Feststofffracht (Schwebstoff und Geschiebe)**

Die Berechnung der Feststofffracht umfasst die Kenntnis über anfallende Schwebstoffe und transportiertes Geschiebe. Diese Informationen sind, am selben Standort zusammengefasst, nur in Ausnahmefällen vorhanden; in die Schweiz am ehesten für die Emme bei der Mündung in die Aare (Schwebstoffmessstation Emme – Wyler, Geschiebeablagerungsplatz Luterbach). Obwohl auch hier die Standorte unterschiedlich sind und nur unzureichend Daten zur Verfügung stehen, könnte anhand dieses Beispiels näherungsweise die Gesamtfracht abgeschätzt werden. Für zuverlässigere Angaben müssten allerdings die Messintervalle bei den Schwebstoffen erhöht werden.

Ferner besteht die Möglichkeit, mittels einer speziellen Studie eine Schätzung der Gesamtfracht durchzuführen. Dies ist jedoch ein sehr aufwändiges Verfahren, welches in der heutigen Situation betreffend personell

und vor allem finanzieller Ressourcen der LH nicht mehr durchgeführt werden kann. In den dreissiger Jahren hingegen führte das damalige Amt für Wasserwirtschaft in der Aare (Haslital) eine derartige Studie durch. Die Messungen wurden während 2 Jahren betrieben. Die Studie war für die damalige Zeit, vermutlich auch international gesehen, eine Pioniertat. Es ging damals vor allem darum, die an der Versuchsanstalt für Wasserbau neu ermittelte Geschiebetransportformel von Meyer-Peter/Müller in natürlichen Verhältnissen zu testen.

### **3.2.11 Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials**

Die Geschiebekornverteilung folgt gewissen Regeln. Sie lässt sich häufig durch eine Fullerkurve annähern. Auf langen Flusstrecken sind Kornverteilung und Maximal Korn mehr oder weniger konstant, und mit zunehmender Weglänge nimmt die Korngrösse ab («Abrieb»). Seitenzubringer sorgen für Unregelmässigkeiten.

Je komplexer die Verhältnisse an einem Fluss sind (variable Geometrie, stark unterschiedliche Korngrössen, stark wechselnde Abflüsse), umso schwieriger wird die rechnerische Erfassung des Geschiebetransportes. In vielen praktischen Fällen ist diese sehr aufwendig und wird deshalb oft nicht durchgeführt. Zudem sind gewisse Phänomene, wie die Entmischung des Geschiebematerials, noch weitgehend unerforscht und verunmöglichen eine zuverlässige Rechnung. Abweichungen von prismatischen Gerinneformen, welche den Anliegen des Natur- und Landschaftsschutzes gerecht zu werden versuchen, bedeuten eine weitere Komplikation der Rechnung.

Die Kenntnis der Korngrößenverteilung ist für viele Fragestellungen, insbesondere für Berechnungen des Transportvermögens einer Flusstrecke von Bedeutung. Oft ist das abgelagerte Geschiebe bezüglich Kornverteilung mit dem Sohlenmaterial der Oberwasserstrecke nur bedingt identisch, da wegen der Sohlenabpflasterung und generellen Entmischungserscheinungen die gröberen Komponenten in der Sohle stärker, in den Ablagerungen weniger stark vertreten sind.

Da die Geschiebeablagerungen häufig sehr heterogen aufgebaut sind und sich während des Ablagerungsvorgangs das Material oft entmischt, ist es schwierig, eine repräsentative Materialprobe für die Bestimmung der Kornverteilung zu finden. Für die Analyse muss daher eine mittlere Mischung erfasst werden.

Zur Erfassung der gröberen Komponenten (Deckschicht) werden Linien- und Flächenproben durchgeführt. Volumenproben dienen vor allem zur Erhebung des Unterschichtmaterials. Daraus kann dann die Kornverteilung bis zu Komponenten von 100 mm Grösse und eventuell darüber durch Siebung bestimmt werden. Die verschiedenen Methoden sind zum Teil nur schwer vergleichbar. Für Bachbettmaterial und Übermürungen kommen eher nur Schätzmethode, resp. wenig aufwendige Oberflächenanalysenmethoden in Frage. Das Problem liegt weniger in der Methode als in der Auswahl des richtigen Standortes, Zeitpunktes und «Probenvolumens» (Entmischung). Durchführung und Umrechnung der einzelnen Proben sind bei FEHR (1987) und GHO (1996) beschrieben.

### Linienprobe

Ein Seil wird über die zu beprobende Strecke gespannt, die darunter liegenden Körner an der b-Achse gemessen und einer Grössenklasse zugeteilt. Die Kornverteilung ist aus der Anzahl Körner pro Klasse zu ersehen.

- Aufwand:** Der Arbeitsaufwand richtet sich nach Anzahl und Länge der Proben. Für eine Probe benötigen 2 Personen ca. 1 Stunde.
- Genauigkeit:** Für eine einzelne Probe mässig, deshalb sollten immer mehrere Proben durchgeführt werden (Erhöhung der Repräsentativität).
- Vor-/Nachteile:** Es ist kein grösseres Instrumentarium notwendig. Die Resultate sind rasch ersichtlich. Die Genauigkeit ist jedoch stark von der Repräsentativität der einzelnen Proben abhängig.

### Flächenprobe

Probenahme prinzipiell wie bei der Linienprobe, nur dass die Komponenten aus einer definierten Fläche entnommen werden.

Bezüglich Aufwand, Genauigkeit und Vor- und Nachteilen gilt ähnliches wie bei der Linienprobe.

### Volumenprobe

Die Grobkomponenten mit Durchmesser grösser als 6,0 cm werden ausgemessen und deren Gewichtsanteil an der gesamten Geschiebeprobe bestimmt. Die feineren Fraktionen werden gesiebt. Die Komponenten Feinsand und feiner (< 0,02 cm) sind nicht mehr wei-

ter aufzugliedern. Für die Siebungen wird in der Regel ein Quadratloch-Normsiefsatz verwendet.

Das Sieben der Feinkiesfraktion und feiner hat am getrockneten Material zu erfolgen. Um eine repräsentative Kornverteilung zu erhalten, benötigt man ein Volumen der Materialprobe, das ein Vielfaches des Volumens des Maximalkorns beträgt.

- Genauigkeit:** Für die eigentliche Messung genügend, sofern das Probematerial über Wasser entnommen werden kann.
- Aufwand:** Relativ gross, vor allem wenn eine gute örtliche Repräsentativität gesucht wird. Oft müssen die Auswahlverfahren den örtlichen Verhältnissen angepasst werden. Sehr grobkörniges Material bedingt ein entsprechend grösseres Probenvolumen.
- Vor-/Nachteile:** Die Interpretation ist bei sehr heterogenen Materialien eventuell problematisch, sonst im allgemeinen gut möglich.

### 3.2.12 Korngrössenverteilung der Schwebstoffe

Für Korngrössenanalysen werden herkömmliche manuelle (Atterberg, Pipette) und elektronische Messgeräte (Sedigraph, Coulter Counter und Laser) eingesetzt.

Mit Atterberg und Pipette sowie dem Sedigraph wird das Korngrössenspektrum nach dem Einwiegen der Probe nach klassischer Weise aufgrund der Fallgeschwindigkeit bestimmt. Coulter Counter und Laser sind eigentliche Partikelmessgeräte. Lasergeräte registrieren die Grösse resp. den Durchmesser jedes einzelnen Kornes, der Coulter Counter hingegen misst bei jedem Korn den elektrischen Spannungsabfall.

- Aufwand:** Für Atterberg und Pipette relativ hoch, für die elektronischen Messgeräte gering.
- Genauigkeit:** Für Atterberg und Pipette gut, für Sedigraph, Coulter Counter und Laser sehr gut.
- Vor-/Nachteile:** Coulter Counter und Laser eignen sich für sehr kleine Proben, Sedimentgraph für solche mittlerer Grösse (> 0,5 Gramm), Atterberg und Pipette können nur für grössere Mengen Schwebstoffproben verwendet werden (> 5 Gramm). Mit den elektronischen Geräten können

bis ca. 30 Proben pro Tag verarbeitet werden. Die Lasermethode eignet sich vor allem für die Bestimmung der Korngrößenverteilung in unverfestigten Sedimentproben.

Die Analyseergebnisse von Atterberg, Pipette und Sedigraph sind allerdings nicht mit den Resultaten von Coulter Counter und Lasergeräten vergleichbar.

Erfahrungsdauer: Alle Messmethoden werden seit längerer Zeit eingesetzt.

### 3.2.13 Weitere Messgrößen

Sporadisch wurde die Kornform und die Kornoberfläche mittels Rasterelektronenmikroskop bestimmt. Zusätzlich lassen sich mit EDS (Energy Dispersive System) semiquantitative chemische Analysen der Partikel durchführen. Die mineralogische Zusammensetzung wird mit Röntgenanalysen bestimmt.

Für viele hydraulische Fragestellungen ist das Raumgewicht eine wichtige Umrechnungsgröße. Es handelt sich um das Raumgewicht der (ungestörten) Geschiebeablagerung. Dabei können einzelne Proben oder Lastwagenwägungen vorgenommen werden. Hierbei muss jedoch der Wasseranteil am Gesamtgewicht bekannt sein, wofür eine Materialprobe aus Mittel- bis Feinstkorn benötigt wird.

Anhand der Kornverteilungskurve (Kenntnis des Anteils Grobmaterial) kann der gemessene Wassergehalt auf die Gesamtprobe umgerechnet werden. Unter Umständen lässt sich der Wassergehalt auch mit einer Neutronenprobe messen.

Aufwand: Gross.  
Genauigkeit: Mässig bis genügend.  
Vor-/Nachteile: Wassergehalt und Feststoffgewicht werden nur sporadisch bestimmt (z. B. bei Extremereignissen, oder alle 5 bis 10 Jahre einmal), weil die entsprechenden Erhebungen sehr arbeitsintensiv sind.

## 3.3 Messungen in Seen und Stauhaltungen

Geschiebe und die groben Schwebstoffe lagern sich in der Regel unmittelbar nach der Einmündung in Seen und Stauhaltungen ab und bilden das Delta. Nach der

Einmündung erfolgt eine nach Korngröße gestaffelte Fraktionierung und Ablagerung der eingetragenen Partikel. Die feinkörnigeren Anteile werden über grössere Distanzen durch seeinterne Strömungen verfrachtet, bevor sie auf den Grund sinken oder aber den See über den Ausfluss wieder verlassen. Die Erfassung dieses horizontalen Partikelflusses ist wegen der meist komplexen Strömungsverhältnisse ein schwieriges Unterfangen. Auch teilweise strömungsabhängig aber etwas leichter erfassbar ist der vertikale Partikelfluss («Sinkstoffe»), welcher letztlich zur Sedimentation und damit zur Verlandung führt.

Die Auffangwirkung eines Sees kann durch Bilanzierung der Feststofffrachten im Zu- und Abfluss abgeschätzt werden.

### 3.3.1 Feststoffeintrag

Bestimmung der Ablagerungsvolumina durch wiederholte Deltavermessungen oder Seegrundaufnahmen. In bestimmten zeitlichen Abständen wiederholte Seegrundaufnahmen ermöglichen die Bestimmung von Änderungen der Ablagerungsvolumina. Dabei sind nur Aussagen über den Gesamteintrag möglich, wobei berücksichtigt werden muss, dass ein Teil der eingetragenen Schwebstoffe den See wieder verlassen kann. Der Geschiebeanteil am Delta hängt vom Charakter des Zuflusses ab. Rückschlüsse auf die Geschiebefracht des Zuflusses sind nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich.

Aufwand: Abhängig von der Grösse des Deltas und der erforderlichen Messgenauigkeit. Je nach Einzugsgebiet und Feststoffbelastung des Zuflusses genügen Aufnahmen im zeitlichen Abstand von etwa 10 Jahren.

Genauigkeit: Abhängig von Messtechnik und Lotungsdichte.

Vor-/Nachteile: Deltavermessungen können in der Regel nur langfristig geplant werden. Dies bedingt, dass die interessanten Extremereignisse praktisch nicht erfassbar sind. Für die Erfassung der Jahresfrachten sind kostspielige Messkampagnen erforderlich. Zusätzlich müssen Proben genommen und bezüglich Kornverteilung und Lagerungsdichte analysiert werden. Vor allem bei kleinen Volumenänderungen ist die Bestimmung der Geschiebefracht aufgrund von

Deltavermessungen unsicher. Sie stellen jedoch eine Kontrollmöglichkeit für den Geschiebehaushalt dar, besonders wenn die Messungen regelmässig wiederholt werden.

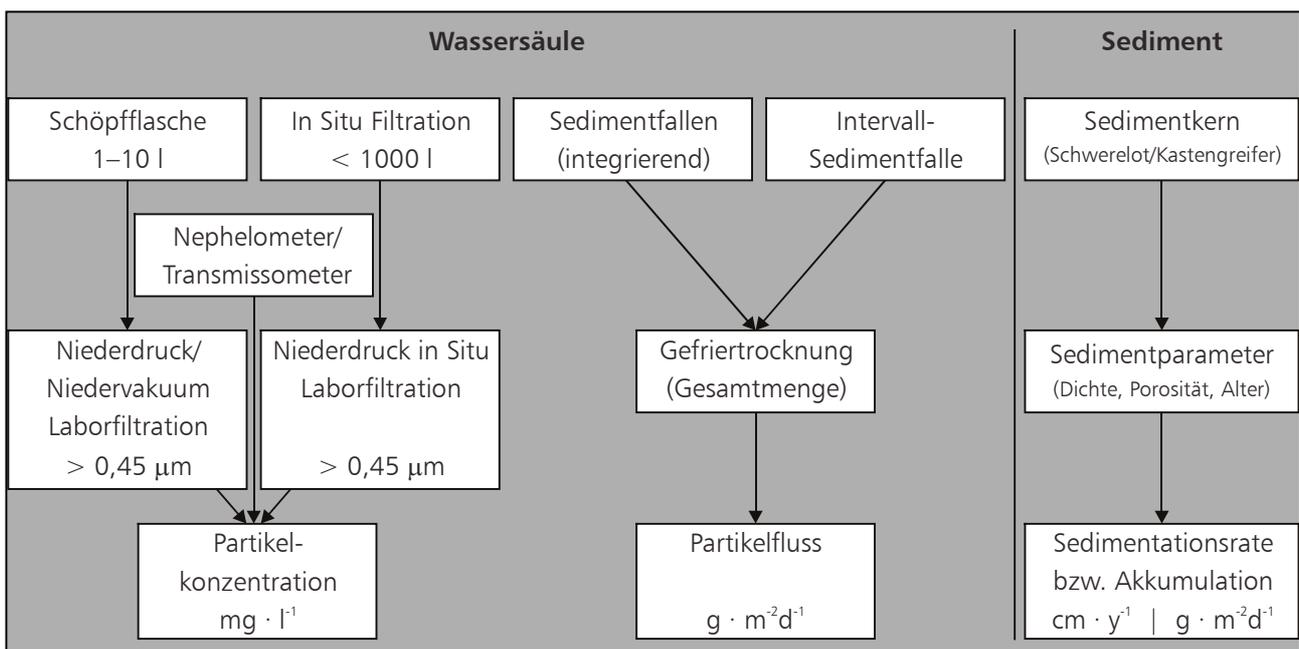
### 3.3.2 Schwebstoffkonzentration

Um den Schwebstoffinhalt eines Sees zu bestimmen, muss die Schwebstoffkonzentration in möglichst vielen Vertikalprofilen bestimmt werden. Die Probeentnahme kann mittels Schöpfflaschen oder «In Situ Filtration» erfolgen (vgl. Fig. 35). Daraus kann eine mittlere Konzentration und durch Multiplikation mit dem Seevolumen der momentane Schwebstoffinhalt ermittelt werden. Der vertikale Partikelflux wird mit Hilfe von Sedimentfallen bestimmt und zwar als Schwebstoffmenge pro Fläche mal Zeit (gebräuchlichste Einheit:  $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ).

### 3.3.3 Sedimentationsraten

Zur Bestimmung der Sedimentationsraten (Schichtmächtigkeit der pro Zeiteinheit abgelagerten Sedimente) bestehen direkte Messmethoden, wie:

- Sedimentfallen,
- Sedimentpegel,
- Sedimentprofile (vgl. Fig. 35) und
- Seegrundaufnahmen.



Figur 35: Schema der Probeentnahme aus einem See (nach SPREAFICO & MAZIJK 1993).

# 4 Ergebnisse

Ergebnisse über Feststoffuntersuchungen sind an verschiedener Stelle publiziert worden. Eine wichtige Publikation ist dabei der Hydrologische Atlas der Schweiz. In früherer Zeit wurden bereits die in Abschnitt 1.5.3 genannten Werke veröffentlicht. Die Messungen der Landeshydrologie werden jeweils im hydrologischen Jahrbuch der Schweiz publiziert.

## 4.1 Schwebstoffe

Von den älteren Arbeiten werden hier zwei wichtige Auswertungen aus den Jahren 1936/37 und 1964–69 vorgestellt. Die neueren Untersuchungen werden thematisch geordnet präsentiert.

### 4.1.1 Ältere Auswertungen

#### Schwebstoffmessungen Aare – Brienzwiler 1936/37

1936 und 37 wurden in der Aare bei der Abflussmessstation Aare – Brienzwiler spezielle Schwebstoffmessungen durchgeführt.

Anhand von Probeentnahmen an der Oberfläche, der Sohle und auf 4 dazwischenliegenden Höhenlagen wurde festgestellt, dass an der Oberfläche die geringsten Schwankungen der Schwebstoffkonzentration auftreten. Ferner nahm die Konzentration von der Oberfläche gegen die Sohle und von den seitlichen Messpunkten zur Profilmittte hin zu.

Neben der Schwebstoffkonzentration wurde auch die Kornzusammensetzung in Gewichtsprozenten gemessen (vgl. Tabelle 6). Wie die mittlere Schwebstoffkonzentration nahm auch die Korngrösse von der Wasseroberfläche zur Sohle hin zu. Diese Ergebnisse wurden später auch für andere Messstandorte grösstenteils bestätigt.

#### Auswertungen aus den Jahren 1964–69

Nach der Aufnahme regelmässiger Schwebstoffmessungen durch die Landeshydrologie in den 60er Jahren wurden u. a. auch spezielle Auswertungen für die Bestimmung der Schwebstofffracht bei der Station Aare – Brienzwiler vorgenommen. Als Unterlagen dienten Oberflächenproben aus den Jahren 1964–68 sowie die mittleren Tagesabflussmengen aus demselben Zeitraum.

Für den Vergleich von Punkt- und Integrationsmessungen in der Vertikalen wurden an den zwei Standorten Aare – Brienzwiler und Linth – Weesen zusätzliche Messungen mit dem Messwagen der Landeshydrologie vorgenommen. Dabei sind für die beiden Messstationen keine einheitlichen Ergebnisse zustande gekommen. Dies wurde vor allem dem Umstand zugeschrieben, dass die Messungen an der Linth bei Hochwasser ausgeführt wurden, und dass zudem Fliess- und Füllgeschwindigkeiten nicht unbedingt übereinstimmten. Für die Untersuchungen wurden die beiden Methoden hingegen als gleichwertig angenommen. Dies war aber vorerst eine Annahme, welche damals als Hypothese formuliert und nicht abschliessend überprüft werden konnte.

Einige der Ergebnisse wurden wie folgt dargestellt:

- Anhand von 91 Messungen der Station Aare – Brienzwiler wurde das Verhältnis der mittlere Konzentration (C) zur Oberflächenkonzentration ( $C_o$ ) bestimmt und anschliessend zum Abfluss (Q) in Beziehung gesetzt. Die resultierende parabolische Funktion konnte mit  $Q = 22 \cdot (C/C_o)^{1,7}$  angenähert werden. Die mittlere Konzentration könnte also bei bekannter Abflussmenge und Oberflächenkonzentration berechnet werden. Hier ist allerdings anzumerken, dass diese Beziehung nur für Aare – Brienzwiler gültig war. Zudem mussten die Messungen teilweise korrigiert werden, da unterschiedliche Düsen (4 und 5 mm) bei der Probenahme verwendet worden waren.

Entnahmetiefe unter Wasserspiegel [m]	Mittlere Konzentration [g/l]	Kornzusammensetzung in Gewichtsprozenten			
		0–0,1 mm	0,1–0,75 mm	0,75–0,9 mm	0,9–2,4 mm
0,22	0,208	46,8	44,3	5,1	3,8
0,92	0,249	41,8	52,7	1,8	3,7
1,62	0,38	22,5	66,5	5,5	5,5
2,02	0,904	6,4	46,3	13,9	33,4

Tabelle 6: Schwebstoffkonzentration und Korngrössenverteilung bei der Aare Brienzwiler, anhand der Messungen von 1936/37.

- Bezüglich der Relation Oberflächenkonzentration/ Wasserführung konnte bis etwa 42 m<sup>3</sup>/s keine Korrelation gefunden werden. Für mehr als 42 m<sup>3</sup>/s ergab sich annähernd  $Q = 22 \cdot C_o^{0,256}$ .
- Die Beziehung zwischen Wasser- und Schwebstoffführung wurde anhand von 524 Oberflächenproben ermittelt. Die Werte wurden mit dem entsprechenden Tagesmittelabfluss multipliziert um eine mittlere, tägliche Schwebstoffführung zu erhalten.
- Bei grösseren Geschwindigkeiten bestehen verschiedene übereinanderliegende Schichten mit unterschiedlichem Schwebstofftransport. Eine Durchmischung findet nur am Rande statt. Eine Probenahme durch Tiefenintegration kann hier zu falschen Ergebnissen führen (z. B. Unterbewertung). Vergleichende Messungen mit Punktentnahmen sollten daher wieder vermehrt ausgeführt werden.

Die Jahresfrachten wurden mit der gemeinsamen Schwebstofffunktion berechnet. Aus der Dauerkurve der Abflussmengen, erstellt anhand von 1, 2, 3, 9, 18, 55, 91, 137, 182, 228 und 364 Tagen, wurde eine Dauerkurve der Schwebstoffführung berechnet und durch graphische Integration die jährliche Schwebstofffracht ermittelt (vgl. Abschnitt 4.1.4).

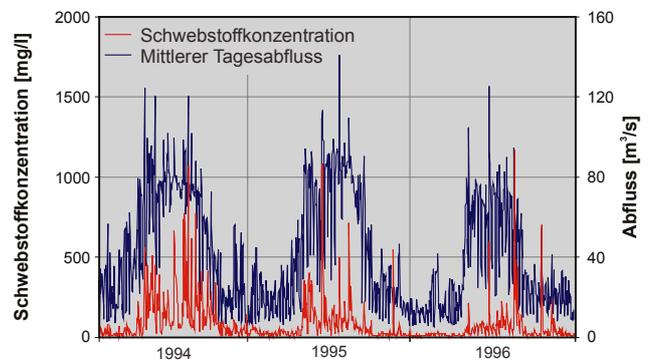
#### 4.1.2 Ausgesuchte Messergebnisse neueren Datums

##### Korrelation Schwebstoffkonzentration – Abfluss

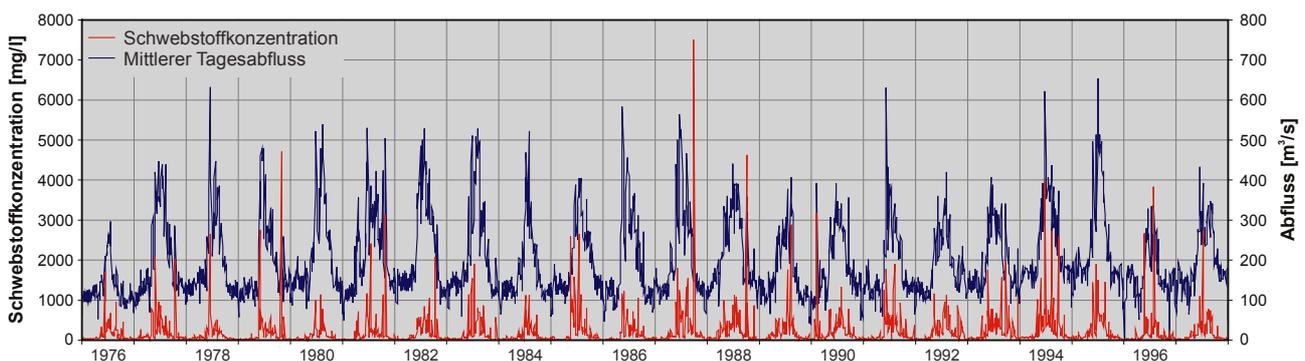
Die Korrelation zwischen der Schwebstoffkonzentration und der mittleren täglichen Abflussmenge ist in vielen Fällen sehr schwach (vgl. Tabelle 7). Bei demselben Abfluss können die Sedimentkonzentrationen um mehr als den hundertfachen Wert variieren. Warum die Korrelationen so unterschiedlich ausfallen, kann nicht schlüssig beantwortet werden. Von wenigen

Ausnahmen abgesehen, ist die Korrelation dort hoch, wo eher kurze Messreihen bestehen (Messkampagnen 1993). Tabelle 7 zeigt die Problematik der Schwebstofffracht-Bestimmung auf, welche ja anhand der gemessenen Schwebstoffkonzentration und des entsprechenden Tagesmittelabflusses ermittelt wird.

Die Schwebstoffkonzentrationen und mittleren Tagesabflüsse der ASPEG-Messstation Aare – Brienzwiler sind in Figur 37 für die Jahre 1994–1996 dargestellt. Gut ersichtlich ist der generelle Zusammenhang. Während der Sommermonate, wenn die mittleren Tagesabflüsse hohe Werte erreichen, nimmt die Schwebstoffkonzentration ebenfalls zu. Hochwasserabflüsse sind immer auch von erhöhten Schwebstoffkonzentrationen begleitet. Am Beispiel des Messstandorts Rhône – Porte-du-Scex (Fig. 36) lässt sich ersehen, dass demgegenüber aussergewöhnliche Schwebstoffkonzentrationen nicht in jedem Fall mit Spitzenabflussmengen verbunden sein müssen. Die maximale Schwebstoffkonzentration am 12.10.1987 von 7526 mg/l wurde bei einem Abfluss von nur gerade 265 m<sup>3</sup>/s erreicht (mittlerer Jahresabfluss 183 m<sup>3</sup>/s).



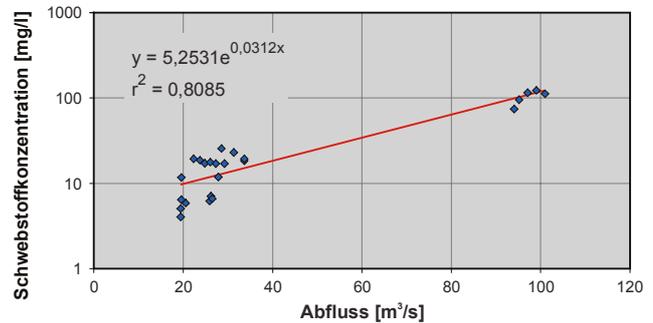
Figur 37: Messungen der Schwebstoffkonzentration bei der Messstation Aare – Brienzwiler ASPEG, 1994–96.



Figur 36: Messungen der Schwebstoffkonzentration bei der Messstation Rhône – Porte-du-Scex, 1976–97.

Die in Figur 38 dargestellten Daten der Station Reuss – Seedorf (Querprofilmessungen von 1991, 92, 93 und 1998; vgl. Tab. 5) zeigen eine gewisse Abhängigkeit zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentration.

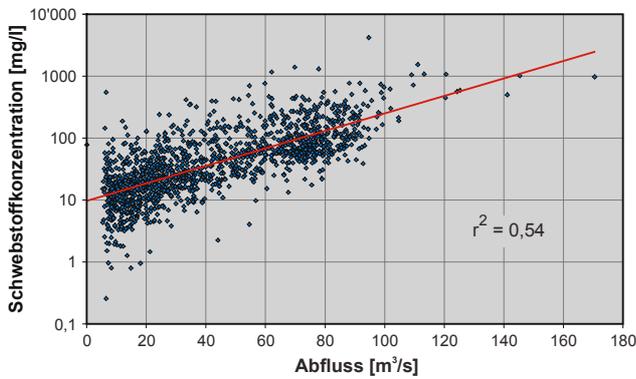
Bei grösseren Datenmengen (Figuren 39 bis 41) ist die Abhängigkeit zwar noch immer ersichtlich, aber teilweise nur noch schwach ausgeprägt.



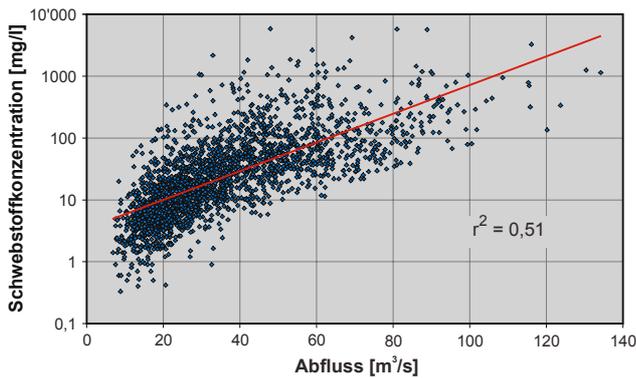
Figur 38: Relation Abfluss – Schwebstoffkonzentration für Oberflächenproben (Reuss – Seedorf, Querprofilmessungen 1991/92/93/98).

