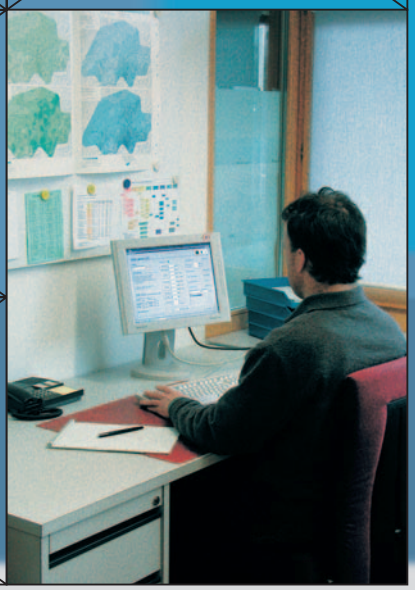






Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten

Praxishilfe

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr. 4 – Bern 2003

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

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

Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten

Praxishilfe

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr. 4 – Bern 2003

M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, A. Ryser

mit Beiträgen von
M. Barben, Ch. Hegg, B. Hingray, J.-P. Jordan, C. Kan, A. Musy, F. Naef, M. Niggli, S. Scherrer, M. Schilling,
M. Spreafico, St. Vogt, R. Weingartner

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

Hunziker, Zarn & Partner
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau

Scherrer AG
Hydrologie und Hochwasserschutz

Eidg. Forschungsanstalt WSL
Institut fédéral de recherches WSL
Istituto federale di ricerca WSL
Swiss Federal Research Institute WSL

GIUB

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Projektleitung

Prof. Dr. M. Spreafico, Bundesamt für Wasser und Geologie
PD Dr. R. Weingartner, Geographisches Institut der Uni Bern

Redaktion

A. Ryser, Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner AG

Beiträge

Dr. M. Barben
Geographisches Institut der Uni Bern, Gruppe für Hydrologie, Hallerstr. 12, 3012 Bern
Kap. 2, Kap. 5.1

Dr. Chr. Hegg
Eidg. Forschungsanstalt WSL, Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewegungen, 8903 Birmensdorf
Kap. 5.2

Dr. B. Hingray
Institut des sciences et technologies de l'environnement, Laboratoire hydrologie et aménagements, EPFL, Ecublens, 1015 Lausanne
Kap. 4.1.2, Kap. 4.3, Kap. 5.3

Dr. J.-P. Jordan
Bundesamt für Wasser und Geologie, 2501 Biel
Kap. 2.4

Dipl. Geographin C. Kan
Bundesamt für Wasser und Geologie, 3003 Bern-Ittigen
Kap. 4.2

Prof. Dr. A. Musy
Institut des sciences et technologies de l'environnement, Laboratoire hydrologie et aménagements, EPFL, Ecublens, 1015 Lausanne
Kap. 4.1.2, Kap. 4.3, Kap. 5.3

Dr. F. Naef
Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich, 8092 Zürich
Kap. 3, Kap. 4.1.1

Dipl. Ing. EPFL M. Niggli
Institut des sciences et technologies de l'environnement, Laboratoire hydrologie et aménagements, EPFL, Ecublens, 1015 Lausanne
Kap. 4.1.2, Kap. 4.3, Kap. 5.3

Dr. S. Scherrer
Scherrer AG, Stockackerstrasse 25, 4153 Reinach
Kap. 3, Kap. 4.1.1

Dipl. Kult-Ing. ETH M. Schilling
Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner, Schachenallee 29, 5000 Aarau
Kap. 5.1.6

Prof. Dr. M. Spreafico
Bundesamt für Wasser und Geologie, 3003 Bern-Ittigen
Kap. 1, Kap. 4.2

Dipl. Natw. ETH St. Vogt
Eidg. Forschungsanstalt WSL, Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewegungen, 8903 Birmensdorf
Kap. 5.2

PD Dr. R. Weingartner
Geographisches Institut der Uni Bern, Gruppe für Hydrologie, Hallerstr. 12, 3012 Bern
Kap. 1, Kap. 2, Kap. 5.1

Mitglieder der Expertengruppe

Dr. M. Barben, GIUB
Prof. Dr. P. Burlando, ETH-Zürich
P. Dändliker, Amt für Umwelt, Kt. Solothurn
Dr. Ch. Hegg, WSL
Dr. H.P. Hodel, BWG
P. Hohl, Service des Eaux, Sols et Assainissement, Kt. Vaud
Dr. J.-P. Jordan, BWG
Prof. Dr. A. Musy, EPF-Lausanne
M. Schilling, Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner AG
Prof. Dr. M. Spreafico, BWG
St. Vogt, WSL
PD Dr. R. Weingartner, GIUB

Übersetzungen

B. Schäfli, F. Spicher, H.P. Willi

Impressum

Herausgeber:	Bundesamt für Wasser und Geologie
Erscheinungsvermerk:	BBL, Bern 2003
ISSN:	1660-0746
Auflage:	700
Zitiervorschlag:	Bundesamt für Wasser und Geologie: Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Berichte des BWG, Serie Wasser (Bern 2003, 118S.)
Bildnachweis:	grosses Bild: Heinz Hongler (BWG) kleines Bild links: Hanspeter Hodel (BWG) kleines Bild rechts: Heinz Strässler (BWG) Sämtliche Kartenausschnitte reproduziert mit der Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (BM 012073)
Internethinweis:	Die Publikation ist im PDF-Format auf der BWG-Internetsite www.bwg.admin.ch verfügbar
Bezugsadresse:	BBL, Vertrieb Publikationen, CH-3003 Bern
Internet:	www.bbl.admin.ch/bundespublikationen
Bestellnummer:	804.504d Diese Publikation erscheint Mitte 2003 auch in französischer Sprache.
Software:	Zu dieser Publikation kann eine Software auf CD-ROM bestellt werden. Vertrieb Geografisches Institut der Uni Bern Gruppe für Hydrologie Hallerstr. 12, 3012 Bern
Copyright:	© BWG, Bern, März 2003

Vorwort

Die Kenntnis von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit ist eine wichtige Grundlage für den Schutz und die Nutzung unserer Wasserressourcen sowie den Schutz des Menschen vor schädigenden Wirkungen des Wassers.
Während in grösseren Einzugsgebieten meist Abflussmessungen vorhanden sind, fehlen solche in kleinen (<10 km^2) und mittelgrossen (10–500 km^2) Einzugsgebieten häufig. Entsprechend den vorhandenen hydrologischen Informationen und der Vielfalt der Problemstellungen gibt es eine grosse Anzahl von Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. In der Praxis stellt sich deshalb die Frage nach dem zur Lösung eines Problems geeigneten Verfahren.
Die vorliegende Publikation soll einen Überblick über die in der Schweiz verwendeten Methoden geben und bei der Anwendung helfen, das geeignete Verfahren auszuwählen. Als zusätzliche Hilfe wurden von der Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Uni Bern (M. Barben) und an der Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewegungen der Eidg. Forschungsanstalt WSL (S. Vogt) für die Verfahren der Kapitel 5.1 und 5.2 zwei Programmpakete entwickelt, welche die Bestimmung der Hochwasserabflüsse unterstützen.
Der Schwerpunkt bei den Arbeiten wurde auf die Hochwasserabschätzung in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen gelegt (Kapitel 5). Dabei ist die Priorität auf die Bestimmung der Abflussspitzen, und nicht auf die Abflussvolumina, gelegt worden.
Der Vollständigkeit halber werden aber auch Methoden der Hochwasserabschätzung in Gebieten mit Abflussmessungen beschrieben (Kapitel 4).
Bei der Hochwasserabschätzung ist die Beurteilung der relevanten Abflussbildungsprozesse eine wichtige Voraussetzung, weshalb die Publikation ein spezielles Kapitel zu den Grundlagen der Abflussbildungsprozesse enthält (Kapitel 3).

Die vorliegende Publikation erhebt nicht den Anspruch, optimale Verfahren zur Lösung aller Probleme bei der Hochwasserabschätzung anzubieten. Sie will vielmehr in der Praxis eine nützliche Arbeitshilfe bei der Entscheidungsfindung sein. Ein ausreichendes Mass an hydrologischen Kenntnissen ist aber Voraussetzung.
Die Hochwasserabschätzung muss sich in Zukunft weiterentwickeln. So sind heute beispielsweise bei der Abschätzung von Hochwasserganglinien und -frachten, bei der Bestimmung sehr seltener Hochwasser und bei der Beurteilung der Abflussprozesse in kleinen und mittelgrossen Einzugsgebieten viele Probleme noch nicht zufriedenstellend gelöst. Dazu braucht es in Zukunft weitere Messungen, Untersuchungen und Auswertungen.
Federführend bei der Konzeption und Durchführung waren die Herren Prof. Dr. M. Spreafico und PD Dr. R. Weingartner. Ihnen und allen anderen, die zum Gelingen der Publikation beigetragen haben, sei unser bester Dank ausgesprochen.

Bundesamt für Wasser und Geologie

Der Direktor



Dr. Chr. Furrer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ... 3
Inhaltsverzeichnis ... 5
1 Einleitung ... **7**
Wo liegen die Probleme? ... 7
Was will die «Praxishilfe»? ... 7
Hochwasserabschätzung und Hochwasserbemessung ... 7
Aufbau der «Praxishilfe» ... 8
Und die Zukunft? ... 8
2 Methodenübersicht ... **10**
2.1 Extremwertstatistik ... 11
2.2 Niederschlag-Abfluss-Modelle ... 12
2.3 Regionale Übertragung ... 12
2.4 Bedeutung und Behandlung extremer Hochwasser (EHQ) ... 14
2.4.1 Zum Begriff des Restrisikos ... 14
2.4.2 Definition des Extremhochwassers für den Hochwasserschutz ... 14
2.4.3 Bestimmung des Extremhochwassers ... 14
2.4.4 Anwendung des Extremhochwassers ... 15
2.4.5 Beispiel zur Bestimmung des Extremhochwassers ... 15
3 Grundlagen zu den Abflussbildungsprozessen ... **16**
3.1 Einleitung ... 16
3.2 Welche Abflussprozesse kennt man? ... 16
3.3 Wie unterschiedlich wirken verschiedene Abflussprozesse? ... 17
3.4 Schlüsselstellen entscheiden, welcher Abflussprozess sich einstellt ... 17
3.5 Abflussprozesse an Hängen ... 20
3.6 Wie wirken sich Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet aus? ... 20
3.7 Wie lässt sich die Hochwasserreaktion von Einzugsgebieten erklären? ... 24
3.8 Schlussfolgerungen ... 24
4 Hochwasserabschätzung basierend auf Abflussmessungen ... **25**
4.1 Niederschlag-Abfluss-Modelle ... 25
4.1.1 Hochwasserabschätzung mit Niederschlag-Abfluss-Modellen (NAM) ... 25
a) Möglichkeiten und Grenzen von Niederschlag-Abfluss-Modellen (NAM) ... 25
b) Einsatzmöglichkeiten von NAM mit Einbezug der Abflussprozesse ... 27
c) Einsatz eines NAM bei einer Hochwasserabschätzung im Baselbieter Jura ... 27
d) Schlussfolgerung ... 32
4.1.2 Hochwasserabschätzung mit einem stochastischen Ansatz in Kombination mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell ... 33
a) Stochastische Erzeugung von Niederschlags- und Abflussserien durch kontinuierliche Simulation ... 33
b) Stochastische Erzeugung von Niederschlags- und Abflussserien durch Multi-Ereignis-Simulation ... 34
c) Anwendung am Beispiel des oberen Einzugsgebietes der Rhone ... 35
d) Schlussfolgerung ... 39
4.2 Extremwertstatistik ... 39
4.2.1 Einleitung ... 39
4.2.2 Bereitstellen der Stichprobe ... 40
4.2.3 Berechnen von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit ... 42
4.2.4 Beispiel ... 42
4.2.5 Hinweise auf ausländische Empfehlungen und Computerprogramme ... 47
4.3 Ausserordentliche und extreme Hochwasser ... 47
4.3.1 Methoden zur Abschätzung ausserordentlicher Hochwasser ... 47
4.3.2 Die Methode CONSECRU (ausserordentliche Hochwasser) ... 49
4.3.3 Das Modell CRUEX (extreme Hochwasser) ... 51
5 Hochwasserabschätzung ohne Einbezug von Abflussmessungen ... **54**
5.1 Mittelgrosse Einzugsgebiete (10–500 km²) ... 54
5.1.1 Vorgehen ... 54
5.1.2 Methoden ... 55
a) Kürsteiner ... 56
b) Müller-Zeller ... 58
c) Kölla meso ... 60
d) GIUB'96 ... 62
e) Momente ... 67
f) BaD7 ... 68
5.1.3 Software HQx_meso_CH ... 70
5.1.4 Berechnungsablauf und Interpretation der Ergebnisse ... 72
5.1.5 Allgemeine Anwendungsbeispiele ... 75
5.1.6 Anwendungsbeispiele aus der Praxis ... 77
5.2 Kleine Einzugsgebiete (<10 km²) ... 80
5.2.1 Vorgehen ... 81
a) Bereitstellen der Grundlagen ... 81
b) Aufstellen der Hypothese für die Gebietsbeurteilung ... 83
c) Feldbegehung ... 85
d) Anwendung der Methoden ... 86
e) Interpretation und Validierung der Resultate ... 86
5.2.2 Methoden ... 86
a) Bestimmen der massgebenden Niederschlagsintensitäten ... 86
b) Müller modifiziert ... 87
c) Taubmann/Thiess/Chow ... 88
d) Modifiziertes Fliesszeitverfahren ... 89
e) Kölla ... 90
f) Clark-WSL ... 90
5.2.3 Wertung ... 91
5.2.4 Anwendungsbeispiel: Vogelbach (1,55 km²) ... 93

a) Bereitstellen der Grundlagen 93
b) Aufstellen der Hypothese für die Gebietsbeurteilung..... 94
c) Feldbegehung..... 96
d) Anwendung der Methoden 97
e) Interpretation und Validierung der Resultate 99
5.3 Massstabsübergreifende Methoden (1–500 km²) 99
5.3.1 Übersicht..... 99
5.3.2 Modell HYDRAT 100
a) Beschreibung 100
b) Gültigkeitsbereich 101
5.3.3 Modell HYDRIF.....103
a) Beschreibung 103
b) Gültigkeitsbereich 104
5.3.4 Die Methode HYDREG: Eine kombinierte und massstabsübergreifende Methode.....105
a) Überblick 105
b) Anwendung in der Westschweiz 106
c) Wiederkehrperiode 107
d) Einzugsgebietsgrösse 107
e) Geografische Lage 107
f) Basisdaten.....107
g) Anwendungsbeispiele 107
h) Evaluation der Resultate.....110

1 Einleitung

Wo liegen die Probleme?

Die *Hochwasserhydrologie* blickt in der Schweiz auf eine reiche Vergangenheit mit Wurzeln im 19. Jahrhundert zurück. Das Spektrum reicht von der Verbesserung der Messtechnik über umfassende extremwertstatistische Analysen zu regionalhydrologischen Ansätzen, von der Untersuchung historischer Hochwasser über Prozessuntersuchungen im Gelände bis zur Modellierung hydrologischer Systeme. Im Zuge dieser Entwicklung wurden verschiedene Verfahren und Modelle erarbeitet, die es erlauben, wichtige Hochwasserparameter – und hier vor allem die Spitzenabflussmenge – abzuschätzen. Welche Verfahren können nun in der Praxis zur Hochwasserabschätzung eingesetzt werden? Bei der Beantwortung dieser Kernfrage sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen:

– Welche Ziele wollen wir erreichen? Welche Hochwasserparameter sind mit welcher Genauigkeit abzuschätzen?
– Wie gross ist das Einzugsgebiet und welche Kenntnisse und Informationen sind dazu vorhanden? Sind Abfluss- oder Niederschlagsmessstationen vorhanden? Wie lang sind deren Messreihen?

Welche zeitlichen und finanziellen Mittel stehen zur Durchführung des Gutachtens zur Verfügung? Auf welche Hilfsmittel kann zugegriffen werden? Welches ist der hydrologische Hintergrund der Expertin oder des Experten?
Die vorliegende «Praxishilfe» setzt bei diesen Fragen an. Ihr Ziel ist es, Erfahrungen weiterzugeben, die bei der Abschätzung von Hochwasserabflüssen in der Schweiz gewonnen wurden. Im Mittelpunkt stehen vor allem Verfahren, die sich im Laufe der Jahre in der schweizerischen Hochwasserpraxis etabliert haben. Dabei handelt es sich sowohl um einfachere wie komplexere, um ältere wie neuere, um aufwändigere wie weniger zeitintensive Ansätze. Die «Arbeitshilfe» stellt – ganz im Sinn des eben erwähnten Erfahrungsaustausches – die Möglichkeiten und Grenzen sowie die Unsicherheiten solcher Ansätze dar.

Was will die «Praxishilfe»?

Die Praxis hat nach wie vor die Aufgabe, unseren Lebensraum optimal vor Hochwasser zu schützen. Dies zeigen nicht zuletzt die unzähligen Hochwasserereignisse, von denen die Schweiz in den letzten Jahren massiv betroffen war und welche teilweise grosse Schäden verursacht haben. Die Anforderungen an die Hochwasserpraxis sind mit dem neuen Bundesgesetz über den Wasserbau vom 21. Juni 1991 weiter gestiegen. Im Gegensatz zu früher, wo der 100jährliche Abfluss im Mittelpunkt stand, erfordert die heutige Differenzierung der Schutzziele auch die Bestimmung von Spitzenabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperioden.
Die vorliegende Arbeitshilfe soll die Praxis bei der Hochwasserabschätzung begleiten, indem sie

– die in der Schweiz häufig zur Anwendung gelangenden Verfahren und Modelle darstellt und übersichtsmässig beschreibt: Zielgrösse (z.B. HQ_{50}, EHQ), Einsatzbereich, benötigte Input-Parameter, Aufbau des Ansatzes, Hinweis auf Fehlermöglichkeiten, Probleme bei der Anwendung u. a.,
– aufzeigt, welche Verfahren, Modelle bzw. Verfahrensgruppen in Abhängigkeit von der Datenlage und der Fragestellung eingesetzt werden können und
– konkrete Anwendungen anhand von Fallbeispielen diskutiert.

Im Anhang finden die Anwenderinnen und Anwender benutzerfreundliche Computerprogramme, welche es erlauben, die Mehrheit der im vorliegenden Bericht dargestellten Verfahren effizient anzuwenden.
Der vorliegende Bericht ist kein «Kochbuch», welches standardisierte Abläufe bei der Hochwasserabschätzung vorschreibt. Dafür ist die Materie zu komplex; Hochwasser sollten immer unter Einbezug von Expertenwissen abgeschätzt werden. Dazu gehört auch die Rekognoszierung vor Ort, die Beurteilung von Schlüsselfaktoren des Abflussprozesses und der Einbezug historischer Hochwasser.
Ziel ist es, den Experten und die Expertin bei der Hochwasserabschätzung zu unterstützen, indem die «Praxishilfe» gebräuchliche Verfahren darstellt, Hilfsmittel zu deren Anwendung zur Verfügung stellt und Hinweise gibt, wie die Ergebnisse interpretiert werden könnten. Die «Praxishilfe» ersetzt den Hochwasserexperten nicht! Sie trägt im Gegenteil zu einem sachgerechten, zielorientierten und möglichst optimalen Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung bei.

Hochwasserabschätzung und Hochwasserbemessung

Bei Hochwasserschutzprojekten müssen Hydrologie und Wasserbau eng zusammenarbeiten (vgl. Fig. 1-1). Die Hydrologie untersucht das Einzugsgebiet als ein System, das Hochwasser produziert. Sie versucht, Antworten auf folgende Fragen zu geben:

– Wie kommen Hochwasser zustande? Stichworte: Abflussbildung und Prozessverständnis

– Wann und wie häufig treten Hochwasser auf? Stichworte: zeitliche Variabilität, Trends, Häufigkeitsverteilungen
– Wie gross ist ihr Ausmass? Stichworte: Abflussspitzen, Wiederkehrperioden
– Welche Methoden eignen sich, um dieses Ausmass festzulegen?

Die Beantwortung dieser Fragen ermöglicht es, Hochwasser, und hier vor allem selten auftretende Hochwasser, möglichst genau abzuschätzen. Darunter verstehen wir zum Beispiel nicht nur die Quantifizierung einer Spitzenabflussmenge in m^3/s, sondern auch die Ausweisung des zugehörigen Vertrauensintervalls. Diese Angaben bilden die Grundlage für die wasserbauliche Massnahmenplanung und für Risikoüberlegungen (z.B. Restrisiko).
Der vorliegende Bericht liefert einen Beitrag zur Hochwasserabschätzung; er klammert aber bewusst alle Aspekte aus, welche von der Hochwasserabschätzung zur Hochwasserbemessung bzw. Hochwasserdimensionierung führen. Diese Aspekte werden u.a. in der Publikation «Hochwasserschutz an Fliessgewässern – Wegleitungen des BWG» (BWG 2001) diskutiert.

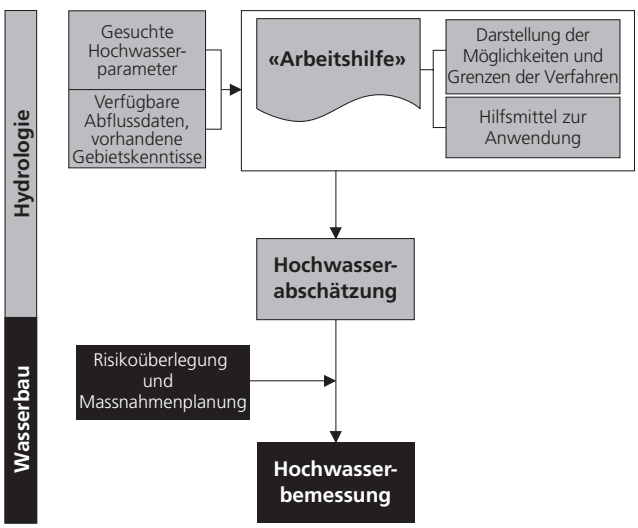


Fig. 1-1: Stellung der Hydrologie und des Wasserbaus bei der Hochwasserbemessung.

Aufbau der «Arbeitshilfe für die Praxis»

Bei der Auswahl der Verfahren bzw. Verfahrensgruppen, welche sich für eine Hochwasserabschätzung grundsätzlich eignen, müssen der Experte und die Expertin verschiedenste Aspekte mitberücksichtigen. Zwei Kriterien sind aber besonders wichtig:

1. Fragestellung: Welches ist das Ziel der Abschätzung? Handelt es sich um eine Vorabklärung oder um ein konkretes Projekt? Welche Schutzmassnahmen sind in Abhängigkeit des Schadenpotentials und des Risikos notwendig? Damit eng verbunden ist die entscheidende Frage: Welche Hochwasserparameter werden mit welcher Genauigkeit benötigt? Daraus lässt sich unter anderem der zu erwartende zeitliche und finanzielle Aufwand ableiten.

2. Datenlage: Welche Daten und Informationen stehen zur Verfügung? Die Datenlage schränkt in der Regel die methodischen Möglichkeiten stark ein und gibt oft die entscheidenden Rahmenbedingungen für die Hochwasserabschätzung (vgl. Fig. 2-1). Deshalb orientiert sich die Gliederung des vorliegenden Berichtes primär an der Datenlage.

Das Hochwassergeschehen kann unter verschiedenen Aspekten beschrieben werden: Anstiegszeit, Spitzenabfluss, Dauer des Ereignisses, Abflussvolumen u.a. In der Praxis steht der Spitzenabfluss als wichtigste Grösse aber eindeutig im Vordergrund. Die «Arbeitshilfe» ist auf diese Grösse ausgerichtet. Für den Spitzenabfluss ist die grösste Zahl von Verfahren verfügbar. Weitere wichtige Aspekte – insbesondere die Ganglinie des Hochwassers – werden nur bei einzelnen Verfahren, insbesondere bei den deterministischen Modellen, mitberücksichtigt.

Und die Zukunft?

Die «Praxishilfe» stellt also Grundlagen bereit, die einen effizienten Einsatz bestehender Verfahren ermöglichen, ohne dabei standardisierte Vorschriften zu machen. Es ist geplant, die Erkenntnisse in *Ausbildungskursen* zu vertiefen und damit den Erfahrungsaustausch zwischen den Anwenderinnen und Anwendern zu unterstützen.
Einige der besprochenen Verfahren sind zwar schon ältern Datums; sie besitzen aber den Vorteil, dass ihre Tauglichkeit aufgrund der jahrelangen Anwendung sehr gut bekannt ist. Die Erfahrungen in der Praxis haben zudem gezeigt, dass sie in der Lage sind, in bestimmten Situationen durchaus gute Resultate zu liefern. Durch die Kombination der verschiedenen Verfahren ergeben sich zudem interessante Perspektiven, die in der vorliegenden Arbeitshilfe erstmals systematisch genutzt werden.
Die meisten der diskutierten Ansätze sind auf die *Hochwasserspitze* ausgerichtet. Damit ist eine entscheidende Lücke angesprochen. *Hochwasserfrachten und -ganglinien* werden in Zukunft weiter an Bedeu-

tung gewinnen. Sie sind beispielsweise notwendig, um in Fragen des Geschiebetransports, der für die Beurteilung der Hochwassersicherheit wichtig ist, einen entscheidenden Schritt weiterzukommen. Aber auch bei der Planung von Massnahmen zum Hochwasserrückhalt sind Kenntnisse zur Hochwasserfracht sehr wichtig.

Im weiteren sind grosse Lücken bei der Hochwasserabschätzung in *kleinen Einzugsgebieten* (<10 km^2) vorhanden. Dies hängt einerseits mit der mangelhaften Datenlage zusammen: Nur für wenige kleine Einzugsgebiete liegen in der Schweiz genügend lange Messreihen vor, um beispielsweise Abschätzverfahren zu eichen. Andererseits ist die Abschätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten besonders schwierig, weil hier die positiven Effekte der räumlichen Ausmittelungen weniger zum Tragen kommen. Eine gute Beurteilung der ablaufenden Prozesse ist damit noch wichtiger als in grösseren Einzugsgebieten.

Die Hochwasserabschätzung wird sich also weiterentwickeln müssen. Mögliche Stossrichtungen werden im vorliegenden Bericht beispielsweise in Kapitel 4 und 5 aufgezeigt. So wird versucht, mit der Kombination verschiedener Ansätze das Gesamtresultat der Hochwasserabschätzung zu verbessern. Dazu gehören die Beurteilung der Abflussbereitschaft der hydrologisch relevanten Teilflächen eines Einzugsgebietes als Grundlage zur Bestimmung der Modellparameter, die Erkundung historischer Hochwasser zur Ergänzung allfällig vorhandener statistischer Auswertungen sowie der Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen.

2 Methodenübersicht

Die Gliederung der hier vorgestellten Methoden orientiert sich primär an der Verfügbarkeit der vorhandenen *Abflussdaten* und an den *Gebietskenntnissen* (vgl. Fig. 2-1). Gliederungen nach anderen Kriterien sind durchaus vorstellbar und werden auch vorgenommen (vgl. Kapitel 1).

Die *Extremwertstatistik* kommt in jenen günstigen Fällen zum Tragen, in denen längere Abflussmessreihen vorliegen. Im Gegensatz zur klassischen Anwendung der Extremwertstatistik, die nur Abflussdaten berücksichtigt, werden beim *GRADEX-Verfahren* auch Informationen zum Niederschlag verwendet.

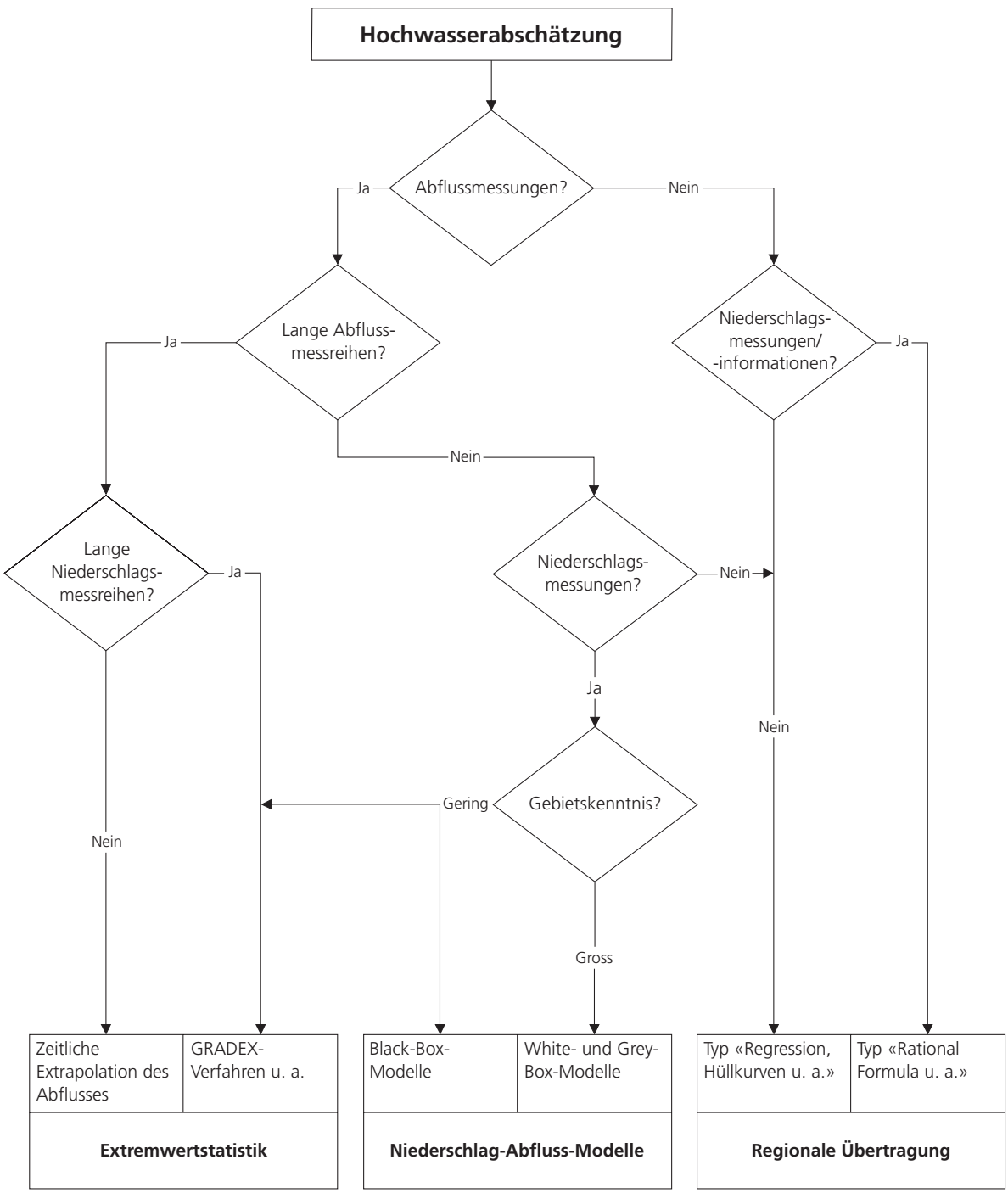


Fig. 2-1: Einordnung der Hochwasser-Abschätzverfahren.

Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) werden eingesetzt, wenn detailliertere Informationen benötigt werden, wenn beispielsweise die Quantifizierung einer Spitzenabflussmenge nicht genügt, sondern auch die Ganglinie eines Extremereignisses abzuschätzen ist. In der Regel benötigen N-A-Modelle (kürzere) Abflussmessreihen zur Modelleichung. Aufgrund des Detaillierungsgrades, mit dem die physikalischen Prozessabläufe in Funktion der Gebietskenntnisse abgebildet werden, unterscheidet man zwischen Black-Box-, Grey-Box- und White-Box-Modellen.
Regionale Übertragungsfunktionen werden vor allem dann eingesetzt, wenn keine Abflussmessungen vorhanden sind. Es sind aber auch Anwendungen bekannt, welche mithilfe dieser Verfahren extremwertstatistische Auswertungen kürzerer Messreihen plausibilisieren (BARBEN 2001). Die Vielfalt der regionalen Übertragungsfunktionen lässt sich aus der Sicht der Datenlage in die beiden Modelltypen «Regression, Hüllkurven u.a.» und «Rational Formula u.a.» gliedern (vgl. Fig. 2-1). Aus methodischer Sicht werden «Regionale Übertragungsfunktionen» und «Regional-taxonomische Verfahren» unterschieden (WEINGARTNER 1999).
Wie bereits in der Einleitung (Abschnitt «Und die Zukunft?») diskutiert wurde, sollte die Hochwasserabschätzung durch die Berücksichtigung der real ablaufenden *Abflussbildungsprozesse* auf eine breitere Basis gestellt werden. Dies hilft dem Anwender auch, besondere Verhältnisse, welche das Endergebnis einer Hochwasserabschätzung massgeblich beeinflussen könnten, zu erkennen. Wir denken hier an die Rolle des Schnees in alpinen Einzugsgebieten, an stark vergletscherte Einzugsgebiete, an Karstgebiete u. a. m. Deshalb wird in Kapitel 3 spezifisch auf den Abflussbildungsprozess eingetreten.

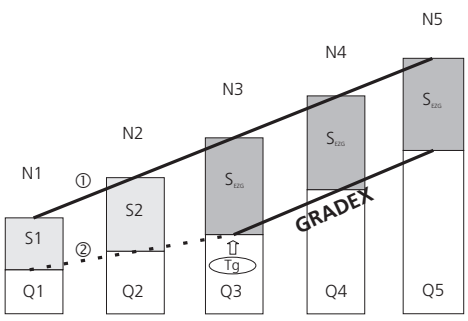
2.1 Extremwertstatistik

Liegen für ein Gewässer genügend *lange Abflussmessreihen* vor, kann die Bemessungsgrösse mithilfe der Extremwertstatistik abgeschätzt werden. Die Tafel 5.6 des «Hydrologischen Atlasses der Schweiz» (ASCHWANDEN & SPREAFICO 1995) und die Hochwasserbände des BWG (SPREAFICO & STADLER 1986, 1988; SPREAFICO & ASCHWANDEN 1991a, 1991b) vermitteln eine gute Übersicht über die Datenlage. In der praktischen Anwendung wird eine theoretische Verteilungsfunktion an die empirische Verteilung der Messwerte angepasst. Die Messwerte sind meist Jahreshöchstwerte oder alle Werte über einer bestimmten Schwelle (partielle Serie) (vgl. Kapitel 4.2). Durch den *Einbezug vertrauenswürdiger historischer Hochwasser* kann die Aussagekraft der Abschätzung weiter erhöht werden (GEES 1996), wie das Beispiel in Tabelle 2-1 belegt. Schwierigkeiten bei der Quantifizierung historischer Hochwasser ergeben sich oftmals bei der Umsetzung der rekonstruierten Wasserstände in Abflussmengen. So bestehen Unsicherheiten bei der Ermittlung des maximalen Wasserstandes, bei der Bestimmung von alten Flussquerschnitten und bei der Rekonstruktion der Gerinnerauigkeit. Im weiteren ist zu prüfen, ob mit dem Einbezug historischer Hochwasser die Homogenität der Datenreihe gewährleistet ist.

Grundlage	**Abschätzung HQ_{100} [m³/s]**
Abflussmessreihe 1921–1941	155
Abflussmessreihe 1921–1941 und quantifiziertes grösstes historisches Hochwasser (1846: 245 m³/s)	220
Abflussmessreihe 1921–1941 und Berücksichtigung der drei grössten quantifizierten historischen Hochwasser (1846, 1880, 1901)	210
Abflussmessreihe 1921–1941 und Einbezug von elf Ereignissen aus der Schadensdatenbank unter Verwendung eines Schwellenwertes; Anwendung des POT-Verfahrens (s. GEES 1996)	193

Tab. 2-1: Abschätzung des 100jährlichen Hochwassers der Sitter – Appenzell mit unterschiedlichen Datengrundlagen; der Referenzwert HQ_{100} beträgt 210 m³/s (aus WEINGARTNER 1998).

Das *GRADEX-Modell* beruht auf folgendem Prinzip (MARGOUM et al. 1994): Jedes Einzugsgebiet besitzt einen durchschnittlichen Sättigungspunkt; nach dem Erreichen dieses Sättigungspunktes sind die Steigungen der Verteilungsfunktionen des mittleren Abflusses und des Niederschlags gleich (vgl. Fig. 2-2). Zusätzliche lange Messreihen des Niederschlags erlauben es, die Informationen aus den kurzen Abflussmessreihen zu erhöhen.



N1,..., N5	Auslösender Niederschlag
S1, S2	Gespeicherter Niederschlag
S_{EZG}	Speicherkapazität des Einzugsgebietes
Q1,..., Q5	Mittlere Abflüsse
①	Verteilungsfunktion des Niederschlags
②	Verteilungsfunktion des mittleren Abflusses
Tg	Durchschnittlicher Sättigungspunkt des Einzugsgebietes (Die Knickstelle Tg liegt in diesem Beispiel im Bereich der Niederschlagsmenge N3)

Fig. 2-2: Das Prinzip des Modells GRADEX (aus ELSASSER 1996).

2.2 Niederschlag-Abfluss-Modelle

Die N-A-Modelle umfassen alle Ansätze, die einen Niederschlag rechnerisch in einen Abfluss transformieren. «Hydrologische Niederschlag-Abfluss-Modelle beschreiben die kausalen Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss mathematisch und dienen zur Ermittlung der Abflüsse aus einem Einzugsgebiet. Das Ziel der Modellanwendung ist vor allem, aus vorgegebenen Niederschlagsereignissen die resultierenden Hochwasserganglinien zu berechnen» (DVWK 1999). Übersichten und Klassifizierungen von N-A-Modellen findet man beispielsweise bei NEMEC (1993) oder MANIAK (1999).
In Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen ist der Einsatz von N-A-Modellen nicht oder nur in Ausnahmefällen möglich. N-A-Modelle benötigen für die Eichung stets zeitlich hochaufgelöste Messwerte der Input- und Output-Parameter. Da letztere oftmals fehlen, sind N-A-Modelle in den meisten Fällen keine Alternative zu den Verfahren der regionalen Übertragung. Gelingt es allerdings, ein N-A-Modell einzusetzen, bieten sich für die Hochwasserabschätzung interessante Möglichkeiten.
In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass der Übergang zwischen N-A-Modellen und den Verfahren der regionalen Übertragung fliessend ist. So kann beispielsweise die Rational Formula beiden Methodengruppen zugeordnet werden. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist aber, dass die N-A-Modelle auf Modellparametern aufgebaut sind, die aus den Standorteigenschaften eines Einzugsgebietes abgeleitet wurden und die Verfahren der regionalen Übertragung in der Regel mit regionalisierten Inputparametern operieren.
Die N-A-Modellierung zur Bestimmung von Bemessungsgrössen kennt zwei unterschiedliche Vorgehensweisen:

a) Die *ereignisbezogene Modellierung* berechnet einzelne Hochwasserereignisse, indem ein Bemessungsniederschlag auf ein Einzugsgebiet appliziert wird. Die Wahl der Randbedingungen (Bodenfeuchte, Niederschlags-Intensitätsverlauf) kann die Ergebnisse entscheidend beeinflussen.
b) Die *Langzeitsimulation* verwendet lange Reihen der Modellinputparameter (Niederschlag, Temperatur, Strahlung etc., je nach Komplexität des verwendeten Modells) und simuliert eine durchgehende, lange Abflussreihe, die anschliessend extremwertstatistisch ausgewertet wird.

Bei der ereignisbezogenen Modellierung ist es wegen der grossen Unsicherheiten bei der Festlegung der Randbedingungen nicht möglich, Angaben zur Wiederkehrperiode zu machen. Sie spielt jedoch beim Hochwasserschutz gerade bei der Differenzierung der Schutzziele eine zentrale Rolle (BWW 1995). «Feuchte» Einzugsgebiete transformieren einen hundertjährlichen Niederschlag ganz anders in einen Abfluss als «trockene» Einzugsgebiete mit grossem Sättigungsdefizit.
Die Langzeitsimulation wäre an und für sich ideal, bei der praktischen Durchführung treten aber einige Schwierigkeiten auf. So ist es heute noch mit sehr grossem Aufwand verbunden, für ein beliebiges Einzugsgebiet genügend lange repräsentative Reihen der Modellinputparameter zu erstellen (räumliche Interpolation aus benachbarten Meteo-Stationen oder Verwendung von Wettergeneratoren).
Um die Nachteile der beiden Ansätze zu minimieren, wurde eine kombinierte Methode entwickelt, welche in Kapitel 4.1.2 erläutert wird.

2.3 Regionale Übertragung

Zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen werden meist Verfahren der Regionalisierung eingesetzt. In der Literatur wird anstelle von «Regionalisierung» manchmal auch von «regionalhydrologischen Analysen» gesprochen (WEINGARTNER 1999).

Regionale Übertragungsfunktionen

Die Analyse, die Simulation sowie die Inter- und Extrapolation raumvarianter Strukturen sind Schwerpunkte regionalhydrologischer Analysen (WEINGARTNER 1999). Dabei spielen die sogenannten regionalen Übertragungsfunktionen (SCHWENTKER & STREIT 1983) eine wichtige Rolle. Das grundlegende Prinzip bei den regionalen Übertragungsfunktionen besteht darin, hydrologische Grössen oder die Parameter eines hydrologischen Modells in Funktion variabler und invariabler Gebietskenngrössen zu setzen. Prozesse, die im Einzugsgebiet ablaufen, werden dabei nicht im kausalanalytischen Sinn betrachtet. Zur Herleitung dieser Funktionen geht man von Einzugsgebieten mit Abflussmessungen aus, in denen sowohl Hochwasserkennwerte als auch *Gebietskenngrössen* zur Verfügung stehen. Die unabhängigen Gebietskenngrössen charakterisieren

– das Einzugsgebiet als Ganzes (z.B. geographische Lage, Fläche, Höhen- und Neigungsverhältnisse, Expositionen, Form),
– die Gerinne (z.B. Länge, Gefälle),
– die Verhältnisse im Untergrund (z.B. Durchlässigkeit, Speicherkapazität),

– die Vegetations- und Landnutzungsverhältnisse (z.B. Anteil bewaldeter Flächen),
– die klimatologischen Bedingungen (z.B. Strahlung, Temperatur, Niederschlag) sowie
– die anthropogenen Beeinflussungen (z.B. Versiegelungsgrad).

Die sogenannten *empirischen Verfahren* bilden eine wichtige Gruppe innerhalb der regionalen Übertragungsfunktionen. Sie haben ihre Wurzeln oftmals im ausgehenden 19. Jahrhundert und sind in der Praxis nach wie vor weit verbreitet. Dabei ist der Funktionstyp a priori vorgegeben (z.B. $Q_{max} = a \cdot Fn^b$) und es geht darum, die Parameter mithilfe von Einzugsgebieten mit Abflussmessungen zu eichen.
Mit den regionalen Übertragungsfunktionen wird also die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen mathematisch formuliert, so dass eine Hochwasserabschätzung in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen möglich ist.

Regional-taxonomische Verfahren

Als zweite wichtige Verfahrensgruppe sind die regional-taxonomischen Verfahren zu nennen, welche vom klassischen Verständnis der Regionalisierung im Sinne einer «Unterteilung der Landoberfläche in Regionen mit ähnlichem oder einheitlichem hydrologischen Regime» (BECKER 1992) ausgehen. SCHWENTKER & STREIT (1983) fassen diese klassische, strukturierende Vorgehensweise bei regionalhydrologischen Analysen unter dem Begriff «regional-taxonomisch begründete Verfahren» zusammen: «Zielsetzung der regionalen Taxonomie ist die *Typisierung von Raumeinheiten*. Durch die Typisierung werden in der Regel Raumeinheiten zu Gruppen nach Massgabe einer Ähnlichkeitsdefinition zusammengefasst.» Sind die gefundenen Raumeinheiten zudem räumlich zusammenhängend, so kann – im Gegensatz zu den räumlich nicht zusammenhängenden *Raumtypen* – von Regionen gesprochen werden; es liegt eine Regionalisierung im engeren Sinne vor. Mit den regional-taxonomischen Verfahren sollen also hydrologisch relevante Raumstrukturen erkannt und dadurch die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen erklärt bzw. modelliert werden. Dadurch erlauben sie es, die Komplexität der realen Welt zu reduzieren. Taxonomische Verfahren basieren auf Gebietskenngrössen und / oder auf hydrologischen Grössen.
Die Ausweisung hydrologisch ähnlich reagierender Gebiete stellt gerade im Hochwasserbereich eine sehr grosse Herausforderung dar und gelingt – wie die Erfahrungen zeigen – oftmals nicht. Dem ist auch beizufügen, dass es Einzugsgebiete, Regionen oder Raumtypen mit gleichen oder sehr ähnlichen hydrologischen Eigenschaften im umfassenden Sinn nicht gibt; Ähnlichkeiten lassen sich – wenn überhaupt – nur problembezogen, also bezüglich einer bestimmten hydrologischen Grösse, bestimmen.
Bei der Abschätzung hydrologischer Grössen in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen ist folgendes Vorgehen denkbar:
1. Bildung von Raumtypen oder Regionen nach einem geeigneten, zielgrössenorientierten Typisierungsansatz;
2. Zuordnung des Gebietes ohne Messdaten zu einem Raumtyp bzw. zu einer Region;
3. Übernahme der typspezifischen hydrologischen Kennwerte oder Modellparameter.

Die beiden Ansätze «*regional-taxonomische Verfahren*» und «*regionale Übertragungsfunktionen*» lassen sich unter dem Oberbegriff «*regionale Übertragung*» zusammenfassen (SCHWENTKER & STREIT 1983). Je nach Fragestellung kann es sinnvoll sein, die beiden Verfahrensgruppen zu kombinieren: Mit einer vorgeschalteten problembezogenen taxonomischen Untersuchung lassen sich hydrologisch ähnlich reagierende Einzugsgebiete oder Regionen identifizieren, die als Basis für die Entwicklung regionaler Übertragungsfunktionen dienen können. Die Erfahrung zeigt, dass sich bei regional differenzierten Modellen – im Vergleich mit den sogenannten Globalmodellen – die Werteintervalle der Modellparameter verkleinern und damit die Aussagekraft und Güte der regionalhydrologischen Modelle verbessern lassen (WEINGARTNER 1999).

Die Rolle der Gebietsgrösse

Je kleiner ein Einzugsgebiet ist, desto stärker können Einzelfaktoren die Hochwasserbildung beeinflussen. Ausmittelungseffekte, welche sich in mittelgrossen Einzugsgebieten positiv auf die Güte der Abschätzung auswirken können, kommen bei kleinen Einzugsgebieten weniger zum Zuge. Daraus ergeben sich wesentliche methodische Unterschiede bei der Hochwasserabschätzung in kleinen (<10 km^2) und mittelgrossen (10 bis 500 km^2) Einzugsgebieten. Deshalb werden diese beiden Anwendungsfälle in der vorliegenden Praxishilfe getrennt behandelt.

2.4 Bedeutung und Behandlung extremer Hochwasser (EHQ)

2.4.1 Zum Begriff des Restrisikos

Seit Beginn der 90er Jahre hat sich im Umfeld des Hochwasserschutzes eine neue Denkweise etabliert. Der Wechsel markiert den Wandel von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur. Dieser neue Ansatz basiert auf der Erkenntnis, dass ein absoluter Schutz nie erreicht werden kann und das Augenmerk deshalb auf eine bessere Bewältigung des verbleibenden Risikos gelegt werden muss.

Früher wurden die Schutzbauten so dimensioniert, dass sie ihre Funktion bis zu einem bestimmten Bemessungswert erfüllen mussten, im Allgemeinen bis zu einer Dimensionierungswassermenge, die einem hundertjährlichen Ereignis entspricht. Die Erfahrung mit den jüngsten Katastrophenereignissen hat gezeigt, dass die Schäden meist durch Ereignisse verursacht wurden, die das Bemessungshochwasser der Schutzbauten überstiegen. Diese aussergewöhnlichen Ereignisse müssen besser in die Vorsorgepolitik einbezogen werden, und es sind Massnahmen zu fördern, welche die nach der Realisierung von Schutzmassnahmen verbleibenden Risiken vermindern. Diese Risiken werden gemeinhin Restrisiken genannt.

Vereinfachend kann festgehalten werden, dass bei sehr grossen Sachwerten oder beim Vorhandensein von Sonderrisiken auch bei einem Extremereignis keine Schäden akzeptiert werden können und zusätzliche Massnahmen ergriffen werden müssen. Dies kann durch ein Anheben ihres Schutzniveaus (Schutzziel) oder durch eine Verringerung ihrer Verletzbarkeit erreicht werden. Um den Handlungsspielraum definieren zu können, müssen die Folgen bekannt sein, die ein Ereignis mit sich bringt, das grösser ist als die Projektwassermenge, und die vorgeschlagenen Massnahmen müssen an die Situation angepasst sein. Mögliche Lösungen sind planerische Massnahmen (Baureglemente), Objektschutz, Anpassung der Schutzbauten, um deren Bruch im Überlastfall zu verhindern, und schliesslich eine Notfallplanung.

Als Grundlage für diese Untersuchungen muss ein repräsentatives Extremhochwasser definiert werden.

2.4.2 Definition des Extremhochwassers für den Hochwasserschutz

Das Extremhochwasser ist definiert als sehr seltenes Ereignis, das die üblichen Dimensionierungswerte wesentlich übersteigt. Die Wahl dieses Ereignisses berücksichtigt zahlreiche Faktoren, die ihrerseits sehr variabel sind. Deshalb ist eine genaue Definition, insbesondere die Angabe einer Wiederkehrperiode, nicht unbedingt notwendig und zweckmässig. Der Begriff des Extremhochwassers beinhaltet auch Unsicherheiten bezüglich der mit der Gefahrensituationen verbundenen Prozesse und ist nicht ausschliesslich an einen Spitzenabfluss gebunden. In diesem Sinn wird das Extremhochwasser als eine Prüfwassermenge für das Hochwasserschutz-Dispositiv interpretiert, analog zur Praxis in der Statik (aussergewöhnliche Einwirkungen, Nutzlasten und Zusatzlasten) und der Geotechnik.
In dem Fall, wo der Spitzenabfluss für die Bestimmung eines Extremereignisses massgebend ist, wird diesem Ereignis in der Regel eine Wiederkehrperiode von 1000 Jahren zugeordnet. Dieses Extremhochwasser (EHQ) muss jedoch vom maximalen Hochwasser (Q_{max}) unterschieden werden, das aus der Anwendung verschiedener empirischer Methoden hervorgeht. Das maximale Hochwasser ist effektiv an den grössten beobachteten Wert eines Einzugsgebietes mit Abflussmessungen gebunden. Dieser Wert kann jedoch häufig unterhalb des Extremhochwassers liegen. Er unterscheidet sich auch von einem Sicherheitshochwasser, das bei der Dimensionierung von Staumauern verwendet wird.

2.4.3 Bestimmung des Extremhochwassers

Für die Analyse eines Extremhochwassers müssen die Ereignisse berücksichtigt werden, die für das untersuchte System eine bedeutende zusätzliche Belastung darstellen. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Situationsanalyse (Typ des Einzugsgebietes, vorhandene Daten, beteiligte Prozesse, resultierende Gefahren) massgebend für die Wahl der charakteristischen Eigenschaften dieses Ereignisses. Die folgenden Kommentare beziehen sich ausschliesslich auf die Ermittlung des Spitzenabflusses.
Wenn umfangreiche Informationen zum Abfluss vorhanden sind oder wenn die Umstände es verlangen, können bei der Bestimmung der extremen Abflussspitzen verfeinerte Betrachtungen angebracht sein. Solche Methoden werden im Kapitel 4.3 vorgestellt.
Berücksichtigt man die zahlreichen anderen Faktoren, die mit der Erkennung der verbleibenden Risiken und Schwachstellen verbunden sind, ist eine detaillierte Berechnung des Extremhochwassers oft nicht nötig.

Eine grobe Schätzung erweist sich im Allgemeinen als ausreichend. Oft behilft man sich mit Werten, welche vom hundertjährlichen Hochwasser abgeleitet werden, indem das HQ_{100} mit Faktoren zwischen 1,3 und 1,5 multipliziert wird. (Zum Vergleich: Für Talsperren wird ein Sicherheitsfaktor von 2,25 verlangt). Der Gradient $HQ_{100}/HQ_{2,33}$ aus einer Frequenzanalyse kann allenfalls weitere Informationen zur Festlegung dieses Faktors liefern.
Wegen der Unsicherheiten in den kleineren Einzugsgebieten sind Sicherheitsfaktoren bis 2 sinnvoll.

2.4.4 Anwendung des Extremhochwassers

Zusammenfassend sei daran erinnert, dass das Extremhochwasser bei verschiedenen Abklärungen im Rahmen eines Hochwasserschutzprojektes benötigt wird.

- Bei der Untersuchung der Hochwassergefahren: Im Gefahrenstufendiagramm, das für die Gefahrenkartierung verwendet wird, ist dieses Extremereignis integriert (verbleibende Risiken =gelb gestreifte Flächen).
- Bei der Erstellung des Schutzkonzepts, im Rahmen der Optimierung von Massnahmen, bei der Suche nach Lösungen zur Minimierung des Restrisikos.
- Bei der Dimensionierung von Bauwerken. Gewisse Hochwasserschutzbauten müssen ein Extremhochwasser aushalten können (konstruktive Sicherheit).

2.4.5 Beispiel zur Bestimmung des Extremhochwassers

Im Rahmen des grossen Projektes der 3. Rhonekorrektion im Kanton Wallis wurde eine gründliche hydrologische Studie für die Abschätzung der Abflüsse erarbeitet. Die Untersuchung basierte einerseits auf einer statistischen Analyse der gemessenen Abflüsse der hydrometrischen Stationen der Landeshydrologie und andererseits auf einer hydrologischen Modellierung. Dafür wurde ein Niederschlagsgenerator eingesetzt. Diese Analyse wird in Kapitel 4.1.2 vorgestellt.
Die statistischen Analysen, die im Rahmen von CONSECRU durch das Wasserbaulabor HYDRAM der EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) ausgeführt wurden, basieren auf einer statistischen Anpassung einer homogenen Zeitreihe von gemessenen Abflüssen (BÉROD & CONSUEGRA 1995). Die grossen Staumauern, die Mitte der 1950er Jahre gebaut wurden, haben durch ihre Speicherwirkung und durch die Dämpfung der Hochwasserspitzen tatsächlich einen grossen Einfluss auf die Hochwasserabflüsse. Die Figur 2-3 zeigt die Anpassung der beiden Abflussmessreihen: vor (1941–1957) und nach (1961–1997) dem Bau der Talsperren. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Wirkung der Staumauern nicht immer garantiert werden kann – insbesondere im Herbst, wenn die Stauseen praktisch voll sind – sollte als Referenzzeitreihe für die Abschätzung der Abflüsse diejenige vor dem Bau der Staumauern verwendet werden. Kann ein bestimmtes Rückhaltevolumen dauerhaft zur Verfügung gestellt werden, kann dies berücksichtigt werden (z.B. Mattmark).
Damit alle zur Verfügung stehenden Informationen genutzt werden konnten, wurde die Messreihe durch Hochwasserspitzen der rekonstruierten Ereignisse von 1987 und 1993, ohne Berücksichtigung des Einflusses der Staumauern, ergänzt. Das Hochwasser vom Oktober 2000 wurde ins Diagramm eingefügt, aber es wurde nicht für die statistische Analyse berücksichtigt.

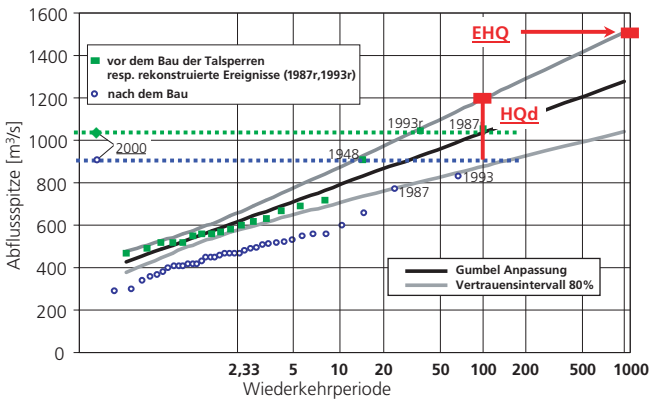


Fig. 2-3: Hydrologische Grundlagen der 3. Rhonekorrektion und Hochwasser vom 15. Oktober 2000 (Abflussmessstation von Sitten).

Die Anpassung wurde vervollständigt durch die Bestimmung eines Vertrauensintervalls (80%). Die Dimensionierungswassermengen in der Grössenordnung des HQ_{100} dürften in einem Bereich liegen, der durch den grössten gemessenen Abfluss (2000) und die Obergrenze des Vertrauensintervalls begrenzt wird. Dieser obere Wert entspricht einem Abfluss von 1200 m³/s.
Für das Extremhochwasser entspricht der ermittelte Wert, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten, der Obergrenze des Vertrauensintervalls eines tausendjährlichen Ereignisses. Dies entspricht ungefähr einem Abfluss von 1550 m³/s. Das Verhältnis zwischen dem HQ_{100} max (obere Grenze des Vertrauensintervalls) und dem Extremhochwasser beträgt hier also 1,3. Berücksichtigt man den Median des HQ_{100} (1050 m³/s), so beträgt das Verhältnis ungefähr 1,5. Diese Untersuchungen ergeben also Faktoren, welche mit denjenigen aus den Untersuchungen anderer Einzugsgebiete (Reuss, Engelberger Aa) übereinstimmen.
Basierend auf der hydrologischen Modellierung wurde das Extremereignis schliesslich auf 1600 m³/s festgelegt.

3 Grundlagen zu den Abflussbildungsprozessen

3.1 Einleitung

Die Beurteilung der relevanten Abflussbildungsprozesse ist eine wichtige Voraussetzung für eine zuverlässige Hochwasserabschätzung. Es geht im Wesentlichen um die Frage, wie gross der Anteil des Niederschlages ist, der während des Hochwassers abfliesst. Kapitel 3 zeigt auf, wie unterschiedlich die Abflussbildung auf natürlichen Flächen sein kann und wie sich diese Unterschiede auf den Hochwasserabfluss auswirken. Wie viel Niederschlag abfliesst, wird wesentlich vom Rückhaltevermögen der Böden bestimmt. Je nach Schluckvermögen der Böden wird mehr oder weniger Wasser gespeichert und mit mehr oder weniger starker Verzögerung in die Bäche abgeben. Auf kaum durchlässigen Böden entsteht aufgrund von Infiltrationshemmnissen rasch Oberflächenabfluss. Sehr durchlässige Böden müssen hingegen erst gesättigt werden, bis Oberflächenabfluss oder Abfluss im Boden entsteht. Je nach Art der Böden werden also unterschiedliche Abflussprozesse in Gang gesetzt, die entscheiden, ob sofort Abfluss entsteht oder erst nach ergiebigeren Niederschlägen.

