Beiträge zur Hydrologie der Schweiz
Nr. 40

Bern, Februar 2013

Herausgegeben von der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und der Schweizerischen Hydrologischen Kommission (CHy)

Manfred Spreafico und Daniel Viviroli

Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz

Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele

Herausgeber
Manfred Spreafico
Geographisches Institut der Universität Bern
früher: Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

Daniel Viviroli
Belop GmbH, Sarnen
früher: Geographisches Institut der Universität Bern und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung

Druck
Publikation Digital AG

Bezug des Bandes
Hydrologische Kommission (CHy) der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (scnat)c/o

Geographisches Institut der Universität Bern
Hallerstrasse 12, 3012 Bern

http://chy.scnatweb.ch

Zitiervorschlag
Spreafico, Manfred und Daniel Viviroli (Hrsg.), 2013: Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz - Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 40, Bern.

Die Herausgabe dieser Publikation wurde unterstützt von der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)

sc | nat

Swiss Academy of Sciences
Akademie der Naturwissenschaften
Accademia di scienze naturali
Académie des sciences naturelles

ISBN 978-3-033-03838-7
ISSN 1421-1130

© SGHL und CHy

Vorwort

In der vorliegenden Publikation sind Kurzbeiträge zum Thema Hochwasserabschätzung in der Schweiz zusammengefasst. Sie ist zwischen Forschung und Praxis angesiedelt und soll eine praxisrelevante Übersicht des schweizerischen Kenntnisstandes mit wissenschaftlicher Tiefe vermitteln. Die Publikation hat nicht den Anspruch eine umfassende Darstellung der Arbeiten auf dem Gebiet der Hochwasserabschätzung in der Schweiz aufzuzeigen. Vielmehr wurden mit Schwergewicht Arbeiten und Produkte ausgewählt, welche vom Bundesamt für Umwelt durchgeführt, entwickelt, in Auftrag gegeben oder zumindest unterstützt worden sind.

Der Schwerpunkt bei den Beiträgen liegt auf den Berechnungsmethoden (Modelle) und der überblickenden Diskussion der Thematik. Es werden jedoch auch gezielt Informationen zu Grundlagen und Prozessen vermittelt. Diese werden durch die Anwendung in Fallbeispielen vertieft.

Die Publikation soll auch dazu dienen den Kenntnisstand der Schweiz auf dem Gebiet der Hochwasserabschätzung ins Ausland zu vermitteln.

Bern, im Februar 2013

Rolf Weingartner
Präsident der Hydrologischen Kommission

Zusammenfassung

Das Bundesgesetz über den Wasserbau hält u.a. fest, dass in allen Landesteilen der Schweiz gleiche Sicherheitsstandards für den Hochwasserschutz garantiert sein müssen, dass die Bevölkerung in den Planungsprozess von Hochwasserschutzmassnahmen eingebunden werden muss und dass nachhaltige Schutzmassnahmen geplant und ausgeführt werden sollen. Ausgehend von diesem Gesetz hat die Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT) einen Vorschlag für den Prozess des integrierten Hochwasserschutzes in der Schweiz mit Grundlagenbereitstellung, Intervention nach Hochwasserereignissen, Instandstellung, Prävention und Vorsorge erstellt.

In der vorliegenden Publikation werden ausgewählte Beispiele von Massnahmen im integralen Hochwasserschutz der Schweiz vorgestellt. Prioritär wurden dabei Grundlagen, Methoden und Beispiele aus den Bereichen der Hochwasserabschätzung und des Sedimenttransportes ausgewählt, welche vom Bundesamt für Umwelt in irgendeiner Form unterstützt wurden.

Im Kapitel 1 finden sich einige generelle Angaben zum Hochwasserschutz in der Schweiz.

Im Kapitel 2 werden Dienstleistungen der Abteilung Hydrologie beim Bundesamt für Umwelt dargestellt. Es wird kurz auf die Messgeräte und Messmethoden eingegangen und dann das Produkt Hochwasserstatistik vorgestellt. Abschliessend werden Hinweise zur Datenverfügbarkeit und Güte von Hochwassermessungen gegeben.

In Kapitel 3 folgt ein Überblick über Tätigkeiten auf dem Gebiet der Feststoffbeobachtung in der Schweiz mit Angaben zum Geschiebesammlermessnetz der GHO und Verfahren zur Abschätzung des Geschiebetransportes in Wildbachgebieten.

Das Kapitel 4 befasst sich mit dem Problem der Erfassung, Häufigkeit und Analyse von historischen Hochwassern. Daraus werden Konsequenzen abgeleitet.

Im Kapitel 5 werden Erkenntnisse aus dem Bereich Umweltveränderungen und deren Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse in der Schweiz aufgezeigt. Ausgegangen wird von Veränderungen die in der Vergangenheit stattgefunden haben und dann wird auf zukünftige Veränderungen eingegangen.

Kapitel 6 gibt eine kurze Übersicht über die verfügbaren Methoden der Hochwasserabschätzung.

Im Kapitel 7 wird das Modell PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) vorgestellt, welches auf einer Kaskade linearer Einzelspeicher und spezifischen Modulen für Schnee, Gletscher, Interzeption, Bodenfeuchte und Verdunstung, sowie Abflussbildung und Abflusskonzentration beruht.

Kapitel 8 zeigt eine Einführung in die Software HQx_meso_CH. Diese Software ermöglicht in mittelgrossen Einzugsgebieten von 10 – 500 km2 ohne Abflussmessungen Hochwasserabflüsse mit beliebiger Wiederkehrperiode mittels neun verschiedener Verfahren abzuschätzen.

In Kapitel 9 findet sich eine Einführung in die Regulierung des Juragewässersystems mithilfe eines hydraulischen Modelles basierend auf der Software FLUX-FLORIS.

Im Kapitel 10 wird am Beispiel Sihl die Möglichkeiten der Hochwasserprognose mithilfe der Modellkette PREVAH-FLORIS aufgezeigt. Es wird hier auch ausgeführt wie die Prognose in der Praxis umgesetzt wird.

Im Kapitel 11 werden 3 Ansätze für die Hochwasserabschätzung und –vorhersage im Kanton Wallis vorgestellt: Eine Methode für die Abschätzung extremer Hochwasser für die Stauanlagensicherheit (CRUEX), die Entwicklung der Hochwasserschutzstrategie des Kantons Wallis

(CONSECRU) und das System MINERVE für die Vorhersage und das Management von Hochwasser.

Kapitel 12 zeigt ein Verfahren, welches die Beurteilung der Auswirkungen von wasserbaulichen Massnahmen auf den Feststofftransport ermöglicht. Die Anwendung des Verfahrens wird am Fallbeispiel Houetenbach aufgezeigt.

Im Kapitel 13 wird die Anwendung des Geschiebeabschätzverfahrens nach Gertsch für Ereignisse mit mehr als 100-jähriger Wiederkehrperiode in Einzugsgebieten kleiner als 10 km2 am Fallbeispiel Rote Bach dargestellt.

Im Kapitel 14 werden Resultate und Erkenntnisse der Untersuchungen der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL auf dem Gebiet Geschiebetransport in Wildbächen und Gebirgsflüssen unter Berücksichtigung der Makrorauigkeit vorgestellt.

Résumé

La loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau prescrit pour toutes les régions de Suisse les mêmes standards de sécurité concernant la protection contre les crues. De plus, la population locale doit être intégrée dans le processus de planification de mesures contre les crues. Des mesures de protections durables doivent être planifiées et mises en œuvre. Sur la base de cette loi fédérale, la plate-forme nationale « Dangers naturels » (PLANAT) a développé un concept pour la protection intégrée contre les crues en Suisse : le cycle de gestion intégrée des risques contient la mise à disposition de données, l'intervention après un sinistre, la remise en état, la prévention ainsi que la préparation.

Dans cette publication, des exemples pertinents de mesures dans le cadre de la protection intégrée contre les crues sont présentés. Une attention particulière est portée aux données, aux méthodes ainsi qu'à des exemples émanant de l'évaluation des crues et du transport de sédiments et soutenus par l'Office fédéral de l'environnement.

Le chapitre 1 esquisse l'état actuel de la protection contre les crues en Suisse.

Le chapitre 2 présente les services de la division Hydrologie de l'Office fédéral de l'environnement. Après un aperçu des instruments et des méthodes de mesure, la statistique des crues ainsi que la qualité et la disponibilité des observations sont discutées.

Un aperçu des activités concernant le transport de sédiments en Suisse est donné au chapitre 3. On y trouve des informations sur le réseau de mesures des dépotoirs à alluvions du groupe d'hydrologie opérationnelle (GHO) ainsi que sur les méthodes d'estimation du transport d'alluvions dans les régions à torrents.

Le chapitre 4 est consacré à la problématique du recensement, de la fréquence et de l'analyse de crues historiques et aux conclusions qui en découlent.

Le chapitre 5 se penche sur les changements environnementaux et leurs conséquences sur les débits de crue en Suisse. Sur la base des changements passés, des hypothèses sont formulées pour l'avenir.

Les méthodes disponibles pour l'évaluation des crues sont résumées dans le chapitre 6.

Le modèle PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) repose sur une cascade de réservoirs linéaires simples et sur des modules spécifiques pour la neige, les glaces, l'interception, l'humidité du sol et l'évaporation ainsi que les processus de formation et de concentration du débit. PREVAH est présenté au chapitre 7.

Le chapitre 8 constitue une introduction au software HQx_meso_CH. Ce software permet d'estimer – sans observations - les débits de crue pour les bassins versants de taille moyenne (10-500 km^2). Ceux-ci peuvent être estimés pour un temps de retour quelconque à l'aide de neuf procédés différents.

Le réseau hydrographique du Jura est régulé à l'aide d'un modèle hydraulique basé sur le software FLUX-FLORIS. Le procédé est décrit au chapitre 9.

Dans le chapitre 10, les possibilités de prévision des crues sur la base de la chaîne de modèles PREVAH-FLORIS sont montrées à l'exemple pratique de la Sihl.

Trois procédés d'évaluation et de prévision des crues en Valais sont exposés au chapitre 11 : une méthode pour l'estimation de crues extrêmes pour la sécurité des ouvrages d'accumulation (CRUEX) ; le développement d'une stratégie de protection contre les crues pour le Valais (CONSECRU) et le système MINERVE pour la prévision et la gestion de situations de crue.

Un procédé pour l'appréciation des conséquences de projets d'aménagement de cours d'eau sur le transport de sédiments ainsi qu'une étude de cas (Houetenbach) sont présentés au chapitre 12.

Pour l'estimation de la quantité de charriage pour des événements extrêmes (temps de retour supérieur à 100 ans) dans les bassins versants de surface inférieure à 10 km^2, un procédé a été développé par Gertsch. Celui-ci est appliqué au torrent Rote Bach dans le chapitre 13.

Enfin, le chapitre 14 présente les résultats des investigations de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL dans le domaine du charriage des torrents et des rivières de montagne sous considération de la macro-rugosité.

Summary

The Flood Control Act of Switzerland emphasises the requirements that equal safety standards in all parts of the country should be guaranteed, that the involved population must be integrated in the planning process of protection measures and that sustainable protection measures must be planned and implemented. Based on this act the National Platform for Natural Hazards (PLANAT) has set-up the process of integrated flood risk management cycle including assessing of hazards and risks, intervention after flood events, recondition, reconstruction, prevention and preparation.

In this publication some selected examples out of the large amount of measures necessary for integrated flood risk management are presented. Priority has been given to measures for the estimation of floods and sediment transport issues and to activities supported by the Swiss Federal Office for the Environment.

In Chapter 1 some general information related to flood protection in Switzerland is presented. More detailed information hereto in English can be found in “Swiss Contribution to the Integrated Flood Management Tool: Laws, Regulations and Technical Standards of Flood Management” of the Associated Programme on Flood Management of the World Meteorological Organization (publication should be ready mid of 2013).

Chapter 2 describes services of the Division of Hydrology of the Swiss Federal Office for Environment. Described topics cover measurement equipment, measurement methods, extreme flood flow statistics, availability and accuracy of data.

Chapter 3 shows an overview of the activities carried-out in the field of the observation of sediment transport and deposition in Switzerland. Special information is given related to the Swiss network of sediment measurement in sediment retention basins and methods for the estimation of sediment transport in alpine basins.

Chapter 4 describes the determination, frequency and analysis of historical floods and points out the consequences gained by the investigations.

In Chapter 5 the actual knowledge about the impacts of environmental changes on the flood flows in Switzerland is presented. Changes in the past are analysed and possible future changes are shown.

Chapter 6 provides a brief overview of the available methods for the estimation of flood flows in Switzerland.

In Chapter 7 the model PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) is described, which is based on a cascade of linear single storages and specific modules for snow, glacier, interception, soil humidity and evapotranspiration, as well as flow generation and flow concentration.

Chapter 8 gives an introduction into the software HQx_meso_CH. This software enables the estimation of flood flows of any recurrence intervals in basins areas of 10 – 500 km2, where no discharge measurements are available. Estimations can be made using nine different hydrological models.

In Chapter 9 an introduction into the regulation of the Jura lake system with the help of a hydraulic model based on the software of FLUX-FLORIS is provided.

In Chapter 10 the capabilities of the model chain PREVAH-FLORIS for the flood flow forecast is shown. In addition the use of the forecast for flood flow management is presented.

In Chapter 11 three methods for the estimation of flood flow and the handling of flow forecast in the canton of Valais are described: A method for the estimation extreme flood flows related

to the security of dams (CRUEX), the development of a flood protection strategy in the canton Valais (CONSECRU) and the system MINERVE for the forecast and the management of flood flow.

Chapter 12 shows a procedure, with which the impacts of hydraulic constructions on sediment transport can be determined. The procedure is shown at the case study Houetenbach.

In Chapter 13 the application of the Gertsch method for the estimation of sediment transport with recurrence intervals of more than 100 years in catchment areas smaller than 10 km2 is presented. As case study the Rote Bach is selected.

In Chapter 14 results and new knowledge out of a larger investigation of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research related to sediment transport in torrents and mountainous rivers taking into account macro roughness are presented.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 3

Zusammenfassung 5
Résumé 7
Summary 9

1. **Einleitung**
Manfred Spreafico 13

2. **Hochwassermessung**
Beat Sigrist, Caroline Kan, Daniel Streit 19

3. **Feststoffbeobachtung in der Schweiz**
Manfred Spreafico, Alessandro Grasso 25

4. **Historische Hochwasser**
Petra Schmocker-Fackel, Felix Naef 33

5. **Umweltveränderungen und Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse Schweiz**
Bruno Schädler 41

6. **Methoden für die Hochwasserabschätzung**
Daniel Viviroli 47

7. **Modell PREVAH**
Daniel Viviroli 51

8. **HQx-meso-CH**
Martin Barben 59

9. **Regulierung des Juragewässersystems: Modellgestützte Optimierung von Betriebsparametern mit FLUX/FLORIS 2000**
Jürg Trösch 67

10. **Hochwasserprognose Fallbeispiel: Sihl**
Massimiliano Zappa 73

11. Estimation et prévision des crues en Valais
Dominique Bérod 79

12. Berechnung der Auswirkungen von wasserbaulichen Massnahmen auf den Feststoff-transport
Fallbeispiel: Houetenbach, Gemeinde Bönigen
Christoph Lehmann.....87

13. Anwendung des Geschiebeabschätzverfahrens nach Gertsch
Fallbeispiel: Rote Bach, Gemeinde Lauterbrunnen
Eva Gertsch.....95

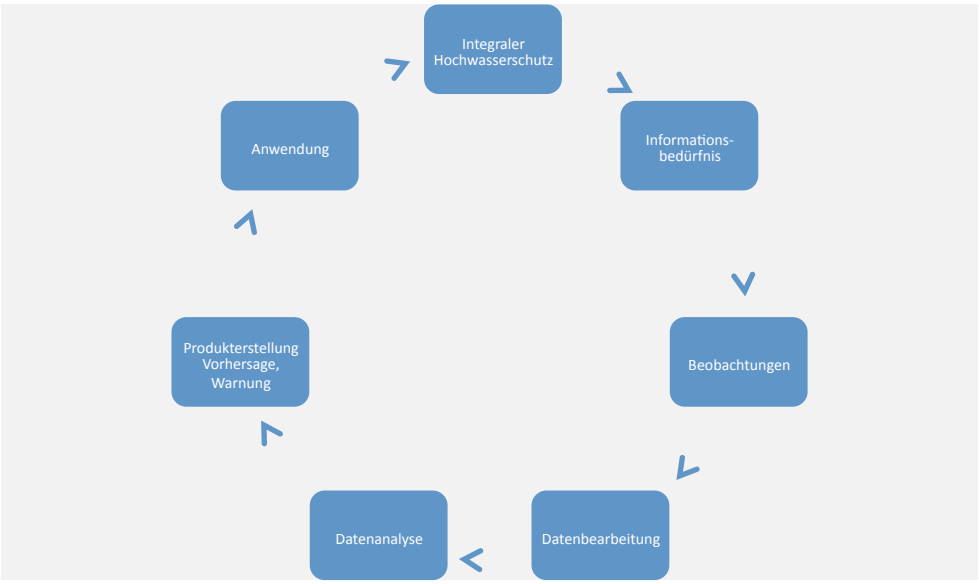
14. Berechnung des Geschiebetransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen unter Berücksichtigung von Makrorauigkeit
M.Nitsche, D. Rickenmann, A. Badoux, J.M Turowski, J.W.Kirchner 101

1

Einleitung

Manfred Spreafico
Geographisches Institut der Universität Bern

Die Bedürfnisse des integralen Hochwasserschutzes bestimmen die Bereitstellung der hydrologischen Grundlagen. Die Planung des Messnetzes, die Datenerhebung, die Analyse der Beobachtungen, die Datenbearbeitung sowie die Produkte Abflussvorhersage und Warnung sind auf diese Bedürfnisse abzustimmen.



Figur 1: Zyklus der hydrologischen Datenbereitstellung

Damit die Bereitstellung effizient erfolgen kann müssen die gesetzlichen Grundlagen, die Hochwasserschutzstrategie und die praktische Umsetzung der Hochwasserschutzmassnahmen bekannt sein. Deshalb wird hier kurz auf die schweizerischen Gegebenheiten im Hochwasserschutz eingegangen.

1.1 Gesetzliche Grundlagen

Der Hochwasserschutz in der Schweiz wird durch Bundesgesetze und kantonale Gesetze sowie einschlägige Verordnungen geregelt. Dabei basieren die Bundesgesetze auf der Bundesverfassung und die kantonalen Gesetze auf den Bundesgesetzen.

Das Bundesgesetz über den Wasserbau schreibt vor, dass eine umfassende Gefahrenerhebung und –analyse, eine Differenzierung der Schutzziele, eine zweckmässige Massnahmenpla-

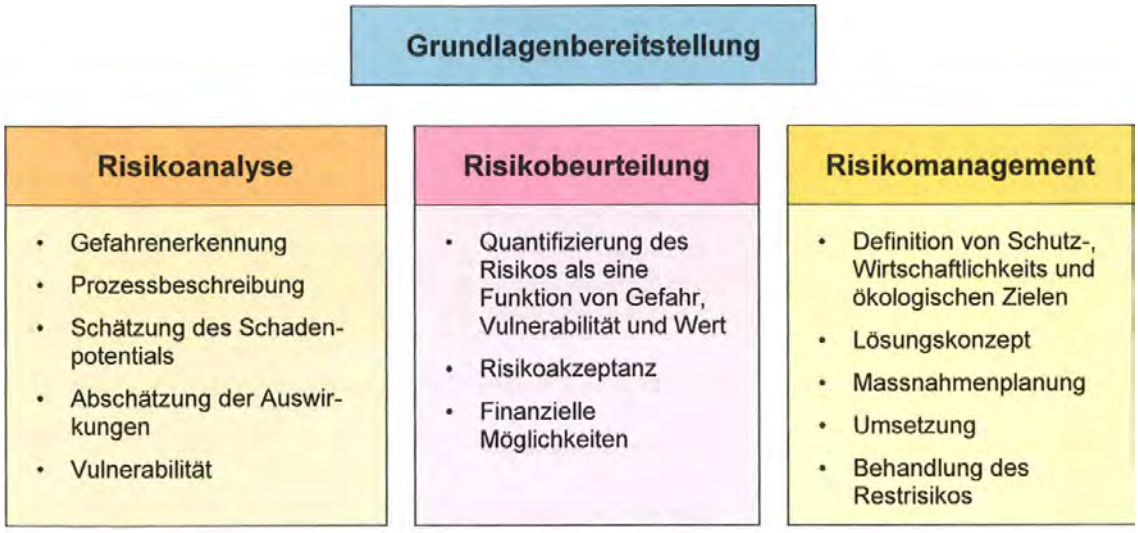
nung (Hochwasserdämpfung, Unterhalt der Gewässer, Einbezug der ökologischen Bedürfnisse) und eine Begrenzung des verbleibenden Risikos sicherzustellen ist.

Um die Umsetzung der Gesetze und Verordnungen zu erleichtern, haben die Bundesstellen und die Kantone nützliche Publikationen (Richtlinien, Wegleitungen, Empfehlungen, Berichte, Fallbeispiele, Analysen abgelaufener Hochwasserereignisse, Ausbildungsunterlagen, usw.) herausgegeben.

1.2 Strategie im Hochwasserschutz

Der Leitsatz der Nationalen Plattform Naturgefahren PLANAT lautet „Von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur". Dieser Leitsatz is auch für den modernen Hochwasserschutz gültig. Bei der „Gefahrenabwehr" versucht man wenn immer möglich ein Schadenereignis, z.B. eine Überschwemmung, vollständig zu verhindern. Die Erfahrung zeigt aber, dass die Natur mit technischen Massnahmen nicht vollständig beherrschbar ist und damit ist das Ziel der Gefahrenabwehr vielfach nicht erreichbar. „Risikokultur" bedeutet in diesem Zusammenhang, dass man lernt mit einem Restrisiko zu leben. Es wird akzeptiert, dass dort, wo man Schäden mit vernünftigem Aufwand nicht vollständig verhindern kann, ein Restrisiko verbleibt.

Der Ansatz für die Lösung des Hochwasserschutzproblems liegt dann in der Grundlagenbereitstellung, der Risikoanalyse, der Beurteilung des Risikos und im Risikomanagement (siehe Figur 2).



Figur 2: Ansatz für die Lösung von Hochwasserschutzproblemen

Das Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) hat basierend auf dem Bundesgesetz über den Wasserbau eine Wegleitung Hochwasserschutz an Fliessgewässern verfasst. Darin wird eine Strategie für den Hochwasserschutz dargestellt. Als Grundsätze für den Hochwasserschutz werden darin festgehalten (BWG, 2001) :

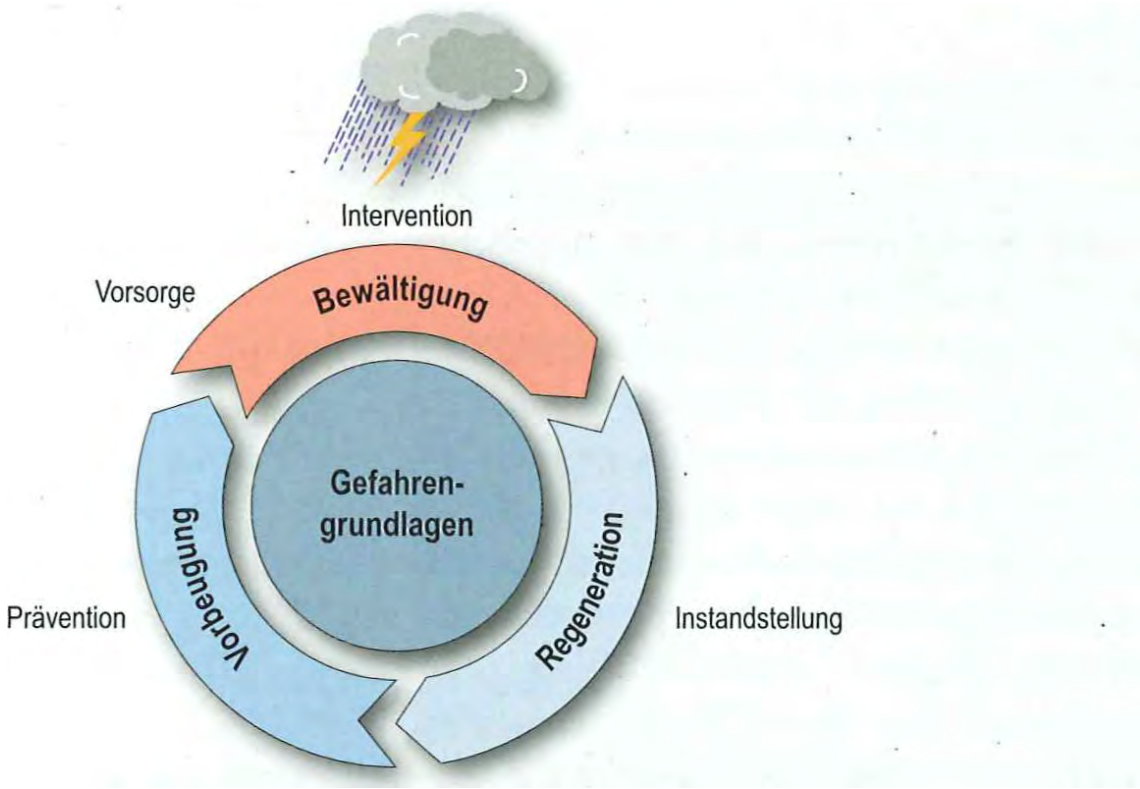
- Gefahrensituation klären;
- Ökologische Defizite ermitteln;
- Schutzziele festlegen;
- Rückhalten, wo möglich;
- Durchleiten, wo nötig;
- Eingriffe minimieren;
- Schwachstellen überprüfen;
- Unterhalt gewährleisten;
- Raumbedarf sichern;
- Bedürfnisse respektieren.

In dieser Wegleitung finden sich auch weitere Angaben zum Vorgehen bei der Planung im Hochwasserschutz, dem administrativen Verfahren, der Projektierung und den Massnahmen.

Die Massnahmen im Hochwasserschutz werden kontinuierlich an neue Forderungen und an technische Fortschritte angepasst.

1.3 Analyse abgelaufener extremer Hochwasserereignisse

Die ausgezeichneten und umfassenden Analysen der Hochwasser 2005 (BAFU/WSL, 2007) und BAFU/WSL, 2008) und der Hochwasser 2007 (BAFU, 2009) haben viele neue Erkenntnisse bei den Prozessen der Meteorologie, der Hydrologie, der Hangstabilität, des Sedimenttransportes und der Hydraulik gebracht. Zudem wurden die Methoden der Gefahrenbeurteilung, Vorbeugung und der Bewältigung auf ihre Tauglichkeit untersucht. Wie im Teil 2 der Ereignisanalyse Hochwasser 2005 aufgeführt, wird aufgrund der Analyse ein leicht veränderter Vorschlag für die Darstellung des integralen Risikomanagement vorgeschlagen (Figur 3).



Figur 3: Veränderter Vorschlag für die Darstellung des integralen Risikomanagements (BAFU/WSL, 2008)

Bei der Analyse zeigte sich erneut, wie wichtig die hydrometeorologischen Messungen und Vorhersagen für das Hochwassermanagement sind. Ganz generell muss der Grundlagenbereitstellung eine grössere Beachtung geschenkt werden, deshalb stehen sie auch im Zentrum des Risikokreislaufes. Gemäss dem Vorschlag beginnt die Bewältigung, wegen der besseren Vorhersagemöglichkeiten, schon vor dem Ereignis mit der Vorsorge, d.h. der Massnahmen zur Vorbereitung der eigentlichen Intervention. Dazu gehört die Planung und Vorbereitung organisatorischer Massnahmen, das Planen und Üben von entsprechenden Einsätzen, die Ausbildung und Sicherstellung der materiellen, personellen und der Führungsbereitschaft.

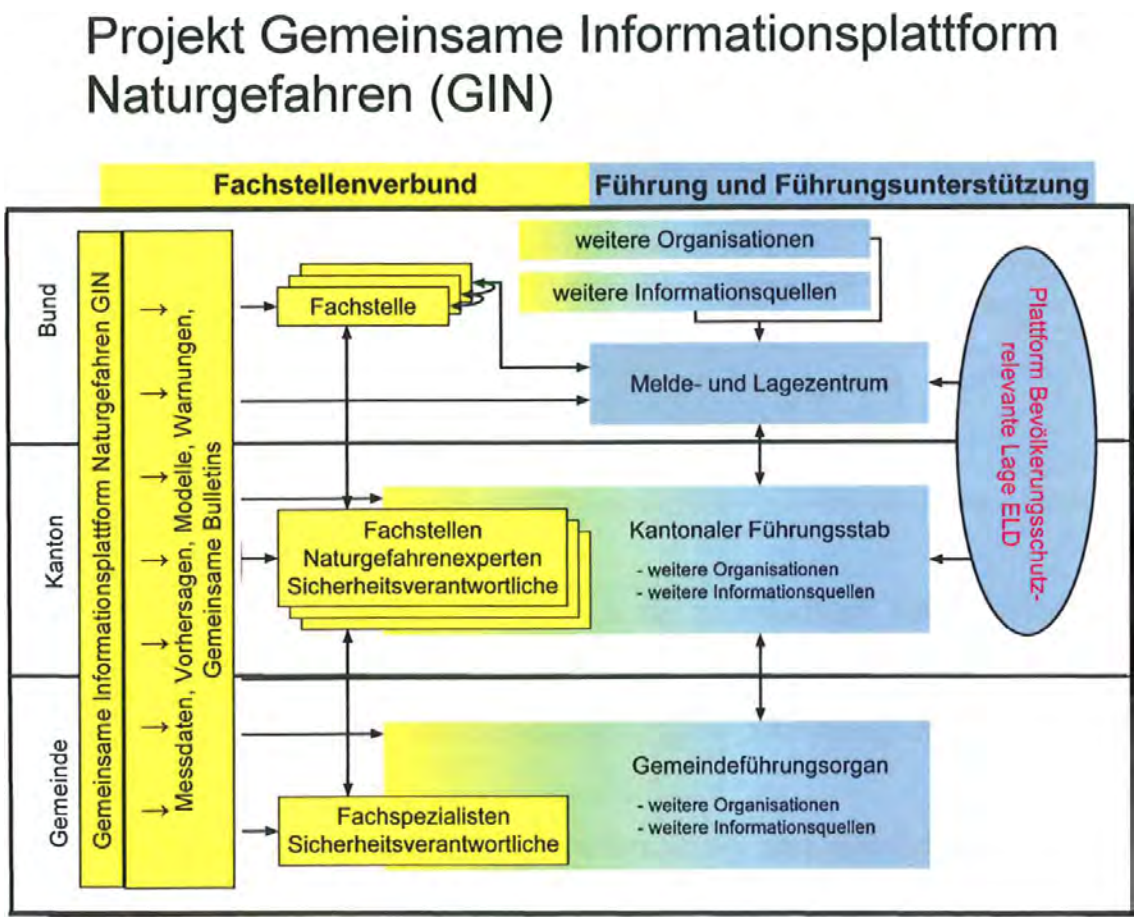
Die untersuchten Fallbeispiele zeigen, dass Objektschutz eine wirksame und kostengünstige Massnahme zur Schadensminderung darstellt. Entscheidend sind die richtige Einschätzung der Gefährdungsszenarien und insbesondere der möglichen Intensitäten sowie eine sorgfältige Planung und vollständige Realisierung der Massnahmen. Objektschutzmassnahmen können ohne grosse Mehrkosten realisiert werden und tragen erheblich zur Reduzierung der Risiken bei.

1.4 Die Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren

Verantwortliche für die Prävention und Intervention bei Hochwasser sind auf Messungen, Vorhersagen und Fachinformationen angewiesen. Sie benötigen diese Informationen zeitgerecht und zuverlässig. Gestützt auf einen Beschluss des Bundesrates 2007 haben das Bundesamt für Umwelt (BAFU), das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) und das WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF eine Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren (GIN) aufgebaut. Neben den Messdaten von meteorologischen und hydrologischen Stationen integrierten MeteoSchweiz, BAFU und SLF ihre bekannten Produkte wie Niederschlagsradar, Wetterprognosemodelle, Abflussvorhersagen oder das Lawineninformationssystem IFKIS in GIN. Darüber hinaus wurden Synergien und gemeinsame Stärken genutzt und neue, kombinierte Produkte beispielsweise für Hochwassersituationen (Niederschlag, Schneeschmelze, Abfluss) entwickelt (Figur 4).

Figur 4: Beispiel einer Darstellung in GIN

GIN verbessert die Bewältigung von Schadensereignissen und unterstützt die Einsatzkräfte auf den Stufen Bund, Kantone und Gemeinden bei ihrer Arbeit. Damit wurde die bestehende Lücke bei der Unterstützung der Fachleute für Risikomanagement geschlossen (Figur 5).



Figur 5: Stellung von GIN in der Gefahrenbewältigung

Durch die Entwicklung des Hochwasserschutz-Managements wird GIN eine bedeutend wichtigere Rolle zukommen als ursprünglich gedacht. GIN wird vielmehr eine Plattform und Drehscheibe werden, mit der nebst den oben genannten Vorhersagen auch regionale und lokale Prognosen und Informationen verwaltet und zur Verfügung gestellt werden. Zudem sollen auch Daten von Kantonen und allenfalls Dritter aufgeschaltet und die Zugriffsberechtigung erweitert werden.

Literatur

BWG (2001): Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitungen Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern

BAFU/WSL (2007): Bezzola, G.R., Hegg, C. (Eds).,Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 Prozesse, Schäden und erste Einordnun, Bundesamt für Umwelt, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 707, Bern.

BAFU/WSL (2008): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen, Umwelt-Wissen Nr. 825, Bern.

*BAFU (*2009): Bezzola, G.R., Ruf, W. (Eds.), Ereignisanalyse Hochwasser August 2007 Bundesamt für Umwelt, Umwelt-Wissen Nr. 927

2

Hochwassermessung

Beat Sigrist, Caroline Kan, Daniel Streit
Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

Die Messung des Wasserstandes bei Hochwasser unterscheidet sich nicht wesentlich von der Messung bei tieferen Wasserständen. Zu berücksichtigen ist die grosse Dynamik des Wassers, die sich vor allem in grossen Wellen, hoher Turbulenz, starkem Lufteintrag, hohem Feststoffgehalt und grossen mechanischen Kräften äussert.

Grundsätzlich lassen sich alle gebräuchlichen Wasserstandsmesser wie Schwimmer, Pneumatik, Drucksonde und Radar auch bei Hochwasser einsetzen.

Gerät	Vorteil	Nachteil	Bemerkung
Schwimmer	Im beruhigten Rohr oder Schacht	Kommunikation mit Fluss ev. gestört	Pegellatte im Schacht und im Fluss vergleichen
Pneumatik	Elektronisch dämpfbar	Gefährdet durch Geschiebe und Geschwemmsel	
Drucksonde	Elektronisch dämpfbar	Gefährdet durch Geschiebe und Geschwemmsel	
Radar	Ausserhalb des Wassers und damit geschützt	Grosse Wellen und Gischt stören Wasserspiegelerfassung	Beruhigten aber repräsentativen Standort wählen. Mittelwertbildung elektronisch dämpfen.

2.1 Messgeräte

Die Messgeräte, die bei Hochwasser eingesetzt werden, sind dieselben wie bei tieferen Abflüssen. Dabei steigen jedoch vor allem die Anforderungen an das Personal und die Gefährdung von Personal und Gerätschaften.

Gerät	Vorteil	Nachteil	Bemerkung
Messflügel	Messresultate gut reproduzierbar	Muss bis zur Sohle eingetaucht werden	
Akustik/Doppler	Misst von der Oberfläche aus	Teuer, Blackbox	
Leitfähigkeitsmessung mit Salz	billig	Limitiert auf kleine Abflüsse (2-5 m3)	
Lichtleiterfluorimeter	Auch für grosse Abflüsse	teuer	

2.2 Messmethoden

Als Messmethoden kommen vor allem solche zur Anwendung, die eine rasche Durchführung der Abflussbestimmung erlauben. Dies weil der Durchgang einer Hochwasserwelle schnell erfolgt und die Abflussmessung bei stark variierendem Pegel rasch ungenau wird.

Methode	Vorteil	Nachteil	Bemerkung
Flügelmessung	Standardausrüstung	Lange Messzeit	Oberflächenmessung reduziert Zeitbedarf
ADCP-Messung	Kurze Messzeit	Störung durch Wellen und Geschwemmsel	
Verdünnungsmessung	Kurze Messzeit		Messstandorte vorgängig festlegen
Oberflächengeschwindigkeitsmessung mit Radar oder Video	Permanentmessung, berührungslos	Eher ungenau	

2.3 Messnetz

Verwertbare Hochwasserdaten erhält man meist erst nach mehreren Jahren Messzeit (> 10 Jahre). Der Anspruch an die Messgenauigkeit und Messverfügbarkeit ist hoch, so dass es sich meist nicht lohnt, Messstationen nur für die Bestimmung der Hochwasserabflüsse zu betreiben. Damit man den ganzen Anstieg und Durchgang einer Hochwasserwelle erfassen kann, muss man alle Pegelstände und Abflüsse messen können. Die Anforderungen an die zeitliche Auflösung der Daten sind hoch. Ein gut ausgebautes Messnetz mit Redundanzen erlaubt das Überbrücken von Messausfällen und erleichtert die Bestimmung der Spitzenabflüsse mit Vergleichen.

2.4 Hochwasserstatistik

Die Abteilung Hydrologie des BAFU betreibt für alle eidgenössischen Abflussmessstationen eine Hochwasserstatistik-Datenbank, die alljährlich sowie zusätzlich bei Bedarf nachgeführt wird. Sie dient als Basis für die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, gibt aber unter anderem auch Auskunft über die Rangierung eines Hochwasserereignisses innerhalb der Zeitreihe einer Messstation. Bei den Berechnungen hält sich das BAFU an die "Empfehlungen zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten" (DVWK, 1979). Die Analyse basiert auf den jährlichen Hochwasserspitzen. Die verwendeten Maxima stimmen dabei nicht immer mit den Angaben in älteren Jahrbüchern überein, da in einigen Fällen nachträgliche Korrekturen

vorgenommen wurden. Die Auswertung umfasst die deskriptive Statistik der Hochwassermessreihe mit den notwendigen Kenngrössen für die Anpassung einer Verteilungsfunktion (je nach Parameterausprägung log-Pearson-III, Pearson-III oder Gamma) sowie die Berechnung der Hochwasserspitzenwerte für verschiedene Jährlichkeiten. Die Ergebnisse sind auf einem Resultatblatt zusammengetragen, welches für Stationen mit einer Messreihe von mehr als 20 Jahren auf der Internetseite des BAFU publiziert wird.

Die Abteilung Hydrologie setzt auch neuere Verfahren der Extremwertstatistik ein (z.B. DVWK, 1999). Diese berücksichtigen die Erkenntnis, dass es kein „richtiges" Berechnungsverfahren mit einer einzigen Lösung gibt, sondern ein Lösungsspektrum. Die Resultate der neueren Methoden unterscheiden sich zwar häufig von jenen des DVWK-Verfahrens 1979, erfahrungsgemäss liegen sie jedoch zumeist innerhalb des Vertrauensbereichs des letzteren. Dem Aspekt der Unsicherheit wird Rechnung getragen, indem das Vertrauensintervall im Frequenzdiagramm dargestellt wird.

Die vom BAFU publizierten Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit sind als erste Richtwerte zu betrachten. In einem konkreten Bemessungsfall müssen umfassendere Betrachtungen vorgenommen werden. Neben der Verwendung verfeinerter statistischer Verfahren gehören dazu auch der Einbezug von zusätzlichen Informationen (z.B. historische Hochwasser, Angaben zu Überflutungen, hydraulische Berechnungen) und Überlegungen bezüglich Kosten und Nutzen bzw. Risiko. Die für eigene Auswertungen benötigten Abflussdaten der eidgenössischen Messstationen können beim BAFU bezogen werden. Eine Beschreibung des Vorgehens zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten findet sich u. a. in [Meylan et al., 2008] oder [Spreafico et al., 2003].

Im Anschluss an grossräumige Hochwasserereignisse wurden vom Bund in den vergangenen Jahren mehrere umfassende Ereignisanalysen initiiert (Hochwasser 1987, 1999, 2000, 2005 und 2007). Die entsprechenden Publikationen können über die Internetseite des BAFU bezogen werden. Eine weitere Informationsquelle bildet der Hydrologische Atlas der Schweiz, welcher verschiedene Tafeln zum Thema Hochwasser enthält. Hochwasserstatistische Kennwerte langer Messreihen sind in der Tafel 5.6 (Hochwasserabflüsse – Analyse langer Messreihen) zu finden. Allerdings ist zu beachten, dass die Tafel den Stand der Daten bis 1990 repräsentiert. In der Tafel 5.12 (Hochwasserabflüsse – statistische Kennwerte 1971–2007) wird die Thematik aus der Tafel 5.6 wieder aufgenommen und vertieft. Einerseits können wesentlich längere Messreihen verwendet werden, andererseits werden neben den mittleren Jahreshochwasserspitzen und den Variationskoeffizienten zusätzliche Kennwerte analysiert.

2.5 Datenverfügbarkeit

In der Abteilung Hydrologie des BAFU wird mit grossem Einsatz daran gearbeitet, für die ganze Kette des Datenflusses von der Messstation bis zum Kunden eine möglichst hohe Verfügbarkeit zu gewährleisten. Im Feld werden die Stationen hochwassersicher gebaut und sowohl mit redundanten Mess- und Übertragungseinrichtungen als auch mit Notstromanlagen ausgestattet. Die Systeme im BAFU, von der Importschnittstelle bis zu den Internetservern werden ebenfalls redundant geführt. So kann sichergestellt werden, dass aktuelle Daten jederzeit erreichbar sind und den Nutzern über verschiedene Kanäle zur Verfügung gestellt werden können.

Den Behörden und der Öffentlichkeit stehen mehrere Möglichkeiten offen, sich individuell über die aktuelle Situation der Wasserstände und Abflüsse in den Schweizerischen Gewässern ins Bild zu setzen. Sie können aktuelle Daten mit einer kurzen Verzögerung sowohl übers Internet als auch über das Mobiltelefon herunterladen. Im Internet stehen unter anderem stets aktualisierte Übersichtskarten zur Verfügung wie zum Beispiel der Vergleich der Messwerte mit der Hochwasserstatistik. Ebenfalls im Internet sind die öffentlich verfügbaren Vorhersagestationen mit Prognosen für die nächsten drei Tage greifbar. Auf Grund der zunehmenden Wichtigkeit des Internet bei der Bewältigung von Hochwasserereignissen wird heute das Angebot redundant auf verschiedenen Servern zur Verfügung gestellt.

Für Behörden wird bei Bedarf der Datenbezug auch direkt ab der Messstation angeboten.

Aktuelle hydrologische Daten sind durch diese Dienste für den Benutzer jederzeit und überall greifbar. Wichtig zu wissen ist, dass es sich bei den aktuellen Daten immer um ungeprüfte Rohdaten handelt. Es wird weder in der Messstation noch vor der Publikation über Mobiltelefon oder im Internet eine Verifikation der Daten durchgeführt.