Messtandort (alphabetisch)	berücksichtigte Messjahre	Anzahl Daten	Korrelationskoeffizient
Aare – Brienzwiler	1976–1997	2231	0,25
Aare – Brienzwiler, ASPEG	1993–1997	1430	0,54
Aare – Hagneck	1977–1978	182	0,51
Aare – Untersiggenthal	1976–1991	1827	0,43
Albula – Tiefencastel	1992–1993	105	0,54
ARA – Bad Ragaz	1979–1991	1256	0,19
Areuse – Boudry	1993	72	0,56
Arve – Genève, Bout du Monde	1992–1997	475	0,42
Arve – Genève, Pont des Acacias	1976–1992	1716	0,56
Birs – Münchenstein	1993	102	0,65
Broye – Payerne	1993	102	0,45
Doubs – Ocourt	1993	104	0,39
Emme – Wiler, Biberist	1983–1997	1421	0,33
Emme – Wiler, Krayligen	1979–1983	485	0,26
Glatt – Rheinsfelden	1993	104	0,46
Inn – Schuls, Tarasp	1993	89	0,57
Kander – Hondrich	1992–1993	108	0,75
Kleine Emme – Littau	1993	104	0,50
Landquart – Felsenbach	1979–1997	1965	0,46
Linth – Mollis	1976–1997	2276	0,51
Lonza – Blatten	1979–1997	1682	0,62
Lütschine – Gsteig	1976–1997	2226	0,72
Lütschine – Gsteig, ASPEG	1993–1997	1638	0,72
Maggia – Locarno	1993	104	0,42
Moesa – Lumino	1993	104	0,54
Reuss – Mühlau	1977–1997	2176	0,28
Reuss – Seedorf	1979–1997	1827	0,40
Rhein – Diepoldsau	1984–1997	1385	0,48
Rhein – Schmitter	1976–1984	904	0,69
Rhone – Brig	1992–1993	111	0,52
Rhône – Porte du Scex	1976–1997	2282	0,62
Sarine – Broc	1993	101	0,34
Simme – Oberwil	1992–1993	103	0,58
Sitter – St. Gallen	1993	102	0,43
Thur – Halden	1976–1997	2244	0,53
Ticino – Bellinzona	1985–1997	1327	0,26
Ticino – Riazzino, Gudo	1979–1984	525	0,36
Vispa – Visp	1992–1993	111	0,38
Worble – Ittigen	1988–1991	345	0,43

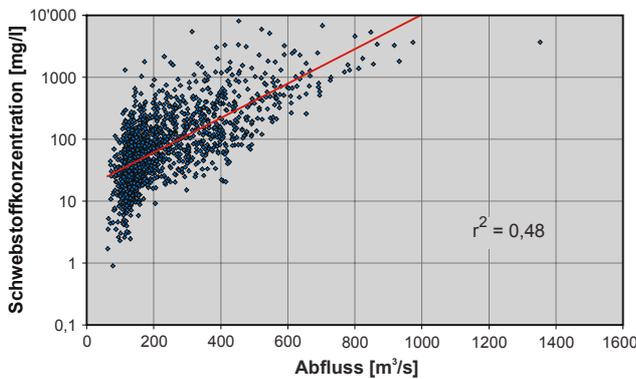
Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten für die exponentielle Relation Schwebstoffkonzentration – mittlerer Tagesabfluss.



Figur 39: Datenset der Schwebstoffkonzentrationen Aare – Brienzwiler ASPEG, 1993–1997 (tägliche Messungen, mit Unterbrüchen besonders in den Wintermonaten).



Figur 40: Datenset der Schwebstoffkonzentrationen an der Station Linth – Mollis, 1976–1997.



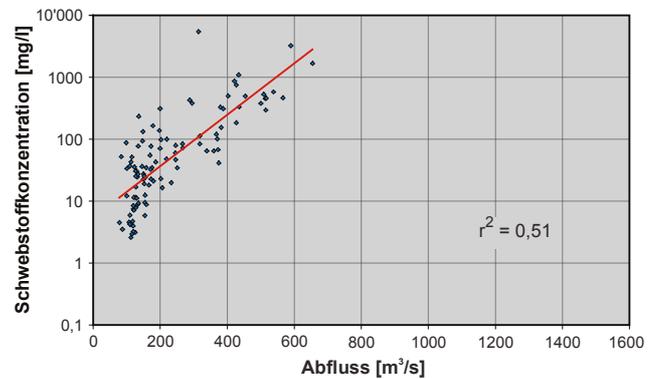
Figur 41: Datenset der Schwebstoffkonzentrationen versus Abflusstage Mittel bei der Station Rhein – Diepoldsau, 1984–1998.

Tendenziell lässt sich eine Zunahme der Schwebstoffkonzentration mit zunehmendem Abfluss nachweisen. Dabei fällt auf, dass die höchsten Konzentrationen eher bei mittleren Abflüssen (beim Rhein – Diepoldsau um 300–800 m<sup>3</sup>/s) auftreten. Allerdings ist die Abdeckung mit Messdaten für die oberen Bereiche ungenügend. Bei den kleinen Abflüssen treten eher geringere Schwebstoffkonzentrationen auf. Die Schwankungen sind aber beträchtlich: Im Bereich der Abflüsse um etwa 200 m<sup>3</sup>/s variieren die Schwebstoffkonzentrationen bei Diepoldsau zwischen 10 und 2000 mg/l, also um einen Faktor 200.

Betrachtet man die Daten für ein einzelnes Jahr (Figur 42), erscheint die Punktwolke gegenüber derjenigen in Figur 41 etwas enger, die Schwebstoffkonzentrationen schwanken aber beim selben Abfluss immer noch um einen Faktor 100.

#### Saisonale Schwankungen; Beispiel Rhein – Diepoldsau

In Figur 43 sind die Daten der Januar resp. Julimessungen aus den Jahren 1985 bis 1997 dargestellt. Aufgrund des Abflussregimes weisen die Winter- und Sommerabflusswerte kaum Überschneidungen auf. Im Januar liegen die Tagesmittelabflüsse unterhalb rund 200 m<sup>3</sup>/s, im Juli darüber. Die Schwebstoffkonzentrationen erreichen im Januar im Mittel nicht so hohe Werte wie im Juli, umgekehrt kommen Werte unterhalb 15 mg/l nur im Januar vor. Werte im Bereich zwischen 20 und 1300 mg/l sind sowohl im Sommer wie im Winter möglich.



Figur 42: Datenset der Schwebstoffkonzentrationen an der Station Rhein – Diepoldsau, 1997.

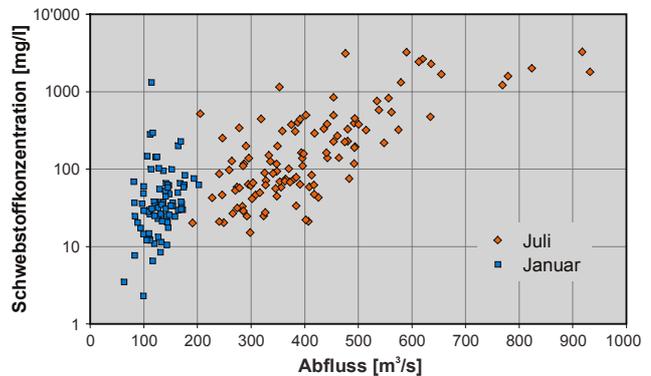
Mit diesen Daten lassen sich Unterschiede zwischen winterlichem und sommerlichem Schwebstofftransport, welche nicht auf den Abfluss zurückzuführen sind, nicht nachweisen. Weitet man die Betrachtung auf die drei Wintermonate Dezember bis Februar sowie auf die Sommermonate Juni bis August aus, ergeben sich Überschneidungen beim Abfluss im Bereich von 150 bis 300 m<sup>3</sup>/s. Die entsprechenden Werte in Figur 44 zeigen im Sommer leicht höhere, im Winter oftmals tiefere Schwebstoffkonzentrationen.

Es entsteht der Eindruck, dass im Winter generell weniger Feststoffe anfallen. Die entscheidende Grösse für den Schwebstofftransport bleibt jedoch der Abfluss. Allfällige andere Einflüsse spielen – vermutlich – eine untergeordnete Rolle. Diese am Beispiel Rhein – Diepoldsau aufgestellte These konnte bisher nicht für alle Stationen bestätigt werden und wäre in Zukunft anhand weiterer Daten zu überprüfen.

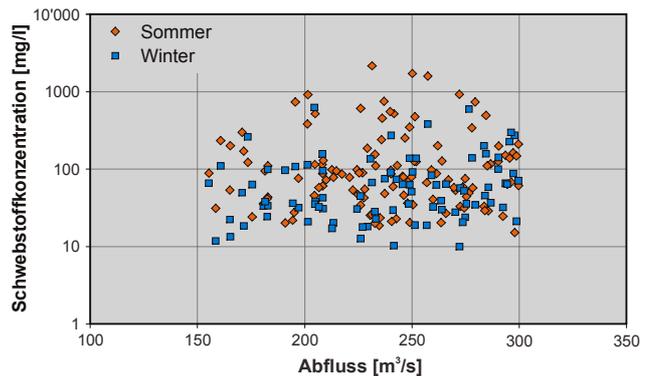
### Repräsentativität der Mittelprobe

Die Schwebstoffkonzentration verteilt sich nicht immer gleichmässig über den Fliessquerschnitt. Es stellt sich die Frage, inwiefern eine an der Oberfläche in der Mitte des Flusses erhobene Mittelprobe repräsentativ für den Schwebstofftransport im Fluss ist. Aufgrund der durchgeführten Messkampagnen, bei welchen immer mindestens ein sogenanntes Querprofil mit 3 bis 10 Proben (abhängig von der Flussbreite) entnommen worden ist, kann festgehalten werden, dass die Mittelprobe generell als genügend repräsentativ für einen Flussquerschnitt betrachtet werden darf.

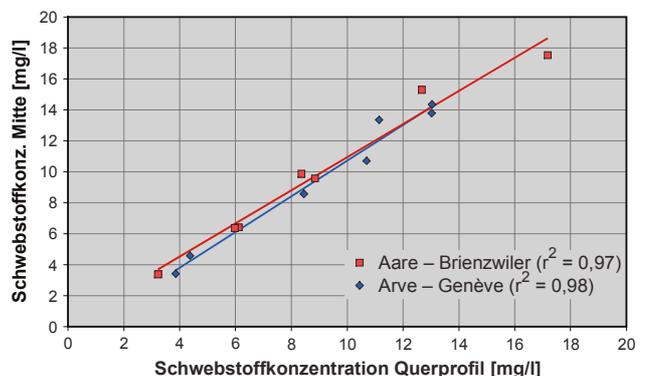
An den beiden Stationen Aare – Brienzwiler und Arve – Genève (Figur 45), darf die Korrelation ( $r^2$ ) zwischen Mittel- und Querprofilmessung mit Werten  $> 0,97$  als sehr gut angesehen werden. Bei andern Stationen sieht es teilweise anders aus, so dass die Repräsentativität für jeden Standort neu beurteilt werden muss. In den untersuchten 65 Fällen wich die Mittelmessung in 46 Fällen mehr als 5 % vom Querprofildurchschnitt ab. Gänzlich daneben (mehr als 50 % Abweichung) war sie in 17 Fällen.



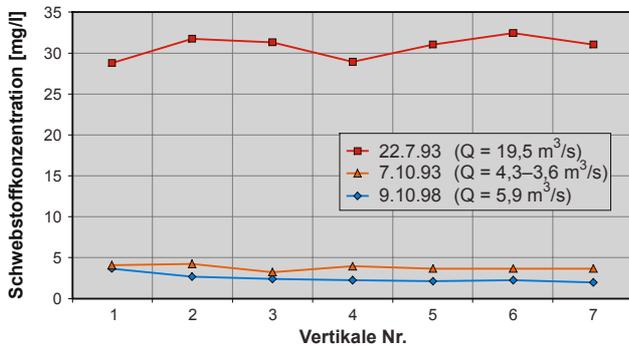
Figur 43: Schwebstoffkonzentrationen an der Station Rhein – Diepoldsau jeweils im Januar und im Juli.



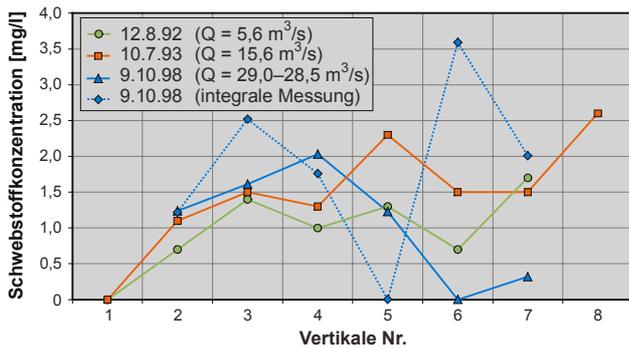
Figur 44: Vergleich der Schwebstoffkonzentrationen im Winter (Dezember–Februar) und Sommer (Juni–August) bei Abflüssen zwischen 150 und 300 m<sup>3</sup>/s an der Station Rhein – Diepoldsau.



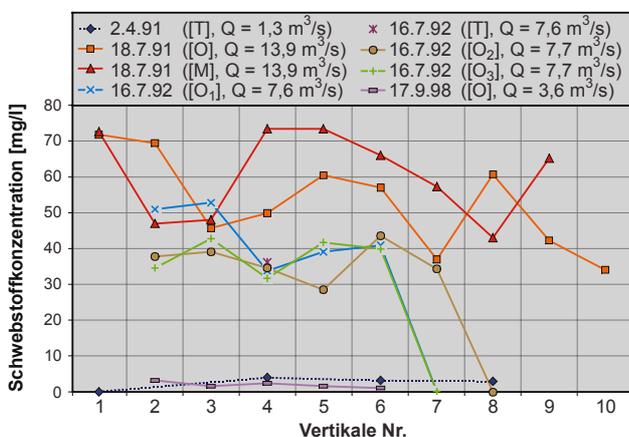
Figur 45: Relation der Mittelmessung zu Querprofilmessungen, an den Beispielen Aare – Brienzwiler und Arve – Genève.



Figur 46: Querprofilmessungen (Oberfläche) an der Station Glatt – Rheinsfelden.



Figur 47: Querprofilmessungen (Oberfläche und integral) an der Station Doubs – Ocourt.



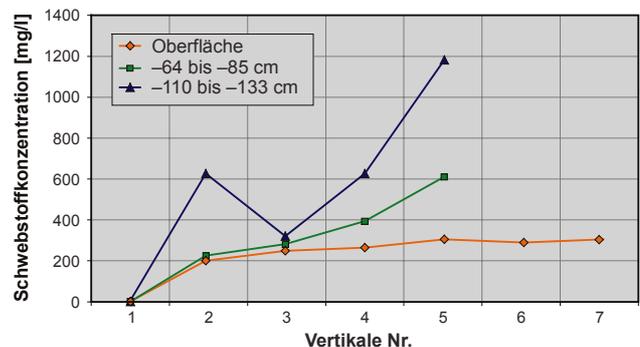
Figur 48: Querprofilmessungen (Oberfläche [O], Mitte [M] und Tiefe [T]) an der Station Lonza – Blatten.

In den Figuren 46–48 sind Beispiele von durchgeführten Querprofilmessungen dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass die Konzentration über das Querprofil immer Unterschiede aufweist. Für die Glatt (Fig. 46) sind die Unterschiede in den Querprofilbildern nicht sehr gross (kanalähnliches Gerinne). In eher natürlichen Gerinnen (Doubs, Fig. 47 und Lonza, Fig. 48) zeigen sich erhebliche Unterschiede im Bild der einzelnen Querprofile, so dass sich keine Gesetzmässigkeiten mehr erkennen lassen. Als einzige Gemeinsamkeit fallen in Figur 47 (Doubs) die durchwegs kleinen Schwebstoffkonzentrationen am Messpunkt beim linken Ufer erkennen.

### Messungen in verschiedener Wassertiefe

Je näher an der Flusssohle die Probe genommen wird, desto höher ist in der Regel die Schwebstoffkonzentration. Am Beispiel der Messung vom 16. Juli 1991, Lüttschine – Gsteig, Bönigen (Fig. 49), kann ein Anstieg der Schwebstoffkonzentrationen bei zunehmender Wassertiefe belegt werden. Je näher die Messung bei der Sohle ist, desto grösser sind allerdings die Unterschiede im Querprofil. Dies ist vermutlich nicht zuletzt auf den stark pulsierenden Sedimenttransport in Sohlennähe zurückzuführen. Diese Vermutung gilt tendenziell auch für andere Messungen (vgl. Beispiel Arve Genève vom 23.7.1991, Fig. 50).

Bei Integrationsmessungen wird das Schöpfgerät von der Oberfläche bis in Sohlennähe abgesenkt und wieder hochgezogen. Die Probe deckt damit eine Vertikale ab, und stellt einen Mittelwert zwischen Oberflächen- und Tiefenproben dar. Am Beispiel der Messungen Arve – Genève vom September 1998 (Fig. 51) kann die höhere Schwebstoffkonzentration bei den Integra-



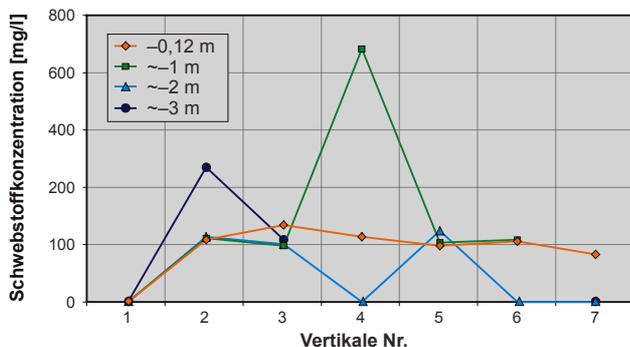
Figur 49: Schwebstoffkonzentrationswerte in verschiedenen Wassertiefen, an der Station Lüttschine – Gsteig, Bönigen vom 16. Juli 1991.

tionsmessungen erkannt werden, jedoch nur in der Flussmitte. Gegen die Ufer hin nimmt dieser Unterschied stark ab, was vor allem auf die niedrigere Wasserhöhe resp. Fließgeschwindigkeit am Flussrand, aber vermutlich auch auf eine grössere vertikale Durchmischung des Schwebstofftransportes (infolge Reibung, Turbulenzen) zurückzuführen sein könnte.

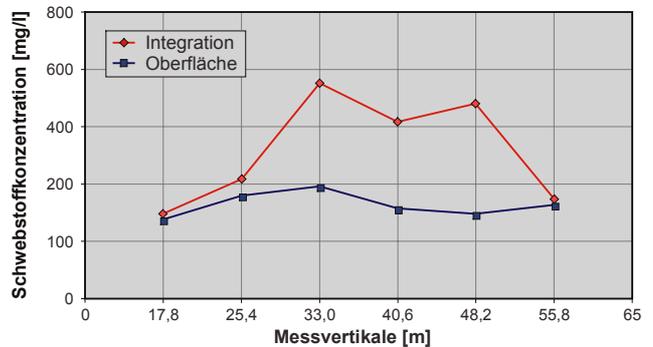
### Einfluss des Probenahmeapparates

Das zur Probenahme verwendete Gerät beeinflusst das Messergebnis ebenfalls. Ein Vergleich von verschiedenen Probenahmeapparaten (SGF und SGLN, Fig. 52) und typgleichen Probenahmeapparaten (SGL43 und SGL47, Fig. 53) bei den Standorten Aare – Brienzwiler und Arve – Genève ergibt folgendes Bild:

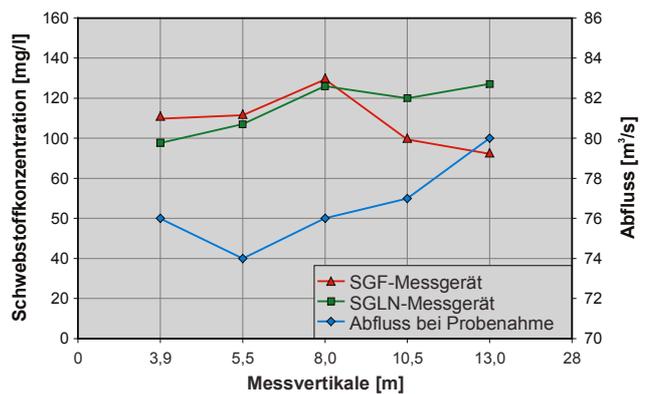
- Bei nahezu konstantem Abfluss im Querprofil sind die Abweichungen in der Flussmitte am geringsten. Die Unterschiede nehmen gegen die Böschungen hin zu. Dabei lässt sich aber keine konstante Abweichung bei den erfassten Konzentrationen feststellen. In der Flussmitte sind die Schwebstoffkonzentrationen beim Gerät SGF etwas höher, gegen die Ausseiten hin jedoch deutlich tiefer als beim Gerät SGLN. Diese Unterschiede können deshalb nicht alleine gerätebedingt erklärt werden – während der geringen Zeitdifferenz bei der Probeentnahme war die Schwebstoffführung vermutlich nicht konstant. Dies ist ein weiteres Indiz für den äusserst variablen Schwebstofftransport bei konstantem Abfluss.
- Der Vergleich zwischen SGL Nr. 43 und SGL Nr. 47 (Messung Arve – Genève, vgl. Fig. 53), zeigt mit einer Ausnahme keine grösseren Unterschiede. Allerdings sind auch die Abflussschwankungen geringer als beim Beispiel in Fig. 52.



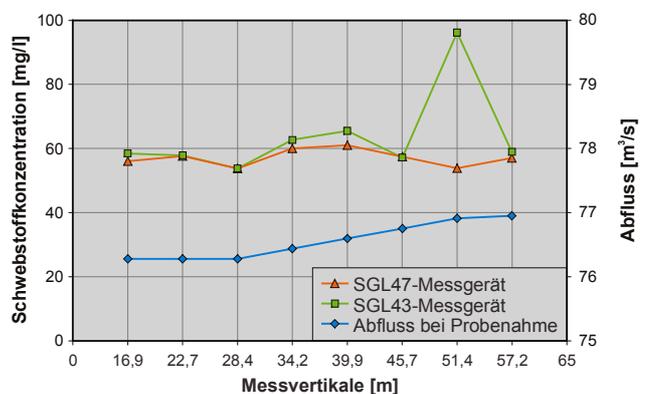
Figur 50: Schwebstoffkonzentrationswerte in verschiedenen Wassertiefen, an der Station Arve – Genève vom 23.9.1991.



Figur 51: Oberflächen- und Integrationsmessung, an der Station Arve – Genève vom 17.9.1998.



Figur 52: Station Aare – Unterbach, Brienzwiler, Vergleichsmessungen vom 17.9.1991 mit den Geräten SGNL und SGF.



Figur 53: Vergleichsmessungen SGL Nr. 47 – SGL Nr. 43 vom 23.6.1992, an der Station Arve – Genève.

### **Zeitliche Repräsentativität der Schwebstoffprobenentnahme**

Bereits mehrfach (BINDERHEIM-BANKAY & JAKOB 1999) wurde darauf hingewiesen, dass mit der Schwebstoffprobenahme am Morgen zu geringe Ergebnisse bei der Abschätzung von Schwebstofffrachten erzielt würden. Die Tagesspitze der Abflüsse wird oft erst am späten Nachmittag erreicht. Leider existieren kaum Vergleichsdaten, um diese Vermutung zu untermauern. Darum wurde das Problem bei mit ASPEG-Probenahmegeräten ausgerüsteten Stationen näher untersucht.

Für die Probenahmen im Routinebetrieb wurde stationsbezogen ein Tageszeitpunkt bestimmt, bei welchem der Abfluss mit hoher Wahrscheinlichkeit nahe dem Tagesmittelabfluss ist. Hier wären aber vertiefere Untersuchungen angezeigt, insbesondere da ja der Tagesmittelabfluss über das Jahr betrachtet zeitlich nicht konstant auftritt.

### **Vergleich Trübungsmessung mit Schwebstoffkonzentrationsmessungen**

Um die Berechnungsmethode zur Abschätzung der Schwebstofffrachten zu prüfen und zu verbessern, wurde im Rahmen eines Pilotprojektes an der Lütschine eine neue Methode zur Berechnung von Schwebstofffrachten erarbeitet. Dazu wurden tägliche, als Stichproben erhobene Schwebstoffkonzentrationsmessungen und seit Februar 1998 kontinuierliche Trübungsmessungen durchgeführt. Mit einer Korrelation zwischen den Trübungswerten (Tr) und den Schwebstoffkonzentrationen (SSC) sollte eine kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffführung ermöglicht werden. Auf diese Weise würde eine integrierende Datenbasis für Schwebstofffrachtberechnungen geschaffen.

Ein Ziel des Projektes war, die Trübungsdynamik der Lütschine zu beschreiben und basierend auf den Erkenntnissen die Eignung der Schwebstoffkonzentration-Trübung-Korrelationsmethode im Hinblick auf Schwebstofffrachtberechnung zu prüfen. Ein genereller Einsatz von Trübungsmessungen zur Bestimmung von Schwebstoffkonzentrationen könnte unter den folgenden Einschränkungen vorgenommen werden:

- a) Jedes Einzugsgebiet ist individuell zu behandeln bzw. für jedes Einzugsgebiet muss jeweils eine Korrelation zwischen Trübung und Schwebstoffkonzentration erstellt werden.
- b) Die Datenbasis zur mathematischen Beschreibung der SSC-Tr-Beziehung muss genügend gross sein,

weil hauptsächlich bei Hochwasserereignissen diese Korrelationen stark variieren.

- c) Es sind immer dieselben Trübungssonden zu verwenden, weil diese die SSC-Tr-Beziehungen wesentlich beeinflussen.
- d) Die komplizierten Abhängigkeiten der Trübung von der Partikelgrösse und -beschaffenheit der Schwebstoffe müssen genügend berücksichtigt werden.

Ferner waren innerhalb des Projektes verschiedene Methoden zur Berechnung der Schwebstofffrachten zu vergleichen und zu evaluieren, um daraus Empfehlungen zur Datenerhebung und -aufbereitung sowie zur Anwendung verschiedener Methoden zur Schwebstofffrachtberechnung an der Lütschine abzuleiten. Auf diese Arbeiten wird hier nicht mehr eingegangen, da in der Zwischenzeit die Berechnungsmethode der Landeshydrologie für Schwebstofffrachten angepasst worden ist (GRASSO & JAKOB 2003).

### **Einfluss der Schnee- und Gletscherschmelze auf die Trübungsdynamik**

Die Trübung im Wasser resultiert aus der Konzentration der lichtabsorbierenden Substanzen. Dazu gehören sowohl Partikel als auch gelöste Stoffe. Die Trübung ist stark an die hydrologischen Verhältnisse gekoppelt, wobei bei gleichem Abfluss oft unterschiedlich starke Trübungswerte gemessen werden. Dies ist einerseits eine Folge der Art der hydrologischen Ereignisse und andererseits des Zeitpunkts der Trübungsmessung während der hydrologischen Ereignisse. Die Auswirkungen der Schnee- und Gletscherschmelze auf die Trübung in der Lütschine sind sowohl im Jahresverlauf als auch im Tagesgang ersichtlich.

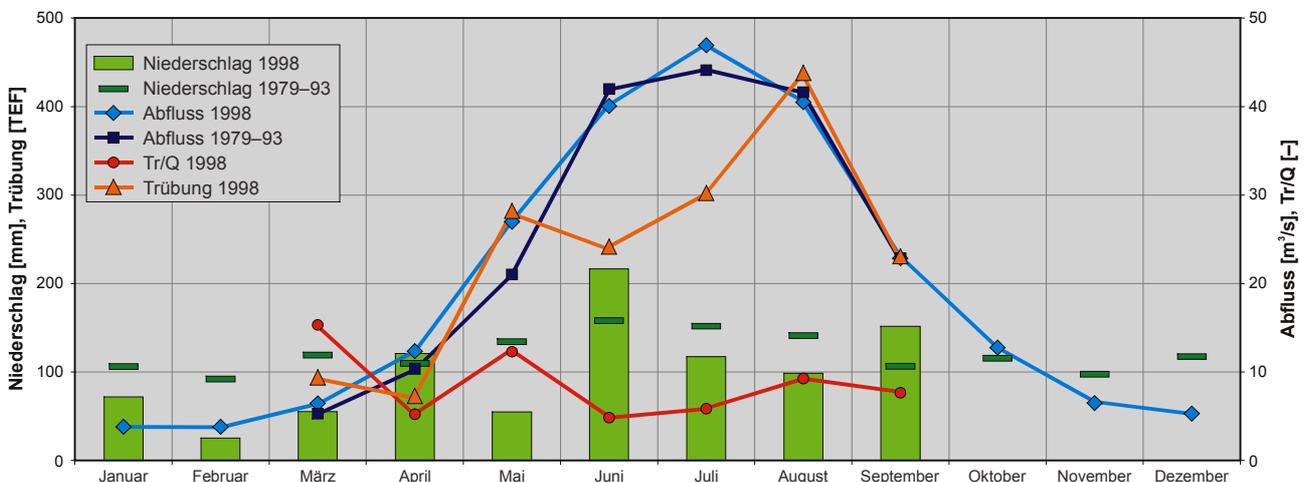
#### Jahresverlauf:

- Die höchste mittlere Trübung (zeitlich gewichtetes Monatsmittel) wurde im August gemessen, was auf den grossen Anteil des trüben Gletscherschmelzwassers relativ zum klaren Grundwasser zurückzuführen ist (Fig. 54).
- Die Einbrüche der Trübungswerte im April und Juni können möglicherweise mit den in diesen Monaten erhöhten Niederschlägen erklärt werden. Dadurch erhöhte sich das Verhältnis von Grundwasser zu Schmelzwasser, was wiederum zu tieferen mittleren Trübungswerten führte (Fig. 54).
- Die trübende Wirkung des Schmelzwassers zeigt sich auch im Verhältnis von Trübung zu Abfluss. Dieses war bei der ersten und zweiten Schneeschmelze im März bzw. Mai am grössten, im Juni am geringsten. Bis August stieg das Trübungs-Abfluss-Verhältnis mit zunehmenden Lufttemperaturen wieder an, um im September mit den ersten Kälteeinbrüchen erneut abzunehmen.
- Einzelne saisonal ersichtliche Schnee- und Gletscherschmelzereignisse sind mit einer grösseren zeitlichen Auflösung in Figur 55 ersichtlich. Anfangs März ereignete sich mit einer leichten Verzögerung zum Anstieg in der Lufttemperatur (um 6 °C) die erste starke Schneeschmelze, welche einen grossen Trübungspeak verursachte.
- Weitere Schmelzereignisse sind in den verzögert zur Lufttemperatur synchron verlaufenden Trübungs- und Abflusswerten Ende April, Mitte Mai, Ende Juni, Mitte Juli und Anfang September ersichtlich.