3.2 Welche Abflussprozesse kennt man?

Figur 3-1 zeigt die wichtigsten Abflussprozesse anhand schematischer Bodenprofile.
Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationshemmnissen (Hortonian Overland Flow, HOF) wird auf Böden und Oberflächen beobachtet, die verdichtet oder wasserabstossend sind und deshalb nur schwach durchlässig sind.
Gesättigter Oberflächenabfluss (Saturation Overland Flow, SOF) tritt nach Sättigung des Bodens auf. Auf flachgründigen oder feucht-nassen Böden mit geringem Speichervermögen ist dies besonders rasch der Fall. Man unterscheidet zwischen rasch gesättigtem Oberflächenabfluss (SOF1), verzögertem (SOF2) oder stark verzögertem Oberflächenabfluss (SOF3). Dies gilt analog bei den anderen Abflussprozessen.
Abfluss im Boden (Sub-Surface Flow SSF) tritt auf, wenn über einer Stauschicht im Boden hoch durchlässige Schichten liegen oder Makroporen dem Wasser ein rasches laterales Fliessen ermöglichen.
Ist der Boden gut durchlässig und liegt er über durchlässigem geologischem Untergrund, kann über die *Tiefensickerung* (Deep Percolation DP) viel Wasser in den Boden und den geologischen Untergrund eindringen und gespeichert werden, ohne dass Abfluss entsteht.

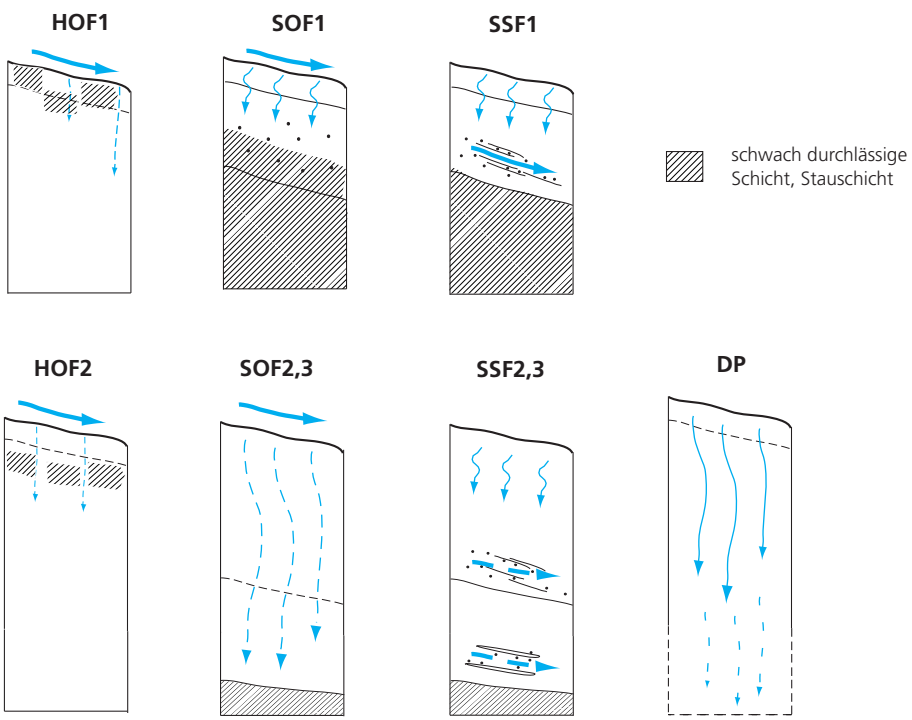


Fig. 3-1: Abflussprozesse und Reaktionsweisen bei Starkregen.
HOF = Hortonscher Oberflächenabfluss (Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationshemmnissen); HOF1 rasch, HOF2 leicht verzögert.
SOF = gesättigter Oberflächenabfluss; SOF1 rasch, SOF2 leicht verzögert, SOF3 stark verzögert.
SSF = Abfluss im Boden (Subsurface Flow), SSF1 leicht verzögert, SSF2 verzögert, SSF3 stark verzögert.
DP = Tiefensickerung (Deep Percolation).

Weitere Faktoren beeinflussen die Abflussbildung: Die *Vorgeschichte* (Niederschläge der letzten Tage vor dem Hauptereignis) kann beispielsweise die Abflussreaktion eines Einzugsgebietes verschärfen. Die *Schneeschmelze* kann auf verschiedene Art und Weise auf die Abflussbildung einwirken. Durch den Schmelzprozess wird gebundenes Niederschlagswasser freigesetzt. Findet dieser Vorgang gleichzeitig mit ergiebigen Regenfällen statt, kann sich die Wirkung des Niederschlags verstärken. Allerdings sind die Schmelzraten verglichen mit den bei Starkregen auftretenden Niederschlagsintensitäten eher klein. Bei den Hochwasserereignissen von 1999 wurde die Wirkung der Schneeschmelze auf den Abfluss untersucht (BWG 2000)[1]. Die Schneeschmelze kann aber auch Wasser in die darunter liegende Bodenschicht abgeben und damit den Sättigungsprozess beschleunigen. Das Beispiel in Kapitel 3.6 zeigt, wie diese Faktoren grosse Hochwasser fördern können.

3.3 Wie unterschiedlich wirken verschiedene Abflussprozesse?

Bei Beregnungsversuchen an natürlichen Hängen von 60 m² Grösse wurden die Abflussprozesse untersucht (SCHERRER 1996; NAEF et al. 1998). Der Versuchsaufbau und die wichtigsten Resultate sind im HADES, Blatt 5.7 (NAEF et al. 1999) dargestellt. Figur 3-2 zeigt die Abflussreaktion der 18 untersuchten Standorte auf intensive Niederschläge (50–100 mm/h). Vier Standorte mit typischen Abflussreaktionen werden im folgenden näher beschrieben. Hortonscher Oberflächenabfluss (HOF) wurde im Gebiet des Gotthard-Pass (TI) beobachtet. Der mächtige, schwach zersetzte, makroporenarme Auflagehumus wirkte als Infiltrationsbarriere, so dass kaum Wasser infiltrierte und nahezu 90% des Niederschlags oberflächlich abfloss. Auf dem flachgründigen, durchlässigen Braunerdeboden an einem Steilhang in Willerzell (SZ) am Sihlsee infiltrierte hingegen sämtliches Wasser und floss, gestaut vom Sandsteinfels, leicht verzögert lateral im Boden ab (SSF2). Ebenfalls über Sandsteinfels wurde in Therwil (BL) eine tiefgründige, makroporenreiche Braunerde beregnet. Hier entstand jedoch stark verzögerter Oberflächenabfluss, da sich der Boden nur langsam sättigte (SOF3) und über eine Stunde lang sämtliches Wasser infiltrierte. Auf der Braunerde über verkarstetem Kalkstein in Blauen (BL) infiltrierte während Stunden sämtliches Wasser in den Boden und sickerte in den klüftigen Kalksteinfels weiter, ohne dass Abfluss entstand. Selbst bei längeren Niederschlägen tragen also die Standorte in Therwil und Blauen kaum zum Abfluss bei.

Der standortgebundene Abflussprozess bestimmt also, wie viel Abfluss entsteht. Kann man die dominanten Abflussprozesse eines Einzugsgebietes räumlich festlegen, so lässt sich entscheiden, ob das Gebiet bei Starkniederschlägen sofort, leicht verzögert oder stark verzögert reagiert und wie gross der resultierende Abfluss in etwa ist.

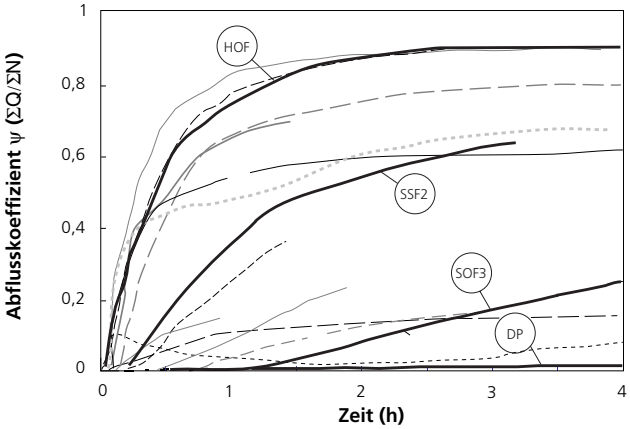


Fig. 3-2: Der Verlauf der Volumenabfluss-Koeffizienten ($\Psi = \Sigma Q/\Sigma N$) der 18 Hangstandorte. Mit schwarz ausgezogener Linie eingetragen sind die Standorte, die von bestimmten Abflussprozessen dominiert wurden (HOF = Hortonscher Oberflächenabfluss; SOF3 = sehr verzögerter Oberflächenabfluss als Folge der Bodensättigung; SSF2 = verzögerter Abfluss im Boden; DP = Tiefensickerung).

3.4 Schlüsselstellen entscheiden, welcher Abflussprozess sich einstellt

Die Auswertung der Beregnungsversuche hat gezeigt, dass sogenannte «Schlüsselstellen» darüber entscheiden, welcher Abflussprozess sich einstellt. Figur 3-3 stellt die Schlüsselstellen und ihre Wirkungsweise an einem Bodenprofil dar. Die Darstellung gilt für einen von Stau- oder Hangwasser unbeeinflussten Boden.

[1] Beim Hochwasser 1999 traten damals Schneeschmelzraten von bis zu 40 mm/Tag auf. Die Niederschlagsintensitäten lagen im Vergleich dazu wesentlich höher. So sind am 21. Mai 1999 in der Ostschweiz bis zu 200 mm Niederschlag pro Tag gefallen.

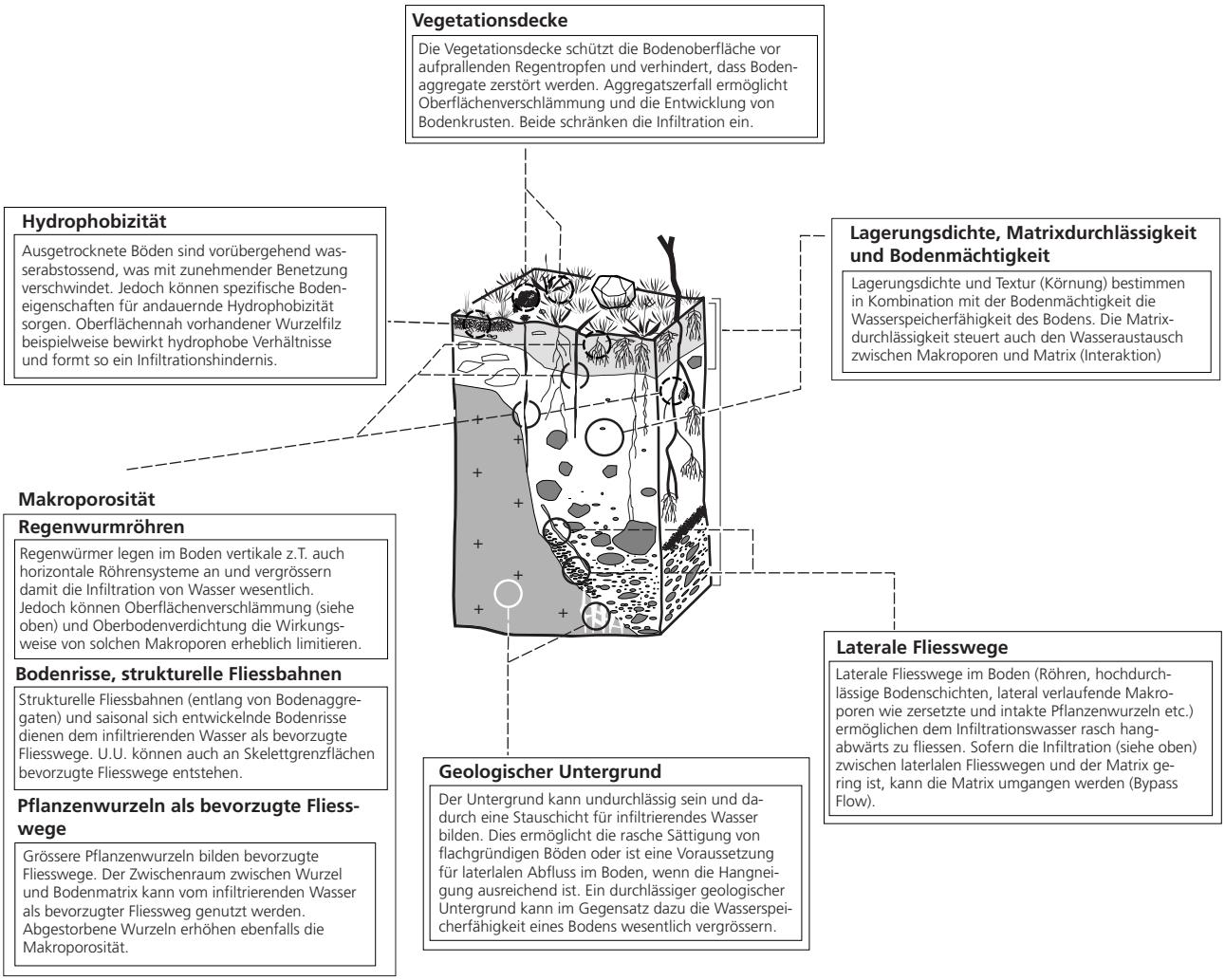


Fig. 3-3: Bodenprofil mit Schlüsselstellen, welche die Infiltration und Wasserbewegung durch den Boden beeinflussen und entscheiden, welcher Abflussprozess sich an einem Standort einstellt. Die Angaben beziehen sich auf einen von Stau- oder Grundwasser unbeeinflussten Boden. Wie diese Schlüsselstellen wirksam werden, zeigt Fig. 3-4.

Figur 3-4 zeigt ein anhand dieser Erkenntnisse entwickeltes Prozess-Beurteilungs-Schema (PBS) für Wieslandböden. Das PBS hilft, den dominanten Abflussprozess an einem Standort herzuleiten (SCHERRER & NAEF 2002, SCHERRER 2001). Es ist in Anlehnung an ein Bodenprofil in Oberfläche, Ober- und Unterboden und geologischen Untergrund gegliedert.
Das PBS ergibt für einen flachgründigen, gut durchlässigen Wiesland-Boden an einem steilen Hang mit dichtem geologischen Untergrund folgenden Beurteilungsverlauf: Bei gutem *Deckungsgrad* und *nicht hydrophobem Humus* gelangt man zur Beurteilung der *Bodenmatrix*. In diesem Fall ist *sie nicht verdichtet und gut durchlässig*, dies ermöglicht dem Wasser, in den Unterboden vorzudringen. Die *Gesamtmächtigkeit* des Bodens ist <1 m und auch <0,5 m. Bei *hoher Makroporosität des Unterbodens, grosser Matrixdurchlässigkeit, dichtem Untergrund und grosser Hangneigung* stellt sich die Frage nach unterirdischen *lateralen Fliesswegen*. Sind solche vorhanden, ergibt sich *SSF2*. Bei einem flachen Hang würde sich *SOF2* einstellen.

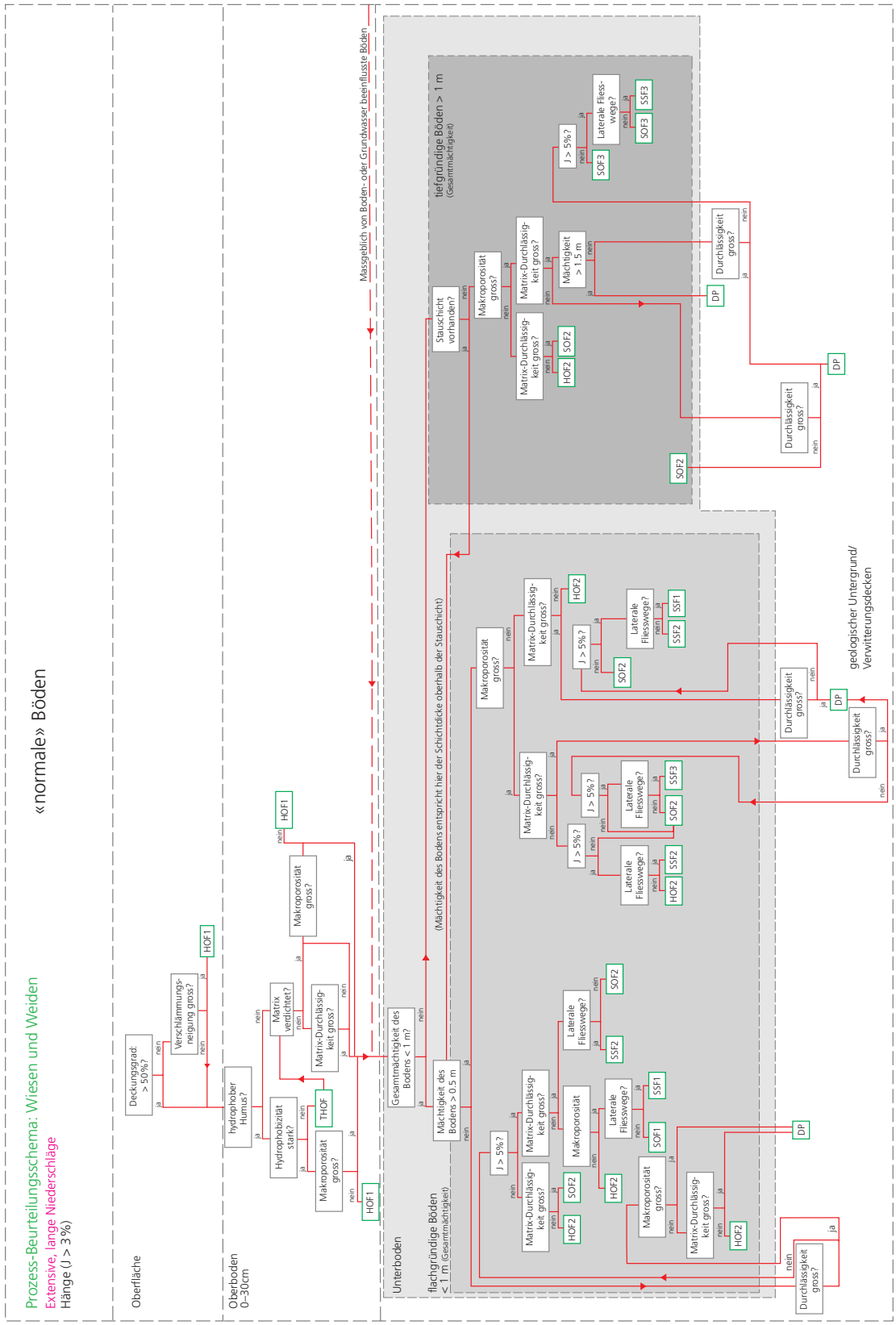


Fig. 3-4: Prozessbeurteilungsschema (PBS) für die Herleitung des dominanten Abflussprozesses unter Berücksichtigung der Schlüsselstellen. Die Beurteilung der einzelnen Kriterien geht auf SCHERRER (2001) zurück.

3.5 Abflussprozesse an Hängen

Mit Hilfe des PBS können die dominanten Abflussprozesse an einem Standort bestimmt werden. Betrachtet man mehrere Standorte an einem Hang, so treten verschiedene Prozesse gleichzeitig auf. Figur 3-5 zeigt an einer Hangsequenz im Idarbach-Einzugsgebiet (Rheinland-Pfalz) die mittels Felduntersuchungen bestimmten dominanten Abflussprozesse. In den Kästchen sind die Gründe für das Auftreten eines bestimmten Prozesses aufgeführt. Mit Überlegungen aus der «Hillslope Hydrology» kann die gegenseitige Beeinflussung der Abflussprozesse beurteilt werden.
Im vorliegenden Fall wurden am Oberhang wenig abflusswirksame Prozesse (DP) identifiziert. Ihr Einfluss auf die Prozesse in der Hangmitte ist daher gering. Würden aber beispielsweise schwach durchlässige Böden das Wasser am Oberhang stauen, so entstünden dort wesentlich stärkere Abflüsse, welche die Abflussbildung im Mittelhang und Unterhang massgeblich beeinflussen würden.

3.6 Wie wirken sich Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet aus?

Einzugsgebiete reagieren unterschiedlich auf Starkregen. Die beobachteten unterschiedlichen Reaktionsarten lassen sich vor allem auf Unterschiede in der Speicherfähigkeit der Böden zurückführen. Wenn in einem Gebiet die Abflussprozesse SOF1 und HOF flächenmässig dominieren, verläuft die Abflussbildung bei Starkregen schneller als in Gebieten mit verzögerten Abflussprozessen (SOF2, SOF3, SSF2, SSF3, DP). Mit Hilfe von geologischen und pedologischen Karten und Untersuchungen im Gelände kann ein Einzugsgebiet nach Abflussprozessen kartiert werden und in unterschiedliche Reaktionsweisen (schnell, leicht verzögert, verzögert, stark verzögert reagierende Flächen, sog. Abflusstypen) gegliedert werden. Aus Anteil und räumlicher Verteilung dieser Flächen ergeben sich Hinweise, wie und auf welche Art sich der Niederschlag (Gewitter, Landregen) auf das Einzugsgebiet auswirkt. Anhand der Einzugsgebiete des *Allenbachs* bei Adelboden, der *Saltina* bei Brig und der *Schüss* bei Sonce-

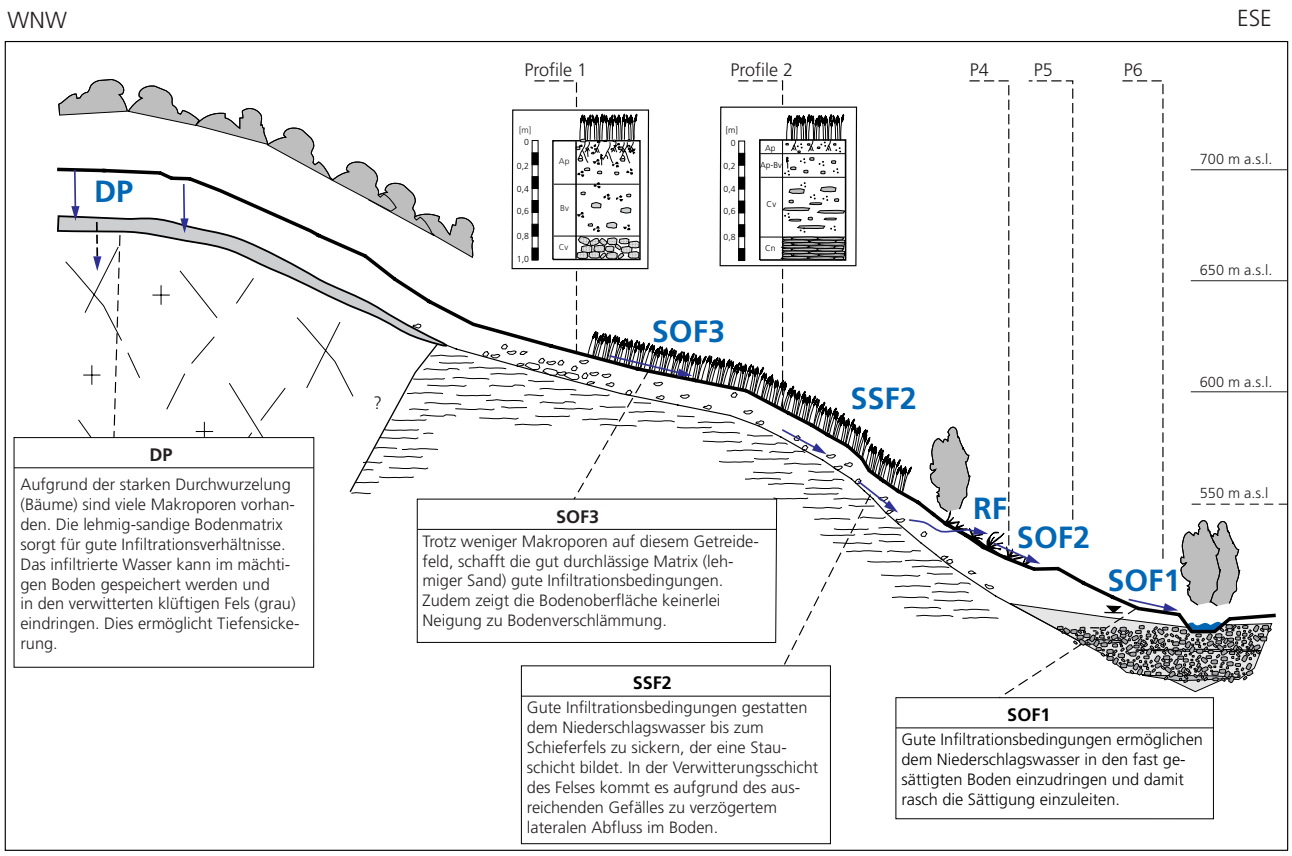


Fig. 3-5: Die aufgrund von Felduntersuchungen ermittelten dominanten Abflussprozesse an einer Hangsequenz im Hundsrück (Rheinland-Pfalz). P1-6 sind Profilbeurteilungen anhand von Sondierungen; in den Kästchen sind die Gründe aufgeführt, weshalb sich ein bestimmter dominanter Abflussprozess einstellt.

a) Schnelle und starke Reaktion

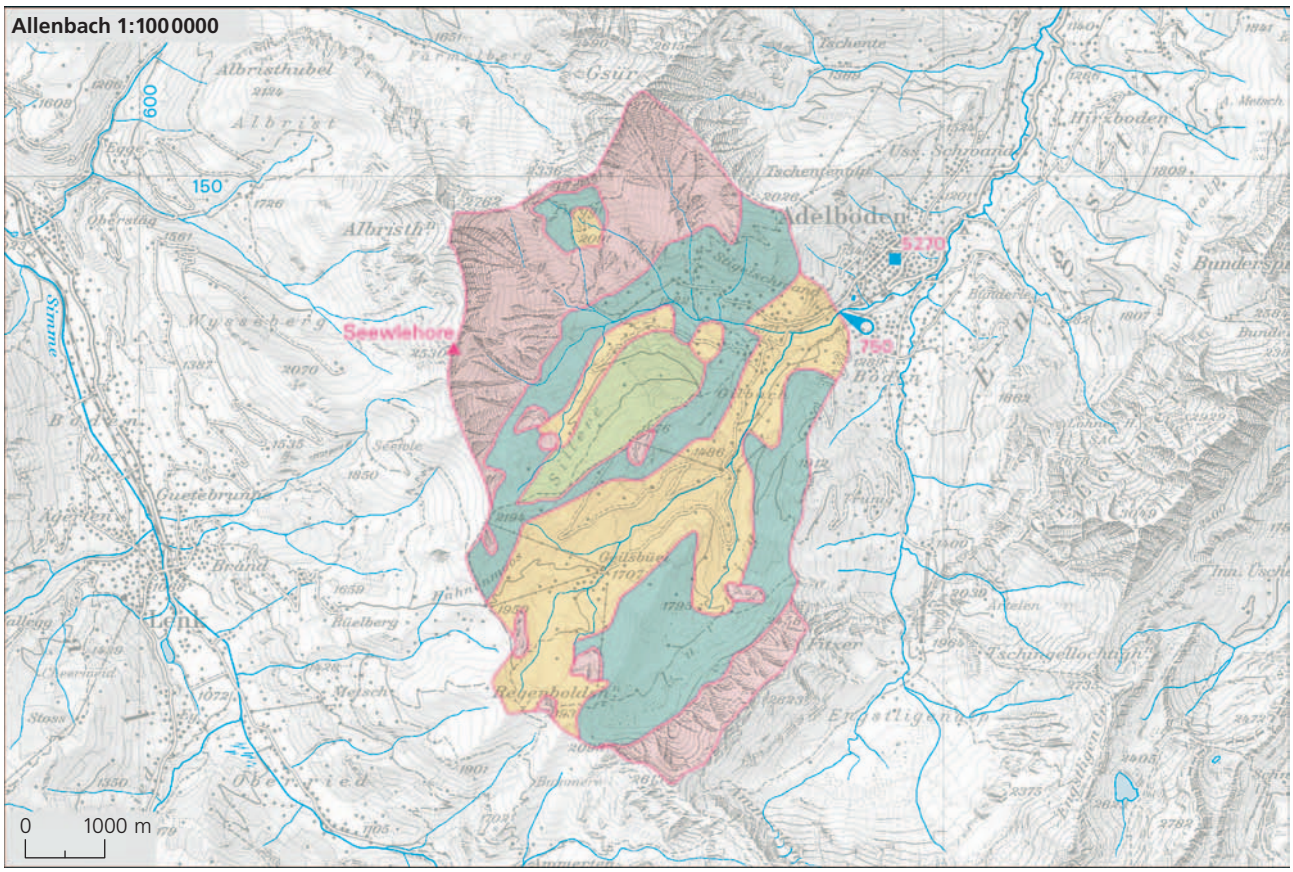
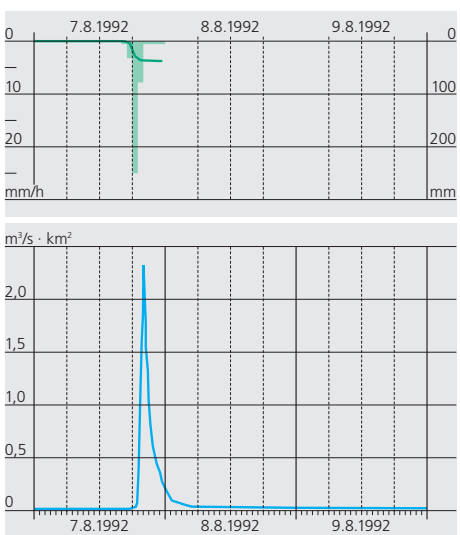