Als weitere Dienstleistung für Behörden, Kraftwerke und grössere Industriebetriebe, bietet die Abteilung Hydrologie den Hochwasseralarm direkt aus der Messstation an. In Absprache mit dem Kunden werden Schwellenwerte (Wasserstand) festgelegt, bei deren Überschreiten unmittelbar eine automatische Meldung via die Alarmzentrale CERTAS ausgelöst wird. Diese Dienstleistung wird heute für einen Grossteil der gut ausgebauten Messstationen angeboten.

Angebot des BAFU	Informationen und Linkliste
Internetangebot:	Aktuelle Daten (Verzögerung 10 Min - 1h) und Informationen www.hydrodaten.admin.ch www.hydrodaten2.admin.ch (Redundanz)
Abflussvorhersagen:	Abflussvorhersagen der nächsten drei Tage für die öffentlich verfügbaren Messstationen: http://www.hydrodaten.admin.ch/warnungen-vorhersagen/de/index.html?lang=de
Alarmstationen:	Dienstleistung für Behörden, Kraftwerken und grösseren Industriebetriebe - Hochwasseralarm direkt aus der Messstation
SMS-Dienst:	Aktuelle Daten (Verzögerung 10 Min - 1h) inkl. statistische Eckwerte der letzten 24 h. Abonnement fixe Zeit Abonnement Schwellenwert http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01832/01849/index.html?lang=de
Hydrowatch:	Javaapplikation für einfache Grafiken mit aktuellen Daten (Verzögerung 10 Min - 1h) http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01832/01850/index.html?lang=de

2.6 Güte

Die Güte der Hochwasserbestimmung an einer Messstation ist vor allem abhängig von der Güte der Abflussmessung, vom Ausmass der erforderlichen Extrapolation der Wasserstand-Abfluss-Beziehung (weil die Abflussmessung meist halt doch nicht beim Höchstabfluss hat durchgeführt werden können) und von der Art und Stabilität des Messquerschnitts.

Messquerschnitt	Vorteil	Nachteil	Bemerkung
Absturz	Gut berechenbar, stabil	Grosse Fliessgeschwindigkeit	Formelmässige Berechnung
Sohlenpflästerung	stabil		
Kiessohle		veränderlich	
Verkrautung	Kaum Geschiebetransport	Unsicherheit durch Krautwachstum	

Bei einer guten Hochwasser-Abflussmessung muss mit einem Fehler von 5-10% gerechnet werden. Je nach Art und Umfang der Extrapolation muss für die Bestimmung des Spitzenabflusses mit einer Unsicherheit von 10-30% gerechnet werden.

Literatur

DVWK, 1979: Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. Heft 101, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Bonn.

DVWK, 1999: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Regel 251, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Bonn.

Meylan, P., Favre, A.-C., Musy, A., 2008 : Hydrologie fréquentielle, une science prédictive. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

Spreafico, M., 2003: Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

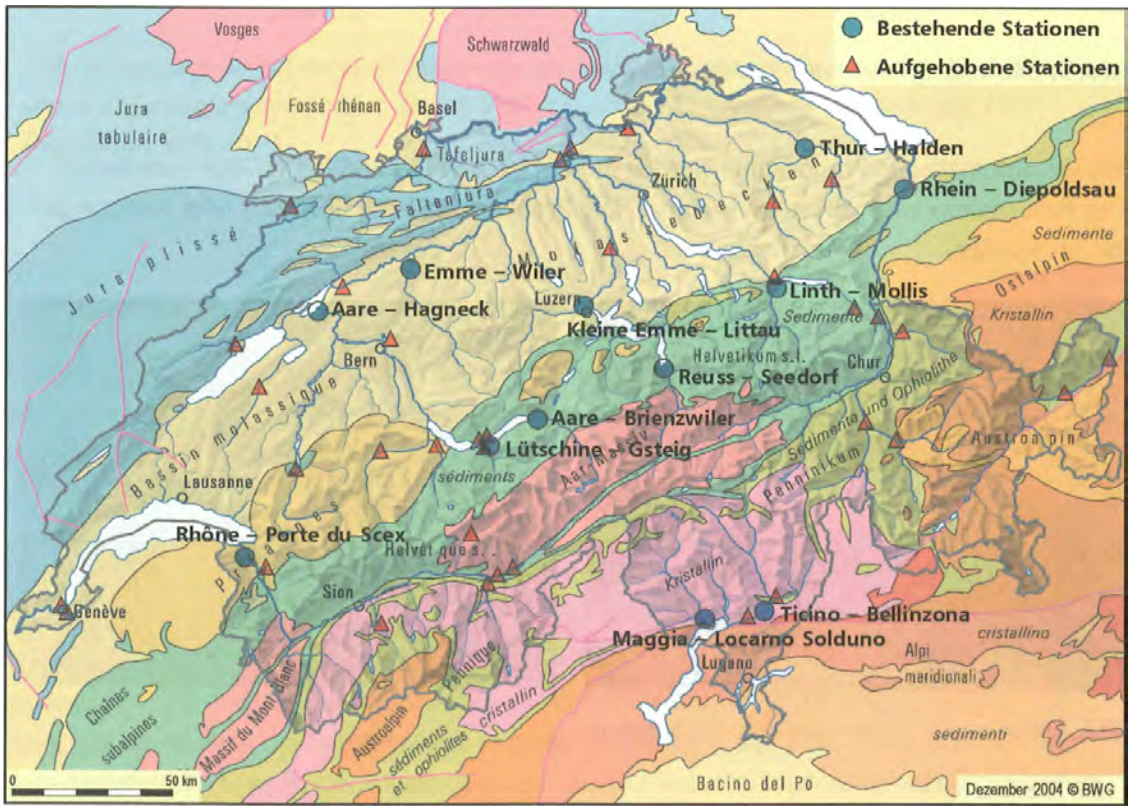
3

Feststoffbeobachtung in der Schweiz

Manfred Spreafico, Alessandro Grasso
Geographisches Institut der Universität Bern und Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

3.1 Einleitung

Im 19. Jahrhundert wurden zur Feststoffbeobachtung praktisch ausschliesslich Seegrund- und Deltaaufnahmen durchgeführt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann man mit Messungen im Einzugsgebiet, beispielsweise in den Versuchsgebieten Sperbel- und Rappengraben der WSL und seit 1962 wird das Schwebstoffmessnetz der Landeshydrologie für die langfristige Beobachtung des Schwebstofftransportes aufgebaut und betrieben. Das Messnetz deckt die wichtigsten Fliessgewässer in den Hauptstromgebieten der Schweiz ab. Damit können beispielsweise die Schwebstoffeinträge in die grössten Seen der Schweiz und der Schwebstoffaustrag aus der Schweiz ins Ausland ermittelt werden (siehe Figur 1).



Figur 1: Schwebstoffmessnetz der Landeshydrologie: Karte der Messstandorte mit geologischer Zugehörigkeit

Eine generelle Übersicht über die Feststoffbeobachtungen in der Schweiz findet sich in Tabelle 1.

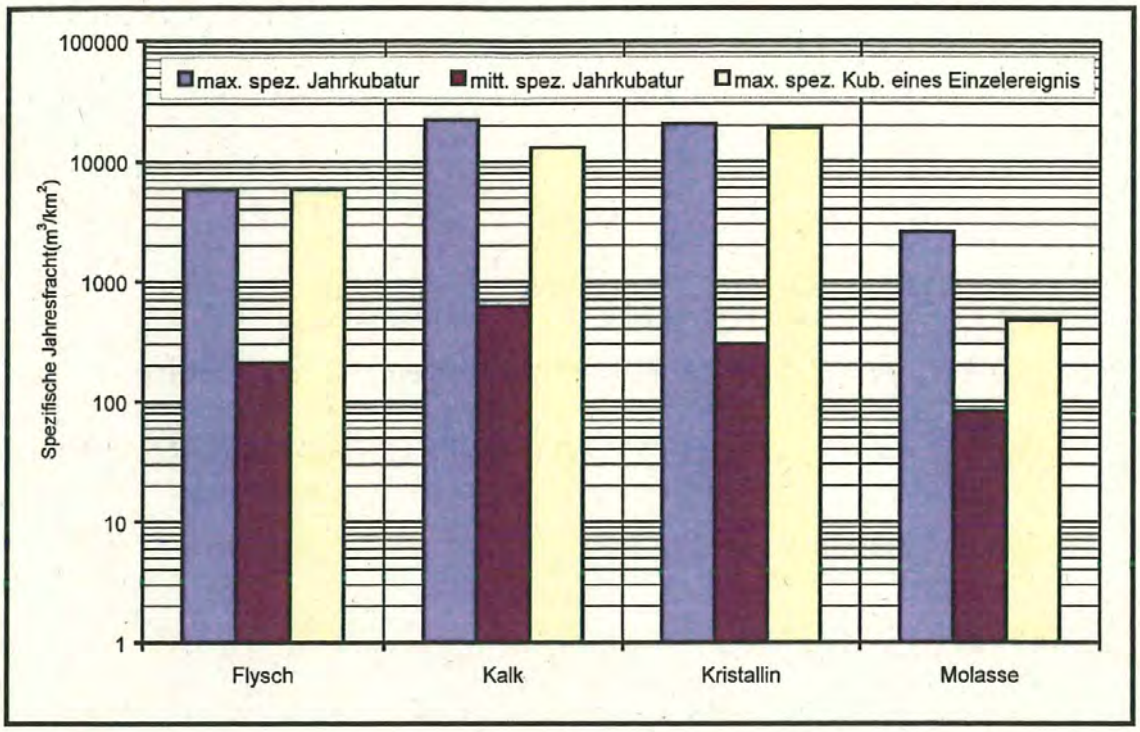
Tabelle 1: Generelle Übersicht der bis heute ausgeführten Feststoffbeobachtungen

FESTSTOFFART	WILDBÄCHE	FLÜSSE	SEEN
Geschiebe	Jahresfracht – Schätzungen, systematisch nur in Versuchsgebieten und dem GHO Geschiebemessnetz Katastrophenereignisse – Schätzung der Übermurungskubaturen oder der Ablagerungen in Geschiebesammlern, sporadisch, heute üblich – Abschätzung von Feststofffrachten zukünftiger Ereignisse mit Hilfe des Verfahrens GHO (1996) Ganglinie des Geschiebes – nur in Untersuchungsgebieten	Geschiebeführung – vereinzelte Messungen Geschiebefrachten – zusammen mit Schwebstoffen in Speichern und Seen – an Einzelstandorten	Mehrjahresfrachten In Deltas, in größeren Zeitabständen
Schwebstoffe	Schwebstoffführung und -fracht – systematisch nur in wenigen Versuchsgebieten	Schwebstoffkonzentration – an vielen Messstellen Schwebstoffführung – systematisch nur in wenigen Flussstrecken Schwebstofffracht – berechnet an Messstationen	Mehrjahresfrachten von Geschiebe und Schwebstoffen – In Seedeltas und Stauräumen, sporadisch Sedimentationsraten – Spezialuntersuchungen Zusammensetzung – Spezialuntersuchungen Schwebstoffbilanz – Spezialuntersuchung
Feststoffcharakteristiken	Kornverteilung, Raumgewicht – nur in Einzelfällen erfasst, meist Schätzungen	Korngrößenverteilung – sporadische Messungen	Kornverteilung – sporadische Messungen
Schwemmstoffe	Geschwemmselfracht – Schätzungen bei spez. Ereignissen	Geschwemmselfracht – sporadisch nach Hochwasserereignissen Eisfracht – sporadische Schätzungen	Geschwemmselfracht – Schätzung bei Hochwasserereignissen
Weitere Beobachtungen	Erosionspotenzial Feststoffhaushalt – spezielles Verfahren zur Abschätzung	Quer- und Längsprofile – alle 10 Jahre in vielen Flussstrecken Flussmorphologie – in Einzelfällen Mineralogie – sporadisch	Bathymetrische Aufnahmen – sporadisch Trübungsmessung – spezielle Fragestellungen – vereinzelt

3.2 Messnetz der Geschiebesammler der Gruppe für operationelle Hydrologie (GHO)

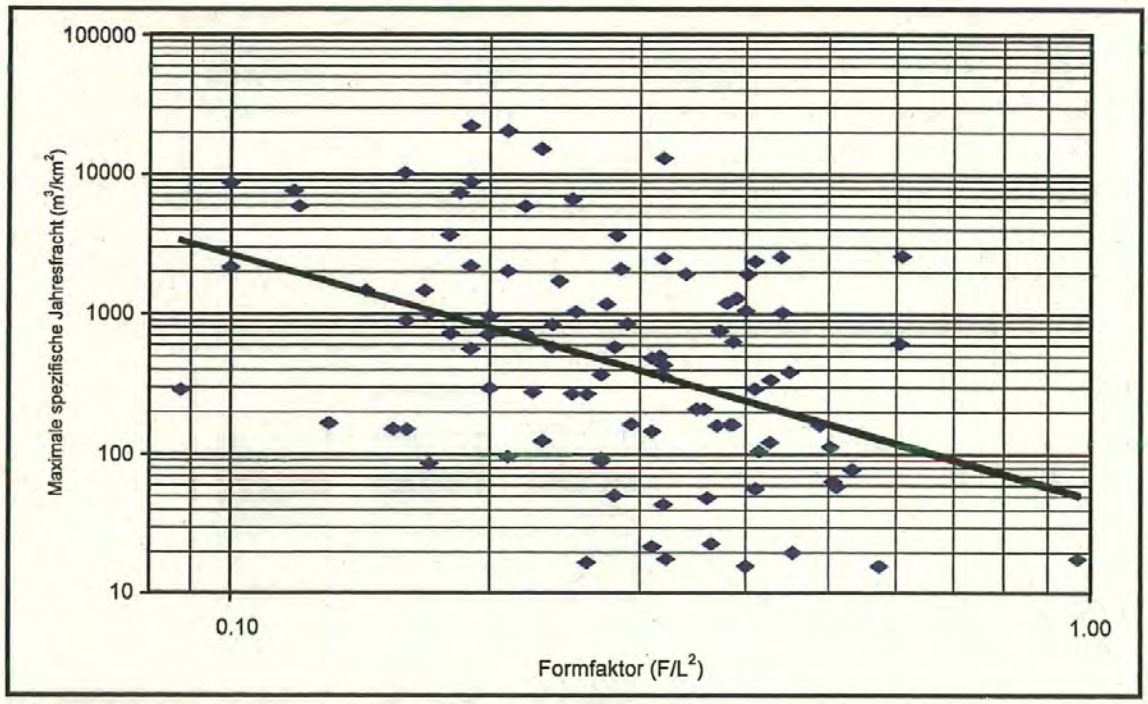
Seit 1987 erfassen die Landeshydrologie und die Eidg. Forschungsanstalt WSL zusammen mit interessierten Kantonen Feststoffe in Geschiebesammlern nach einem festgelegten Konzept (GHO,1984). Ziel dieses Messprogrammes ist die langfristige und kostengünstige Erfassung des Feststoffaustrags aus kleinen schweizerischen Einzugsgebieten. Um die Analyse der Messdaten zu erleichtern wurden die Einzugsgebiete detailliert beschrieben. Als Kenngrössen wurden verwendet: Lage, Wildbachgeschichte, Morphometrie, Geologie, Bodenbedeckung, Landnutzung, Hydrologie, Geomorphologie, Abschätzung des Geschiebepotentials, Angaben zum Geschiebesammler, Informationsquellen und verwendete Unterlagen.

Nach mehr als 20 Jahren Messbetrieb im Geschiebemessnetzprogramm lassen sich nun erste Tendenzen und Aussagen formulieren über den Einfluss von Steuergrössen auf die gemessenen Geschiebefrachten. In Figur 2 sind die mittleren und maximalen spezifischen Frachten und die von Einzelereignissen produzierten Maximalfrachten für die vier wichtigsten lithologischen Klassen (Flysch, Kalk, Kristallin, Molasse) dargestellt. Die maximale spezifische Jahresfracht jeder lithologischen Klasse entspricht der höchsten beobachteten Fracht der jeweiligen Klasse. Das Gleiche gilt für die spezifische Maximalfracht eines Einzelereignisses. Die geologischen Klassen Kalk und Kristallin produzieren in der Schweiz die höchsten spezifischen Frachten. Dies lässt sich nicht nur mit der Lithologie der Einzugsgebiete dieser beiden Klassen erklären, sondern auch mit ihrer in der Regel höheren mittleren Hangneigung.



Figur 2: Mittlere und maximale spezifische Jahresfrachten aus Einzelereignissen geordnet nach vier geologischen Klassen der Einzugsgebiete.

Empirische Verfahren zur Geschiebeabschätzung berücksichtigen normalerweise nur wenige typische Parameter des Einzugsgebietes, wie Neigung des Gerinnes, Grösse und Geologie des Einzugsgebietes (Bertschi et al. 2008). Anhand der Geschiebesammlermessungen kann gezeigt werden, dass sich weitere typische Parameter des Einzugsgebietes wie Form (siehe hierzu Figur 3), die Neigung und das Vorhandensein von Permafrost auf die Produktion und den Transport von Feststoffen auswirken. In länglichen Einzugsgebieten sind die maximalen spezifischen Jahresfrachten höher. Der Grund liegt wahrscheinlich darin, dass sich in solchen Einzugsgebieten der Abfluss eher auf ein Gerinne konzentriert, was zu einer grösseren Transportkraft führt.

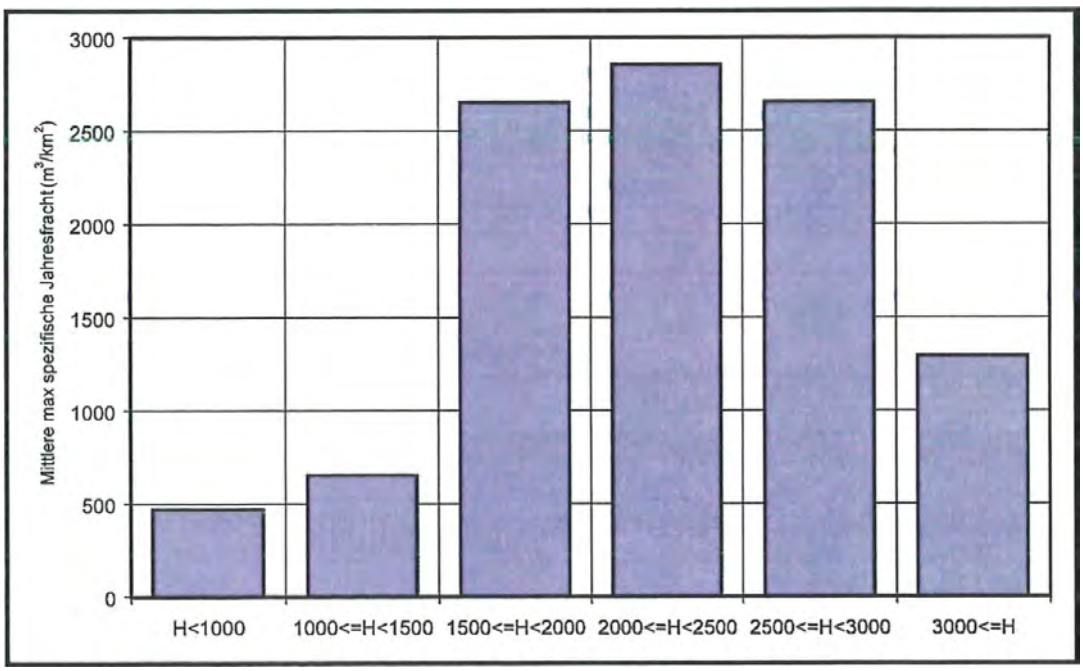


Figur 3: Zusammenhang zwischen der maximalen spezifischen Jahresfracht und der Form des Einzuggebietes

Unterteilt man die Einzugsgebiete nach ihrer maximalen Höhenlage, stellt man fest, dass bei zunehmender Maximalhöhe der Einzugsgebiete bis etwa 2500 m ü.M. der Mittelwert der maximalen spezifischen Jahresfracht der Höhenklassen zunimmt (siehe Figur 4). Dies ist hauptsächlich damit zu erklären, dass mit zunehmender Höhe auch die mittlere Neigung ansteigt und damit auch die spezifische Fracht zunimmt. Ab einer Höhe von mehr als 2500 m ü.M. nehmen die spezifischen Frachten jedoch wieder ab. Diese Abminderung der spezifischen Jahresfracht mit der Höhe kann mit klimatischen und geologischen Faktoren erklärt werden:

- Zwischenspeicherung des Niederschlags als Schnee bei einem Starkniederschlagsereignis in höheren Lagen.
- Grösserer Anteil von anstehendem Fels, Gletscher und Permafrost im Hochgebirge und somit wenig verfügbares Lockermaterial.
- Teils kann auch die inneralpine Lage eine Rolle spielen, da dort die Niederschlagssummen bei Staulagen im Vergleich mit den tiefer gelegenen Voralpen kleiner sind.

Je nach geografischer Ausrichtung ist der Boden in der Schweiz oberhalb von 2300-2400 m ü.M. ständig gefroren. Der Permafrost ist für die Stabilisierung der Böden vor Witterungseinflüssen von grosser Bedeutung. Es ist zu erwarten, dass der durch die globale Erwärmung verursachte Rückzug der Gletscher sowie das Auftauen des Permafrostes und der damit verbunden Freigabe von mobilisierbarem Lockermaterial eine Zunahme der Geschiebefrachten in solchen Einzugsgebieten hervorgerufen werden.



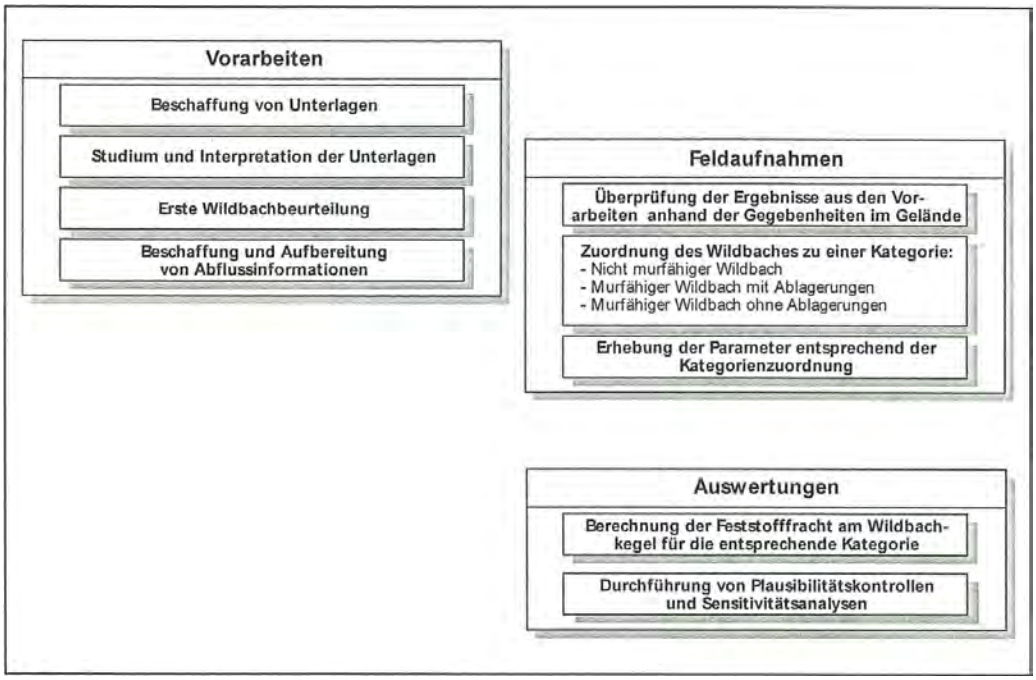
Figur 4: Maximale spezifische Jahresfrachten gegliedert nach Höhenklassen

3.3 Abschätzung des Geschiebetransportes in Wildbachgebieten

3.3.1 Das Verfahren nach Lehmann

In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Wasserwirtschaft und dem Geographischen Institut der Universität Bern hat die Landeshydrologie eine Anleitung für die Praxis zur Abschätzung der Geschiebefracht erstellt (GHO, 1996). Das Verfahren erlaubt die Abschätzung der Geschiebefracht für ein bestimmtes Ereignis zu systematisieren und reproduzierbar zu machen. Die Arbeitsschritte sind in Figur 5 zusammengestellt. Mit dem Verfahren bestimmt man die Transportkapazität, die Geschiebefracht, das Geschiebepotential und die möglichen Geschiebeablagerungen im Gerinneabschnitt.

Siehe hierzu auch Kapitel 13.



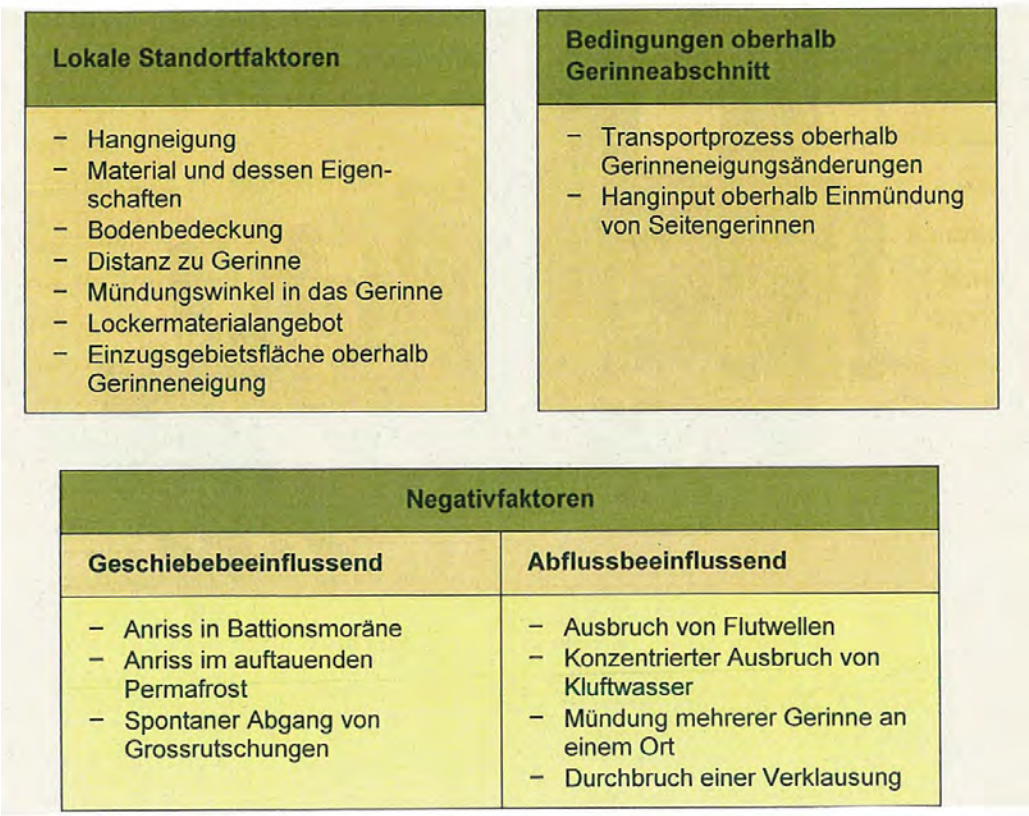
Figur 5: Vorgehensweise für die Abschätzung von Geschiebefrachten nach Ch. Lehmann (GHO,1996)

3.3.2 Das Verfahren von Gertsch

Seit 2005 wurde am Geographischen Institut der Universität Bern aufgrund von Ereignisanalysen und Systemuntersuchungen ein neues System für die Abschätzung der Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme kleiner als 10 km^2 bei Grossereignissen entwickelt (Gertsch, 2009). Das Verfahren geht davon aus, dass die Geschiebelieferung durch lokale Standortfaktoren, Bedingungen oberhalb eines beobachteten, Gerinneabschnittes und Negativfaktoren bestimmt wird (siehe Figur 6). Siehe hierzu auch Kapitel 13.

Die beiden Verfahren von Lehmann und Gertsch wurden zu einem Expertsystem zusammengefasst und sind im Druck und dienen u.a. als Beitrag der Schweiz zur Internationalen Sediment Initiative des Internationalen Hydrologischen Programmes der UNESCO.

Im Rahmen von Studien, Untersuchungen und Forschungsarbeiten haben zudem Universitäten und private Institutionen Beobachtungen durchgeführt, um Lösungen für spezifische wasserbauliche Probleme zu finden, resp. um Informationen für die Modellkalibrierung oder –verifizierung zu erhalten. Ein einmaliges Messsystem ist durch die Eidg. Forschungsanstalt WSL im Alptal bei Einsiedeln eingerichtet worden, wo unter anderem eine Hydrophon-Anlage die Erfassung der Geschiebefrachten erlaubt.



Figur 6: Zusammenstellung von Einflussfaktoren auf den Geschiebehaushalt nach Gertsch (2009)

Stauraumverlandung ist weltweit eines der grössten Probleme im Zusammenhang mit Erosion und Sedimenttransport. Dies trifft auch für die Schweiz zu. Die Problematik und die Bewirtschaftung der Stauraumverlandung in der Schweiz ist durch das Laboratoire de construction hydrauliques der EPFL im Auftrag des BAFU eingehend beschrieben worden (siehe LCH, 2008).

Literaturhinweise

Spreafico, M. et al (1984) Feststoffbeobachtung in schweizerischen Fliessgewässern, Schlussbericht der Arbeitsgruppe für Feststoffbeobachtung, Gruppe für operationelle Hydrologie, Bericht Nr.1, Bern

GHO (1987) Die mengenmässige Erfassung von Schwebstoffen und Geschiebefrachten Gruppe für operationelle Hydrologie, Bericht Nr.2, Bern

Lehmann, C. (1993) Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen, Geographica Bernensia G42, Bern

Spreafico, M. et al (1996) Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Grundlagen und Anleitung. Gruppe für operationelle Hydrologie, Bericht Nr.4, Bern

BWG (2005) Feststoffbeobachtung in der Schweiz, Berichte des Bundesamt für Wasser und Geologie, Serie Wasser, Nr.8, Bern

Bertschi, W. et al (2008) Empirische Modelle zur Geschiebefrachtenabschätzung-Kalibrierung und Eingrenzung unterschiedlicher Modelle, Interpraevent 2008, Conference Proceeding, Vol.1

Grasso, A. et al (2009) Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen, Wasser, Energie, Luft

Gertsch (2009) Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen- Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens, Dissertation Geographisches Institut der Universität Bern

LCH (2008) Reservoir sedimentation, Overview on the problematic of sedimentation and sediment management in alpine reservoirs

Rapport No 02/2008 des Laboratoire de construction hydrauliques, EPFL-ENAC-LCH, Lausanne

4

Historische Hochwasser

Petra Schmocker-Fackel, Felix Naef
Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern und HyBeSt GmbH, Birmensdorf

4.1 Einleitung

Hochwasser bedrohen menschliche Siedlungen schon seit Urzeiten. Über solche Katastrophen wurde deshalb über die Jahrhunderte immer wieder berichtet. Wenn diese Zeugnisse sorgfältig ausgewertet werden, lässt sich unser Verständnis über extreme Ereignisse wesentlich erweitern und es lassen sich aktuelle Fragen beantworten.

Hochwasserschutzbauten werden 100jährliche, 300jährliche oder noch seltenere Ereignisse zugrunde gelegt. Diese Abflüsse lassen sich jedoch mit Messreihen über weniger als 100 Jahren kaum zuverlässig ermitteln. Historische Hochwasser erlauben es, unseren Horizont um mehrere hundert Jahre zu erweitern und so die Grösse seltener Ereignisse besser einzugrenzen (zB. Schaub et al., 1990).

Die in den letzten Jahren in verschiedenen Gebieten festgestellte Häufung von grossen Hochwassern wird oft in Zusammenhang mit der Zunahme der Treibhausgase gebracht. Anhand der Auswertung von historischen Hochwassern wird im Folgenden die Frage untersucht, wie sich die Häufigkeit von Hochwassern in der Schweiz in den letzten 500 Jahren geändert hat und wie sich damit die Häufung der letzten Jahre vergleicht.

Bei der Frequenzanalyse langjähriger Abflussmessreihen wird vorausgesetzt, dass sich die Häufigkeit von Hochwassern über die Jahrhunderte wenig ändert. Mit den langen Zeitreihen historischer Hochwasser lässt sich diese Annahme überprüfen und auch die Konsequenzen von sich ändernden Häufigkeiten auf statistisch ermittelte Abflüsse aufzeigen.

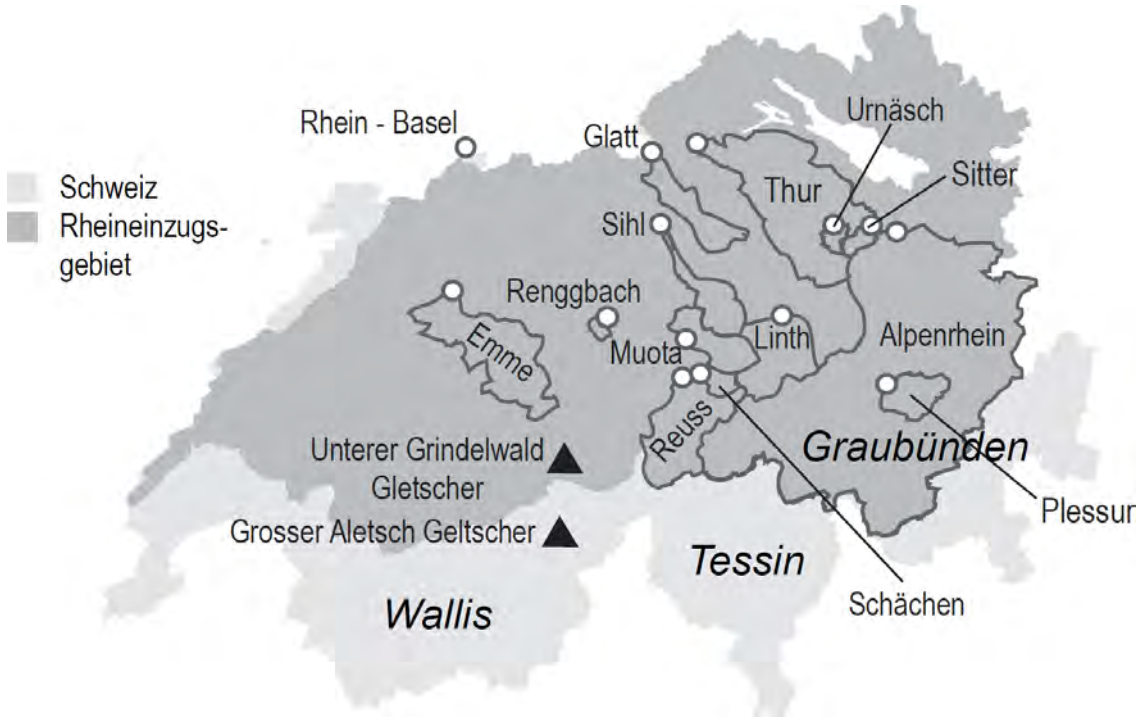
4.2 Datengrundlage

Am Rhein in Basel wird seit 1808 der Abfluss gemessen (Ghezzi, 1926). Systematische Abflussmessungen begannen in der Schweiz jedoch nach 1900. Die detaillierten Schilderungen in Chroniken, Tagebücher, Briefen, Pfarrbüchern und Zeitungen erlauben es, die Hochwasserhäufigkeiten der Vergangenheit zu ermitteln und Informationen über Entstehung und Ablauf von Hochwasser zu gewinnen.

Bei den Auswertungen solcher Quellen ist zu berücksichtigen, dass sie unterschiedlich im Informationsgehalt und oft unvollständig sind. Mit einer sorgfältigen Analyse lässt sich jedoch mit solchen Daten die Hochwassergeschichte über mehrere hundert Jahre rekonstruieren.

Vorgestellt werden hier die Auswertungen der historischen Hochwasser von 14 Schweizer Einzugsgebieten (Figur 1). Die Daten wurden aus der WSL Schadendatenbank (Röthlisberger, 1991), der Weikinn Quellensammlung (Weikinn,1958 bis 2002), den Arbeiten von Gees (1997), Pfister (1984, 1998) und Schaub et al. (1990) zusammengetragen. Berücksichtigt wurden Ereignisse, die in diesen Quellen als schadenverursachende Hochwasser erwähnt wurden (Schmocker-Fackel und Naef, 2010a).

Ab welchem Abfluss Schäden auftreten, hängt von hydraulischen Gegebenheiten und dem Schadenpotential in den einzelnen Gebieten ab. Je nach Höhe des schadenverursachenden Abflusses wurden also mehr oder weniger Hochwasser überliefert. Deshalb ist die Anzahl der überlieferten Hochwasser in verschiedenen Gebieten unterschiedlich.

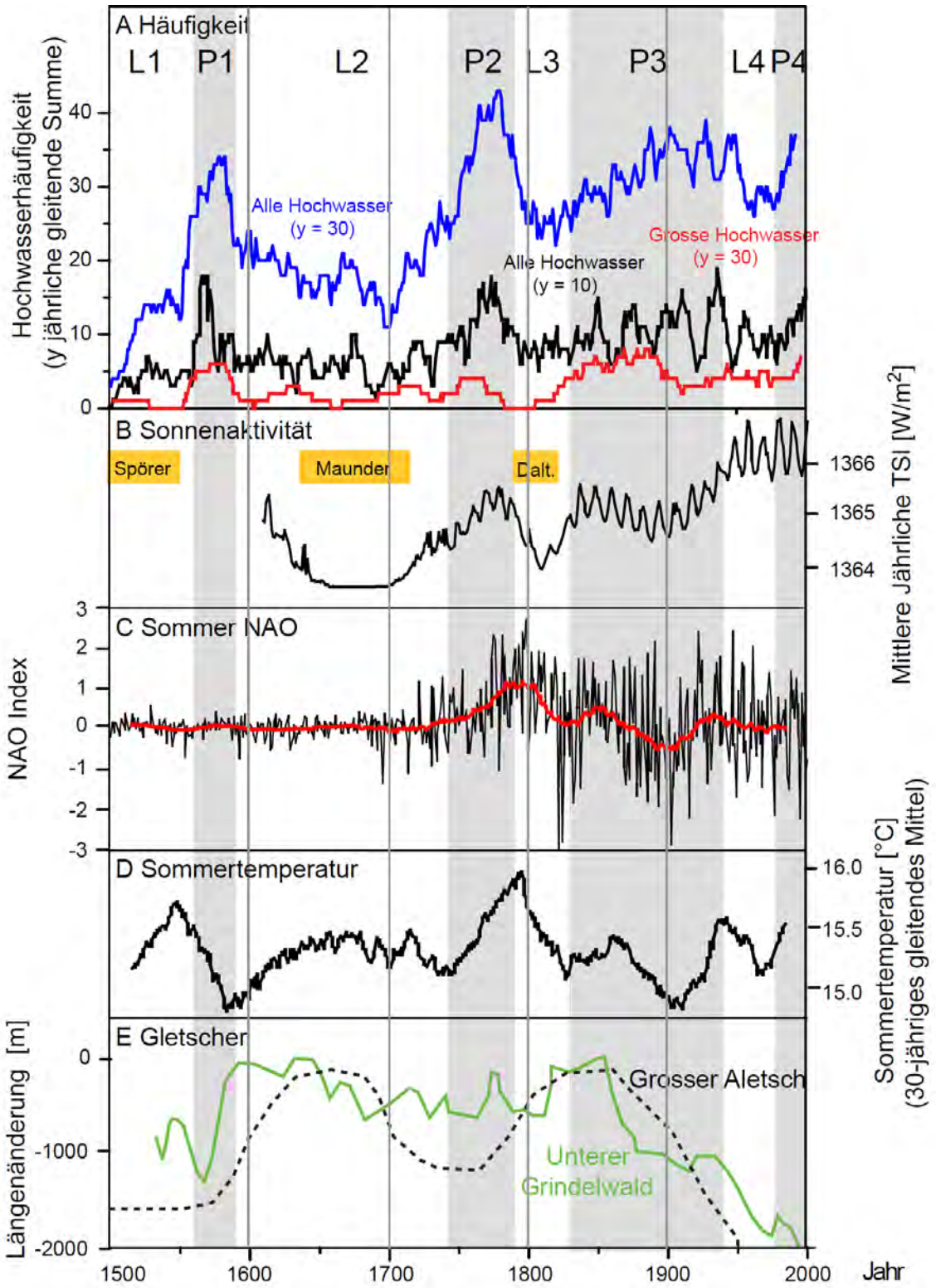


Figur 1: Lage der untersuchten Einzugsgebiete.

4.3 Hochwasserhäufigkeiten seit 1500

Figur 2 zeigt die Hochwasserhäufigkeiten in ausgewählten Untersuchungsgebieten über 10 Jahresperioden und als gleitendes Mittel über 30 Jahre. In Figur 3 ist die Summe der Hochwasser der 14 Untersuchungsgebiete auf der Alpennordseite sowie die grossen überregionalen Hochwasser in der ganzen Schweiz über gleitende 30 Jahresperioden dargestellt. Die geringere Anzahl Hochwasser vor 1750 in Figur 3 dürfte auf unvollständige Aufzeichnungen zurückzuführen sein und begründen keinen echten Trend. Die Schwankungen der Hochwasserhäufigkeiten auch vor 1750 lassen sich jedoch nicht mit Datenlücken erklären.

In allen Gebieten wechseln hochwasserreiche mit hochwasserarmen Phasen ab. Hochwasserreiche Phasen traten zwischen 1560 und 1590 (P1), um 1760 (P2), im 19. Jahrhundert (P3) und seit 1970 (P4) auf. Wenige Hochwasser gab es vor 1560 (L1), zwischen 1630 und 1720 (L2), zwischen 1790 und 1810 (L3) und zwischen 1940 und 1970 (L4). Im historischen Vergleich sind die Hochwasserhäufigkeiten der letzten Jahre noch nicht aussergewöhnlich, sie liegen immer noch im Bereich früherer hochwasserreicher Phasen.



Figur 2: Anzahl Hochwasser pro Dekade sowie das drei- Dekaden Mittel. Ebenfalls eingezeichnet sind Veränderungen im Gerinne oder im Einzugsgebiet, die das Auftreten von Hochwasserschäden und/oder den Hochwasserabfluss beeinflussen.

4.4 Lassen sich die Ursachen für diese Schwankungen erkennen?

Schwankungen der Hochwasserhäufigkeit in den letzten 500 Jahre traten in der Schweiz in Intervallen zwischen 30 – 100 Jahren auf. Schwankungen traten auch in anderen europäischen Flussgebieten auf, sie verlaufen aber nicht synchron zueinander (Schmocker-Fackel und Naef, 2010a; Glaser und Stangl, 2004).

Vaquero (2004) fand auf der Iberischen Halbinsel eine Phase mit wenigen Hochwassern während dem Maunder Minimum der Sonnenaktivität. Die Sonnenaktivität könnte also Schwankungen im Klima und damit in der Hochwasserhäufigkeit auslösen. In der Schweiz traten die ersten drei Phasen mit geringer Hochwasseraktivität (L1 – L3) während der Spörer, Maunder und Dalton Sonnenaktivitätsminima auf. Allerdings lässt sich ab 1810 kein Zusammenhang mehr zwischen Sonnenaktivität und Hochwasserhäufigkeit finden (Figur 3). Auch in Italien konnten für die letzten 2000 Jahre kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Hochwasserhäufigkeit und Sonnenaktivität gefunden werden (Camuffo und Enzi, 1995).