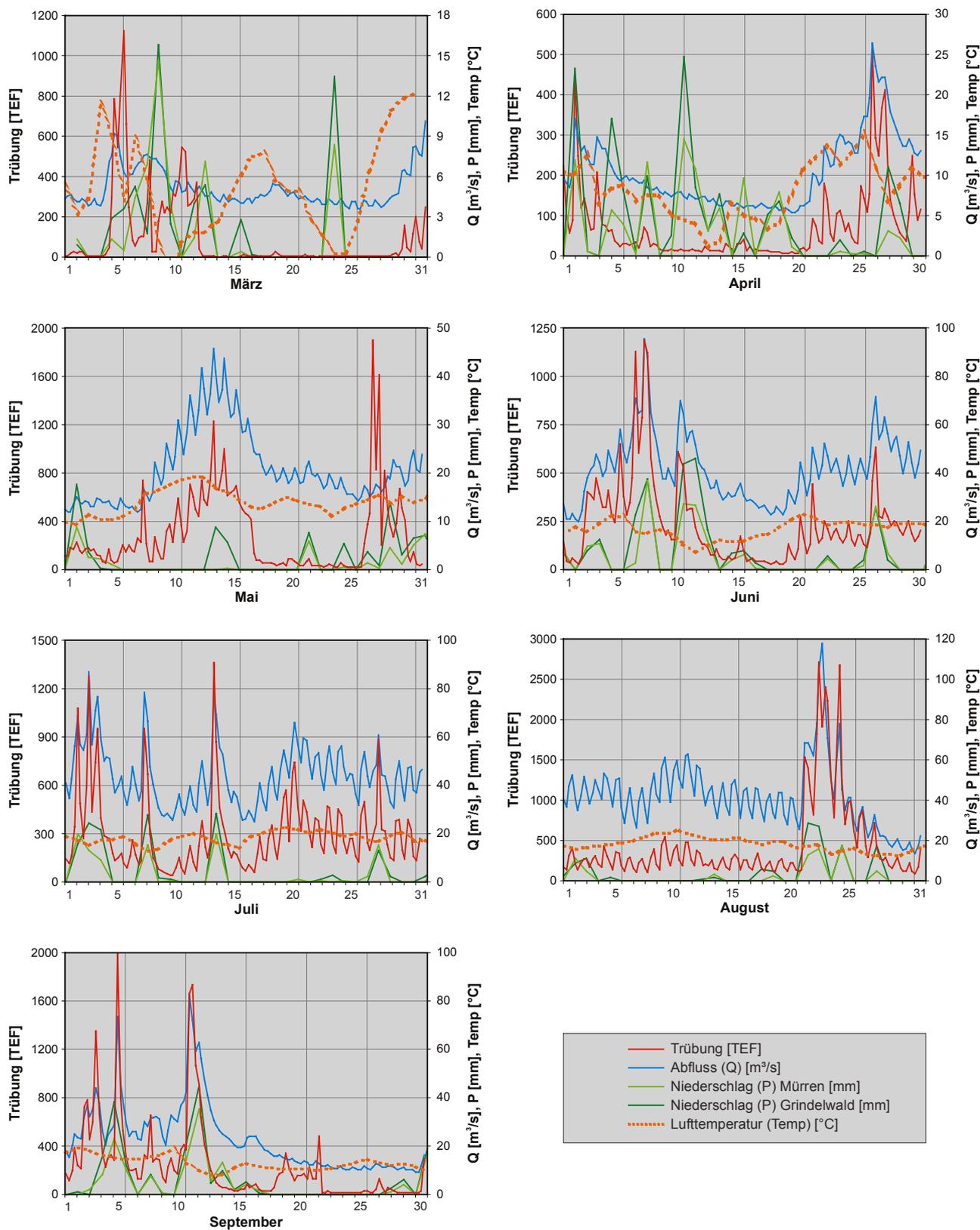
#### Tagesverlauf:

- Im Tagesverlauf traten die Trübungs- und Abflussmaxima je nach Jahreszeit zwischen Spätnachmittag (im Hochsommer) und Mitternacht (im Frühjahr) verzögert zur höchsten Sonneneinstrahlung bzw. zum Luft-Temperaturmaximum auf.
- Die Trübungs- und Abflussminima traten entsprechend am späten Vormittag (Hochsommer) bzw. am späten Nachmittag (Frühjahr) auf.

Die Verzögerung des Trübungs- und Abflusspeaks zur maximalen Sonneneinstrahlung bzw. Lufttemperatur ist im Frühjahr grösser als im Hochsommer, weil die Fließgeschwindigkeit aufgrund des geringeren Abflusses im Frühjahr kleiner ist und somit die «Schmelzwasserwelle» später bei der Messstation eintrifft. Gegebenenfalls müssen diese Unterschiede in den Tagesgängen bei punktuellen Trübungsmessungen entsprechend der Fragestellung insbesondere bei Schwebstofffrachtberechnungen berücksichtigt werden.



Figur 54: Monatsmittelwerte (1998) von Abfluss, Niederschlag und Trübung im Vergleich zu den langjährigen (1979–93) Mitteln an der Station Lüttschine – Gsteig.

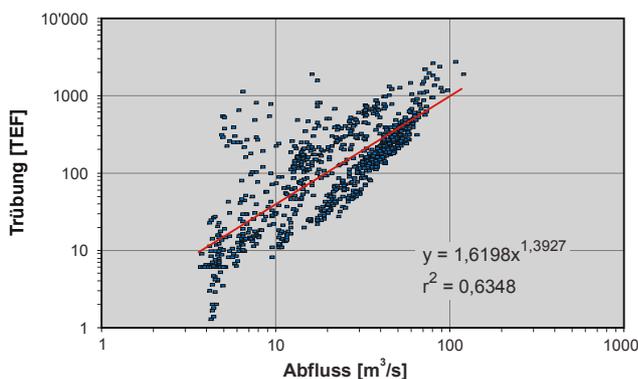


Figur 55: Verlauf der Trübung (6h-Mittelwerte) an der Schwebstoffstation Lüttschine – Gsteig in einer monatlichen Zusammenstellung für das Jahr 1998.

## Einfluss von Niederschlagsereignissen auf die Trübungsdynamik

Einzelne Niederschlagsereignisse wirkten sich wie vorgängig ausgeführt unterschiedlich auf das Abflussregime und die Trübungsdynamik der Lütschine aus. Im März und April ist kein Einfluss des Niederschlages auf das Abflussregime ersichtlich, weil der Niederschlag zum grössten Teil als Schnee vorlag (Fig. 55). Kleinere Regenfälle von weniger als 10 mm, wie sie beispielsweise Ende Mai auftraten, wirkten sich ebenfalls kaum auf Abfluss und Trübung aus. Grössere Regenereignisse von mehr als 20 mm, wie sie in der ersten Juni- und Julihälfte, Ende August und Anfang bis Mitte September vorkamen, führten zu grösseren Abfluss- und Trübungspikes. Die höchste Trübung wurde während des Regenereignisses Ende August gemessen, welches auf eine lange niederschlagsfreie Periode von rund einem Monat folgte. Dabei wurde das während der Niederrwasserperiode im Flussbett abgelagerte Feinmaterial ausgeschwemmt, was die hohen Trübungswerte bewirkte.

Besonders auffallend in der Trübungsdynamik der Lütschine ist, dass die Tagesgänge von Hochwasser, verursacht durch Starkniederschläge, überlagert werden, während bei grösseren Schmelzereignissen, wie beispielsweise Mitte Mai, die Tagesgänge ersichtlich bleiben. Einzelne Trübungspikes von wenigen Stunden Dauer (27./28.5.; 19.–21.9.1998), die weder mit dem Abflussregime noch mit einzelnen Wetterereignissen (Niederschlag, Temperatur) korreliert werden können, sind entweder auf Trübungen unbekanntes Ursprungs, die vielleicht mit den durchgeführten Renaturierungsmassnahmen an der Schwarzen Lütschine zusammenhängen, oder auf Sondenfehlfunktionen zurückzuführen.



Figur 56: Korrelation zwischen Abfluss und Trübung in der Lüttschine bei Gsteig.

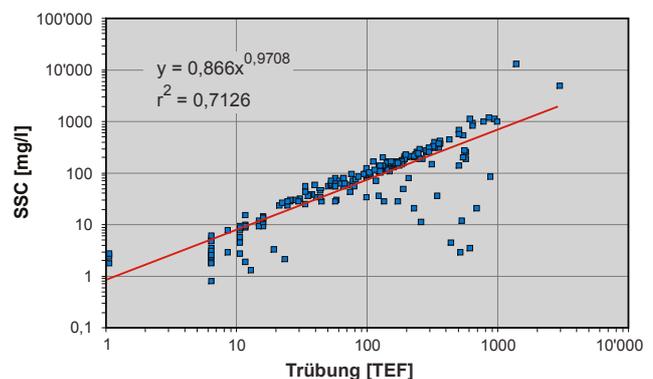
## Trübungs-Abfluss-Beziehungen

Die Trübung in der Lüttschine verlief im Untersuchungszeitraum 1998 meist synchron zum Abfluss. Die Korrelation zwischen Abfluss und Trübung weist jedoch ein tiefes Bestimmtheitsmass auf ( $r^2 = 0,63$ ; März–September), was auf die vorgängig beschriebene unterschiedliche Phasenverschiebung und die Vielfalt der Trübungs-Abfluss-Beziehungen, welche in der Lüttschine wirksam sind, zurückzuführen ist (Fig. 56). Korrekterweise müsste man Trübungs-Abfluss-Beziehungen mit verschiedenen definierten Grundgesamtheiten durchführen (z. B. Schmelze bei kleinem und hohem Basisabfluss; Regenereignis nach langer Trockenperiode bei kleinem und hohem Basisabfluss; Regenereignis nach kurzer Trockenperiode bei kleinem und hohem Basisabfluss usw.). Dafür ist die Datenlage jedoch nicht ausreichend. Auffallend ist die bei kleinem Abfluss grosse Streuung der Trübungswerte, eine Folge des starken Einflusses der Schnee- und Gletscherschmelze insbesondere bei kleinem Abfluss.

## Trübung-Schwebstoff-Korrelation

Für die SSC-Tr-Korrelation wurden jeweils diejenigen Trübungswerte verwendet, welche zum Zeitpunkt der Stichprobe (09:00 Uhr) gemessen wurden. Die Trübungswerte vom 27./28.5.; 30.6.; 19.–21.9. und 27.9.1998 wurden als Ausreisser angenommen und deshalb nicht in die Korrelationen miteinbezogen.

Die Trübungswerte und Schwebstoffkonzentrationen wurden einerseits über den Zeitraum der gesamten Probenahme (März–September) (Fig. 57) und andererseits auf Monatsbasis (Fig. 58) korreliert. Die Korrelation zwischen den Trübungswerten und den Schwebstoffkonzentrationen ist über den Zeitraum der



Figur 57: Korrelation zwischen Schwebstoffkonzentration (SSC) und Trübung in der Lüttschine bei Gsteig von März bis September 1998.

gesamten Probenahmeperiode statistisch signifikant (F-Test) und weist einen Korrelationskoeffizienten ( $r^2$ ) von 0,71 auf (Fig. 57). Einige hohe Trübungswerte wurden bei geringen Schwebstoffkonzentrationen gemessen. Diese Werte fallen hauptsächlich in den Zeitraum der ersten und zweiten Schneeschmelze im März bzw. Mai, weil die während der Schmelzwasserereignisse kleineren und feineren Partikel eine hohe Trübung bei gleichzeitig geringen Schwebstoffkonzentrationen bewirken.

Auf Monatsbasis gerechnet sind die Korrelationen zwischen Trübung und Schwebstoffkonzentration ebenfalls statistisch signifikant (F-Test). Die Korrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,39 und 0,98 (Fig. 58). Zu beachten ist dabei, dass die tiefen  $r^2$  von 0,39 und 0,53 in den Monaten März und Mai auftreten, in welchen die Daten aufgrund der Schmelzereignisse stark streuen. In den Monaten April und Juni bis September liegen die Werte der Bestimmtheitsmasse mit 0,87 und 0,98 deutlich höher. Der aus der Korrelation bestimmte Regressionsparameter  $b$  ist – als Folge der unterschiedlichen Partikelzusammensetzung – in den Monaten März und Mai ebenfalls viel geringer als von April bis August. Der Parameter  $b$  nimmt von April bis August (ohne Mai) zu und ab September wieder ab, was die Abhängigkeit der SSC-Tr-Beziehung vom Abfluss bzw. vom hydrologischen Ereignis zeigt. Mit der Korrelation der Daten über kürzere Zeiträume können offenbar diese unterschiedlichen Abhängigkeiten gut berücksichtigt werden.

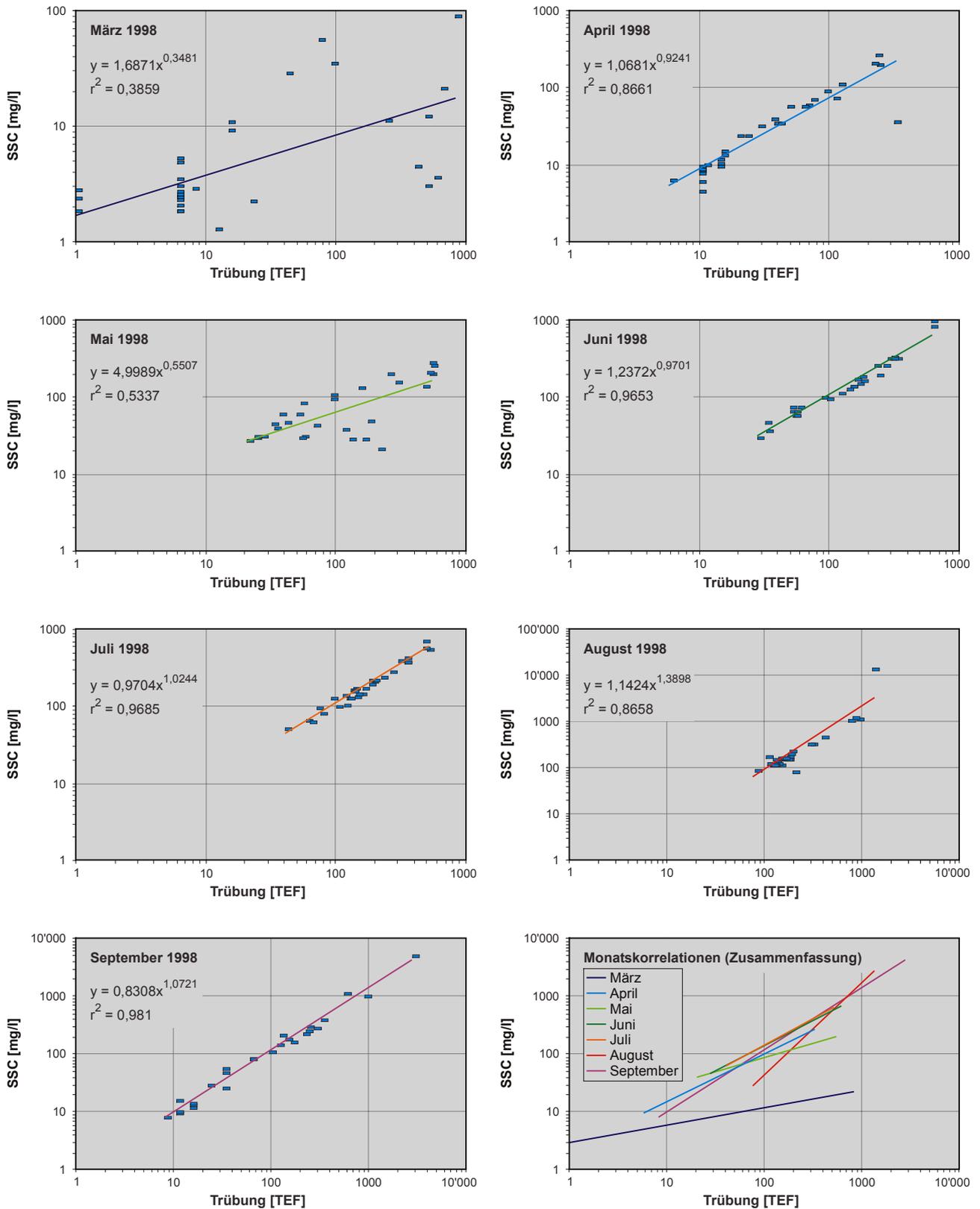
Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es mit kontinuierlichen Trübungsmessungen möglich ist, die Trübungsdynamik und damit auch die Dynamik der Schwebstoffführung mit einer hohen zeitlichen Auflösung semiquantitativ zu erfassen. Dies erlaubt einerseits die als Stichproben gemessenen Schwebstoffkonzentrationen auf ihre Plausibilität hin zu prüfen, weil die Trübung und damit auch die Schwebstoffe in einem zusammenhängenden Verlauf erfasst werden. Andererseits können die aus den gemessenen Schwebstoffkonzentrationen berechneten Schwebstofffrachten besser interpretiert und beurteilt werden, weil der Einfluss der Tageszeit auf die Schwebstoffführung aufgrund der Trübungsmessungen qualitativ abschätzbar ist.

Die Trübungsganglinie weist teilweise Unregelmässigkeiten auf, welche aufgrund unserer Erfahrungen nicht eindeutig erklärt werden können. Es ist deshalb empfehlenswert, vorübergehend eine zweite Sonde im Feld einzusetzen, um eine bessere Grundlage für die Beur-

teilung von Sondenfehlfunktionen als mögliche Ursache für diese Unregelmässigkeiten in der Ganglinie zu schaffen.

Die Rohdaten der Trübungsmessungen bestehen aus 10-Minuten-Werten, welche aufgrund der grossen Datenmenge im Hinblick auf Zeitreihendarstellungen sehr aufwendig zu bearbeiten sind. Bei der Darstellung von Trübungsverläufen stellt sich deshalb die Frage nach dem optimalen Mittelungsintervall, mit welchem bei einem minimalen Datensatz die maximale für die jeweilige Fragestellung interessante Information ersichtlich ist. Für die Rohdatenbearbeitung der Trübungsmessungen hat sich folgendes gezeigt:

- Niederschlags-, Abfluss- und Lufttemperaturdaten sind für die Interpretation der Trübungswerte in Fließgewässern beizuziehen. Insbesondere für Rückschlüsse auf Schneeschmelzereignisse, welche die Trübung wesentlich beeinflussen können, sind die Lufttemperaturen wichtig und können nicht durch Wassertemperaturdaten ersetzt werden, da Schneeschmelze auslösende Temperaturunterschiede im Wasser – wegen der grossen Wärmekapazität – mit den benutzten Sonden nicht messbar sind.
- 10-Minuten-Trübungswerte eignen sich für die Betrachtung von Tagesgängen.
- Für die Darstellung und Interpretation der Trübungsverläufe über längere Zeiträume (Wochen bis Monate) und im Zusammenhang mit der Plausibilitätsprüfung von Schwebstoffkonzentrationsmessungen reichen 6-Stunden-Mittelwerte aus, wobei die Tagesgänge innerhalb der saisonalen Schwankungen deutlich ersichtlich bleiben. Grundsätzlich gilt dabei, dass Werte, die weder mit dem Abfluss noch mit anderen Klimadaten korreliert werden können, als Ausreisser zu betrachten sind und nicht in weitere Auswertungen einbezogen werden sollten, es sei denn, sie können eindeutig auf Uferrutschungen oder ähnliches zurückgeführt werden.
- Die Monatsmittelwerte weisen eine grosse Streuung von bis zu 200 % auf, weshalb sie lediglich zum Aufzeigen eines Trends im Jahresverlauf verwendet werden können. Dieser Trend kann jedoch von Jahr zu Jahr sehr verschieden sein. Die Daten von knapp einem Jahr reichen jedoch nicht aus, um die Aussagekraft von Trübungsmonatsmittelwerten zum jetzigen Zeitpunkt beurteilen zu können.
- Bei der Beurteilung der Trübungsganglinien sollte für alle beigezogenen Parameter (Klimadaten) eine optimale Skalierung vorgenommen werden, weil schon die geringsten Schwankungen die Trübung wesentlich beeinflussen können.



Figur 58: Korrelationen zwischen Schwebstoffkonzentration und Trübung in der Lüttschine bei Gsteig über den Zeitraum von jeweils einem Monat.

### 4.1.3 Kornverteilung und mineralogische Zusammensetzung

#### Kornverteilung

Die Körnchen einer Schwebstoffprobe weisen nach ihrer Grösse ( $d$  = Korndurchmesser) in allen untersuchten Proben angenähert eine dreiparametrische, lognormale Verteilung auf. Als Parameter werden der Wert  $d_{50}$  (Median), die Streuung und eine Konstante  $B$  verwendet. Es ist nämlich nicht  $\log(d)$  sondern erst  $\log(d + B)$  normal verteilt.

Die Werte  $d_{50}$  von Proben mit integrierter Entnahme liegen im Mittel zwischen 43 und 66  $\mu\text{m}$  (1 Mikron [ $\mu\text{m}$ ] misst 0,001 mm). Der kleinste gemessene Wert beträgt 17  $\mu\text{m}$  (Rhein – Schmitter) und der grösste ca. 120  $\mu\text{m}$  (Arve – Genf, Hochwasser). Grössere Mittelwerte als 120  $\mu\text{m}$  sind bislang nur bei fehlerhaften Probenahmen (z. B. Aufschürfen von Bodenmaterial) vorgekommen. Grosse  $d_{50}$ -Werte sind im allgemeinen mit hohen Abflüssen verbunden. Die Abhängigkeit der beiden Grössen Abfluss und Mittelwert ist nicht zu übersehen (Fig. 59). Die integriert entnommenen Proben weisen durchschnittlich (1,5 bis 2,5 mal) grössere  $d_{50}$ -Werte auf, als die dazugehörigen, gleichzeitig entnommenen Oberflächenproben.

Die Streuung (d. h. die Variationsbreite der Körner um den Wert  $d_{50}$ ) scheint bei den Oberflächenproben mit der Grösse proportional zu sein; mit zunehmendem Wert  $d_{50}$  nimmt sie nämlich auch leicht zu. Diese Abhängigkeit ist aber beim untersuchten Probenmaterial so gering, dass man die Streuung praktisch als Konstante auffassen kann. Sie weist demnach bei Oberflächenproben einen Wert von 2,5 ( $\pm 0,8$ ) auf. Dies be-

deutet, dass 68 % der Körner zwischen den Grenzen von  $(d_{50} + B) \cdot 2,5$  und  $(d_{50} + B) / 2,5$  liegen dürften.

Beispiel:

$$\begin{aligned} d_{50} &= 50 \mu\text{m} \\ B &= 8,6 \mu\text{m} \\ d_{16} &= 58,6 / 2,5 = 23 \mu\text{m} \\ d_{84} &= 58,6 \cdot 2,5 = 146 \mu\text{m} \end{aligned}$$

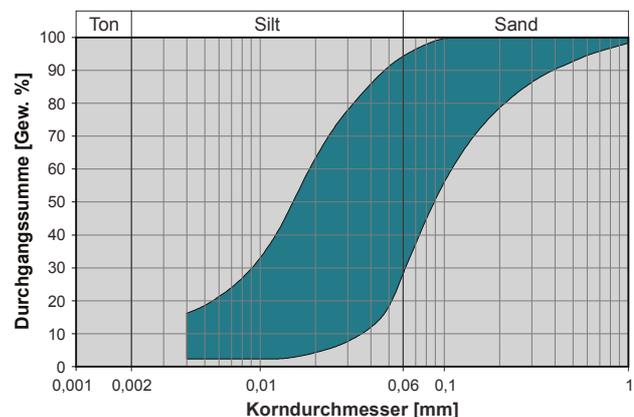
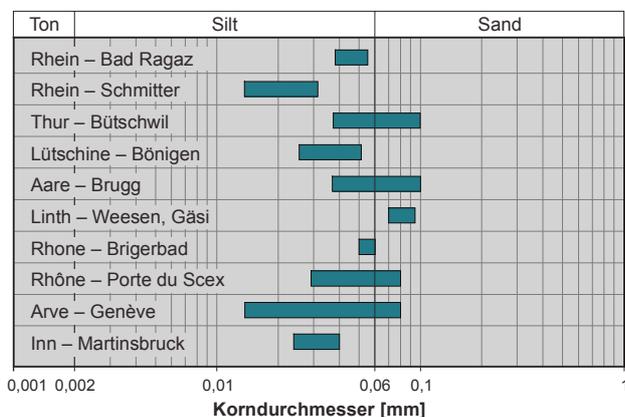
Die Streuung für integriert entnommene Proben scheint etwas grösser zu sein; für die Konstante erhält man Werte zwischen 3,3 und 4,0.

Die Grösse des  $B$ -Wertes variiert bei den untersuchten Proben zwischen 0 und 30  $\mu\text{m}$ ; sie wird weitgehend durch die Grösse des  $d_{50}$ -Wertes der Kornverteilung bestimmt ( $B = 0,24 \cdot d_{50} - 3,4$ ; nach GHO 1987).

#### Mineralogische Zusammensetzung der Schwebstoffe

Wie Röntgenanalysen zeigen, bestehen die Schwebstoffe meistens aus fünf Mineralgruppen:

- Quarz (20–30 %) überall gleichmässig vertreten
- Feldspat (6–28 %) zwei bis dreimal häufiger in Flüssen mit kristallinem Einzugsgebiet
- Karbonat (0–45 %) überall vorhanden, etwas weniger in den Alpen, dafür häufiger im Mittelland
- Glimmer (30–50 %) überall vorhanden, etwas weniger in den Alpen, dafür häufiger im Mittelland
- Kaolinit und Mixed-layer (Montmorillonit etc.).



Figur 59: Variationsbreite der Mittelwerte ( $d_{50}$ ) (links) und Korngrössenverteilung (rechts) an verschiedenen Messstandorten (nach GHO 1987).

1993 wurden Korngrössenanalysen bei den Schwebstoffbeobachtungsstandorten durchgeführt und durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (D) analysiert. Bei den Stationen Reuss – Mühlau, Landquart – Felsenbach, Rhône – Porte du Scex, Simme – Oberwil und Lonza – Blatten, und besonders bei Lüttschne – Gsteig und Vispa – Visp, wurden überdurchschnittlich grobe Kornverteilungskurven für die Klassen Feinschluff bis Feinsand (< 2 bis 100 µm) festgestellt. Einige Beispiele sind im Anhang 4 dargestellt.

#### 4.1.4 Schwebstofffrachten

##### Vergleich mit früheren Untersuchungen bei der Aare Brienzwiler

Beim Messstandort Aare – Brienzwiler wurden seit längerer Zeit, allerdings mit Unterbrüchen, Schätzungen der Schwebstofffracht vorgenommen. Der Messstandort eignet sich deshalb gut für Vergleiche mit früheren Schätzungen und Schätzmethoden. Es wurden die in Tabelle 8 aufgeführten Schwebstoff-Jahresfrachten geschätzt.

Die etwas tieferen mittleren Schwebstofffrachten in jüngerer Zeit lassen sich teilweise durch den Ausbau der Grimsekraftwerke erklären. Allerdings dürften hier

Jahre	Schwebstofffracht [1000 t]	Quelle
1905–1928	257,3–306,8	
1929–1932	185,3–224,6	
1898–1932	248,8–297,1	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939a
1936	202,7	
1937	323,2	
1964	331	
1965	343	
1966	154	Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz (LH 1970)
1967	175	
1968	104	
1964–1968	221,4	
1979	64,3	
1980	65,6	
1981	119,9	
1982	121,6	
1983	88,3	
1984	45,2	
1985	56,8	
1986	126,7	
1987	271,1	
1988	84,4	
1989	125,7	JAKOB & SPREAFICO 1997,
1990	79,5	Hydrologische Jahrbücher der Schweiz (LH div.)
1991	181,5	
1992	75,4	
1993	87	
1994	140,1	
1995	52,2	
1996	37,6	
1997	82,4	
1998	116,7	
1999	146,3	
1979–1999	143*	

\*) berechnet nach alter Berechnungsmethode.

Tabelle 8: Schwebstofffrachten beim Messstandort Aare – Brienzwiler.

neben den natürlichen Schwankungen auch methodische Ursachen die teilweise grossen Unterschiede in der jährlichen Schwebstofffracht erklären. Immerhin scheint ein gewisser Trend hin zu kleineren Jahresfrachten zu bestehen, welcher aber an dieser Stelle weder bestätigt noch im Detail begründet werden kann.