Fig. 3-6: a) Die Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet des Allenbachs bei Adelboden (Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, Tafel 5.7).

b) Grösstes gemessenes Hochwasserereignis (Adelboden)



Legende

Abflussreaktion der Teilflächen auf Starkregen

Schnell reagierende Flächen

Flächen mit geringem Speichervermögen: Fels, sehr flachgründige Böden, stark vernässte Böden, Böden mit stark gehemmter Durchlässigkeit, Siedlungsflächen

Leicht verzögert reagierende Flächen

Flächen mit mässigem Speichervermögen: flachgründige Böden, vernässte Böden, Böden mit gehemmter Durchlässigkeit

Verzögert reagierende Flächen

Flächen mit grossem Speichervermögen: durchlässige, mittel- bis tiefgründige Böden

Stark verzögert reagierende Flächen

Flächen mit sehr grossem Speichervermögen: durchlässige und tiefgründige Böden, durchlässige Böden über durchlässigen Lockersedimenten oder Festgesteinen

Niederschlags- und Abflussganglinie der grössten in einem Einzugsgebiet gemessenen Hochwasserereignisses

Niederschlagsintensität [mm/h]

Summierter Niederschlag [mm]

Abflussspende [$m^3/s \cdot skm^2$]

Weitere Teilflächen

Gletscher

Zur Analyse verwendete Messstationen

862 Abflussmessstation (Nummer siehe Tafel 5.1)

280 Niederschlagsmessstation (Nummer siehe Tafel 2.1)

b) Charakteristische Gebietsreaktion des Allenbaches bei Starkregen.

a) Verzögerte und mässige Reaktion

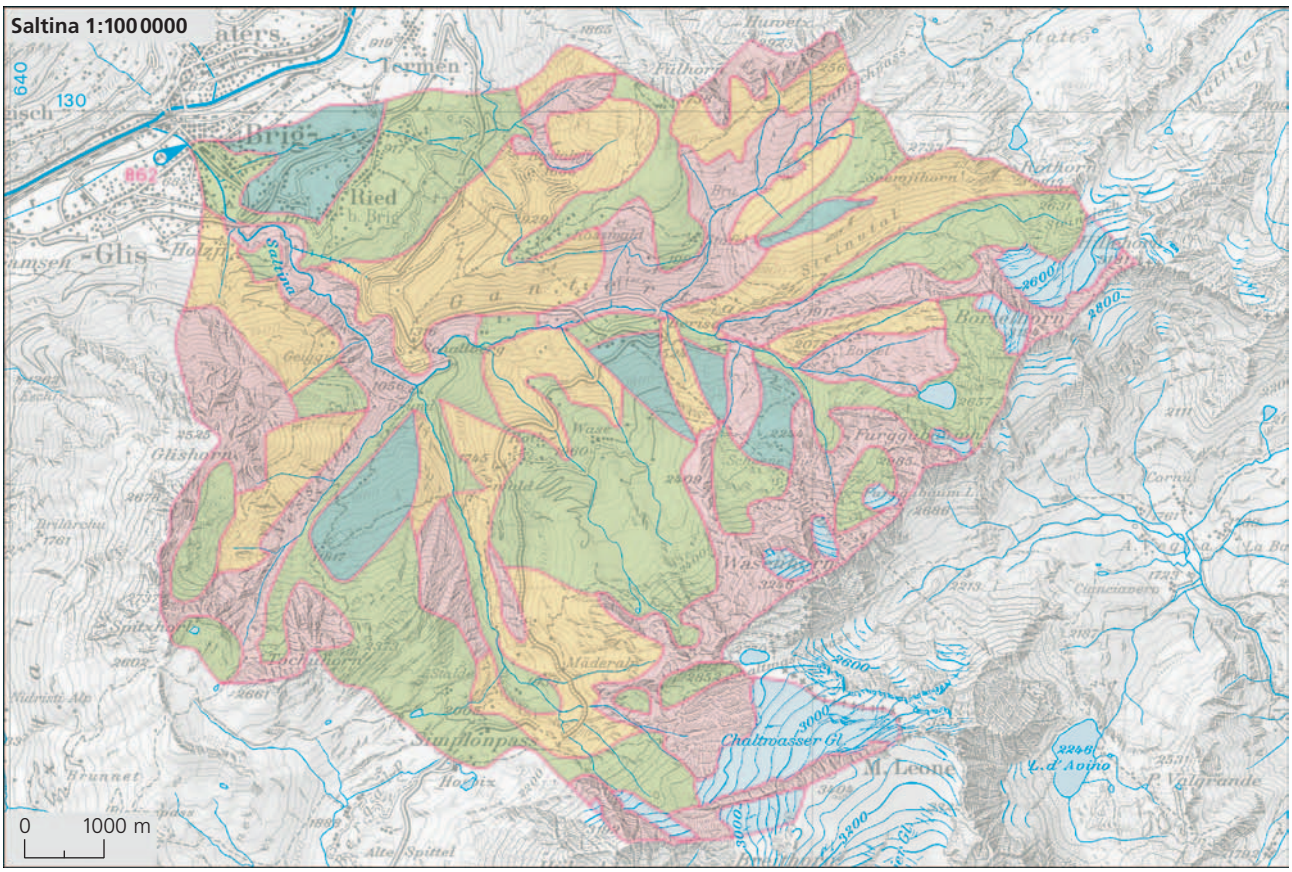
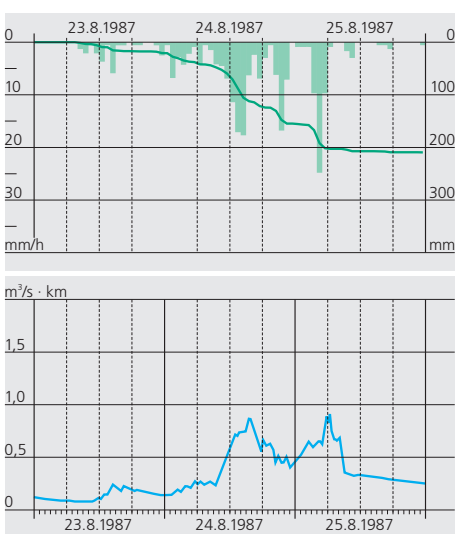


Fig. 3-7 a) Die Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet der Saltina bei Brig (Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, Tafel 5.7).

b) Grösstes gemessenes Hochwasserereignis (Brig)



Legende

Abflussreaktion der Teilflächen auf Starkregen

Schnell reagierende Flächen

Flächen mit geringem Speichervermögen: Fels, sehr flachgründige Böden, stark vernässte Böden, Böden mit stark gehemmter Durchlässigkeit, Siedlungsflächen

Leicht verzögert reagierende Flächen

Flächen mit mässigem Speichervermögen: flachgründige Böden, vernässte Böden, Böden mit gehemmter Durchlässigkeit

Verzögert reagierende Flächen

Flächen mit grossem Speichervermögen: durchlässige, mittel- bis tiefgründige Böden

Stark verzögert reagierende Flächen

Flächen mit sehr grossem Speichervermögen: durchlässige und tiefgründige Böden, durchlässige Böden über durchlässigen Lockersedimenten oder Festgesteinen

Niederschlags- und Abflussganglinie der grössten in einem Einzugsgebiet gemessenen Hochwasserereignisses

Niederschlagsintensität [mm/h]

Summierter Niederschlag [mm]

Abflussspende [$m^3/s \cdot skm^2$]

Weitere Teilflächen

Gletscher

Zur Analyse verwendete Messstationen

862 Abflussmessstation (Nummer siehe Tafel 5.1)

280 Niederschlagsmessstation (Nummer siehe Tafel 2.1)

b) Charakteristische Gebietsreaktion der Saltina bei Starkregen.

a) Verzögerte und schwache Reaktion

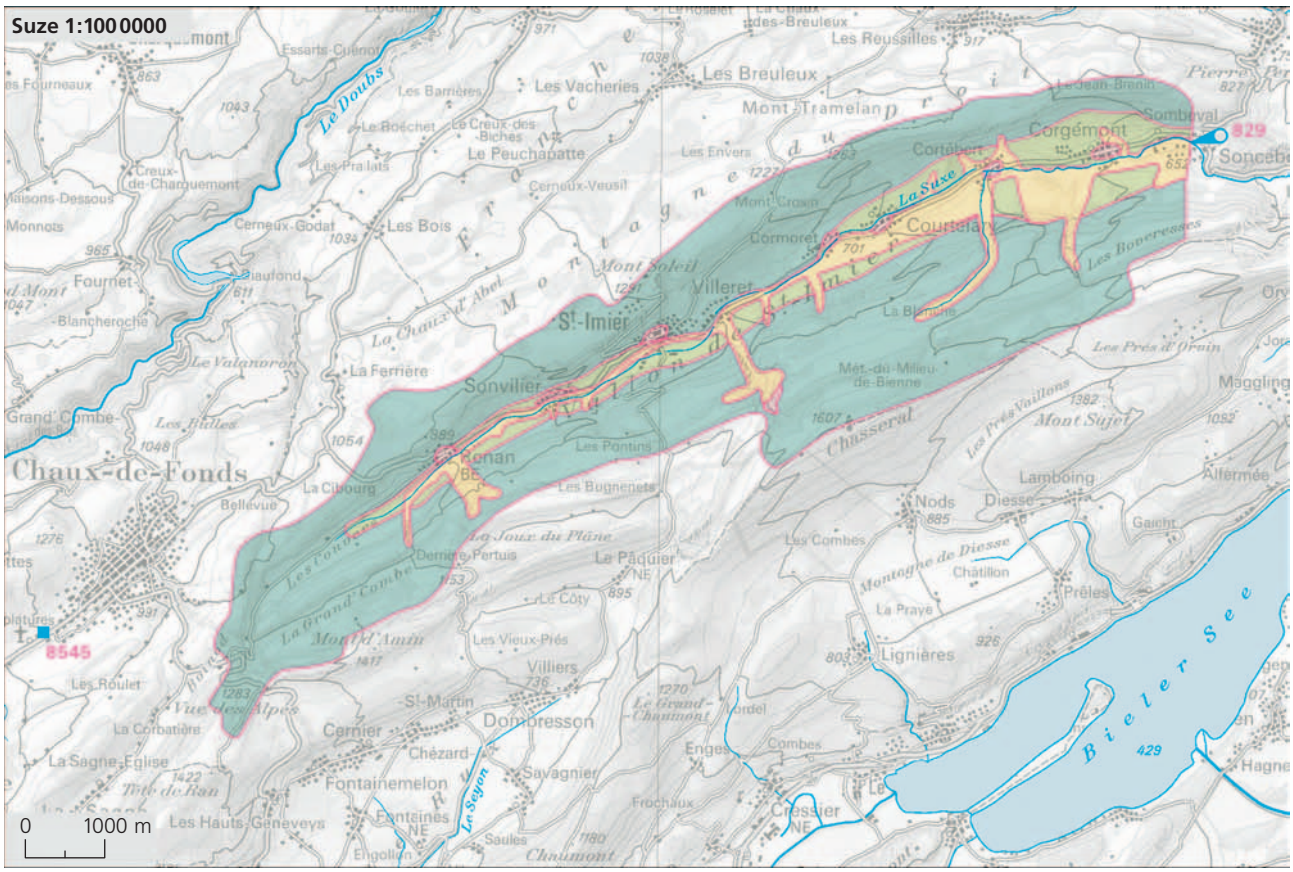
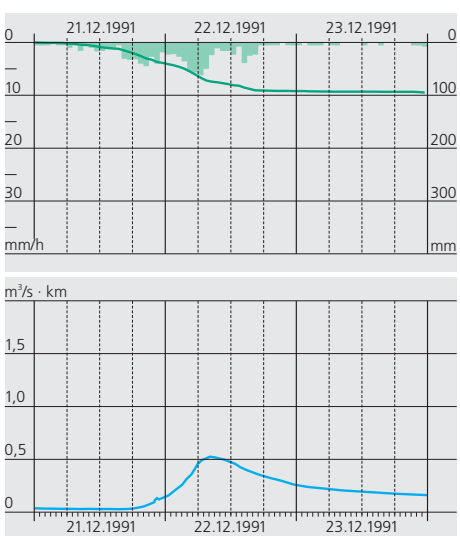


Fig. 3-8: a) Die Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet der Schüss bei Sonceboz (Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, Tafel 5.7).

b) Grösstes gemessenes Hochwasserereignis (Sonceboz)



b) Charakteristische Gebietsreaktion der Suze bei Starkregen.

Legende

Abflussreaktion der Teilflächen auf Starkregen

Schnell reagierende Flächen

Flächen mit geringem Speichervermögen: Fels, sehr flachgründige Böden, stark vernässte Böden, Böden mit stark gehemmter Durchlässigkeit, Siedlungsflächen

Leicht verzögert reagierende Flächen

Flächen mit mässigem Speichervermögen: flachgründige Böden, vernässte Böden, Böden mit gehemmter Durchlässigkeit

Verzögert reagierende Flächen

Flächen mit grossem Speichervermögen: durchlässige, mittel- bis tiefgründige Böden

Stark verzögert reagierende Flächen

Flächen mit sehr grossem Speichervermögen: durchlässige und tiefgründige Böden, durchlässige Böden über durchlässigen Lockersedimenten oder Festgesteinen

Niederschlags- und Abflussganglinie der grössten in einem Einzugsgebiet gemessenen Hochwasserereignisses

Niederschlagsintensität [mm/h]

Summierter Niederschlag [mm]

Abflussspende [$m^3/s \cdot skm^2$]

Weitere Teilflächen

Gletscher

Zur Analyse verwendete Messstationen

862 Abflussmessstation (Nummer siehe Tafel 5.1)

280 Niederschlagsmessstation (Nummer siehe Tafel 2.1)

boz (Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, Tafel 5.7) lässt sich der Einfluss der Abflussprozesse auf die Abflussentstehung aufzeigen.
Den Untergrund des Einzugsgebietes des Allenbachs bilden tonige Flysche, Kalksteine und postglaziale Lokalmoränen. In den Flyschen der sehr steilen Südhänge sind, wenn überhaupt, Rohböden vorhanden. An den parallel zum Schichtfallen der Flyscheinheiten verlaufenden Nordhängen treten mächtige gleyige Verwitterungsböden auf. Diese Hänge sind oft instabil und durch Sackungen und Rutschungen geprägt. Bei kurzen, intensiven Niederschlägen reagieren die steilen Fels- und Rohbodenflächen aufgrund ihrer geringen Speicherkapazität sofort (Fig. 3-6a, rote Flächen). Diese Flächen sind zum grössten Teil zusammenhängend, vom Gerinnenetz gut erschlossen, und können von einem lokal begrenzten Gewitter überregnet werden. Hier tritt v.a. HOF und SOF1 mit schneller Abflussreaktion auf. In geringerem Masse tragen die teils tonigen Moränenablagerungen und gleyigen Verwitterungsböden zum Hochwasserabfluss bei (SOF2, SSF2), während die Flächen mit mächtigen Hang- und Bachschuttablagerungen kaum reagieren (DP, SSF3, SOF3).
Die grossen Hochwasser im Allenbach werden deshalb durch sommerliche Gewitterregen verursacht, welche zu kurzen Hochwassern mit ausgeprägten Abflussspitzen führen (Fig. 3-6b). Bei lang andauernden Niederschlägen sind die Abflussspitzen weniger markant.

Im Einzugsgebiet der *Saltina* sind die schnell reagierenden Teilflächen dispers verteilt (Fig. 3-7a). Die schnell reagierenden Flächen sind Gebiete mit Fels und flachgründigen, rasch sättigbaren Böden. Ein räumlich beschränkter Gewitterregen kann diese Teilfächen nicht einheitlich überregnen. Die grossen Hochwasser der Saltina werden deshalb durch lange und ergiebige Niederschläge ausgelöst, die zwar eine geringe Intensität aufweisen, bei denen aber auch Flächen mit verzögerter Abflussreaktion gesättigt werden und so zum Abfluss beitragen (Fig. 3-7b). Solche in diesem Einzugsgebiet weit verbreiteten Flächen bestehen aus Moränen, Bergsturz- und Hangschuttablagerungen.
Das Einzugsgebiet der *Schüss* im Berner Faltenjura wird hauptsächlich durch verkarstete Kalke gebildet. Darauf entstehen meist flachgründige, durchlässige Böden, die das Niederschlagswasser in den tieferen Untergrund leiten (Deep Percolation). Dies führt zu einer stark verzögerten Abflussreaktion. Der Talboden ist von Schichten aus Mergel und Sandstein bedeckt, die ihrerseits teilweise von toniger Grundmoräne überlagert sind. Darauf haben sich weniger durchlässige Böden entwickelt und im Fall von Starkregen kommt es hier zu Oberflächenabfluss. Da das Gebiet mehrheitlich Teilflächen mit guter bis sehr guter Durchlässigkeit umfasst (Fig. 3-8a), entstehen grosse Hochwasser nur im Winter, bei hoher Bodenfeuchte und wenn Frost die Infiltrationskapazität der Böden vermindert. Dann tritt an manchen Stellen, wo das Wasser sonst im Untergrund versickert, Oberflächenabfluss auf. Die resultierenden Hochwasserganglinien sind gekennzeichnet durch lange Anstiegszeiten, kleine Spitzenabflüsse und grosse Abflussvolumen (Fig. 3-8b).

3.7 Wie lässt sich die Hochwasserreaktion von Einzugsgebieten erklären?

Der Allenbach und die Saltina zeigen, wie wichtig das Speichervermögen der Einzugsgebiete für die Entstehung von Hochwasserabflüssen ist. Das Zusammenspiel von Abflusstypen-Flächen mit unterschiedlicher Abflussbereitschaft und der Niederschlagscharakteristik spielt folglich bei der Hochwasserentstehung eine wichtige Rolle. Die Wirkung von zusätzlichen Faktoren wie Schneeschmelze und Bodenfrost zeigt sich am Beispiel des verkarsteten Einzugsgebiets der Schüss. Kapitel 4.1 beschreibt, wie dieses Zusammenspiel mit Hilfe von Niederschlag-Abfluss-Modellen untersucht werden kann.

3.8 Schlussfolgerungen

- Der Aufbau des Bodens bestimmt seine Abflussreaktion auf Starkniederschläge. Während Böden mit günstigem Aufbau in der Lage sind, sämtliches Wasser zu speichern, fliesst bei anderen ein Grossteil des Niederschlags ab.
- Diese Unterschiede lassen sich auf unterschiedliche Abflussprozesse zurückführen. Welcher Abflussprozess ausgelöst wird, hängt von verschiedenen Schlüsselstellen im Boden ab.
- Um zu verstehen, auf welche Weise grosse Hochwasser in einem Gebiet entstehen, sind gebietsspezifische Kenntnisse der Abflussprozesse nötig.
- Die Ausführungen zeigen, dass der Boden eine Schlüsselgrösse beim Hochwasserbildungsprozess darstellt. Weitere Aspekte wie die Vegetation, die Gewässernetzdichte, die Geomorphologie, die Geologie und letztendlich die räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung müssen aber mitberücksichtigt werden.
- Die Abflussreaktion ganzer Einzugsgebiete hängt vom Flächenanteil und der räumlichen Lage der verschieden reagierenden Teilflächen ab. Je nach Anteil und Verteilung sind unterschiedliche Niederschläge für die Entstehung grosser Hochwasser entscheidend. Wie diese Faktoren zusammenspielen, kann mit Niederschlag-Abfluss-Modellen untersucht werden (vgl. Kapitel 4.1).

4 Hochwasserabschätzung basierend auf Abflussmessungen

4.1 Niederschlag-Abfluss-Modelle

4.1.1 Hochwasserabschätzung mit Niederschlag-Abfluss-Modellen (NAM)

a) Möglichkeiten und Grenzen von Niederschlag-Abfluss-Modellen (NAM)

Mit Niederschlag-Abfluss-Modellen (NAM) wird ein Ausschnitt des hydrologischen Kreislaufes mit mathematischen Gleichungen abgebildet. Damit wird es möglich, aus meteorologischen Eingangsgrössen und gebietsspezifischen Parametern den Abfluss aus einem Einzugsgebiet zu berechnen. Seit dem Aufkommen von leistungsfähigen Computern wurde mit enormem Aufwand eine unübersehbare Anzahl solcher Modelle für verschiedene Zwecke entwickelt. Eine grosse Zahl ist speziell auf die Simulation von Hochwasserabflüssen ausgelegt. Im Folgenden werden einige Gedanken über die Möglichkeiten und Grenzen solcher Modelle dargelegt. Verschiedene Aspekte der Abflussbildung bei Starkregen sind noch Gegenstand der Forschung. Andere sind schwer erfassbar, weil sich die Vielfältigkeit der Natur nur schwer in Gleichungen mit einer überschaubaren Zahl von Parametern fassen lässt. Etwas ausführlicher wird in Abschnitt b) und c) aufgezeigt, wie sich Modellrechnungen durch Kenntnis der in einem Einzugsgebiet vorkommenden Abflussprozesse verbessern lassen.
Die Bestimmung des abflusswirksamen Anteils des Niederschlags ist das zentrale Element in jedem NAM.

In Kapitel 3 wurde ein Überblick über die in verschiedenen Einzugsgebieten beobachteten Abflussprozesse gegeben. Infiltrationsraten und Speichervermögen schwanken bei natürlichen Böden in einem weiten Rahmen. Die Regelmechanismen, die diese Grössen steuern, sind komplex und vernetzt. Bis heute ist kein Modell in der Lage, diese Vorgänge detailliert und nur auf der Grundlage von im Feld erfassbaren Parametern nachzubilden.
Gleichwohl zeigen die existierenden Modelle grosse Unterschiede. Ein ideales Modell würde die Vorgänge in allen Skalenbereichen, vom Standort über den Hang, vom Teileinzugsgebiet bis zum Gesamtgebiet, physikalisch richtig abbilden (Fig. 4-1). Ein solches Modell müsste nicht geeicht werden, da die notwendigen Parameter im Feld erhoben werden könnten, und es würde auch bei extremen Niederschlagsereignissen verlässliche Resultate liefern. Heute existieren jedoch erst für kleine Geländeausschnitte (Plot oder Hänge) Modelle, welche die massgebenden Prozesse einigermassen zutreffend erfassen. Dagegen enthalten auch die aufwändigsten Einzugsgebietsmodelle so entscheidende Vereinfachungen der wichtigsten Prozesse, dass man kaum mehr von einem physikalischen Hintergrund sprechen kann und sie als Konzeptmodelle bezeichnet werden müssen. Wenn das zugrundeliegende Konzept die wesentlichen Vorgänge im Einzugsgebiet zutreffend erfasst, lassen sich damit befriedigende Resultate erzielen. Eine weitere Vereinfachung stellen die weit verbreiteten Black-Box-Modelle dar, die den Input

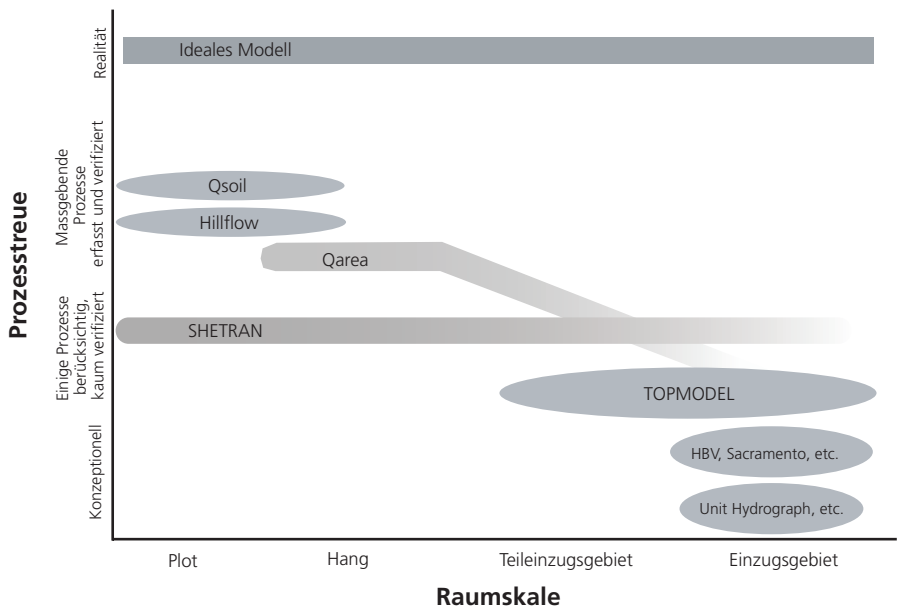


Fig. 4-1: Erfassung der massgebenden Abflussprozesse in unterschiedlichen Skalenbereichen mit einigen bekannten Niederschlag-Abfluss-Modellen.

(Niederschlag) mit einer Funktion in den Output (Abfluss) umwandeln, ohne dass sie den Anspruch haben, die tatsächlichen Vorgänge abzubilden.
Konzept- oder Black-Box-Modelle werden mit Parametern an ein Einzugsgebiet angepasst. Dies geschieht in einem Verfahren, das Eichung genannt wird. Dabei werden die Parameter systematisch verändert, bis die berechneten Abflüsse möglichst gut mit den gemessenen übereinstimmen. Damit ist das Dilemma aufgezeigt: Um Modelle einsetzen zu können, sind simultane Messungen von Niederschlag und Abfluss notwendig. Wenn keine Abflussmessungen verfügbar sind, kann auch das Modell nicht geeicht werden. Wenn jedoch Messungen über eine ausreichend lange Periode vorhanden sind, lassen sich Hochwasser bestimmter Jährlichkeit einfacher mit einer statistischen Analyse der gemessenen Abflüsse bestimmen.