Dies gilt auch für den NAO Index (Nordatlantische Oszillation). Casty et al. (2005) und Frei et al. (2000) stufen den Einfluss der NAO auf Niederschläge im Alpenraum als gering ein. Ebenfalls kein direkter Zusammenhang konnte zwischen Hochwasser und Schweizer Sommer- oder Wintertemperatur gefunden werden (Figur 3). Allerdings deuten die Temperaturzeitreihen sowie die Längenänderung der Gletscher darauf hin, dass sich das Klima während der vier hochwasserreichen Phasen (P1-P4) deutlich veränderte.

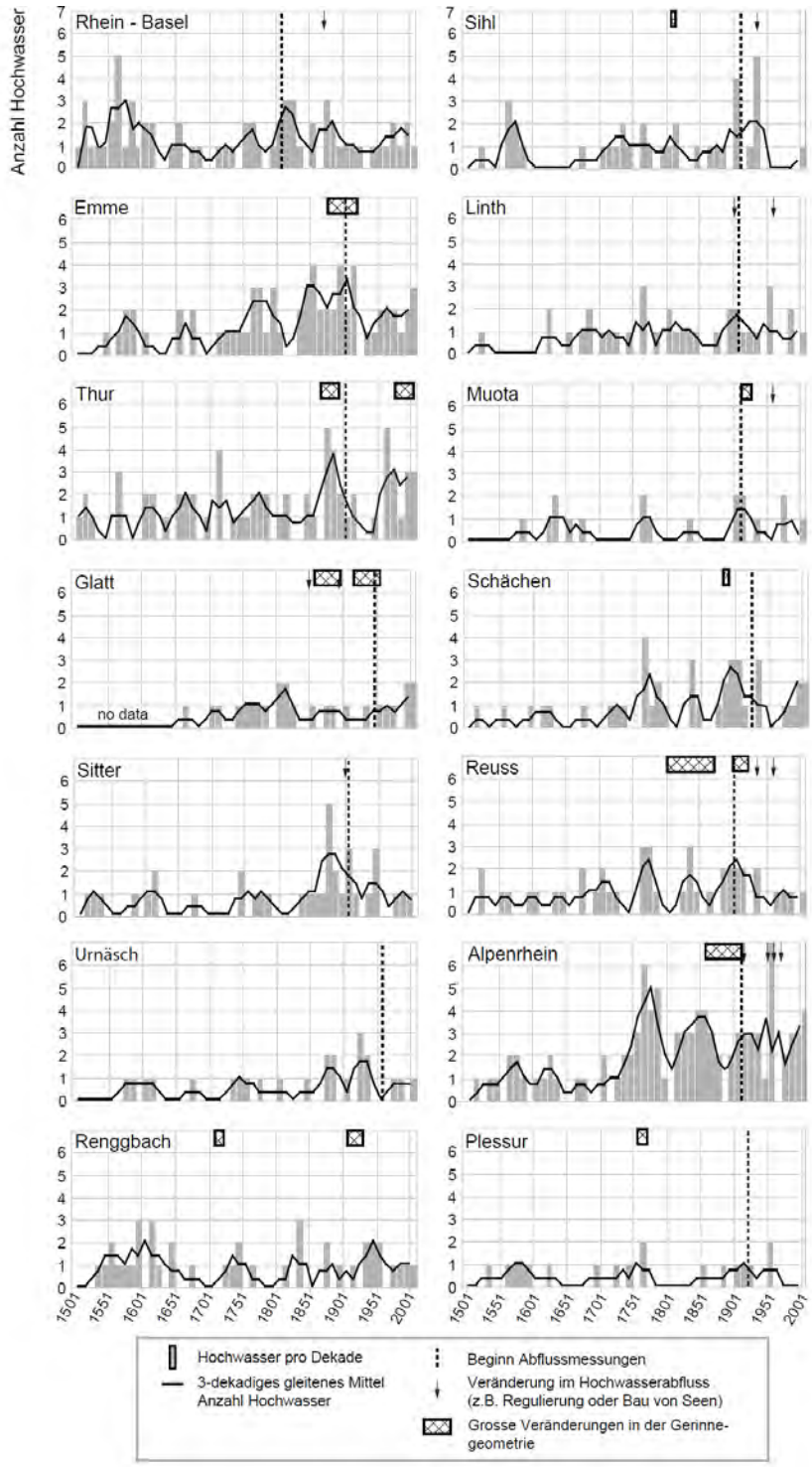
Sturm et al. (2001), Jacobeit et al. (2004) und Wanner et al. (2004) fanden für deutsche Flüsse eine Beziehung zwischen hochwasserreichen Phasen und Veränderungen im grossräumigen Muster der atmosphärischen Zirkulation. Diese Muster bestimmten sie aus den rekonstruierten Bodenluftdruckfelder für Zentraleuropa für die letzten 500 Jahre (Luterbacher et al., 2002b)

Schmocker-Fackel und Naef (2010b) stellten alle sehr grossen, schadensreichen Hochwasser seit 1850 zusammen. Dabei zeigte sich, dass es drei typische räumliche Muster der Hochwasserschäden gibt, die je einem Typ Nordost, Nordwest oder Süd zugeordnet werden konnten (siehe Figur 4). Die markierten Gebiete in Figur 4 zeigen die Umhüllende der Schadensorte. Gleichzeitig wurde soweit möglich, als Parameter für die grossräumige atmosphärische Zirkulation, die Höhenwindrichtung über den Alpen (in der 500 hPa Fläche) aus der Alpenwetterstatistik und den Witterungsberichten der Meteoschweiz bestimmt (Meteoschweiz, 1985).

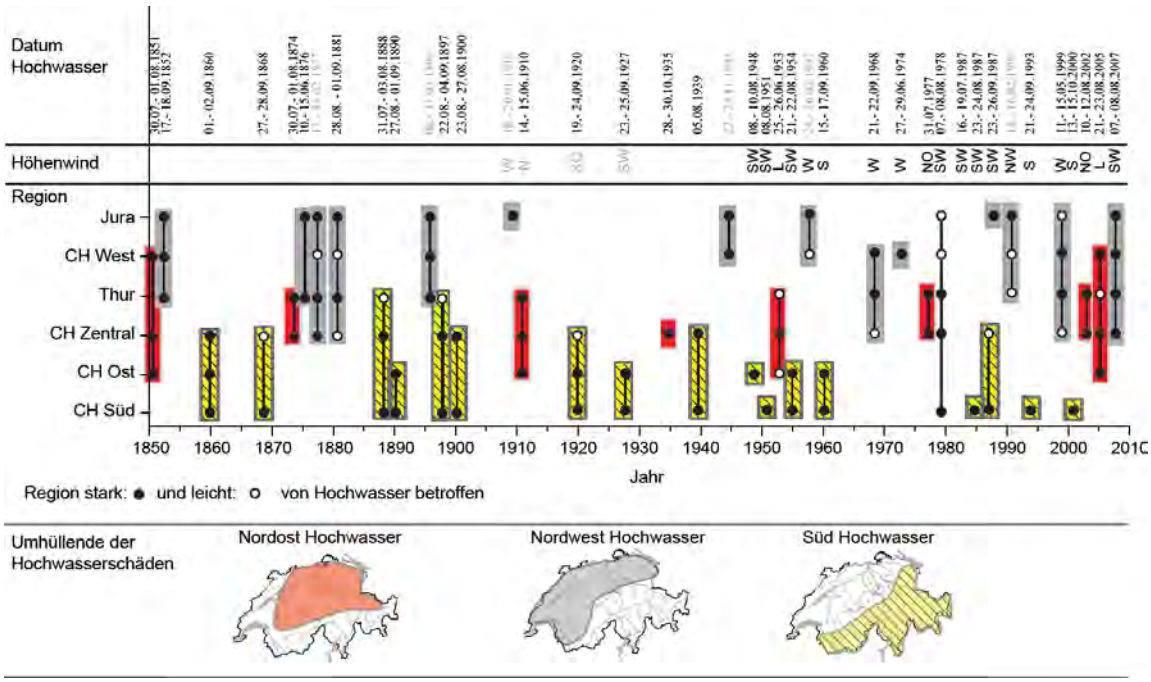
Die grossen Hochwasser von 1910 und 2005 gehören zum Typ Nordost. Dieser Typ betrifft die Zentralschweiz, die Nordostschweiz und manchmal auch Nordbünden. Dabei herrscht eine Nordostströmung über den Alpen oder wechselnde Verhältnisse wie bei den Vb Wetterlagen vor (VanBebber, 1891). Nordwest Hochwasser, wie 1999 und 2007, treten von der Westschweiz über den Jura und das Schweizer Mittelland bis zum Thur Einzugsgebiet auf. Die Zentralschweiz oder Nordbünden sind meist nicht oder nur gering betroffen. Die Strömung kam in allen bekannten Fällen aus westlicher Richtung. Südhochwasser traten immer bei südlichen Strömungslagen auf und verursachten Schäden im oberen Wallis und Tessin. Durch Überlappen des Niederschlags von der Alpensüdseite auf die Alpennordseite können aber auch Graubünden und die Kantone Uri und Glarus betroffen sein (Grebner, 1993). Bei den grossen Hochwasserereignissen von 1888 und 1897 wurde sogar noch das Thur Einzugsgebiet betroffen.

Von den 40 grossen bekannten Hochwassern sind 17 Südhochwasser, gefolgt von 14 NW-Hochwassern und nur 8 NO-Hochwassern. Südhochwasser häuften sich zwischen 1888 und 1900 und zwischen 1920 und 1960. Auch die Ereignisse von 1987 und 2000 gehören dazu. Während der ersten Phase (1888-1900) wurden häufig auch die Zentralschweiz und manchmal sogar die NO-Schweiz betroffen. Während den späteren Hochwassern war die Nordostschweiz nicht mehr und die Zentralschweiz nur gelegentlich betroffen. Es scheint, als wäre das Übergreifen von Niederschlag auf die Alpennordseite im 20. Jahrhundert seltener geworden.

Auf der Alpennordseite konnte eine Häufung sehr grosser Hochwasser zwischen 1874 und 1881 und dann wieder seit 1968 beobachtet werden. Dazwischen lag eine hochwasserarme Zeit. Während die NO-Hochwasser relativ gleichmässig über die Zeit verteilt sind, traten zwischen 1920 und 1960 kaum NW-Hochwasser auf, und wenn, dann nur im Winter und auf den Jura beschränkt. Auch Südhochwasser verursachten in dieser Periode wenig Schäden auf der Alpennordseite.



Figur 3: Hochwasserhäufigkeit in den 14 Einzugsgebieten auf der Alpennordseite und sehr grosse Hochwasser in der gesamten Schweiz. P1 - P4 sind Phasen mit vielen Hochwassern, L1 - L4 mit wenigen Hochwassern in der Nordschweiz (A). Ebenfalls eingezeichnet sind die Spörer, Maunder and Dalton Sonnenaktivitätsminima und die totale Sonnenstrahlung TSI aus Lean (2004) (B). Die rekonstruierten NAO Werte (schwarz) und ihr 30jähriges gleitendes Mittel (rot) sind von Luterbacher et al. (1999 und 2002a) (C), die rekonstruierten Schweizer Sommertemperaturen (D) stammen von Casty et al. (2005) und die Gletscherlängenänderungen des Unteren Grindelwald sowie des grossen Aletschgletschers sind von Holzhauser und Zumbühl (1999) (E).



Figur 4: Räumliche Ausdehnung grosser Hochwasser seit 1850 klassifiziert nach Lage der Hochwasserschäden in Nordost, Nordwest und Südereignisse (siehe Karte unterste Zeile). Für alle Ereignisse nach 1945 wurde die atmosphärische Strömung über den Alpen aus der Alpinenwetterstatistik von Meteo Schweiz angegeben (L: wechselnde Richtung).

4.5 Konsequenzen

Die Auswertung historischer Hochwasser in der Schweiz der letzten 500 Jahre zeigt, dass sich 30 bis 100 Jahre andauernde Phasen mit hoher und niedriger Hochwasseraktivität abwechselten. Diese Phasen verliefen auf der Alpennord- und südseite nicht parallel, im 20. Jahrhundert sogar eher gegenläufig. Die letzte hochwasserarme Phase dauerte auf der Alpennordseite von 1920 bis 1960; seit 1968 steigt die Häufigkeit wieder an.

Hochwasserereignisse überdecken nicht die ganze Schweiz, sondern treffen nur einzelne Regionen. Während Hochwasser, ausgelöst durch Nordostströmungen oder Vb Wetterlagen, seit 1850 regelmässig auftraten, gab es zwischen 1920 und 1960 weniger Hochwasser, die durch westliche oder südliche Strömungslagen verursacht wurden.

Die erhöhte Hochwasseraktivität der letzten Jahre bewegt sich noch im Rahmen der Schwankungen der letzten 500 Jahre. Diese Schwankungen lassen sich nicht mit globalen Parametern, wie Sommertemperatur, Sonnenaktivität, etc. erklären und sie verlaufen in verschiedenen Ländern in Europa nicht parallel. Unsere Untersuchungen ergaben Hinweise, dass die Schwankungen auf Änderungen der Häufigkeiten einzelner Wetterlagen zurückführen sind. Um Aussagen über Hochwasserhäufigkeiten in einer wärmeren Atmosphäre treffen zu können, ist ein besseres Verständnis dieser Zusammenhänge erforderlich.

Unsere Hochwasserstatistiken beruhen auf Abflussmessungen, die sich auf das 20. Jahrhundert beschränken. Sie fallen damit in eine hochwasserarme Zeit und die mit diesen Messreihen ermittelten Werte liegen in Zeiten grösserer Hochwasseraktivität zu tief. Für eine Hochwasserabschätzung sollte deshalb versucht werden, die Zeitreihen durch historische Hochwasser zumindest bis in die Mitte des 19. Jhd. zu verlängern, da die zweite Hälfte der 19. Jhd. ausgesprochen hochwasserreich war.

Literatur

Camuffo, D. and Enzi, S., 1995: Climatic features during the Spörer and Maunder Minima, in: Solar output and climate during the Holocene, Frenzel, B. (ed), Paläoklimaforschung 16, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart:105-124.

Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J. and Böhm, R. , 2005: Temperature and precipitation in the European Alps since 1500. Int. J. Climatol., 25, 1855-1880.

Frei, C., Davies, H.C., Gurtz, J. and Schär, C. , 2000: Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in central Europe, Integrated Assessment, 1, 281-299.

Gees, A. , 1997: Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz -Bedeutung für das Bemessungshochwasser, Geographisches Institut der Universität Bern, Geographica Bernensia, G53.

Ghezzi, C. , 1926: Die Abflussverhältnisse des Rheins in Basel, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, 19, Bern.

Glaser, R. and Stangl, H. , 2004: Climate and floods in central Europe since AD 1000: Data, methods, results and consequences, Surv. Geophys., 25, 485-510.

Grebner, D. ,1993: Synoptische Zirkulationen während Extremniederschlägen in der nordalpinen Schweiz, Aktuelle Aspekte in der Hydrologie, Zürcher Geographische Schriften, 5e, 39 - 48.

Hächler, S. , 1991: Hochwasserereignisse im Schweizerischen Alpenraum seit dem Spätmittelalter. Raum-zeitliche Rekonstruktion und gesellschaftliche Reaktionen, Lizenziatsarbeit in Schweizergeschichte, Historisches Institut der Uni Bern.

Holzhauser, H. and Zumbühl, H.J, 1999: Holocene Glacial Fluctuations, Blatt 3.8, Hydrologischer Atlas der Schweiz, Bern, Landeshydrologie und Geologie.

Jacobeit, J., Glaser, R., Luterbacher, J., Wanner, H. , 2003: Links between flood events in central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes. Geophysical Research letters, 30, 1172-1175.

Lean, J. , 2004: Solar Irradiance Reconstruction,IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology, Data Contribution Series # 2004-035, NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

Luterbacher, J., Xoplaki, E., Dietrich, D., Rickli, R., Jacobeit, J., Beck, C., Gyalistras, D., Schmutz, C. and Wanner, H. , 2002a: Reconstuction of sea level pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500, Clim. Dynam., 18, 545-561.

Luterbacher, J., Xoplaki, E., Dietrich, D., Rickli, R., Jacobeit, J., Beck, C., Gyalistras, D., Schmutz, C. and Wanner, H. , 2002b: Reconstuction of sea level pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500, Clim. Dynam., 18, 545-561.

Luterbacher, J., Schmutz, C., Gyalistras, D., Xoplaki, E., and Wanner, H. , 1999: Reconstruction of monthly NAO and EU indices back to AD 1675, Geophys. Res. Lett., 26, 2745-2748.

MeteoSchweiz, 1985: Alpenwetterstatistik. Beschreibung der einzelnen Parameter. Abteilung Forschung. Unveröffentlicht.

MeteoSchweiz, 1911-2007. Witterungsbericht der MeteoSchweiz. Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich.

MeteoSchweiz, 1864-2007. Annalen der MeteoSchweiz. Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich.

Pfister, Ch. , 1984: Klimageschichte der Schweiz 1525-1860 - Das Klima der Schweiz von 1525-1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft, Band I, Academica helvetica, Verlag Paul Haupt, Bern.

Pfister, Ch. ,1998: Raum-zeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen 1496-1995, Schlussbericht NFP 31, Vdf , Zürich.

Röthlisberger, G. , 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz,. WSL Bericht 330.

Schaub, D., Horat, P. and Naef, F. , 1990: Die Hochwasser der Reuss im 18. und 19. Jahrhundert und ihr Einfluss auf die Hochwasserstatistik, Wasser, Energie, Luft, 3 / 4.

Schmocker-Fackel, P. and Naef, F. ,2010a: Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. Hydrol. Earth Syst. Sci, 14, 1581-1594.

Schmocker-Fackel, P. and Naef, F. , 2010b: More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850, J. Hydrol., 381, 1-8.

Sturm, K., Glaser, R., Jacobeit, J., Deutsch, M., Brázdil, R., Pfister, Ch., Luterbacher, J. and Wanner, H. , 2001: Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation, Petermanns Geograpische Mitteilungen, 145, 2001/6, 14-23.

Trouet, V.; Esper, J.; Graham, N.E.; Baker, A.; Scourse, J.D.; Frank, D.C. , 2009: Persistent Positive North Atlantic Oscillation Mode Dominated the Medieval Climate Anomaly. Science, 324: 78-80.

Vaquero, J.M. , 2004: Solar signal in the number of floods recorded for the Tagus river basin over the last millennium, Climatic Change, 66, 23-26.

Van Bebber, W.J., 1891: Die Wettervorhersage : eine praktische Anleitung zur Wettervorhersage auf Grundlage der Zeitungswetterkarten und Zeitungswetterberichte : für alle Berufsarten. Im Auftrag der Direktion der Deutschen Seewarte, Enke, Stuttgart, 171pp.

Wanner, H., Beck, C., Brázdil, R., Casty, C., Deutsch, M., Glaser, R., Jacobeit, J., Luterbach, J., Pfister, C., Pohl, S., Sturm, K., Werner, P.C., Xoplaki, E. , 2004: Dynamic and socioeconomic aspects of historical floods in Central Europe. Erdkunde 58, 1-16.

Weikinn, C.: Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitenwende bis zum Jahre 1850, Hydrographie Teile 1-6 (Zeitwende - 1859), Akademie-Verlag, Berlin, 1958-2002.

5

Umweltveränderungen und Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse Schweiz

Bruno Schädler
Geographisches Institut der Universität Bern

5.1 Einleitung

Die Entstehung von Hochwassern ist von einer grossen Zahl von Einflussfaktoren abhängig, wie z.B. vorangegangenes und aktuelles Wettergeschehen, mannigfache Gebietseigenschaften und Landnutzungen, Füllungsstand der Speicher im Untergrund und an der Oberfläche und morphologische Eigenschaften der Gerinne. Uhlenbrock et al. (2000) haben an 29 Einzugsgebieten in Baden-Württemberg untersucht, welche Einflussgrössen wichtig sind für die Hochwasserentstehung. Als besonders wichtig haben sich dabei der Ereignisniederschlag, die Vorfeuchte im Boden, die Niederschlagdauer sowie die Jahreszeit herausgeschält. Allerdings halten Uhlenbrook et al. (2000) wie auch Naef (1985) fest, dass letztlich jedes Hochwasser ein Unikat in seiner Entstehung ist. Die Regenmenge und –intensität sowie die örtlich/zeitliche Verteilung – und damit das Wetter bzw. das Klima – beeinflussen dominant die Hochwasserentstehung. Damit ist klar, dass Klimaschwankungen und die anthropogen bedingte Klimaänderungen das Hochwassergeschehen beeinflussen.

Zusätzlich beeinflussen in der Schweiz aber auch andere anthropogene Veränderungen die Entstehung der Hochwasser:

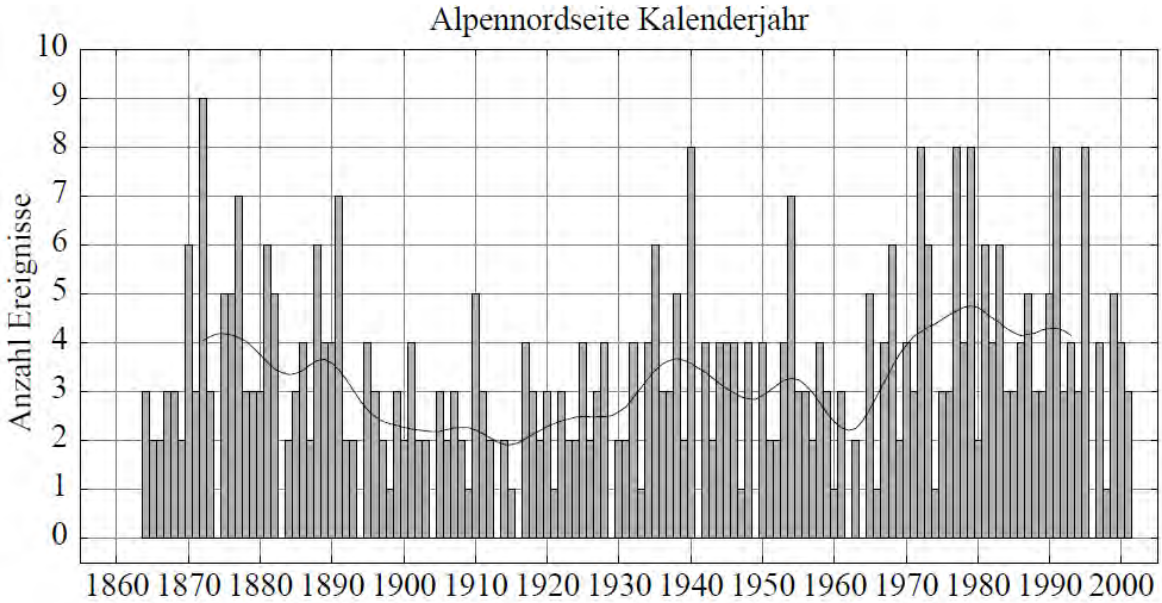
- Umleitungen von Fliessgewässern wie z.B. die Kanderableitung in den Thunersee, die Umleitung der Aare in den Bielersee oder der Linth in den Walensee.
- Alle Seen mit Ausnahme des Bodensees und des Walensees sind reguliert. Petrascheck (2007) hat für die Hochwasser 2005 den Effekt des (natürlichen und künstlichen) Hochwasserrückhaltes analysiert und festgestellt, dass die See-Ausflussspitzen im Vergleich zum Seezufluss um – je nach See - 40 bis 85% reduziert werden konnten.
- Der Bau der grossen alpinen Speicher mit einem Gesamtvolumen von gegen 4 Milliarden Kubikmeter. Petrascheck und Python (2000) zeigen, dass während der Hochwasser im Mai/Juni 1999 so viel Wasser in den Kraftwerkspeichern zurückgehalten wurde, dass z.B. der Bodenseewasserstand um 20 cm, der Abfluss des Rheins bei Basel um 200 m3/s vermindert wurde. Pougatsch und Raboud (2002) zeigen, dass das Hochwasser der Rhone in Branson im Hochwasser 2000 um rund 100 m3/s, 1992 um 160 und 1987 sogar um 210 m3/s vermindert worden ist.

Diese Ausführungen zeigen, dass die genannten Faktoren massgeblich zur Verminderung der kleineren und mittleren, in eingeschränktem Masse aber auch für die grossen Hochwasserspitzen beitragen können und dass dadurch die Zeitreihen der jährlichen Abflussspitzen besonders in den mittleren und grösseren Fliessgewässern nicht homogen sind.

5.2 Veränderungen in der Vergangenheit

Die langfristige Beobachtung des Abflussgeschehens zeigt weltweit, dass sich immer wieder Perioden mit relativ wenig Abfluss mit solchen von relativ grossem Abfluss abwechseln. Probst und Tardy (1987) haben die Abflüsse in den fünfzig wichtigsten Flüssen der Welt über rund 100 Jahre analysiert und festgestellt, dass diese Schwankungen mit einer Periodenlänge von ca. 7-12 Jahren regional synchron schwanken. Dabei ist über Eurasien und Nordamerika eine leichte Phasenverschiebung von Süden nach Norden und in verstärktem Masse von Osten nach Westen zu beobachten. Diese Phänomene werden von den Autoren auf periodisch sich verändernde Druckanomalien, d.h. auf periodische Veränderungen der grossräumigen Zirkulationssysteme zurückgeführt. Damit ist es nicht weiter erstaunlich, dass auch in der Schweiz solche periodischen Schwankungen zu beobachten sind. Sie finden sich in allen grossen Einzugsgebieten wieder sowohl in Gebietsniederschlägen wie auch im mittleren Abfluss (Hubacher und Schädler, 2010).

Die seit 1850 beobachteten Schwankungen im Starkniederschlagsgeschehen (Figur 1) (Hegg und Vogt, 2005; Bader and Bantle, 2004) und im Hochwassergeschehen (Schmocker-Fackel und Naef, 2010a) haben ein wesentlich längere Periodenlänge. In der Schweiz wurde eine Periode von ausgesprochen kühlen und feuchten Wetter in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts beobachtet, welche mit dem grossen Hochwasser von 1910 endete. Ab 1910 bis 1973 herrschte relative Ruhe, die mit dem Hochwasser an der Reuss (1977) und der Thur (1978) wieder ein Ende fand. Schwankungen im Hochwassergeschehen mit einer Periodenlänge von ca. 30 bis 100 Jahre können für den Zeitraum ab 1500 über ganz Europa beobachtet werden (Schmocker-Fackel und Naef, 2010b). Diese Autoren bringen die beobachteten Schwankungen auch in Verbindung mit Veränderungen der grossräumigen atmosphärischen Zirkulation. Wetter et al. (2010) analysierten die Hochwasser des Rheins bei Basel zurück bis 1298 und mussten feststellen, dass die hochwasserarme Zeit hier von 1877 bis 1998 gedauert hat und einzigartig ist für die ganze Untersuchungsperiode. Hydraulische Modellierungen zeigten, dass dieses Phänomen höchstens teilweise mit anthropogenen Massnahmen im Einzugsgebiet erklärt werden können.



Figur 1: Anzahl von Starkniederschlägen (ab 70 mm/2 Tage) 1864 bis 2001 im Kalenderjahr in den Niederungen der Alpennordseite. Angegeben sind jeweils die Werte von Jahr zu Jahr sowie das Mittel über 20 Jahre (aus Bader und Bantle, 2004).

Aufgrund dieser langperiodischen Schwankungen und der langen hochwasserarmen Zeit im 20. Jahrhundert ist es nicht überraschend, dass über kürzere Zeiträume von etwa 20 bis 40 Jahren immer wieder positive oder negative Trends der Hochwasserveränderung festgestellt werden. Die Wahl der Periodenlänge ist damit sehr kritisch und kann die Resultate stark beeinflussen (Weingartner et al., 1999). Bei 95 analysierten Messreihen unterschiedlicher Beobach-

tungsdauer schwankt die Anzahl Messreihen mit signifikant (α=5%) positivem Trend zwischen 12 und 29 Prozent; zwischen 0 und 4 Prozent weisen einen signifikant negativen Trend auf.

Diezig und Kan (2010) analysieren lange Messreihen in der Schweiz bis 2007, dh. unter Einschluss der letzten hochwasserreichen Jahre. Sie vergleichen u.a. die Trends der Perioden 1926-2007, 1941-2007, 1956-2007 und 1971-2007. Es wird dabei deutlich, dass für die verschiedenen Perioden sogar das Vorzeichen des Trends sich ändern kann. Von 17 Stationen an kleineren und mittleren Gewässern mit einer Zeitreihe von 82 Jahren weisen die Hälfte einen signifikant positiven Trend auf. Im Lichte der oben erwähnten Besonderheiten des 20. Jahrhunderts mit einer langen hochwasserfreien Zeit zeigt diese Analyse, dass sogar eine Zeitreihe von immerhin 82 Jahren zu einem langfristig betrachtet verzerrten Bild führen kann.

Weber (2007) präsentiert Analysen von Hochwasserzeitreihen an 60 Stationen in Bayern und 30 Stationen in Baden-Württemberg mit sehr unterschiedlicher Einzugsgebietsgrösse (<100 bis 50'000 km2) mit einer Messreihenlänge von mindestens 72 Jahren. Von allen Zeitreihen der jährlichen Hochwassermaxima liegt der Anteil mit positivem Trend bei rund 80 %. Allerdings weisen nur 20 % aller Stationen einen signifikanten (α=5%) Trend auf. Der positive Trend beträgt in der Mehrheit zwischen 0 und 5 Prozent pro Jahr. In der jüngeren Zeitreihe ab 1974 verstärkten sich die positiven Trends deutlich, der Anteil der signifikanten blieb jedoch konstant.

Die Schlussfolgerung aus diesen Darlegungen ist sicher die, dass bei Trenduntersuchungen immer die betrachtete Zeitperiode im Lichte des grösseren zeitlichen Geschehens kritisch zu beleuchten ist.

5.3 Zukünftige Veränderungen

Frei (2004) hat im Auftrag des „Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung (OcCC)“ für die Arbeiten am Bericht OcCC (2007) Klimaszenarien bereitgestellt, welche dem Stand des Wissens entsprechen. Umfassende neue Szenarien wurden im Rahmen der Initiative C2011 (CH2011, 2011) erstellt. Die Szenarien beschreiben die Änderungen im 21. Jahrhundert im Vergleich zum Ende des 20. Jahrhunderts.

Die Auswertungen der Klimasimulationen von Frei (2006) erlauben eine grobe Quantifizierung der Niederschlagsextremwerte für Jährlichkeiten zwischen 5 und 50 Jahren. Es zeigen sich nur geringe Unterschiede für die Extreme mit einer Dauer zwischen 1 und 5 Tagen. Zwischen den Jahreszeiten muss unterschieden werden: Im Herbst wird mit einer Zunahme der Extremwerte bis zu 10% auf der Alpennordseite respektive 20% auf der Alpensüdseite gerechnet. Im Winter und Frühling liegt die Zunahme beidseits der Alpen zwischen 0 und 20%. Im ungünstigsten Fall kann ein heute 100 jährliches Ereignis in Zukunft zu einem 20 jährlichen werden. Im Winter und Frühling wird als Folge der Kombination von höheren Spitzen und längerer Dauer eine Zunahme der Niederschlagsvolumen erwartet.

Für den Sommer erlauben die große Variabilität der Resultate sowie das eingeschränkte Vertrauen in die Modellsimulationen keine Aussagen. Allenfalls sind Tendenzen für eine Zunahme nordalpin und eine Abnahme südalpin erkennbar. In Ch2011 (2011) werden keine konkreten Aussagen zu den Veränderungen der Starkniederschläge gemacht, da die Resultate der Klimamodellierungen eine sehr grosse Streuung zeigen.

Aussagen zur Entwicklung der Hochwasserabflüsse sind für die Schweiz saisonal, regional und auch bezogen auf die Einzugsgebietsgröße differenziert zu betrachten (KOHS, 2007; Schädler et al., 2007).

Nordalpine Gebiete unter 1500 m ü.M.: Im Winter sind durch erhöhte Bodenwassergehalte und durch höhere Niederschlagsleistungen höhere Hochwasserspitzen zu erwarten. Trotz Erwärmung bleiben im Mittelland Schneedecken und damit kombinierte Schmelz-/Regenereignisse weiter möglich. Der Einfluss von Schmelzereignissen nimmt wie bisher mit der Höhenlage der Einzugsgebiete im betrachteten Höhenbereich zu. In diesen Gebieten treten bereits heute im Winter und Frühjahr die Jahreshochwasser auf. Sie können auch in Zukunft bis ins Frühjahr vorkommen, werden aber dem Klima entsprechend höher.

Im Sommer werden die Hochwasser besonders in tieferen Lagen geringer ausfallen, weil die Abflussdisposition der Böden durch verringerte Niederschläge und höhere Verdunstung deutlich reduziert ist. Allerdings ist zu beachten, dass im Sommer immer auch mit konvektiven

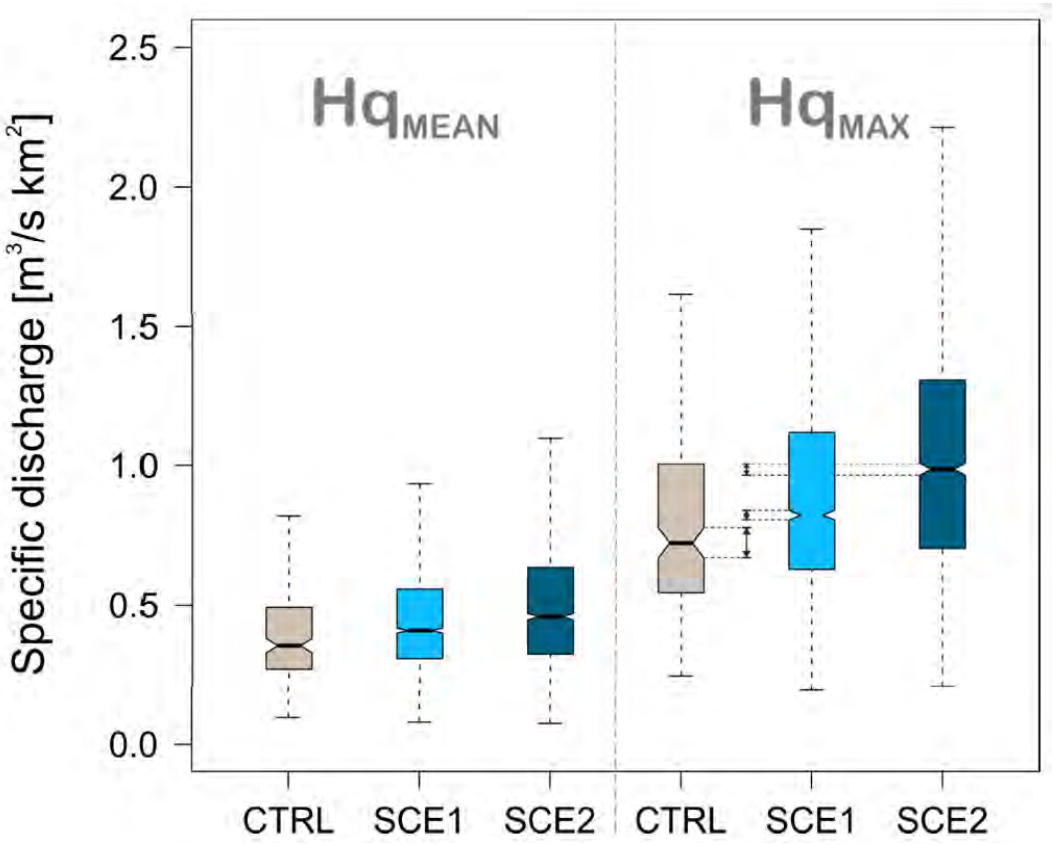
Starkniederschlägen zu rechnen ist, welche hauptsächlich in kleinen Einzugsgebieten zu Hochwasser führen können.

Nord- und inneralpine Gebiete über 1500 m ü.M.: Die Regimes in den Alpen wechseln von glazialer zu nivaler Prägung. Im Winter steigen die Abflüsse wegen gelegentlicher Regenfälle etwas an. Daraus ergeben sich jedoch keine wirklichen Hochwasser. Im Frühjahr sind kleine Schmelzhochwasser möglich, die Spitzen werden größer als heute. Die Jahreshochwasser werden jedoch wie heute im Sommer auftreten und voraussichtlich nicht größer werden. Im Herbst sind kaum Veränderungen zu erwarten.

Alpensüdseite: Im Winter und Frühjahr lassen die stärker wachsenden Niederschlagsleistungen auch eine entsprechende Hochwasserzunahme erwarten. Im Sommer deuten abnehmende Niederschläge auf kleinere Abflussspitzen hin. Maßgebend für die Jahreshochwasser bleiben die hydrometeorologischen Bedingungen im Herbst. Dabei lassen die höheren Niederschlagsleistungen eine Zunahme der Hochwasser erwarten.

Das saisonale Auftreten von Hochwasser dürfte sich in Zukunft in Abhängigkeit der Höhenlage und der Schneebedeckung und damit des hydrologischen Regimes in der Schweiz stark verändern (Köplin et al., 2013). Auch konnten Köplin et al. (2013) mit neuen zeitlich hoch aufgelösten Modellrechnungen zeigen, dass allein die Veränderung der Temperatur und der Regensummen die mittleren und die häufigeren Hochwasser ansteigen dürften, vor allem gegen Ende des 20. Jahrhunderts (Figur 2).

In Baden-Württemberg und in Bayern wurde im Rahmen des Projektes KLIWA unter Verwendung von Klimaszenarien, einem statistischen Downscaling und hydrologischen Modellen die Veränderung der Hochwasserspitzen bis 2100 berechnet KLIWA (2006). Als Resultat wurden für verschiedene Regionen und Auftretenswahrscheinlichkeiten sogenannte Klimaänderungsfaktoren bestimmt. Diese dienen jetzt verbindlich für die Festlegung der Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen (LFU, 2005).



Figur 2: Boxplots der Veränderung der spezifischen mittleren Hochwasser (Hq_{mean}) und der maximalen Hochwasser (Hq_{max}) über jeweils eine Periode von 22 Jahren. Vergleich der Kontrollperiode CTRL (1984-2005) mit der mittleren Zukunft SCE1 (2025-2046 und der fernen Zukunft SCE2 (2074-2095); Figur aus Köplin et al. (2013)

Literatur

Bader, S., Bantle, H., 2004. Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur – und Niederschlagsentwicklung 1864–2001. Veröffentlichung der MeteoSchweiz Nr. 68, 45p.

CH2011, 2011: Swiss Climate Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp.

Petrascheck A. (2002): Hydrologie Seen. In: Bezzola G.R. und Hegg Ch.: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen, Nr. 0707, p. 71-97, Bern

Petrascheck A. und Python J. (2000) Rückhalt in den Seen und Kraftwerksspeichern. In: Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.): Hochwasser 1999 – Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10, p. 135-138, Bern.

Pougatsch H. und Raboud P. (2002): Analyse de l'effet des ouvrages d'accumulation. In : Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg) : Hochwasser 2000 – les Crues 2000. Berichte des BWG – Serie Wasser, Nr. 2, p. 122 – 130, Bern.

Diezig R. und Kan C. (2010): Hochwasserabflüsse – statistische Kennwerte 1971-2007, Tafel 5.12. In: Weingartner R, Spreafico M. (eds) Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES). Bundesamt für Umwelt, Bern..

Frei C. (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Erhältlich unter http://www.occc.ch/Products/CH2050/ch2050_scenario_d.html.

Frei C., R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli, und P.L. Vidale (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. J. Geophys. Res., 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.

Hegg, C. and Vogt, S. (2005): Häufigkeiten und Trends von Starkniederschlägen in der Schweiz im Zeitraum 1864-2002. Wasser-Energie-Luft, 97: 209-212.

Hubacher R. und Schädler B. (2010): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. Tafel 6.6. In: Weingartner R, Spreafico M. (eds) Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES). Bundesamt für Umwelt, Bern.

KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzungen der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte, Heft 9, 100 p., Karlsruhe.

KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS), Wasser Energie Luft, 99, 55-57.

Köplin N, Schädler B, Viviroli D, Weingartner R. (2013): Seasonality an magnitude of floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes*.

LFU (2005): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes - Leitfaden. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe, 92 p.

Mudelsee M., Börngen M., Tetzlaff G., Grünewald U. (2003): No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. Nature, Vol. 425, p. 166-169.

Naef F. (1985): What parameters control the flood peak in small Swiss catchments? In: Multivariate Analysis of hydrological processes, proceedings of fourth international hydrology symposium July 15-17, Colorado University, Fort Collins, p. 732-743.

OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC/ProClim, Bern, 168 S.

Probst J.L., Tardy Y. (1987): Long Range Streamflow and World Continental Runoff Fluctuations since the Beginning of this Century. J. Hydrol.,94, p. 289-311.

Schädler, B., Frei, C., Grebner, D. and Willi, H. P. (2007): Grundlagen zum Klima, Wasser Energie Luft, 99, 58-60.

*Schmocker-Fackel P. and Naef F. (*2010b): Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 7, 529-560, doi:10.5194/hessd-7-529-2010, 2010.

Schmocker-Fackel, P. and Naef, F. (2010a): More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850, J. Hydrol., 381, 1–8, 2010.

Uhlenbroock S., Steinbrich A., Tetzlaff D., Leibundgut Ch. (2009): Zusammenhang zwischen extremen Hochwassern und ihren Einflussgrössen. In: Arbeitskreis KLIWA (Hsg.), Klimaänderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft – Fachvorträge beim KLWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe, Karlsruhe, p. 187-203.

Weber H. (2007): Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Süddeutschland. In: Arbeitskreis KLIWA (Hsg.), Klimaänderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft – Fachvorträge am 3. KLWA-Symposium vom 25./26.10.2006 in Stuttgart, Karlsruhe, p. 131-142.

Weingartner R., Schwab S., Barben M. (1999): Haben Hochwasser Hochkonjunktur? wasser-energie-luft, 91. Jg., Heft 3/4, p. 61-62, Baden.

Wetter O., Pfister Ch., Weingartner R., Reist T., Trösch J., Luterbacher J. (2010): The largest floods in the upper Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. Hydrolog. Science J., (submitted)

6

Methoden für die Hochwasserabschätzung

Daniel Viviroli
Belop GmbH, Sarnen

Die zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse eingesetzten Methoden lassen sich in drei Verfahrensgruppen unterteilen: Extremwertstatistik, regionalhydrologische Ansätze und Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Bei allen Verfahren bestehen jeweils spezifische Vor- und Nachteile, welche im Folgenden kurz erläutert werden sollen.