### Jahresfrachten im Vergleich der beiden LH-Berechnungsmethoden zur Abschätzung der Schwebstofffracht

In den Figuren 60–62 sind sich die Schwebstofffrachten dreier Stationen, berechnet nach zwei verschiedenen Methoden, gegenübergestellt («Rating curve» alte Methode, «Flow duration» neue Methode). Die durchschnittlichen Jahresdifferenzen bei den Frachten belaufen sich für die Jahre 1979–1999 bei den einzelnen Messstandorten auf zwischen 0 % (Rhône – Porte du Scex, Fig. 61) und 88 % (Reuss – Seedorf, Fig. 62). Die 0 %-Abweichung bei Port du Scex ist ein Zufallsergebnis, da die Frachten für die einzelnen Jahre stark variieren (vgl. Fig. 61). In den einzelnen Jahren, variieren die Werte zwischen 0 % (Lütschine – Gsteig, 1990), und 450 % (Reuss – Mühlau, 1983). Aufgrund der vorliegenden Auswertungen ist es nicht möglich, zu bestimmen, welche der beiden Methoden generell höhere resp. tiefere Werte liefert.

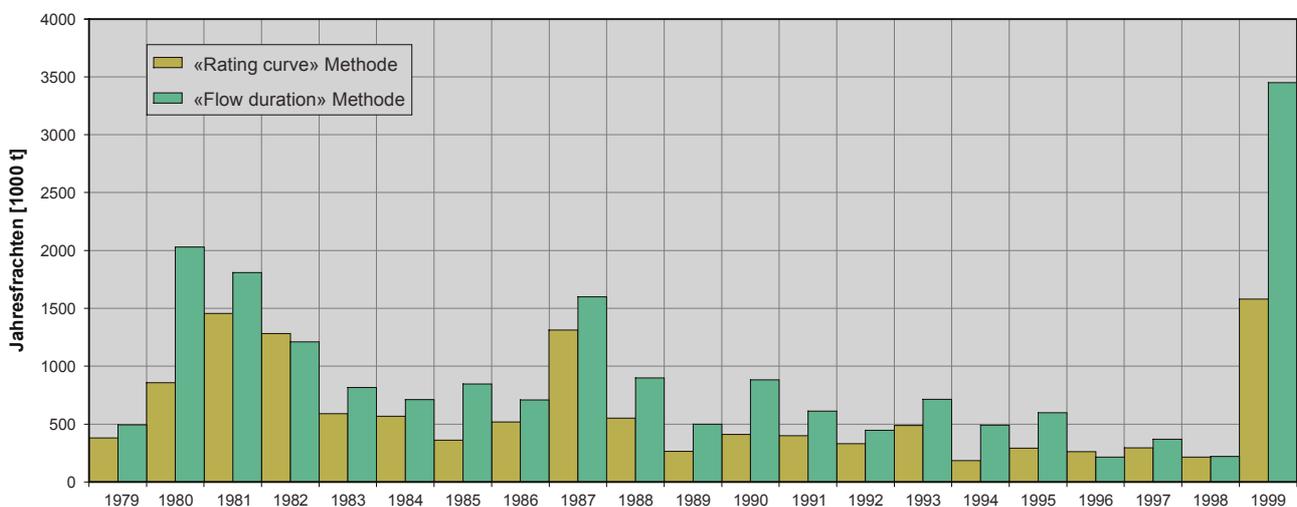
Die mit der «Flow duration» Methode berechneten Schwebstofffrachten einzelner Stationen sind in Anhang 5 dargestellt. Die durchschnittliche Schwebstoff-Jahresfracht der verschiedenen Messstandorte ist in

Tabelle 9 angegeben.

In Kenntnis der Schwankungen in der Schwebstoffführung erstaunen die grossen Unterschiede in den jährlichen Schwebstofffrachten mit Ausnahme vom Messstandort Ticino – Bellinzona (Faktor 165!) nicht. Selbst wenn man den hohen Wert bei aus dem Jahre 1987 (1'651'000 t) als Ausreisser behandelt, würde der Faktor mit dem zweithöchsten Wert von 597'000 t (1985) immerhin noch 60 betragen, was gegenüber den andern Stationen ein Rekordwert darstellt.

Demgegenüber können einzelne hohe Jahresfrachten mit besonderen Ereignissen im betreffenden Jahr teilweise erklärt werden. So beispielsweise die Jahresfrachten der Messstandorte Rhein – Diepoldsau von 1987, Ticino – Bellinzona desselben Jahres und Lütschine – Gsteig 1999:

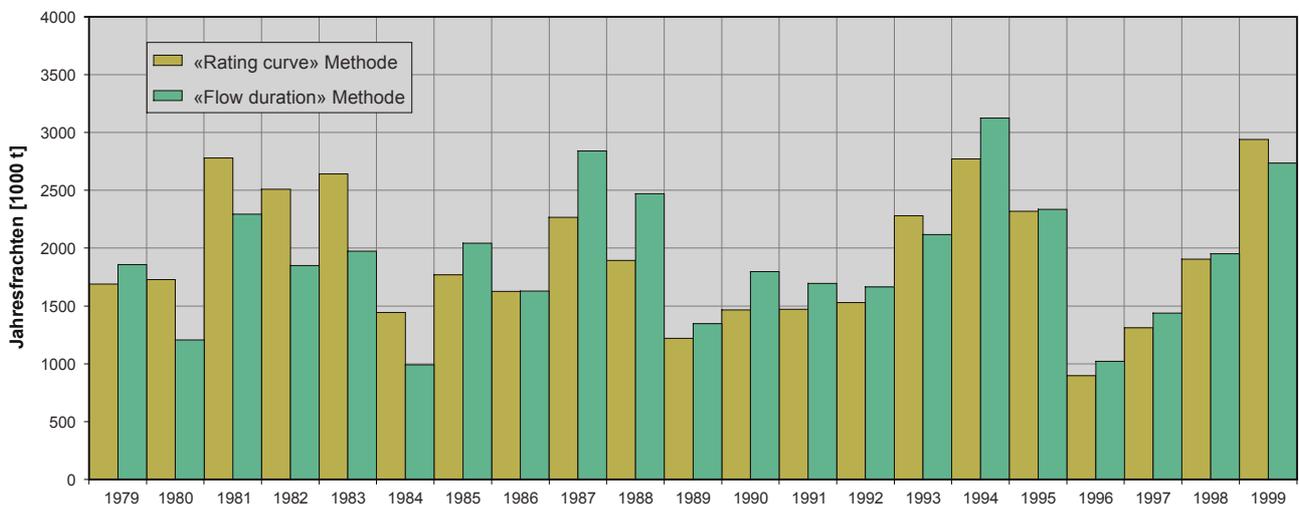
- Im Jahre 1987 haben in der Schweiz grosse Sommerhochwasser zu den grössten bis anhin bekannten Schadenfällen geführt. Hiervon waren vor allem die Kantone Tessin, Wallis, Graubünden und Uri betroffen. Die grössten Jahres-Schwebstofffrachten traten dort auf, wo die Ereignisse des betreffenden Jahres vermutlich eine determinante Rolle gespielt haben dürften. Im Graubünden (Station Rhein – Diepoldsau) waren vor allem die Ereignisse um Mitte Juli 1987 von Bedeutung. Hohe Schwebstofffrachten ergaben sich primär dort, wo keine grösseren Ausuferungen stattgefunden haben, wie dies auch am Beispiel Ticino – Bellinzona (Ereignisse vom August 1987) gezeigt werden kann. Wo grössere Aus-



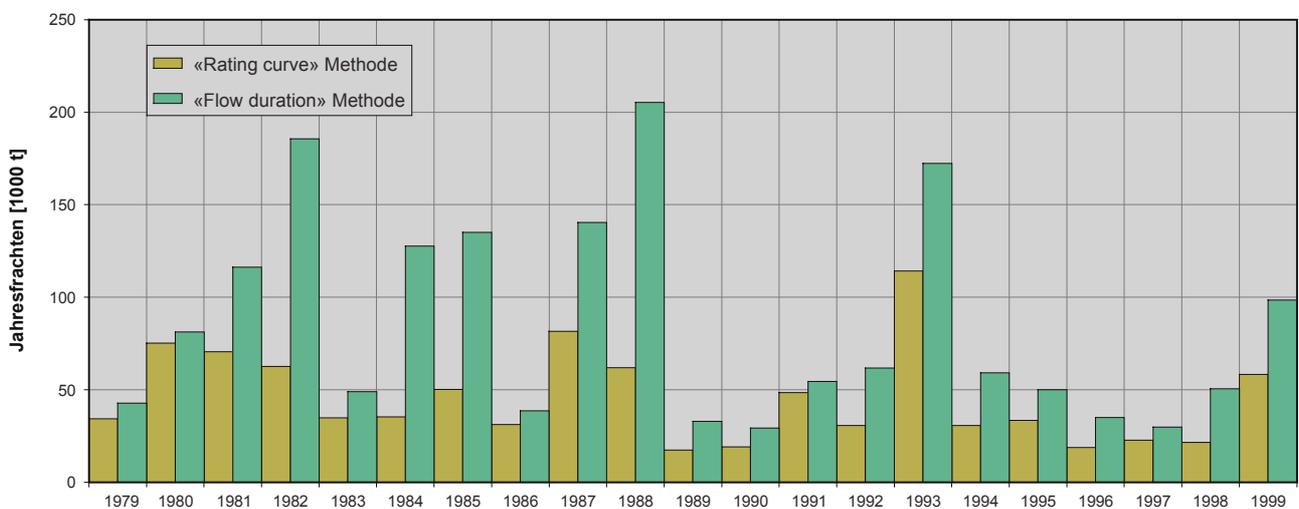
Figur 60: Ergebnisse aus alter (Rating curve) und neuer (Flow duration) Berechnungsmethode anhand der Station Landquart – Felsenbach.

uferungen stattgefunden haben, wie bei der Reuss (Standort Reuss – Seedorf), und der Rhône, sind keine extremen Jahresfrachten aufgetreten.

- Grössere isolierte Ereignisse, wie beispielsweise dasjenige von Brig 1993, schlagen sich nicht wesentlich bis zum Messstandort Porte du Scex durch.
- Die Frühlingshochwasser von 1999 bewirken die höchsten Jahresfrachten bei den Stationen Lütchine – Gsteig, Rhein – Diepoldsau, Thur – Halden und Landquart – Felsenbach.



Figur 61: Ergebnisse aus alter (Rating curve) und neuer (Flow duration) Berechnungsmethode anhand der Station Rhône – Porte du Scex.



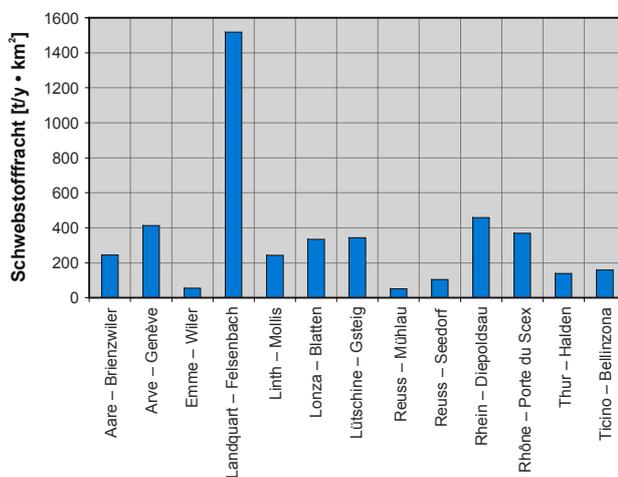
Figur 62: Ergebnisse aus alter (Rating curve) und neuer (Flow duration) Berechnungsmethode anhand der Station Reuss – Seedorf.

Bei Betrachtung der mittleren jährlichen spezifischen Jahresfrachten (vgl. Fig. 63) fällt der hohe Wert für den Messstandort Landquart – Felsenbach auf. Oberhalb des Messstandortes befindet sich ein Kieswerk direkt an der Landquart, welches vermutlich für einen Grossteil der anfallenden Schwebstofffracht verantwortlich ist.

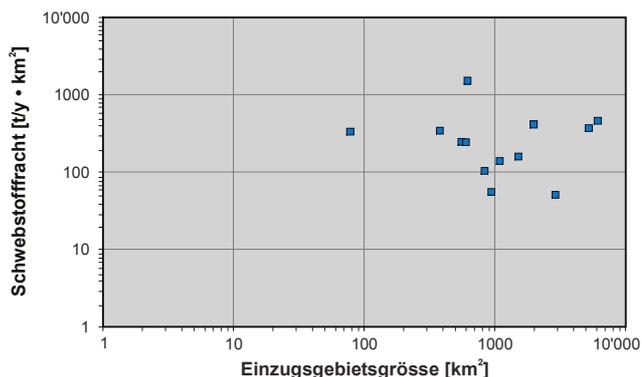
Relativ niedrige spezifische Schwebstofffrachten treten an Standorten des Mittellandes auf (Emme – Wiler, Thur – Halden) oder dort, wo vor dem Messstandort bereits ein See einen Grossteil des Materials aufgenommen hat (Reuss – Mühlau). Standorte in den Alpen oder am Alpenrand weisen mit Ausnahme der Station Reuss – Seedorf eher hohe spezifische Frachten auf.

Während bei den Abflüssen und bei den Geschiebefrachten die spezifischen Werte mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse abnehmen, kann dies anhand der verfügbaren Daten für die spezifischen Schwebstofffrachten nicht nachgewiesen werden (vgl. Fig. 64). Inwiefern diese Aussage mit der beschränkten Anzahl Daten zusammenhängt oder ob hier auch andere Faktoren hinein spielen, kann im Rahmen der vorliegenden Publikation nicht eruiert werden.

Die hohen Schwankungen der Schwebstoffführung und die entsprechenden Unsicherheiten bei Messmethodik und Interpretation deuten aber darauf hin, dass in Zukunft bei der Erfassung von Schwebstoffen erhöhter Nachholbedarf besteht.



Figur 63: Spezifische mittlere Schwebstoff-Jahresfrachten.



Figur 64: Spezifische mittlere jährliche Schwebstofffrachten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse.

Messstandort	Durchschnittliche Jahresfracht [1000 t]	Schwankungen von... bis... [1000 t]	Maximum Jahr	Faktor max/min	Beobachtungsperiode
Aare – Brienzwiler	136	46–574	1991	12	1979–1999
Arve – Genève	816	292–3056	1992	10	1979–1999
Emme – Wiler	52	8–122	1988	15	1985–1999
Landquart – Felsenbach	935	215–3450	1999	16	1979–1999
Linth – Mollis	146	55–304	1993	6	1979–1999
Lonza – Blatten	26	5–74	1979	15	1979–1999
Lütschine – Gsteig	130	56–204	1999	4	1979–1999
Reuss – Mühlau	148	50–385	1980	8	1979–1999
Reuss – Seedorf	86	29–205	1988	7	1979–1999
Rhein – Diepoldsau	2809	798–8691	1999	11	1979–1999
Rhône – Porte du Scex	1923	992–3125	1994	3	1979–1999
Thur – Halden	151	19–316	1999	17	1979–1999
Ticino – Bellinzona	241	10–1651	1987	165	1983–1999

Tabelle 9: Durchschnittliche Schwebstoff-Jahresfrachten sowie Minimal -und Maximalwerte während der Messperiode, nach neuer Methode berechnet.

## 4.2 Ausgesuchte Messergebnisse bezüglich Geschiebe

Da das Geschiebemessnetz in der Schweiz das mit Abstand jüngste Messnetz ist, fehlt es naturgemäss noch am Datenumfang. Einige Ergebnisse werden im Sinne einer ersten Standortbestimmung im folgenden Kapitel dargestellt. Die daraus abgeleiteten Aussagen und Folgerungen dürften im Moment eher provisorischen Charakter haben.

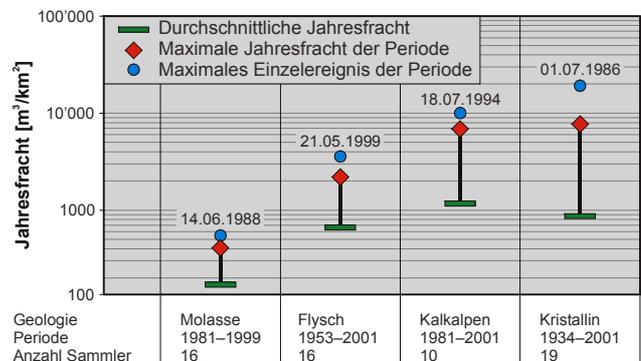
Aus Figur 65 kann ersehen werden, dass im Mittelland (Geologie Molasse) generell die kleinsten Feststofffrachten (Geschiebe und Schwebstoff) anfallen. Dies hängt neben den geologischen Faktoren natürlich auch mit der Topographie zusammen. Die geringeren Frachten aus Flyschgebieten gegenüber denjenigen aus Kalk- und Kristallingebieten sind möglicherweise eine Folge der noch etwas unsicheren Datenlage; LEHMANN 1993 und GHO 1996 konnten diese Beobachtung jedenfalls nicht bestätigen. Weiter zeigt Figur 65 auch, dass einzelne grössere Ereignisse teilweise ein Mehrfaches einer durchschnittlichen Jahresfracht an Material verlagern können.

Die Jahresfrachten sind in den einzelnen Gebieten im Beobachtungszeitraum (in der Regel die letzten 10 Jahre) sehr unterschiedlich (vgl. Fig. 66). Ein Trend zu grösseren Kubaturen bei grösserer Einzugsgebietsfläche lässt sich nicht erkennen, auch ist die Streuung sehr gross. Dies hängt vermutlich u. a. damit zusammen, dass:

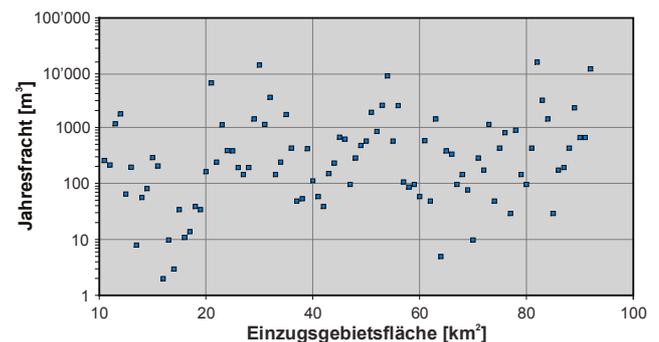
- der Beobachtungszeitraum noch zu kurz ist um zuverlässige Aussagen machen zu können,
- die Jahresfrachten in den einzelnen Gebieten sehr unterschiedlich ausfallen, was mit geologischen, meteorologischen, hydrologischen, geomorphologischen und auch anthropogenen Einflüssen teilweise erklärt werden kann. Zudem spielen auch gewisse stochastische Elemente eine Rolle,
- die langjährige Feststofflieferung aus kleinen Einzugsgebieten nicht zwingend kleiner als in den Untersuchungsgebieten mit grösserer Fläche ist.

Die spezifische Jahresfracht nimmt mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse ab (vgl. Fig. 67). Diese Beobachtung ist nicht neu und bestätigt sich auch anhand anderer Untersuchungen. Die Einteilung in die vier geologischen Kategorien zeigt etwa folgendes Bild:

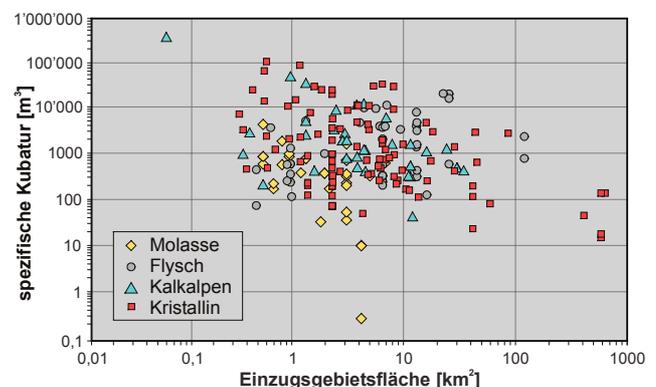
- Eher hohe Jahresfrachten in kristallinen Gebieten
- Molassegebiete: kleine Jahresfrachten



Figur 65: Feststofffrachten ausgewählter Geschiebesammler nach Geologie unterteilt.



Figur 66: Jahresfrachten in den Untersuchungsgebieten (nach LEHMANN 1993 und GHO 1996).

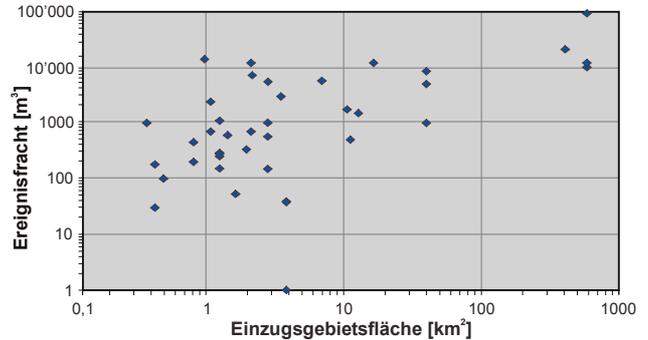


Figur 67: Spezifische Jahresfrachten in den Untersuchungsgebieten (nach LEHMANN 1993 und GHO 1996).

- Einzugsgebiete im Flysch sind in der Praxis allgemein als eher stark erosionsanfällig bekannt, was in dieser Zusammenstellung allerdings nicht zum Ausdruck kommt (vgl. auch Fig. 65). Eine mögliche Ursache dafür kann in der geringen Anzahl ausgewerteter Untersuchungsgebiete liegen.

Eine Zunahme der Ereigniskubatur bei grösserer Einzugsgebietsfläche ist in Figur 68 schwach erkennbar, obschon hier Ereignisse verschiedener Wiederkehrperioden verglichen werden. Die einzelnen Volumina sind jedoch sehr unterschiedlich, was aufgrund der log-log-Aufzeichnung etwas verwischt wird. Die grösste Ereignisfracht wird für die Maggia mit 93'000 m<sup>3</sup> angegeben (Ereignis vom 18.7.1987). Im Rietholzbach wurde am unteren Ende der Skala ein Ereignis von 1 m<sup>3</sup> registriert.

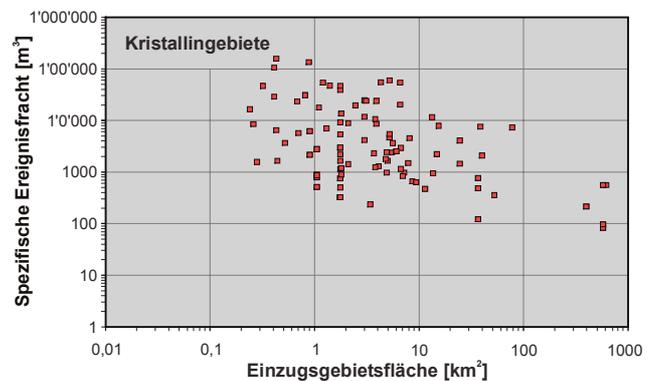
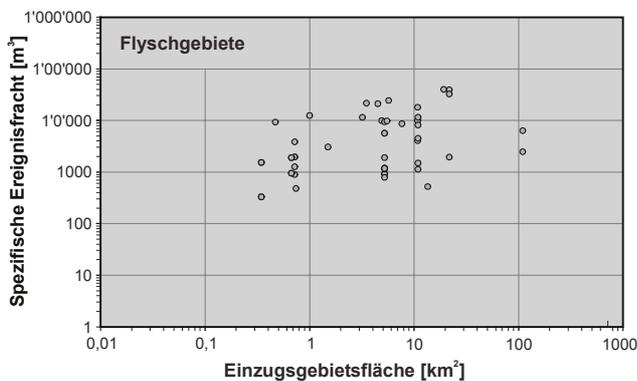
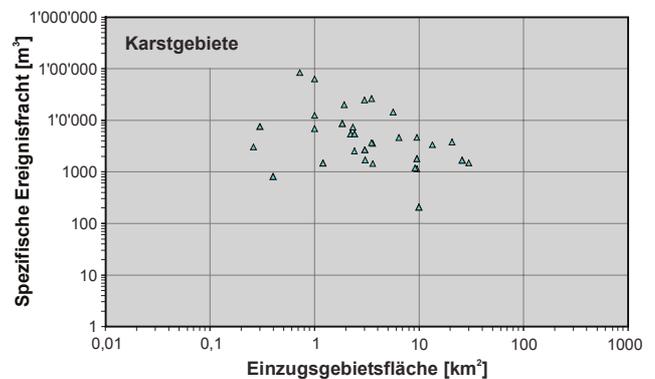
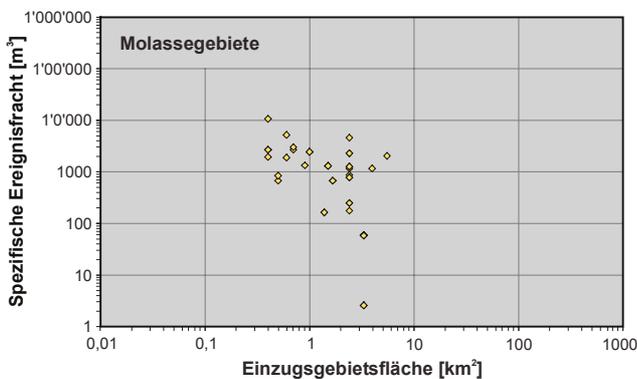
Bei den spezifischen Ereignisfrachten ist eine Abnahme mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse ersichtlich. Diese Abnahme ist aber etwas weniger ausgeprägt bei andern Untersuchungen in der Schweiz (z. B. LEHMANN 1993, SPREAFICO & LEHMANN 1994, GHO 1996). Dies hat



Figur 68: Ereignisfrachten (Murgänge und Geschiebetransport) in den Untersuchungsgebieten (nach LEHMANN 1993 und GHO 1996).

aber auch damit zu tun, dass hier vermehrt Daten in grossen Einzugsgebieten zur Verfügung stehen (vgl. Fig. 69).

Hohe spezifische Ereignisfrachten werden in kristallinen Gebieten beobachtet. Dies steht im Einklang mit den oben erwähnten Untersuchungen. Ein Unterschied



Figur 69: Spezifische Ereignis-Feststofffrachten aus schweizerischen Einzugsgebieten nach Geologie unterteilt.

zeigt sich allerdings bei Einzugsgebieten im Flysch, wo aufgrund der vorliegenden Daten keine speziell hohen Kubaturen registriert wurden. Einzugsgebiete im Molassebecken weisen tendenziell niedrige Werte auf.

## 4.3 Delta- und Seegrundaufnahmen

### 4.3.1 Ausgesuchte Messergebnisse

Einige Ergebnisse aus ausgewählten Delta- und Seegrundaufnahmen sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Im Folgenden werden einige Fallbeispiele von Deltavermessungen dargestellt.

### Rhein-Delta im Bodensee 1900–1979

Die Korrektur des Rheins oberhalb des Bodensees wurde 1900 abgeschlossen. Durch die Begradigung des Flusses wurde die Fließstrecke um ca. 7,5 km verkürzt. Eine bathymetrische Aufnahme des neuen Deltas 1911 ermöglichte die Bestimmung des durch den Rhein von 1900–1911 in den Bodensee transportierten Feststoffvolumens. Während dieser 12 Jahre transportierte der Rhein 7'000'000 m<sup>3</sup> Feststoffe in den Bodensee, rund 580'000 m<sup>3</sup> pro Jahr. Der spezifische jährliche Eintrag von Feststoffen in den Bodensee betrug rund 95 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Die Vermessung des Deltas erfolgte durch 6230 Einzelmessungen in 63 Profilen über eine Fläche von rund 7 km<sup>2</sup>.

Delta/See	Einzugsgebiet	Einzugsgebietsgrösse [km <sup>2</sup> ]	Vergleichsbasis (Periode)	Abgelagerte Kubatur [m <sup>3</sup> ]	Jährliche Ablagerung [m <sup>3</sup> ]	Spezifische jährliche Ablagerung [m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> · y]	Referenz
Bodensee (Hard-Fussacher Bucht)	Rhein	6105	1900–1911	7'000'000	580'000	95	COLLET et al. 1916
			1911–1921	23'148'000	2'572'000	421	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1923
			1921–1931	21'723'000	2'172'300	355	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b
Brienzer See	Aare	566 <sup>1)</sup>	1898–1932	4'080'000	120'000	212	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b
Bieler See	Aare	1392 <sup>2)</sup> 2714 <sup>3)</sup>	1878–1897	6'708'000	335'400	241	COLLET et al. 1916
			1897–1913	2'496'000	156'000	112	COLLET et al. 1916
			1913–1933	7'200'000	380'000	140	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b
Walensee	Linth	622	1860–1911	3'738'000	74'000	119	COLLET et al. 1916
			1911–1931	2'400'000	114'300	184	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b
			1931–1979	6'500'000	135'400	217	LAMBERT 1980a und b
Lago Maggiore	Maggia	926	1890–1926	19'840'000	567'000	612	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b
			1926–1932	1'002'000	167'000	180 <sup>4)</sup>	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b
			1932–1952	4'900'000	243'000	262	LAMBERT 1988
Lago Maggiore	Ticino, Verzasca, Maggia	2897	1952–1984	10'400'000	325'000	351	LAMBERT 1988
			1890–1932	45'777'000	1'116'500	388	EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b
Thuner See	Kander	1126	1866–1946	24'000'000	300'000	266	BWW 1988
			1946–1987	5'654'500	137'900	121	BWW 1988
Lauerzer See	Steineraa	28,5	1982–1989	1'850'000	19'000	297	LAMBERT & PFEIFFER 1990

<sup>1)</sup> Einzugsgebiet der Aare alleine: 553,8 km<sup>2</sup>

<sup>2)</sup> unterhalb Thuner See und Lac de Pérolles bei Freiburg

<sup>3)</sup> gesamtes Einzugsgebiet zwischen Thuner- und Bieler See

<sup>4)</sup> Periode zu kurz für eine zuverlässige Messung

Tabelle 10: Feststofffrachten aus Delta- und Seegrundaufnahmen.