Deshalb lassen sich solche Modelle, neben ihrer Verwendung als Forschungswerkzeuge, nur in Sonderfällen einsetzen, wenn z. B. für die Projektierung nicht nur der Spitzenabfluss, sondern auch der Verlauf der Hochwasserganglinie von Interesse ist (Planung von Rückhaltebecken, Überlagerung von Abflüssen aus Teileinzugsgebieten etc.) oder wenn der Verlauf eines Hochwassers vorausgesagt werden soll. Eine dritte Einsatzmöglichkeit ist die Verlängerung von kurzen Abflussmessreihen mit Hilfe von Modellsimulationen. Dabei wird das Modell anhand der kurzen Periode von gleichzeitigen Niederschlag- und Abflussmessungen geeicht. Danach kann mit einer langen Niederschlagsmessreihe eine Abflussreihe erzeugt und extremwertstatistisch ausgewertet werden.
Konzeptuelle und Black-Box-Modelle liefern bei sorgfältiger Anwendung befriedigende Resultate für Ereig-

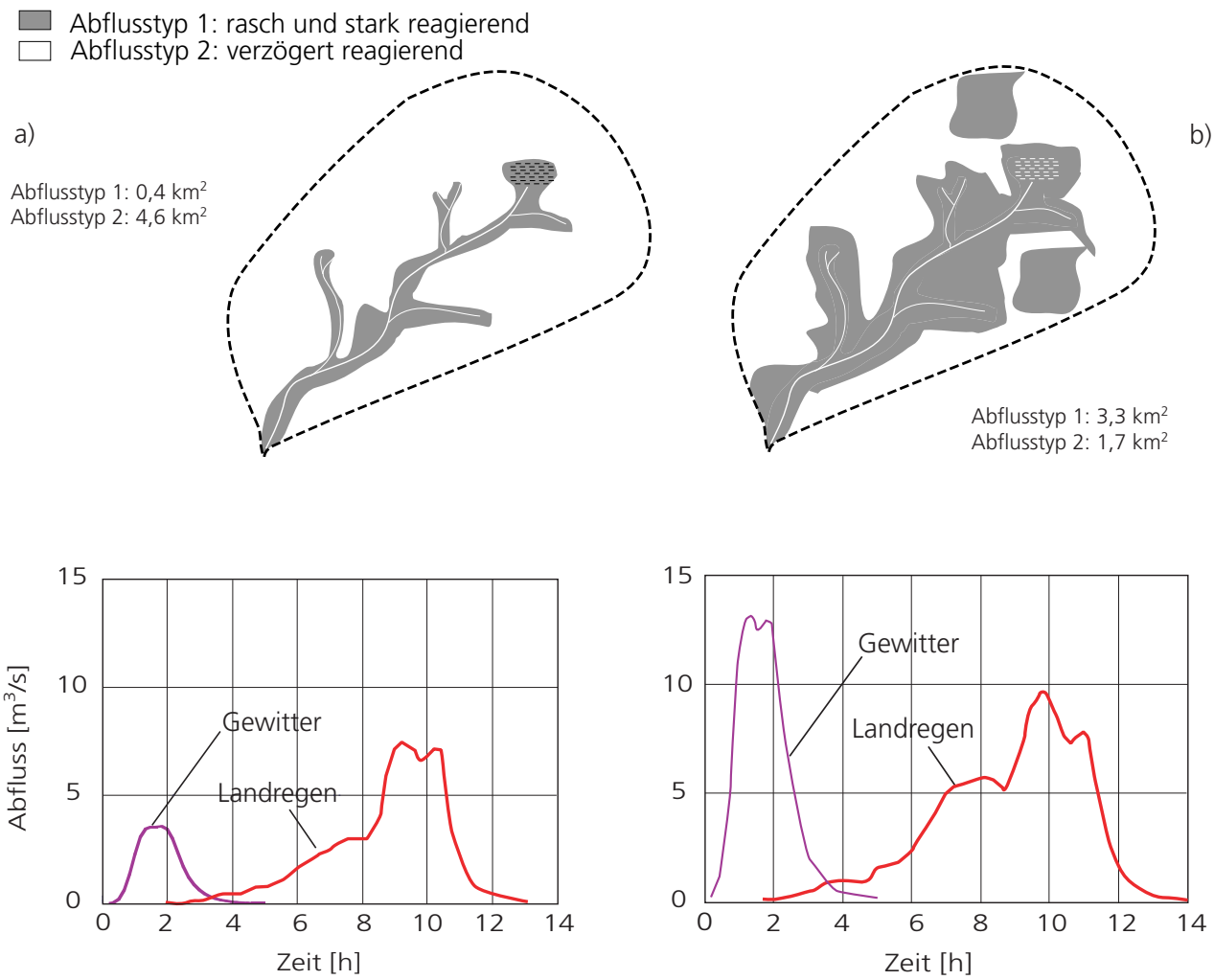


Fig. 4-2: Oben: Zwei Einzugsgebiete von 5 km² mit unterschiedlichen Anteilen an rasch beitragenden Flächen (8% und 66%). Unten: Abflussreaktion der beiden Gebiete auf ein Gewitter (violett) und auf Landregen (rot).

nisse, die in der Eichperiode enthalten sind; ihr Verhalten im Extrapolationsbereich ist jedoch schwer vorauszusagen. Dafür sind mehrere Faktoren verantwortlich. Bei der Eichung solcher Modelle müssen viele Parameter bestimmt werden, die keine direkte physikalische Bedeutung haben und sich deshalb nicht anhand von Gebietseigenschaften bestimmen lassen. Oft ergeben unterschiedliche Kombinationen von Parameterwerten vergleichbare Resultate, so dass sich das Modell nicht eindeutig an ein Gebiet anpassen lässt. Da versucht wird, eine möglichst gute Anpassung der berechneten Abflüsse an die gemessenen zu erreichen, werden Fehler in den Niederschlags- und Abflussdaten durch fehlangepasste Parameter kompensiert. Die Auswirkungen dieser Problematik zeigen sich kaum bei durchschnittlichen Hochwassern, sie können aber im Extrapolationsbereich zu sehr grossen Abweichungen führen. Je kürzer die zur Verfügung stehenden Datenreihen sind, desto unsicherer sind solche Extrapolationen. Eine Möglichkeit, die Eichung stabiler zu gestalten und Gebietsinformationen direkt in die Modelleichung einzubauen, beruht auf der Evaluation der Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet. Die entsprechende Vorgehensweise wird in den nächsten Abschnitten vorgestellt.

b) Einsatzmöglichkeit von NAM mit Einbezug der Abflussprozesse

Das folgende Beispiel zeigt, wie ein NAM kombiniert mit Erkenntnissen über die Abflussprozesse eingesetzt werden kann, um wichtige Fragen der Hochwasserentstehung und -grösse zu klären. Wie Kapitel 3.6 zeigt, reagieren Einzugsgebiete je nach Anteil der zum Hochwasserabfluss beitragenden Flächen unterschiedlich stark auf Starkniederschläge. Es ist bei einer Hochwasserabschätzung wichtig zu wissen, ob ein Gebiet stärker auf Gewitterereignisse oder eher auf langanhaltende Niederschläge anspricht. Dies wirkt sich auf die Grössenordnung der Abflüsse aus.
Figur 4-2 zeigt zwei 5 km² grosse Einzugsgebiete a und b. Obwohl beide Gebiete gleich gross sind, ist ihre Abflussbereitschaft unterschiedlich. Im Fall a zeigt ca. 1/10 der Einzugsgebietsfläche eine starke Reaktion, 9/10 des Gebiets tragen verzögert zum Abfluss bei. Im Gegensatz dazu weist bei Fall b ca. 2/3 der Gebietsfläche eine hohe Abflussbereitschaft auf, 1/3 ist verzögert beitragend. Ebenfalls in Fig. 4-2 ist die mit einem NAM ermittelte Abflussreaktion auf einen Gewitterregen von 60 mm in 2 h und einen Landregen von 100 mm in 10 h dargestellt.
Die Abflussreaktion beim Einzugsgebiet b ist wesentlich stärker als bei a. Im Einzugsgebiet a erzeugen Gewitter keine grossen Abflüsse. Erst ergiebige Niederschläge, die auch die verzögert reagierenden Flächen aktivieren, führen zu grossen Abflussspitzen. Beim Gebiet b hingegen ist die Reaktion auf Gewitter wesentlich grösser als bei lang andauernden, ergiebigen Niederschlägen.
Sind in einem Einzugsgebiet Erkenntnisse über die Abflussprozesse und die hochwasserrelevanten Flächen vorhanden, lässt sich mit einem geeigneten NAM entscheiden, welche Niederschläge massgebend sind. Dieses Vorgehen erlaubt Aussagen über die Grösse von seltenen Hochwasserabflüssen.

c) Einsatz eines NAM bei einer Hochwasserabschätzung im Baselbieter Jura

Einleitung

Am Eibach (Einzugsgebiet 27 km²) im Baselbieter Tafel- und Faltenjura wird aufgezeigt, wie NAM in Kombination mit Untersuchungen über die Abflussprozesse bei der Hochwasserabschätzung eingesetzt werden können.
In der Vergangenheit haben Hochwasser im Eital immer wieder zu Überschwemmungen geführt. Nach solchen Ereignissen stellte sich jeweils die Frage, wie häufig Abflüsse dieser Grösse zu erwarten sind und inwieweit die bestehende Gerinnekapazität ausreichende Sicherheit gewährleistet. Einer statistischen Herleitung der Hochwasserabflüsse stand die kurze Abflussmessreihe von nur 25 Jahren im Wege. Deshalb veranlasste das Tiefbauamt des Kantons Basel-Landschaft eine umfassende hydrologische Untersuchung zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse.

Vorgehensweise

Die Vorgehensweise bei solchen Untersuchungen kann in folgende Teilschritte unterteilt werden (Fig. 4-3):
- Zusammentragen von Daten und Informationen zu Abflussprozessen,
- räumlich differenzierte Beurteilung der Abflussprozesse,
- Erstellen eines geeigneten NAM (Plausibilisierung seiner Reaktionsweise),
- Abflussberechnungen gemäss Szenarien.

Wird bei den ersten Modellrechnungen eine schlechte Übereinstimmung zwischen den berechneten und den beobachteten Abflüssen erreicht, wird die Kartierung der Abflussprozesse hinterfragt. Eventuell werden damit zusätzliche Untersuchungen im Gelände notwendig, um zu verstehen, welche Abflussprozesse im Einzugsgebiet tatsächlich bei Hochwasser ablaufen.

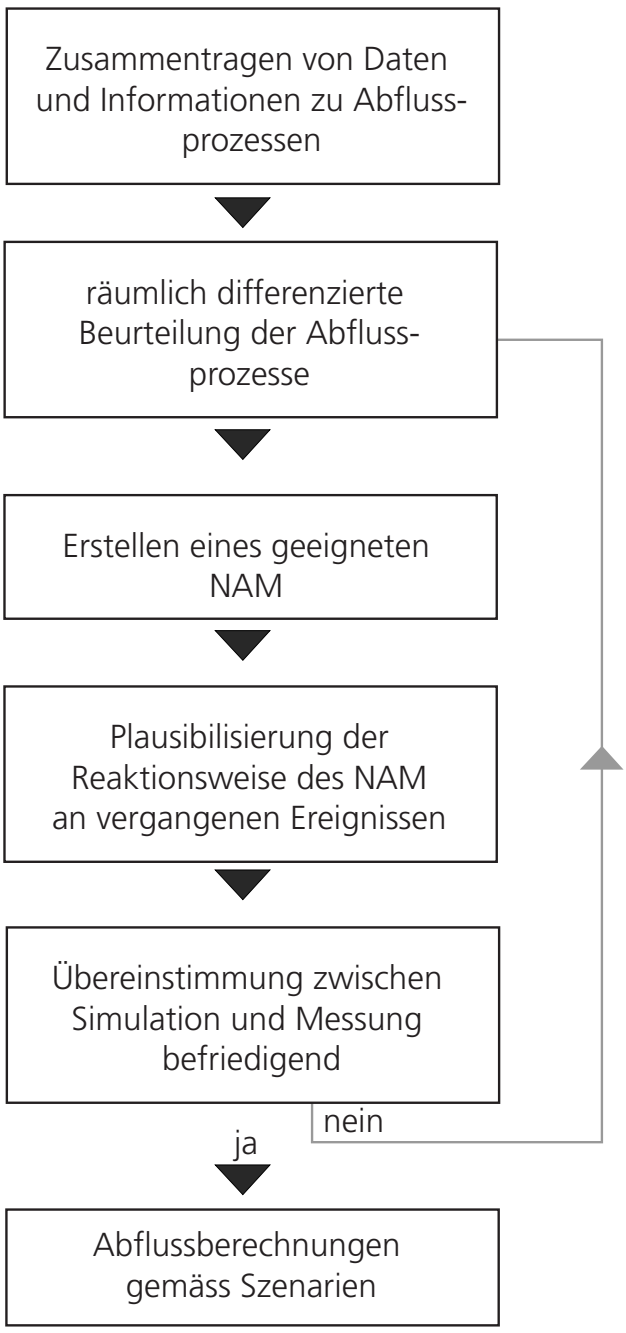


Fig. 4-3: Vorgehensweise: Modelleinsatz bei der Abschätzung von Hochwasserabflüssen unter Berücksichtigung der Abflussprozesse.

Bodenkarten mit hoher räumlicher Auflösung geben wichtige Hinweise auf die Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet. Üblicherweise sind aber solche Karten nicht verfügbar, sodass anhand der geologischen Verhältnisse und eigener Erhebungen im Gelände (Bodensondierungen) eine auf hydrologische Fragestellungen ausgerichtete Bodenkarte entwickelt werden muss. Hauptkriterien sind die Wasserdurchlässigkeit des Bodens aufgrund der Matrix und der Makroporen sowie die Gründigkeit der Böden (vgl. dazu auch Kap. 3).
Mit diesen Informationen können die dominanten Abflussprozesse im Einzugsgebiet räumlich differenziert erhoben werden.
Anhand vergangener Hochwasser wird das NAM überprüft. Stimmen die gemessenen und berechneten Werte in etwa überein, bildet das Modell die massgebenden Prozesse zufriedenstellend nach. Klaffen die Messungen und die Berechnungen stark auseinander, muss die Prozessbeurteilung überdacht werden. Mit zusätzlichen Felduntersuchungen können Fehler bei der Beurteilung ermittelt und korrigiert werden.
Bildet das Modell die gemessenen Hochwasserabflüsse befriedigend nach, sollte es anhand weiterer Hochwasserereignisse geprüft werden (Validierung). Danach kann mit dem NAM die Abflussreaktion des Gebiets auf seltene Niederschlagsereignisse untersucht werden.

Abflussbereitschaft

Böden und Geologie
Der südlichste Teil des Gebiets liegt im steilen Faltenjura, der nördliche Teil im Tafeljura. Im Tafeljura wechseln sich flache bis leicht hügelige, landwirtschaftlich (v.a. ackerbaulich) genutzte Hochflächen mit bewaldeten Steilhängen ab. Der Faltenjura ist weitgehend von steilen Hängen mit Wald- und Grünlandnutzung geprägt. Der geologische Untergrund variiert im Einzugsgebiet des Eibachs stark. Kaum durchlässige Opalinustone liegen neben hoch durchlässigem verkarsteten Hauptrogenstein. Die Böden, die sich auf solchen Gesteinsformationen entwickeln, unterscheiden sich stark in Durchlässigkeit und Speichervermögen. Folglich ist auch mit ausgeprägten räumlichen Unterschieden bei der Abflussbildung zu rechnen, was sich auf die Entstehung und Grösse von Hochwasserabflüssen wesentlich auswirkt.
Auf der Grundlage von bodenkundlichen, geologischen und topographischen Karten, Luftbildern sowie eigenen Bodensondierungen wurde ein umfassendes Bild der Böden im Einzugsgebiet erstellt. Auf den verkarsteten Tafelflächen entwickelten sich durchlässige bis extrem durchlässige sandig-lehmige Braunerden und Rendzinen. Besonders an den Abhängen der

Tafeln, wo sich Bergsturzmaterial und Gehängeschutt akkumulierte, sind die Böden sehr durchlässig. Insgesamt zeichnet sich das Einzugsgebiet des Eibachs durch ausgedehnte Gebiete mit hoch durchlässigen und speicherfähigen Böden aus. Allerdings gibt es auch weniger gut durchlässige, feuchte bis sogar vernässte Böden auf tonig-lehmigen Substraten (Opalinuston, Hanglehme, Rissmoräne).

Abflussprozesse und Abflusstypen
An Orten mit hoch durchlässigen Boden- und Gesteinsschichten finden sich gute Infiltrations- und Speichereigenschaften. Dort ist bei Starkregen Tiefensickerung (DP) zu erwarten. Gebiete mit weniger durchlässigen Böden liegen z.B. südöstlich von Wenslingen (Riss-Moräne), westlich und östlich von Zeglingen; hier entsteht bei Starkniederschlägen rasch Oberflächenabfluss als Folge von Infiltrationshemmnissen. Im Gegensatz dazu bildet sich auf den durchlässigen Böden der Tafelflächen, wo das Niederschlagswasser nicht im Untergrund entschwindet, auf mässig bis stark abfallenden Abhängen (Gehängelehmbereiche) verzögerter bis stark verzögert Oberflächenabfluss als Folge langsam sich sättigender Böden. Gebiete mit Abflüssen im Boden kommen im Einzugsgebiet nur begrenzt vor, da hochdurchlässige Bodenschichten mit lateralen Fliesswegen über einer Stauschicht nicht verbreitet vorhanden sind. Die steilen Abhänge der Tafeln mit teilweise mächtigen Lockermaterialdecken bilden ebenfalls ideale Voraussetzung für Tiefensickerung, in einzelnen bewaldeten Gebieten ist auch ein stark verzögerter Abfluss im Boden möglich.

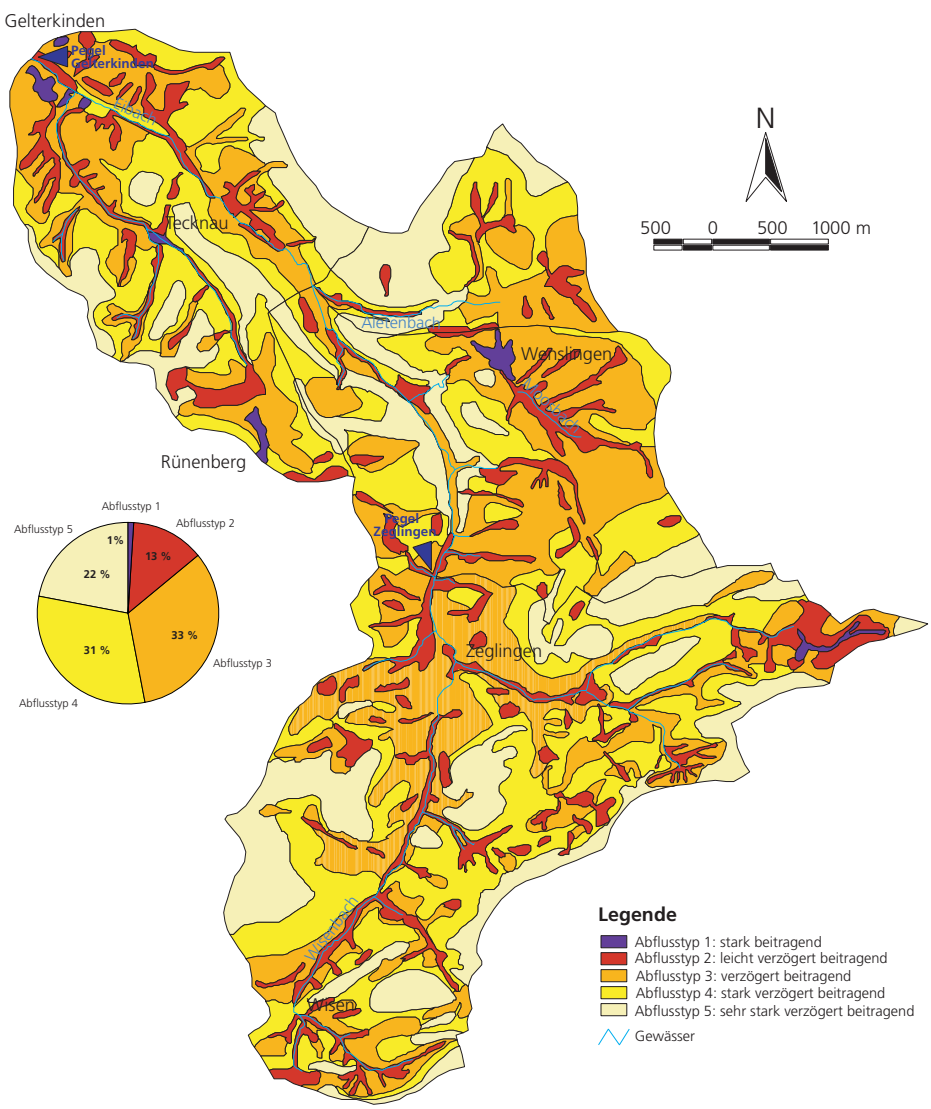


Fig. 4-4: Einzugsgebiet des Eibach (BL):
Die Abflusstypen 1–5 beschreiben die zu erwartende Abflussreaktion der Teilflächen.

Figur 4-4 zeigt Flächen mit ähnlicher Abflussreaktion, sogenannte *Abflusstypen*. 14% des Einzugsgebiets bestehen aus Flächen mit rascher oder nur leicht verzögerter Abflussbildung (Abflusstyp 1 und 2). Rund ein Drittel des Einzugsgebiets trägt erst mit Verzögerung zum Abfluss bei (Abflusstyp 3). Über 50% der Gebietsfläche zeigen eine stark bis sehr stark verzögerte Abflussbildung (Abflusstyp 4 und 5).
Bei kurzen intensiven Niederschlägen tragen nur die Flächen des Abflusstyps 1–3 wesentlich zum Abfluss bei. Bei längeren Niederschlagsereignissen beginnt der Abflusstyp 4 zum Abfluss beizutragen, während Abflusstyp 5 auch bei länger dauernden Ereignissen kaum abflusswirksam wird. Flächen mit hoher Abflussbereitschaft (Abflusstyp 1 und 2) finden sich in verschiedenen Teilen des Gebiets.

Das Modell und seine Grundlagen
Das Modell setzt die im Gelände erfassten Gebietseigenschaften über die Abflussbildung in Abflüsse um. Es dient aber auch der Prüfung der entwickelten Vorstellung der Abflussbildung und als Werkzeug, um auf extreme Ereignisse zu extrapolieren. Erst wenn das Modell vergangene Hochwasserabflüsse nachzubilden vermag, kann es dazu eingesetzt werden, die Reaktion des Einzugsgebiets auf seltenere Starkniederschläge zu untersuchen.
Das eingesetzte Modell QArea wurde am IHW (Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich) entwickelt. Der Aufbau des Modells ist in Fig. 4-5 dargestellt und die Grundlagen in Fig. 4-6. QArea berücksichtigt die räumliche Verteilung der Abflusstypen im Einzugsgebiet, die Isochronen (Laufzeiten des Abflusses in den Gerinnen und auf den Flächen) und

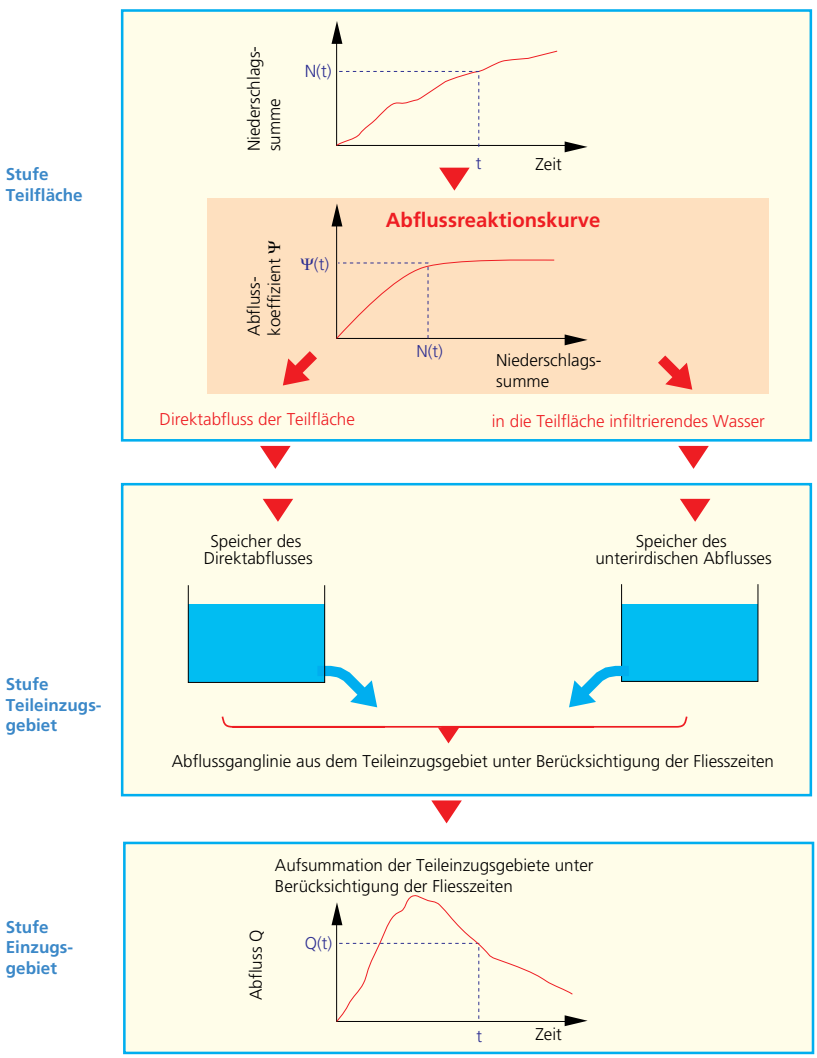


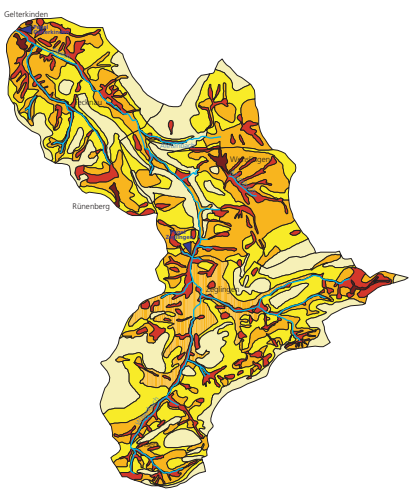
Fig. 4-5: Der Aufbau des Modells QArea.

ein Raster für die Positionierung einer Gewitterzelle im Einzugsgebiet. Die Abflussreaktionskurven beschreiben den Anteil des abfliessenden Niederschlags für jeden Abflusstyp.
Der Niederschlag wird im Modell aufgeteilt in Direktabfluss und in den Boden infiltrierendes Wasser. Das infiltrierte Wasser wird im Boden gespeichert und verzögert wieder abgegeben. Die Reaktion dieser Bodenspeicher wird mit linearen Speichern modelliert, dabei wird für jeden Abflusstyp eine eigene Speichercharakteristik angenommen. Der Direktabfluss erfährt auf dem Weg ins Gerinne eine Verzögerung durch Retention (Oberflächenspeicher), die ebenfalls mit einem linearen Speicher simuliert wird.

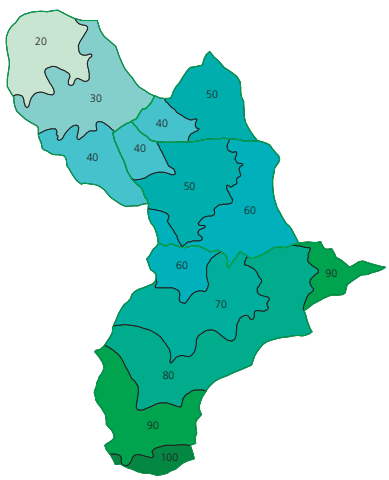
Abflussberechnungen

Plausibilisierung des Modells
Das Modell wurde anhand zweier vergangener Hochwasser (Fig. 4-7) plausibilisiert. Beim Hochwasser vom 19. Mai 1994 wurden innerhalb von 20 Stunden 82 mm Niederschlag registriert, beim Gewitter vom

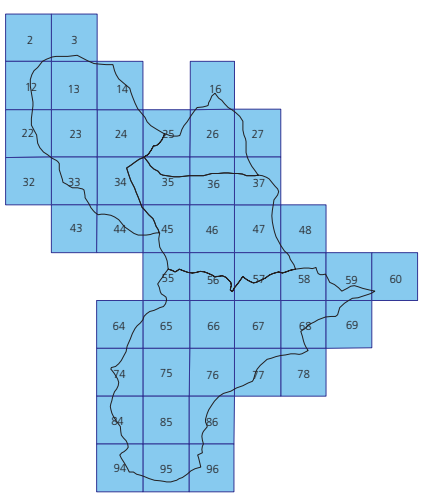
(a) Abflusstypen



(b) Isochronen



(c) räumlich differenzierter Niederschlags-Input



(d) Abflussreaktionskurven

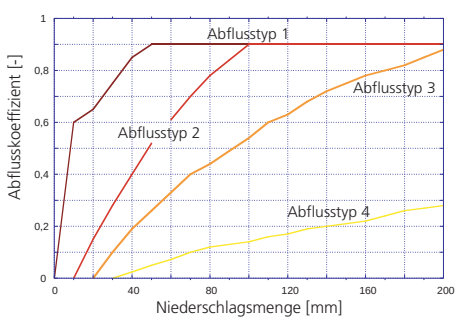


Fig. 4-6: Grundlagen des Modells QArea: a) Die Karte der Abflusstypen beschreibt räumlich differenziert die Abflussreaktion des Einzugsgebiets. b) Die Isochronen berücksichtigen die unterschiedlichen Fliesszeiten in den Gerinnen und den Einzugsgebietsflächen in Minuten. c) Ein Raster erlaubt es, Gewitterzellen in unterschiedlichen Gebieten zu platzieren. d) Die Abflussreaktionskurven beschreiben den Anteil des abfliessenden Niederschlags mit zunehmender Niederschlagsmenge.

6. August 2000 fielen in etwa 2 Stunden 60 mm Niederschlag. Die Figur 4-7 zeigt, dass das Modell sowohl den Verlauf als auch die Spitze und das Volumen der beiden Hochwasser nachbilden konnte.

Abflussberechnungen
Mit diesem Modell wurde im Weiteren untersucht, wie das Gebiet auf seltenere und grössere Niederschläge reagiert. Dabei stellte sich die Frage, ob langanhaltende Niederschläge oder Gewitterregen die grössten Abflüsse bilden. Ein Gewitter hat eine begrenzte Grösse und deckt nicht gleichzeitig das ganze Gebiet von 27 km² Grösse ab. Da das Modell die Abflussbildung im Gebiet räumlich differenziert erfasst, kann die Reaktion des Gebiets auf räumlich unterschiedlich positionierte Gewitterzellen untersucht werden. Trotz der Grösse des Einzugsgebiets von über 20 km² vermögen starke lokale Gewitter wesentlich grössere Abflüsse zu erzeugen als lang anhaltende ergiebige Niederschläge, die das ganze Einzugsgebiet gleichmässig treffen. Allerdings müssen diese Gewitter Flächen mit hoher Abflussbereitschaft treffen (z.B. im Bereich zwischen Wenslingen und Zeglingen). Erkundungen über die historischen Hochwasser der letzten 100 Jahre belegen diesen Befund. Die grössten bekannten Hochwasser (1917, 1985, 2000) wurden von Gewitterniederschlägen ausgelöst. Lang anhaltende Niederschlägen wie z.B. im Mai 1999 oder im Februar 1999 kombiniert mit Schneeschmelze waren nicht in der Lage, ähnlich grosse Abflussspitzen zu erzeugen. Das Modell erlaubte es, zusammen mit Untersuchungen über historische Hochwasser, Aussagen über die Grösse seltener Hochwasserabflüsse zu machen. Das so abgeschätzte HQ100 liegt bei ca. 35 m³/s.

d) Schlussfolgerung
Niederschlag-Abfluss-Modelle werden meist durch Parameteranpassung geeicht und dann zur Extrapolation von Hochwasserabflüssen verwendet. Stabilere Resultate können erzielt werden, wenn die Reaktionen der Böden auf Starkniederschläge, und damit die massgebenden Abflussprozesse, erfasst werden. Mit diesen Grundlagen können NAM wesentlich verbessert werden. Wie sich ein Gebiet bei extremeren Niederschlägen verhält und welche Niederschlagsart (kurze, intensive oder lange, weniger intensive Niederschläge) bei der Erzeugung grosser Abflüsse relevant ist, kann dadurch besser beurteilt werden als mit herkömmlichen NAM.