6.1 Extremwertstatistik

Extremwertstatistische Methoden sind im Allgemeinen gut etabliert (z. B. DVWK, 1999; IH, 1999) und ohne grossen Aufwand anwendbar, allerdings können sie nur in Gebieten mit langen Abflussmessreihen eingesetzt werden (vgl. Miegel und Büttner, 2003). Zudem kann nicht berücksichtigt werden, dass die Entstehungsbedingungen von Hochwassern unterschiedlich sind und sich die hydrologischen Prozesse bei Extremereignissen verändern (Wood et al., 1990; Fontaine, 1995; Uhlenbrook und Steinbrich, 2002; Naef, 2007). Auch bezüglich Auswahl der geeigneten Extremalverteilung und der Parameterschätzmethode besteht eine gewisse Unsicherheit (Vogel et al., 1993; Klemeš, 2000), welche unter Umständen auch wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Schätzungen haben kann. Eine Erhöhung der Prozessnähe kann allenfalls durch die Analyse von Ereignistypen erreicht werden (z. B. Merz, 2002; Diezig, 2006; Helbling, et al., 2006), und die Berück-sichtigung von Niederschlagsextremwerten (vgl. Elsasser, 1996; Merz et al., 1999; siehe auch Gaume, 2006) oder der Einbezug vertrauenswürdiger historischer Hochwasser (z. B. Gees, 1996; Mudelsee et al., 2006) können die Aussagekraft einer Abschätzung ebenfalls steigern.

6.2 Regionalhydrologische Ansätze

Für Gebiete ohne Abflussmessungen wurden in der Vergangenheit vor allem regionalhydrologische Ansätze wie Hüllkurven oder empirische Formeln eingesetzt. Ihnen zugrunde liegt die Idee, hydrologische Grössen oder Parameter einfacher Modelle anhand von flächendeckend vorhandenen Gebietskennwerten zu bestimmen oder die vorhandenen Messungen auf ungemessene Räume zu übertragen. Jüngere derartige Arbeiten für den Alpenraum haben Weingartner (1999), Pfaundler (2001), Barben (2003), Niggli (2004) sowie Merz und Blöschl (2005) verfasst. Seit einigen Jahren wird zudem der Einsatz Artifizieller Neuronaler Netzwerke (ANN) erprobt (z. B. Dawson et al., 2006).

Eine Auswahl von gut untersuchten, für die Schweiz relevanten regionalhydrologischen Verfahren ist im Programmpaket HQx_meso_CH (Barben, 2003) zusammengefasst und über eine sogenannte Praxishilfe (Spreafico et al., 2003) einer praktischen Anwendung zugänglich. Während diese Verfahren in einer Vielzahl von Gebieten übereinstimmend gute Schätzungen liefern, können sich die Resultate der einzelnen Verfahren zum Teil aber auch erheblich unterscheiden. Überlegungen zu hydrologischen Prozessen und Vorbedingungen fliessen in einzelnen Verfahren zwar ein (z. B. Kölla, 1986; Düster, 1994), werden aber nicht kausalanalytisch berücksichtigt, ebenso wenig wie die Ereignistypen. Anzumerken ist, dass die Anwendung dieser

Verfahren gemäss Spreafico et al. (2003) nur für den Skalenbereich von 10 bis 500 km^2 zu empfehlen ist. Für kleinere Gebiete sind andere Ansätze heranzuziehen, welche unter anderem auch stärker auf Feldstudien basieren sollten (vgl. Rickli und Forster, 1997; Dobmann, 2009). In der Praxishilfe wird dafür das Verfahren HAKESCH vorgeschlagen (Vogt, 2001; Vogt et al., 2002).

6.3 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Beim Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen wird in einem ersten Schritt die Hydrologie des interessierenden Einzugsgebietes simuliert. Die Genauigkeit, mit welcher die relevanten hydrologischen Prozesse dabei berücksichtigt werden, hängt vom zugrundeliegenden Modelltyp und den zur Verfügung stehenden Gebietsinformationen ab. Geschieht die Simulation ereignisbezogen, wird ein Bemessungsniederschlag auf das Gebiet appliziert und die Reaktion beurteilt. Angaben zur Wiederkehrperiode sind wegen grossen Unsicherheiten bei der Festlegung der Randbedingungen (v. a. Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) in diesem Falle nicht möglich. Vorteilhafter ist daher die kontinuierliche Simulation über eine längere Dauer, meist über mehrere Jahre. Sowohl Vorgeschichte wie auch Ereignisverlauf ergeben sich dabei jeweils aus dem meteorologischen Modellantrieb, welcher wiederum auf konkreten Messwerten basiert. Die simulierten langen Reihen werden anschliessend mit konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet. Verwendet man als Grundlage ein geeignetes prozessorientiertes hydrologisches Modell (also ein Grey- oder White-Box-Modell), besteht gegenüber anderen Schätzverfahren eine Reihe von entscheidenden Vorteilen (siehe z. B. Beven, 2001):

- Es resultiert eine komplette Ganglinie des Gebietsabflusses, nicht bloss ein Spitzenabflusswert. Dadurch können weitere relevante Hochwasserkennwerte erhoben werden, wie etwa die Volumina des Direktabflusses oder die Überschreitungsdauer von Schwellenwerten.
- Die Wahl der Wiederkehrperiode ist lediglich gegen oben durch die dreifache Anzahl simulierter Jahre beschränkt (DVWK, 1999), ansonsten aber frei.
- Die heikle Festlegung von Abflussbeiwerten zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags erübrigt sich.
- Die Randbedingungen (Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) müssen nicht geschätzt werden; sie leiten sich in der Simulation jeweils vom meteorologischen Modellinput ab (siehe Berthet et al., 2009).
- Die problematische Verknüpfung von Extremniederschlägen mit Extremabflüssen gleicher Jährlichkeit ist nicht nötig (vgl. Naef et al., 1986); Intensitäten und Mengen der Niederschläge werden im Modell über die gesamte Simulationsdauer hinweg sowohl hydrologisch und wie auch meteorologisch sinnvoll berücksichtigt.

Auch bei der kontinuierlichen Simulation besteht im Prinzip das Problem, dass sich die hydrologischen Prozesse unter Extrembedingungen verändern können. Dank der grösseren Prozessnähe sind die daraus erwachsenden Einschränkungen aber wesentlich geringer als bei den beiden weiter oben vorgestellten Verfahrensgruppen. Nachteilig ist vor allem der grosse Aufwand, welcher für eine Modellierung üblicherweise nötig ist – namentlich bei der Aufbereitung von Raumdaten und meteorologischen Daten. Zudem müssen im Normalfall Abflussmessungen zur Verfügung stehen, anhand welcher die freien Parameter des Modells kalibriert werden können. Sind diese Messreihen lang, ist eine extremwertstatistische Analyse wesentlich einfacher durchzuführen. Bei Vorliegen kurzer Reihen können mit Hilfe eines Modells allenfalls längere Reihen simuliert werden, deren Spitzenwerte dann wiederum für eine Extrapolation verwertbar sind. Stehen keine Abflussmessungen für eine Kalibrierung zur Verfügung, kann versucht werden, die freien Modellparameter über eine Regionalisierung herzuleiten. Dieser Weg ist sehr aufwendig und birgt einige Unsicherheiten (Beven, 2007); zudem benötigt er als Grundlage eine grosse Zahl gemessener Gebiete mit entsprechenden Kalibrierungen. Sowohl für die Kalibrierung wie auch für die Regionalisierung gilt, dass für den Anwendungsraum ausführliche Gebietsinformationen vorhanden sein müssen, allem voran möglichst hochauflösende und zuverlässige Daten zu Topographie (digitales Höhenmodell), Landnutzung und Bodeneigenschaften.

Wegen ihrer einfachen praktischen Durchführbarkeit kamen in der Schweiz bisher vor allem Verfahren der Extremwertanalyse (gemessene Gebiete) und der regionalhydrologischen Analyse

(ungemessene Gebiete) zum Einsatz (Spreafico et al., 2003). Beide Ansätze haben wie oben beschrieben ihre spezifischen Einschränkungen, welche im Endeffekt zu grossen Unsicherheiten und Unterschieden in den Schätzwerten führen. In den vergangenen Jahren konnte jedoch der Ansatz der Niederschlag-Abfluss-Modelle für eine praktische Anwendung in ungemessenen Gebieten der Schweiz weiterentwickelt werden (Viviroli, 2007; Viviroli et al., 2009a und 2009b). Darauf wird in Kapitel 7 genauer eingegangen.

Literatur

Barben, M., 2003. Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in der Schweiz. Geographica Bernensia, G71. Geographisches Institut der Universität Bern.

Berthet, L., Andréassian, V., Perrin, C., Javelle, P., 2009. How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. Hydrology and Earth System Sciences, 13, 819–831.

Beven, K. J., 2001. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. Wiley, Chichester, UK.

Beven, K. J., 2007. Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. Hydrology and Earth System Sciences, 11(1), 460–467.

Dawson, C. W., Abrahart, R. J., Shamseldin, A. Y., Wilby, R. L., 2006. Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. Journal of Hydrology, 319, 391–409.

Diezig, R., 2006. Hochwasserprozesstypen der Schweiz. Eine prozessorientierte Typisierung grosser Hochwasserereignisse in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde, 361. Geographisches Institut der Universität Bern.

Dobmann, J., 2009. Hochwasser, Verbauungen und Feststofflieferung in einem Wildbach – Praxishilfe zur Gesamtbeurteilung des Gefahrenpotenzials von Wildbacheinzugsgebieten. Dissertation. Geographisches Institut der Universität Bern.

Düster, H., 1994. Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Dissertation. Geographica Bernensia, G44. Geographisches Institut der Universität Bern.

DVWK [Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau], 1999. Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 251. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn.

Elsasser, A., 1996. Ein Beitrag zur zeitlichen Extrapolation von Hochwasserabflüssen – Möglichkeiten und Grenzen des Modells AGREGEE in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde, 177. Geographisches Institut der Universität Bern.

Fontaine, T. A., 1995. Rainfall-runoff model accuracy for an extreme flood. Journal of Hydraulic Engineering–ASCE, 121(4), 365–374.

Gaume, E., 2006. On the asymptotic behavior of flood peak distributions. Hydrology and Earth System Sciences, 10, 233–243.

Gees, A., 1997. Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz: Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Dissertation. Geographica Bernensia, G53. Geographisches Institut der Universität Bern.

Helbling, A., Kan, C., Vogt, S., 2006. Dauerregen, Schauer oder Schmelze – welche Ereignisse lösen in der Schweiz die Jahreshochwasser aus? wasser, energie, luft, 98(3), 249–254.

IH [Institute of Hydrology], 1999. Flood Estimation Handbook. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.

Klemeš, V., 2000. Tall tales about tails of hydrological distributions. Parts I and II. Journal of Hydrologic Engineering, 5(3), 227–239.

Kölla, E., 1986. Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der VAW, 87. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Merz, R., 2002. Understanding and Estimating Flood Probabilities at the Regional Scale. Dissertation. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer, 181. Technische Universität Wien.

Merz, R., Blöschl, G., 2005. Flood frequency regionalisation spatial proximity vs. catchment attributes. Journal of Hydrology, 302, 283–306.

Merz, R., Blöschl, G., Piock-Ellena, U., 1999. Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 51(11–12), 291–305.

Miegel, K., Büttner, U., 2003. Zum Einfluss der Datenverfügbarkeit und von extremen Ereignissen auf das Ergebnis hochwasserstatistischer Analysen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 47(4), 94–102.

Mudelsee, M., Deutsch, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., 2006. Trends in flood risk of the River Werra (Germany) over the past 500 years. Hydrological Sciences Journal, 51(5), 818–863.

Naef, F., Zuidema, P., Kölla, E., 1986. Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. In: Spreafico, M., ed. *Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung*. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, 33. Kümmerli und Frey, Bern, p. 195–233.

Naef, F., 2007. Extreme Hochwasser Verstehen – Beispiele aus der Schweiz. In: Gutknecht D., ed. Extreme Abflussereignisse: Dokumentation - Bedeutung - Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer, 206. Technische Universität Wien, p. 59–68.

Niggli, M., 2004. Combination bayésienne des estimations régionales des crues: concept, développement et validation. Thèse EPFL, 2895. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Pfaundler, M., 2001. Adapting, Analysing and Evaluating a Flexible Index Flood Regionalisation Approach for Heterogeneous Geographical Environments. Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, 8. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich.

Rickli, C., Forster, F., 1997. Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen, 148(5), 367–385.

Spreafico, M., Weingartner, R., Barben, M., Ryser, A., 2003. Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, 4. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

Uhlenbrook, S., Steinbrich, A., 2002. Einflussgrössen auf die Hochwasserbildung im regionalen Massstab. Wasser & Boden, 54(10), 8–15.

Viviroli, D., 2007. *Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für unbeobachtete Einzugsgebiete der Schweiz*. Geographica Bernensia, **G77**. Geographisches Institut der Universität Bern, ISBN 978-3905835-00-7.

Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009a. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 191–207, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.023.

Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009b. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. Journal of Hydrology*, 377(1–2), 208–225*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.022.

Vogel, R. M., Thomas, W. O., McMahon, T. A., 1993. Flood-Flow Frequency Model Selection in Southwestern United States. Journal of Water Resources Planning and Management, 119(3), 353–366.

Vogt, S., 2001. Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Diplomarbeit. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.

Vogt, S., Forster, F., Hegg, C., 2002. Clark-WSL – a method for the estimation of flood hydrographs in small torrential catchments. In: Spreafico M., Weingartner R., eds. International Conference on Flood Estimation (March 6–8, 2002 in Bern, Switzerland). Proceedings. CHR-Report II-17. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, Lelystad, p. 739–747.

Weingartner, R., 1999. Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, 37. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie, Bern.

Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K. J., 1990. Similarity and scale in catchment storm response. Reviews of Gephysics, 28(1), 1–18.

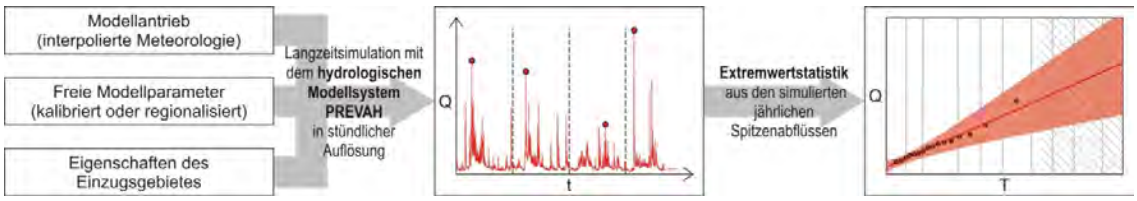
7

Modell PREVAH

Daniel Viviroli
Belop GmbH, Sarnen

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz zur Hochwasserabschätzung beruht auf einer kontinuierlichen hydrologischen Simulation über eine längere Dauer. In der nachfolgend vorgestellten Anwendung wird das hydrologische Modellsystem PREVAH (Viviroli et al., 2009a) eingesetzt, um stündliche Abflusswerte durchgehend ab 1984 zu simulieren (siehe Figur 1). Sowohl die jeweils aktuellen hydrologischen Bedingungen (Vorgeschichte) wie auch der Ereignisverlauf eines Hochwasserereignisses ergeben sich jeweils aus dem Modellantrieb, welcher wiederum auf meteorologischen Messwerten im Stundenintervall basiert. Die simulierten langen Reihen werden anschliessend mit konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet und können so zur Herleitung der gewünschten Hochwasserkennwerte verwendet werden.

Im Normalfall müssen für diesen Ansatz Abflussmessungen zur Verfügung stehen, anhand welcher die freien Parameter des hydrologischen Modells kalibriert werden können. Fehlen solche Daten, muss versucht werden, die freien Parameter über eine sogenannte Regionalisierung aus universell verfügbaren Gebietseigenschaften herzuleiten. Dies bedingt einen grossen Erfahrungsschatz aus der Kalibrierung gemessener Gebiete (Viviroli et al., 2009b) und gute Kenntnis des Anwendungsraumes. Für die Schweiz konnte in den vergangenen Jahren eine solche Regionalisierung entwickelt werden (Viviroli et al., 2009c); sie dient als Grundlage der hier vorgestellten Schätzmethode für ungemessene Gebiete (Viviroli, 2007).



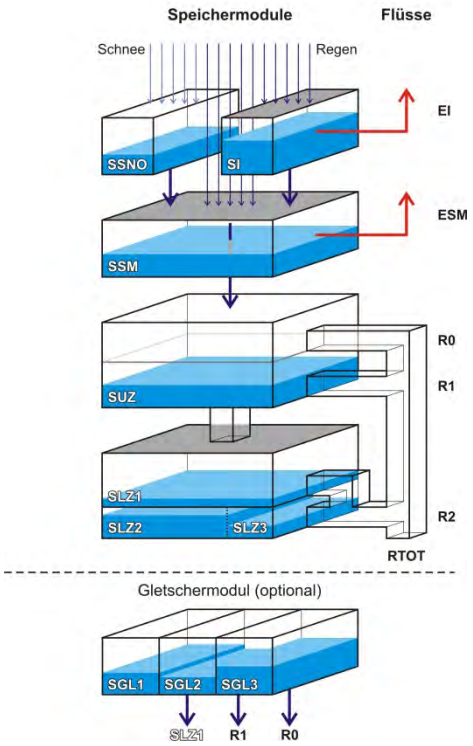
Figur 1: Prinzip der Hochwasserabschätzung mittels Langzeitsimulation.

7.1 Das verwendete hydrologische Modellsystem

Als Grundlage für die Abflusssimulation wurde das deterministische hydrologische Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) (Gurtz et al., 1997; Zappa, 2002; Viviroli et al., 2007; Viviroli et al., 2009a) verwendet. Es ist ein Modell des Typs HBV (Bergström, 1976), basiert auf einer Kaskade linearer Einzelspeicher und besitzt spezifische Module für Schnee, Gletscher, Interzeption, Bodenfeuchte und Verdunstung, Abflussbildung sowie Abflusskonzentration (Figur 2). Für die Anwendung von PREVAH für die Hochwasserabschätzung in der Schweiz spricht vor allem der reiche Erfahrungsschatz, welcher mit diesem Modellsystem in alpinen und voralpinen Gebieten gesammelt wurde (für einen Überblick siehe Viviroli et al., 2009a).

In der hier verwendeten Version verfügt PREVAH über zwölf freie Modellparameter; zwei weitere kommen für vergletscherte Gebiete hinzu. Zur Kalibrierung dieser freien Parameter werden im

Normalfall Abflussmessreihen benötigt. Weitere Gebietsparameter wie beispielsweise Blattflächenindex oder Bewuchshöhe werden von PREVAH auf Grundlage des digitalen Höhenmodells (DHM) sowie weiterer digitaler Karten (u. a. Landnutzung und Bodeneigenschaften) auf pro Monat definierte mittlere Vorgabewerte festgesetzt. Das Modellsystem wird im vorliegenden Anwendungsrahmen mit einer Rasterweite von 500m × 500m betrieben, wobei hydrologisch ähnliche Rasterzellen zu sogenannten Hydrotopen zusammengefasst werden. Dies kann als eine Art dynamischer Auflösung verstanden werden. Der Modellantrieb wird aus stündlich gemessenen Klimaparametern aus dem Messnetz der MeteoSchweiz abgeleitet. Diese Messwerte werden mit einem höhenabhängigen inversen Distanzgewichtungsverfahren für den Anwendungszeitraum 1984 bis 2005 interpoliert. Als Ausgabe liefert PREVAH Werte für sämtliche berücksichtigten Wasserhaushaltsgrössen im Stundenschritt, und zwar sowohl als summarische Werte am Gebietsauslass wie auch in der hier gewählten Basisauflösung von 0.25 km^2. Für die Hochwasserextrapolation werden die Jahresspitzen der stündlichen simulierten Ganglinie verwendet.



Figur 2: Struktur des hydrologischen Modellsystems PREVAH mit Speichermodulen (SSNO: Schneespeicher, SI: Interzeptionsspeicher, SSM: Bodenfeuchtespeicher, SUZ: Oberer Abflussspeicher, SLZ1–SLZ3: Basisabflussspeicher, SGL1–SGL3: Gletscherspeicher) und hydrologischen Flüssen (EI: Interzeptionsverdunstung, ESM: Bodenverdunstung, R0: Oberflächenabfluss, R1: Zwischenabfluss, R2: Basisabfluss, RTOT: Gesamtabfluss).

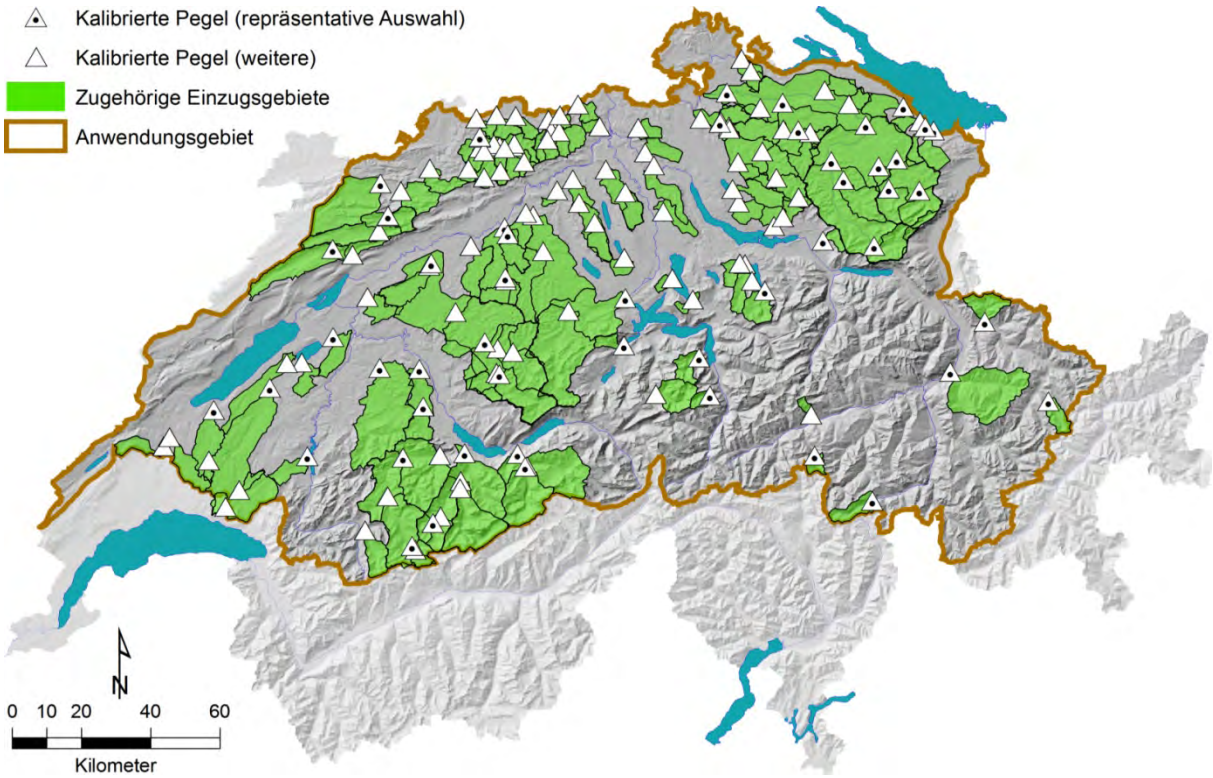
7.2 Anwendung in ungemessenen Gebieten

Wie erwähnt besitzt PREVAH freie Modellparameter, welche üblicherweise an gemessenen Abflussdaten kalibriert werden. Dies wurde als erster Schritt auch für die Entwicklung der vorliegenden Anwendung gemacht, und zwar für insgesamt 140 mesoskalige Einzugsgebiete der Alpennordseite (Figur 3). Zu diesem Zweck wurde ein halbautomatisches Kalibrierungsverfahren in PREVAH implementiert, welches durch zusätzliche, auf Spitzenabflüsse sensitive Gütemasse auch eine gute Wiedergabe der Hochwasserspitzen sicherstellen kann (Viviroli, 2007, Viviroli, 2009b).

Für die Anwendung in ungemessenen Gebieten müssen die freien Modellparameter nun ohne Kalibrierung an gemessenen Abflüssen geschätzt werden (Regionalisierung). Die Resultate der Kalibrierung dienen dabei als Datengrundlage. Ergänzt werden diese Informationen durch Angaben zu Physiographie, Landnutzung, Bodeneigenschaften, Geologie, Hydrogeologie und

Klima der Gebiete; insgesamt wurden 80 solcher Gebietsattribute flächendeckend – also insbesondere auch für ungemessene Gebiete – erhoben.

Um die Modellparameter mit Hilfe der obengenannten Gebietsattribute zu schätzen, wird eine Kombination von drei Verfahren eingesetzt (Figur 4): Als erstes werden diejenigen fünf Einzugsgebiete gesucht, welche dem zu regionalisierenden Zielgebiet am ähnlichsten sind. Die Modellparameter dieser Spendergebiete werden dann unverändert auf das Zielgebiet übertragen und jeweils für eine Abflusssimulation verwendet. Der Median dieser fünf Simulationen bildet eine erste regionalisierte Ganglinie (Nearest-Neighbour-Verfahren). Als zweites werden die Parameter mittels Ordinary Kriging im Raum interpoliert, wobei die Gebietsschwerpunkte jeweils als Stützstellen dienen. Für ein unbekanntes Gebiet können die freien Modellparameter dann direkt aus den resultierenden Parameterkarten herausgelesen und für eine Simulation benutzt werden (Kriging-Verfahren). Als drittes werden die Modellparameter aus Regressionsbeziehungen zu den flächendeckend verfügbaren Gebietsattributen geschätzt und ebenfalls für eine kontinuierliche Simulation des Abflusses verwendet (Regressionsverfahren). Diese drei regionalisierten Simulationen werden anschliessend kombiniert, indem für jeden Zeitschritt der mediane Abfluss der drei simulieren Ganglinien ermittelt wird (kombiniertes Verfahren).



Figur 3: 140 für PREVAH kalibrierte mesoskalige Einzugsgebiete der Schweiz als Grundlage für die Anwendung in ungemessenen Gebieten.

7.3 Resultate

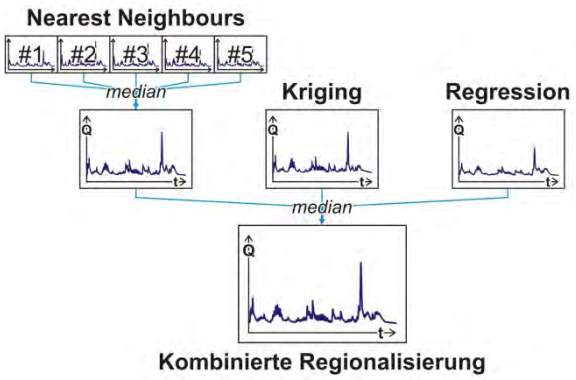
Mit Hilfe von langjährigen Messreihen aus 49 repräsentativen Einzugsgebieten (vgl. Figur 3) wird im Folgenden die Güte der oben beschriebenen Hochwasserabschätzung für ungemessene Gebiete geprüft. Dazu wird für die 49 Gebiete auf Basis regionalisierter Modellparameter eine Langzeitsimulation im Stundenschritt (1984–2003) durchgeführt; anschliessend werden die simulierten Jahreshochwasser extremwertstatistisch ausgewertet. Die Güte der Regionalisierung wird dabei über das sogenannte Jack-Knife-Verfahren beurteilt. Dabei handelt es sich um eine Kreuzvalidierung mit Auslassen des jeweils gerade betrachteten Gebietes. Für das jeweils betrachtete Gebiet werden also weder Informationen aus der Kalibrierung noch aus Abflussmessungen verwendet.

Die Resultate der Hochwasserabschätzung werden nachfolgend anhand des Hochwassers mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren (HQ_{100}) diskutiert, da dieser Standardwert am besten

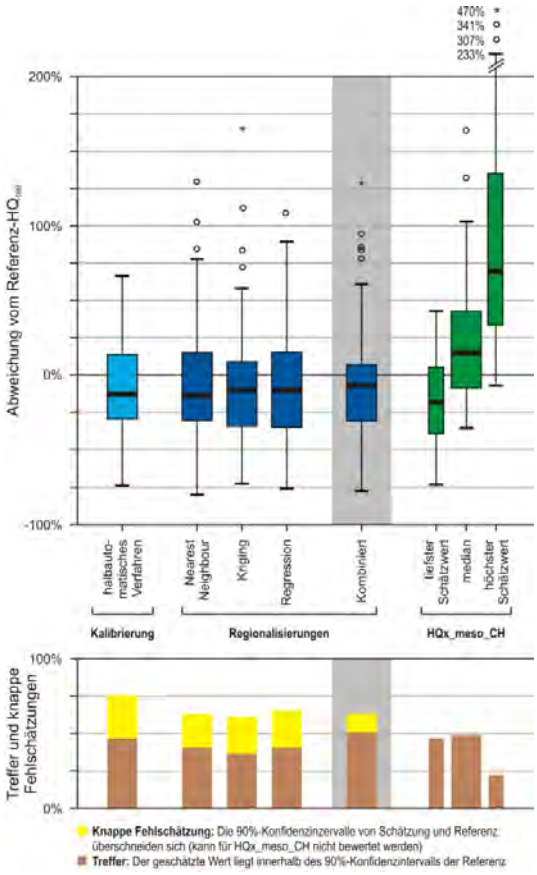
mit anderen Verfahren vergleichbar ist. Als Grundlage der Schätzung wurden stets die stündlichen Jahreshöchstwerte 1984–2003 verwendet, welche aus den simulierten Ganglinien herausgelesen wurden. Die Extrapolation aus der gleich langen und ebenfalls stündlich aufgelösten Reihe beobachteter Werte dient als Referenz. Zu beachten ist, dass die gewählte Wiederkehrperiode zwar ausserhalb des empfohlenen Extrapolationsbereichs von $n \times 3 = 60$ Jahren liegt (DVWK, 1999), dass Viviroli (2007) aber aufzeigen konnte, dass die prozentualen Schätzfehler für ein HQ_{100} im vorliegenden Datensatz mit denjenigen für ein HQ_{20} oder HQ_{50} sehr gut korrelieren. Zugunsten der besseren Vergleichbarkeit mit Standardverfahren ist die Extrapolation auf ein HQ_{100} also vertretbar.

Für jedes der 49 Gebiete wurde die prozentuale Abweichung von der Referenz bestimmt und daraus die mediane Abweichung berechnet. Anhand dieser Abweichung (Figur 5, oben) lässt PREVAH sowohl bei der kalibrierten wie auch bei den regionalisierten Simulationen eine moderate Tendenz zur Unterschätzung des HQ_{100} erkennen. Gleichzeitig ist aber zu verzeichnen, dass sich die Schätzgüte bei der Regionalisierung gegenüber derjenigen der Kalibrierung kaum verschlechtert. Die beste Variante für die Anwendung in ungemessenen Gebieten (kombinierte Regionalisierung, grau hinterlegt) weist einen medianen Schätzfehler von lediglich -7% auf. Der Schätzfehler eines HQ_{100} liegt dabei für die Hälfte der 49 betrachteten repräsentativen Einzugsgebiete zwischen -31% und +7% (Interquartilsbereich). Bemerkenswert ist, dass für die einzelnen Regionalisierungsverfahren jeweils nur wenige Ausreisser gegen oben zu verzeichnen sind, was auf eine gute Stabilität der Schätzung hinweist. Deutliche Überschätzungen können allenfalls auftreten, wenn aussergewöhnliche Bedingungen das Hochwassergeschehen prägen, beispielsweise Ausuferungen oder starker Karsteinfluss. In solchen Fällen sind detailliertere Studien nötig, welche beispielsweise ein hydraulisches Modell miteinbeziehen (vgl. Schwanbeck et al., 2007).

Die Betrachtungen zum Schätzfehler lassen sich weiter konkretisieren und direkter in Bezug zur Praxis setzen, wenn die Anzahl getroffener und knapp verfehlter Schätzungen untersucht wird (Figur 5, unten). Von einem Treffer wird gesprochen, wenn der aus der Simulation geschätzte Wert im statistischen 90%-Konfidenzintervall des aus der Beobachtung extrapolierten Referenz-HQ_{100} liegt. Dies kann als sehr gutes Resultat bezeichnet werden, wenn es sich wie bei der Regionalisierung um eine Schätzung ohne Kalibrierung des Modells handelt. Bei einer knappen Fehlschätzung überschneiden sich zumindest die Konfidenzintervalle von Simulation und Referenz, was als immer noch befriedigend eingestuft wird. Betrachtet man die Treffer und die knappen Fehlschätzungen zusammen, wird mit einer Kalibrierung in 76% der Fälle ein befriedigendes bis sehr gutes Resultat erzielt. Dieser Anteil brauchbarer Schätzungen kann mit einer Regionalisierung, d.h. bei der Anwendung in ungemessenen Gebieten, zwar nicht ganz erreicht werden, beträgt aber immer noch 65%. Beim Anteil Treffer (sehr gute Schätzungen) alleine zeigt die kombinierte Regionalisierung mit 51% vielversprechende Resultate.



Figur 4: Kombination der drei Regionalisierungsverfahren zur Ermittlung der Abflussganglinie eines ungemessenen Einzugsgebietes.



Figur 5: Schätzgüte für ein HQ_{100} bei Kalibrierung und Regionalisierung des Modells, bewertet auf Basis von 49 repräsentativen Einzugsgebieten. Oben: Abweichung von der Referenz, unten: Anteil Treffer und knappe Fehlschätzungen. Die für ungemessene Gebiete verwendete kombinierte Regionalisierung ist grau hinterlegt. Zum Vergleich wurden die entsprechenden Resultate von HQx_meso_CH ebenfalls aufgetragen.

7.4 Vergleich mit Standardverfahren

Interessant ist nun der Vergleich des hier vorgestellten Ansatzes mit den Schätzwerten von HQx_meso_CH (Spreafico et al. 2003, siehe Kapitel 8). Dazu werden in HQx_meso_CH – wiederum für die 49 repräsentativen Einzugsgebiete – diejenigen fünf Verfahren angewendet, mit welchen ein HQ_{100} geschätzt werden kann. Es ergeben sich die folgenden Resultate:

Bezüglich Schätzfehlern ist bei HQx_meso_CH eine leichte Neigung zur Überschätzung festzustellen (Figur 5, oben rechts). Betrachtet man von den fünf für die Schätzung eines HQ_{100} zur Verfügung stehenden Verfahren jeweils dasjenige mit dem medianen Schätzwert, resultiert für die 49 betrachteten Gebiete ein Fehler von +15% (Median der Abweichungen). Beim jeweils höchsten Schätzwert von HQx_meso_CH können mitunter sehr starke Überschätzungen geschehen; für die praktische Anwendung von HQx_meso_CH wird allerdings empfohlen, den jeweils höchsten und tiefsten Schätzwert zu streichen. Der Anteil getroffener Schätzungen (Figur 5, unten rechts) beim medianen Schätzwert von HQx_meso_CH ist mit 47% wiederum vergleichbar mit den Resultaten der prozessbasierten Abschätzung. Die knappen Fehlschätzungen lassen sich nicht beurteilen, da bei HQx_meso_CH kein vergleichbares Konfidenzintervall zur Verfügung steht.

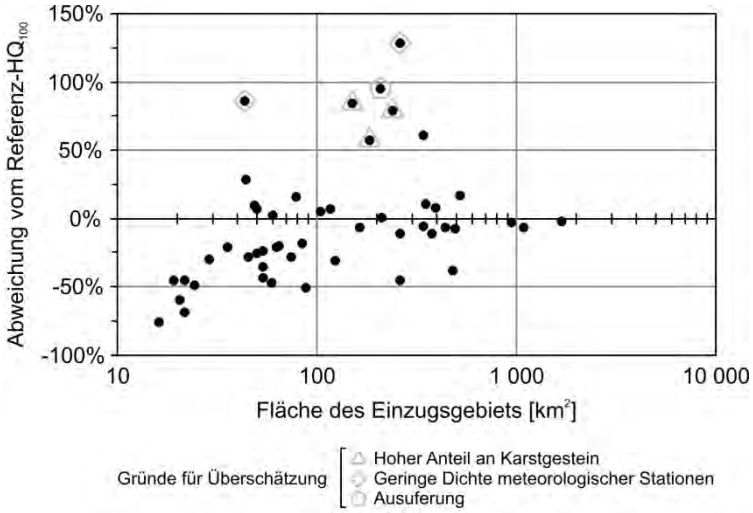
Im hier betrachteten repräsentativen Datensatz schneiden die Schätzungen mit HQx_meso_CH bemerkenswert gut ab. Eine relevante Problematik besteht allenfalls im grossen Wertebereich, welchen die einzelnen Schätzverfahren in manchen Gebieten erzeugen. Von daher erscheint es äusserst sinnvoll, die Ergebnisse von HQx_meso_CH gemeinsam mit der hier vorgestellten prozessorientierten Methode für Abschätzungen zu verwenden, da dadurch robuste Informationen aus völlig unterschiedlich aufgebauten Verfahrensfamilien verglichen werden können. Zusätzlich bietet die prozessorientierte Schätzung eine komplette Ganglinie mit entsprechenden Auswertungsmöglichkeiten.

7.5 Anwendungsskala

Die Erfahrung zeigt, dass sich die Modellierung von Spitzenabflüssen – und damit auch die Hochwasserabschätzung – in kleinen Einzugsgebieten schwieriger gestaltet als in grossen (siehe auch Kapitel 8). Dies lässt sich für das hier beschriebene Verfahren anhand von Figur 6 bestätigen, wo für die kombinierte Regionalisierung Schätzfehler und Gebietsgrösse gegenübergestellt sind. So sind in den untersuchten Gebieten mit einer Fläche von weniger als 40 km^2 ausschliesslich Unterschätzungen des HQ_{100} zu verzeichnen, bei weniger als 25 km^2 relativ deutliche. Die Gründe dafür liegen einerseits in der Schwierigkeit, starke Niederschläge in diesem Skalenbereich korrekt zu interpolieren, andererseits in der eingeschränkten Fähigkeit von HBV-Modellen, ausgesprochen schnelle Abflussantworten korrekt zu simulieren.

Bei mittelgrossen Gebieten (Skalenbereich zwischen 25 und 750 km^2) ist zwar eine recht grosse Spannweite der Schätzfehler zu verzeichnen, der Interquartilsbereich ist jedoch identisch mit der oben erfolgten Gesamtbetrachtung und beträgt ebenfalls -31% bis +7%; der mediane Schätzfehler für ein HQ_{100} vermindert sich jedoch auf +3.6%. Überschätzungen treten hier auf, wenn ein hoher Anteil von Karstgestein vorliegt (z. B. Suze–Sonceboz), das meteorologische Messnetz eine vergleichsweise geringe Dichte aufweist (z. B. Plessur–Chur) oder Ausuferungen bei Hochwasserabfluss auftreten (z. B. Murg–Murgenthal). Bezüglich Karst hat die Erfahrung gezeigt, dass bei einem Anteil von über 50% verkarstungsfähigen Gesteins fast immer mit Überschätzungen gerechnet werden muss.

Die drei grössten betrachteten Gebiete (das Grösste davon ist die Thur bei Andelfingen mit 1696 km^2) weisen sehr geringe Schätzfehler auf, was auf vorteilhafte Ausmittelungseffekte in diesem Skalenbereich zurückzuführen sein dürfte. Gebiete von mehr als 2000 km^2 Fläche sollten jedoch in Teilgebiete aufgetrennt und mittels eines Routings zusammengeführt werden, wo nötig auch mit einem hydraulischen Modell (Schwanbeck et al., 2007).



Figur 6: Schätzfehler für ein HQ_{100} im Vergleich mit der Gebietsgrösse.

7.6 Abschätzung seltener Direktabflussvolumina

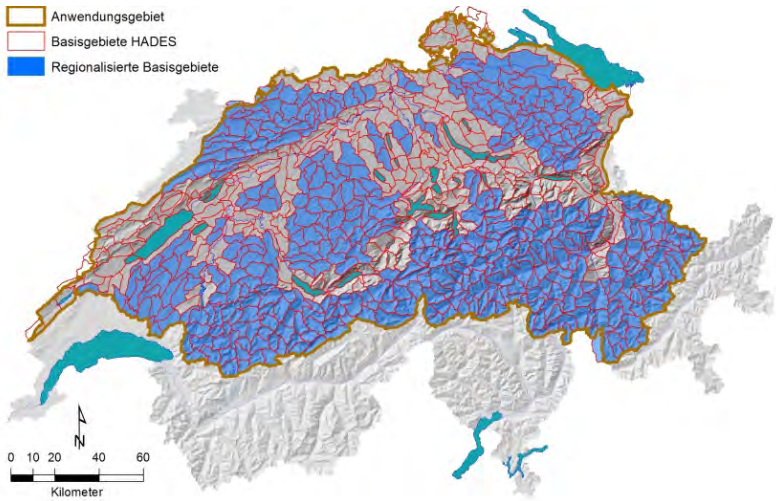
Da mit dem vorgestellten Ansatz nicht nur Spitzenwerte ermittelt werden, sondern eine kontinuierliche Ganglinie, ist es auch möglich, seltene Direktabflussvolumina für ungemessene Gebiete abzuschätzen. Dies ist eine wichtige wasserbauliche Grösse, welche von den bestehenden Verfahren kaum bis gar nicht berücksichtigt wird. Die Schätzgüte eines hundertjährlichen Direktabflussvolumens (HV_{100}) kann hier ebenfalls anhand der Ergebnisse von 49 repräsentativen Gebieten ermittelt werden. Der mediane Schätzfehler für das HV_{100} beträgt beim kalibrierten Modell +7%, beim regionalisierten Modell (Anwendung in ungemessenen Gebieten) +5%, und als Trefferquoten (siehe oben) werden 73% resp. 67% erreicht. Diese Ergebnisse belegen, dass sich mit dem Modellsystem auch seltene Direktabflussvolumina gut abschätzen lassen.

7.7 Fazit und Ausblick

Die oben vorgestellten Resultate belegen, dass die prozessbasierte Langzeitsimulation geeignet ist, um seltene Hochwasserabflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten der Schweiz abzuschätzen. Die Schätzfehler sind vertretbar und bewegen sich im Bereich der etablierten empirischen und stochastischen Verfahren. Somit stellt der hier erläuterte Modellierungsansatz einen wichtigen Beitrag zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Gebieten dar, insbesondere weil dieser Ansatz auf völlig anderen Voraussetzungen basiert als alle bisherigen Verfahren. Somit kann ein wesentlicher Informationsgewinn für die Hochwasserabschätzung in mesoskaligen Gebieten erreicht werden. Zudem sind nicht nur Schätzwerte für die Spitzenabflüsse verfügbar, sondern vollständige Ganglinien, wodurch beispielsweise auch seltene Direktabflussvolumina abgeschätzt werden können. Über eine Verlängerung des meteorologischen Antriebes (z. B. durch Einsatz eines Wettergenerators) besteht zudem die Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der Schätzung zu vergrössern und noch seltenere Hochwasser abzuschätzen.

Ein weiterer Vorteil des beschriebenen Systems ist die Flexibilität von Modellantrieb und Modellparametrisierung. Es ist nun möglich, sowohl im Bereich der Meteorologie und Klimatologie wie auch im Bereich der Abflussbildung Szenarien zu untersuchen und Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Denkbar sind beispielsweise Studien zur Klimaänderung oder zur Landnutzungsänderung (Projekt CCHydro, siehe Köplin et al., eingereicht), wie auch Betrachtungen über hypothetische Niederschlagsverläufe (Worst-Case-Studien, z. B. Schwanbeck et al. 2007, Schwanbeck et al. 2008). Neben der eigentlichen Abflussantwort des Gebietes sind dabei wiederum zeitlich und räumlich differenzierte Werte der Wasserhaushaltsgrössen verfügbar. Grundlage für alle derartigen Studien ist die Prozessorientierung von PREVAH. Diese führt zwar zu einigem Aufwand in der Parameterbestimmung, lässt es dafür aber zu, hydrologisch sinnvolle Gebietsantworten auf vielfältige Modifikationen der Rahmenbedingungen zu simulieren.