Interessant ist der Vergleich mit dem Zustand vor der Rheinkorrektion. Zwischen 1863 und 1883 wurden pro Jahr nur ca. 47'100 m<sup>3</sup> Feststoffe eingetragen (rund 7 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> · y). Dieser Wert zeigt, dass die Transportkapazität des Rheins vor der Mündung zu klein geworden war (nach der Rheinkorrektion stieg der Feststoffeintrag auf 580'000 m<sup>3</sup>/y). Durch die Korrektion wurde das Gefälle auf den letzten 8 Kilometern von 0,40 bis 0,48 % auf 0,86 % angehoben (COLLET et al. 1916).

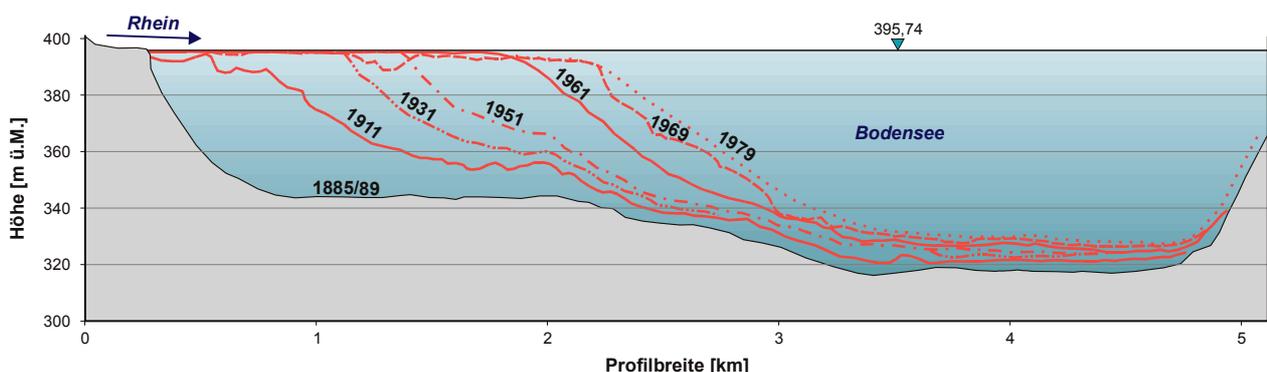
Die Vermessungen wurden 1921 und 1931 wiederholt (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1923, 1939b). Zwischen 1921 und 1931 wurden gesamthaft 21'723'000 m<sup>3</sup> Feststoffe in den Bodensee eingetragen, ebenfalls in dieser Zahl enthalten ist das ausgebagerte Material. Das entspricht einem jährlichen Vo-

lumen von ungefähr 2'172'300 m<sup>3</sup>, was ein spezifisches jährliches Volumen von 355 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> ergibt. Die Auflandung im Mündungsbereich in diesem Zeitraum betrug ca. 25'000 m<sup>2</sup> (von 6'772'000 m<sup>2</sup> im Jahr 1921 zu 6'747'000 m<sup>2</sup> im Jahr 1931). Die mittlere Tiefe im Mündungsgebiet nahm um rund 3,2 m, von 14,4 m (1921) auf 11,2 m (1931) ab. Dies entspricht einer Deltaerhöhung um ca. 0,32 m pro Jahr.

Nach 1931 wurde das Rheindelta periodisch alle 10 Jahre vermessen. Die Resultate sind in der Tabelle 11 zusammengefasst und in Figur 70 graphisch dargestellt. Von 1911 bis 1979 transportierte der Rhein im jährlichen Mittel 3 Mio m<sup>3</sup> Feststoffe in den Bodensee.

Beobachtungsperiode	Anzahl Jahre	Mittlerer jährlicher Feststoffeintrag [m <sup>3</sup> ]	Hard-Fussacher Bucht [m <sup>3</sup> ]	Erweitertes Gebiet 1921 [m <sup>3</sup> ]	Erweitertes Gebiet 1931 [m <sup>3</sup> ]	Erweitertes Gebiet 1941 [m <sup>3</sup> ]	Erweitertes Gebiet 1963 [m <sup>3</sup> ]	Erweitertes Gebiet 1969 [m <sup>3</sup> ]
Herbst 1911–Frühjahr 1921	9	2,6 · 10 <sup>6</sup>	2,6 · 10 <sup>6</sup>					
Frühjahr 1921–Frühjahr 1931	10	3,6 · 10 <sup>6</sup>	2,2 · 10 <sup>6</sup>	0,8 · 10 <sup>6</sup>	0,6 · 10 <sup>6</sup>			
Frühjahr 1931–Herbst 1941	11	3,4 · 10 <sup>6</sup>	2,5 · 10 <sup>6</sup>	0,7 · 10 <sup>6</sup>	0,2 · 10 <sup>6</sup>	0,05 · 10 <sup>6</sup>		
Herbst 1941–Frühjahr 1951	9	1,9 · 10 <sup>6</sup>	1,3 · 10 <sup>6</sup>	0,4 · 10 <sup>6</sup>	0,2 · 10 <sup>6</sup>	0,03 · 10 <sup>6</sup>		
Frühjahr 1951–Frühjahr 1961	10	3,8 · 10 <sup>6</sup>	1,6 · 10 <sup>6</sup>	1,7 · 10 <sup>6</sup>	0,5 · 10 <sup>6</sup>			
Frühjahr 1961–Herbst 1969	9	3,1 · 10 <sup>6</sup>	0,4 · 10 <sup>6</sup>	1,6 · 10 <sup>6</sup>	0,9 · 10 <sup>6</sup>		0,2 · 10 <sup>6</sup>	
Herbst 1969–Herbst 1979	11	2,9 · 10 <sup>6</sup>	0,07 · 10 <sup>6</sup>	1,6 · 10 <sup>6</sup>	0,8 · 10 <sup>6</sup>			0,5 · 10 <sup>6</sup>
1911–1979	68	3,0 · 10 <sup>6</sup>						

Tabelle 11: Mittlerer jährlicher Feststoffeintrag im Bodensee (ÖSTERREICHISCHER RHEINBAULEITER 1951, 1961, 1969; INTERNATIONALE RHEINREGULIERUNG 1979; LAMBERT 1989).



Figur 70: Die Veränderung des Rheindeltas im Bodensee von 1885–1979 (nach LAMBERT 1989).

## Linth-Delta im Walensee

Die erste bathymetrische Aufnahme des Linth-Deltas im Walensee (Fig. 71) wurde im Jahre 1860 ausgeführt. Der jährliche Feststoffeintrag der Linth wurde zwischen 60'000 und 80'000 m<sup>3</sup> geschätzt, bei einer Einzugsgebietsfläche von 621,7 km<sup>2</sup>. Dies entspricht einem jährlichen Transportvolumen zwischen 96,5 und 128,5 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> (COLLET et al. 1916).

Eine neue Karte des Deltas wurde 1911 erstellt (COLLET et al. 1916). Auf einer Deltafläche von 2,83 km<sup>2</sup> wurden 9640 Messungen ausgeführt. Zwischen 1860 und 1911 lagerte die Linth 3'738'000 m<sup>3</sup> Feststoffe im Walensee ab, was einer jährlichen Rate von 74'000 m<sup>3</sup> entspricht. Das spezifische Volumen pro Jahr und km<sup>2</sup> betrug 119 m<sup>3</sup> (vgl. Tabelle 10).

Die Deltaaufnahme wurde 1931 wiederholt. Für die Periode 1911–1931 wurde ein Feststoffeintrag von 2'400'000 m<sup>3</sup> geschätzt, was einem jährlichen Eintrag



Figur 71: Linth-Delta im Walensee.

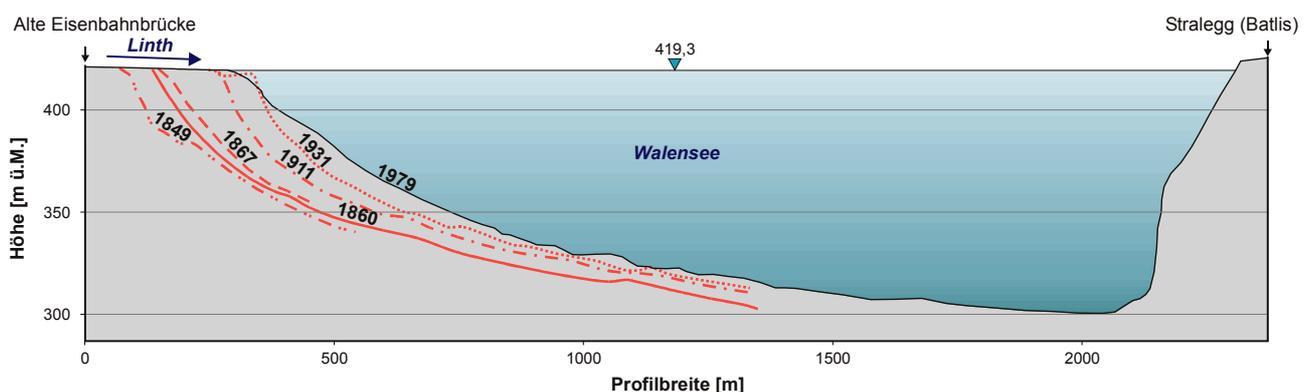
von 114'300 m<sup>3</sup> entspricht (ca. 184 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> pro Jahr). Zu diesem Volumen muss noch eine Entnahme von schätzungsweise 11'400 m<sup>3</sup> durch Baggerungen hinzugezählt werden um den gesamten Feststoffeintrag zu erhalten. Dies ergibt ca. 202 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> pro Jahr (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b).

Im Juni 1979 wurde das westliche Seebett wiederum vermessen. Das abgelagerte Feststoffvolumen von 1931–1979 wurde auf 6'500'000 m<sup>3</sup> geschätzt. Dies entspricht einem mittleren jährlichen Erosionsabtrag von 0,23 mm für das Einzugsgebiet (LAMBERT 1980a und b). Verglichen mit früheren Untersuchungen (0,17 mm/y für die Periode 1911–1931; JÄCKLI 1958) bedeutet dies eine Zunahme der Erosion (LAMBERT 1976, 1978, 1979, 1980a und b, 1984; LAMBERT & SCHLUND 1983).

## Aare-Delta im Bieler See

Das Delta der Aare im Bieler See wurde erstmals 1878, dann wieder 1897, vermessen. 1913 erfolgte wieder eine Untersuchung, da sich der Sedimenteintrag durch die Wasserkraftanlage Kallnach stark verändert hatte (COLLET et al. 1916).

Der totale Feststoffeintrag 1878–1897 betrug ca. 6'708'000 m<sup>3</sup>, was einer jährlichen Ablagerung von 335'400 m<sup>3</sup> und einem spezifischen Volumen von 241 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> · y entspricht. Zwischen 1897 und 1913 wurden rund 2'496'000 m<sup>3</sup> Feststoffe eingetragen (156'000 m<sup>3</sup>/y; 112m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> · y). D. h. in der zweiten Beobachtungsperiode reduzierte sich der Feststoffeintrag auf etwa die Hälfte. Nach der Umleitung der Aare durch den Hagneck-Kanal ab 1878 in den Bieler See wurden vorerst erheblich mehr Feststoffe transportiert. Nach Erreichung eines Gleichgewichtszustandes nach ca. 20 Jahren nahm der Feststofftransport wieder stark ab.



Figur 72: Entwicklung des Linth-Deltas im Walensee von 1849 bis 1979 (nach LAMBERT 1980).

Eine neue Vermessung erfolgte 1933 (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b). Von 1913–1933 betrug der Eintrag  $4'720'000 \text{ m}^3$ , was einen jährlichen Eintrag von  $236'000 \text{ m}^3$  ergibt.

Das Feststoffvolumen welches ausserhalb des Deltagebietes von 1913–1933 abgelagert worden ist, konnte auf etwa  $470'000 \text{ m}^3$  abgeschätzt werden, also rund  $23'500 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ . Damit kann der totale Feststoffeintrag (1913–1933 ca.  $5'190'000 \text{ m}^3$ ) in den Bieler See durch die Aare auf  $260'000 \text{ m}^3/\text{y}$  geschätzt werden. Dies ergibt für das Einzugsgebiet zwischen Thuner und Bieler See einen spezifischen Eintrag von  $100 \text{ m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{y}$ . In diesem Wert nicht enthalten ist aber das beträchtliche Feststoffvolumen, welches durch Baggerungen der Aare und der Saane entnommen oder von künstlichen Speichern zurückgehalten wurde. Allein das im Wohlensee zurückgehaltene Feststoffvolumen seit dem Bau der Wasserkraftanlage Mühleberg im August 1920 bis zum Herbst 1933 z. B. wurde auf  $2'000'000 \text{ m}^3$  geschätzt.

Unter Berücksichtigung dieser Werte ergibt sich für die Periode 1913–1933 ein totaler jährlicher Feststofftransport zwischen dem Thuner See und dem Bieler See von  $380'000 \text{ m}^3$  (totales Volumen ca.  $7'200'000 \text{ m}^3$ ), was ein spezifisches Transportvolumen von  $140 \text{ m}^3/\text{km}^2$  pro Jahr ergibt (vgl. Tab. 10).

#### Aare-Delta im Briener See

Das Aare-Delta im Briener See (Fig. 73) wurde zum ersten Mal 1898 und ein zweites Mal 1932 vermessen. Für die Periode 1898–1932 ergaben die Vermessungen



Figur 73: Aare-Delta im Briener See.

einen Feststoffeintrag von ca.  $120'000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$  (totales Volumen ca.  $4'080'000 \text{ m}^3$ ), was bei einer Einzugsgebietsfläche von  $566 \text{ km}^2$  einer spezifischen Ablagerung von ca.  $212 \text{ m}^3/\text{km}^2$  pro Jahr entspricht. Die Ablagerungshöhe für diese Periode betrug im Delta  $32 \text{ mm}$  pro Jahr (EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT 1939b).

Eine Neuaufnahme erfolgte 1957. Diese ergab eine Abnahme des Deltas um  $2 \text{ Mio m}^3$  in 24 Jahren. Man vermutet, dass diese Abnahme durch Dichteströmungen und Erosion erfolgt sein könnte (LISZKAY 1972).

#### Maggia-Delta im Lago Maggiore

1890 wurde eine erste Seegrundaufnahme durchgeführt (vgl. Tab. 12; Fig. 76). Doch erst die Aufnahme von 1926 wird als brauchbar für die Abschätzung des Feststoffeintrages angesehen. 1932 wurde der ganze westliche Seegrund aufgenommen mit einer Messdichte von 508 Messungen pro  $\text{km}^2$ .

Die nächste Messung erfolgte 1952. In diesen 20 Jahren wurden  $4,9 \text{ Mio m}^3$  oder  $243'000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$  abgelagert,  $45 \%$  mehr als in der Periode 1926 bis 1932 (WALSER 1952).

Eine neue Vermessung wurde im Winter 1984/85 durchgeführt. Das Maggia-Delta (Fig. 74) hat in der Periode 1952–1984 im Mittel um  $325'000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$  zugenommen, was einem spezifischen Feststoffeintrag von  $351 \text{ m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{y}$  entspricht (JÄCKLI 1958; LAMBERT 1980a und b, 1988). Damit kann eine Zunahme über die gesamte Beobachtungsperiode festgestellt werden.



Figur 74: Maggia-Delta im Lago Maggiore.

Neben den hydrologischen Faktoren sind anthropogene Faktoren (Baggerung, Flussbau, Wasserkraftnutzung) für diese Entwicklung verantwortlich (LAMBERT 1988).

### Kander-Delta im Thuner See

Die Kander wurde 1714 in den Thuner See umgeleitet (GROSJEAN 1962, NIKLAUS 1969). Das Delta wird nur



Figur 75: Kander-Delta im Thuner See.

gelegentlich vermessen, trotzdem ist eine überschlägige Abschätzung der Deltazunahme möglich. Der Vergleich der Aufnahmen von 1866 und 1946 zeigt eine Volumenzunahme von ca. 24 Mio m<sup>3</sup> (300'000 m<sup>3</sup>/y).

Eine neue Aufnahme wurde 1987 durchgeführt. Der Vergleich dieser Vermessung mit jener von 1946 ergibt eine Volumenzunahme von 5'654'500 m<sup>3</sup>, was pro Jahr 137'900 m<sup>3</sup> oder eine mittlere Ablagerungshöhe von 5 cm bedeutet (BWW 1988).

### 4.3.2 Spezielle Untersuchungen

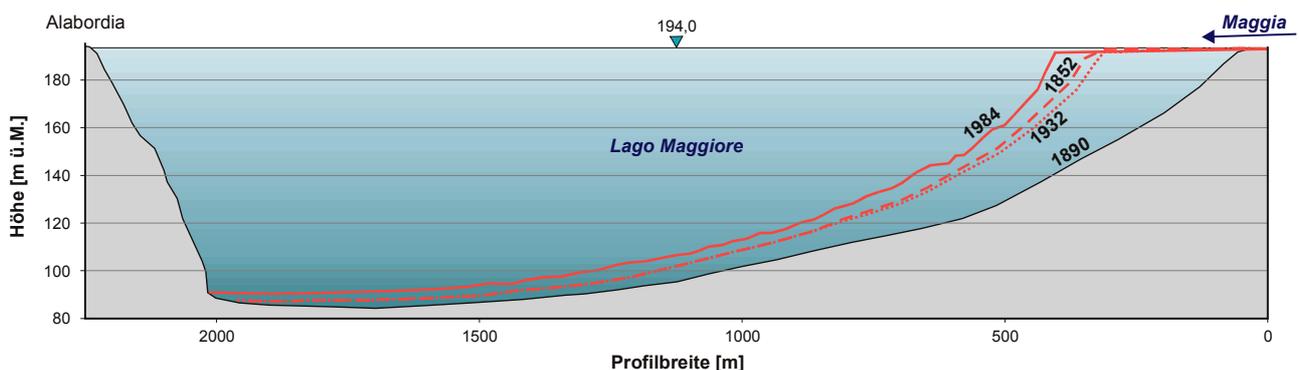
#### Beispiel: Projekt Prozessbeobachtung Stausee Luzzone

In den Jahren 1991–1995 wurde mit Unterstützung der Landeshydrologie durch die Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) ein Projekt zur Prozessbeobachtungen am Stausee Luzzone durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse daraus werden nachfolgend zusammengefasst.

Feststoffbefrachtete Zuflüsse in Stauseen können feinkörnige Materialien bis zu den im Sperrbereich angeordneten Auslassorganen wie Wasserfassung und Grundablass transportieren. Modellversuche im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass solche Fest-

Aufnahme	Abgelagerte Kubatur [m <sup>3</sup> ]	Jährliche Ablagerung [m <sup>3</sup> ]	Spezifische jährliche Ablagerung [m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> · y]
1880–1926	19'840'000	567'000	612
1926–1932	1'002'000	167'000	180
1932–1952	4'900'000	243'000	262
1952–1984	10'400'000	325'000	351

Tabelle 12: Feststoffablagerung im Maggia-Delta für verschiedene Zeitperioden (Einzugsfläche: 926 km<sup>2</sup>).



Figur 76: Veränderung des Maggia-Deltas im Lago Maggiore über die Periode 1890 bis 1984 (nach LAMBERT 1989).

stoffe in tief gelegene, nicht im Betrieb stehende Stollen eindringen und sich dort ablagern. So kann über die Jahre ein beträchtlicher Füllgrad des Stollens erreicht und im Extremfall seine Funktionstüchtigkeit beeinträchtigt werden. Die Modellversuche mit verschiedenen Korngrößen und Füllgraden des Stollens dienten der Überprüfung der bekannten Theorien. Aus den Erkenntnissen können Hinweise auf die minimal erforderliche Fließgeschwindigkeit zur Initiierung des Feststoffaustrags beim Spülvorgang abgeleitet werden.

Die Verlandung von Stauseen kann zur fortschreitenden Ablagerung von Feststoffen nicht nur im See selbst, sondern auch bei wichtigen Betriebsorganen wie Wasserfassung und Grundablass führen.

Anhand mehrjähriger Messungen konnte der Sedimenttransport im Luzzone-See bis zum Grundablass-einlauf beschrieben werden. Die Ablagerung im Grundablassstollen mit geschlossener Schütze wurden in einem ersten Modell beobachtet und die Spülwirkung bei eingestautem Einlauf untersucht. Daraus folgt, dass sich Stollen ohne regelmässige Spülung auf lange Strecken sukzessive mit Feststoffen füllen. Die Spülwirkung hängt von der im Stollen durch die Schützenöffnung erzeugten Fließgeschwindigkeit und der Korngrösse der Ablagerungen ab.

Um den Austrag dieser Ablagerungen im Detail zu untersuchen, wurde ein zweites, grösseres Modell gebaut; die erhaltenen Werte wurden mit den theoretischen Angaben verglichen. Die beiden folgenden, grundsätzlich verschiedenen Betrachtungen des Feststofftransportes wurden dabei herangezogen:

- teilweise mit Feststoffen gefüllter, unter Druck stehender Stollen, welchem klares Wasser zu Spülzwecken zufließt, wodurch die Ablagerungen abgetragen werden können. Hierbei erfolgt der Austrag der Ablagerungen durch kontinuierliches Abtragen der Sohle.
- unter Druck stehender Stollen, durch welchen ein Flüssigkeit-Feststoffgemisch fließt, wobei durch die Abflussverhältnisse Ablagerungen verhindert oder zumindest beschränkt werden sollen. Bei dieser Annahme erfolgt eine vollständige Bewegung der Sohle resp. der zu transportierenden Feststoffe.

Durch die Modellversuche und deren Ergebnisse kann die effektive Grenzgeschwindigkeit mit den theoretischen Werten verglichen werden. Es lassen sich folgende Aussagen machen:

- Es muss klar zwischen den untersuchten Materialien unterschieden werden, da sehr feine Ablagerungen wie der Opalinuston im Wasser kaum konsolidieren.
- Die kritischen Bedingungen gemäss HJULSTRÖM (1935) und SHIELDS (1936) führen zu zufriedenstellenden Ergebnissen, was den Bewegungsanfang der Ablagerungen an der Oberfläche betrifft. Dabei wird der Beziehung von Hjulström wegen der wesentlich einfacheren Anwendung den Vorzug gegeben.
- Die Grenzgeschwindigkeit kann für die untersuchten Füllgrade des Rohres als konstant angenommen werden.
- Die kritischen Bedingungen, welche eine vollständig bewegte Sohle gemäss der Theorie des industriellen Feststofftransportes ergeben, erreichen sehr hohe Werte (bis 12 m/s) und sind in der Praxis kaum erreichbar.

Es muss hinzugefügt werden, dass die Abflussmenge im teilweise gefüllten Stollen für Füllgrade bis etwa 50 % hauptsächlich von der Schützenöffnung abhängt. Erst bei grösseren Ablagerungsmengen im Stollen kommt die Verkleinerung des Abflussquerschnittes bestimmend hinzu. Es ist deshalb für den Betreiber einer Stauanlage kaum möglich, bei normal funktionierenden Spülungen, den Füllgrad anhand des Abflusses zu bestimmen. Somit kann auch das Energiegefälle im Stollen nur annähernd berechnet werden, was die korrekte Anwendung einer Theorie, welche diesen Parameter braucht (z. B. Shields), erschwert.

Die praktische Anwendung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung erlaubt es, für einen gegebenen Maximalabfluss eines Grundablasses und bei bekannten Korngrössendurchmessern der Ablagerungen im Stollen (oder im See beim Grundablass-einlauf), den Füllgrad bei Erreichen des Sohlengleichgewichtes zu bestimmen.

# 5 Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen

## 5.1 Ausgangslage

Geschiebeführende Hochwasser und Murgänge verursachen regelmässig grosse Schäden im dicht besiedelten Alpenraum. Der Planung und Realisierung von Schutzmassnahmen kommt daher hohe Priorität zu. Leider bestehen bei der Grundlagenbeschaffung trotz hohem Forschungsaufwand noch immer grosse Unsicherheiten und Kenntnislücken. Die nun vorliegende Empfehlung (GHO 1996) für die Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen versteht sich als Beitrag zum Verständnis von Wildbachprozessen und zeigt eine Methode zur Abschätzung eines zukünftigen Wildbacheignisses auf. Sie wurde von der Landeshydrologie und -geologie in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Wasserwirtschaft und dem Geographischen Institut der Universität Bern erstellt. Dabei wurde versucht, das heutige Wissen in eine praktische Anleitung für Fachleute einzubauen, welche mit hydrologischen, geologischen, geomorphologischen und wasserbaulichen Fragestellungen vertraut sind und Problemstellungen in Wildbachgebieten zu lösen haben.

Die Empfehlung besteht aus zwei Bänden. Band 1 umfasst die Methodenbeschreibung, im zweiten Band sind die fachlichen Grundlagen zusammengestellt. Die Berechnungen erfolgen mit Hilfe eines EDV-Programes.

## 5.2 Grundsätzliches

Die auf einem Bachkegel anfallende Feststofffracht wird einerseits durch das vorhandene Feststoffpotential, andererseits durch den Transportprozess sowie durch die Ablagerungen im Wildbach beeinflusst.

Als Feststoffpotential gilt diejenige Feststoffmenge, welche während eines zu definierenden Bezugseignisses mobilisiert werden kann. Unter diesem Begriff wird also nicht das gesamte vorhandene Lockermaterial im Einzugsgebiet verstanden. Die Abschätzung des Feststoffpotentials im Gelände wird anhand einer Klassifikation der relevanten Feststoffherde durchgeführt. Von entscheidender Bedeutung ist die Herkunft der mobilisierbaren Feststoffe: Die Feststoffe stammen zu einem grossen Teil aus dem Gerinne selbst sowie aus den angrenzenden Böschungen. Somit gibt nur ein kleiner Teil des gesamten Einzugsgebietes Feststoffe an das Gerinne ab.

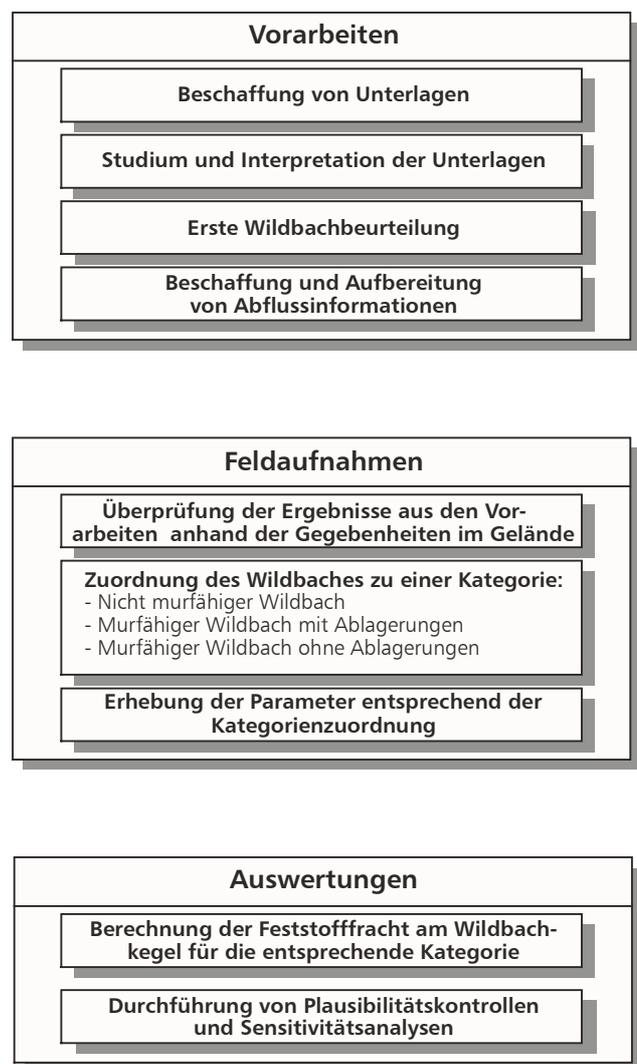
Beim Transportprozess wird unterschieden zwischen Geschiebetransport und Murgang. Murgänge verlagern vielfach höhere Feststoffmengen und richten im

gefährdeten Gebiet im allgemeinen auch grössere Zerstörungen an.

Wichtig sind ferner Ablagerungsstellen in und neben dem Gerinne. Das hier während des Ereignisses abgelagerte Material erreicht den Wildbachkegel nicht.

## 5.3 Vorgehensweise

Figur 77 beschreibt die Art und Weise, wie die Feststofffracht eines Ereignisses mit der vorgestellten Methode abgeschätzt werden kann.



Figur 77: Übersicht über die einzelnen Arbeitsschritte zur Abschätzung der Feststofffracht.

### 5.3.1 Vorarbeiten

Die Vorarbeiten werden weitgehend im Büro durchgeführt und umfassen:

- Eine erste Abklärung des Transportprozesses, d. h. Feststellung der Murfähigkeit des Wildbaches, soweit dies anhand von Dokumenten, aufgrund der Beschreibung abgelaufener Ereignisse sowie von Karten und Luftbildern möglich ist.
- Eine Vorselektion der wichtigen Geschiebeherde anhand von Karten- und Luftbildmaterial.
- Bei nicht murfähigen Wildbächen und falls keine Messungen vorhanden sind: Konstruktion einer vereinfachten Abflussganglinie im Hinblick auf die Berechnung der Feststoff-Transportkapazität im Gerinne.