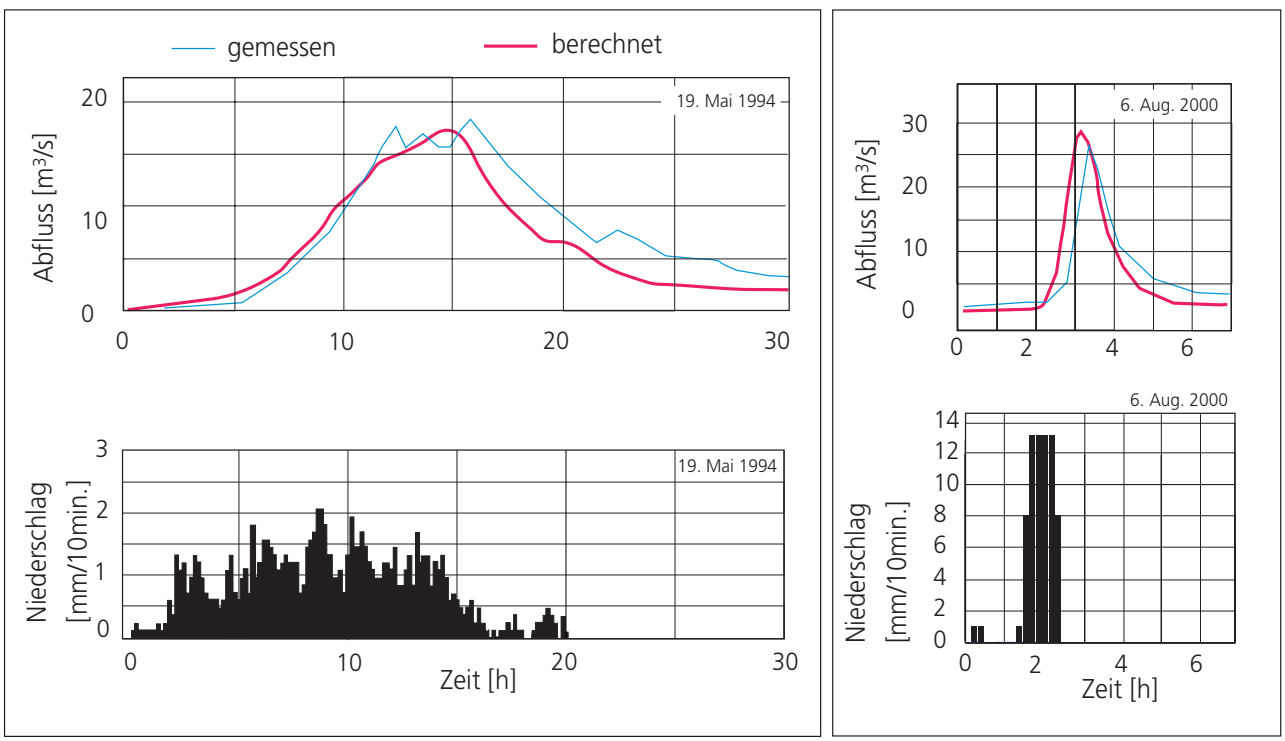


Fig. 4-7: Die Plausibilisierung des NAM anhand von zwei gemessenen Hochwasserereignissen im Eibach.

4.1.2 Hochwasserabschätzung mit einem stochastischen Ansatz in Kombination mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell

Der hier vorgestellte Ansatz zur Untersuchung seltener Hochwasser (Wiederkehrperioden in der Grössenordnung von 100 Jahren) wurde am Labor für «Hydrologie et Aménagements» (HYDRAM) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) entwickelt. Er kann auch zur Untersuchung von ausserordentlichen Hochwassern angewendet werden (längere Wiederkehrperioden, siehe Kapitel 4.3). Die im Abschnitt c) beschriebene Methodik wurde im Rahmen des Projekts CONSECRU (*CONSUEGRA et* al. 1998) für das obere Einzugsgebiet der Rhone optimiert. Diese Studie, die vom Staatsrat des Kantons Wallis in Auftrag gegeben wurde, hatte das Ziel, die Folgen seltener Rhone-Hochwasser abzuschätzen und ihnen vorzubeugen. Sie wurde nach den katastrophalen Überschwemmungen vom September 1993 im Oberwallis (speziell in Brig) erarbeitet. Die am HYDRAM entwickelte Methode der Verwendung von mehreren Ereignissen (eine so genannte Multi-Ereignis-Methode) ist ein gemischter Ansatz: Er basiert auf der Anwendung eines stochastischen Generators von chronologischen Niederschlagsserien und eines ereignisbasierten Niederschlag-Abfluss-Modells. Diese Methode nähert sich einem auf kontinuierliche Simulation gestützten Ansatz an (vgl. Abschnitt a).

a) Stochastische Erzeugung von Niederschlags- und Abflussserien durch kontinuierliche Simulation

Prinzip
Die Idee dieser Methodik besteht darin, die seltenen und ausserordentlichen Hochwasser zu studieren, indem man die hydrologische Reaktion des Studiengebietes mit unterschiedlichen Niederschlags- und hydrologischen Bedingungen simuliert. Dazu wird ein *Modell zur stochastischen Erzeugung von zeitlichen Niederschlagsserien mit einem für das Einzugsgebiet geeigneten Niederschlag-Abfluss-Modell verknüpft*.
Das Niederschlag-Abfluss-Modell wird in einem kontinuierlichen Simulationsmodus angewendet, wodurch aus einer durch den stochastischen Niederschlagsgenerator erzeugten Niederschlagsserie eine chronologische Abflussserie erzeugt werden kann.
Der Niederschlagsgenerator erlaubt die Erzeugung von chronologischen Niederschlagsserien, deren statistische Parameter denen der gemessenen Niederschlagsserien entsprechen (Wahrscheinlichkeit einer Trockenzeit, Varianz oder Extremwerte der Niederschlagshöhe für ein oder mehrere Zeitintervalle). Mit dem stochastischen Niederschlagsgenerator können *beliebig viele, plausible Niederschlagsszenarien* für die aktuellen klimatischen Gegebenheiten simuliert werden: Man kann also Niederschläge unterschiedlicher Form und Intensität erzeugen. Man kann auch die Dauer der Unterbrüche zwischen einzelnen Ereignissen variieren oder, durch eine rasche Folge seltener Ereignisse, aussergewöhnliche hydrologische Situationen simulieren.
Parallel dazu sollten es die Modelle mit kontinuierlicher Simulation gestatten, den Sättigungszustand des Einzugsgebietes, und dadurch die zeitliche Entwicklung der Versickerungskapazität, mitzuverfolgen. Diese Modelle benötigen jedoch ein Modul zur Simulation des unterirdischen Teils des Abflusses. Im Gegensatz dazu begnügen sich die ereignisbasierten Modelle mit der Analyse der Oberflächenabflüsse. Eine kontinuierliche Simulation *führt also zu einer grossen Anzahl von möglichen hydrologischen Ereignissen*, die einerseits durch den Niederschlag und andererseits durch die darauf folgende Reaktion des Einzugsgebietes bestimmt sind: Es können zum Beispiel verschiedene Sättigungszustände des Einzugsgebietes simuliert werden oder unterschiedliche Hochwassersituationen und Überlagerungs-Hochwasser (im Fall von zwei kurz aufeinander folgenden Niederschlägen).

Abschätzung der Wiederkehrperiode, Hochwasserganglinien
Der maximale Abfluss für eine Wiederkehrperiode *T* (zum Beispiel T = 100 Jahre) kann mit Hilfe von simulierten Abflussmengen der gleichen Periode und einer klassischen statistischen Anpassung berechnet werden. Wird jedoch eine Abflussserie von nur X Jahren erzeugt, ist der für das *T*-Jahre-Quantil berechnete Wert fragwürdig. Wenn man nämlich eine andere chronologische Niederschlagsserie von gleicher Dauer sowie die dazugehörige Abflussreihe erzeugt, erhält man andere jährliche Maximalwerte und folglich eine andere Schätzung für das Jahrhunderthochwasser. Dies ist auch aus dem nachfolgend abgebildeten Gumbel-Diagramm ersichtlich (siehe Figur 4-8). Es stellt die Quantile der maximalen Abflussmengen für verschiedene, durch kontinuierliche Simulation erzeugte Abflussreihen der Rhone in Brig dar. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, eine stochastische Erzeugung von *N* chronologischen Niederschlagsserien durchzuführen (typischerweise *N* = 100) und daraus N kontinuierliche Abflussserien zu erzeugen. In der Folge können *N* statistische Anpassungen (zum Beispiel mit einer Gumbel-Verteilung) an die maximalen jährlichen Abflussmengen vorgenommen werden. Daraus sind wiederum *N* Schätzungen des Quantils der Spitzenabflussmenge für eine Wiederkehrperiode *T* möglich.

Zusätzlich zum traditionellen Wert für ein gegebenes Quantil (in unserem Fall der Median der *N* Schätzungen) kann also auch ein mögliches *Variations-Intervall des Quantils* errechnet werden (das Intervall kann zum Beispiel so bestimmt werden, dass es 90% der Quantile enthält). Es ist daher möglich, für eine bestimmte Wiederkehrperiode diejenigen Ereignisse aus der erzeugten Abflussserie zu entnehmen, deren maximaler Abfluss innerhalb des Wahrscheinlichkeitsintervalls liegt. Dieser *Ereigniskatalog* erlaubt es zum Beispiel, eine Sensibilitätsanalyse der Auswirkungen einer Überschwemmung in Abhängigkeit der über die Ufer getretenen Wasservolumina vorzunehmen. Anhand der vorgeschlagenen Methode kann also eine grosse Anzahl von Hochwasserganglinien erstellt werden, wodurch die schwierige Wahl eines einzigen Abflusses und einer einzigen Bemessungsganglinie entfällt.

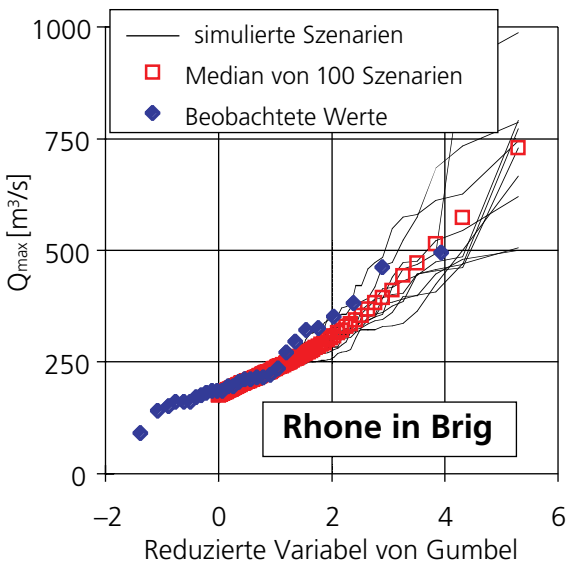


Fig. 4-8: Vergleich der statistischen Verteilungen der beobachteten und simulierten Abflussmengen (aus CONSUEGRA et al. 1998).

Weitere Vorteile der kontinuierlichen Simulation
Dieser Ansatz besitzt weitere Vorteile, deren ausführliche Beschreibung den Rahmen dieser Publikation sprengen würde:

– Die kontinuierliche Simulation macht nicht nur die Untersuchung von Hochwassern möglich, sondern sie erlaubt es auch, den Niedrigwasserstand, den Wasserhaushalt sowie die Versagens- oder Funktionshäufigkeit des zu untersuchenden Systems zu studieren (*HINGRAY et al.* 2000, *GUEX et al.* 2001).
– Die stochastische Erzeugung von Niederschlägen kann auch zur Simulation von Niederschlagsserien verwendet werden, deren statistische Charakteristiken repräsentativ sind für verschiedene *Szenarien zur möglichen zukünftigen Klimaentwicklung*. Die Parameter des Generators werden dementsprechend angepasst. Dieser Ansatz wurde am HYDRAM im Rahmen des NFP31 für das Einzugsgebiet der Broye (Schweizer Mittelland) verfolgt (*OVERNEY et al.* 1997). Der Einfluss einer Veränderung der Niederschläge auf den Wasserhaushalt der Broye in Payerne (400 km²) und auf das Fliessverhalten des Wasserlaufes bis Murten wurde anhand von Klimaerwärmungs-Szenarien des International Panel on Climate Change (Szenarien IPCC A für das Jahr 2100 – *BENISTON et al.* 1992) abgeschätzt. Ein solcher Ansatz ermöglicht natürlich auch die Untersuchung von Hochwassern unter zukünftigen klimatischen Bedingungen.

b) Stochastische Erzeugung von Niederschlags- und Abflussserien durch Multi-Ereignis-Simulation

In alpinen Gebieten können Gletscher- oder Schneeschmelz-Zuflüsse die hydrologische Reaktion des Einzugsgebietes stark beeinflussen. Die Modellierung der zeitlichen Entwicklung dieser Zuflüsse, speziell über ein ganzes Jahr hinweg, ist häufig problematisch. Aus diesem Grund wurde ein ereignisbasierter Modus (oder besser gesagt ein Multi-Ereignis-Modus) gewählt, obwohl das für das obere Einzugsgebiet der Rhone entwickelte Niederschlag-Abfluss-Modell auch in einem kontinuierlichen Modus angewendet werden kann. Die Anwendung eines ereignisbasierten Ansatzes setzt gewisse Kenntnisse der Anfangsbedingungen voraus. Dazu wurde ein weiterer stochastischer Ansatz ausgearbeitet, um die Werte der zur Charakterisierung dieser Anfangsbedingungen notwendigen Variablen aus geeigneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zufällig zu ziehen und das hydrologische Modell so zu initialisieren. Die entwickelte Methodik ist also gemischt: In einer ersten Phase wird ein Modell zur *stochastischen Erzeugung von Niederschlägen* angewandt, anhand dessen beliebig viele chronologische Niederschlagsserien (kontinuierliche Serien) simuliert werden können. Jeder dieser Serien werden dann auf Grund eines Selektionskriteriums (für unsere Studie wurde die Niederschlagshöhe des Ereignisses verwendet) die kritischen Niederschlagsereignisse entnommen, das heisst die Niederschläge, die möglicherweise ein bedeutendes Hochwasser erzeugen könnten. *Für jedes der so gewählten kritischen Niederschlagsereignisse* wird daraufhin das *hydrologische Modell initialisiert (mit einer möglichen, stochastisch erzeugten Grundkonfiguration* des Einzugsgebietes). Dieses wird schliesslich zur *Berechnung eines entsprechenden Hochwasser-Szenarios* benutzt. Man erhält also für jede chronologische Niederschlagsserie eine Serie von Hochwasserszenarien, anhand der die gebräuchlichen statistischen Analysen durchgeführt werden können.

c) Anwendung am Beispiel des oberen Einzugsgebiets der Rhone

Die oben erwähnte Multi-Ereignis-Methode wurde auf das obere Einzugsgebiet der Rhone angewandt. Sie kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Erstellung eines Niederschlag-Abfluss-Modells zur Simulation des Abflusses beim Auslauf des Studiengebietes (ereignisbasierter Modus mit stündlichem Zeitintervall)
- Kalibrierung des Niederschlag-Abfluss-Modells anhand von bedeutenden beobachteten Ereignissen, für die zeitlich übereinstimmende Niederschlags- und Abflussdaten zur Verfügung stehen
- Erstellung eines Schemas zur räumlichen Niederschlagsverminderung anhand von kritischen Niederschlagssituationen
- Aufstellung und Kalibrierung des stochastischen Modells zur zeitlichen Erzeugung von Niederschlägen anhand von örtlich beobachteten, zeitlichen Niederschlagsserien
- Erzeugung von 100 chronologischen Niederschlagsserien mit einer Dauer von je 120 Jahren
- Erstellung der dazugehörigen Hochwasserserien und Auswahl der kritischen Ereignisse
- Erstellung eines Hochwasserkataloges, anhand dessen verschiedene statistische Analysen vorgenommen werden können.

In den folgenden Abschnitten werden einige besondere Aspekte der verschiedenen Arbeitsschritte und die Resultate der Studie zusammengefasst. Detaillierte Angaben findet man in CONSUEGRA et al. 1998.

Erstellung und Kalibrierung des Niederschlag-Abfluss-Modells

Die Suche nach einem alpinen Verhältnissen angepassten hydrologischen Modell hat zur Entwicklung von SOCONT (*BÉROD* 1994) geführt. Es handelt sich um ein Modell mit einem *linearen Reservoir zur Erzeugung des Basisabflusses* und einem *nicht-linearen Reservoir zur Erzeugung des direkten Abflusses*, das auf der Theorie der kinematischen Welle basiert. Das Studiengebiet umfasst eine Fläche von ungefähr 3750 km^2 (die Rhone in *Branson*); die Modellierung erfordert eine Unterteilung in Teileinzugsgebiete mit einer Grösse von ungefähr 50 km^2.

Die Kalibrierung der Parameter des Modells SOCONT wurde an den Einmündungen der hochwasserrelevanten Zuflüsse vorgenommen (konkret sind das die Rhone in Brig und die Vispa in Visp). Die Kalibrierung konnte nur anhand der Abflussganglinien der Grossereignisse vom August 1987 und September 1993 vorgenommen werden. Die hydroelektrischen Anlagen, die in den fünfziger Jahren errichtet wurden, haben das hydrologische Verhalten der Einzugsgebiete der Region nachhaltig verändert. Es sind aber nur für die Grossereignisse von August 1987 und September 1993 genaue Aufzeichnungen über die Wasserumleitungen und die Zuflüsse aus den Stauwerken vorhanden (*BIEDERMANN et al.* 1996).

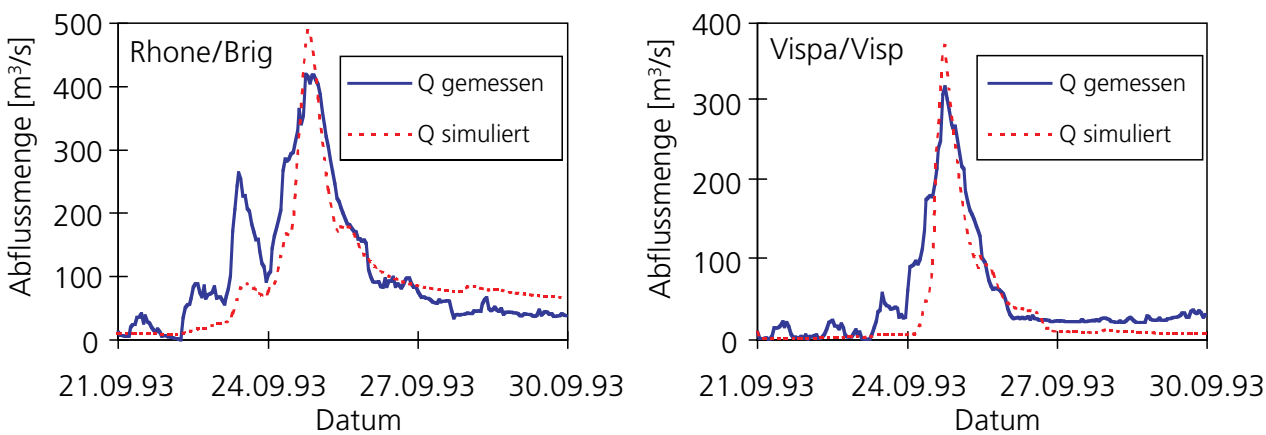


Fig. 4-9: Beobachtete und simulierte Abflussganglinien für die Rhone in Brig und für die Vispa in Visp. Der Vergleich erfolgte ohne Berücksichtigung der Gletscherkomponente (aus CONSUEGRA et al. 1998).

Der stochastische Niederschlagsgenerator
Angesichts der Ausmasse des oberen Einzugsgebietes der Rhone muss die räumliche Variabilität der Niederschläge berücksichtigt werden. Ein Niederschlagsfeld-Typ konnte als besonders kritisch für die Bildung von grossen Hochwassern (wie die von August 1987 und September 1993) identifiziert werden. Dies ist fast immer die Folge von Regenfronten, die vom Süden der Alpen herkommen und die von warmer Luft und von intensiven Niederschlägen (von einem oder mehreren Tagen) begleitet werden. Während Niederschlagsereignissen dieses Typs konzentrieren sich die Niederschläge hauptsächlich auf die Einzugsgebiete am linken Rhone-Ufer, speziell auf das Einzugsgebiet der Vispa. Die Maximalniederschläge konzentrieren sich auf die Achse *Binn-Simplon*. In der Folge wurde für alle erzeugten Niederschlagsereignisse das *für die Situation «Binn – Simplon» repräsentative Schema zur räumlichen Niederschlagsverminderung* benutzt. Dieses ist am *Geographischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (GIETHZ)* erstellt worden.
Zur Erzeugung der zeitlichen Niederschlagsserien der Station *Simplon* hat das HYDRAM das *Neymann-Scott Rectangular Pulses Modell* (NSRPM) verwendet. Zusätzliche Information über dieses Modell findet man in *COWPERTWAIT (1991)* und in *FAVRE et al. (1997)*. Das NSRPM-Modell ist so ausgelegt, dass es die Mittelwerte, die Varianz und die Autokorrelation des Niederschlagsprozesses wiedergibt (für verschiedene Zeitintervalle). Das Konzept des NSRPM-Modells stellt dabei den Niederschlag als Folge von mehren Fronten dar, die durch trockene Intervalle unterbrochen sind. Eine Front setzt sich aus mehreren rechteckigen Zellen zusammen, die durch einen zeitlichen Ursprung, eine Dauer und eine Intensität definiert sind. Die 5 Parameter, die sich analytisch durch die Momente erster und zweiter Ordnung sowie die Autokorrelation zwischen zwei aufeinander folgenden Zeitschritten ausdrücken lassen, sind die folgenden: die durchschnittliche Auftrittsrate von Fronten, die durchschnittliche Intensität, die durchschnittliche Dauer, Position und Anzahl der Zellen. Wie in Figur 4-10 dargestellt ist, handelt es sich dabei um den mathematischen Erwartungswert der Variablen *L, X, E, B* und *C*. Diese 5 Variablen, die einer exponentiellen, einer geometrischen oder einer Poisson-Verteilung folgen, werden zufällig und unabhängig voneinander erzeugt.

L: Zeit zwischen den Ursprüngen
B: Position der Zelle
E: Dauer der Zelle
C: Anzahl der Zellen
X: Intensität der Zelle

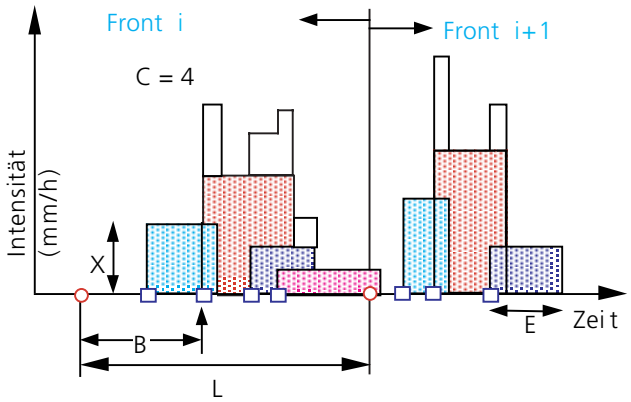


Fig. 4-10: Darstellung des Niederschlagsprozesses durch das NSRPM-Modell (FAVRE et al. 1997).

Zur Vermeidung der Probleme, die in einem Stichprobenverfahren vom Typ Monte-Carlo auftreten, wurden *100 Niederschlagsserien mit einem Zeitschritt von einer Stunde (jede mit einer Dauer von 120 Jahren)* mit dem NSRPM-Modell erzeugt. Die aus diesen Serien erstellten Bemessungs-Hyetogramme werden danach anhand des Schemas des GIETHZ räumlich vermindert. Dies ermöglicht die Bestimmung der repräsentativen Wasserhöhen des auf ein gegebenes Einzugsgebiet gefallenen Niederschlages. Zur Unterscheidung zwischen flüssigen und festen Niederschlägen wird jedem Niederschlagsereignis eine Nullgrad-Isotherme (Schneefallgrenze) zugeordnet, die zufällig aus einer empirischen Verteilung (basierend auf Messungen der Monate August und September) gezogen wird.

Herleitung von Hochwasserszenarien – Initialisierung des hydrologischen Modells
Das Niederschlag-Abfluss-Modell wird in einem ereignisbasierten Modus angewendet. Das Ziel ist dabei die Erzeugung eines Hochwasser-Szenarios für jedes Niederschlagsereignis, das aus den im vorhergehenden Schritt erzeugten chronologischen Niederschlagsserien ausgewählt wurde. Die einzelnen Etappen zur Erstellung der Hochwasserszenarien sind in Figur 4-11 zusammenfassend dargestellt.
Zur Initialisierung des hydrologischen Modells (Initialisierung des Füllgrades des Boden-Speichers) wird jedem Bemessungs-Hyetogramm zufällig ein anfänglicher Basisabfluss zugewiesen. Diese Zuweisung erfolgt – wie schon für die Isothermen – anhand einer empirischen Verteilung, die aus Messungen während

der uns interessierenden Periode abgeleitet wurde. Ein gleichwertiger Ansatz wird auch für die Gletscherzuflüsse gewählt, indem zu den durch das hydrologische Modell erzeugten Hochwasserganglinien ein Zufallswert addiert wird. Dieser stammt aus einer empirischen Verteilung, die auf den Messungen des Massa-Gletschers bei Blatten basiert. Der Gletscherzufluss wird selbstverständlich der Vergletscherungsrate jedes Teileinzugsgebietes angepasst.

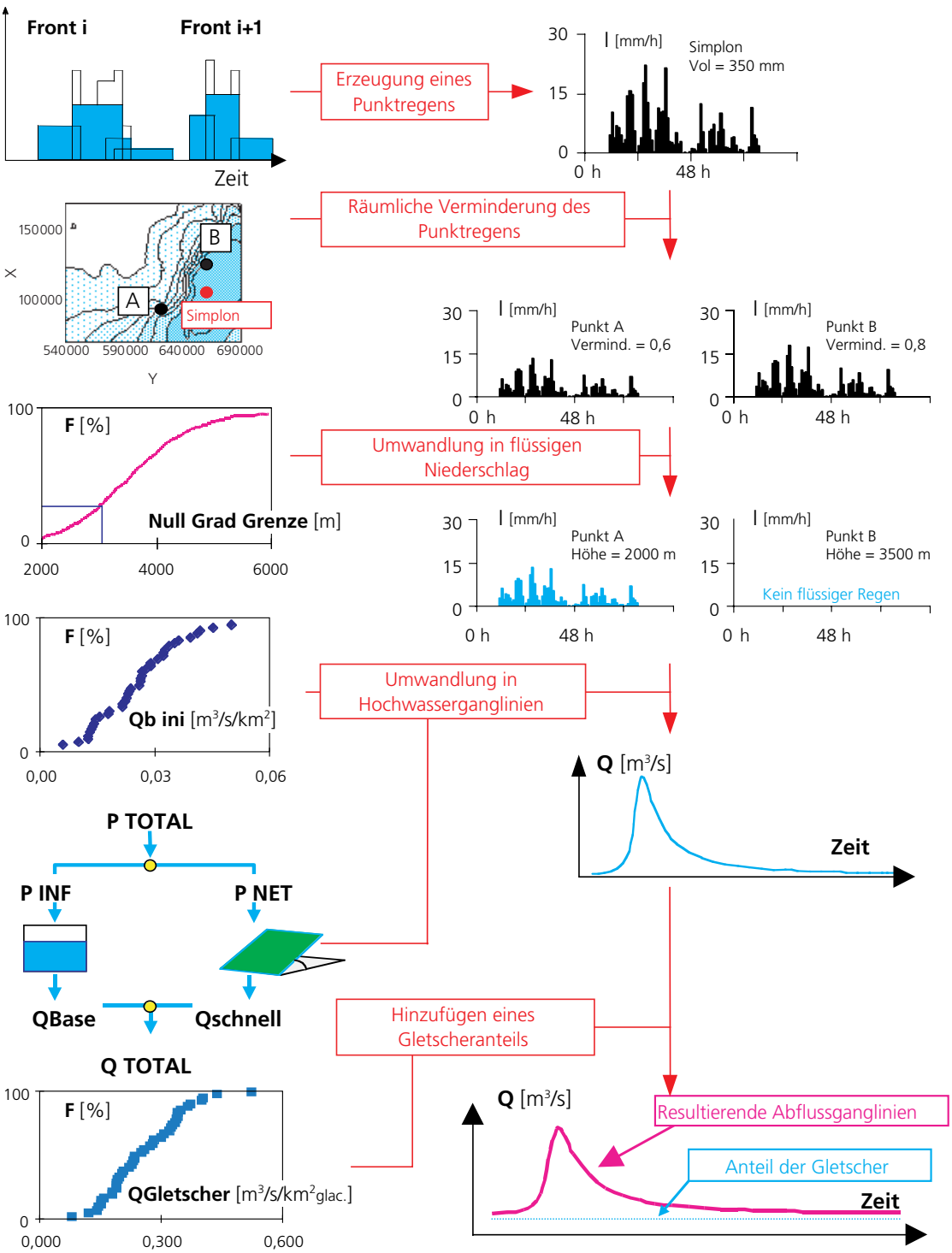


Fig. 4-11: Angewandter Ansatz zur Erstellung von Hochwasserszenarien.