Die vorgestellte Schätzmethode wird gegenwärtig der Anwendung durch ein breiteres Publikum zugänglich gemacht. Dazu werden auf Grundlage von Simulationen mit PREVAH Hochwasserschätzwerte für 450 Basisgebiete (siehe Figur 7) gemäss Hydrologischem Atlas der Schweiz hergeleitet (122 davon sind gleichzeitig Bilanzierungsgebiete), welche einen grossen Teil der mesoskaligen Einzugsgebiete der nordalpinen Schweiz abdecken. Die Ergebnisse werden voraussichtlich Anfang 2011 über das Bundesamt für Umwelt (BAFU) verfügbar sein.



Figur 7: Basisgebiete der Schweiz, für welche mit dem vorgestellten Ansatz Hochwasserabschätzungen verfügbar sein werden.

Literatur

Bergström, S., 1976. *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*. Bulletin A 52, Department of Water Resources Engineering, University of Lund, Sweden.

DVWK [Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau], 1999. *Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 251, Bonn.

Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H., Menzel, L., Schulla, J., 1997. Auswirkungen von klimatischen Variationen auf den Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Abschlussbericht zum Nationalen Forschungsprogramm 31 „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“. vdf Hochschulverlag, Zürich.

Köplin, N., Schädler, B., Viviroli, D., Weingartner, R. How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences*, eingereicht.

Schwanbeck, J., Viviroli, D., Weingartner, R., Röser, I., Trösch, J., 2007. Prozessbasierte Abschätzung von Extremhochwassern im Einzugsgebiet der Sihl. Projektschlussbericht. Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL). Geographisches Institut der Universität Bern und TK Consult AG, Zürich.

Schwanbeck, J., Viviroli, D., Weingartner, R., Frei, C., Schumann, A., 2008. Modellbasierte Sensitivitätsanalysen für das Berner Oberland. In: Bezzola, G. R., Hegg, C., eds. *Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen*. Umwelt-Wissen, 08-25. Bundesamt für Umwelt, Bern, p. 48–58.

Viviroli, D., 2007. *Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für unbeobachtete Einzugsgebiete der Schweiz*. Geographica Bernensia, **G77**. Geographisches Institut der Universität Bern, ISBN 978-3905835-00-7.

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009a. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), 1209–1222, doi:10.1016/j.envsoft.2009.04.001.

Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009b. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 191–207, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.023.

Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009c. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. Journal of Hydrology*, 377(1–2), 208–225*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.022.

Zappa, M., 2002. Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales. Diss. ETH, **14895**. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

8

HQx-meso-CH

Martin Barben
Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

8.1 Einleitung

Für den Einsatz eines einfachen Modells zur Abschätzung von Hochwasserspitzen in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen sind die Ansprüche an die Datenlage gering und der zeitliche und finanzielle Aufwand bescheiden. Diese für die Praxis günstigen Bedingungen müssen allerdings mit einer oftmals unbekannten Güte der Resultate „erkauft“ werden. Im Gegensatz zu früher ist es aber mit den heutigen Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung nicht mehr notwendig, sich auf eine einzige Methode zu beschränken. Man kann viele verschiedene Abschätzverfahren gleichzeitig anwenden und die Ergebnisse analysieren. So gelangt man zu einer breiter abgestützten und damit insgesamt plausibleren Hochwasserabschätzung. Das hier vorgestellte Programmpacket HQx_meso_CH ist ganz auf diese Vorgehensweise abgestimmt.

Trotzdem ist die Hochwasserabschätzung insgesamt nicht einfacher geworden. Im Gegenteil: Es braucht ein grosses Fachwissen, um die zur Verfügung stehenden Mittel optimal einzusetzen und um die Resultate richtig zu interpretieren. Früher lag der Schwerpunkt des Aufwandes bei der Rechenarbeit, und es blieb kaum Zeit, die ermittelten Ergebnisse in Frage zu stellen oder zu plausibilisieren. Heute ist der Berechnungsaufwand dank leistungsfähiger Computerprogramme minimal, und es bleibt mehr Zeit für vertiefende Analysen und für die Plausibilisierung der Resultate.

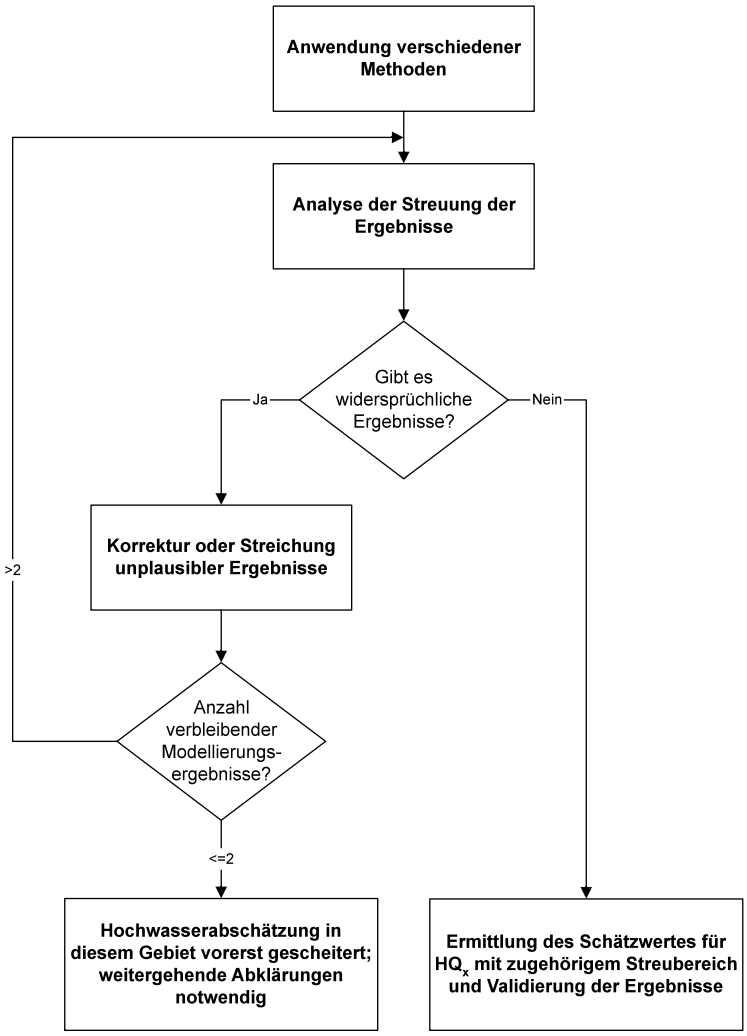
Die Hochwasserabschätzung in mittelgrossen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen kann in vier Arbeitsschritte gegliedert werden (vgl. Figur 1):

1. Anwendung verschiedener geeigneter Methoden
2. Analyse der Streuung der Ergebnisse
3. Korrektur oder Streichung unplausibler Ergebnisse
4. Ermittlung des Schätzwertes für HQx mit zugehörigem Streubereich und Validierung der Ergebnisse

Mit diesem Vorgehen erhalten wir also sowohl einen *Schätzwert* als auch einen zugehörigen *Streubereich*. Dieser Streubereich kann als „Ersatz“ für das Vertrauensintervall angesehen werden, welches im Zusammenhang mit wasserbaulichen Überlegungen sehr wichtig ist. Auf dieses Vorgehen wird weiter unten noch näher eingegangen.

Die Erfahrungen in der Schweiz zeigen, dass es sinnvoll ist, bei der Hochwasserabschätzung zwischen *mittelgrossen Einzugsgebieten (10-500 km^2)* und *kleinen Einzugsgebieten (<10 km^2)* zu unterscheiden. Methoden für mittelgrosse Einzugsgebiete können nicht bedenkenlos auf kleine Einzugsgebiete übertragen werden, da die Abflussbildung und die Abflusskonzentration in kleinen Einzugsgebieten nicht von den gleichen Prozessen dominiert werden wie in grösseren Gebieten. Die kleinräumig wechselnden Verhältnisse, welche die Abflusscharakteristik von Kleineinzugsgebieten prägen, erfordern neben der Modellierung auch Geländearbeiten (Kartierungen). Bei mittelgrossen Gebieten können die entsprechenden Parameter hingegen meist

flächendeckenden digitalen Datensätzen (Bodeneignungskarten, Bodennutzungskarten etc.) entnommen werden. Dies ist bei Kleineinzugsgebieten wegen des zu geringen Detaillierungsgrades der Datensätze oftmals problematisch. Bei Analysen in Kleineinzugsgebieten kommt erschwerend hinzu, dass nur für sehr wenige Gebiete genügend lange Messreihen zur Verfügung stehen, um die Abschätzverfahren zu eichen.



Figur 1: Hochwasserabschätzung in mittelgrossen Einzugsgebieten ohne Abflussmessung

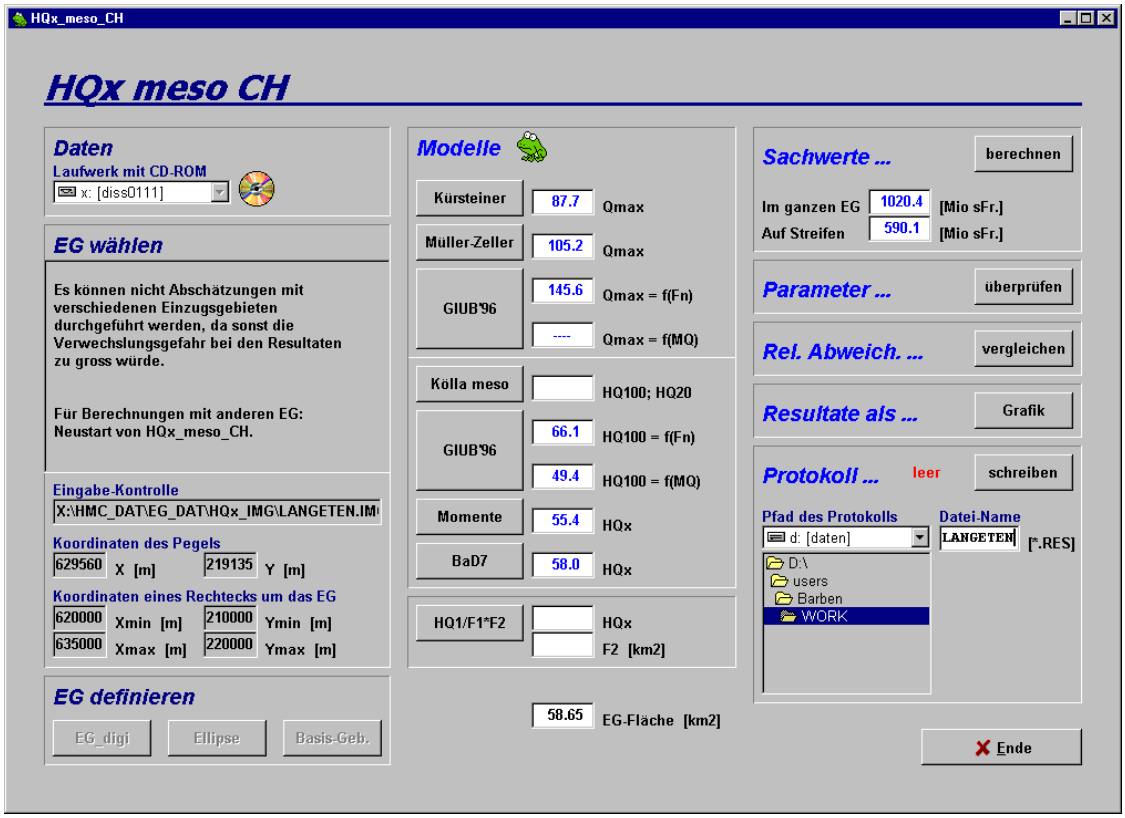
8.2 Software HQx_meso_CH

Das Programm **HQx_meso_CH** (**HQx**: Hochwasser mit beliebiger Wiederkehrperiode x; **meso**: mesoskalige, d.h. mittelgrosse Einzugsgebiete; **CH**: schweizerische Einzugsgebiete) dient der Abschätzung von Hochwasserspitzenabflüssen in mittelgrossen (10 bis ca. 500 km^2) Einzugsgebieten der Schweiz. In das Softwarepaket wurden die neun folgenden Methoden integriert:

Kürsteiner
Müller-Zeller
GIUB'96 [f(F) und f(MQ)]
} Zielgrösse Q_{max}

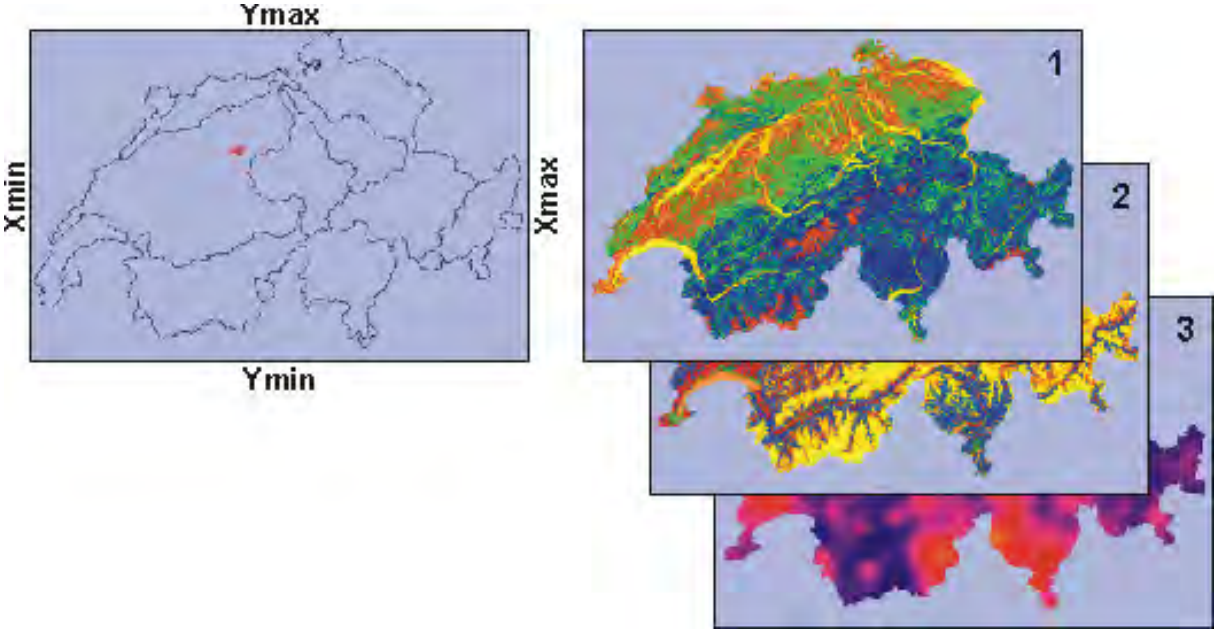
Kölla meso
GIUB'96 [f(F) und f(MQ)]
Momente
BaD7
} Zielgrösse HQ_x je nach Modell: HQ_{20}, HQ_{100} oder beliebig

HQx_meso_CH ist so konzipiert, dass keine weiteren Zusatz-Programme benötigt werden. Das Programm und alle benötigten Grunddatensätze befinden sich auf einer CD-ROM. Die Grunddatensätze wurden flächendeckend über die ganze Schweiz in einem 100 m-Raster aufbereitet. Das Programm bietet die Möglichkeit, beliebige Einzugsgebiete ins System einzugeben (Digitalisieren am Bildschirm) oder bestehende Einzugsgebiete einzulesen (Auswahl von HADES-Basisgebieten), verschiedene Hochwasser-Abschätzmodelle anzuwenden und die Resultate in Protokollen und Grafiken auszugeben.



Figur 2: Hauptformular von HQx_meso_CH

Der Anwender braucht sich nicht darum zu kümmern, welche Datensätze für welche Modelle benötigt werden. HQx_meso_CH ermittelt die Parameter für das ausgewählte Einzugsgebiet aus den vorhandenen Datensätzen und führt die Berechnungen automatisch durch.

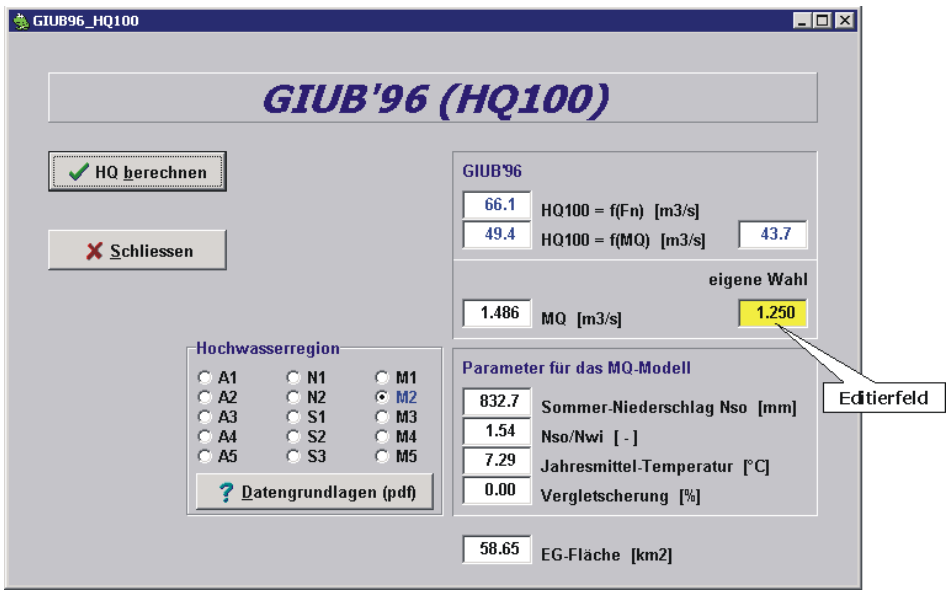


Figur 3: Datensätze in HQx_meso_CH. Links: Festlegen des Einzugsgebietes Rechts: Modellparameter oder Parameter, die weiterverarbeitet werden

In Figur 3 rechts sind beispielhaft drei Datensätze dargestellt, die in einzelnen oder mehreren Abschätzmodellen benötigt werden. HQx_meso_CH umfasst insgesamt knapp 30 Datensätze, welche sich in drei Kategorien gliedern:

1. Aus Gebietskennwerten abgeleitete Modellparameter (z.B. der c-Wert nach Kürsteiner)
2. Gebietskennwerte, aus denen Gebietsmittelwerte berechnet werden, welche dann direkt in Regressionsgleichungen einfliessen (z.B. die Landnutzung)
3. Weitere Daten, die vor ihrer Anwendung in Modellen noch weiterverarbeitet werden müssen (z.B. die Starkniederschläge aus dem „Hydrologischen Atlas der Schweiz“, Tafel 2.4).

Die Philosophie von HQx_meso_CH kann am Beispiel des Modells GIUB'96 gut dargestellt werden (vgl. Figur 4). GIUB’96 umfasst zwei Ansätze für die Bestimmung der Hochwasserspitzen: Einerseits den Ansatz mit HQ_{100} = f(Fn) und andererseits den Ansatz mit HQ_{100} = f(MQ). Der erste Ansatz bietet keinerlei Schwierigkeiten bei der Anwendung. Die Einzugsgebietsgrösse (Fn) wird vom Programm berechnet und je nach Lage des Einzugsgebietes in die entsprechende regional-differenzierte Funktion eingesetzt. Aufwändiger gestaltet sich die Arbeit mit dem zweiten Ansatz, bei dem der mittlere Jahresabfluss (MQ) als unabhängiger Modellparameter einfliesst. In einem Einzugsgebiet ohne Abflussmessungen ist MQ jedoch nicht bekannt. HQx_meso_CH beinhaltet deshalb ein MQ-Modell, das den mittleren Abfluss für beliebige Einzugsgebiete der Schweiz schätzt. Das Modell basiert auf den Eingabeparametern Sommerniederschlag, Verhältnis Sommer- zu Winterniederschlag, mittlere Jahrestemperatur und Vergletscherung. HQx_meso_CH verwendet standardmässig den mit diesem Ansatz bestimmten mittleren Jahresabfluss. Falls aber bessere Angaben zum mittleren Jahresabfluss vorliegen, kann der Wert im Editierfeld angepasst werden. Die von HQx_meso_CH automatisch erhobenen Parameter sind also immer als Vorschläge zu verstehen. Falls vertrauenswürdigere Daten zur Verfügung stehen, können (und sollen!) diese manuell eingefügt werden.



Figur 4 Hochwasserabschätzung mit dem Modell GIUB'96

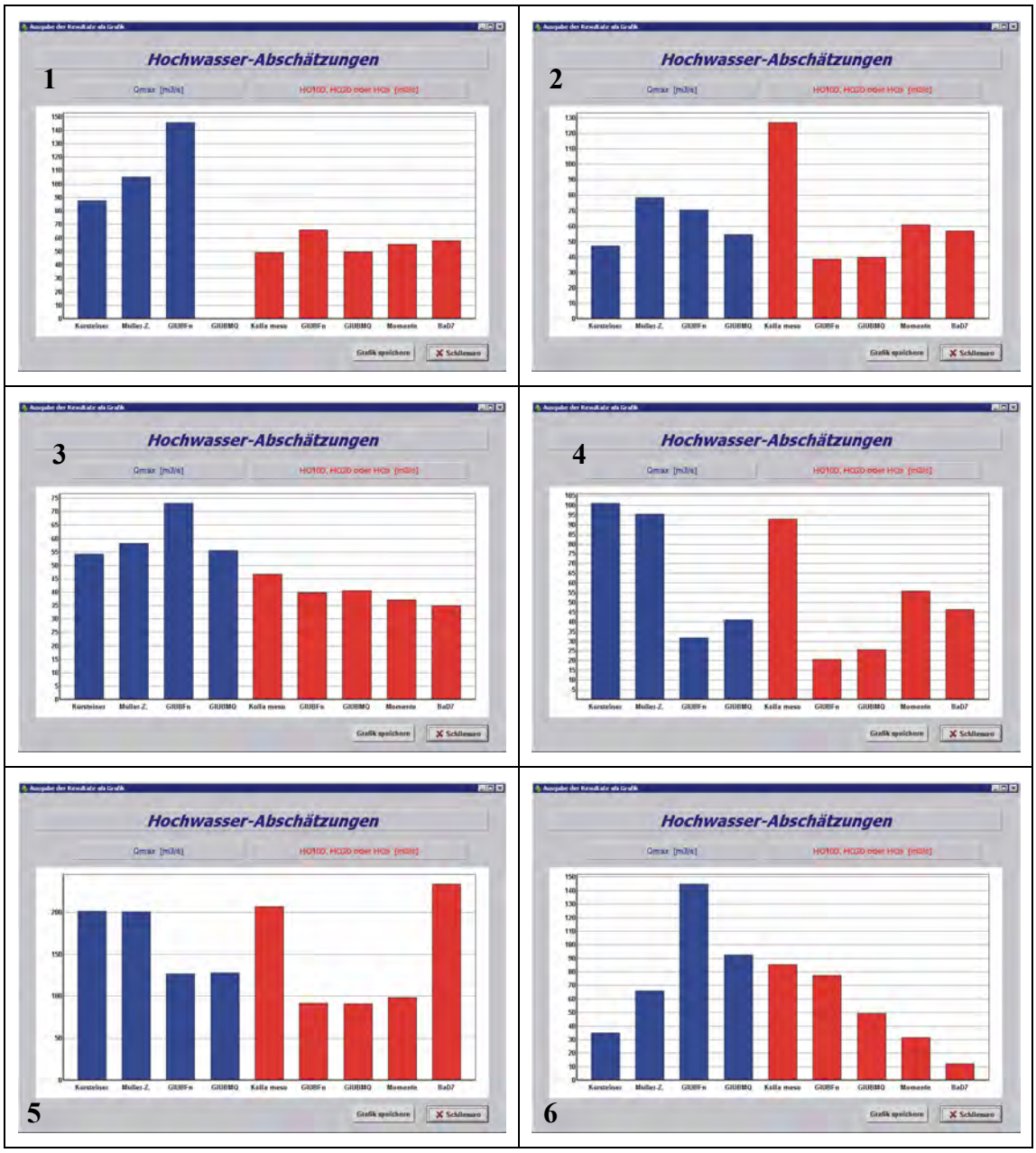
Wenn die Resultate aller Modelle vorliegen, kann mit der Interpretation der Ergebnisse begonnen werden. HQx_meso_CH nimmt den Anwendern die Entscheidung über die Grösse der Hochwasserspitze nicht ab, sondern unterstützt sie lediglich mit effizienten Hilfsmitteln bei den verschiedenen Berechnungen.

8.3 Berechnungsablauf und Interpretation der Ergebnisse

Im Folgenden werden der Berechnungsablauf und die Interpretation der Ergebnisse gemäss der weiter vorne vorgeschlagenen Strategie erläutert (vgl. Figur 1).

Schritt 1: Anwendung verschiedener Modelle

Durch die Anwendung verschiedener Modelle soll ein möglichst breites Spektrum an Hochwasserabschätzungen bereitgestellt werden (vgl. Figur 5).



Figur 5: Hochwasserabschätzungen in verschiedenen Einzugsgebieten (Berechnung und Darstellung mit HQx_meso_CH)

Schritt 2: Analyse der Streuung der Ergebnisse

Bei der Analyse der Streuung der Ergebnisse gibt es grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden, die anhand der Beispiele aus Figur 5 erläutert werden:

Die verschiedenen Abschätzungen liegen in einer vergleichbaren Grössenordnung (Beispiele 1 und 3): Sowohl die Ergebnisse der Zielgrösse Q_{max} (blaue Balken) als auch die Ergebnisse der Zielgrösse HQ_{100} bzw. HQ_x (rote Balken) liegen relativ nahe beieinander. Das Mittel der Q_{max}-Werte liegt über dem Mittel der HQ_x-Werte. In diesem Fall lässt sich der gesuchte Spitzenabfluss zuverlässig bestimmen (vgl. Schritt 4).

Die verschiedenen Abschätzungen weisen eine grosse Streuung auf (Beispiele 2, 4, 5 und 6): Die Ergebnisse innerhalb der Gruppe Q_{max} und/oder HQ_x liegen weit auseinander. Eventuell liegen auch einzelne Ergebnisse aus der HQ_x-Gruppe über den Werten der Q_{max}-Gruppe. Eine Abschätzung der Hochwasserkennwerte ist in diesem Fall problematisch, und die Ursachen für die widersprüchlichen Ergebnisse sind zu suchen (Schritt 3).

Schritt 3: Korrektur oder Streichung unplausibler Ergebnisse

In diesem Schritt werden die unplausibel scheinenden Resultate genauer unter die Lupe genommen. Man untersucht, weshalb einzelne Ergebnisse aus dem Rahmen fallen. Findet man die Ursachen des Modellversagens heraus, so kann man die entsprechenden Parameter anpassen und eine neue, verbesserte Hochwasserabschätzung machen. Falls die Ursachen für das Modellversagen nicht erkannt werden können, wird das entsprechende Modell nicht mehr weiter berücksichtigt. Damit erhält man eine bereinigte Palette von Abschätzungen, die wiederum ab Schritt 2 beurteilt wird, sofern noch genügend Ergebnisse vorliegen. Ist dies nicht der Fall, gilt die Abschätzung nach der hier propagierten Strategie vorerst als gescheitert und es sind weitergehende Analysen notwendig.

Die Gründe, wieso ein Modell versagen kann, sind vielfältig. Sie hängen vom Aufbau und den Eingabegrössen der einzelnen Verfahren und von der räumlichen Lage des Einzugsgebietes ab.

Schritt 4: Ermittlung des Schätzwertes für HQ_x mit zugehörigem Streubereich und Validierung der Ergebnisse

Schritt 4 wird nur erreicht, wenn mindestens drei plausible Ergebnisse vorliegen (vgl. Figur 1). Dann wird der gesuchte Hochwasserspitzenabfluss wie folgt abgeschätzt:

1. Der (gewichtete) Mittelwert aus den verbleibenden Ergebnissen führt zum Schätzwert für $\mathbf{HQ_x}$.
2. Der **Streubereich** wird durch den grössten und den kleinsten Wert der verbleibenden Abschätzungen bestimmt. Dieser Streubereich ist aber nicht dem Vertrauensintervall einer Extremwertanalyse gleichzusetzen. Der Streubereich wird beispielsweise auch von den Unsicherheiten bei der Parameterwahl der einzelnen Modelle beeinflusst. Trotzdem ist es vernünftiger, diesen Streubereich im Sinne eines „nichtstatistischen Vertrauensintervalls“ zu verwenden als auf einen einzigen fixen Schätzwert zu setzen.
3. Validierung der Ergebnisse.

Bemerkungen zu 1: Als Schätzwert für $\mathbf{HQ_x}$ kann sowohl das arithmetische Mittel als auch ein gewichtetes Mittel verwendet werden. Die Festlegung der Gewichte wird den Anwenderinnen und Anwendern überlassen. So können Modelle, die im Einzelfall als „sehr gut“ beurteilt werden, besonders gewichtet werden.

Bemerkungen zu 2: Die Obergrenze des Streubereiches für das HQ_x sollte nicht über dem Mittel der Q_{max}-Werte liegen, da sich daraus Widersprüche ergeben würden.

Bemerkungen zu 3: Zur Validierung der Ergebnisse bieten sich verschiedene Möglichkeiten an:

- Berücksichtigung der Hochwassergeschichte
- Vergleich der Ergebnisse mit der vorhandenen Abflusskapazität des Gerinnes
- Einbezug von Prozessüberlegungen

8.4 Erfahrungen mit HQx_meso_CH

Von HQx_meso_CH wurden seit der Einführung im Jahr 2003 rund 200 Exemplare an private Umweltbüros und an kantonale Ämter verkauft. An mehreren Kursen wurden Fachleute im Umgang mit der Software geschult. Damit hat HQx_meso_CH – vor allem in der Deutschschweiz – eine sehr grosse Verbreitung gefunden. Das Konzept der gleichzeitigen Anwendung von mehreren Abschätzmethoden ist bei den Fachleuten sehr gut angekommen.

Bei HQx_meso_CH stehen alle Grunddatensätze zur Verfügung (es müssen keine Modellparameter im Feld erhoben werden) und bei der Anwendung ist eine strenge Benutzerführung vorgegeben. Dies führte dazu, dass bei der Anwendung der Modelle kaum Probleme aufgetreten und kaum negative Rückmeldungen eingegangen sind. Als kleine Erweiterung zur Software wurde nachträglich einzig eine Schnittstelle programmiert, die das Einlesen von bereits vorhandenen Einzugsgebietsgrenzen aus dem GIS erlaubt.

9

Regulierung des Juragewässersystems: Modellgestützte Optimierung von Betriebsparametern mit FLUX/FLORIS 2000.

Jürg Trösch
TK Consult AG, Zürich

9.1 Die Aare

Die Aare ist der wichtigste Fluss des schweizerischen Mittellandes. Sie erstreckt sich von den Berner Alpen über Thuner- und Brienzersee, die Jurarandseen Murtensee, Neuenburgersee und Bielersee bis zum Zusammenfluss mit dem Rhein. Sie ist mit ihren Nebenflüssen ein wichtiges wasserwirtschaftliches System. Die Aare weist beim Pegel Untersiggenthal Stilli, nach der Aufnahme von Reuss und Limmat, eine mittlere Wasserführung von 561 m^3/s auf. Das entsprechende Einzugsgebiet umfasst eine Fläche von 17625 km^2.

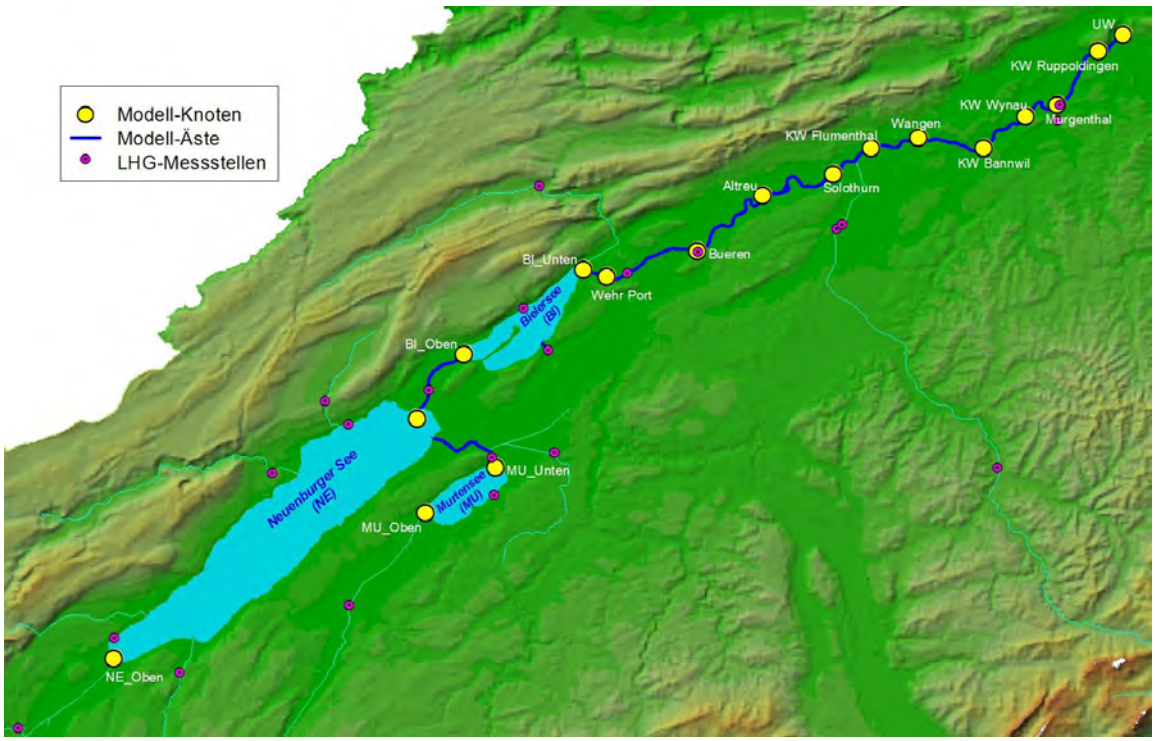
9.2 Die Juragewässerkorrektionen JGK

Die grossflächigen Überschwemmungen im flachen Gebiet unterhalb Aarberg – hervorgerufen durch massive Geschiebeablagerungen der Aare – wurden zunehmend zum Problem der Besiedlungen. Die *Erste Juragewässerkorrektion* (I. JGK), durchgeführt in den Jahren 1868–91, brachte eine grundlegende Veränderung des Aarelaufes. Die Aare wurde durch den neuen Hagneckkanal in den Bielersee umgeleitet. Der Nidau-Büren-Kanal wurde als neuer Ausfluss erstellt, reguliert über ein Wehr bei Nidau, was eine Absenkung der drei Seespiegel um rund 3 m ergab, verbunden mit einer Trockenlegung weiter Gebiete rund um die Seen. Die Verbindungsgerinne zwischen den drei Seen wurden begradigt und kanalisiert (Broye- und Zihlkanal), um die Seespiegel auszugleichen.

Die *Zweite Juragewässerkorrektion* in den Jahren 1963–1970 vergrösserte die Durchflusskapazitäten der Kanäle erneut, ergänzt mit einem neuen Wehr bei Port, wodurch die Hochwasserstände um einen weiteren Meter gesenkt wurden.

Die Wehranlage Port reguliert die Abflüsse aus dem Bielersee. Die Regulierung erfolgt gemäss einem detaillierten Reglement. Dabei ist der Abfluss beim Wehr so einzustellen, dass „den Interessen der Seeanlieger und Unterlieger Rechnung getragen wird“.

Mit dem neu erstellten hydraulischen Modell, basierend auf der Software FLUX/FLORIS, besteht nun die Möglichkeit, verschiedene Szenarien von Seeregulierungen vor und während Hochwassersituationen durchzurechnen.



Figur 1: Ausschnitt des Abflussmodells, Jurarandseen bis Ruppoldingen

9.3 Das Modell der Aare

Figur 1 zeigt die Komponenten des Modellgebietes, das die drei Jura-Rand-Seen Neuenburgersee, Bielersee und Murtensee, ihre verbindenden Kanäle, Broye- und Zihlkanal sowie die Aare bis zum KW Ruppoldingen umfasst.

9.4 Programm FLUX/FLORIS^{2000}

Die hydraulischen Simulationen werden mit dem Computercode FLUX/FLORIS^{2000} (Scietec GmbH) durchgeführt (Fäh et al., 2000). Das Programm berechnet den instationären eindimensionalen Abfluss in Flussnetzwerken auf der Basis der vollständigen De-Saint-Venant-Gleichungen. Die Flussäste werden mittels Querprofile diskretisiert. Zuflussganglinien werden als Randbedingung berücksichtigt. Die Berechnungen werden rein hydraulisch, d.h. ohne Geschiebetransport durchgeführt. Im Programmpaket stehen ein Modul für die Regelung von Kraftwerken, Modul zur Inversen Modellierung (automatische Kalibrierung) sowie zahlreiche Möglichkeiten, komplexe Regelungssysteme zu simulieren (Modul ECM), zur Verfügung. Mit der automatischen Kalibrierung können auch ungemessene Seitenzuflüsse bestimmt werden.

9.5 Geometrie

Das System ist in 16 Berechnungsabschnitte (*branches*) und 71 Knoten unterteilt. Die ca. 250 km lange Modellstrecke wurde mit Hilfe von über 1900 Querprofilen diskretisiert. Hierbei entstammen die Daten den aktuellen Messkampagnen. Für die Seen wurden Querprofile aus den Landeskarten 1:25’000 generiert. Die Genauigkeitsanforderungen an die Geometrie unterhalb der Wasseroberfläche sind geringer, so dass diese Tiefenlinien eine ausreichende Datengrundlage bilden.

9.6 Hydrologie

Die Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet werden durch gemessene Pegel erfasst. Hier liefern die Ganglinien der schweizerischen Landeshydrologie (LHG) stündliche Messwerte, die als direkte Zuflüsse dem Modell eingeleitet werden. Zuflüsse aus Gebieten, die nicht durch die Pegel erfasst werden, werden berücksichtigt, indem die Ganglinien nahe gelegener Pegel flächenproportional übertragen werden.

9.7 Randbedingungen und Bauwerke

An den Randknoten des Neuenburgersees und des Murtensees wird die zufliessende Wassermenge als Ganglinie vorgegeben. Die untere Randbedingung wird als HQ-Beziehung implementiert (Unterwasser KW Beznau). Weitere wichtige Modellknoten bilden die Aare-Kraftwerke, die als geregelte Knoten simuliert werden, wobei (zum Teil saisonal unterschiedlich) konstante Wasserspiegel an Gerinne-Punkten im Oberwasser eingehalten werden müssen.

Kernstück des Modells ist das Wehr Port, das die vollständige Abflusskontrolle des gesamten JGK-Systems übernimmt. Dabei wird der Aare-Abfluss gemäss dem „Reglement 1980/82" saisonal unterschiedlich reguliert. Eine Tabelle definiert für jeden Tag im Jahr in Abhängigkeit des Seewasserspiegels den einzustellenden Wehrdurchfluss. Darüber hinaus gelten im Interesse einer ausgeglichenen Wasserführung weitere Nebenbedingungen.

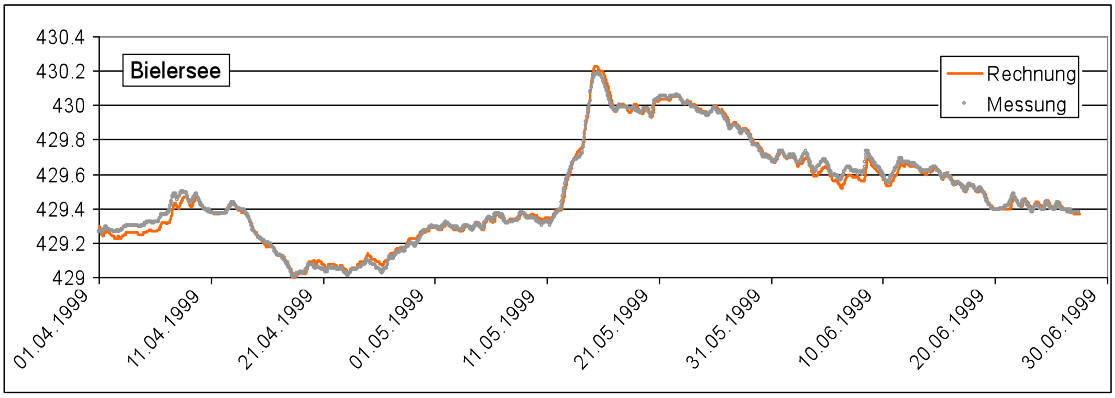
Im Hochwasserfall gelten besondere Bedingungen. Droht der Abfluss der Aare beim Pegel Murgenthal den Wert von 850 $m^3 s^{-1}$ zu übersteigen, ist der Abfluss aus dem Bielersee zu drosseln. Diese „*Murgenthal-Bedingung*" basiert auf einem sogenannten „*rechentechnischen Grenzwert*", der sich aus Prognosewerten der Seitenzuflüsse und dem aktuellen Wehrabfluss berechnet.

Im Gegensatz zu den Kraftwerken, die als geregelte Kraftwerksknoten implementiert werden, wird für das Wehr Port das im FLUX/FLORIS^{2000} verfügbare Konzept des „externer Reglers" verwendet. Dabei wird der Regler in einem separaten Programm codiert und zur Laufzeit dem FLORIS-Rechenkern hinzugefügt.

9.8 Modellkalibrierung

Die Kalibrierung des Modells erfolgt mit Hilfe des FLORIS-Moduls IM (Inverse Modellierung). Im Gegensatz zum *Direkten Problem*, wo ein Modellzustand (z. B. das Abflussregime) in Funktion der unabhängigen Eingabeparameter (Modellparameter) berechnet wird, werden hier die Modellparameter als abhängige Variable in Funktion eines (gemessenen) Sollzustandes behandelt. Die Mess- und Modellfehler werden dabei mit berücksichtigt, was zu einer statistischen Betrachtung des *Inversen Problems* führt. Basierend auf der *Maximum Likelihood Schätztheorie* wird eine Zielfunktion formuliert, die zu minimieren ist. Aus Plausibilitätsgründen werden die Vorkenntnisse der veränderlichen Modellparameter berücksichtigt, beispielsweise Erfahrungswerte der Gerinnerauigkeiten.