### 5.3.2 Feldaufnahmen

Im Gelände ist folgendes auszuführen:

- Abschätzung der Murfähigkeit des Gerinnes, falls diesbezüglich noch keine Klarheit besteht.
- Einteilung des Wildbaches in Gerinneabschnitte. In jedem Gerinneabschnitt wird folgendes durchgeführt:
  - Schätzung des Feststoffpotentials der massgebenden Geschiebeherde.
  - Schätzung möglicher Ablagerungen.
  - Aufnahmen von «Querprofilen» mit Gefälle, Gerinnebreite und  $d_{90}$ ,  $d_{50}$  und  $d_{30}$  (charakteristische Korngrößen, bei welchen 90 %, 50 % resp. 30 % Gewichtsanteile des Sohlenmaterials kleiner sind) der Sohle für nicht murfähige Wildbäche. Diese Parameter werden bei der Berechnung der Transportkapazität verwendet.

Die Relevanz von Geschiebeherden ergibt sich aus zwei Kriterien:

- Materialzusammensetzung:

Geschiebeherde aus Lockermaterial sind wichtig. Solche aus anstehendem Fels, mit Ausnahme von leicht erodierbaren und schiefrigen Gesteinen, haben untergeordnete Bedeutung, da die Feststofflieferung in das Gerinne (z. B. durch Steinschlag) nicht direkt an ein Hochwasserereignis im Wildbach gebunden ist.

- Lage des Geschiebeherdes und Transportweg des Materials in das Gerinne:

Im Gerinnebereich liegende Geschiebeherde aus Lockermaterial werden während des Ereignisses erodiert und sind somit von vorrangiger Bedeutung. Wildbäche mit grossen Geschiebeherden im Gerinnebereich haben zudem die Tendenz, besonders aktiv zu sein. Hier sind in der Regel auch grosse Feststoffkubaturen zu erwarten.

Bei Geschiebeherden ausserhalb des Gerinnebereiches ist der Transportweg in das Gerinne von Bedeutung; grosse Geschiebeherde wie Schutthalde, offene Anbrüche usw. sind wichtig, wenn deren Material via Seitengerinne oder Runse auf direktem Weg in den Wildbach gelangen kann.

Bei Geschiebeherden, welche nicht über einen direkten Verbindungsweg zum Gerinne verfügen, ist die Hangneigung ein wichtiger Faktor. Ist die Hangneigung kleiner als  $30^\circ$ , bleibt das Material häufig irgendwo im Hang liegen und wird erst zu einem späteren Zeitpunkt wiederum erodiert.

### 5.3.3 Auswertungen

Die Auswertungen erfolgen im Büro und umfassen nebst der detaillierten Berechnung der Feststofffracht die Überprüfung der Felduntersuchungen (Plausibilitätskontrollen).

Für jeden Gerinneabschnitt wird berechnet:

- das Feststoffpotential
- die Feststoff-Transportkapazität unter Verwendung der Abflussganglinie (gilt für nicht murfähige Wildbäche)
- das Volumen möglicher Ablagerungen
- zusätzlich wird, für jedes Querprofil, fortlaufend bachabwärts die jeweilige Differenz von Feststoffpotential und Transportkapazität unter Berücksichtigung der Ablagerungen berechnet und aufsummiert, d. h. eine Feststoffbilanz erstellt (Fig. 78). Am untersten Querprofil erhält man die Kubatur der Feststofffracht am Kegelhal.

Bei murfähigen Wildbächen können diese Berechnungen nicht so detailliert durchgeführt werden, weil es keine Möglichkeit gibt, das Transportvermögen von Murgängen zu berechnen. Hier werden Feststoff- und Ablagerungspotential in jedem Gerinneabschnitt er-

fasst und so die Feststoffbilanz gerinneabschnittsweise erstellt.

Zum Schluss werden Plausibilitätskontrollen der berechneten Feststofffracht sowie Sensitivitätsanalysen durch Variation der verwendeten Parameter (Abflüsse, Feststoffpotential) vorgenommen.

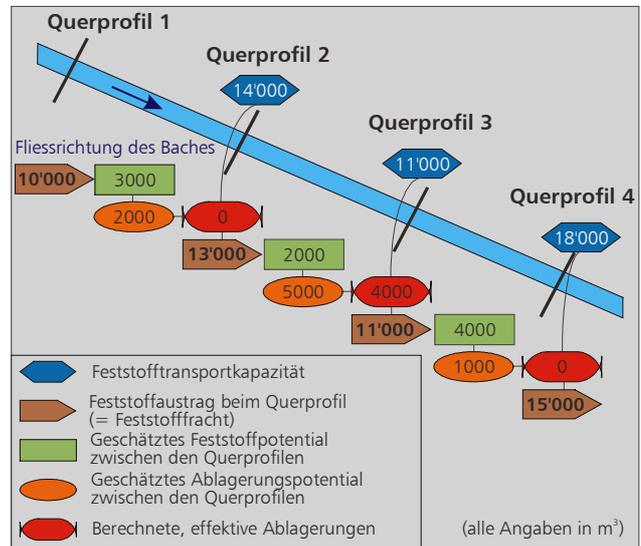
## 5.4 Ergebnisse aus den Berechnungen

Fig. 79 zeigt als Beispiel ein Ergebnis aus Berechnungen, welche für die Guppenruns im Kanton Glarus erstellt worden sind. Der Bachlauf ist durch die Querprofile Nr. 21 (Tobelbereich) bis hinunter zur Mündung in die Linth (Nr. 1) schematisch dargestellt. Die grösseren natürlichen Ablagerungsstellen (zu ersehen bei den Querprofilen 19, 18, 13, sowie 8 und 7) vermögen den Feststoffeintrag in die Linth nicht dermassen zu reduzieren, dass dort kein Rückstau zu befürchten wäre. Darüberhinaus würde das auf dem Kegel (Nr. 2 und 1) abgelagerte Material Schäden verursachen.

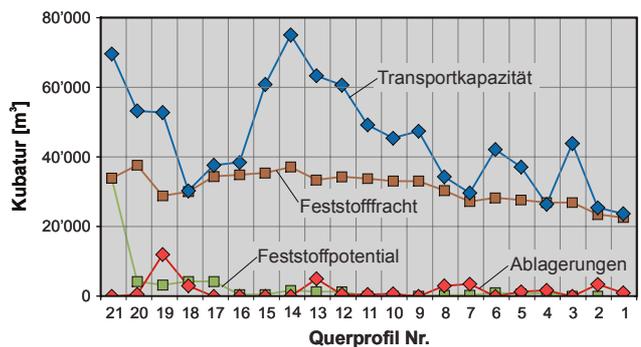
Es konnte gezeigt werden, dass durch den geplanten Geschiebeablagerungsplatz im Bereich der Querprofile Nr. 8 und 7 zusammen mit weiteren Rückhaltmassnahmen weiter oben (zu erstellen im Bereich der Querprofile 14–12) die Feststofffracht eines Grossereignisses stark reduziert wird, womit ein möglicher Aufstau der Linth praktisch verhindert werden kann.

## 5.5 Fazit

Mit der hier vorgestellten Methode ist es möglich geworden, die Abschätzung von Feststofffrachten für ein bestimmtes Ereignis zu systematisieren und reproduzierbar zu machen. Sie erlaubt zudem, die Feststoffverlagerung an praktisch jedem beliebigen Punkt im Gerinne zu erfassen und die anfallende Fracht zu bestimmen. Durch Variation bestimmter Eingabeparameter wie beispielsweise Niederschlag oder Feststoffpotential können verschiedene Jährlichkeiten und Abläufe eines Ereignisses simuliert und die Konsequenzen für die erwartete Feststofffracht auf dem Kegel abgeschätzt werden. Hieraus ergeben sich neue Möglichkeiten für die Planung und Dimensionierung wasserbaulicher Eingriffe wie auch für die Ausscheidung von Gefahrenzonen.



Figur 78: Prinzip der Ermittlung der Feststofffracht in Wildbächen.



Figur 79: Feststoffverlagerung während eines Grossereignisses in der Guppenruns (GL).

Das Verfahren wurde an vielen Beispielen erprobt. Es hat sich gezeigt, dass die notwendigen Abklärungen ein hohes Mass an Verständnis für die im Wildbach ablaufenden Prozesse erfordern und daher nur durch gut eingeführte Fachleute durchgeführt werden sollten.



# 6 Erhebung von Feststoffen nach Unwettern

## 6.1 Ausgangslage

Die Erfassung

- abgelaufener Prozesse nach einem Ereignis
- der Geschiebeherde
- der erodierten Kubaturen
- Ablagerungen und
- Schlüsselstellen

im Gerinne (GHO 1999) hilft nicht nur Sofortmassnahmen möglichst sachgerecht zu planen, sondern trägt auch zum Prozessverständnis bei, welches im Hinblick auf die Erarbeitung von längerfristigen Schutzmassnahmen unabdingbar ist. Die Dokumentation der feststoffrelevanten Prozesse und der umgesetzten Feststoffvolumina nach Unwettern bildet daher einen wesentlichen Teil einer umfassenden Ereignisdokumentation.

## 6.2 Grundsätzliches

Da nach Unwetterereignissen die Spuren durch Aufräumarbeiten und Eingriffe im Rahmen von Sofortmassnahmen rasch verwischt werden, ist deren Erfassung möglichst unmittelbar nach dem Ereignis unumgänglich. Die verantwortlichen Behörden sind nach einem Unwetter durch organisatorische und Hilfeleistungsmassnahmen stark beansprucht. Vorgängige Überlegungen, wer eine solche Erhebung durchführt und wie der Auftrag lautet, sind daher von Nutzen. Es empfiehlt sich jedoch, die Erhebung von Feststoffen durch qualifizierte Fachleute durchführen zu lassen.

Eine Erhebung über Feststoffe nach Unwettern kann allerdings nie als vertiefte und abschliessende Studie gelten. Sie ersetzt deshalb in keinem Fall detaillierte Untersuchungen oder Projektunterlagen über abgelaufene Prozesse und für mögliche zukünftige Schutzkonzepte. Es sollen vielmehr raschmöglichst die wichtigsten Fakten über die abgelaufenen Prozesse und deren Auswirkungen zusammengetragen werden (s. LHG 1995).

## 6.3 Vorgehensweise

Zuerst sind jeweils die vorhandenen Spuren möglichst lückenlos festzuhalten und zu dokumentieren:

- Spuren im Gerinne und ausserhalb davon, welche Rückschlüsse auf den Hochwasserstand, Erosions- und Ablagerungskubaturen ermöglichen.

- Ferner sind die Spuren festzuhalten, welche Rückschlüsse auf abgelaufene Prozesse erlauben.
- Feststellung von Schäden an Verbauungen und Infrastruktur.
- Grobbeurteilung des Momentanzustandes des Einzugsgebietes mit einer Einschätzung der neuen Gefahrensituation.

Aufgrund der Spuren im Gelände können Interpretationen der wichtigen feststoffbezogenen Abläufe und Prozesse des Ereignisses vorgenommen werden:

- Die Hochwasserspuren erlauben die Rekonstruktion des Durchflussquerschnittes. Mit der Annahme einer plausiblen durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit kann eine grobe Abschätzung des Spitzenabflusses, meistens inklusive der mitgeführten Feststoffe, vorgenommen werden.
- Die Schätzung von durchschnittlichen Erosionstiefen, von Ablagerungsflächen und -mächtigkeiten ermöglicht Rückschlüsse auf umgesetzte Feststoffkubaturen.
- Transportprozesse können ebenfalls erfasst werden.

Zusammen mit der Schadensaufnahme und der Einschätzung der neuen Gefahrensituation sind die Ergebnisse eine wichtige Entscheidungshilfe für die Anordnung von Sofortmassnahmen und längerfristig für die Planung adäquater Schutzmassnahmen.

Im Rahmen der Erhebungen wird empfohlen, mindestens die nachfolgend erwähnten Elemente zu behandeln:

- Schätzung der Abflussspitze (inkl. Feststoffe).

Da in den meisten Fällen keine Messungen vorliegen, braucht man für die Schätzung:

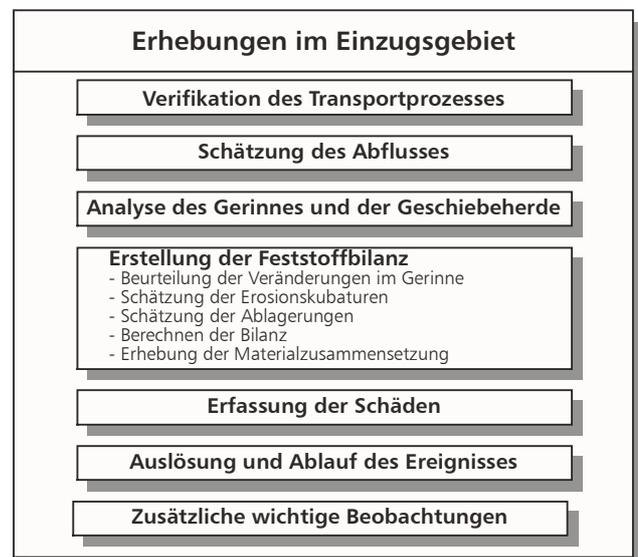
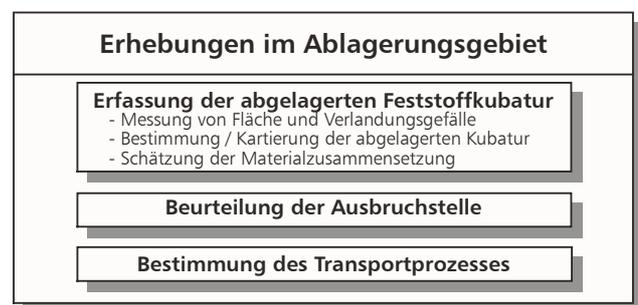
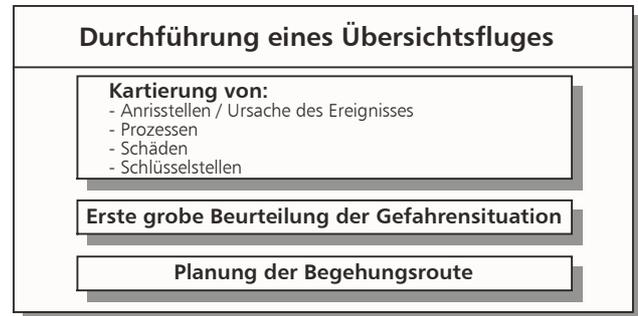
- Energieliniengefälle
- Durchflussquerschnitt (Höhe der Hochwasserspuren über der Sohle und Bachbreite zum Zeitpunkt des Durchflusses)
- Angaben über die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit

- Schätzung der Feststoffkubaturen von Erosionen und Ablagerungen:

- Erosionsmächtigkeiten in der Sohle
- durchschnittliche Erosionsbreite der Sohle
- durchschnittliche Ablagerungsmächtigkeiten
- Ablagerungsflächen

- Festlegung des Transportprozesses (Geschiebetransport oder Murgang):
  - Erfassung der Spuren zur Erkennung des Transportprozesses (s. GHO 1996)
- Erhebung der Materialzusammensetzung:
  - Linien- oder Flächenproben auf Ablagerungen
  - Linienproben an verschiedenen Stellen im Gerinne.

Das Vorgehen ist in Figur 80 dargestellt.



Figur 80: Übersicht über das Vorgehen bei der Erfassung von Feststoffen nach Unwettern.

# 7 Fazit und Ausblick

Die Feststoffbeobachtung ist sowohl für den Gewässerschutz wie auch für die Gewässernutzung von Interesse. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Themenkreise: Abtrag im Einzugsgebiet, Verlandung von Stauräumen und Seen, Stauraumspülungen, Kolmatierung von Gewässerabschnitten, Beeinflussung der Fischlaichentwicklung, Adsorption kolloidaler oder gelöster Wasserinhaltsstoffe, Verschleisserscheinungen an technischen Anlagen und Dimensionierung von Sandfängen bei Wasserfassungen.

## 7.1 Projekte

Betrachtet man die im Kapitel 1 beschriebenen Bedürfnisse und Lücken an Feststoffbeobachtungen der GHÖ-Publikation von 1984, so stellt man fest, dass diese auch heute noch weitgehend Gültigkeit haben. Seither wurden jedoch einige Projekte zur Verbesserung der Situation durchgeführt oder initialisiert.

### 7.1.1 Datenerhebung und -bereitstellung

Das bestehende Schwebstoffmessnetz der Landeshydrologie wurde weiter geführt und zusätzlich temporäre Messstellen betrieben (s. Abschnitt 2.1).

Zusammen mit den Kantonen und Forschungsinstitutionen wurde ein gesamtschweizerisches Geschiebesammlermessnetz aufgebaut, welches Feststoffabschätzungen aus kleinen Einzugsgebieten erlauben soll (s. Abschnitt 2.2).

Zusammen mit dem damaligen Bundesamt für Wasserwirtschaft, veranlasste die Landeshydrologie und -geologie bis in die 1990er Jahre mehrere Deltaaufnahmen in Seen. Die periodischen Aufnahmen von Querprofilen in ausgesuchten Flüssen wurden vom BWG weitergeführt (s. Abschnitte 2.3, 2.4).

Da die Messung des Feststofftransportes in kleinen gebirgigen Einzugsgebieten sehr schwierig und kostenintensiv ist, wurde zusammen mit dem Geographischen Institut der Universität Bern ein Verfahren für die Abschätzung des Feststofftransportes in Wildbächen entwickelt. Das Verfahren ist operationell gestaltet mit einer Arbeitsanleitung und zugehörigem Berechnungsprogramm (s. Kap. 5). Dieses Verfahren ist heute in der Praxis verbreitet. Für die Analyse von geschiebeführenden Hochwassern und Murgängen wurde eine Empfehlung für die Erhebung und Dokumentation der Feststoffverlagerung in steilen Fliessgewässern erarbeitet (s. Kap. 6).

Bezüglich Stausee- und Stauraumverlandung resp. Bewirtschaftung der Feststoffe (Ablagerung, Spülung usw.) wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt und neue Erkenntnisse gewonnen. Das gleiche gilt für den Feststoffhaushalt in Seen (s. Abschnitt 4.3).

### 7.1.2 Datenqualität

Auf dem Gebiet der Datenqualität wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Anhand gemeinsamer Messkampagnen der Rheinanliegerstaaten Schweiz, Deutschland und Holland wurde die Güte und Vergleichbarkeit der Messungen begutachtet (s. Abschnitt 3.2.6).

Probleme wie:

- Korrelation Schwebstoffkonzentration versus Abfluss
- Saisonale Schwankungen im Schwebstofftransport
- Repräsentativität der Stichproben im Querschnitt
- Verteilung der Schwebstoffe über die Tiefe
- zeitliche Repräsentativität der Probenahme
- Vergleich Trübungs- versus Schwebstoffkonzentrationsmessung
- Einfluss der Schnee- und Gletscherschmelze auf die Trübungsdynamik

usw. wurden untersucht und neue Erkenntnisse erarbeitet (s. Abschnitt 4.1.2). Insbesondere wurde ein neues Verfahren für die Frachtbestimmung mit Hilfe von Stichproben entwickelt und eingeführt (s. Abschnitt 4.1.4).

### 7.1.3 Prozesskenntnisse

Die Prozesskenntnisse bezüglich des Feststofftransportes konnten einerseits durch Feldforschung in den Untersuchungsgebieten der WSL (Erlenbach), des Geographischen Institutes der Uni Bern (Spissibach) und der Landeshydrologie/WSL (Rüttigraben, Schwändlibach, Rothenbach und Melera) und andererseits durch Untersuchungen im Labor (VAW, Laboratoire d'hydraulique, etc.) vertieft werden. Insbesondere die Hydrophon-Daten geben wichtige Informationen zur Prozessdynamik.

### 7.1.4 Modellierung

Bei der Modellierung des Feststofftransportes wurden einige Fortschritte erzielt, sowohl bei den Wildbächen als auch bei den grösseren Flüssen. Wie im KHR Bericht II-19 «Morphologische Berechnungen mit Sedimentmischungen, Zukunftsmusik oder eine realistische Alternative?» festgehalten, gibt es aber auch hier noch viele Probleme zu lösen (KROEKENSTOEL & VAN VELZEN 2003).

## 7.2 Ausblick

Nach eingehenden Abklärungen und basierend auf Konzepten wird die Landeshydrologie in Zukunft die beschränkten Mittel schwerpunktmässig wie folgt einsetzen.

### 7.2.1 Mitarbeit beim Betrieb und Auswertung des GHO-Geschiebemessprogrammes

Am 31.10. und 6.11.2002 hat die GHO beschlossen, das Geschiebemessprogramm mit Verbesserungen weiterzuführen. Hierzu wurde 2003 ein Konzept zur Verbesserung des GHO-Geschiebemessnetzes erstellt und mit dessen Umsetzung begonnen. Die Landeshydrologie wird die nationale Datenbank weiterhin führen, wertet die Daten jährlich aus und stellt sie den Kantonen zur Verfügung. Die Meldeformulare und der Meldeprozess werden erneuert.

Für die nutzungsgerechte Interpretation der erhobenen Daten müssen zusätzliche Informationen über die Einzugsgebiete beschafft werden. Die Landeshydrologie hat bereits mit der Aufnahme von wichtigen Beschreibungsmerkmalen begonnen. Zudem unterstützt das BWG eine Forschungsarbeit mit dem Titel «Klassierung alpiner und voralpiner Wildbachsysteme hinsichtlich ihrer Geschiebelieferung während Einzelereignissen in Abhängigkeit von deren Grunddisposition, Auslöseszenarien und spezifischer Prozessdynamik». Daraus sollen sich wichtige Interpretationshilfen ergeben. Zudem soll das GHO-Messprogramm noch stärker mit der Forschung verhängt werden.

Langfristig soll versucht werden, basierend auf den Daten und Erkenntnissen ein Modell für die Abschätzung der zu erwartenden Feststofffrachten aufzustellen, welches die notwendigen Felderhebungen ergänzen und unterstützen kann.

### 7.2.2 Betrieb des Schwebstoffmessnetzes

Basierend auf den Resultaten einer Überprüfung und einem neuen Konzept im Jahre 2004 wird ein Schwebstoffmessnetz weiterhin betrieben.

Allerdings kann aufgrund der Kreditrestriktionen ein dringend notwendiger Ausbau nicht ausgeführt werden. Das Hauptgewicht wird daher auf den Schwebstoffeintrag der grossen Flüsse in die Seen gelegt.

Zusätzlich zu diesem permanenten Messnetz betreibt die Landeshydrologie temporäre Messstellen in

Zusammenarbeit mit Dritten, z. B. Rhone – Brig und Fexbach – Sils-Maria.

Die Datenqualität soll durch den zusätzlichen Einbau von Trübungsmessern an ausgewählten Standorten verbessert werden.

### 7.2.3 Deltaaufnahmen

Die Kenntnis der Veränderungen von Deltas ist für die Feststoffbilanzierung grösserer Gebiete von ausschlaggebender Bedeutung. Deshalb unterstützt die Landeshydrologie weiterhin nach Möglichkeit die Aufnahme von Seedeltas. Leider stehen im Moment die personellen und finanziellen Mittel um solche Aufnahmen durchzuführen resp. in Auftrag zu geben nicht zur Verfügung.

### 7.2.4 Zusammenarbeit mit anderen schweizerischen Fachstellen

Aufgrund der unzureichenden Ressourcen für die Bereitstellung der Grundlagen auf dem Gebiet des Feststofftransportes ist die verstärkte Zusammenarbeit mit anderen Fachstellen aus der Forschung, mit Kantonen und Privaten unabdingbar geworden. Im Vordergrund stehen für die Landeshydrologie:

- Zurverfügungstellung der vorhandenen Mess-Infrastruktur für Dritte.
- Fachliche und materielle Unterstützung Dritter bei Prozessuntersuchungen und der Erfassung von Feststoffen.
- Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen, Empfehlungen usw. durch Vergabe an auswärtige Fachstellen.
- Gemeinsame Durchführung von Projekten.

### 7.2.5 Internationale Zusammenarbeit

Der Austausch von Kenntnissen und Daten über die Landesgrenzen hinweg ist überaus wichtig und kann zudem kostengünstiger sein. Die Bedeutung möglichst genauer Kenntnisse des Feststofftransportes wird auch durch internationale Organisationen und Institutionen wie UNESCO, WMO, IAHR, IAHS, ICOLD, IAEA, ICL, IRTCES, CATHALAC, KHR, ICCORES belegt.

Im Vordergrund steht für die Landeshydrologie in unmittelbarer Zukunft die Mitarbeit den Institutionen:

- UNESCO, Programm «International Sediment Initiative» (ISI), eine internationale Einrichtung für

Feststoffforschung, Feststofffassung und -management.

Hauptziele von ISI sind:

- Einen Beitrag für den Einschluss von Feststoffproblemen in Projekten zu leisten, die diesen Aspekt bisher nicht oder nur ungenügend berücksichtigt haben.
- Verbesserung des Wissensstandes und Austausch von Erfahrungen.
- Förderung und Unterstützung der Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Institutionen, die sich mit der Feststoffproblematik befassen.
- Erkennen und beurteilen der vorhandenen Unsicherheiten.
- Gezielte Aus- und Fortbildung (Workshops, Kurse, Publikationen usw.).

– KHR

Durchführung von Projekten für die Optimierung von Messgeräten, Messmethoden, morphologischen Modelle usw.

– WMO

Arbeitsgruppe AR VI Europa

- European Sediment Network (SedNet)  
Schwerpunktprogramm Feststoffqualität und Wasser-Feststoff-Interaktion.

### **7.2.6 Beratung und Information**

Wie für andere hydrologische Parameter berät und informiert die Landeshydrologie externe Stellen und Personen, soweit sie hierzu über die notwendige Kernkompetenz und Kapazität verfügt.

Die hier aufgezeigten Programme und Tätigkeiten der verschiedenen nationalen und internationalen Institutionen zeigen die allgemeine Bedeutung von Feststoffbeobachtungen auf. Ungeachtet der in letzter Zeit vielerorts erschwerten die Rahmenbedingungen bezüglich der finanziellen und personellen Mittel, ist es weiterhin notwendig, den Wissensstand über den Feststofftransport stetig zu erhöhen. Diese Notwendigkeit zeigt sich gerade in der täglichen weltweiten Praxis. Feststoffbezogene Fragestellungen nehmen kontinuierlich zu und müssen gelöst werden. In aller Regel ist es aber nicht möglich, innerhalb der entsprechenden Projekte gezielte und vertiefte Studien zu betreiben. In all diesen Fällen ist es umso wichtiger, dass bereits vorhandene Kenntnisse und Erfahrungen, wie sie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt worden sind, umfassend verfügbar sind.



# Literaturverzeichnis

- BINDERHEIM-BANKAY, E. & JAKOB, A. (1999): Trübungsmessungen zur Abschätzung von Schwebstofffrachten. *Gas Wasser Abwasser*, 79/12, 1014–1021.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) (2004): Hydrologischer Jahrbuch der Schweiz 2003. Bern.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1988): Vermessung des Kanderdeltas im Thunersee 1987. Schlussbericht, Winterthur.
- COLLET, L.-W., MELLET, R. & STUMPF, W. (1916): Le charriage des alluvions dans certains cours d'eau de la Suisse. *Annales der Schweizer Landeshydrographie* Bd. 2, Bern.
- EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT (1923): Das Rheindelta im Bodensee; Wiederholung der Aufnahme von 1911. Mitt. Nr. 15 des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.
- EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT (1926): Il delta della Maggia nel Lago Maggiore. Mitt. Nr. 21 des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.
- EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT (1932): Wasserführung, Sinkstoffführung und Schlammablagerung des Alten Rheins. Régime des débits, charriage et dépôt des alluvions de Vieux Rhin. Mitt. Nr. 31 des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.
- EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT (1939a): Untersuchungen in der Natur über Bettbildung, Geschiebe- und Schwebstoffführung. Mitt. Nr. 33 des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.
- EIDG. POST- UND EISENBAHNDEPARTEMENT (1939b): Deltaaufnahmen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft. Mitt. Nr. 34 des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.
- FEHR, R. (1987): Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen. Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitt. Nr. 92 der VAW-ETH, Zürich.
- GHO (Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie) (1983): Verzeichnis von in der Schweiz durchgeführten Feststoffbeobachtungen, Delta-, Seegrund- und Querprofilaufnahmen. Bern.
- GHO (1984): Feststoffbeobachtung in Schweizerischen Fließgewässern. Schlussbericht der Arbeitsgruppe für Feststoffbeobachtung. Landeshydrologie, Bern.
- GHO (1987): Die mengenmässige Erfassung von Schwebstoffen und Geschiebefrachten. Mitt. der GHO Nr. 2. Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- GHO (1996): Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Grundlagen und Anleitung. Mitt. der GHO Nr. 4. Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- GHO (1999): Feststoffverlagerung in steilen Fließgewässern. Erhebung und Dokumentation nach Unwetterereignissen. Mitt. der GHO Nr. 5. Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- GIUB (Geographische Institut der Universität Bern) (1999): Berner Hydrograph – Mitteilungsblatt der Gruppe für Hydrologie Nr. 12.
- GRASSO, A. & JAKOB, A. (2003): Charge de sédiments en suspension – Comparaison entre deux méthodes de calcul. *Gaz Eaux* 83/12, 898–905.
- GROSJEAN, G. (1962): Die Ableitung der Kander in den Thunersee vor 250 Jahren. – *Jb. Thuner-Brienzersee* 1962, 18–40.
- HJULSTRÖM, F. (1935): The morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris. – *Bull. Geol. Inst. Uppsala* 25.
- INTERNATIONALE RHEINREGULIERUNG (1979): Das Rheindelta im Bodensee, Bericht über die Seegrundaufnahme vom Jahre 1979, Feldkirch.
- JÄCKLI, H. (1958): Der rezente Abtrag der Alpen im Spiegel der Vorlandsedimentation. – *Eclogae geol. Helv.* 51/2, 354–365.
- JAKOB, A. & SPREAFICO, M. (1997): Schwebstoffkonzentrationen und -frachten in Fließgewässern. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 7.4), Bern.
- KHR (Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes) (1996): Feststoffbeobachtung im Rhein. Beschreibung der Messgeräte und Messmethoden. Bericht Nr. II-11 der KHR, Lelystad.
- KOS, Th.J.M., SCHEMMER, H. & JAKOB, A. (2000): Feststoffmessungen zum Vergleich von Messgeräten und Messmethoden im Rhein, 10.–12. März 1998. Bericht Nr. I-18 der KHR, Lelystad.
- KROEKENSTOEL, D. F. & VELZEN, E. H. van (2003): Morphologische Berechnungen mit Sedimentmischungen, Zukunftsmusik oder eine realistische Alternative? Bericht Nr. II-19 der KHR, Lelystad.
- LAMBERT, A. (1976): Über die klastische Sedimentation im Walensee. Diss. ETH Zürich 7517.
- LAMBERT, A. (1978): Eintrag, Transport und Ablagerung von Feststoffen im Walensee. – *Eclogae geol. Helv.* 71/1, 35–52.
- LAMBERT, A. (1979): Starke Bodenströmungen im Walensee – Eine Auswirkung des Hochwassers vom 31.7./1.8.1977 in der Zentralschweiz. – *Wasser Energie Luft* 71/3, 50–53
- LAMBERT, A. (1980a): Das Delta der Linth im Walensee – ein Vergleich der Seegrundaufnahmen von 1931 und 1979. – *Wasser Energie Luft* 72/7/8, 243–246.
- LAMBERT, A. (1980b): Die Entwicklung des Linthdeltas im Walensee zwischen 1931 und 1979. – *Eclogae geol. Helv.* 73/3, 867–880.