Resultate der stochastischen Generierung
Die vorgeschlagene Methodik wurde auf ihre Fähigkeit zur Wiedergabe der *Statistiken der beobachteten maximalen Abflüsse* hin überprüft. Figur 4-8 und Figur 4-12 vergleichen die gemessenen und simulierten Statistiken für die Rhone in Brig und die Vispa in Visp. Die statistische Verteilung der beobachteten Extremwerte wird wahrheitsgetreu wiedergegeben. Dasselbe gilt für die anderen getesteten Einzugsgebiete (Rhone in Reckingen, Sitten und Branson).
Der Median für die Vispa in Visp wurde anhand von 100 (unter natürlichen Bedingungen) erzeugten Serien maximaler Abflüsse ermittelt. Er beträgt für die 100 Jahrhundertabflüsse ungefähr 500 m³/s, und das 10%- respektive 90%-Quantil beträgt ungefähr 400 m³/s respektive 600 m³/s. So kann also zur Erstellung einer Hochwasser-Gefahrenkarte für die Umgebung von Visp aus den erzeugten Abflussganglinien diejenige ausgewählt werden, deren Abfluss eine Wiederkehrperiode von ungefähr 100 Jahren besitzt (das heisst zwischen 400 und 600 m³/s).

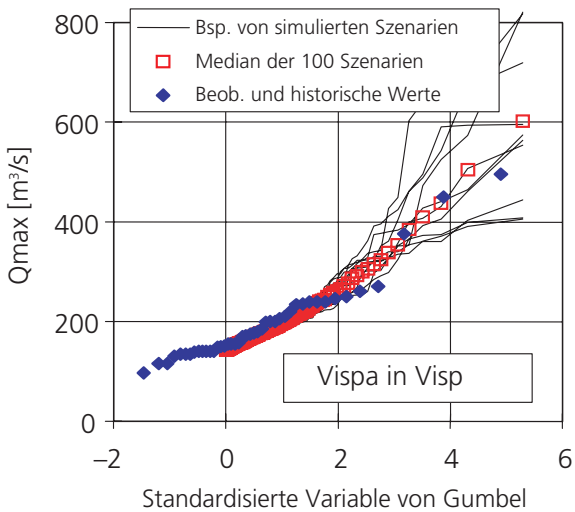


Fig. 4-12: Vergleich der statistischen Verteilungen des beobachteten und simulierten Abflusses der Vispa in Visp (aus CONSUEGRA et al. 1998).

Die Fähigkeit der Methodik zur Erstellung von realitätsnahen «*Volumen-Schwellenabfluss*-Kurven» wurde ebenfalls überprüft. Diese Kurven stellen das den Schwellenwert übersteigende Wasservolumen dar (Figur 4-13). Sie können für spezielle Abflussganglinien – zum Beispiel die eines Jahrhunderthochwassers – erstellt werden. Man kann daraus näherungsweise das Überlaufvolumen eines Gerinnes errechnen, dessen maximale Abflusskapazität dem Schwellenabfluss gleichgesetzt werden kann (Situation A). Es kann sich dabei auch um das notwendige Rückhaltevolumen (grobe Schätzung) oberhalb eines Staudammes handeln. Dieses dient zur Speicherung des Hochwassers und zum Erhalt eines konstanten Wertes (zum Beispiel Turbinendurchfluss) an einem flussabwärts gelegenen Punkt (Situation B). Der Schwellenabfluss wird dann diesem konstanten Abfluss gleichgesetzt. Solche Volumen-Schwellenabfluss-Kurven wurden für die Rhone in Brig (Situation A) und für die Saaservispa in Mattmark (Situation B) anhand von simulierten und beobachteten Hochwassern erstellt.
Das Verhältnis zwischen Volumen und Schwellenabfluss wurde für alle generierten Abflussganglinien, deren maximaler Abfluss den beobachteten Grossereignissen entspricht, bestimmt. Figur 4-14 vergleicht diese Volumen-Schwellenabfluss-Kurven der generierten Abflussganglinien mit denen des Hochwassers vom August 1987 und vom September 1993. Die vorgeschlagene Methodik ist im Stande, *Hochwasserszenarien zu erzeugen, die vergleichbar sind mit den beobachteten Grossereignissen* der Region. Sie kann aber auch *viel kritischere Hochwasserszenarien* erzeugen: Mehrere der simulierten Hochwasser haben Überlaufvolumen, die mehr als 1,5 bis 2 mal so hoch sind wie die für 1987 und 1993 geschätzten Volumen.

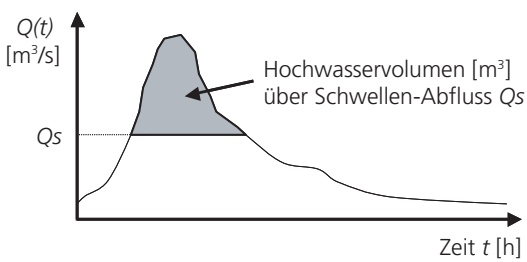


Fig. 4-13: Hochwasservolumen, das bei einem bestimmten Ereignis oberhalb des gewählten Schwellenabflusses Qs liegt.

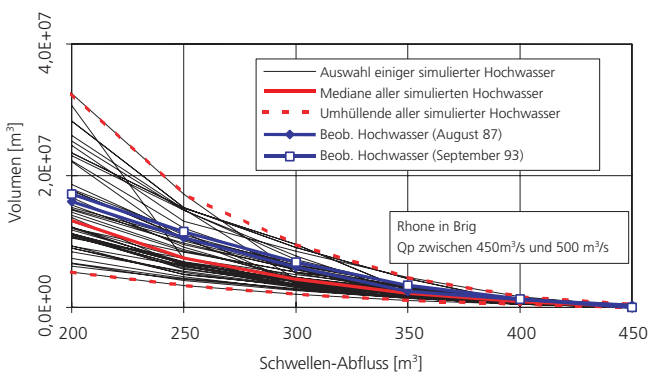


Fig. 4-14: Hochwasservolumen, die oberhalb eines Schwellenabflusses liegen (Rhone in Brig); Vergleich der generierten Kurven mit den Kurven der beobachteten Hochwasser (aus CONSUEGRA et al. 1998).

d) Schlussfolgerung

Zur besseren Einschätzung von Hochwassern mit einer seltenen Eintretenshäufigkeit sowie verschiedener Unsicherheitsfaktoren im Modellierungs- und Abschätzungsprozess derselben wurde am HYDRAM eine spezielle Methodik entwickelt (CONSUEGRA et al. 1998). Diese basiert auf der *parallelen Verwendung eines stochastischen Niederschlagsgenerators und eines Niederschlag-Abfluss-Modells*, welches in einem Multi-Ereignis-Simulationsmodus verwendet wird.
Mit Hilfe dieser Methode kann eine Vielzahl von pluviometrischen und hydrologischen Konfigurationen generiert werden, die für die Hochwasserbildung kritischen Konfigurationen entsprechen. Die vorgeschlagene Methodik kann folglich zur Untersuchung von seltenen und ausserordentlichen Hochwassern angewendet werden.
Im Vergleich mit einem Ansatz, der auf *einem* einzigen Bemessungsregen als Input für ein hydrologisches Modell basiert, eröffnet die Verwendung eines stochastischen Niederschlagsgenerators (in Verbindung mit einem Schema zur räumlichen Niederschlagsverminderung) interessante Perspektiven für den Bereich der Dimensionierung. Anstelle einer einzigen Bemessungsganglinie erhält man eine Vielzahl unterschiedlicher Hochwassersituationen, anhand derer eine detaillierte *Sensibilitätsanalyse* vorgenommen werden kann. Daher können für die Kartierung von Hochwasser-Gefahrenzonen verschiedene Hochwasserganglinien verwendet werden, die ein oder mehrere gemeinsame Merkmale aufweisen (zum Beispiel die maximale Abflussmenge einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren), deren Volumen oberhalb eines Schwellenabflusses (Durchflusskapazität des Wasserlaufes) jedoch sehr unterschiedlich sind. Es ist also möglich, die Sensibilität des Ausmasses der Überschwemmungen in Abhängigkeit von den Unsicherheiten bei der Abschätzung des Bemessungshochwassers zu quantifizieren.
Da die Parametrisierung des Niederschlagsgenerators sowie des hydrologischen Modells regionenspezifische Merkmale verwendet, ist es nicht möglich, diese auf ein anderes Studiengebiet zu übertragen. Wir denken jedoch, dass sich die Methodik sowohl in Bezug auf die Grundlagen der Modellierung sowie auch hinsichtlich der Vorgehensweise verallgemeinern lässt. Das Hauptproblem bleibt die Charakterisierung des Niederschlags, vor allem die Definition eines oder mehrerer Schemen zur räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverminderung, die für eine kritische meteorologische Situation repräsentativ sind.
Selbst wenn der Weg der Weiterentwicklung steinig ist, sollte man bedenken, dass sich die Fachleute vermehrt auf diese neuen Verfahren stützen werden – zu Lasten der klassischen Ansätze, die nicht alle notwendigen Elemente liefern, um den aktuellen Anforderungen im Bereich des Wasserbaus zu genügen.

4.2 Extremwertstatistik

4.2.1 Einleitung

Liegen in einem Einzugsgebiet *Abflussmessungen* vor, können diese statistisch ausgewertet werden. Beispielsweise kann aus den jährlichen Hochwasserspitzen mithilfe von empirischen und theoretischen Verteilungsfunktionen die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines bestimmten Hochwasserabflusses bestimmt werden.
Der gemessene Abfluss wird bei der Extremwertstatistik als *Zufallsvariable* aufgefasst. Die Gesamtheit der Abflüsse stellt das Grundkollektiv, auch *Grundgesamtheit* genannt, dar. Diese Grundgesamtheit steht bei den Abflussmessungen nicht zur Verfügung, weil die Messreihen nicht unendlich lang sind und weil sich die Abflussbildung über längere Zeitspannen verändern kann (Inhomogenität der Messreihe). Daher betrachtet man ein zeitlich begrenztes Teilkollektiv (*Stichprobe*, Zeitreihe) als repräsentativ für die Grundgesamtheit und nimmt an, dass darin alle Eigenschaften der Grundgesamtheit angenähert enthalten sind.
Die Stichprobenwerte müssen statistisch unabhängig voneinander sein. Deshalb beschränkt man sich bei der Hochwasserstatistik auf eine bestimmte Auswahl von Hochwassern. Man wählt beispielsweise eine Stichprobe mit den Jahreshöchstwerten (jährliche Serie) oder eine partielle Serie von Hochwassern, welche einen bestimmten Schwellenwert überschreiten.
Für die gewählte Stichprobe kann die *empirische Häufigkeitsverteilung* bestimmt werden. Will man nun Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Unterschreitens und des Überschreitens bestimmter Hochwasserabflüsse treffen, muss man von der diskreten empirischen Verteilung zu einer *theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung* übergehen, d. h. man versucht, von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit zu schliessen. Prinzipiell gibt es viele verschiedene Verteilungsfunktionen, welche die Voraussetzungen für die Anwendung in der Hochwasserstatistik erfüllen (stetig, eingipflig, obere und untere Begrenzung). Es gibt aber keine theoretische Verteilungsfunktion, welche für alle Stichproben die besten Resultate gewährleistet (MENDEL 1993).
Es sei noch erwähnt, dass in der Wasserwirtschaft nicht nur die Statistik der *Hochwasserspitzen* von

Bedeutung ist. Für die Dimensionierung von Bauwerken wie z. B. Hochwasser-Rückhalteräumen ist auch die Statistik der *Hochwasservolumen* sehr wichtig.

4.2.2 Bereitstellen der Stichprobe

Damit die Hochwasserwahrscheinlichkeit berechnet werden kann, muss eine repräsentative, genügend lange und homogene Datenreihe von Abflusswerten guter Qualität ausgewählt und aufbereitet werden.

Stichprobenumfang
Liegen *lange Messreihen* vor (z. B. grösser als 30 Jahre), ist eine Statistik mit den Jahreshöchstwerten des Abflusses angebracht. Wie lange eine Messreihe sein muss, um genügend genaue Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen zu können, ist mathematisch nicht genau festzulegen, da ja die Grundgesamtheit oder wenigstens eine genügend lange homogene Messreihe nicht vorhanden ist. Bei *kurzen Messreihen* ist allenfalls die Verwendung partieller Reihen (2–4 Hochwasserabflüsse pro Jahr, zweckmässigerweise getrennt nach Sommer- und Winterhalbjahr) ins Auge zu fassen. Winterhochwasser gehören oft zu einer anderen Gesamtheit als Sommerhochwasser.

Genauigkeit der Abflussmessungen
In stabilen Gerinnen mit optimalen Fliessbedingungen und geringer Feststoffführung können die Hochwasserabflüsse mit relativ hoher Genauigkeit gemessen werden (ca. ± 5%). Leider findet man solche optimalen Bedingungen wegen der oft steilen Gerinne mit starkem Feststofftransport, der hohen Erstellungskosten künstlicher Gerinne, der wasserbaulichen Einschränkungen und Umweltschutzüberlegungen nur bei wenigen Messstationen. Bei den meisten Messstationen sind genaue Hochwassermessungen wegen der grossen Fliessgeschwindigkeiten, dem Feststoff- und Geschwemmseltransport, der Bettveränderungen, der schnell wechselnden Wasserstände usw. schwierig. Die Genauigkeit der Hochwassermessungen ist zwar gegenüber früher durch den Einsatz neuer Technologien erhöht worden, doch ist sie immer noch schlechter als bei Messungen im Mittelwasserbereich. Zu beachten ist auch, dass die Pegel-Abfluss-Beziehung bei vielen Stationen in die hohen Abflussbereiche extrapoliert werden muss, da bei grossen Fliessgeschwindigkeiten und Geschwemmseltransport mit dem hydrometrischen Flügel vielfach nicht mehr gemessen werden kann.

Homogenität der Datenreihen
Nebst der Genauigkeit der Abflussmessungen ist die Homogenität der Datenreihe eine weitere wichtige Voraussetzung für eine gute Extremwertstatistik. *Inhomogenitäten* in den Datenreihen können durch einen Wechsel der Messgeräte und Messmethoden, durch Stationsverlegungen, durch Gerinneveränderungen und durch anthropogene Einflüsse verursacht werden. Inhomogenitäten sind soweit möglich zu korrigieren oder es sind für die Problemstellung geeignete Teilperioden zu wählen.
Bei der statistischen Analyse der Hochwasserabflüsse der eidgenössischen Stationen wurden beispielsweise drei Kategorien gebildet (SPREAFICO et al. 1986, 1988, 1991):

Kategorie 1:
Stationen mit keiner bis geringer Beeinflussung des Abflussregimes
Beispiel: Station Hinterrhein – Hinterrhein
Das Abflussregime dieser Stationen hat sich während der Beobachtungsperiode kaum verändert. Die Hochwasserstatistik wird mit den Hochwasserwerten der gesamten Beobachtungsperiode durchgeführt.

Kategorie 2:
Stationen mit mittlerer Beeinflussung des Abflussregimes
Beispiele: Rhein – Domat/Ems, Rhein – Neuhausen
Es handelt sich hier um Stationen, in deren Einzugsgebiet während der Beobachtungsperiode anthropogene Veränderungen stattgefunden haben (Speicherausbauten, Zu- und Ableitungen, Gewässerausbauten, Abflussregulierung usw.). Oft können die Veränderungen nicht einem einzelnen Eingriff zugeordnet werden, sondern sie bestehen aus Überlagerungen von verschiedenen wasserwirtschaftlichen Massnahmen. Diese Eingriffe können sich unterschiedlich auf die Abflüsse auswirken. Bei der Station Rhein – Domat/Ems beispielsweise haben sich die mittleren Jahresabflüsse während der Beobachtungsperiode nur gering verändert, die Sommer-, Winter- und Hochwasserabflüsse aber relativ stark. Bei der Station Rhein – Neuhausen wurden diese Veränderungen durch den Einfluss des Bodensees stark ausgeglichen.
Entsprechend der Grösse und der Art der Beeinflussung ist die geeignete Untersuchungsperiode für die Hochwasseranalysen festzulegen.

Kategorie 3
Stationen mit grosser Beeinflussung des Abflussregimes
Beispiel: Drance de Bagnes – Le Châble
Bei dieser Kategorie handelt es sich hauptsächlich um Stationen, in deren Einzugsgebiet Speicherseen mit Zu- und Ableitungen erstellt worden sind. Meist ist der Zeitpunkt des Eingriffes bekannt und die Untersuchungsperiode kann entsprechend dem Zeitpunkt und den Auswirkungen des Eingriffes festgelegt werden.

Vorgehen bei der Homogenitätsuntersuchung
Das folgende Vorgehen bei der Homogenitätsuntersuchung wird empfohlen:

a) Darstellung und erste Beurteilung der Datenreihen
Hierzu wird das vorhandene Datenmaterial auf verschiedene Arten graphisch dargestellt (siehe hiezu auch SPREAFICO et al. 1986, 1988, 1991). Aus der Darstellung der langjährigen Jahres-, Sommer- und Wintermittel des Abflusses können grössere Änderungen in der Menge und zeitlichen Verteilung der Abflüsse festgestellt werden. Durch die Unterteilung der Beobachtungsperiode in *Teilperioden* und deren Vergleich ergeben sich vielfach wichtige Aufschlüsse bezüglich Homogenität (vgl. Fig. 4-15).

b) Erfassen von anthropogenen Einflüssen und Naturkatastrophen
Zur Erfassung von anthropogenen Einflüssen stehen die Stationsdossiers, die Angaben in den hydrologischen Jahrbüchern und die einschlägige Fachliteratur über Wasserkraftnutzung, Speicherbau, Gewässerausbau und Meliorationen zur Verfügung. Inhomogenitäten, verursacht durch den Wechsel der Messmethoden und -geräte, Stationsverlegungen usw. sind soweit möglich zu eruieren. Naturkatastrophen grösserer Art, wie beispielsweise Gletscherabbrüche, Gletscherausbrüche, grossflächige Hangrutschungen usw. können Ausreisser produzieren, welche als solche zu behandeln sind.

c) Homogenitätstests
Die Homogenität der jährlichen Spitzenabflüsse ist mit verschiedenen statistischen Methoden zu untersuchen. Beispielsweise mit dem *U-Test von Mann-Withney*, dem *Kruskal-Wallis-Test*, dem *Spearman rank correlation coefficient*, dem *Kendall rank correlation coefficient*, dem *Spearman rank order serial correlation coefficient* und dem *Rank order correlation test for trend*.
Doppelsummenanalysen mit benachbarten Abflussstationen sind hilfreich.
Diese Tests liefern des öfteren unterschiedliche Resultate. Es wird deshalb empfohlen, die Homogenitätsuntersuchungen als Gesamtbeurteilung auf der Basis der Punkte a) bis c) durchzuführen.
Fraglich erscheinende Hochwasserwerte sind anhand bestehender Unterlagen (Limnigraphenbögen, digitale Aufzeichnungen, Pegelstand-Abfluss-Beziehungen, Stationsbeschreibungen, Vergleichsrechnungen usw.) zu überprüfen. *Ausreisser*, die durch statistische Tests

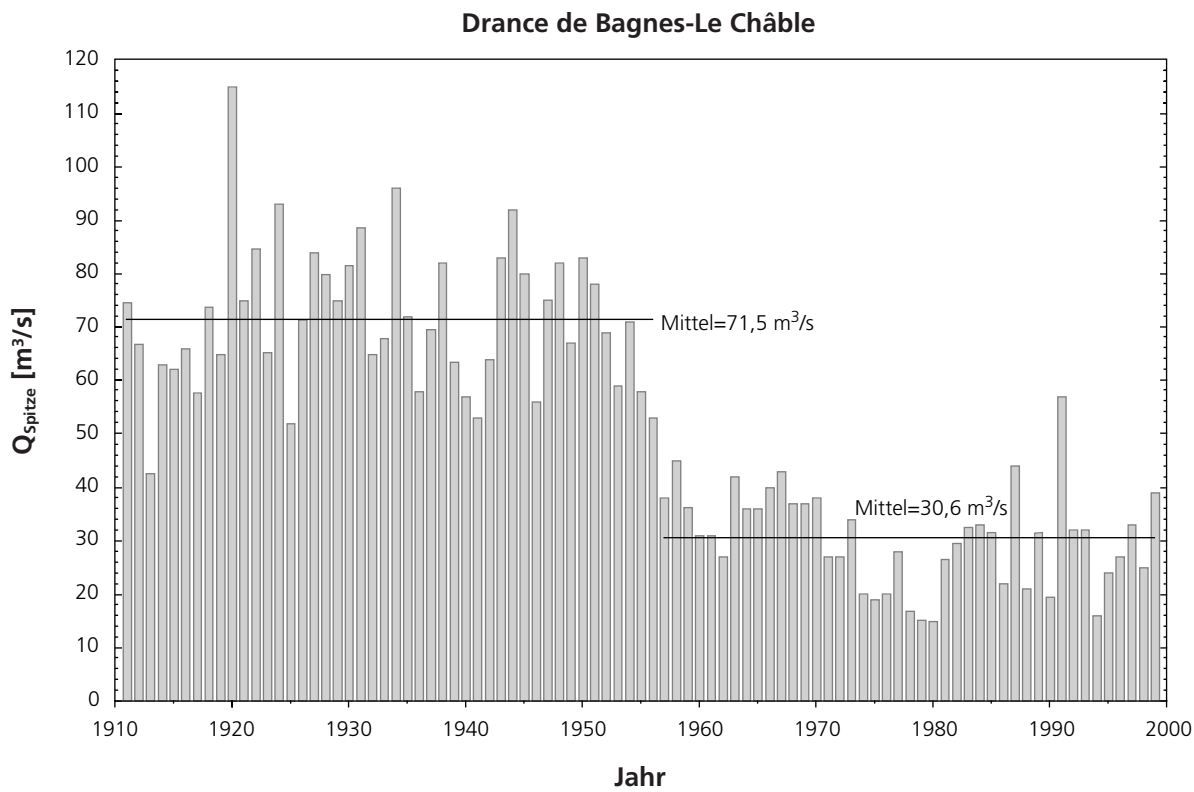


Fig. 4-15: Vergleich der grössten jährlichen Hochwasserspitzen an der Station Drance de Bagnes – Le Châble.

gefunden werden, sind nur zu korrigieren, wenn auch hydraulische Berechnungen die These der statistischen Tests erhärten. Ausreisser, welche auf Messfehlern beruhen, sind zu korrigieren. Dasselbe gilt für fehlerhafte Zeitreihen.

4.2.3 Berechnen von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit

Für die Berechnung und Darstellung von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit müssen eine geeignete *Verteilungsfunktion* gewählt, ein passendes *Parameterschätzverfahren* angewandt und die «*plotting positions*» festgelegt werden. Um eine Reihe von Hochwasserspitzenabflüssen als Wahrscheinlichkeitskurve darzustellen, muss über die Wahrscheinlichkeit oder Wiederkehrperiode, welche man der einzelnen Hochwasserspitze zuzuordnen hat, entschieden werden. Hierzu werden in der Literatur viele Formeln angegeben (LINSLEY 1982, MENDEL 1993).
Eine gute Übersicht über Verteilungsfunktionen in der Hydrologie findet sich in MENDEL (1993). Neben einer detaillierten Beschreibung der Verteilungsfunktionen sind darin auch Angaben zu den Schätzverfahren (Anpassungsmethoden) wie Momentenmethode und Maximum-Likelihood-Methode sowie Hinweise zu den «*plotting positions*» enthalten.

Vorgehen bei der Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit:
1) Bereitstellung der Stichprobe gemäss Abschnitt 4.2.2
2) Wahl einer oder mehrerer Verteilungsfunktionen

Auswahl von analytischen Verteilungsfunktionen	Anzahl der Parameter
Extremwertverteilung Typ 1 (E1)	2
Allgemeine Extremwertverteilung (AE)	3
Logarithmische Normalverteilung (LN3)	3
Pearson-Typ 3-Verteilung (P3)	3
Logarithmische Pearson-Typ 3-Verteilung (LP3)	3
Weibull-Verteilung (WB3)	3
Gemischte Extremwertverteilung (ME)	4

3) Berechnung der Stichprobenwerte, welche für die Parameterschätzung und die Berechnung der Vertrauensintervalle benötigt werden.
4) Parameterschätzung der analytischen Verteilungsfunktion resp. -funktionen mithilfe der Momentenmethode (MM), der Maximum-Likelihood-Methode (MLM) oder der Methode der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente (WGM) usw.
5) Bestimmung der Anpassungsmasse der Stichprobenwerte an die analytische Verteilungsfunktionen (CHOW 1964).
6) Darstellung der empirischen Verteilung der Stichprobenwerte und der Verteilungsfunktionen. Für die Eintragung sind die «plotting positions» zu bestimmen (LINSLEY et al. 1982).
7) Berechnung der Vertrauensintervalle für unterschiedliche Signifikanzniveaus unter der Annahme, dass die Abweichungen von dem mit der Verteilungsfunktion berechneten Wert normalverteilt sind. Als Vertrauensbereich kann beispielsweise ein Signifikanzniveau von 80% gewählt werden.

4.2.4 Beispiel

Das Vorgehen wird am Beispiel der Abflüsse der Station Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch dargestellt.

a) Beschreibung der Station
Der Chamuerabach ist ein rechtsseitiger Zufluss des Inn. Sein Einzugsgebiet von 73 km² bis zur Messstation weist eine geringe Vergletscherung von 1,5% auf. Der Chamuerabach hat ein nivo-glaziales Regime. Das Regime ist nur gering anthropogen beeinflusst. Die Angaben zu den Abflüssen befinden sich in der Tabelle 4-1.
Die Messstation ist bei einem Überfall installiert (Fig. 4-16).



Fig. 4-16: Messstation Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch.

b) Wahl der Stichprobe
Die Stichprobe der Abflusswerte muss entsprechend der Datenlage und den Zielvorstellungen ausgesucht werden (Jahresspitzenabflüsse, partielle Reihen, Sommer- und Winterspitzen, Hochwasservolumen usw.). Wie schon im Abschnitt 4.2.2 dargestellt, ist die Auswahl der Stichprobe von entscheidender Bedeutung. Sie muss möglichst lang, aber konsistent und homo-

gen sein. Die verwendeten Spitzenabflüsse müssen möglichst genau gemessen sein. Abklärungen sind anhand der Messunterlagen durchzuführen. Eine sorgfältige Überprüfung der Stichprobe ist unabdingbar.