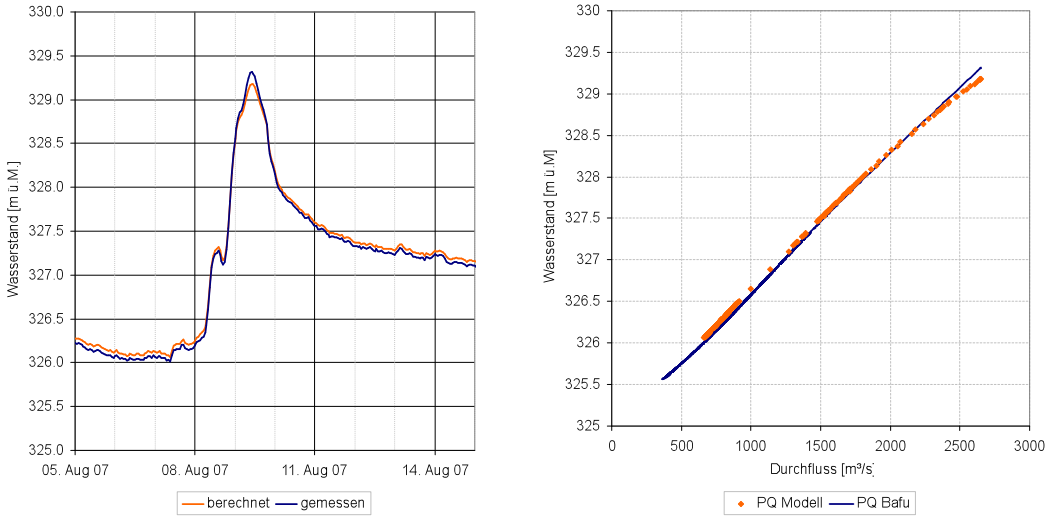
Für die Kalibrierung wird das Extremereignis vom Frühjahr 1999 (HW99: 1.4.1999 bis 30.6.1999) in Stundenschritten simuliert. Als Messgrössen werden alle verfügbaren Wasserstände der Pegel und Abflüsse herangezogen. Auch die Abweichungen der berechneten und gemessenen Abflussmengen an den Pegelstellen im Broye- und Zihlkanal, wo (Ultraschall-)Messgeräte installiert sind, werden mit berücksichtigt. Die automatische Abflussregulierung wird während der Kalibrierungs- (und der späteren Validierungs-) simulation ausser Kraft gesetzt, da während Hochwassern oft nicht nach Reglement reguliert wird. Auf diese Weise wird die tatsächliche Mengenbilanz im Gesamtsystem – wichtig bei der Anpassung von ungemessenen Zuflussmengen – eingehalten.



Figur 2: HW99 (Kalibrierung) – Vergleich berechneter und gemessener Wasserspiegel in Bielersee

Kalibrierungsergebnisse sind in Figur 2 dargestellt. Die erzielten Abweichungen der Wasserspiegel in den Seen und Kanälen oberhalb des Wehres Port betragen im Mittel weniger als 2 cm, der Maximalwert beträgt 7.5 cm über die dreimonatige Simulationsperiode.

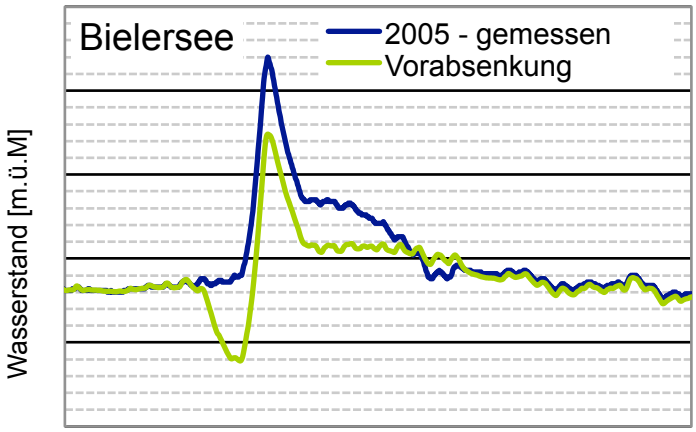
Figur 3 zeigt den Vergleich zwischen Rechnung und Messung am Pegel Untersiggenthal der Aare, bei Stilli. Bis auf Diskrepanzen vom max. 10 cm im Scheitelpunkt des Hochwassers ist die Übereinstimmung der Wasserspiegel ausserordentlich gut. Die PQ-Beziehung zeigt gegenüber der vom BAFU verwendeten Kurve vor allem bei grossen Abflüssen grössere Abweichungen.



Figur 3: Hochwasser 2007, Pegel Aare in Stilli. Links: gemessene (blau) und berechnete (orange) Wasserstandsganglinie [m ü. M.], rechts: resultierende PQ-Beziehung

9.9 Simulation der Seeregulierung

Auf Basis des validierten Modells kann nun das geregelte Gesamtsystem zur Untersuchung der optimalen Regulierung der Jurarandseen untersucht werden. Als Beispiel wird die Berechnung einer Vorabsenkung der Seen dargestellt (siehe Figur 4). Durch eine Vorabsenkung kann zusätzliches Retentionsvolumen geschaffen werden, um die durch Hochwasser entstehenden Schäden zu reduzieren. In Figur 4 beginnt die Vorabsenkung 3 Tage vor dem Hochwasserereignis. Der maximale Seewasserstand kann dadurch um 45 cm gesenkt werden. Notwendig für eine Vorabsenkung ist eine Prognose der in den nächsten Tagen zu erwartenden Zuflüsse in die Seen.



Figur 4: Hochwasser 2005, Pegel Bielersee; gemessener und berechneter Wasserspiegel [m ü. M.] mit einer Vorabsenkung.

9.10 Zusammenfassung

Das Modell des hydraulischen Systems der Aare ermöglicht die Berechnung verschiedener Szenarien, wie beispielsweise die Vorabsenkung der Jurarandseen bei einem prognostizierten Hochwasser oder die Untersuchung der optimalen Regelung des Wehres Port.

Literatur

Bundesamt für Umwelt: Ereignisanalyse Hochwasser August 2007, Bern, 2009

Fäh, R., Kuhlmann, U., Reichel, G.: FLUX/FLORIS^{2000} Benutzerhandbuch, SCIETEC GmbH (scietec.at), Linz, Österreich, 2000.

Kühne, A.: Optimale Regulierung der zweiten Juragewässerkorrektion (II. JGK), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Zürich, 1996.

Müller R.: Die II. Juragewässerkorrektion, Wasser- und Energiewirtschaft, Heft 1/2, 1959, 1-27.

Reichel G., Kraftwerksketten im Hochwasserfall: Unterstützung durch Online-Simulation und Optimierung, Praxisthema in Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 2004, Heft 7-8

10

Hochwasserprognose – Fallbeispiel Sihl

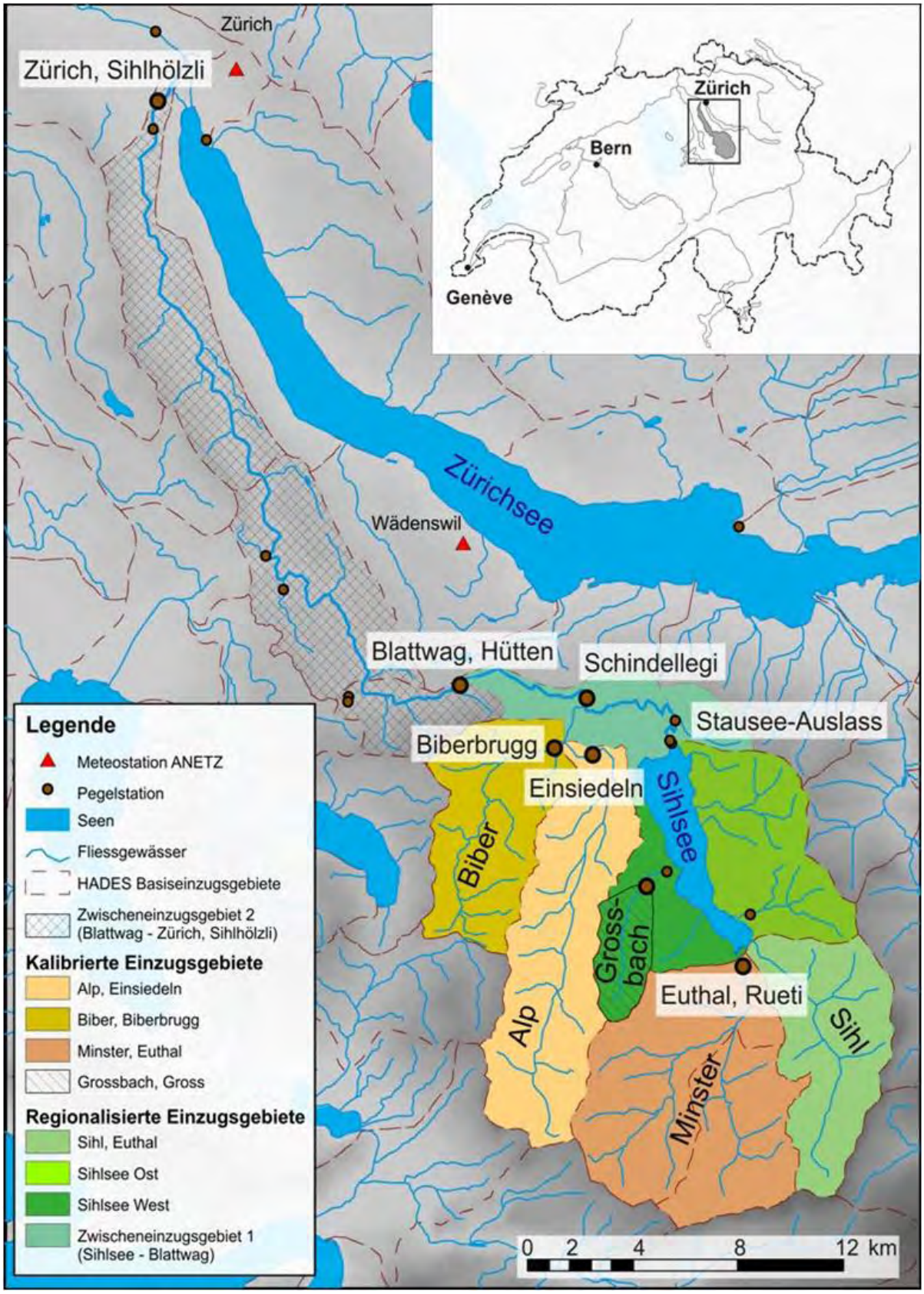
Massimiliano Zappa
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL,
Birmensdorf

10.1 Das Hochwassergefährdungspotential der Stadt Zürich

Historisch betrachtet wurden Teile der Agglo-meration Zürich regelmäßig durch Hochwasser der Sihl überflutet, beispielsweise 1846, 1874 und 1910. Hierbei traten rekonstruierte Spitzenabflüsse von bis zu 570 m^3/s auf. Bedroht sind bei einem derartigen Ereignis damals wie heute die Bewohner des Sihltals, welches parallel zum Zürichsee in Richtung Nordwesten entwässert, und der Stadt Zürich. Durch seine lang gestreckte Form wirkt das Tal wie ein Flaschenhals, welcher sich erst unmittelbar vor der Kernstadt Zürichs wieder öffnet. Hier würden sich dann die Wassermassen in die Innenstadt und zahlreiche, dicht besiedelte Wohnviertel ergießen.

Seit 1938 allerdings, als im oberen Sihleinzugsgebiet der Sihlstausee zur Stromproduktion entstand, wurde die Marke von 280 m^3/s (Hochwasserereignis im August 2005) nicht mehr überschritten. Statistisch betrachtet aber häufen sich kritische Ereignisse seit 1998 wieder. (vgl. Zappa et al., 2010: 5)

Um die Agglomeration Zürich und besonders das Bahnhofsviertel vor erneuter Überflutung mit hohem Schadenspotential zu schützen, wurde im Auftrag Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich ein neuartiges regionales Hochwasserwarnsystem entwickelt und installiert (Zappa et al.,2010). Es deckt das gesamte, 336 km^2 große Einzugsgebiet der Sihl von der Quelle im Kanton Schwyz bis zur Mündung in die Limmat in der Stadt Zürich (Kanton Zürich) ab (siehe Figur 1) und kann als Teil des Risikomanagements anhand täglicher Modellierungen präzise Aussagen für die beiden kritischen Punkte Sihlsee und Zürich Hauptbahnhof machen.



Figur 1: Sihleinzugsgebiet

10.2 Der Sihlsee als Einschnitt

Der Sihlsee befindet sich als Endpunkt des oberen Einzugsgebietes im Hochtal von Einsiedeln (Kanton Schwyz) und entwässert die Flüsse Minster, Sihl, Grossbach und weitere Flüsse regionaler Bedeutung vollständig. Ein Grossteil des natürlichen Einzugsgebietes im oberen, niederschlagsreicheren Teil der Sihl ist daher durch die künstliche Aufstauung vom Unterlauf hydrologisch entkoppelt. Alp und Biber fließen der Sihl unterhalb der Staumauer zu.

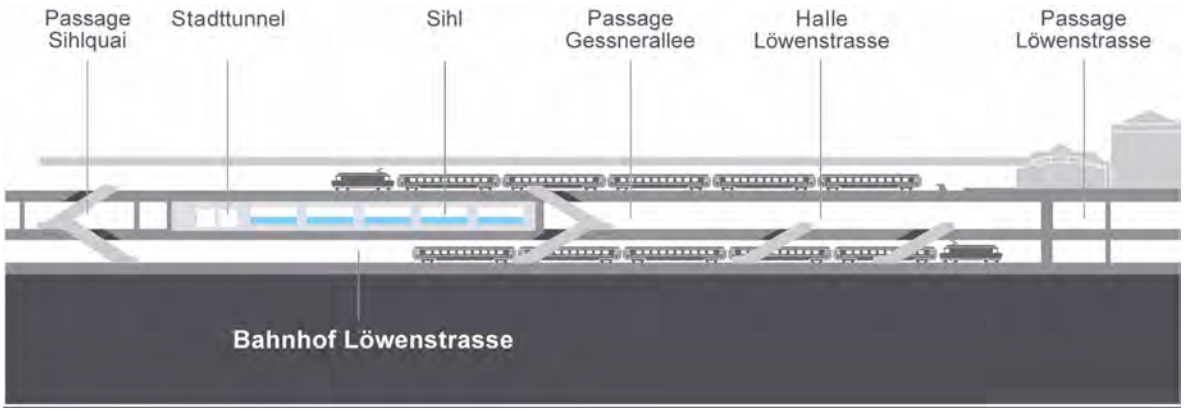
In diesem Zusammenhang ist erneut die Form des unteren Einzugsgebietes zu beachten, da durch das Zusammenspiel der gestreckten, schmalen Form mit bestimmten hydrologischen Vorbedingungen Hochwasserwellen mal mehr, mal weniger abgeflacht werden. Auch die Fliesszeiten zwischen den beiden Messstationen Sihlhölzli und Blattwag variieren je nach Abflussmenge mit drei bis sechs Stunden stark. Wird der Stausee bei plötzlich einsetzenden Starkniederschlägen aufgrund eines hohen Seepegels nicht als Zwischenspeicher genutzt, kann sich die Situation durch notwendige Entlastungsabflüsse zusätzlich gefährlich verschärfen.

10.3 Zürich Hauptbahnhof als Engpass

Flussabwärts liegt ein Grossteil der Zürcher Innenstadt auf dem Schwemmkegel der Sihl und ist somit potentielle Überflutungsfläche. Neben der Wohnbesiedlung stellt Zürichs Hauptbahnhof, Knotenpunkt des schweizerischen Bahn- und des Zürcher S-Bahn-Verkehrs, hierbei aufgrund seiner besonderen Architektur eine weitere Engstelle für die Sihl dar. Die ober- und unterirdische Bauweise des Bahnhofgebäudes und der Gleiskörper zwingt die Sihl in mehrere tunnelartige Durchlässe, um das Bauwerk zwischen zwei Gleisebenen zu durchfließen (siehe Figur 1). Dadurch wird der Querschnitt künstlich beschränkt und fördert insbesondere im Bereich des Bahnhofsviertels die Gefahr von Überflutungen und Verklausungen. Durch Baumassnahmen zur Errichtung des neuen unterirdischen Bahnhofs Löwenstrasse, welcher direkt unterhalb des Flussbettes liegt, wurde der Flussquerschnitt zwischen 2008 und 2011 zeitweise weiter verkleinert, so dass sich der Bedarf nach Frühwarnung vor Hochwasser erneut verstärkte.

10.4 Die Modellkette PREVAH-FLORIS

Um nun die Hochwasserspitzen und Volumina der Sihl frühzeitig abschätzen zu können, arbeitet das operationelle Hochwasservorhersagesystem mit dem hydrologischen Modell PREVAH und dem hydraulischen Modell FLORIS, welche nacheinander ablaufen und sich aufeinander beziehen (siehe Figur 2).



Figur 2: Schema Prozesskette

10.5 Das hydrologische Modell PREVAH

PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU related Model (vgl. Viviroli et al., 2009 und Kapitel 7) wird zu diesem Zweck mit Niederschlagsdaten aus Bodenmessnetzen angetrieben. Ausgewählte Stationen übermitteln zusätzlich Daten zu Lufttemperatur, relativer Feuchte,

Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und der Sonnenscheindauer. Hinzu kommt, ebenfalls stündlich, der Pegelstand des Sihlstausees.

Die Wettervorhersagen stammen aus numerischen Wettermodellen der MeteoSchweiz. Diese unterscheiden sich hierbei grundlegend sowohl in ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung, als auch in ihrem wissenschaftlichen Verständnis. Während COSMO-LEPS eine probabilistische Vorhersage mit sechzehn gleich wahrscheinlichen Möglichkeiten für einen Vorhersagezeitraum von fünf Tagen rechnet (Jaun und Ahrens 2009), sind COSMO-7 und COSMO-2 klassische deterministische Modelle, die Vorhersagen für 72 bzw. weniger als 24 Stunden machen (Zappa et al., 2008). Ihre räumliche Auflösung liegt dabei zwischen sieben km (COSMO-LEPS) und 2.2 km Maschenweite (COSMO-2). Letzteres kann zusammen mit der häufigeren Aufaddierung (8 Mal pro Tag) Unwetterwarnungen für starke Gewitter bzw. kurzfristige Niederschlagsereignisse ausgeben, ist aber bei langfristigen Vorhersagen wenig hilfreich.

10.6 Das hydraulische Modell FLORIS

Das hydrologische Modell mit meteorologischen Daten und Messwerten des Seepegels wird nun in das hydraulische Modell FLORIS überführt. Hier fließen die Eigenheiten des Fliessbettes der Sihl ein, da es auf regelmäßig aufgenommenen Querprofilen zwischen dem Sihlsee und der Mündung in die Limmat basiert. Diese wurden sowohl eingemessen, als auch interpoliert und weisen einen mittleren Abstand von 150 Metern auf. Berücksichtigt werden hierbei neben Wehren, Schwellen und Brückenpfeilern auch die Turbinierung des Sees, sowie die bereitzustellende Restwassermenge für die Sihl und das Betriebsreglement. Letzteres tritt in Kraft wenn der Seepegel auf 888.7 m steigt und löst automatisch das vermehrte Ablassen von Wasser in die Sihl aus (Badoux et al., 2010).

Das vorliegende hydrologisch-hydraulische Hochwasservorhersagesystem für die Sihl liefert seit 2008 täglich probabilisitsche Vorhersagen für die nächsten 120 Stunden für das Gesamteinzugsgebiet. Gute Resultate werden hierbei aufgrund der Art der Kalibrierung für Hochwasser und mittlere Abflüsse erzielt. Bei der Auswertung der Daten von 2008 bis 2010 ergibt sich der Trend, dass die Vorhersagen auf Basis des probabilistischen COSMO-LEPS-Systems zutreffender sind, als die deterministischen COSMO-7-Modelle (Addor et al., 2011). Auch kann durch die probabilistische Vorhersage eine bessere Einschätzung erfolgen, da sie mit den sechzehn Wahrscheinlichkeiten eine umfangreichere Interpretation zulässt. Die Entscheidungsgrundlage einer deterministischen Vorhersage hingegen besteht nur aus einer Möglichkeit (vgl. Zappa et al., 2010: 18).

10.7 Der operationelle Betrieb

In der Praxis stehen den Verantwortlichen alle drei Vorhersagetypen zur Verfügung. Einmal täglich wird eine COSMO-LEPS-Fünf-Tage-Vorhersage erstellt, dreimal täglich COSMO-7 für drei Tage und achtmal täglich COSMO-2 für weniger als einen Tag, somit wird die zeitliche und räumliche Auflösung besser, je näher das Ereignis rückt. Ergänzt werden diese von aktuellen Messdaten. Auf dieser Datengrundlage entsteht ein wöchentlicher Lagebericht durch eine Beratergruppe für alle Verantwortlichen der Bahnhofsbaustelle und des Stausees, auf dessen Grundlage weitere Maßnahmen eingeleitet werden können (Badoux et al., 2010).

10.8 Vorabsenkung Sihlsee

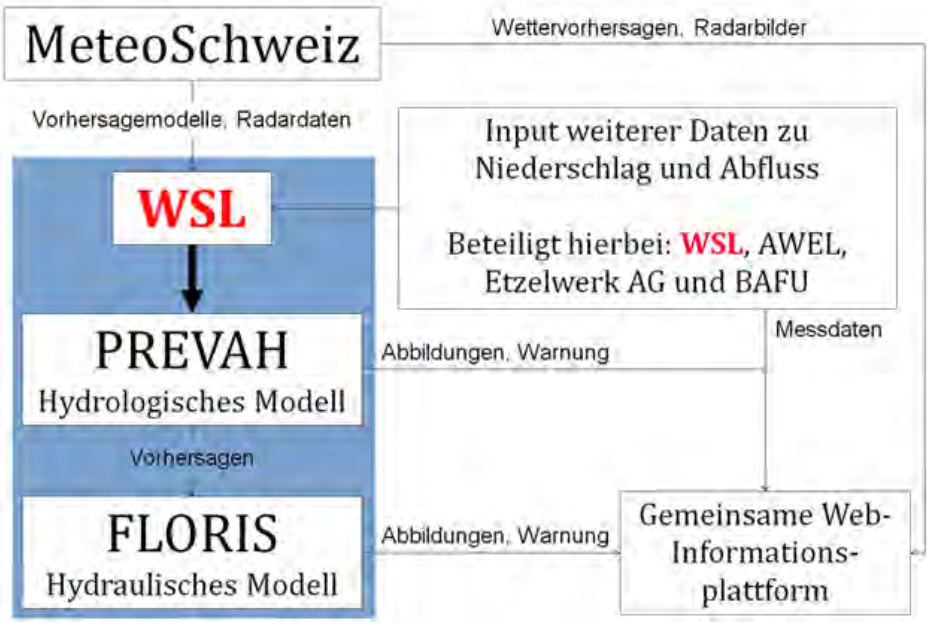
Als eine von zwei Möglichkeiten bei kritischen Vorhersagen kann die Vorabsenkung des Sihlsees in Betracht gezogen werden. Die durch die Staumauer entstehende hydrologische Entkoppelung des Unterlaufs der Sihl macht es möglich den Sihlsee für den niederschlagsreicheren Oberlauf als Zwischenspeicher zu nutzen und so die Hochwasserspitze im Unterlauf abzumildern. Das aufgefangene Wasser kann dann mit zeitlicher Verzögerung abgegeben oder zur Stromproduktion genutzt werden. Um den Seespiegel präventiv um mehrere Zentimeter abzusenken braucht es eine Vorbereitungszeit von 24 bis 72 Stunden, abhängig von der abzulassenden Menge. Dadurch entsteht ein ungefährliches kleines Hochwasser mit unproblematischen Abflussmengen für den Unterlauf. Diese Maßnahme ist wegen der langen Vorbereitung allerdings nur möglich, wenn mehrere Tage im Voraus ein ausgiebiges Niederschlagsereignis prognostiziert wird, aber nicht durchführbar, wenn plötzliche Starkregen- und Gewitterereignisse auftreten.

10.9 Baustellenflutung am Bahnhof

Ist diese Vorbereitungszeit durch genannte instabile Witterungsverhältnisse und extrem unsichere Prognosen nicht mehr gegeben, kann als alternative Maßnahme der Flussquerschnitt im Bereich der Bahnhofsbaustelle wieder erweitert werden, um so einen größeren Abfluss zu ermöglichen. Zu diesem Zweck können die während der Bauphase vorübergehend geschlossenen Fluttore geöffnet und innerhalb von 24 Stunden nach Beseitigung der Baumaterialien geflutet werden und die notwendige Entlastung bringen. Diese Baustellen-spezifische Massnahme wird ab 2011 nicht mehr zur Anwendung kommen, da die Arbeiten für die neue Durchmesserlinie bei Zürich HB beim Abflussquerschnitt der Sihl unterhalb der Bahnhof fertig sind und darum die gesamte Kapazität der fünf Durchlässe unterhalb der Bahnhof gewährleistet ist.

10.10 Kommunikationsstrukturen

Um einen reibungslosen Ablauf zwischen Wettervorhersage und möglicher Einleitung von Massnahmen bei kritischen Abflusswerten zu gewährleisten, ist eine komplexe Kommunikationsstruktur auf Basis einer Webplattform aufgebaut worden (Figur 3). Neben dem bereits erwähnten wöchentlichen Lagebericht, welcher durch Mitarbeiter der WSL und der Projektleitung für Wasserbau/Hydrologie der Baustelle Löwenstrasse erstellt wird, gibt es genaue Ablaufpläne für eventuelle Gefahrensituationen. Löst die PREVAH/FLORIS-Modellkette Alarm aus, tagen Beratungs- und/oder Koordinierungsgruppe und sprechen den Verantwortlichen Handlungsempfehlungen aus.



Figur 3: PREVAH/FLORIS-Prozesskette

Wird eine Vorabsenkung des Sihlsees durchgeführt, werden sowohl Kraftwerke, als auch direkte Anrainer über dieses Vorgehen informiert. Badegäste, die sich im Bereich der Sihl aufhalten, werden durch zahlreiche Warntafeln über das richtige Verhalten bei steigendem Wasserspiegel informiert.

Literatur

Addor N, Jaun S, Fundel F, Zappa M. 2011. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 2327-2347, doi:10.5194/hess-15-2327-2011

Badoux A, Zappa M, Schatzmann M, Oplatka M, Jaun S, Boesch M, Gross M, Steiner P, Hegg C, Rhyner J. IFKIS-Hydro Sihl. (2010). Beratung und Alarmorganisation und während des Baus der Durchmesserlinie beim Hauptbahnhof Zürich. Wasser, Energie, Luft, Heft 4/2010: S. 309-320

Schwanbeck, J., Viviroli, D., Röser, I., Trösch, J., Weingartner R. (2007): Prozessbasierte Abschätzung von Hochwassern im Einzugsgebiet der Sihl. Schlussbericht zur Studie im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich, Bern/Zürich (unveröffentlicht)

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. In: Environmental Modelling and Software, 24: 1209-1222.

Zappa, M., Jaun, S., Badoux, A., Schwanbeck, J., Addor, N., Liechti, K., Roeser, I., Walser, A., Viviroli, D., Vogt, S., Gerber, M., Trösch, J., Weingartner, R., Oplatka, M., Bezzola, G. R., Rhyner, J. (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal. Wasser Energie Luft, 102. Jg., Heft 3: 238–248, Baden.

11

Estimation et prévision des crues en Valais

Dominique Bérod
Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne

11.1 Introduction

Le canton du Valais a de tout temps eu des relations privilégiées avec l'office fédéral de l'environnement, et avant lui ses prédécesseurs de l'économie des eaux, puis des eaux et de la géologie. La raison principale en est les besoins de ce canton en matière de protection contre les dangers naturels : les crues de 1987, 1993 et 2000 par exemple se sont chargé de le rappeler. Le Valais, par sa position au centre des Alpes, sa taille, sa diversité et ses infrastructures offre également un laboratoire d'étude des phénomènes naturels en grandeur réelle. La plupart des processus hydrologiques et hydrauliques s'y déroulent : écoulements fluviaux, transport solide et alluvionnement, laves torrentielles, fontes des neiges et des glaces. Les nombreux grands barrages hydroélectriques sont également une source d'études, que se soit pour des questions de protection des ouvrages eux-mêmes, d'alluvionnement des retenues ou encore de contribution des retenues hydroélectriques à la protection des vallées latérales et de la plaine du Rhône.

Trois projets parmi les nombreuses études et recherches conduites en Valais avec l'appui de la Confédération ces vingt dernières années sont présentés ici. Il s'agit d'une méthode d'estimation des crues extrêmes pour la sécurité des barrages (CRUEX), du développement de la stratégie de protection contre les crues en Valais (CONSECRU) et du modèle de prévision et de gestion des crues (MINERVE). Chacun de ces projets a fait l'objet de rapports détaillés et seuls les éléments principaux touchant l'hydrologie sont synthétisés ici.

11.2 CRUEX (1991-2000)

Le projet CRUEX était un mandat de l'ancien office fédéral des eaux et de la géologie qui visait à développer une méthode d'estimation des crues de contrôle de sécurité contre les crues des barrages suisses en se basant sur une approche déterministe de type PMP/PMF (Probable maximum precipitation/probable maximum flood). Confiée à l'EPFL, cette étude comprenait trois volets :

1. Modélisation numérique des précipitations extrêmes et détermination de champs spatio-temporels des PMP.
2. Modélisation numérique des crues extrêmes sur la base des PMP.
3. Détermination des crues critiques en fonction des caractéristiques des aménagements hydrauliques.

Les éléments essentiels sont condensés dans un rapport de synthèse (Zellweger et Musy, 2000). En plus de divers articles scientifiques, deux thèses ont également été développées dans le cadre de CRUEX (Bérod, 1995 ; Dubois, 1998). Ce chapitre se concentre sur les aspects de modélisation hydrologique.

Cette modélisation repose sur des hypothèses de maximisation raisonnable des phénomènes de précipitations et de crues. Le modèle hydrologique retenu devait refléter correctement les

phénomènes extrêmes sur des petits bassins versants alpins très pentus, tout en contenant les temps de calculs dans des limites utilisables pour des praticiens disposant d'un ordinateur de bureau.

Les crues extrêmes sur les petits bassins versants alpins sont avant tout dues à des précipitations de type convectif très intenses et de courte durée, qui se produisent principalement en été. Tenant compte également des caractéristiques des bassins versants considérés (fortes pentes, faible couverture pédologique), les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Les écoulements de surface rapides sont prédominants par rapport à l'infiltration et aux écoulements de subsurface.
- La fonte de neige n'est pas un élément essentiel dans la formation des crues extrêmes et rapides.
- Le ruissellement de surface réagit de manière non-linéaire aux intensités de précipitations.

En tenant compte de ces conditions et hypothèses, les équations des ondes cinématiques ont été retenues pour modéliser les crues. Il s'agit d'une simplification des lois de St-Venant, négligeant termes de pression et d'inertie. L'infiltration est calculée de manière classique par l'équation de Philip et la fonte de neige est estimée par la méthode du degré-jour. Le modèle hydrologique construit sur cette base est de type semi-distribué à base quasi-physique ; il a été baptisé ORAGE, pour Ondes cinématiques pour la simulation du Ruissellement avec Application de la Géomorphologie pour la description du bassin versant en Eléments (Bérod, 1995). D'autres modèles plus simples (cascades de réservoirs non linéaires) ont également été développés à titre de comparaison (Bérod et al, 1995).

L'approche géomorphologique permet de prendre en compte la typologie locale des bassins versants de manière synthétique, tout en permettant un gain de temps de calcul. Cette méthode, basée sur la classification de Strahler, ne calcule qu'une seule fois les écoulements sur des sous-bassins similaires (de même ordre et présentant des surfaces, longueurs et pentes semblables). Ce procédé permet de montrer les contributions relatives des différentes parties d'un bassin versant. Les ondes cinématiques ont été résolues par un schéma numérique de Lax-Wendroff sur les versants et de Piecewise Parabolic Method (PPM) dans les cours d'eau.

Le modèle a été testé sur les bassins versants très bien équipés et documentés du WSL dans l'Alptal, puis appliqué sur les sites de Mattmark et de Mauvoisin en Valais.

Afin de maximiser les paramètres tout en conservant la plausibilité physique des résultats, des analyses de sensibilité ont été conduites sur les paramètres suivants, en utilisant les volumes de précipitations issus du modèle de PMP (Receanu et al, 2009) :

- Durée et structure temporelle des précipitations : maximisées et aléatoires.
- Paramètres d'infiltration
- Paramètres de ruissellement de surface (rugosité des bassins et cours d'eau).

Ces analyses de sensibilité ont été réalisées par la méthode de Monte Carlo. Les résultats ont montré l'importance du choix de la structure temporelle des précipitations dans les modélisations événementielles. Un exemple de résultat se trouve dans la figure 1.

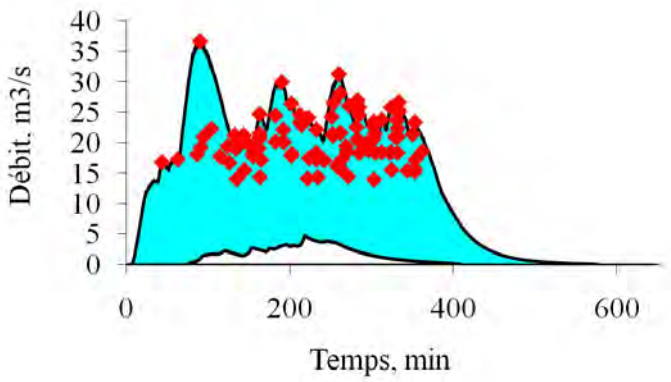


Figure 1 : Exemple d'analyse de sensibilité des débits de pointe à la structure des précipitations (Bérod, 1994). Les points représentent les débits de pointe et la surface l'enveloppe des hydrogrammes possibles.

Les résultats de l'ensemble de l'étude CRUEX ont permis de vérifier la protection contre les crues de différents barrages en Suisse et à l'étranger. L'Office fédéral de l'Energie a pu sur cette base adapter ses recommandations (OFEN, 2008). Un guide pratique est encore à élaborer.

Les méthodes de CRUEX ont également été à l'origine de deux études importantes pour le Valais. La première concerne la possibilité d'utiliser le barrage de Mattmark pour la protection contre les crues de la vallée de Saas et de contribuer à l'écrêtement des crues du Rhône (cf infra). La seconde étude est CONSECRU, présentée ci-dessous.

11.3 CONSECRU (1995-2001)

A la suite des crues catastrophiques de septembre 1993, le gouvernement valaisan a décidé la mise sur pied d'un programme visant à développer les bases nécessaires à la stratégie de protection contre les crues du canton. L'office fédéral des eaux et de la géologie, actuellement office fédéral de l'environnement, a fortement subventionné les développements et a participé activement aux activités du Canton.

Les objectifs de l'étude ont consisté, de manière générale, à élaborer un concept de protection contre les crues tenant compte des intempéries récentes et appliquant la philosophie fédérale de protection contre les crues. Ses principales étapes ont été (Etat du Valais, 2001):

- Mettre en place les bases nécessaires à l'établissement des cartes de danger eau en Valais ;
- instituer une politique de protection contre les crues accordant la priorité aux mesures de prévention dans une vision globale de gestion des risques ;
- établir un catalogue de scénarios de crues pouvant affecter le territoire cantonal ;
- proposer un réseau d'observation et une structure de traitement des données en cas de crue majeure;
- optimiser l'utilisation des zones inondables ainsi que des mesures d'entretien et d'aménagement écologique des rives des cours d'eau.

CONSECRU a également permis de moderniser les bases hydrologiques nécessaires à l'application de la stratégie de protection contre les crues, s'agissant en particulier de l'aménagement du Rhône. Ainsi, les crues de projet ont été estimées par deux approches complémentaires. La première a consisté à actualiser les statistiques de crues du Rhône et de ses affluents en tenant compte d'une part des mesures les plus récentes et d'autre part en utilisant les lois statistiques des extrêmes les plus courantes (Gumbel, LogNormale et LogPearson III.) et la méthode du GRADEX. Une méthode permettant la détection de valeurs horsains a également été implémentée et le calcul systématique d'intervalles de confiances a permis de prendre en compte une part des incertitudes.

La seconde approche a combiné une simulation déterministe des crues du Rhône et de ses affluents avec une approche stochastique. La modélisation déterministe a reposé sur un modèle développé spécifiquement pour CONSECRU, sur la base des modèles de CRUEX. Ce nouveau modèle, dénommé SOCONT, simule les crues par un système de réservoirs non linéaires, en prenant en compte de manière simplifiée la fonte de neige et de glace, ainsi que les effets des barrages. Ce modèle a également été conçu pour des simulations multiples en vue de son utilisation dans un contexte stochastique.

La génération stochastique visait à générer de longues et nombreuses séries synthétiques de débits de crues en vue de leur traitement statistique. La procédure consiste à générer aléatoirement des séries de précipitation par la méthode de Neymann-Scott (Favre, 2000), à utiliser le modèle SOCONT pour générer les crues issues des précipitations synthétiques, puis à appliquer les méthodes statistiques sur les extractions des débits maximaux de ces séries. Un résultat typique est présenté dans la figure 2, les résultats se trouvant dans Mezghani, 2009 et Hingray et al, 2006.

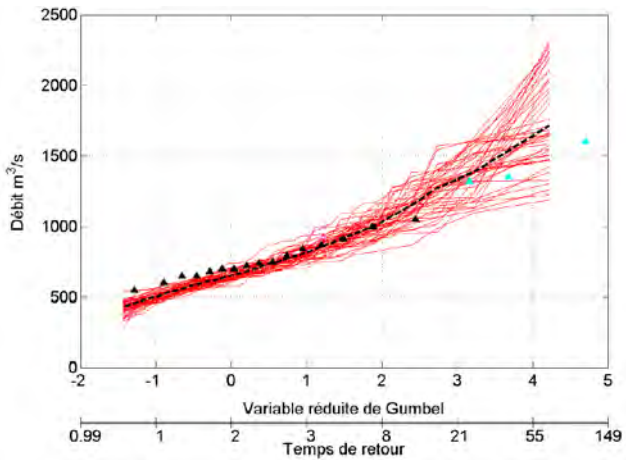


Figure 2 : Exemple de traitement statistique des séries de crues générées sur le Rhône à la Porte-du Scex (d'après Hingray et al, 2006). Les triangles noirs représentent les débits maximaux annuels observés, les courbes fines les ajustements de 50 séries simulées et le traitillé épais la médiane des scénarios.

Les générations dépendant des conditions météorologiques et climatiques, les statistiques ont été effectuées par saison, les cas critiques pour le Rhône valaisan étant la période août-octobre.

Cette approche a permis de calculer des crues de temps de retour donné tout le long du Rhône en tenant compte des incertitudes, les résultats n'étant pas des valeurs fixes mais une gamme de débits possibles. Ceci permet de choisir la crue de temps de retour en tenant compte de critères supplémentaires liés à l'économicité et à des aspects environnementaux et techniques. La figure 3 illustre cette démarche :

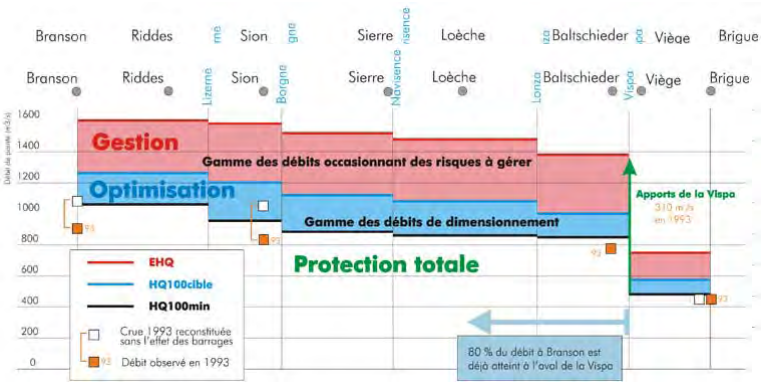


Figure 3 : Gamme des débits estimés le long du Rhône (Etat du Valais, 2000)

Cette approche contribue également à fixer des ordres de grandeur pour la gestion des risques restants.

En plus de ces résultats pratiques, CONSECRU a jeté les bases de la gestion des crues par les retenues hydroélectriques. Les études ont montré que les barrages ont eu des effets positifs lors des grandes crues récentes :diminution de plus de 200 m^3/s en 1987, de 160 m^3/s en 1993 et de 100 m^3/s en 2000, les pointes de crues observées sur le Rhône ayant été entre 900 et 1'200 m^3/s. Ce débit retenu correspond à une hauteur d'eau d'environ 50 cm dans le Rhône : sans ce stockage, les débordements auraient été nombreux.

Cet effet protecteur aurait pu être plus grand encore si les barrages avaient été moins pleins. Ce taux de remplissage est fonction du marché, et jusqu'au début des années 2000, il était habituel de stocker un maximum d'eau en automne pour l'énergie hivernale. Même si le marché montre une plus grande diversité des prix dans l'année depuis, il n'en reste pas moins que le Canton du Valais a voulu garantir et optimiser l'effet de protection contre les crues des grands barrages. Ceci revient à transformer des barrages à but unique en retenues à buts multiples, sans toutefois modifier la structure des ouvrages, à l'exception du barrage de Mattmark. CONSECRU a en effet montré qu'il était possible de réserver un volume de réserve en surélevant l'évacuateur de crues de 1.5 m, sans mettre en danger la sécurité de la digue. Cette surélévation a été réalisée en 2001(André et al, 2002).

Pour les autres barrages, la stratégie vise à déterminer des scénarios de crues et simuler différents effets des barrages selon les types de crues, les taux de remplissage initial et les opérations possibles : turbinages préventifs, pompages, dérivations. La mise en place de la stratégie implique actions :

1. Recueillir les informations requises de la part des opérateurs des barrages : données hydrométéorologiques, taux de remplissage, gestion prévue dans les jours à venir, état des installations.
2. Disposer d'un outil de calcul permettant des prévisions de crues et des simulations des opérations sur les barrages, en vue de mettre en place un système d'aide à la décision.
3. Mettre en place une procédure décisionnelle, comprenant les relations avec les sociétés hydroélectriques et l'application des décisions du gouvernement concernant les turbinages préventifs.

Ces turbinages visant à créer de la place dans les barrages avant une crue sont sujets à dédommagement. Il a donc été nécessaire d'une part de régler les modalités dans des conventions entre le Canton et les sociétés hydroélectriques et d'autre part de disposer d'un outil suffisamment fiable et précis pour minimiser les pertes. C'est l'objet de MINERVE, présenté ci-après.

11.4 MINERVE (1999–2011)

L'étude CONSECRU a montré la nécessité pour le canton du Valais de disposer d'un outil de prévision des débits pour le Rhône et ses principaux affluents, et de gestion des crues par les aménagements hydroélectriques. D'entente avec l'Office fédéral de l'environnement, l'Etat du Valais a ainsi mandaté l'EPFL, par les laboratoires d'hydrologie et d'aménagement (HYDRAM) d'une part et des constructions hydrauliques d'autre part (LCH), pour mettre en place une étude pilote entre 1999 et 2000, puis pour élaborer un outil opérationnel de 2001 à 2006. Météosuisse a dès le début accompagné le projet, fournissant données, prévisions et conseils. Ce projet a été nommé MINERVE, pour : « Modélisation des Intempéries de Nature Extrême des Rivières Valaisannes et de leurs Effets. La phase 2001-2006 a comporté trois parties : modélisation hydrologique, système hydraulique et aide à la décision.