- LAMBERT, A. (1984): Eine geologische Karte des Walensees. – *Eclogae geol. Helv.* 77/1, 101–113.
- LAMBERT A. (1988). Seegrundvermessungen im Lago Maggiore: Das Wachstum des Maggia- und Ticino/Verzasca-Deltas vom 1890 bis 1986. – *Wasser Energie Luft* 80/1/2, 21–28.
- LAMBERT, A. (1989): Das Rheindelta im See. – *Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik* 87/1, 29–32.
- LAMBERT, A.M., KELTS, K.R. & MARSHALL, N.F. (1976): Measurements of density underflows from Walensee, Switzerland. – *Sedimentology* 23, 87–105.
- LAMBERT, A. & PFEIFFER, C. (1990): Neuvermessung des Lauerzerseebeckens. Veränderung des Seegrundes von 1892 bis 1989. – *Wasser Energie Luft* 82/9, 190–194.
- LAMBERT, A. & SCHLUND, R.A. (1983): Die topographische Neukartierung des Walensees. – *Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik* 87/11, 397–402.
- LEHMANN, C. (1993): Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen. Grundlagen und Anleitung. – *Geographica Bernensia* G42, Bern.
- LH (Landeshydrologie) (1970): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz. Bern.
- LH (div.): Hydrologische Jahrbücher der Schweiz. Bern.
- LHG (Landeshydrologie und -geologie) (1991): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 – Ergebnisse der Untersuchungen. Hydrologische Mitteilungen der LHG Nr. 14, Bern.
- LHG (1995): Nant du Pissot, Commune de Villeneuve (VD): Laves torrentielles du 13/14 août 1995. Documentation de l'événement, Unveröff. Bericht. Bern.
- LISZKAY, M. (1972): Aaredelta-Brienzersee; Ergebnisse einer nochmaligen Auswertung der Deltaaufnahmen von 1932/1933 und 1956/1956, Eidgenössisches Amt für Wasserwirtschaft (EAWW), Bern.
- NIKLAUS, M. (1969): Die Kander und ihr Delta im Thunersee. – *Jb. Thuner-Brienzersee* 1969, 59–85.
- ÖSTERREICHISCHER RHEINBAULEITER (1951): Das Rheindelta im Bodensee, Bericht über die Seegrundaufnahme vom Jahre 1951, Vorarlberg.
- ÖSTERREICHISCHER RHEINBAULEITER (1961): Das Rheindelta im Bodensee, Bericht über die Seegrundaufnahme vom Jahre 1961, Vorarlberg.
- ÖSTERREICHISCHER RHEINBAULEITER (1969): Das Rheindelta im Bodensee, Bericht über die Seegrundaufnahme vom Jahre 1969, Vorarlberg.
- SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteil. Preuss. Versuchsanst. Wasser, Erd, Schiffsbau*, Berlin Nr. 26.
- SPREAFICO, M. & LEHMANN, C. (1994): Sediment transport observations in Switzerland. Variability in Stream Erosion and Sediment Transport (Proceedings of the Canberra Symposium, December 1994). – *IAHS Publ.* 224, 259–268.
- SPREAFICO, M. & MAZIK, A. van (Red.) (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein. Bericht Nr. I-12 der KHR, Lelystad.
- STUMPF, W. (1916): Methode der Deltavermessungen der Abteilung Wasserwirtschaft. *Annalen der Schweizer Landeshydrographie* Bd. 2, Bern.
- VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie) & GIUB (Geographisches Institut der Universität Bern) (1987): Emme 2050 – Studie über die Entwicklung des Klimas, der Bodenbedeckung, der Besiedlung, der Wasserwirtschaft und des Geschiebeaufkommens im Emmental, sowie über die Sohlenentwicklung und den Geschiebehaushalt in der Emme und mögliche zukünftige Verbauungskonzepte. VAW/GIUB Bericht Nr. 909, Zürich und Bern (unveröffentlicht).
- WALSER, E. (1952): Nouvelle méthode pour les levés des deltas. – *Bull. Tech. Suisse Romande* 12, 4–8.
- WLS (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft) (Hrsg.) (1992): Jahresbericht der WSL 1991, Birmensdorf.

# Bildnachweis

- Umschlag: oben: A. Grasso, BWG  
Mitte: BWG  
unten: A. Grasso, BWG
- Figur 2: Eva Gertsch, BWG  
Figur 3: Emil Schulthess, Zürich, aus LAMBERT  
1988
- Figur 4: BWG  
Figur 5: Hugo Raetzo, BWG  
Figur 7–22: BWG  
Figur 23: Eva Gertsch, BWG  
Figur 28/29: BWG  
Figur 30–32: Adrian Jakob, BWG  
Figur 34: BWG  
Figur 71: Eidg. Landestopographie aus LAMBERT  
1980a
- Figur 73: aus GBL 2003  
Figur 74: Emil Schulthess, Zürich, aus LAMBERT  
1988  
Figur 75: aus GIUB 1999



# Anhang

## A1 Liste der Geschiebemesstationen der GHO-Datenbank «DB-Solid»

Nr.	Institution	Kanton	Fluss	Station	Messbeginn
AG01	AG	AG	Wyna	Reinach	01. Okt 87
AG02	AG	AG	Ruederchen	Schöftland	15. Nov 87
AG03	AG	AG	Talbach	Schinznachdorf	01. Jul 86
AG04	AG	AG	Sissle	Sisseln	30. Apr 86
BE01	BE	BE	Innerer Blindlauigraben	Lütschental	01. Jan 96
BE02	BE	BE	Fritzenbach	Leissigen	01. Jan 96
BE03	BE	BE	Spissibach	Leissigen	01. Jan 96
BE04	BE	BE	Bütschliigraben	Schagnau, Bumbach	01. Jan 86
BE05	BE	BE	Steinenbach	Bowil	01. Okt 87
BE07	BE	BE	Dorfbach	Oberbibb	01. Jan 87
BE08a	BE	BE	Längenbachgraben	Längenbachwald	01. Apr 89
BE08b	BE	BE	Längenbach	Längenbachmühle	01. Apr 89
BE09	BE	BE	Grosse Bachtalen	Brienz	01. Jan 97
BE11	BE	BE	Leimbach	Frutigen	–
BE12	BE	BE	Wallbach	Lenk	–
BE13	BE	BE	Schwarzbach	Lauenen	–
BE14	BE	BE	Eistlenbach	Hofstetten	–
GR01a	GR	GR	Dorfrüfe	Trimmis(a)	01. Jan 89
GR01b	GR	GR	Dorfrüfe	Trimmis(b)	01. Jan 89
GR02	GR	GR	Tomilsertobel	Rothensbrunnen	01. Jan 89
GR03	GR	GR	Muranzina	Sta. Maria	01. Jun 90
GR04	GR	GR	Valparghera	Domat/Ems	01. Jan 86
GR05	GR	GR	Val Zuondra	Celerina	01. Jul 87
GR06	GR	GR	Val Grevas	Madulain	01. Jul 86
GR07	GR	GR	Val Punteglias	Trun	01. Jul 87
GR08	GR	GR	Val Gronda	Tschlin	01. Jan 89
GR09	GR	GR	Riale de Rasch	Lostallo	01. Jul 87
GR10	GR	GR	Riale Molera	Lostallo	01. Jul 87
GR11a	GR	GR	Val Pednal	Poschiavo(a)	01. Jan 89
GR11b	GR	GR	Val Pednal	Poschiavo(b)	01. Jan 89
NW01	NW	NW	Steinibach	Dallenwil (Loudresgrotte)	01. Jan 90
NW02	NW	NW	Humligenbach	Wolfenschiessen	01. Jan 86
NW03	NW	NW	Mühlebach	Beckenried	01. Jan 81
NW04	NW	NW	Rübibach	Buochs	01. Jan 85
NW05	NW	NW	Steinibach	Hergiswil	01. Jan 90
OW01	OW	OW	Bitzighoferbach	Sarnen-Sack	01. Okt 81
OW02	OW	OW	Melbach	Kerns-Ledi	01. Jan 03
OW03	OW	OW	Grosse Schliere	Alpnach	01. Jan 84
OW04	OW	OW	Dürnbach	Engelberg-Grundli	31. Jul 98
OW05	OW	OW	Edisriederbach	Sachsln-Obfluh	01. Jan 03
SG01	SG	SG	Widenbach	Altstätten	01. Jan 01
SG02	SG	SG	Aubach	Eichberg	01. Jan 03
SG03	SG	SG	Simmi Hasengut	Gams	15. Dez 99
SG04a	SG	SG	Viltiserbach	Vilters(a) Tobel	15. Aug 00
SG04b	SG	SG	Viltiserbach	Vilters(b) Elco	01. Jan 90
SG05	SG	SG	Steinenbach	Kaltbrunn	01. Jan 03
SG06a	SG	SG	Gasenzerbach oben	Gams(a) Rosengarten	01. Jan 03
SG06b	SG	SG	Gasenzerbach	Gams(b) Kessi	01. Jan 03
SG06c	SG	SG	Felsbach Bad	Gams	01. Jan 03
SG07	SG	SG	Simmi Wider	Gams	15. Dez 99
SZ01	SZ	SZ	Nietenbach	Seewen	01. Jan 88
SZ02	SZ	SZ	Hundschottenbach	Biberegg	01. Mrz 88
SZ03	SZ	SZ	Ahorenweidbach	Einsiedeln	01. Jul 88
SZ04	SZ	SZ	Nidlaubach	Unteriberg	01. Jul 88

SZ05	SZ	SZ	Chessibach	Altendorf	01. Jul 88
SZ06	SZ	SZ	Filderenbach	Unteriberg	01. Jul 88
TI01	TI	TI	Riale Tiglia	Leontica	01. Jan 88
TI02	TI	TI	Riale Crosa	Riveo	01. Jan 88
TI03	TI	TI	Valle di Gerra	Gambarogno	01. Jan 84
TI04	TI	TI	Brima	Losone	01. Jan 88
TI05	TI	TI	Riale di Sementia	Sementina	01. Jan 89
TI06	TI	TI	Riale Cusello	Sigirino	01. Jan 88
TI07	TI	TI	Val Maggiore	Torricella	01. Jan 88
TI08	TI	TI	Riana	Bioggio	01. Jan 88
TI09	TI	TI	Riale Fragiatorra	Malvaglia	01. Jan 88
TI10a	TI	TI	Leggiuna	Malvaglia	01. Jun 88
TI10b	TI	TI	Brenno	Malvaglia	01. Jun 88
TI11	TI	TI	Riale Grande	Lumino	01. Jan 88
TI12	TI	TI	Maggia	Avegno	01. Jan 87
TI13	TI	TI	Brenno	Riasco-Olivone	01. Jan 95
TI14	TI	TI	Brenno	Motto-Dongio	01. Jan 94
TI15	TI	TI	Brenno	Foce Brenno-Biasca	01. Jan 94
TI16	TI	TI	Ticino	Lavorgo-Presa AET	01. Jan 95
TI17	TI	TI	Ticino	Airolo	01. Jan 95
UR01	UR	UR	Gangbach	Schattdorf	01. Jan 88
UR02	UR	UR	Kummetbach	Attinghausen	01. Jan 88
UR03	UR	UR	Böschrüti	Seedorf	01. Jan 90
UR04	UR	UR	Fischlauri	Seedorf	01. Jan 90
UR05	UR	UR	Opplibach	Gurtellen	01. Jan 90
UR06	UR	UR	Schipfenbach	Silenen	01. Jan 89
UR07	UR	UR	Kirchbach	Silenen	01. Jan 88
VAW01	VAW	SG	Rietholzbach	Mosnang	18. Jul 81
VD01	VD	VD	Croisette	Bex	01. Jan 00
VD02	VD	VD	Tinière	Villeneuve	01. Jan 02
VD03	VD	VD	Promenthouse	Embouchure	01. Jan 91
VS01	VS	VS	Drance de Ferret	Orsière	01. Jan 03
VS02	VS	VS	Lonza	Ferden	01. Jan 03
VS03	VS	VS	Bielzug	St. Niklaus	01. Jan 03
VS04	VS	VS	Täschbach	Täsch	01. Jan 03
VS05	VS	VS	Münstigerbach	Münster	01. Jan 03
VS06	VS	VS	Fosse des Talons	Collombey/Muraz	01. Jan 03
VS07	VS	VS	Stampbach	Blatten (Lötschental)	01. Jan 03
VS08	VS	VS	Bielzug	St.-Niklaus/Herbruggen	
VS09	VS	VS	Baettligraben	Guldensand, Grengiols	01. Jan 03
VS10	VS	VS	Meretschibach	Agarn	01. Jan 03
VS11	VS	VS	Torrent de Peterey	Ayer (Zinal)	01. Jan 03
VS12	VS	VS	Bruchji	Naters, Rischinu	01. Jan 03
VS13	VS	VS	Torrent de Bajin	Hérémenche (Pralong)	01. Jan 03
VS14	VS	VS	Milibach	Obergesteln (Hostetten)	01. Jan 03
VS15	VS	VS	Torrent de Vellaz	Saxon	01. Jan 03
VS16	VS	VS	Dorfbach	Randa	01. Jan 03
VS17	VS	VS	Bossey	Fully	01. Jan 03
WSL1	WSL	SZ	Erlenbach	Alptal	18. Aug 82
WSL2	WSL	FR	Rotenbach	Schwarzsee	01. Jan 53
WSL3	WSL	FR	Schwändlibach	Schwarzsee	01. Jan 53
WSL4	WSL	TI	Melera	Val Morobbia	01. Nov 34

Tabelle 13: Liste der Geschiebemesstationen der GHO-Datenbank «DB-Solid».

## A2 Meldeblatt Geschiebefrachten

**Meldeblatt Geschiebefrachten - GHO Geschiebemessnetz**

Institution: \_\_\_\_\_

Erhebungsort	Erhebungsmethode				Erhebungsfracht			Geschiefefracht [m³]		Erhebungszeitpunkt / -periode		Ursachen								Zusätzliche Erhebungen						
	Anzahl Lastwagen	Wägung der Lastwagen	Profilaufnahmen	Photogrammetrische Aufnahme	Andere Methode	Jahresfracht	Mehrfahrfracht	Fracht eines Einzelergebnisses	Fracht mehrerer Geschiebeschübe	Geschiebe	Schwebstoffe	Anteil Holz / Geschwemmel	Datum der Leerung	Fracht von: bis:	Einzelereignis	mehrere Geschiebeschübe	Gewitter / Starkniederschläge	Dauerregen	Ufer- / Hangrutschung	Sperndruch	normaler Geschiebetransport	Murgang	Andere	zusätzliche Erhebungen	Schätzung Niederschlag	Schätzung Abfluss
Bemerkung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bemerkung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bemerkung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bemerkung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bemerkung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bemerkung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ort/Datum: ..... Unterschrift: .....

Figur 81: Meldeblatt Geschiebefrachten – GHO Geschiebemessnetz.

### A3 Tabelle Querprofilaufnahmen

Flussgebiet	Gewässer	Strecke/Ort		
Rhein	Rhein	Kraftwerk Schaffhausen		
		Balm – Rheinfall		
		Herdern – Ellikon		
		Rüdlingen – Ellikon		
		Reckingen – Herden		
		Laufenburg – Schwaderloch		
		Strandbad Mumpf – Laufenburg		
		KRS – Strandbad Mumpf		
		Strassenbrücke Rheinfelden – KRS		
		Augst – Strassenbrücke Rheinfelden		
		Pfalz – Augst		
		Basel Landesgrenze – Pfalz		
		Stauraum Kraftwerk Eglisau		
		Brücke Reichenau – Landquart		
		Lanquart – Vaduz – Sevelen		
		Brücke Vaduz – Bodensee		
		Untersee – Schaffhausen		
		Rheinfall – Fähre Klemme		
		Fähre Schwaderloch – Hüningen		
		Thur	Thur	Stauraum Kraftwerk Eglisau
Weberei Ebnet – Gemeinde Ebnet/Wattwil				
Gemeinde Ebnet/Wattwil – Schmiedenbach				
Schmiedenbach – Wehr Lichtensteig				
Bischoffszell – Will				
Kantonsgrenze SG/TG – Strassenbrücke Amlikon				
Dorfbach Amlikon – Strassenbrücke Niederneunforn				
Strassenbrücke Niederneunforn – Blindensteg				
Töss	Töss			Konzessionsgebiet Kraftwerk Eglisau
				Brücke Rikon – Blindensteg
Birs	Birs	Aesch – Rheinmündung		
		Hinterrhein	Ausgleichsbecken Bärenburg	
Landquart	Landquart		Thusis – Reichenau	
		Felsenbach – Rhein		
Schraubach	Schraubach	Alter Rhein		
			Rinnsal	
Lüssel	Lüssel	Kt. Grenze BE/SO – Birs		
		Sitter	Kt. Grenze SG/TG – Thur	
Weissbad	Weissbad		Weissbad – Lank	
		Glatt	Glatt	Oberhausen – Rümlang
Aare	Aare			Wynau, Unterwasser bis Murgenthal
		Rupperswil – Auenstein		
		Kraftwerk Wildegg – Brugg		
		Brugg – Stilli		
		Kraftwerk Beznau		
		Brienzersee – Uterseen		
		Thunersee – Mühlewehr		
Thun – Neubrücke				

		Neubrücke – Schleuse Port
		Schleuse Port – Zentrale Bannwil
		Böttstein – Rhein
	Canal de Broye	
	Canal de Thielle	Lac de Neuchâtel – Bielersee
	Nidau – Büren – Kanal	
	Schwarze Lüttschine	
	Lüttschine	Wilderswil – See
	Kander	Engstligen – Thunersee
	Simme	Kirel – Kander
	Gürbe	Meierisligraben – Aare
	Sarine	Lessoc – Broc
		Fribourg – Aare
	Sense	Schwarzwasser – Saane
	Orbe	Orbe – Yverdon
	Broye	Brivaux – Lac de Neuchâtel
	Emme	Kemmeriboden – Emmenmatt
		Sorbach – Emmenmatt
		Emmenmatt – Aare
	Ilfis / Schonbach	Marbach – Emme
Reuss	Reuss	Am Steg, Pfaffensprung
		Amsteg – Urnersee
		Luzern – Bremgarten
		Wird – Kraftwerk Zufikon
		Kraftwerk Zufikon
		Bremgarten – Aare
	Uetenbach	Sachwyz – Seeweren
	Muota	Hinterthal – Vierwaldstättersee
	Engelbergeraas	Grafenort – Vierwaldstättersee
	Kleine Emme	Flühli – Reuss
Limmat	Limmat	Zürichsee – Platzspitz
	Linth - Kanal	Walensee – Zürichsee
	Escher Kanal	Mollis – Walensee
Rhone	Rhone	Brücke Naters – Brücke Suste
		Brücke Suste –
		Pont de Branson – Lac Léman
		Sortie du lac – frontière
	Vispa	Neubrücke – Rhone
	Canal de Château Neuf	
	Canal du Couchant	
	Canal de Fully	
	Canal de la Grande Allée	
	Canal principal	Sion – Riddes
		Riddes – Rhône
	La Morge	Bei Sion
	Drance	Pont Martigny – Rhône
	Arve	Sierne – Rhône
Ticino	Ticino	Bodio – Brenno
		Brenno – Lago Maggiore
	Brenno	Malvaglia

		Loderio – Biasca
	Valle di Moleno	
	Moesa	Cabbiolo – Ticino
	Maggia	
	Cassarate	Piano Stampa – Lago di Lugano
	Veduggio	Leguana – Lago di Lugano
	Tresa	Ponte Tresa
Inn	Inn	Flazbach – S'chanf

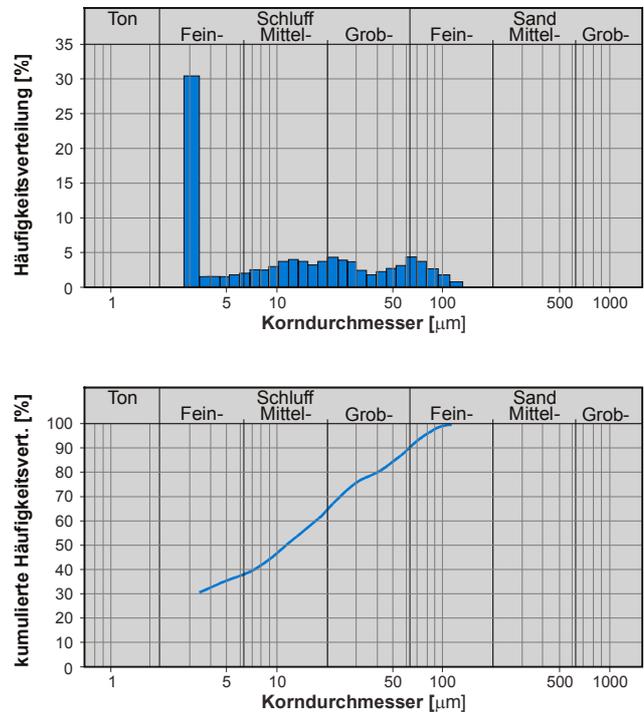
Tabelle 14: Zusammenstellung der Querprofilaufnahmen bis etwa 1980, aus GHO (1983).

## A4 Beispiele für Korngrößenanalysen

### A4.1 Linth – Mollis, Kupfernsteg

Anteil [%]	Korndurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
18,53	< 2
64,50	< 20
76,46	< 32
89,88	< 63
98,87	< 100

Tabelle 15: Anteil der Partikel unterhalb bestimmter Korndurchmesser für Linth – Mollis, Kupfernsteg.

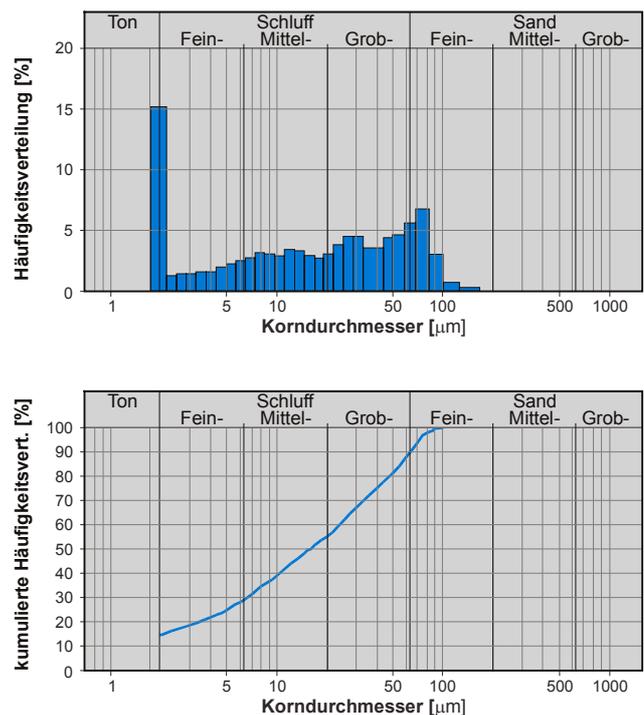


Figur 82: Korngrößenanalyse Linth – Mollis, Kupfernsteg vom 29.07.1993.

### A4.2 Lüttschine – Gsteig, Bönigen

Anteil [%]	Korndurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
14,82	< 2
54,39	< 20
68,58	< 32
88,57	< 63
99,30	< 100

Tabelle 16: Anteil der Partikel unterhalb bestimmter Korndurchmesser für Lüttschine – Gsteig, Bönigen.

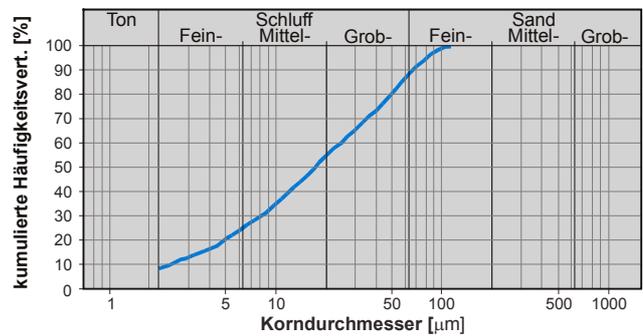
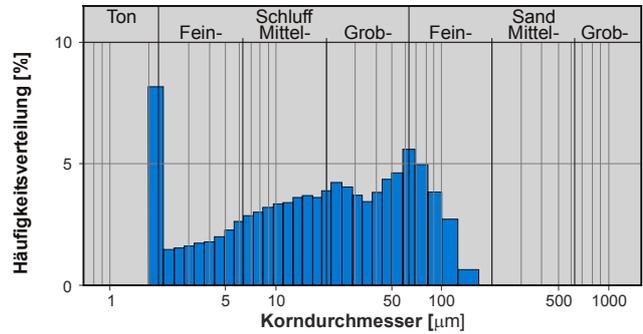


Figur 83: Korngrößenanalyse Lüttschine – Gsteig, Bönigen vom 14.07.1993.

### A4.3 Reuss – Seedorf

Anteil [%]	Korndurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
8,02	< 2
53,03	< 20
66,70	< 32
87,18	< 63
97,98	< 100

Tabelle 17: Anteil der Partikel unterhalb bestimmter Korndurchmesser für Reuss – Seedorf.

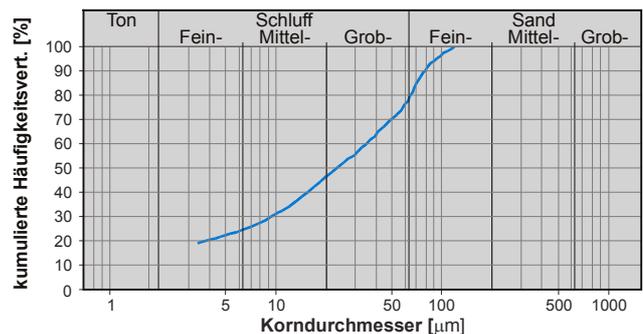
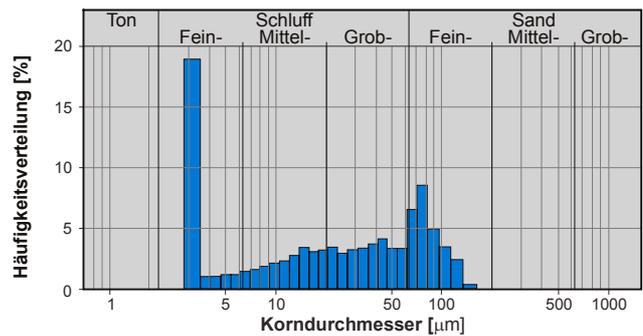


Figur 84: Korngrößenanalyse Reuss – Seedorf vom 13.07.1993.

### A4.4 Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke

Anteil [%]	Korndurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
11,50	< 2
46,43	< 20
57,66	< 32
77,82	< 63
96,41	< 100

Tabelle 18: Anteil der Partikel unterhalb bestimmter Korndurchmesser für Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke.

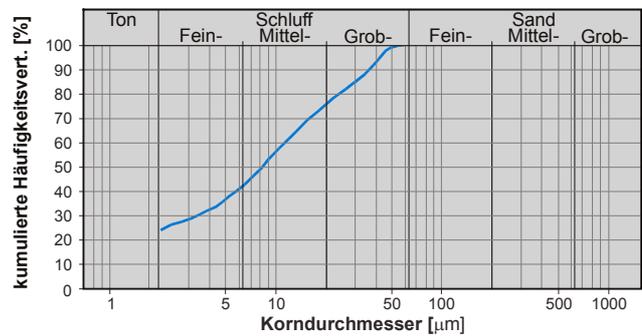
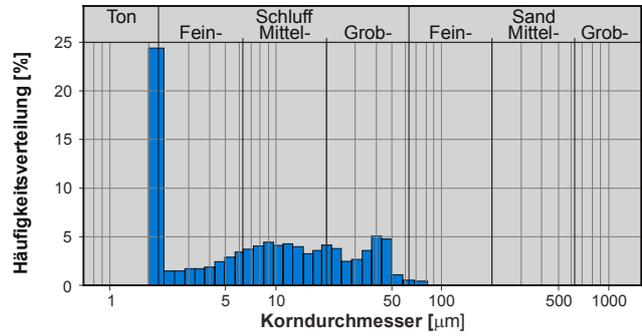


Figur 85: Korngrößenanalyse Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke vom 22.07.1993.