La modélisation hydrologique a repris les bases développées par CONSECRU pour l'adapter aux besoins de prévision. Tenant compte des ouvrages hydrauliques, plus de 200 sous-bassins sont utilisés dans les calculs. Les données d'entrée sont soit des mesures (calage, validation, état initial), soit les prévisions de précipitations et de températures de Météosuisse. Ces prévisions météorologiques sont issues des différents modèles COSMO de Météosuisse, incluant COSMO-LEPS (prévisions d'ensemble, fournissant une estimation de l'incertitude sur les résultats). Les sous-bassins versant étant eux-mêmes découpés en 7 tranches d'altitude, il

est ainsi possible de tenir compte de la limite pluie-neige et de la fonte de la neige et des glaciers.

Le modèle hydrologique a été intégré comme un module dans l'outil de simulation hydraulique développé par le LCH et nommé Routing System (RS II, puis III). Ce modèle décrit de manière détaillé tous les ouvrages hydrauliques d'une certaine importance en Valais et permet la simulation de toutes les opérations hydrauliques, en tenant compte de l'état de fonctionnement des différents organes, comme le montre la figure 4. Cette vue d'ensemble cache un degré de détail très élevé, chaque partie représentée étant encore précisée dans le modèle MINERVE.

Figure 4 : Modélisation des bassins versants et des ouvrages hydrauliques du Valais (Jordan, 2007).

Cette démarche a nécessité une longue phase d'inventaire ; elle a été fructueuse grâce à l'excellente collaboration des sociétés hydroélectriques. RS a été complété par un système d'aide à la décision qui, sur la base des prévisions issus du modèle hydrologique, permet d'estimer le risque de crues dans les 3 à 5 jours à venir et de simuler des scénarios de gestion : turbinages préventifs, pompages, actionnement de vidanges, etc. En combinant toutes les actions possibles, le système propose la solution la plus économique, compte tenu des risques effectifs de crues et des pertes d'exploitation. Un exemple de simulation se trouve dans la figure 5. Il s'agit d'une simulation a posteriori qui démontre le potentiel d'utilisation de MINERVE.

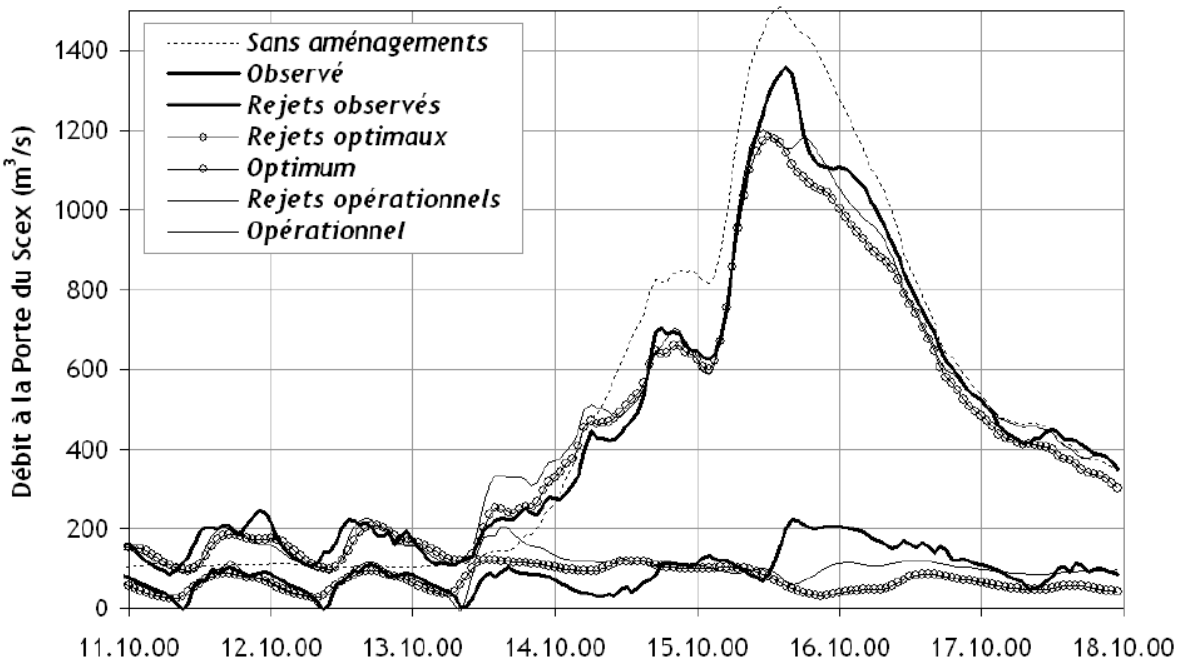


Figure 5 : Exemple de resimulation de la crue d'octobre 2000 a posteriori, en fonction de différents scénarios de gestion des barrages (Jordan, 2007).

Les principaux résultats se trouvent notamment dans la thèse de F. Jordan (Jordan, 2007). Une période pilote a pu être lancée dès 2006, un test en grandeur réelle ayant eu lieu en septembre 2006 (la crue prévue ne s'était alors produite que de manière très modérée). La période pilote a permis deux enseignements principaux : premièrement, le système MINERVE dispose d'un potentiel important pour la réduction des grandes crues sur le Rhône et ses principaux affluents, mais le système doit encore être perfectionné pour en améliorer la précision, la fiabilité et la convivialité. Deuxièmement, une organisation ad hoc doit être mise en place pour assurer la surveillance et les prévisions de crues.

Sur ce constat, la suite de MINERVE a démarré en 2008. Le nouveau laboratoire d'hydrologie de l'EPFL, l'ECHO, a remplacé l'ancien HYDRAM. L'université de Lausanne, par son institut de géomatique et d'analyse du risque (IGAR), est également entré en jeu pour développer la méthode des analogues. Cette méthode vise à reconnaître des situations hydrométéorologiques passées semblables à celles prévues par les modèles de prévision, afin d'en améliorer la plausibilité et la précision. Les autres axes de développement concernent l'amélioration générale de la démarche hydrologique et l'amélioration du système d'aide à la décision. Des bureaux privés, employant notamment d'anciens participants à MINERVE et CRUEX, sont également impliqués pour les aspects opérationnels.

MINERVE 2011 devrait ainsi permettre aux cantons du Valais et de Vaud de disposer d'un modèle de prévision des crues opérationnel. En plus des besoins pratiques pour le canton, la Confédération a également un intérêt important de disposer d'un système de prévisions sur le Rhône, afin de répondre à son obligation de fournir des alertes nationales de crues en application de l'ordonnance du 18 août 2010 sur l'alerte et l'alarme (Ordonnance sur l'alarme, OAL). Afin de tirer profit des infrastructures et des ressources mises en place à l'Office fédéral de l'environnement pour les prévisions nationales, il a été proposé que les prévisions de bases de MINERVE soient réalisées par l'OFEV, le Canton reprenant la main tant pour les précisions régionales et locales que pour l'optimisation de la gestion des retenues hydroélectriques. Ce partenariat constitue un excellent exemple de complémentarité entre les cantons et la Confédération.

11.5 Conclusions

Les recherches évoquées ici ont permis tant au canton du Valais qu'à la Confédération d'améliorer leurs connaissances et leur démarche dans le domaine de l'hydrologie des crues. Elles ont permis également le développement de thèses, leurs auteurs exportant ainsi leurs connaissances soit dans le domaine public, sois dans le domaine privé.

Le Valais assure également un partenariat directement avec des instituts de recherche, à l'exemple du WSL. Le projet HYDRALP, développant des méthodes dans le domaine du charriage et des laves torrentielles, est un exemple qu'il convient de citer. Grâce à de tels projets, le Valais se prépare aux défis de demain dans le domaine de l'eau, que ce soit pour des questions de dangers naturels ou plus généralement de gestion de l'eau. La confédération tire parti de ces développements pour en faire bénéficier les autres cantons intéressés. Une telle démarche gagnant-gagnant devrait perdurer dans les années à venir.

Références

André S. ; Boillat J-L , 2002. Schaffung eines Rückhaltevolumens im Stausee Mattmark für den Hoch-wasserschutz";Proc. Int. Symposium Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau 2002, VAW, Zürich, 509-518

Bérod, D., 1995. Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes - Apport de la description géomorphologique pour la simulation des processus d'écoulement. Thèse EPFL No. 1319, 1995.

Bérod, D ; Singh, V.P., Devred, D ; Musy, A., 1995. A geomorphological nonlinear cascade (GNC) model for estimation of floods from small alpine watersheds. Journal of Hydrology 166, 147-170.

Dubois, J., 1998. Comportement hydraulique et modélisation des écoulements de surface. Thèse EPFL, no 1890.,

Etat du Valais, groupe de travail intredépartemental, 2001 : CONSECRU, Concept de protection contre les crues. Rapport final.

Etat du Valais, 2000. 3e correction du Rhône, rapport de synthèse.

Favre, A.-C., 2000; Single and multi-site modelling of rainfall based on the Neyman-Scott process. Thèse EPFL, no 2320.

Hingray, B. ; Mezghani, A. ;Schaefli, B ;Niggli, M. ; Faivre, G. ; Guex, F. ; Hamdi,Y ;Musy, A ; 2006. Estimation des débits de crue du Rhône à Porte du Scex et autres points amont caractéristiques. Rapport final du projet CONSECRU 2,.

Mezghani, Abdelkader, 2009. Génération multi-sites de variables météorologiques horaires en zone alpine. Application à la simulation de scénarios de crues du Rhône supérieur suisse. Thèse EPFL no 4335

Office fédéral de l'Energie (OFEN), 2008. Sécurité des ouvrages d'accumulation: documentation de base relative à la vérification de la sécurité en cas de crue.

Receanu, Ramona ; Hertig, Jacques-André ; J.-M. Fallot, 2009. Modélisation spatiale et temporelle des précipitations pour l'estimation des crues extrêmes dans les Alpes. Geographia Technica. Numéro spécial, 2009, 38.-388.

Zellweger, F., Musy, A., 2000. CRUEX, rapport de synthèse. Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne

12

Berechnung der Auswirkungen von wasserbaulichen Massnahmen auf den Feststofftransport Fallbeispiel: Houetenbach, Gemeinde Bönigen

Christoph Lehmann
Hydrologie - Wasserbau, Urtenen-Schönbühl

12.1 Ausgangslage

Der Houetenbach erstreckt sich mit knapp 4 km^2 Einzugsgebietsfläche nördlich der Schynigen Platte und dem Loucherhorn Richtung Bönigen / Brienzersee.

In den letzten Jahrzehnten haben unterschiedlich grosse Ereignisse im Houetenbach stattgefunden. Ein grösseres Ereignis trat im Jahre 1996 auf, als sich das Bachbett an mehreren Stellen vollständig mit Geschiebe füllte. Daraufhin wurde beschlossen, mit wasserbaulichen Massnahmen die Situation insbesondere für die Nationalstrasse A8 sowie für den Bereich bei der Mündung in den Brienzersee zu entschärfen.

Vorgängig zur eigentlichen Planungsphase wurde durch den Verfasser eine Geschiebestudie erarbeitet mit dem Ziel, noch nicht im Detail geplante, jedoch vorgesehene Baumassnahmen auf Sinn und Zweck sowie auf optimale Standorte hin zu überprüfen. Die Studie wurde Ende 1996 abgeschlossen (Lehmann 1998). Im Laufe der Umsetzung der Ergebnisse in konkrete Planungsvorschläge wurden verschiedene Optionen speziell im Hinblick auf ihre Wirkung auf den Feststofftransport und auf die Gefährdung schützenswerter Objekte im Detail mit Modellrechnungen bewertet (Lehmann 2000). Daraufhin wurde von einem Ingenieurbüro ein Projekt ausgearbeitet und vom Verfasser mit Optimierungsvorschlägen (Lehmann 2002) versehen. In der Folge wurde ein Geschiebeablagerungsplatz erstellt sowie Massnahmen zur Begünstigung von Ablagerungen im Mittellauf ausgeführt.

Am 12. August 2004 um ca. 17Uhr verursachte ein Unwetter grössere Feststoffverlagerungen im Houetenbach. In den darauf folgenden Tagen wurden ca. 5000 m3 Material aus dem neu erstellten Geschiebeablagerungsplatz ausgebaggert.

Der vorliegende Bericht entstand aufgrund einer Geländebegehung vom 23. August 2004. Darin werden die Feststoffverlagerungen des Ereignisses grob nachgezeichnet. Ferner folgt eine kurze Besprechung über die Wirkung der bereits erfolgten Massnahmen im Bach mit einer Empfehlung für das weitere Vorgehen.

12.2 Bisherige Empfehlungen und vorgeschlagene Massnahmen

In den oben genannten Berichten wurden u. a. die folgenden Ergebnisse präsentiert resp. Empfehlungen abgegeben:

- Die Abflussspitze für ein 100-jährliches Ereignis beträgt zwischen 20 – 25 m^3/s.
- Der Houetenbach ist murfähig.
- Die Feststofffracht für ein 100-jährliches Ereignis beträgt je nach Szenarium zwischen 15'000 und 21'000 m^3. Die insgesamt mobilisierbare Feststoffmenge aus dem Ein-

zugsgebiet beträgt 36'000 m^3. Die entlang des Baches auftretenden natürlichen Ablagerungen sind also sehr hoch.

- Auch bei kleineren Kubaturen von etwa 13 – 15‘000 m^3 entstehen ernsthafte Probleme bei der Bachunterführung der Nationalstrasse A8. Die genannte Kubatur entspricht etwa einem Ereignis, welches statistisch ungefähr alle 30 - 70 Jahre einmal auftreten kann.
- Ein 20-jährliches Ereignis transportiert ungefähr 6000 m^3. Für die Unterführung bei der A8 stellt dieses Feststoffvolumen per se kein direktes Problem dar, wird das Material in einem Hochwasser durch Geschiebetransport hinuntergeschwemmt. Sollte aber ein Murgang bis an diese Stelle gelangen, können auch bei der genannten Kubatur Probleme bei der Unterführung entstehen. Mitgeführtes Schwemmholz kann in jedem Fall die Situation verschärfen.
- Bei der Mündung in den See lagert sich in regelmässigen, fast jährlichen Abständen Geschiebe ab, welches die Brücke zu verstopfen droht und den Seeuferweg unpassierbar machen könnte. Bei grösseren Ereignissen landet das Bachbett vollständig auf und überführt sowohl Brücke als auch Seeuferstrasse.
- Im Interesse eines Schutzes der A8 und der untenliegenden Parzellen wurde ein Geschiebeablagerungsplatz oberhalb der A8 als zweckmässig erachtet. Dieser sollte einerseits einen Murgang und die entsprechende Feststofffracht auffangen oder die Fracht reduzieren können. Das Fassungsvermögen dieses Geschiebeablagerungsplatzes sollte möglichst gross sein, d. h. mindestens 10'000 m^3.
- Als Auslaufbauwerk war eine Dosiersperre vorgesehen, damit Material von kleinen Ereignissen den Sammler passieren kann, beim Grossereignis aber die Nationalstrasse keiner speziellen Gefährdung untersteht. Die Schlitzweiten sollten etwa 1.5 bis 2 Meter breit sein. Nach entsprechenden Erfahrungen sollte die Schlitzweite entweder verengt oder ausgeweitet werden.
- Ein zur Diskussion stehender Geschiebeablagerungsplatz im Mittellauf wurde als weniger günstig beurteilt, da dessen Auffangvolumen aufgrund der bachabwärts verstärkt einsetzenden Erosion teilweise wieder kompensiert würde. Die Feststofffracht bei der A8 und bei der Mündung in den See würde in diesem Falle unterhalb des Geschiebeablagerungsplatzes wieder zunehmen.
- Hingegen wurde als zusätzliche Massnahme zum Geschiebeablagerungsplatz eine Ausweitung des Gerinnes im Mittellauf vorgeschlagen. Im Mittellauf durchfliesst der Bach einen Bereich, der bereits in früherer Zeit als Ablagerungsraum für Geschiebe gedient hatte.
  Das Fassungsvermögen der vorgesehenen Ablagerungsflächen beträgt etwa 5000 m^3. Damit erhoffte man, im günstigen Fall die Feststofffracht bis zur A8 um etwa 4000 m^3 zusätzlich zu reduzieren (die Differenz ist auf vermehrte Erosion im Zwischenteil zurückzuführen).
- Ferner wurde ein Dosierwerk unterhalb der vorgesehenen Ausweitungen diskutiert. Da aber eine gewisse Verstopfungsgefahr besteht und so des öftern gebaggert werden müsste, wurde eine grössere Öffnung (+/- Bachbreite) vorgeschlagen.

Die Ausführung der drei Hauptmassnahmen, Geschiebeablagerungsplatz, Ausweitung und Dosiersperre sollte zeitlich gestaffelt erfolgen. Alle drei Massnahmen waren aber Bestandteil desselben Projektes.

Ferner wurde die Tatsache erwähnt, dass die empfohlenen Massnahmen nicht verhindern könnten, auch nach kleineren Ereignissen bei der Mündung in den Brienzersee Geschiebe baggern zu müssen. Das Gefälle bei der Mündung ist zu klein, so dass sich dort immer Ablagerungen bilden werden. Auch eine vollständig geschlossene Geschiebesperre oberhalb der A8 kann Ablagerungen bei der Mündung nicht verhindern. Das geschiebelose Hochwasser erodiert auf der Strecke zwischen A8 und Mündung wiederum Material, welches daselbst zur Ablagerung gelangt; der Brienzersee übt hier eine Staufunktion aus.

12.3 Bis heute durchgeführte Massnahmen

In der darauf folgenden Zeit wurde ein Geschiebeablagerungsplatz mit Dosierwerk oberhalb der A8 erstellt und im Frühling 2004 seiner Bestimmung übergeben. Leider konnte das notwendig erachtete Geschieberückhaltevolumen von 10'000 m^3 vorab aus Platz- und umweltbedingten Gründen nicht realisiert werden. Das tatsächliche Fassungsvermögen des Geschiebeablagerungsplatzes liegt bei etwa 5000 bis 6000 m^3. Die Schlitzweiten der Dosiersperre betragen 0.7m.

Im Mittellauf wurden Massnahmen getroffen, um Ablagerungen auf den beidseitig des Baches vorhandenen Flächen zu begünstigen.

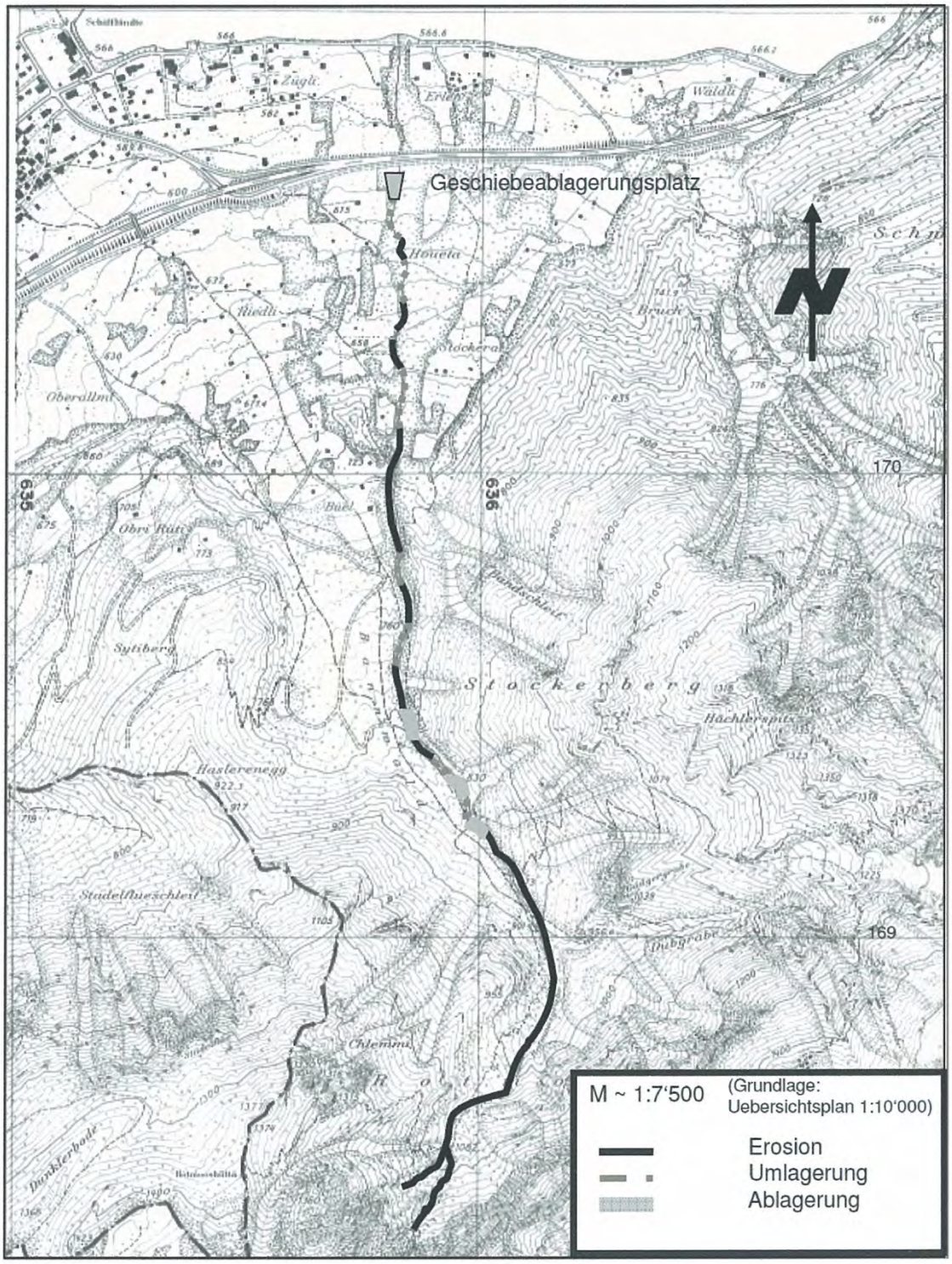
12.4 Das Ereignis vom 12. August 2004
a) Wirkung der Bauten

Wenige Monate nach der Fertigstellung des Geschiebeablagerungsplatzes oberhalb der A8, ereignete sich am 12. August über dem Einzugsgebiet des Houetenbaches ein Unwetter. Laut Augenzeugen war der Geschiebeablagerungsplatz innerhalb einer halben Stunde fast vollständig aufgefüllt. Erste Schätzungen gingen von einer abgelagerten Feststofffracht von ca. 5000 m^3 aus, wobei aber noch ein bestimmter Anteil v. a. Feinmaterial Richtung Brienzersee verlagert wurde.

Vielleicht hat der Geschiebeablagerungsplatz möglicherweise einen Schadenfall im Bereich der Nationalstrasse verhindert. Auf mögliche Probleme an dieser Stelle mit einer entsprechenden Feststofffracht wurde bereits früher hingewiesen. In diesem Sinne hat sich das Bauwerk aber sicher bewährt.

Die Massnahmen für zusätzliche Ablagerungen im Mittellauf hingegen haben nicht in erhofftem Masse gegriffen. Die Gründe dafür waren nicht eruierbar, da Geschiebe die fraglichen Stellen seit dem Ereignis zudeckt. Die Art und Weise des Eingriffes konnte deshalb nicht erkannt werden.

Die vorliegende Grobanalyse der Feststoffverlagerung durch das Ereignis wurde v a. mittels einer Begehung des Bachbettes und Vergleichsfotos durchgeführt und erfolgte semiquantitativ. Es ging auch darum, aufgrund dieses ersten grösseren Ereignisses weitere Massnahmen im Bach optimieren zu helfen und eine erste Standortbestimmung durchzuführen.



Figur 1: Feststoffverlagerung während des Ereignisses vom 12. August 2004. Kommentar siehe Text.

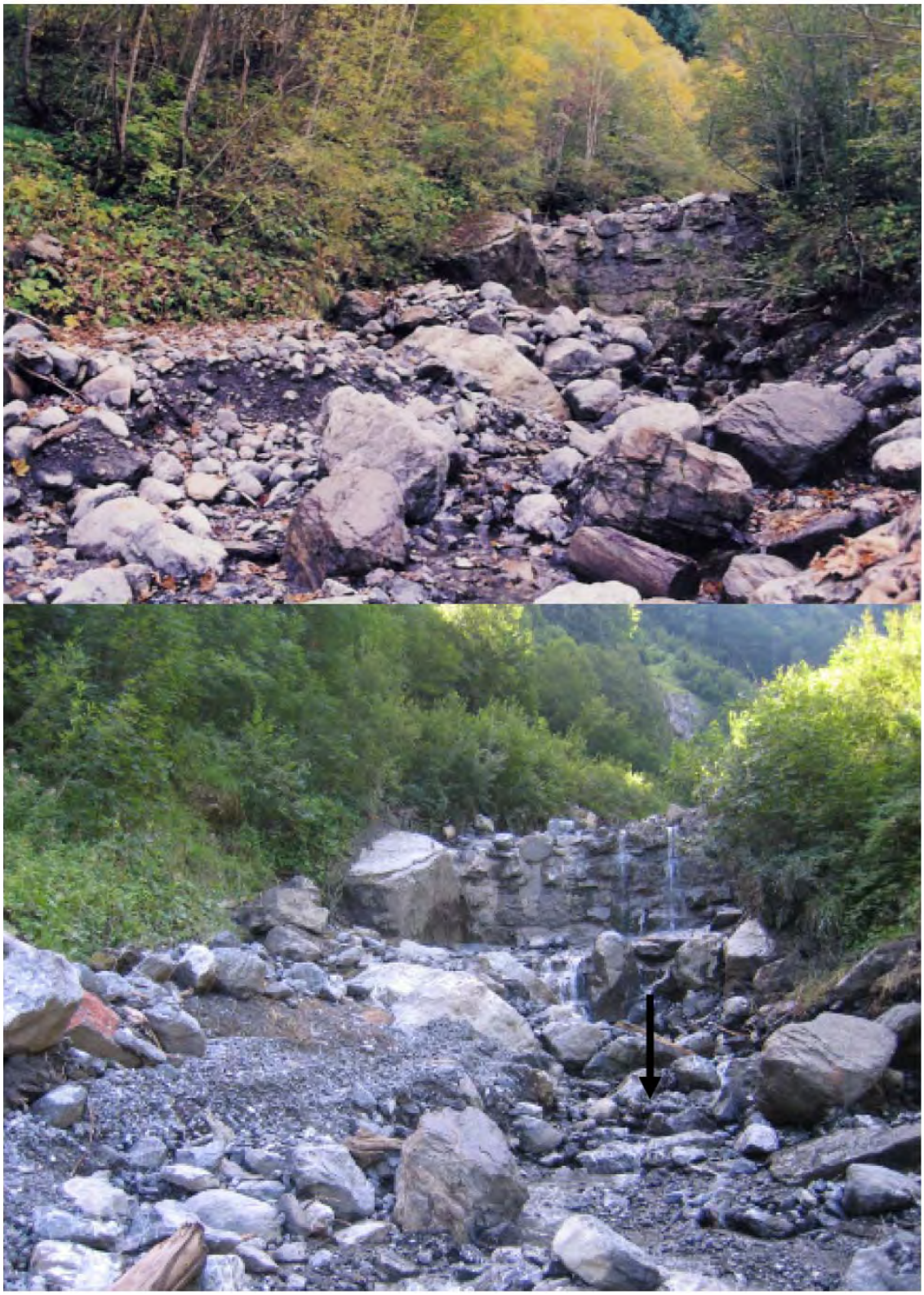
b) Feststoffumlagerung

Aufgrund der Geländebegehung sowie auch des Bildervergleichs (siehe Figur 2) können folgende generelle Feststellungen gemacht werden:

– Die Felderhebung zeigte die Schwierigkeit auf, bei kleineren Ereignissen genaue Verlagerungskubaturen zu bestimmen: eine eindeutige Zuordnung der Prozesse zum betreffenden Ereignis war nicht in jedem Falle möglich. Zudem ist der Anteil an transportiertem Feinmaterial unbekannt. Dieser Feinmaterialanteil ist in der Regel im

Gelände nicht klar ersichtlich, spielt aber, aufs Ganze betrachtet, volumenmässig eine wichtige Rolle (zusätzliche 50 – 100 Volumenprozent (?)).

- Das Ereignis vom August 2004 hat den neu erstellten Geschiebeablagerungsplatz fast vollständig gefüllt. Zudem muss mit einem unbekannten Volumen von eher feinem Material ausgegangen werden, das in einer ersten Phase durch das Auslaufbauwerk des Geschiebeablagerungsplatzes durchgeflossen ist. Insgesamt dürften vorläufigen Schätzungen gemäss etwa 3000 – 5000 m^3 Material im Sammler und bei der Mündung in den Brienzersee abgelagert worden sein.
- Über die Materialverteilung im Geschiebeablagerungsplatz liegen bisher keine gesicherten Kenntnisse vor. Den Spuren nach zu urteilen sowie gemäss den Aussagen von Herrn Gerber (Gerber & Troxler AG; Leerung des Geschiebeablagerungsplatzes) haben sich vorne am Auslaufbauwerk mehrheitlich feinere Elemente eines Murganges mit hohem Feinanteil (mudflow) abgelagert. Von diesem dürfte auch Material durch das Auslaufbauwerk hindurch Richtung Brienzerseemündung geflossen sein. In den hinteren Bereichen des Sammlers finden sich vor allem gröbere Komponenten.
- Die Spuren entlang des Baches zeugen von deutlichen Geschiebeverlagerungen und auch von Murgängen (Levées auf beiden Seiten). Ferner wurden teils bedeutende Ablagerungen auch neben dem Gerinne festgestellt.
- Geht man entlang der in Figur 1 bezeichneten Erosionsstrecke von einem mittleren Erosionsbetrag von 1 – 2 m^2 pro Laufmeter aus, beträgt die Erosion insgesamt etwa 3600 m^3. Die Ablagerungen entlang der Strecke (ohne diejenigen im Geschiebeablagerungsplatz) betragen ca. 1100 m^3. Bilanzmässig erreichten demnach ca. 2500 m^3 Feststoffe den Geschiebeablagerungsplatz. Darin nicht eingeschlossen sind nun die oben erwähnten Anteile Feinmaterial. Bei einem zusätzlichen Feinanteil von angenommenen 50 % beträgt die abgelagerte Feststofffracht im Geschiebesammler ca. 3800 m^3, bei 100 % ca. 5000 m^3. In Figur 1 können neben den Strecken mit vorwiegend Erosion auch solche mit Umlagerungstendenz (Erosion und Auflandung halten sich die Waage) und Ablagerungsstellen erkannt werden. Dabei ist ein Vorherrschen von Erosionsstrecken gegenüber solchen mit Umlagerungen ersichtlich.



Figur 2: Standort 636160 / 168 910
An der Stelle des Pfeiles ist eine Eintiefung von etwa 1 Meter erkennbar. An dieser Stelle dürfte die Erosion etwa 2m^2 pro Laufmeter betragen haben. Links neben dem Stein ist eine Terrasse aus verhältnismässig feinem Material vorhanden, welche eindeutig dem Ereignis zugeordnet werden konnte.

c) Einordnung des Ereignisses

Die bedeutenden Geschiebeumlagerungen während des Ereignisses vom August 2004 dürfen nicht über die Tatsache hinwegtäuschen, dass es sich beim betrachteten Ereignis eher um ein

solches mit vermutlich häufiger Wiederkehrperiode handelt. Die Jährlichkeit dürfte schätzungsweise unter 20 Jahren liegen. Folgende Beobachtungen unterstützen diese Einschätzung:

- Es haben keine bedeutenden Gerinneveränderungen stattgefunden (weder deutliche Tiefenerosion noch ausserordentliche Ablagerungen entlang des Gerinnes).
- Grossereignisse sind in der Regel gerinneverändernd (hohe und klar erkennbare Tiefen – und Seitenerosion, welche markante Veränderungen im Bachbett hinterlassen) und lassen meistens auch deutliche Spuren im Einzugsgebiet zurück (Rutschungen, Anrisse, Hangmuren usw.). Zudem sind Verbauungen oft beschädigt oder weggerissen. Diese Hinweise fehlen im Houetenbach.

Die Einschätzung als kleines Ereignis heisst aber auch, dass in Zukunft auch bedeutend grössere Ereignisse (mit entsprechenden Feststoffkubaturen) zu erwarten sind.

12.5 Fazit zu den bisherigen Massnahmen

Die durchgeführten Beobachtungen lassen für die bisherigen Massnahmen im Houetenbach folgende - nicht abschliessende - Beurteilungen zu:

- Das Rückhaltevolumen des Geschiebeablagerungsplatzes ist, für sich alleine genommen, für Grossereignisse wahrscheinlich zu knapp. Er dürfte aber ein etwa 20-jährliches Ereignis (~6000 m^3 Material) gerade noch neutralisieren. Es ist deshalb wichtig, dass zusätzliche Massnahmen realisiert werden können.
- Die Schlitzweite am Auslaufbauwerk wurde mit ca. 70 cm weniger weit ausgelegt als ursprünglich empfohlen. Im vorliegenden Falle war dies soweit erkennbar kein Nachteil. Es macht daher sicher Sinn, die Schlitzweite aufgrund des einen Ereignisses nicht zu verändern und im Moment so zu belassen. So können weitere Erfahrungen gesammelt werden.
- Das Auslaufbauwerk hat v. a. Feinmaterial durchgelassen. Grobes Material wurde grösstenteils zurückgehalten. Ob dies nun mit der Ereigniskonstellation zusammenhängt (viel Feinmaterial enthaltender Murgang in früher Phase des Ereignisses, Verlagerung von grösseren Komponenten vermutlich in einer späteren Phase) oder der Konstruktion zu verdanken ist, muss vorerst offen bleiben.
- Der Rückhalt des Grobgeschiebes hat wahrscheinlich dazu beigetragen, bei der Brücke vor der Seemündung zusätzliche Probleme zu verhindern. Ein erhöhter Anteil gröbere Komponenten hätte mehr Auflandungen und vielleicht Folgeschäden verursacht.
- Inwieweit der Geschiebeablagerungsplatz nun tatsächlich Schäden im Bereich der Nationalstrasse A8 verhindern konnte, ist nicht genau abklärbar. Aufgrund der Feststoffmenge und der Geschiebekonzentration (der Ablagerungsplatz war in kurzer Zeit gefüllt) hätte ein Schadenfall ohne den Geschiebeablagerungsplatz indes nicht ausgeschlossen werden können.

Im Mittellauf hat sich das Geschiebe offensichtlich nicht in gewünschtem Masse abgelagert. Die Komponenten kamen schon auf kurzer Strecke nach Verlassen des Bachbettes zum Stillstand. Der zur Verfügung stehende Ablagerungsplatz wurde nur ungenügend ausgenützt. Neben der allgemeinen Konstellation könnte auch zuwenig „Schub“ von oben dazu beigetragen haben; abschliessend ist dies jedoch nicht zu beurteilen. Hier ist das generelle Konzept aber zu überprüfen.

12.6 Vorschlag für das weitere Vorgehen

Aufgrund der Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Unwetter vom August 2004 lassen sich Vorschläge für ein weiteres Vorgehen skizzieren.

- Geschiebeablagerungsplatz:
- Die Schlitzweite von 0.7 Metern im Moment so belassen.
- Genaue Beobachtung der Ablagerungsprozesse durch die Schwellenkorporation, ev. mit Dokumentation (Fotos, Buchführung der Ereignisse).
- Sollten aus irgendeinem Grund die im Mittellauf geplanten zusätzlichen Massnahmen nicht realisiert werden können, müsste eine Verlängerung des

Geschiebeablagerungsplatzes bachaufwärts zur Vergrösserung des Retentionsvolumens in Betracht gezogen werden.

- Ausweitungen im Mittellauf:
- Nach Möglichkeit Eruierung der Gründe, warum die Massnahmen nicht zur vollen Zufriedenheit gegriffen haben.
- Ev. Vergrösserung der Öffnungen für die lateralen Ablagerungen, dafür müssten aber die Böschungen freigebaggert werden (mit hohen Kosten verbunden, daher eher im Verein mit der Erstellung der Geschiebesperre realisierbar (?), siehe unten).
- Rückhaltebauwerk im Mittellauf:
  Nach der Erstellung des Geschiebeablagerungsplatzes bei der A 8 stehen nun weitere Massnahmen im Mittellauf zur Diskussion. Als vordergründiges Bauwerk steht eine Murgangsperre im Raum. Diese sollte nur für grössere Ereignisse wirksam werden. Der Feststoffdurchlass ist daher grösser zu planen als beim Geschiebeablagerungsplatz. Im andern Falle wird man genötigt sein, häufige Ausbaggerungen vornehmen zu müssen, was sich negativ auf die Kosten auswirkte und dem Sinn dieses Bauwerkes entgegenspräche.

13

Anwendung des Geschiebeabschätzverfahrens nach Gertsch Fallbeispiel: Rote Bach, Gemeinde Lauterbrunnen

Eva Gertsch
belop GmbH, Sarnen

13.1 Anwendungsbereich des Geschiebeschätzverfahrens

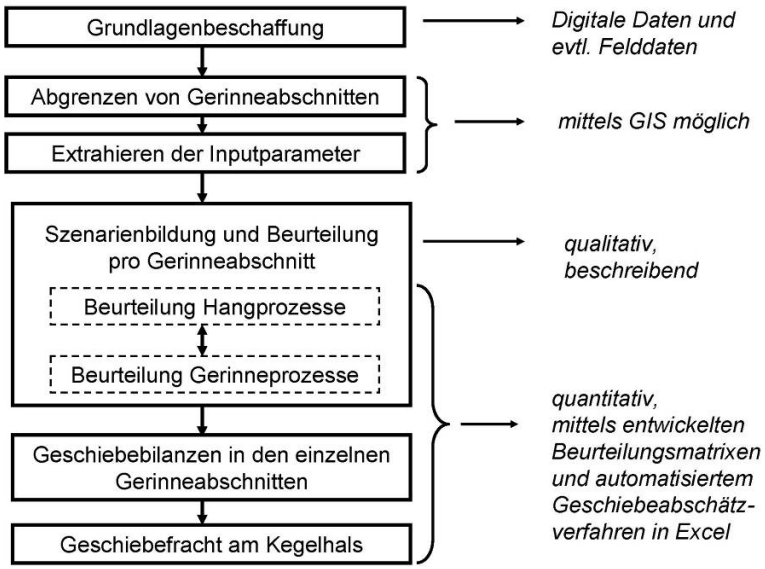
Mit dem von Gertsch entwickelten Geschiebeabschätzverfahren können Geschiebebilanzen in Gerinneabschnitten sowie die gesamte Geschiebefracht am Kegelhals von steilen Wildbächen in Abhängigkeit von verschiedenen, eigens definierten Szenarien für Grossereignisse (Wiederkehrperiode ≥ 100 jährlich) abgeschätzt werden.

Das Verfahren kann eingesetzt werden in voralpinen und alpinen Wildbachsystemen mit einer Einzugsgebietsfläche < 10 km^2 und einem mittleren Gerinnegefälle von > 10 %.

Das Zielpublikum zur Anwendung des Geschiebeabschätzverfahrens sind erfahrene Expertinnen und Experten aus der Praxis, die in ihrer täglichen Arbeit mit Geschiebeabschätzungen in Wildbachsystemen konfrontiert sind und somit bereits ein gutes Prozessverständnis mitbringen.

13.2 Arbeitsschritte im Geschiebeabschätzverfahren

In Figur 1 ist ein Ablaufschema des Geschiebeabschätzverfahrens ersichtlich.

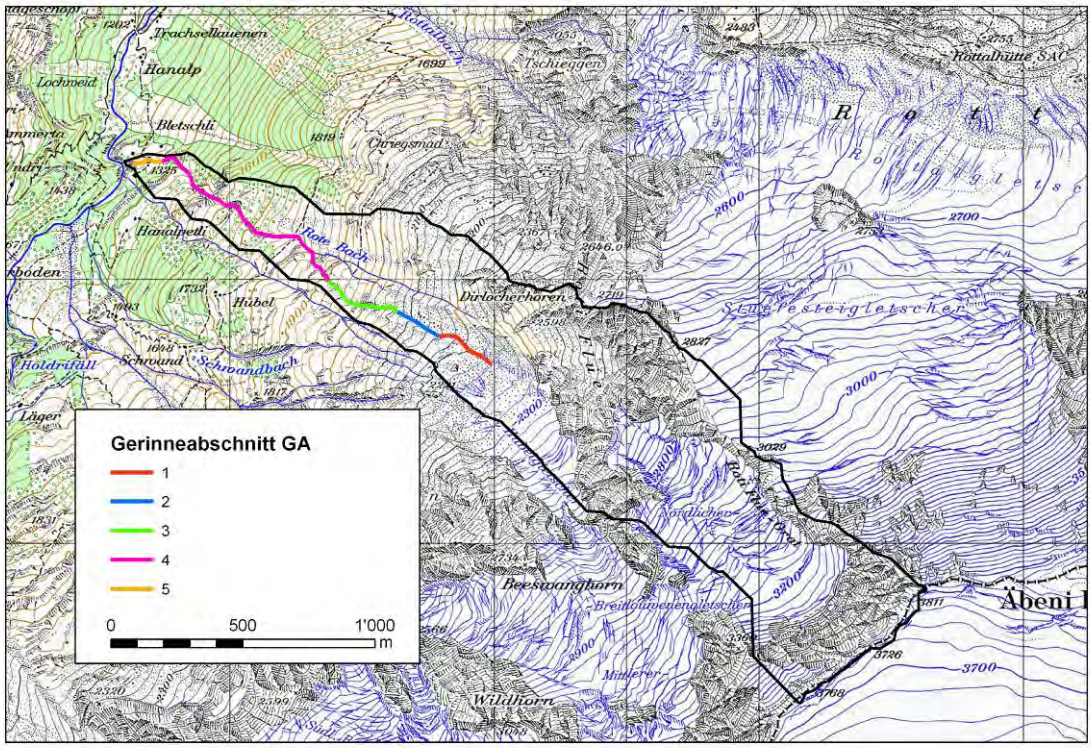


Figur 1: Ablaufschema des Geschiebeabschätzverfahrens

In einem ersten Schritt erfolgt die Grundlagenbeschaffung, wo die benötigten Inputparameter sowohl digital als auch aus Felderhebungen zusammengetragen werden. Danach gilt es, die geschieberelevanten Gerinneabschnitte zu definieren und abzugrenzen. Anschliessend werden pro Gerinneabschnitt die erforderlichen Inputparameter extrahiert. Für diese beiden Arbeitsschritt kann ein GIS eingesetzt werden. Nun erfolgt für den Anwender die Aufgabe, mögliche Ereignisszenarien rein qualitativ zu definieren. Diese werden anschliessend pro Gerinneabschnitt mit Hilfe von zwei Beurteilungsinstrumenten, nämlich der Hang-Beurteilungsmatrix für die Hangprozesse und der Gerinne-Beurteilungsmatrix für die Gerinneprozesse beurteilt. Daraus erfolgt eine quantitative Abschätzung der Geschiebebilanz pro Gerinneabschnitt. Zum Schluss werden die Geschiebebilanzen aller Gerinneabschnitte bis zum Kegelhals aufsummiert und es resultiert eine Abschätzung der Geschiebefracht am Kegelhals.

Eine detaillierte Beschreibung des konkreten Vorgehens bei der Gesamtbeurteilung kann in der Originalarbeit nachgelesen werden.

13.3 Fallbeispiel Rote Bach
a) Abgrenzung der homogenen Gerinneabschnitte



Figur 2: Einzugsgebiet und homogene Gerinneabschnitte

GA 1: Flaches Gletschervorfeld beim Hubelgletscher bis und mit Karschwelle

GA2: Steilgerinne im unlimitierten Moränenmaterial unterhalb Karschwelle

GA3: Steilgerinne im anstehenden Fels, mit limitierten Lockermaterialdepots

GA4: Steilgerinne im anstehenden Fels, komplett ausgeräumt, unten schluchtartig

GA5: Gerinne im unlimitierten Lockermaterial vor Einmündung in Lütschine

b) Inputparameter pro Gerinneabschnitt

	Inputparameter Gerinne														Inputparameter Hang				
Gerinneabschnitt	Anzahl GA, die in diesen GA einmünden	GA oberhalb 1	GA oberhalb 2	GA oberhalb 3	GA oberhalb 4	GA unterhalb	AEG [km²]	LM-Angebot	Höhe [m.ü.M.] am obersten Punkt	Länge GA [m]	Höhendifferenz [m]	mittlere Gerinneneigung [%]	schiefe Länge L_s [m]	J GA / J GAob [-]	H100 [km²]	Hpot[km²]	HF [km²]	Hpot / H100	HF / H100
1	0					2	1	1	2215	210	55	26.2	217.083	1				#DIV/0!	#DIV/0!
2	1	1				3	1.06	1	2160	180	93	51.7	202.606	2				#DIV/0!	#DIV/0!
3	1	2				4	1.09	3	2067	310	165	53.2	351.177	1				#DIV/0!	#DIV/0!
4	1	3				5	1.13	4	1902	860	560	65.1	1026.26	1.2				#DIV/0!	#DIV/0!
5	1	4				Kegelhals	1.5	1	1342	115	38	33.0	121.116	0.5				#DIV/0!	#DIV/0!
6											#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!
7											#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!
8											#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!
9											#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!
10											#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!
11											#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!
12											#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!
Kegelhals									1304		#NV	#NV	#NV	1				#DIV/0!	#DIV/0!

Eingabemaske / Beurteilung Hang und Gerinne / Grafik_Gerinne / Grafik_Hang / Fazit

Figur 3: Eingabemaske der Inputparameter pro homogenem Gerinneabschnitt

c) Szenariendefinition (qualitativ)

Qualitative Szenariendefinitionen für mögliche Ereignisabläufe bei einem Grossereignis (Wiederkehrperiode > 100 jährlich)

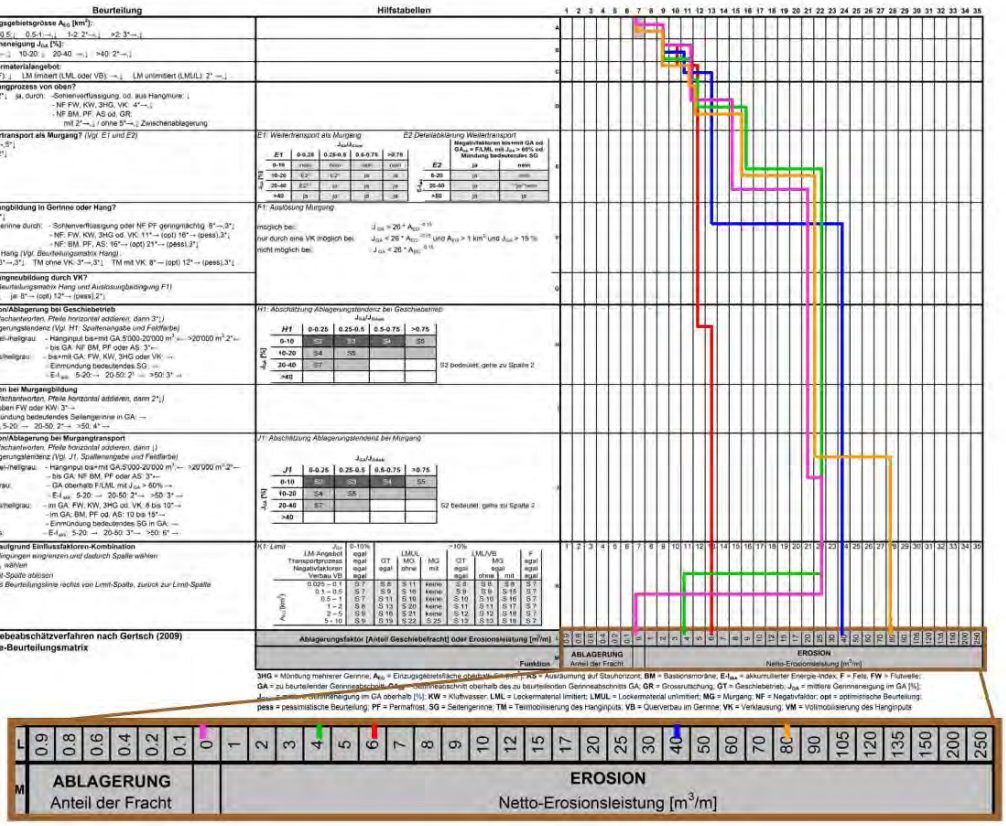
Pessimistisches Szenario SzP: Plötzliches Auslaufen einer Wassertasche oder gestautem Gletscherabfluss im Hubelgletscher, Flutwelle. Murgangauslösung in GA2, Fortsetzen des Murgangs bis Kegelhals. Starke Beschleunigung in steilem glatten Felsabschnitt GA3/GA4, extreme Erosion in GA5.

Optimistisches Szenario SzO: Murgangauslösung in GA2 während einem Gewitter oder langanhaltenden Niederschlägen. Fortsetzen des Murgangs bis zum Kegelhals. Starke Beschleunigung in steilem glatten Felsabschnitt GA3/GA4, starke Erosion in GA5.

d) Berechnung Geschiebebilanzen/-frachten pro Szenario

Quantitative Geschiebebeurteilung der vordefinierten Szenarien mit Hilfe der Gerinne-Beurteilungsmatrix. Es besteht zusätzlich eine Hang-Beurteilungsmatrix. Diese wird aber im Fall des Roten Bachs nicht benötigt, da keine massgebenden Hangprozesse zu erwarten sind.

e) Pessimistisches Szenario SzP



Figur 4: Gerinne-Beurteilungsmatrix mit Beurteilungslinie pro Gerinneabschnitt SzP

Geschiebeabschätzung Grossereignis nach Gertsch (2009)

Bach, Gemeinde: Rote Bach, Lauterbrunnen
Szenario: SzP
Bearbeiter/in, Datum: Eva Gertsch, 1.11.2010

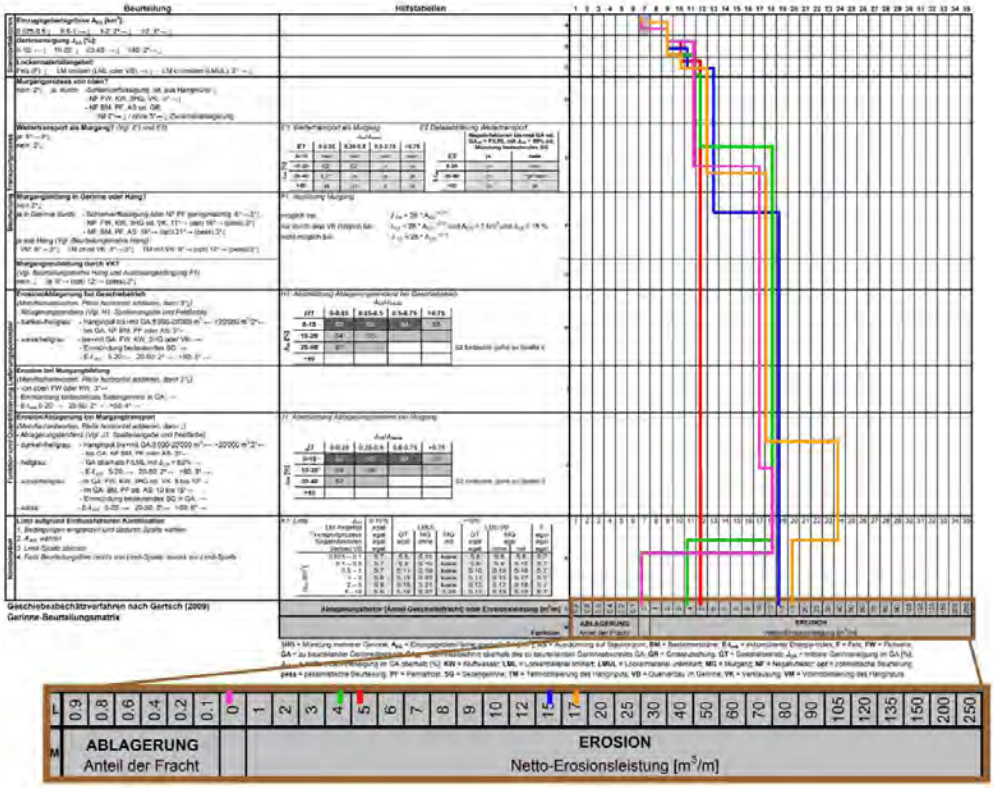
Gerinneabschnitt	Horizontale Gerinnelänge [m]	Einzugsgebietsfläche oberhalb AEG [km²]	mittlere Gerinneneigung JGA [%]	Lockermaterialangebot	JGA/JGAob	Akkumulierter Energie-Index E-Iakk	Geschiebelieferung aus dem Hang [m³]	mobilisierter Hanginput im Gerinne [m³]	Transportprozess im Gerinne	Funktion des Gerinneabschnitts	Ablagerungsfaktor	abgelagerte Kubatur [m³]	Erosionsleistung [m³/m]	erodierte Kubatur [m³]	Geschiebebilanz im Gerinneabschnitt [m³]	aufsummierte Geschiebefracht nach diesem Gerinneabschnitt [m³]
1	210	1.80	28.2	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	GT	Erosion			6	1260	1260	1260
2	180	1.06	51.7	unlimitiert	1.97	0.0	0	0	MG	Erosion			40	7200	7200	8460
3	310	1.09	53.2	limitiert nat.	1.03	0.0	0	0	MG	Erosion			4	1240	1240	9700
4	850	1.13	85.1	Fels	1.22	14.0	0	0	MG	Transit			0	0	0	9700
5	115	1.50	33.0	unlimitiert	0.51	80.8	0	0	MG	Erosion			80	9200	9200	18900
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																

Geschiebefracht am Kegelhals [m³]: **18'900**

Figur 5: Tabellarische Darstellung der Geschiebebilanzen und –fracht für SzP

→ Abschätzung Geschiebefracht (Kegelhals) pessimistisches Szenario: **ca. 20'000 m³**

f) Optimistisches Szenario SzO



Figur 6: Gerinne-Beurteilungsmatrix mit Beurteilungslinie pro Gerinneabschnitt SzO

Geschiebeabschätzung Grossereignis nach Gertsch (2009)

Bach, Gemeinde: Rote Bach, Lauterbrunnen
Szenario: SzO
Bearbeiter/in, Datum: Eva Gertsch, 1.11.2010

Gerinneabschnitt	Horizontale Gerinnelänge [m]	Einzugsgebietsfläche oberhalb AEG [km²]	mittlere Gerinneneigung JGA [%]	Lockermaterialangebot	JGA/JGAab	Akkumulierter Energie-Index E-Iakk	Geschiebelieferung aus dem Hang [m³]	mobilisierter Hanginput im Gerinne [m³]	Transportprozess im Gerinne	Funktion des Gerinneabschnitts	Ablagerungsfaktor	abgelagerte Kubatur [m³]	Erosionsleistung [m³/m]	erodierte Kubatur [m³]	Geschiebebilanz im Gerinneabschnitt [m³]	aufsummiertes Geschiebefracht nach diesem Gerinneabschnitt [m³]
1	200	1.00	50.0	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	MG	Erosion			5	1000	1000	1000
2	180	1.09	57.7	unlimitiert	1.07	0.0	0	0	MG	Erosion			15	2700	2700	3700
3	310	1.09	53.2	limitiert nat.	1.03	0.0	0	0	MG	Erosion			4	1240	1240	4940
4	880	1.19	56.1	fest	1.03	14.0	0	0	MG	Erosion			0	0	0	4940
5	115	1.50	33.0	unlimitiert	0.51	80.8	0	0	MG	Erosion			17	1955	1955	6945
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																

Geschiebefracht am Kegelhals [m³]: 6'900

Figur 7: Tabellarische Darstellung der Geschiebebilanzen und –fracht für SzO

→ Abschätzung Geschiebefracht (Kegelhals) pessimistisches Szenario: **ca. 7'000 m³**

Weitere Informationen zum Geschiebeabschätzverfahren

Die komplette Dissertation (in Deutsch) kann gratis herunter geladen werden unter:
http://www.zb.unibe.ch/download/eldiss/09gertsch_e.pdf

14

Berechnung des Geschiebetransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen unter Berücksichtigung von Makrorauigkeit

M. Nitsche, D. Rickenmann, A. Badoux, J.M. Turowski, J.W. Kirchner
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf

14.1 Einleitung

Fluvialer Geschiebetransport, die rollende oder hüpfende Verfrachtung von gröberem Sediment an der Bachsohle, ist ein Prozess, der vor allem in dicht besiedelten Alpentälern eine ernsthafte Naturgefahr darstellt. In der Schweiz sind viele der schadenreichen Unwetterereignisse stark durch Geschiebeablagerungen, Verklausungen oder Übersarungen geprägt (z.B. Bezzola und Hegg, 2007). Die zuverlässige Abschätzung und Vorhersage von Geschiebetransportraten ist wichtig, um zukünftige Schäden zu verhindern bzw. zu reduzieren. Gebräuchliche Transportgleichungen überschätzen in der Regel Geschiebevolumen um bis zu drei Grössenordnungen, wenn sie für Wildbäche und steile Gebirgsflüsse angewendet werden (z.B. Rickenmann, 2001). Dies ist weitgehend darauf zurückzuführen, dass viele dieser Gleichungen auf der Grundlage von Daten aus Laborversuchen mit künstlichen Gerinnen entwickelt und meist nur in flacheren Flüssen getestet wurden. Sowohl Laborrinnen wie auch flache Flüsse unterscheiden sich beträchtlich von Wildbächen und Gebirgsflüssen.

Grobe Blöcke, Stufen-Becken Strukturen und eine stark variierende Gerinnebreite sind typische Merkmale von steilen Flüssen mit Gefällen von mehr als 3 bis 5 %. Der Fliesswiderstand, der durch solche zusätzliche Makrorauigkeit erzeugt wird, hat einen grossen Einfluss auf den Geschiebetransport und wurde auch in Laboruntersuchungen nur selten berücksichtigt. In feinerem Bettmaterial gelagerte grobe Blöcke stören die Abflussverhältnisse und erhöhen die Turbulenz. An Stufen entsteht schiessender Abfluss und beim Eintauchen in darauf folgende Becken werden die Wassermassen stark gebremst, was beträchtliche Energieverluste verursacht. Es treten hydraulische Sprünge, Wirbel und erhebliche Turbulenzen auf. Ein Grossteil der Fliessenergie geht in steilen Gerinnen durch diese Makrorauigkeit verloren.

Hier fassen wir die Ergebnisse von Nitsche et al. (2011) zusammen. Eine ausführlichere deutsche Beschreibung dieser Untersuchung wird in der Zeitschrift Wasser, Energie Luft veröffentlicht. In der Studie wurde der Einfluss verschiedener Fliessgeschwindigkeitsgleichungen auf Geschiebevorhersagen für Wildbäche und Gebirgsflüsse getestet. Vier von fünf der getesteten Fliesswiderstandsgleichungen berücksichtigen explizit ein Mass der Makrorauigkeit, der andere Ansatz basiert auf einer empirischen Beziehung in Abhängigkeit der relativen Abflusstiefe. Wegen des erhöhten Fliesswiderstands aufgrund der Makrorauigkeit wird ein Teil der Fliessenergie umgewandelt und kann nicht mehr zum Geschiebetransport beitragen. Die verbleibende transportwirksame Energie wird über eine Aufteilung des Fliesswiderstandes abgeschätzt und mittels eines reduzierten Energieliniengefälles in die Geschiebetransportgleichungen integriert. Die Ergebnisse der Geschiebevorhersagen vergleichen wir mit Geschiebefrachtmessungen aus 13 Schweizer Wildbächen und Gebirgsflüssen. Mit dem systematischen Vergleich von Fliesswiderstandsansätzen beurteilen wir ihrer Anwendbarkeit für Geschiebetransportvorhersagen in steilen Gerinnen.

14.2 Berechnung des Fliesswiderstandes und des Sedimenttransportes

In der Fachliteratur veröffentlichte Formeln zur Berechnung des Fliesswiderstandes und des Geschiebetransportes beinhalten teilweise Ansätze, welche explizit dem Effekt von grossen Rauigkeitselementen in Wildbächen und Gebirgsflüssen Rechnung tragen. Die in unserer Studie berücksichtigten Methoden zur Quantifizierung des Fliesswiderstandes (s. Aufzählung unten) haben eine gemeinsame Grundannahme. Sie gehen von einem heterogenen Gerinnebett aus, das sowohl relativ feines Sohlenmaterial als auch grössere und gröbere Partikel aufweist. Dabei tragen beide Elemente zu verschiedenen, von der Abflusshöhe abhängigen Anteilen zum gesamten Fliesswiderstand bei.

Blöcke und Stufen stellen die grundlegenden groben Rauigkeitselemente – die Makrorauigkeiten – dar, die in den Ansätzen berücksichtigt sind. Die folgenden Fliesswiderstandsformeln wurden hierzu verwendet:

- Whittaker et al. (1988)
- Egashira und Ashida (1991)
- Pagliara und Chiavaccini (2006)
- Yager (2006)
- Rickenmann und Recking (2011)

Der Ansatz von Rickenmann und Recking (2011) ist der einzige hier verwendete Ansatz, der nicht explizit eine Messgrösse für grobe Rauigkeitselemente beinhaltet. Es handelt sich um einen pauschalen, empirischen Ansatz, welcher aber implizit Informationen über eine durchschnittliche Rauigkeitserhöhung in steilen und rauen Gerinnen enthält.

Die oben aufgeführten Fliesswiderstandsgleichungen wurden mit der dimensionslosen Geschiebetransportformel nach Rickenmann (2001) kombiniert, welche ursprünglich aus 252 durchgeführten Laborversuchen abgeleitet wurde und die ein Gerinnegefälle von 0.04 bis 20 % abdeckt (Rickenmann, 1991). In die Transportformel geht ein reduziertes Energieliniengefälle ein, das mit der Methode der Fliesswiderstandsaufteilung bestimmt werden kann (Rickenmann und Recking, 2011). Bei dieser Methode wird der Anteil des Fliesswiderstands der Makrorauigkeit an der Gesamtrauigkeit geschätzt, womit die transportwirksame Energie bestimmt wird. Auf diese Weise konnte in bisherigen Studien für verschiedene Hochwasserereignisse eine bessere Übereinstimmung zwischen im Feld beobachteten und berechneten Geschiebevolumen erreicht werden (z.B. Badoux und Rickenmann, 2008).

Zusätzlich zu den verschiedenen Kombinationen von Fliesswiderstandsformeln und der Transportgleichung von Rickenmann (2001) wurde letztere in der vorliegenden Studie auch als Referenzgleichung zur Bestimmung des Geschiebetransports ohne Berücksichtigung der Auswirkungen grossskaliger Rauigkeitselemente verwendet. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Methoden.

Tabelle 1: Kombinationen von Geschiebetransport- und Fliesswiderstandsgleichungen mit Abkürzungen

Geschiebetransport	Partitionierung der Fliesswiderstände	Abkürzung im Text
Rickenmann (2001)	keine Reduktion (no reduction)	Ri-no
Rickenmann (2001)	Pagliara und Chiavaccini (2006)	Ri-PC
Rickenmann (2001)	Whittaker et al. (1988)	Ri-W
Rickenmann (2001)	Egashira und Ashida (1991)	Ri-EA
Rickenmann (2001)	Yager (2006)	Ri-Y
Rickenmann (2001)	Rickenmann und Recking (2011)	Ri-RR

14.3 Untersuchungsgebiete und Datengrundlage

Zum Testen der ausgewählten Formeln wurden Messungen in 13 Wildbächen und Gebirgsflüssen in den Schweizer Alpen und Voralpen durchgeführt (Tabelle 2). Durch diese Auswahl der Gerinne konnten wir einen weiten Bereich von Gerinnecharakteristiken abdecken. Während einige Gerinneabschnitte ziemlich flach verlaufen, weisen andere steilere Abschnitte Stufen-Becken Abfolgen oder sogar kaskadenartige Morphologien auf. Die Gefälle der Gerin-

neabschnitte reichen von 2 bis 19 %. Die berücksichtigten Wildbäche und Gebirgsflüsse lassen sich in zwei Klassen unterteilen: (a) Gerinne, für welche langjährige, periodische Messreihen von in Geschiebesammlern (Erlenbach, Rotenbach, Schwändlibach, Melera) oder kleineren Rückhalteräumen (Sperbelgraben, Rappengraben) abgelagerten Geschiebevolumen bestehen, und (b) Gerinne, welche nach einzelnen extremen Transportereignissen untersucht wurden (Lonza, Saltina, Baltschiederbach und Gamsa nach den Unwettern 2000 im Wallis sowie Buoholzbach, Steinibach und Mattenbach nach dem Hochwasser im August 2005). Genauere Angaben zu den Bacheigenschaften und den verwendeten Abfluss- und Geschiebedaten geben Nitsche et al. (2011).

Die die Rauigkeit eines Gerinneabschnittes beschreibenden morphologischen Parameter wurden in den 13 Gerinnen aufgenommen und sind in Nitsche et al. (2011) detailliert aufgelistet. In Tabelle 2 sind nur einige wenige Kenngrössen aufgeführt. Einige Parameter variieren innerhalb eines betrachteten Abschnittes beträchtlich. Da alle Berechnungen für einzelne Gerinneabschnitte erfolgen, verwenden wir Abschnittsmittelwerte der gemessenen Grössen für die sogenannte Schlüsselstrecke mit der geringsten Transportkapazität. Im Rahmen dieser Studie wurde zur Bestimmung der Schlüsselstrecke vom Prinzip des kleinsten Gefälles ausgegangen. In den untersuchten Gerinnen stimmen die bestimmten Schlüsselstrecken mit den Abschnitten unmittelbar oberhalb der Geschiebeablagerungsgebiete überein.

Tabelle 2: Gerinneeigenschaften

Parameter	Rotenbach	Rappengraben 1	Schwändlibach	Sperbelgraben	Rappengraben 2	Erlenbach	Melera
Einzugsgebietsgrösse (km²)	1.7	0.7	1.4	0.5	0.6	0.7	1.1
Höhenlage, niedrigste/höchste (m ü.M.)	1274/1630	983/1256	1217/1642	911/1203	990/1256	1110/1655	962/1773
Grösster gemessener Abfluss ($m^3 s^{-1}$)	18	2.2	8.5	1.2	2.6	14.6	8
Gerinneneigung S [a]	0.051	0.06	0.098	0.101	0.106	0.115	0.17
D_{84} (m) [b]	0.18	0.08	0.16	0.08	0.08	0.29	0.16
Blockkonzentration Γ (-) [c]	0.02	0	0.04	0	0	0.11	0.02
Mittlere Stufenabstand L (m) [d]	10.45	22.91	16.19	60.83	22.91	7.86	15.32
Parameter	Saltina	Lonza	Baltschieder	Mattenbach	Gamsa	Buoholzbach	Steinibach
Einzugsgebietsgrösse (km²)	78	170	43	31	38	14	12
Höhenlage, niedrigste/höchste (m ü.M.)	670/3438	630/3994	647/3934	1015/2728	660/3391	490/2404	493/1955
Grösster gemessener Abfluss ($m^3 s^{-1}$)	~120	90-95	~100	~45	65-70	~40	~85
Gerinneneigung S [a]	0.02	0.064	0.135	0.15	0.165	0.17	0.186
D_{84} (m) [b]	0.16	0.20	0.18	0.45	0.14	0.23	0.92
Blockkonzentration Γ (-) [c]	0.08	0.09	0.16	0.26	0.16	0.10	0.40
Mittlere Stufenabstand L (m) [d]	31.39	17.78	7.84	10.85	16.48	10.00	50.83

[a] mittlere Gerinneneigung des Untersuchungsabschnitts; [b] Korngrössenverteilung berechnet mithilfe von Linienzahlanalysen von mindestens 500 Steinen > 1cm für jeden Bachabschnitt; [c] nach Pagliara und Chiavaccini (2006); [d] berechnet aus Längsprofilen mit Laserdistanz- und –neigungsmesser

14.4 Resultate und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie untersuchte die Genauigkeit modifizierter Geschiebetransportberechnungen. Dabei bildeten unterschiedliche Ansätze zur Berechnung des Fliesswiderstands durch Makrorauigkeit die Basis für die Reduktion des Energieliniengefälles in einer Transportformel. Dieses Vorgehen reduzierte die Überschätzung der beobachteten Geschiebefrachten (V_{gem}) im Vergleich zu den Vorhersagen der Referenzgleichung von Rickenmann (2001) signifikant. Die berechneten Geschiebefrachten sind mit V_{ber} bezeichnet. Die Güte der mit den sechs Ansätzen erzielten Resultate variiert für die verschiedenen Gerinne und für die einzelnen Hochwasserereignisse stark (Abb. 1). Für Gerinne mit langjährigen Messreihen wurden die Bereiche der Verhältnisse V_{ber}/V_{gem} für jedes Untersuchungsgebiet mit Boxplots dargestellt; für Gerinne mit

einzelnen Extremereignissen sind Einzelpunkte aufgeführt. Einige Gleichungen weisen eine beträchtliche Variation von einer bis drei Grössenordnungen für Werte von V_{ber}/V_{gem} auf. Die Referenzgleichung ohne Berücksichtigung von groben Rauigkeitselementen (Ri-no) überschätzt in der Regel die Geschiebetransportvolumen um bis zu zwei Grössenordnungen (Abb. 1). Im Vergleich dazu wurden mit allen Formelkombinationen (Tabelle 1) mit einer Aufteilung des Fliesswiderstandes jeweils kleinere Volumen bestimmt. Für einzelne grosse Hochwasserereignisse werden generell bessere Ergebnisse erzielt als für die langjährigen Datenreihen. Letztere beinhalten eine Vielzahl von kleinen Transportereignissen mit Abflüssen in der Nähe des Transportbeginns und kleinen relativen Abflusstiefen, für die Geschiebeberechnungen generell ungenauer sind.

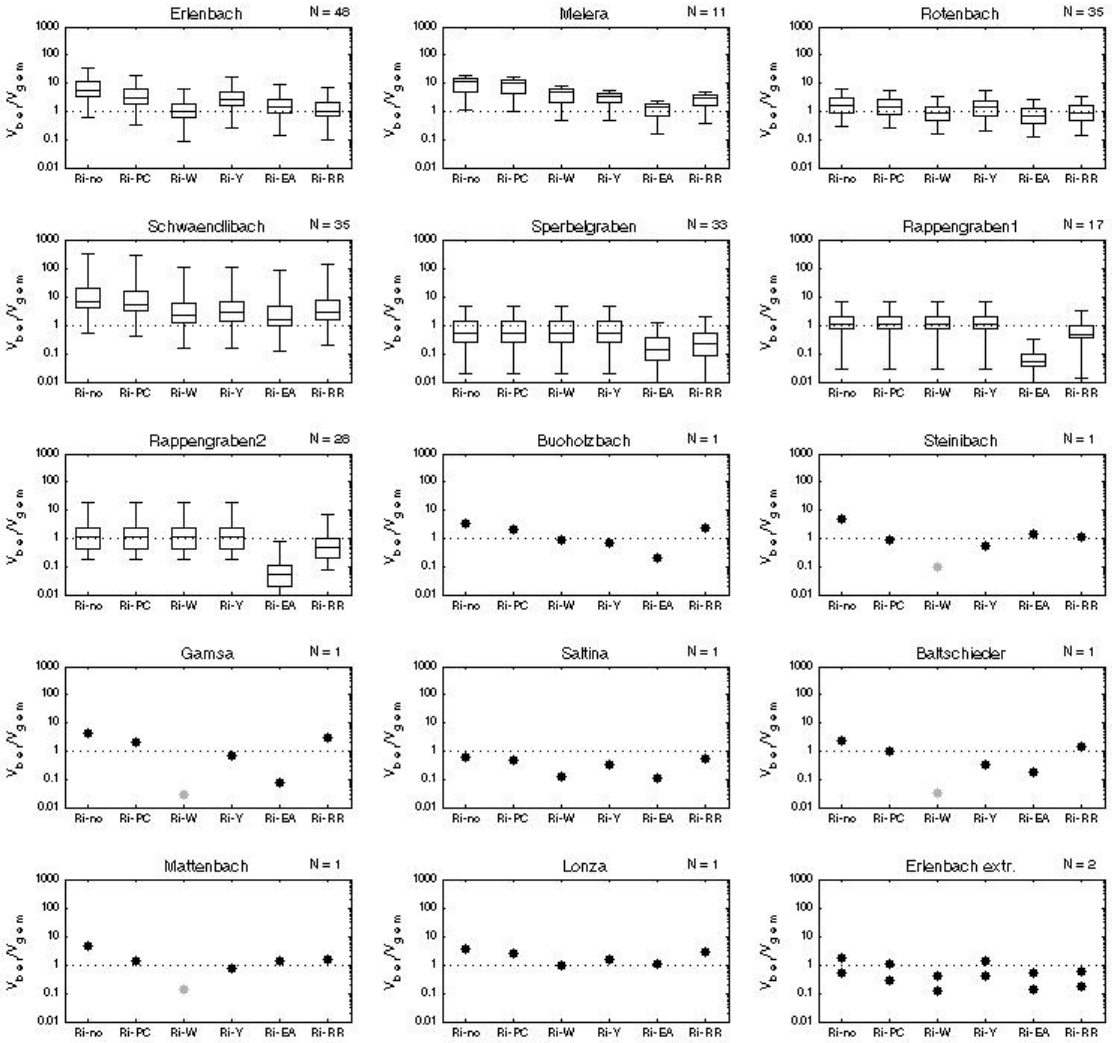


Abb. 1: Verhältnis von berechneten zu gemessenen Geschiebevolumen (V_{ber}/V_{gem}) für die untersuchten Gerinne. Die Berechnung mit der Referenzformel von Rickenmann (2001) ohne Korrektur für Makrorauigkeiten ist jeweils ganz links aufgeführt (Ri-no). Die weiteren Formelkombinationen sind in Tabelle 2 definiert. Punkte in hellem Grau bedeuten, dass der Ansatz für den Bach nicht anwendbar ist. N ist die Anzahl verwendeter Geschiebetransportereignisse. Die gestrichelte Line beim Wert 1 entspricht einer perfekten Übereinstimmung von Berechnung und Beobachtung. Die Boxen sind durch das 25- und 75-Perzentil und den Median definiert. Die Whisker zeigen die 5- und 95-Perzentile der Daten. Die Grafik "Erlenbach extr." (letzte Zeile, rechte Spalte) enthält aussschliesslich Daten von zwei der grössten gemessenen Hochwasserereignisse im Erlenbach.

In Abbildung 2 sind die Resultate (d.h. die Verhältnisse V_{ber}/V_{gem}) der verschiedenen Ansätze in Klassen zusammengefasst. Für die langjährigen Datensätze lieferten die Kombinationen Ri-W, Ri-RR und Ri-Y die besten Vorhersagen. Für 71, 64 bzw. 63 % der berechneten Transportvolumen liegt die Abweichung innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Werte ($0.3 < V_{ber}/V_{gem} < 3$). Insgesamt schwankten die V_{ber}/V_{gem}–Werte aller sechs Ansätze für diese Klasse in einem Bereich zwischen 0.04 und 59. Den besten Medianwert für V_{ber}/V_{gem} der langjährigen Daten erzielten Ri-W (1.1) und Ri-RR (0.9) (Abb. 2 und Tabelle 3). Der Variationskoeffizient von Ri-W und Ri-RR liegt allerdings im Bereich der meisten anderen Ansätze; in dieser Sparte erreichte Kombination Ri-Y den tiefsten Wert.

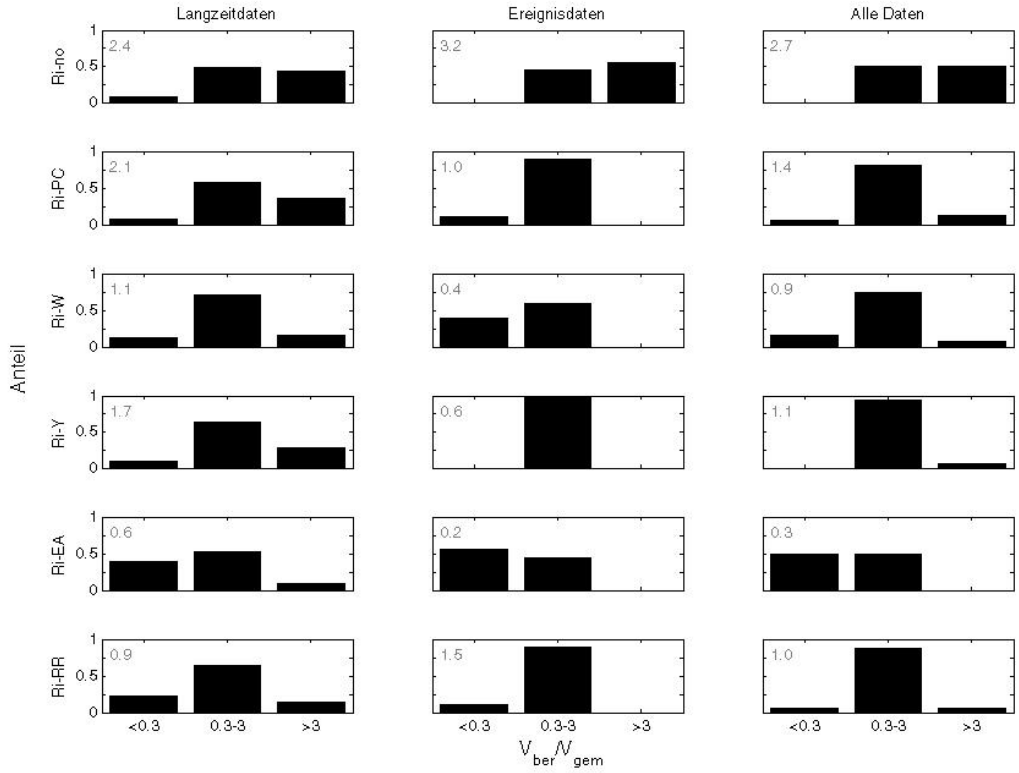


Abb. 2: Verhältnis berechneter zu gemessener Geschiebevolumen (V_{ber}/V_{gem}) berechnet mit verschiedenen Gleichungskombinationen (Zeilen; definiert in Tabelle 2) und unterschieden nach Datengruppen (Spalten; definiert in Tabelle 3). Die V_{ber}/V_{gem}–Verhältnisse sind in drei Klassen angegeben, von denen die mittlere Klasse alle Berechnungen innerhalb eines Faktors zehn um die gemessen Geschiebefrachten repräsentiert. Die grauen Zahlen geben den Median der V_{ber}/V_{gem}–Verhältnisse an. Die Gruppe "Langzeitdaten" besteht aus 207 Transportereignissen, die Gruppe "Ereignisdaten" besteht aus 9 Transportereignissen. Die Gruppe "Alle Daten" besteht aus den Geschiebesummen der einzelnen Gerinne, um jeden Bach unabhängig von der Ereignisanzahl gleich zu gewichten. Der Ansatz von Whittaker et al. (Ri-W) wurde bei vier Gerinnen nicht angewendet.

Für die „Ereignisdaten" war die Kombination Ri-Y der einzige Ansatz, bei dem die Abweichung aller berechneten Transportvolumen innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Werte ($0.3 < V_{ber}/V_{gem} < 3$) lag. Die Kombination Ri-PC ergab zwar den besten Medianwert für die „Ereignisdaten", doch bei diesem Ansatz gibt es einen Vorbehalt bezüglich der allgemeineren Anwendbarkeit. Die Kombination Ri-EA ergab die niedrigsten V_{ber}/V_{gem}–Werte, mehr als 70 % der Ereignisse wurden unterschätzt. Den besten Medianwert für den gesamten Datensatz („Alle Daten") wurde mit dem empirischen Ansatz Ri-RR erzielt ($V_{ber}/V_{gem} = 1.0$) und 88 % der Ereignisse wurden innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Werte vorhergesagt. Die Medianwerte der Blockansätze Ri-Y und R-W fielen allerdings nur marginal schlechter aus. Ri-Y sagte sogar 93 % aller Ereignisse innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Frachten voraus.

Tabelle 3 Statistische Kennwerte für das Verhältnis berechneter zu gemessener Geschiebevolumen (V_{ber}/V_{gem}) [a]

	Langzeitdaten					*Ereignisdaten*					*Alle Daten*				
	P_{10}	P_{90}	med	SD	CV	P_{10}	P_{90}	med	SD	CV	P_{10}	P_{90}	med	SD	CV
Ri-no	0.41	14.5	2.4	35.0	4.4	0.53	4.8	3.2	1.7	0.6	0.61	7.0	2.7	2.4	0.8
Ri-PC	0.37	10.2	2.1	28.2	4.5	0.35	2.3	1.0	0.7	0.6	0.48	6.2	1.4	2.0	1.0
Ri-W	0.24	5.2	1.1	10.8	3.9	0.12	0.9	0.4	0.4	0.8	0.12	2.9	0.9	1.0	0.9
Ri-Y	0.32	6.1	1.7	11.5	3.2	0.32	1.5	0.6	0.4	0.6	0.35	2.9	1.1	0.9	0.7
Ri-EA	0.04	2.9	0.6	8.4	4.5	0.09	1.5	0.2	0.6	1.0	0.07	1.5	0.3	0.6	1.0
Ri-RR	0.16	3.9	0.9	14.1	4.9	0.33	2.9	1.5	1.0	0.7	0.34	2.9	1.0	1.1	0.8

[a] P_{10} und P_{90} definieren das 10. und 90. Perzentil der Daten, med bezeichnet den Median, *SD* ist die Standardabweichung und *CV* ist der Variationskoeffizient.

Die unterschiedlichen Resultate in Abbildung 1 sind hauptsächlich auf die Grösse und Dichte der Makrorauigkeitselemente und die Fliessbedingungen zurückzuführen. Die Ansätze, welche die Auswirkungen einzelner grosser Blöcke berücksichtigen, brachten im Allgemeinen bessere Resultate für Gerinne mit einer hohen Konzentration grosser Blöcke oder in Stufen-Becken Systemen. Mit der Kombination der Transportgleichung von Rickenmann (2001) und den Fliesswiderstandsgleichungen von Yager (2006), von Whittaker et al. (1988) und von Pagliara und Chiavaccini (2006) lagen mindestens 75 % der berechneten Ereignisse für Gerinne mit hoher Blockdichte innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Frachten. Allerdings gibt es beim Ansatz von Pagliara und Chiavaccini (2006) einen Vorbehalt bezüglich der allgemeineren Anwendbarkeit (Nitsche et al., 2011). Der Ansatz von Egashira und Ashida (1991), der Fliesswiderstände anhand charakteristischer Grössen der Stufen-Becken Struktur abschätzt, ergab keine Verbesserung der Transportvorhersagen im Vergleich mit der Referenzgleichung.

Wenn keine detaillierten Informationen zur Rauigkeit des untersuchten Gerinnes vorliegen, empfiehlt sich der Ansatz von Rickenmann und Recking (2011) als einfache Möglichkeit, erhöhte Rauigkeitswerte in steilen Gerinnen zu berücksichtigen. Für Gerinne mit hoher Blockdichte lagen mit dem Ansatz ebenfalls mindestens 75 % der berechneten Ereignisse innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Frachten. Der Ansatz ergab im Mittel die besten Vorhersagen für alle Gerinne, die ein breites Spektrum verschiedener Charakteristiken abdecken.

Die Ansätze, welche die Makrorauigkeit berücksichtigen, lieferten Ergebnisse, die bis zu einer Grössenordnung näher an den beobachteten Werten lagen, als Berechnungen ohne Berücksichtigung der Makrorauigkeit. Für Gerinne mit hohen Blockdichten wurden mit dem Ansatz von Yager (2006) relativ gute Ergebnisse erzielt. Dies weist darauf hin, dass diese physikalisch-basierte Methode einen Fortschritt in der theoretischen Beschreibung von Bedingungen mit zusätzlichen Fliesswiderständen darstellt. Trotzdem führten der Ansatz von Yager (2006) und die pauschale Methode von Rickenmann und Recking (2011) zu ähnlich guten Ergebnissen. Dieses Resultat impliziert, dass entweder die physikalisch-basierten Ansätze noch weiter verbessert werden können, um den Einfluss der Makrorauigkeit auf die Gesamtrauigkeit zu beschreiben, oder dass es noch nicht möglich ist, Makrorauigkeit mit genügender Genauigkeit zu identifizieren und quantitativ zu erfassen.

Die hier verwendete Methode, bei der das Energieliniengefälle für die Berechnung mit einer Geschiebetransportformel reduziert wird, könnte je nach verwendeter Geschiebeformel unterschiedliche Auswirkungen auf die berechneten Frachten haben. Die Berücksichtigung der Geschiebetransportformel von Parker (1990) in Kombination mit der Aufteilung des Fliesswiderstandes nach Yager (2006) ist zum Beispiel in Nitsche et al. (2011) diskutiert.

Danksagung

Wir bedanken uns beim BAFU für die finanzielle Unterstützung, welche es uns erlaubte, dieses Projekt durchzuführen. Christoph Hegg danken wir für die Initiierung des Projektes.

Literatur

Badoux, A., Rickenmann, D. (2008): Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis. Wasser Energie Luft, 100(3), 217-226.

Bezzola, G.R., C. Hegg (Eds.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 - Prozesse, Schäden und erste Einordnung, 215 pp., Umwelt-Wissen Nr. 0707. Bundesamt für Umwelt BAFU und Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern.

Egashira, S., Ashida, K (1991): Flow resistance and sediment transportation in streams with step-pool bed morphology, in Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, pp. 45-58, Springer, Heidelberg.

Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2011): Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. Water Resources Research, 47, W08513.

Pagliara, S., Chiavaccini, P. (2006): Flow Resistance of Rock Chutes with Protruding Boulders. Journal of Hydraulic Engineering, 132(6), 545–552.

Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P., Champagne, J.Y. (2008): Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. Water Resources Research, 44, W05412.

Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep flow. Journal of Hydraulic Engineering, 117(11), 1419-1439.

Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. Water Resources Research, 37(12), 3295-3305.

Rickenmann, D., Recking A. (2011): Evaluation of flow resistance in gravel-bed streams through a large field data set. Water Resources Research, 47, W07538.

Yager, E.M. (2006): Prediction of sediment transport in steep, rough streams, PhD thesis, 232 pp, University of California, Berkeley, Berkeley.

ISBN 978-3-033-03838-7
ISSN 1421-1130