### A4.5 Thur – Halden

Anteil [%]	Korndurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
24,02	< 2
75,22	< 20
85,56	< 32
99,59	< 63
100,00	< 100

Tabelle 19: Anteil der Partikel unterhalb bestimmter Korndurchmesser für Thur – Halden.

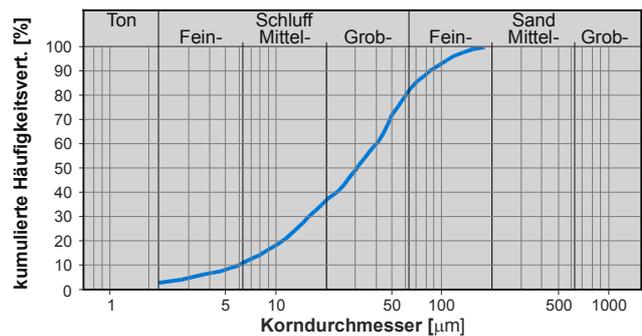
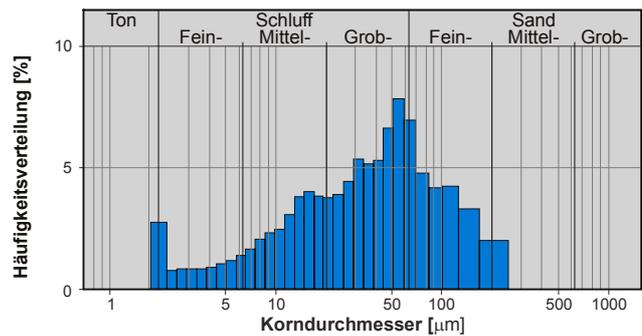


Figur 86: Korngrößenanalyse Thur – Halden vom 22.07.1993.

### A4.6 Ticino – Bellinzona

Anteil [%]	Korndurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
2,67	< 2
35,75	< 20
51,26	< 32
81,03	< 63
92,52	< 100

Tabelle 20: Anteil der Partikel unterhalb bestimmter Korndurchmesser für Ticino – Bellinzona.

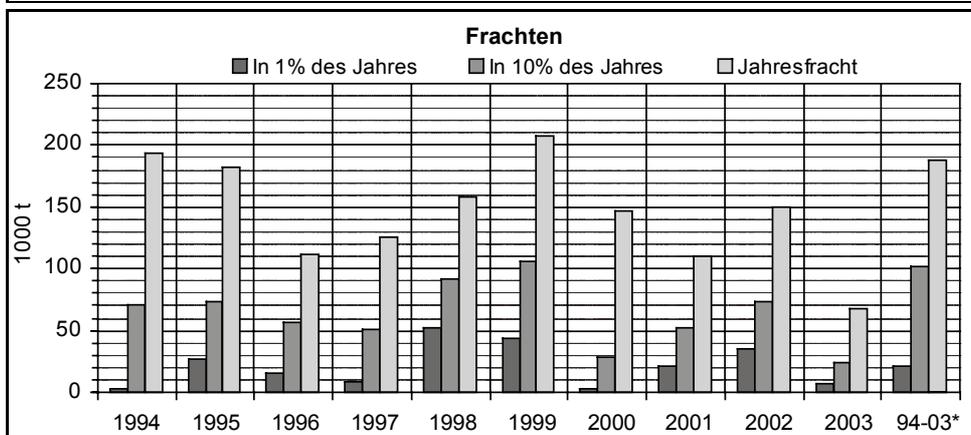
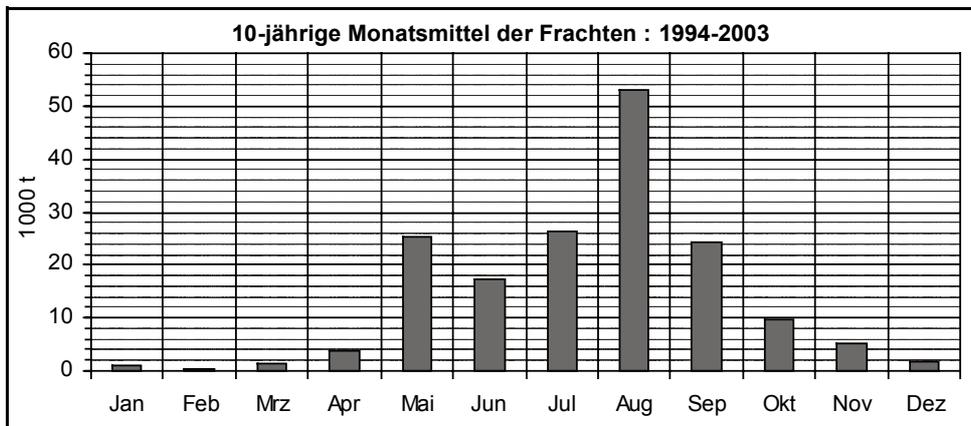
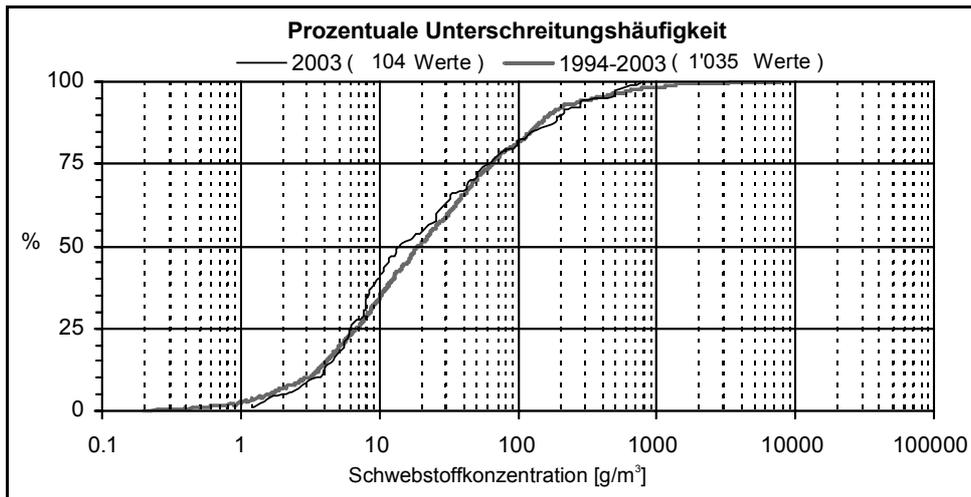


Figur 87: Korngrößenanalyse Ticino – Bellinzona vom 12.07.1993.

## A5 Schwebstofffrachten bei einzelnen Stationen

### A5.1 Linth – Mollis, Kupfersteg

Koordinaten: 724 880 / 219 860      Höhe: 436.0 m ü.M.  
 Einzugsgebiet: 600.0 km<sup>2</sup>      Messbeginn: 1964



\* Mittlere Jahresfrachten der letzten 10 Jahre

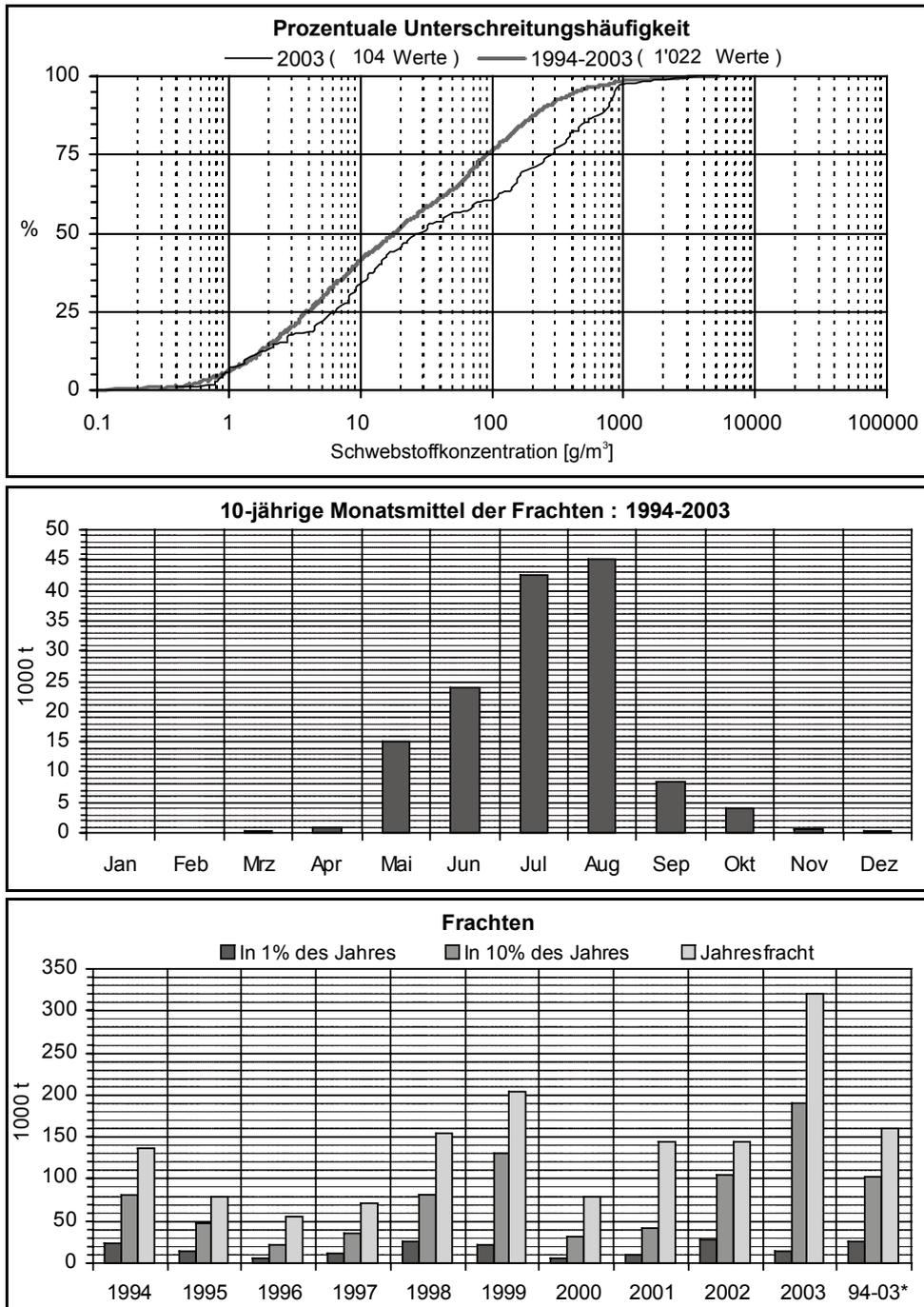
Maximale Jahresfracht seit Messbeginn: 304 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 1993

Minimale Jahresfracht seit Messbeginn: 52 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 1974

Figur 88: Schwebstoffmessungen Linth – Mollis, Kupfersteg (BWG 2004).

## A5.2 Lütschine – Gsteig, Bönigen

Koordinaten: 634 500 / 170 850      Höhe: 585.0 m ü.M.  
 Einzugsgebiet: 379.0 km<sup>2</sup>      Messbeginn: 1964



\* Mittlere Jahresfrachten der letzten 10 Jahre

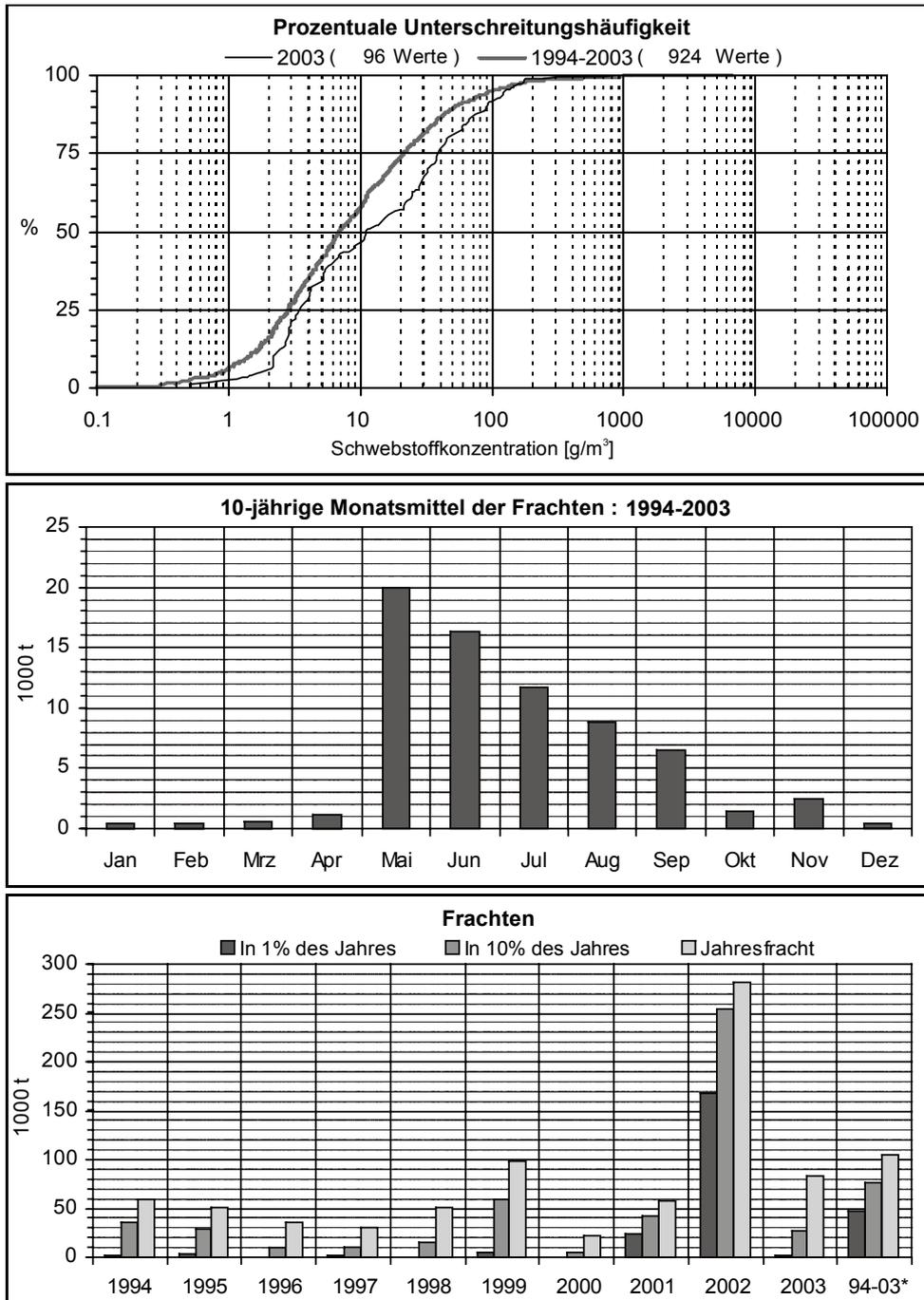
Maximale Jahresfracht seit Messbeginn: 320 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 2003

Minimale Jahresfracht seit Messbeginn: 56 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 1996

Figur 89: Schwebstoffmessungen Lütschine – Gsteig, Bönigen (BWG 2004).

### A5.3 Reuss – Seedorf

Koordinaten: 690 085 / 193 210      Höhe: 438.0 m ü.M.  
 Einzugsgebiet: 832.0 km<sup>2</sup>      Messbeginn: 1979

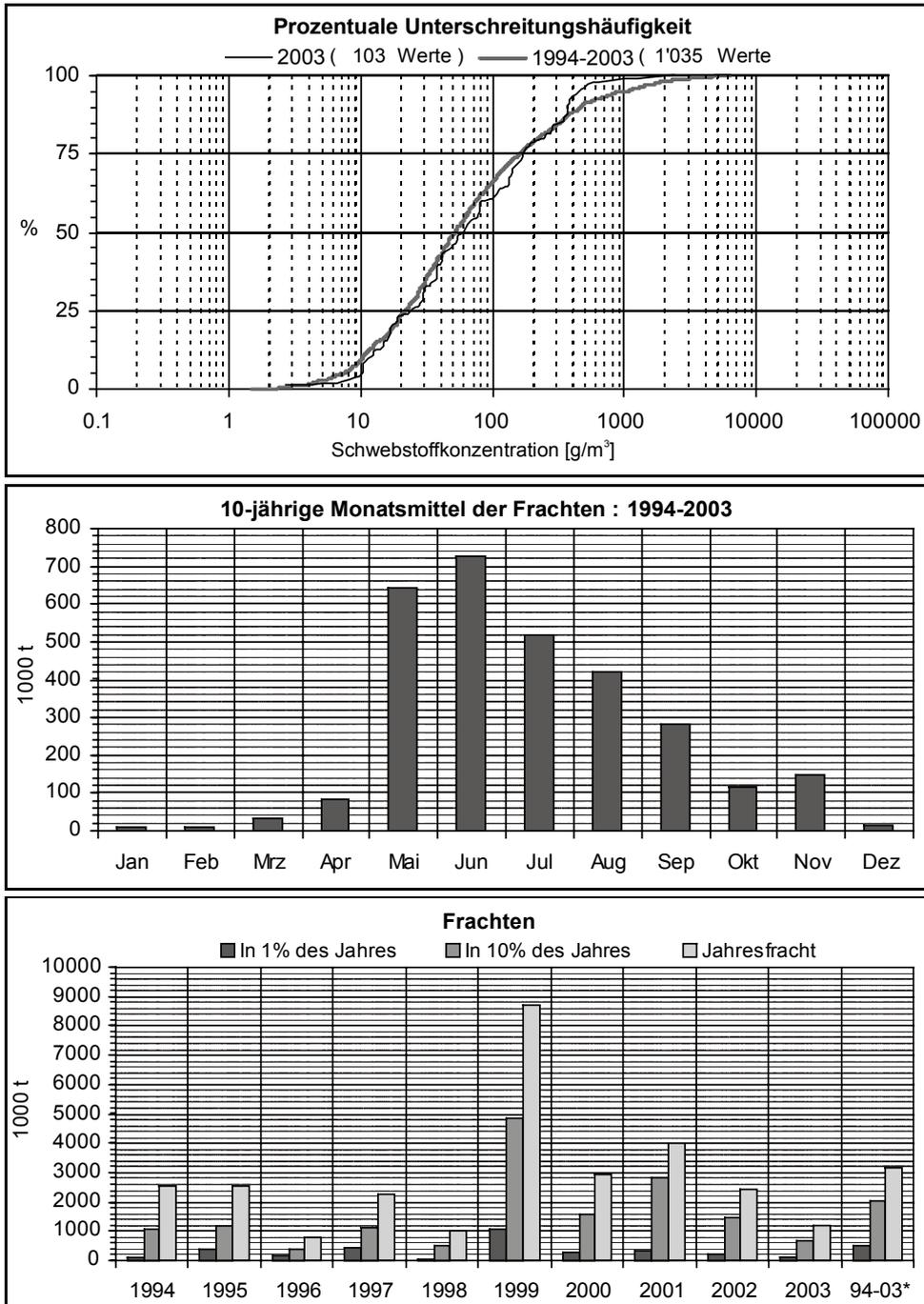


\* Mittlere Jahresfrachten der letzten 10 Jahre  
 Maximale Jahresfracht seit Messbeginn: 281 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 2002  
 Minimale Jahresfracht seit Messbeginn: 23 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 2000

Figur 90: Schwebstoffmessungen Reuss – Seedorf (BWG 2004).

## A5.4 Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke

Koordinaten: 766 280 / 250 360      Höhe: 410.0 m ü.M.  
 Einzugsgebiet: 6'119.0 km<sup>2</sup>      Messbeginn: 1966



\* Mittlere Jahresfrachten der letzten 10 Jahre

Maximale Jahresfracht seit Messbeginn: 8'691 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 1999

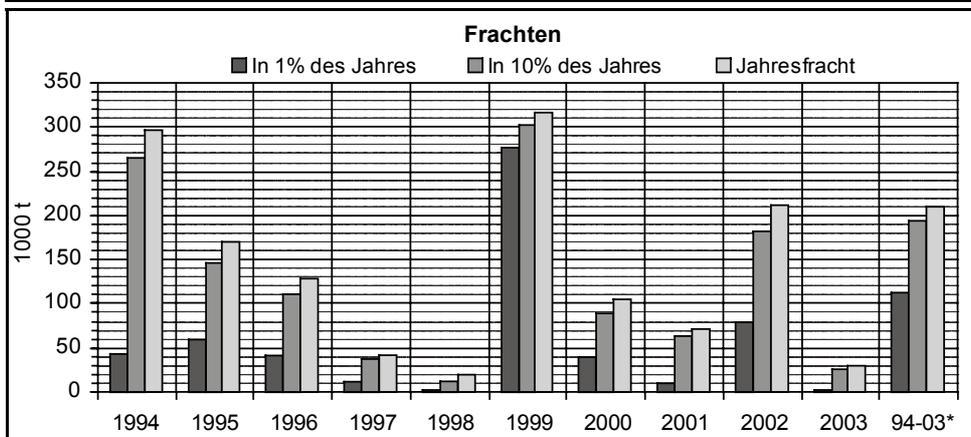
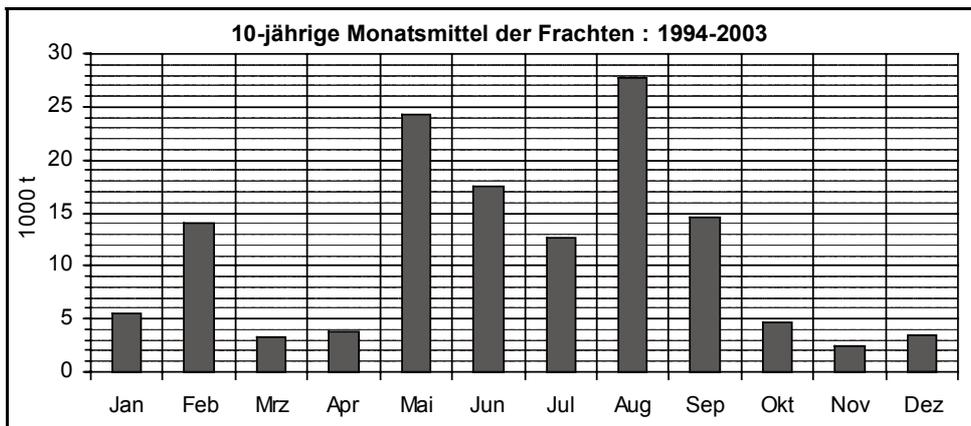
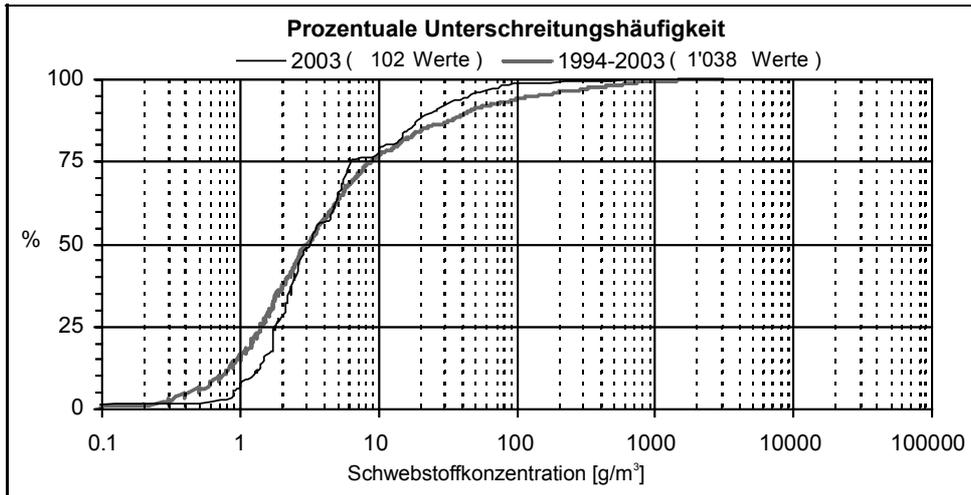
Minimale Jahresfracht seit Messbeginn: 625 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 1972

Die Abflüsse bis 1983 und die Schwebstoffkonzentration bis 1984 wurden an der Station Schmitter gemessen.

Figur 91: Schwebstoffmessungen Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke (BWG 2004).

## A5.5 Thur – Halden

Koordinaten: 734 560 / 263 180      Höhe: 456.0 m ü.M.  
 Einzugsgebiet: 1'085.0 km<sup>2</sup>      Messbeginn: 1975



\* Mittlere Jahresfrachten der letzten 10 Jahre

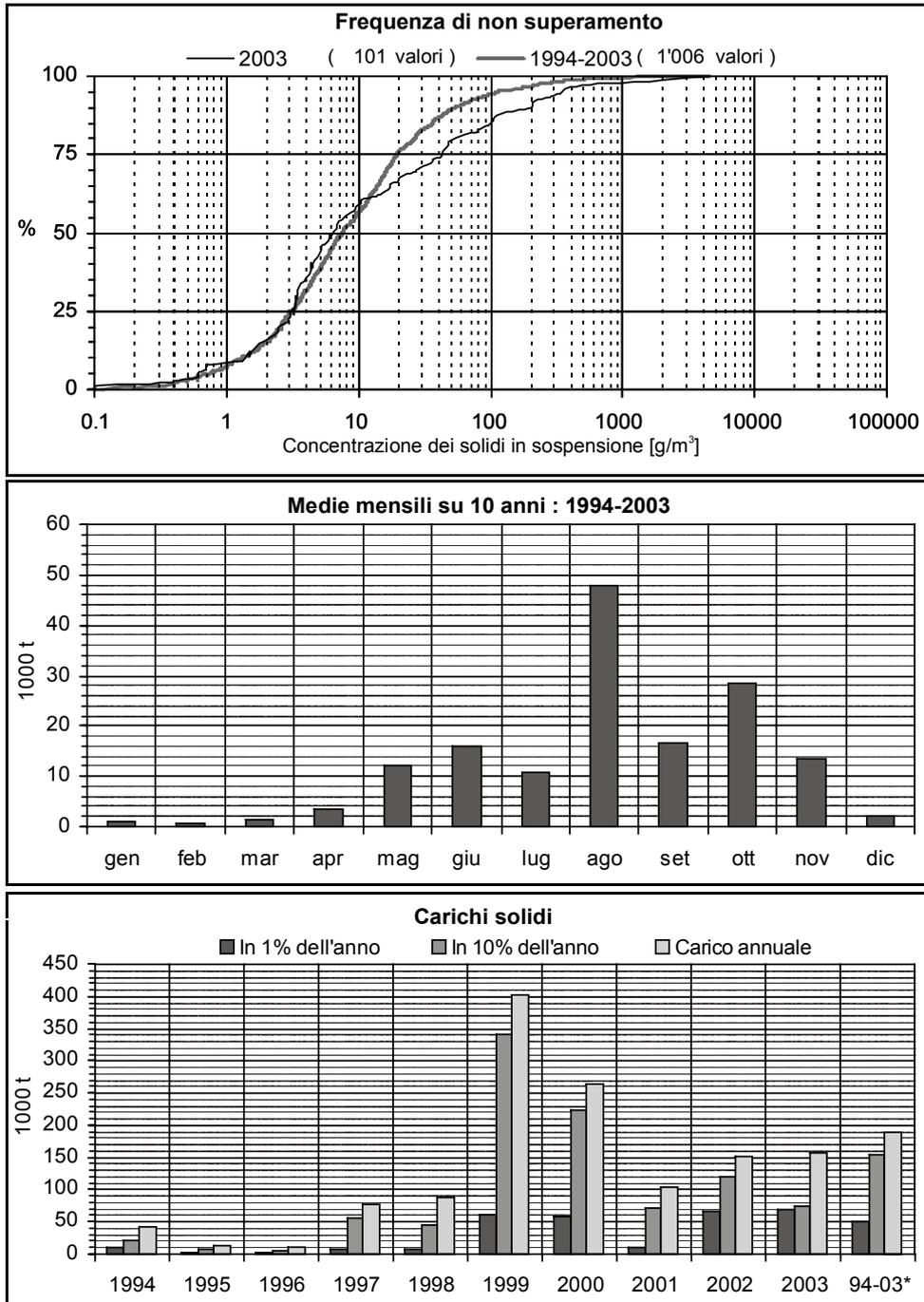
Maximale Jahresfracht seit Messbeginn: 316 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 1999

Minimale Jahresfracht seit Messbeginn: 19 · 10<sup>3</sup> t im Jahr 1998

Figur 92: Schwebstoffmessungen Thur – Halden (BWG 2004).

## A5.6 Ticino – Bellinzona

Coordinate: 721 245 / 117 025      Altitudine: 220.0 m s.m.  
 Bacino imbrifero: 1'515.0 km<sup>2</sup>      Inizio delle misure: 1983



\* Carico solido annuale, media degli ultimi 10 anni

Carico annuale massimo dall'inizio delle misure: 1'651 · 10<sup>3</sup> t nell'anno 1987

Carico annuale minimo dall'inizio delle misure: 10 · 10<sup>3</sup> t nell'anno 1996

Figur 93: Schwebstoffmessungen Ticino – Bellinzona (BWG 2004).