Die im Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz publizierte Reihe der Abflüsse des Chamuerabaches setzt sich aus Abflüssen von 2 Messstandorten zusammen. Die Abflüsse 1955 – 1972 wurden an der Station Cha-

Abfluss
Débit
Portata

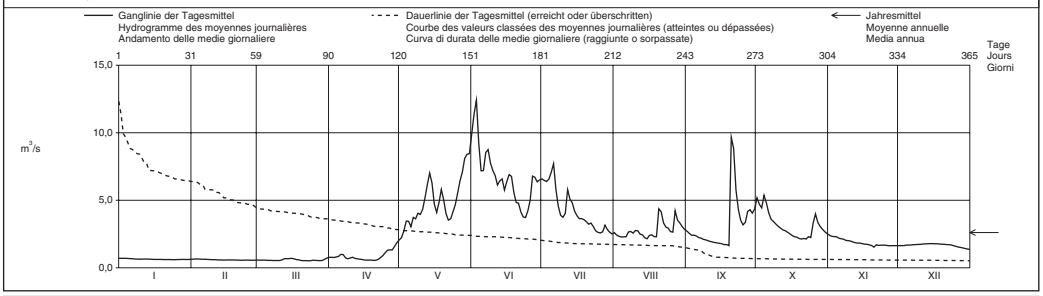
Chamuerabach (Ova Chamuera) - La Punt-Chamues-ch LHG 2263

Koordinaten / Coordonnées / Coordinate	791 430 / 160 600 A	Höhe / Altitude / Altitudine	1720	m ü.M. / m s.m. / m s.m.	Fläche / Surface / Superficie	73,30	km²
		Mittlere Höhe / Altitude moyenne / Altitudine media	2549	m ü.M. / m s.m. / m s.m.	Vergletscherung / Extension glacier / Ghiacciaio	1,50	%

1999

	Jan./Janv. Genn.	Feb./Févr. Febbr.	März/Mars Marzo	April/Avril Aprile	Mai/Mai Maggio	Juni/Juin Giugno	Juli/Juillet Luglio	Aug./Août Agosto	Sept./Sept. Sett.	Okt./Oct. Ott.	Nov./Nov. Nov.	Dez./Déc. Dic.	
1	0,71 +	0,63	0,57	0,77	2,06 -	9,93	6,58	2,60	2,72	5,18	2,41 +	1,64	1
2	0,70	0,64	0,57	0,78	2,24	11,4	6,47	2,42	2,56	4,70	2,33	1,64	2
3	0,70	0,65 +	0,56	0,76	2,75	12,4 +	6,39	2,33	2,41	4,44	2,31	1,65	3
4	0,70	0,65 +	0,57	0,80	3,46	9,23	6,57	2,28	2,42	5,36 +	2,30	1,68	4
5	0,69	0,64	0,56	0,84	3,44	7,18	7,08	2,29	2,36	4,81	2,19	1,68	5
6	0,68	0,63	0,55	0,99	3,05	7,20	7,71 +	2,30	2,24	4,07	2,15	1,69	6
7	0,67	0,63	0,55	0,98	3,73	8,54	5,80	2,65	2,20	3,60	2,12	1,71	7
8	0,65	0,62	0,54	0,74	3,63	8,75	4,57	2,69	2,11	3,43	2,03	1,72	8
9	0,64	0,61	0,54	0,67	4,04	7,76	3,89	2,57	2,07	3,25	2,01	1,73	9
10	0,64	0,60	0,54	0,72	3,95	7,21	3,74	2,76	2,01	3,08	1,98	1,74	10
11	0,64	0,60	0,54	0,78	4,33	6,84	4,03	2,74	1,95	2,95	1,91	1,76	11
12	0,65	0,59	0,60	0,70	5,17	6,13	5,78	2,49	1,91	2,81	1,86	1,77	12
13	0,65	0,58	0,68	0,67	6,15	6,44	5,09	2,44	1,87	2,75	1,83	1,78	13
14	0,64	0,58	0,67	0,64	7,01	6,58	4,81	2,22	1,84	2,64	1,83	1,79 +	14
15	0,63	0,57	0,68	0,62	6,29	5,76	4,19	2,15 -	1,81	2,52	1,79	1,79 +	15
16	0,62	0,58	0,70	0,58	4,71	6,39	3,86	2,40	1,78	2,40	1,75	1,78	16
17	0,62	0,58	0,66	0,57	4,10	6,90	3,64	2,44	1,71	2,30	1,74	1,78	17
18	0,62	0,58	0,61	0,57	4,83	6,77	3,64	2,31	1,72	2,27	1,70	1,76	18
19	0,62	0,58	0,59	0,57	5,80	5,59	3,56	2,30	1,64 -	2,17	1,65	1,75	19
20	0,61	0,57	0,54	0,55 -	5,03	4,84	3,42	4,37 +	9,66 +	2,13 -	1,53 -	1,74	20
21	0,61	0,57	0,53	0,56	4,01	4,78	3,23	4,16	8,83	2,17	1,70	1,72	21
22	0,61	0,56 -	0,53	0,62	3,53	4,14	3,31	3,33	5,77	2,13 -	1,66	1,71	22
23	0,61	0,56 -	0,52 -	0,76	3,63	3,77	3,05	3,02	4,34	2,30	1,67	1,69	23
24	0,60 -	0,57	0,52 -	0,90	4,15	3,72 -	2,74	2,94	3,53	2,24	1,68	1,64	24
25	0,60 -	0,57	0,56	1,12	4,69	4,22	2,62	2,68	3,18	3,31	1,67	1,59	25
26	0,61	0,56 -	0,55	1,30	5,56	5,02	2,58	2,64	3,36	3,99	1,64	1,54	26
27	0,61	0,56 -	0,54	1,33	6,45	6,79	2,67	4,22	4,17	3,36	1,63	1,51	27
28	0,62	0,56 -	0,53	1,32	7,10	6,70	3,15	3,53	4,30	3,06	1,64	1,47	28
29	0,62		0,54	1,58	8,11	6,37	2,83	3,32	4,05	2,85	1,64	1,43	29
30	0,61		0,62	1,87 +	8,41	6,50	2,63	3,05	4,35	2,67	1,64	1,39	30
31	0,62		0,72 +		8,45 +		2,51 -	2,85		2,53		1,36 -	31
Monatsmittel / Moyenne mensuelle / Media mensile	0,64	0,59	0,58 -	0,86	4,83	6,80 +	4,26	2,79	3,16	3,14	1,87	1,67	m³/s
Maximum / Massimo (Spitze / Pointe / Punta)	0,80	0,70 -	1,40	2,60	9,80	15,5	8,60	6,20	21,0 +	5,90	2,50	1,80	m³/s
Datum / Date / Data	1., 2.	div.	31.	30.	30.	3.	6.	20.	20.	3.	1.	div.	

Jahresmittel / Moyenne annuelle / Media annua 2,61 m³/s



Periode / Période / Periodo	1955 – 1999	(45 Jahre / années / anni)											
Monatsmittel / Moyenne mensuelle / Medie mensili	0,71	0,63 -	0,64	0,90	2,92	6,33 +	5,44	3,28	2,69	1,93	1,24	0,89	m³/s
Maximum / Massimo (Spitze / Pointe / Punta)	1,40 -	1,40 -	4,60	19,9	35,0	39,0	20,0	24,0	67,5 +	13,0	5,80	2,10	m³/s
Jahr / Année / Anno	1980	1995	1981	1992	1958	1963	1966	1977,1987	1960	1979	1968	1965,1987	Dat.
Minimum / Minimo (Tagesmittel / Moyenne journ. / Media giornal.)	0,34	0,45	0,32 -	0,46	0,57	1,79	1,99 +	1,38	0,94	0,80	0,58	0,46	m³/s
	1974	1973	1998	1962,1973	1979	1976,1984	1996	1964	1964	1962,1989	1989	1989	Dat.

Grösstes Jahresmittel / Moyenne annuelle la plus grande / La più grande media annua 3,45 (1965) m³/s

Mittlerer Abfluss / Débit moyen / Portata media 2,31 m³/s

Kleinstes Jahresmittel / Moyenne annuelle la plus petite / La più piccola media annua 1,62 (1996) m³/s

Dauer der Abflüsse (erreicht oder überschritten) **/ Débits classés** (atteints ou dépassés) **/ Durata delle portate** (raggiunte o sorpassate)

Tage / Jours / Giorni	1	3	6	9	18	36	55	73	91	114	137	160	
1999	12,4	9,93	8,83	8,45	7,08	6,15	4,78	4,10	3,60	3,05	2,60	2,30	m³/s
1955 - 1999	15,2	11,5	9,63	8,58	7,15	5,55	4,33	3,59	3,01	2,46	2,03	1,66	m³/s
Tage / Jours / Giorni	182	205	228	251	274	292	310	329	347	356	362	365	
1999	2,03	1,76	1,65	1,12	0,68	0,63	0,61	0,58	0,56	0,54	0,53	0,52	m³/s
1955 - 1999	1,33	1,08	0,91	0,81	0,74	0,69	0,64	0,60	0,56	0,53	0,48	0,36	m³/s

Für die Jahre 1955–1972 wurden die Abflüsse der aufgehobenen Station Chamuerabach - Campovasto verwendet. Die Abflüsse wurden in Campovasto auch für die Jahre 1912–1913 und 1916–1921 bestimmt. Durchschnittlicher Abfluss der Periode 1916–1921 : 3,17 m³/s .

Tab. 4-1: Abflusstabelle aus dem Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz.

muerabach – Campovasto erhoben, die Abflüsse 1973–1999 an der Station Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch. Die Landeshydrologie hat diese Messungen zu einer Reihe zusammengelegt, in der Annahme, dass sie trotz der Stationsverschiebung als konsistent angenommen werden kann.
Führt man Doppelsummenanalysen mit der Ova da Fuorn oder dem Berninabach durch, zeigt sich eine Veränderung des Abflusses zur Zeit des Stationswechsels.
Führt man Homogenitätstests an den jährlichen maximalen Hochwasserspitzen durch, so findet man mit verschiedenen Verfahren einen leicht signifikanten Trend. Dieser ist auch visuell gut ersichtlich (siehe Fig. 4-17).

Der Hochwasserspitzenabfluss im September 1960 wird mit 60–75 m³/s angegeben, und es werden vor 1965 noch verschiedentlich sehr hohe Abflusswerte ausgewiesen. Statistisch betrachtet ist der Abflusswert von 1960 ein Ausreisser. Physikalisch ist das extreme Hochwasser aber plausibel, wenn man es mit anderen Stationen im Einzugsgebiet des Inn vergleicht.
Die Messbedingungen bei der alten Station Campovasto waren längst nicht so gut wie bei der neuen Station. Die Abflüsse der neuen Station weisen deshalb eine höhere Genauigkeit auf. Die höchste Abflussmessung hat einen Wert von 13,4 m³/s ergeben. Die Berechnung eines Hochwasserabflusses von 24 m³/s (August 1987) mit der extrapolierten Pegelstand-Abflussbeziehung erscheint deshalb vertrauenswürdig. Bei der Berechnung eines Abflusses von 70 m³/s ist aber mit einem wesentlich höheren Fehler zu rechnen. Die Überprüfung eines solchen extremen Hochwasserabflusses ist, wenn überhaupt möglich, sehr schwierig durchzuführen, da die damaligen Gegebenheiten sehr schwer nachzuvollziehen sind (Bettveränderungen, Geschiebetrieb, usw.).
Ein Vergleich mit den Hochwasserabflüssen an anderen Stationen im Inngebiet zeigt ein ähnliches Bild; die Periode vor 1970 weist höhere Abflussspitzen auf als in neuerer Zeit. Dies ist ein Indiz dafür, dass die hohen Abflüsse der Station Campovasto nicht durch grosse Messfehler verursacht sind.
Das Beispiel zeigt die Unsicherheiten bei der Wahl der Stichprobe, aber auch, wie sensitiv die Hochwasserstatistik auf diese Wahl reagieren kann. Berechnet man das HQ100 der Station La Punt-Chamues-ch aufgrund der Messreihe 1973–1999 mit der Log-Pearson Typ III Verteilung und der Momenten-Methode, erhält man einen Wert von HQ100 = 29,7 m³/s. Bei Mitberücksichtigung der Werte der Station Campovasto ergibt sich für die Periode 1955–1999 ein HQ_{100} von 56,2 m³/s. Dies zeigt, dass bei der Anwendung in der Hochwasserbemessung zusätzliche Untersuchungen (Hydraulik, N-A-Modelle, Abflussprozessuntersuchungen, usw.) notwendig sind.

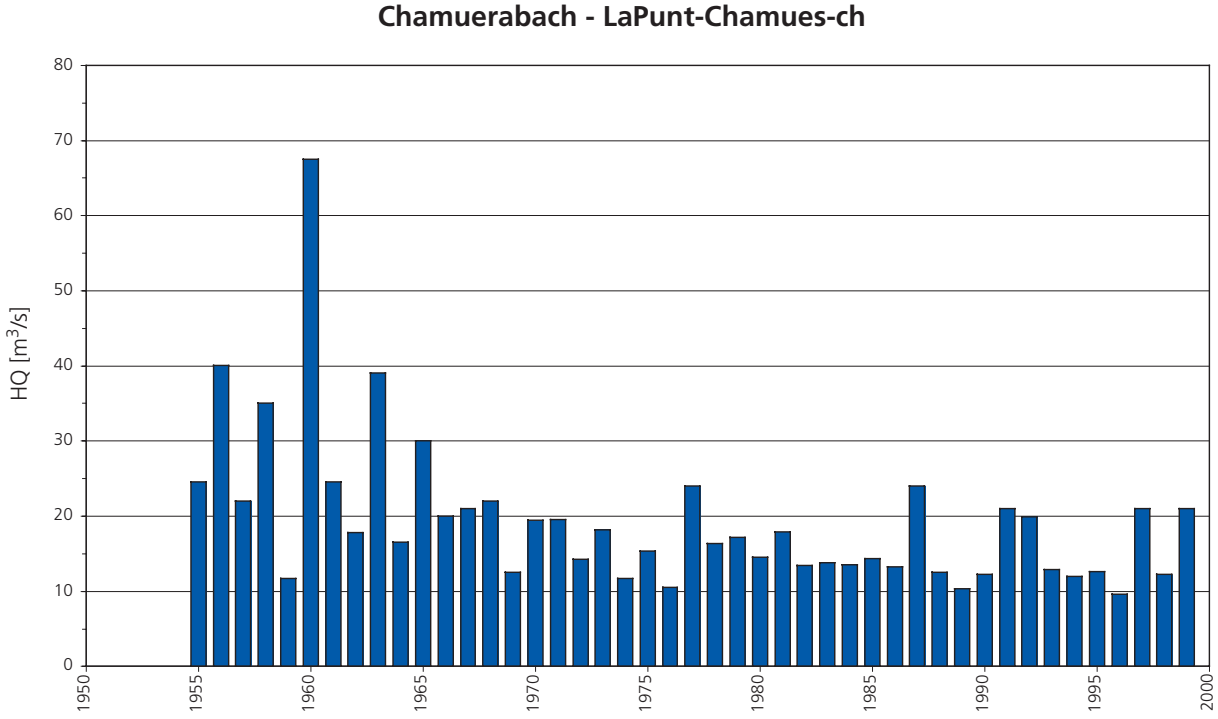


Fig. 4-17: Höchste jährliche Abflussspitzen im Chamuerabach.

Für die folgenden Ausführungen wird von den Jahreshöchstabflüssen 1955–1999 als Stichprobe ausgegangen.

c) Wahl der analytischen Verteilungsfunktion

Es gibt generell keine Verteilungsfunktion, welche für die Beschreibung und Extrapolation aller Stichproben die besten Resultate liefert. Es ist deshalb sinnvoll, verschiedene Verteilungsfunktionen zu wählen, die Berechnungen durchzuführen und die Resultate grafisch darzustellen. Mit optischer Beurteilung oder mithilfe der Berechnung von Anpassungsmassen kann dann die geeignetste Funktion ausgewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass die beste Anpassung nicht unbedingt auch die beste Extrapolation ergibt.
In Fig. 4-18 sind die Resultate für die Station Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch für die Extremwertverteilung Typ 1, die Allgemeine Extremwertverteilung und die Log-Pearson-Typ 3-Verteilung dargestellt. Die Parameterschätzung erfolgte mit der Maximum-Likelihood-Methode. Die Extremwertverteilung Typ 1 zeigt ein anderes Verhalten als die anderen beiden Verteilungsfunktionen.

d) Wahl des Parameterschätzverfahrens

Die Wahl des Parameterschätzverfahrens beeinflusst die Form der analytischen Verteilungsfunktion. Es wird empfohlen, verschiedene Parameterschätzverfahren anzuwenden.
Das Beispiel Chamuerabach (Fig. 4-19) zeigt, dass die Wahl der Parameterschätzmethode einen wesentlichen Einfluss auf die Extrapolation haben kann. Zu beachten ist, dass Resultate unterschiedlicher Berechnungen, welche innerhalb des Vertrauensintervalls liegen, statistisch gleichwertig sind.

e) Darstellung der Vertrauensintervalle

Die Darstellung der Vertrauensintervalle ist wichtig für Risikoabschätzungen. Ein Signifikanzniveau von 80% erscheint sinnvoll.
In Figur 4-20 ist am Beispiel des Chamuerabaches das Vertrauensintervall für die Extrapolation mit der Allgemeinen Extremwertverteilung und dem Parameterschätzverfahren MLM für ein Signifikanzniveau von 80% dargestellt.

f) Extrapolationsbereich

Der zulässige Extrapolationsbereich ist von der Länge der Stichprobe, den Eigenschaften des Gebietes, den Vertrauensintervallen usw. abhängig und kann nicht generell festgelegt werden. Eine Extrapolation auf die doppelte Länge der Stichprobe erscheint in vielen Fällen sinnvoll. Es ist zu bedenken, dass die verfügbaren Messreihen vielfach zu kurz sind, um wirklich seltene

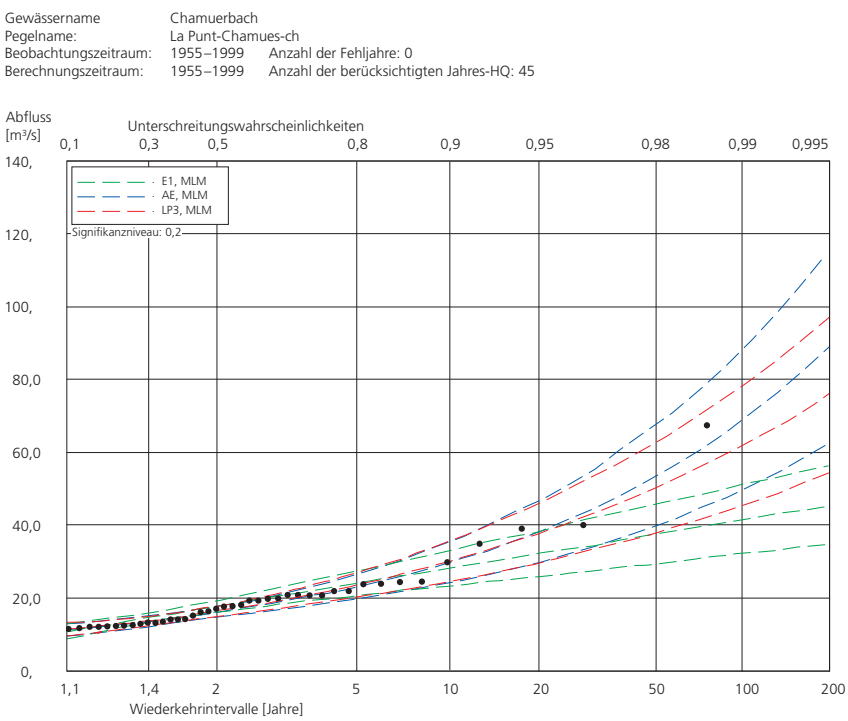


Fig. 4-18: Extrapolation der Jahreshochwasserspitzen an der Station Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch: Extremwertverteilung Typ 1 (E1), Allgemeine Extremwertverteilung (AE) und Log Pearson-Typ 3-Verteilung (LP3) mit 80%-Vertrauensintervallen.

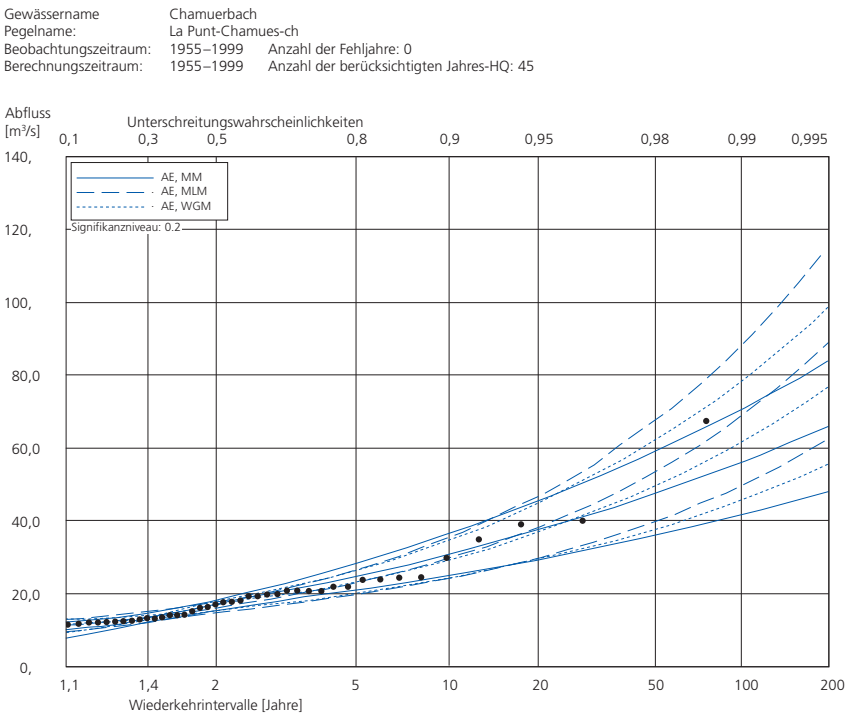


Fig. 4-19: Extrapolation der Jahreshochwasserspitzen an der Station Chamuerabach: Allgemeine Extremwertverteilung (AE) und Parameterschätzverfahren Momentenmethode (MM), Maximum-Likelihood-Methode (MLM) und Methode der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente (WGM) mit 80%-Vertrauensintervallen.

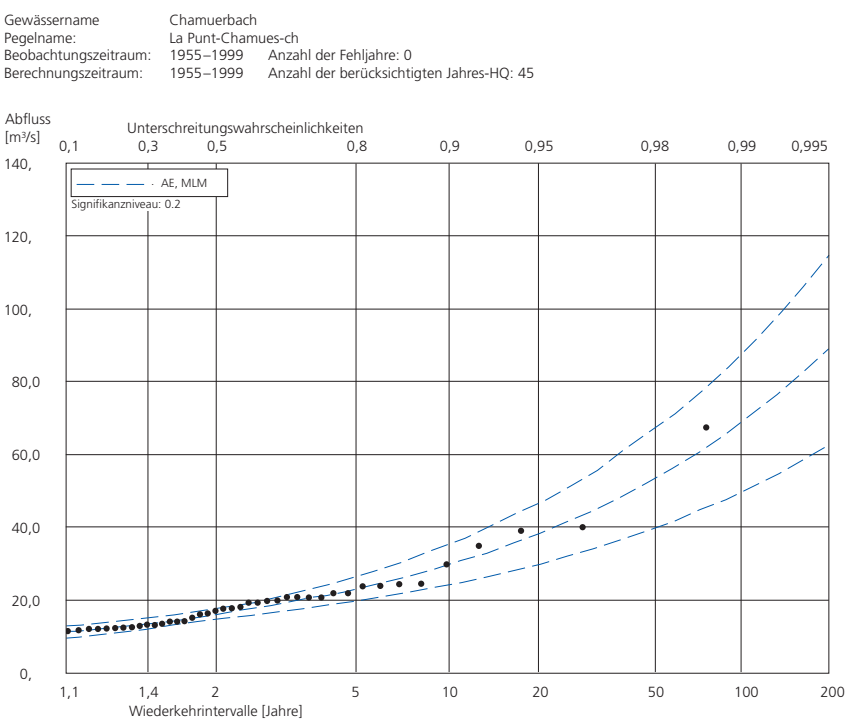


Fig. 4-20: Extrapolation der Jahreshochwasserspitzen an der Station Chamuerabach: Allgemeine Extremwertverteilung mit Parameterschätzverfahren Maximum-Likelihood und 80%-Vertrauensintervall.

Ereignisse zu enthalten. Dies ist beispielsweise bei Karstgebieten oft der Fall. Die Behandlung von Ereignissen mit hohen Wiederkehrperioden wird im Kapitel 4.3 (Ausserordentliche und extreme Hochwasser) behandelt.

4.2.5 Hinweise auf ausländische Empfehlungen und Computerprogramme

a) DVWK-Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit (DVWK 1979)

Die DVWK-Empfehlung 1979 stellt die drei Verteilungsfunktionen Pearson-Typ 3-, logarithmische Pearson-Typ 3- und Gammaverteilung zur Auswahl. Die geeignetste Verteilungsfunktion wird je nach Schiefe und Lage des Fusspunktes der empirischen Verteilung festgelegt.
Die Vorteile dieses Vorgehens liegen bei den objektiven Kriterien zur Wahl der Verteilungsfunktion und bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Der Nachteil besteht darin, dass es möglicherweise eine besser passende Verteilungsfunktion gibt, mit der man die gesuchte Bemessungsgrösse genauer bestimmen könnte. Das Verfahren stützt sich grundsätzlich auf Serien mit Jahreshochwasserspitzen ab. Bei kurzen Messreihen (<15 Jahre) wird empfohlen, partielle Serien zu verwenden.

b) Neue DVWK-Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit (DVWK 1999)

Das neue DVWK-Merkblatt 251 (DVWK 1999) schlägt eine ganze Palette von Verteilungsfunktionen vor. Die Anwenderin und der Anwender wählen die geeignete Verteilungsfunktion u. a. anhand von Anpassungsmassen aus.
Die Firma WASY hat basierend auf dem DVWK-Merkblatt 251 eine Software HQ-EX entwickelt (WASY 1997).

c) HYFRAN

Die Software HYFRAN dient zur Anpassung von statistischen Verteilungsfunktionen und beinhaltet eine Reihe an flexiblen, benutzerfreundlichen und leistungsstarken mathematischen Tools. Es eignet sich im allgemeinen für die statistische Analyse von Datenreihen, insbesondere von Extremereignissen.
HYFRAN wurde vom Institut National de Recherche Scientifique – Eau (INRS-Eau) der Universität von Quebec mit Unterstützung von Hydro-Québec und des Forschungsrates für Natur- und Ingenieurwissenschaften von Kanada (CRSNG) entwickelt.

Systemvoraussetzungen
PC-kompatibel, 80386 oder höher; 8 MB RAM, 5 MB Festplattenbedarf; Windows 95/98/2000/NT

Zusammenfassung

Kriterien	HYFRAN
Statistische Verteilungsfunktionen	16
Validation Tests	5
Anpassungstests	2 für 5 Verteilungsfunktionen
Grafische Standardausgänge	
Unterstützte Betriebssysteme	Windows 95/98/2000/NT
Support	email und Fax

www.inrs-eau.uquebec.ca/activites/groupes/chaire_hydrol/chaire9.html

4.3 Ausserordentliche und extreme Hochwasser

4.3.1 Methoden zur Abschätzung ausserordentlicher Hochwasser

Die Abschätzung von seltenen Hochwassern (Wiederkehrperioden in der Grössenordnung von 100 Jahren), ausserordentlichen (Wiederkehrperioden über 100 Jahren) oder extremen (grösstmöglichen) Hochwassern erfolgt meistens anhand von empirischen Formeln oder statistischen Methoden, die als Lösung genau einen Wert ergeben. Dies ist der Fall bei Methoden, welche den maximalen Abfluss für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren mit einem mehr oder weniger empirisch gewählten Faktor multiplizieren. Dieser Faktor variiert im Normalfall zwischen 1,3 und 1,5, für kleine Gebiete geht er sogar bis 2. Dies ist ebenfalls der Fall bei Methoden, die auf der Extrapolation einer statistischen Anpassung beruhen, welche mittels einer Frequenzanalyse von Messreihen des maximalen jährlichen Abflusses oder von Messwerten über einem bestimmten Schwellenwert (Peak-Over-Threshold Methode) erstellt wurde. Dasselbe trifft auch auf die Methode GRADEX und auf davon abgeleitete Methoden zu. Diese von der Electricité de France entwickelte Methode (GUILLOT & DUBAND 1967) nimmt als Hypothese an, dass jeder zusätzliche Niederschlag ab einer bestimmten Wasserhöhe (die dem Wasser-Sättigungszustand entspricht) eine entsprechende Abflusserhöhung bewirkt. Das heisst, dass über dieser Schwelle der maximale Niederschlag und der dazugehörige Abfluss dieselbe statistische Verteilung, genannt extreme Verteilung, besitzen.
Diese Methoden genügen jedoch in vielen Fällen nicht. Hydroelektrische Anlagen führen zu Unstetig-

keiten im hydrologischen Verhalten des Einzugsgebietes und die vorhandenen Abflussmessreihen sind meistens unzureichend für die Bestimmung von ausserordentlichen Hochwassern (Homogenität, Repräsentativität) (BÉROD & CONSUEGRA 1995). Zudem ist es häufig nötig, die komplette Ganglinie der Hochwasser zu kennen. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Projekten, welche die Wirkung von grossen Staudämmen auf die Verminderung von Hochwasserspitzen untersuchen; auch für die Erstellung von Hochwasser-Gefahrenkarten sind diese Informationen notwendig. Und für bestimmte Anwendungen sind Volumen und Form eines Hochwassers viel wichtigere Kenngrössen als die maximale Abflussspitze.

Einige Methoden, wie z.B. die Methode QDF (Abfluss-Dauer-Frequenz), können synthetische (konstruierte) Bemessungsganglinien liefern (NERC 1975; BARLOCKI & BRUGES 1994; OBERLIN 1992). Diese sind allerdings nur selten für ausserordentliche Hochwasser getestet worden. Ausserdem bevorzugen viele Anwender realistischere Hochwasserganglinien. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, derartige Formen und die dazugehörigen Wiederkehrperioden zu bestimmen. Es ist ausserdem nicht einfach, im Voraus (*a priori*) die Form zu wählen, die für eine Bemessungsganglinie für ein gegebenes System kritisch und plausibel ist. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, gebrauchen BERTOLI & MOISELLO (1994) Bemessungsganglinien, die durch vier Parameter bestimmt sind (der maximale Abfluss, der Basisabfluss, das Volumen des direkten Oberflächenabflusses und die Anstiegszeit des Hochwassers). Von diesen Parametern wird angenommen, dass sie Zufallsvariablen darstellen, die von den lokalen Gegebenheiten abhängig sind und denen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet werden kann. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Formen von Bemessungshochwassern zu erzeugen. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen (die drei letzteren sind bedingt durch die erste) sind allerdings nicht einfach zu bestimmen.

Die Niederschlags-Abflussmodellierung ist ein weiterer Ansatz, der häufig zur Analyse von ausserordentlichen Hochwassern verwendet wird. Das Prinzip dieser Methode besteht darin, ein Niederschlag-Abfluss-Modell anhand von gemessenen Ereignissen zu kalibrieren und es dann für starke Niederschläge zu extrapolieren. Die Analyse ausserordentlicher Hochwasser wird bis heute vorwiegend anhand von ausserordentlichen Bemessungsregen durchgeführt, die dann mit Hilfe eines geeigneten hydrologischen Modells in Bemessungsganglinien umgewandelt werden. Ein extremes Hochwasser kann ebenfalls anhand einer Simulation der Reaktion des Einzugsgebietes auf einen extremen Bemessungsregen ermittelt werden. Dieser Ansatz wurde für das Niederschlags-Abfluss-Modell CRUEX, welches am Labor HYDRAM[1] (ZELLWEGER & MUSY 2000a, b, c) entwickelt wurde, gewählt: Der Bemessungsregen ist im zweiten Fall der maximal mögliche Niederschlag (englisch: Probable Maximum Precipitation, PMP). Durch die Anwendung des Modells CRUEX führt dieser zur Bestimmung eines extremen Hochwassers, welches auch «höchstes wahrscheinliches Hochwasser» genannt wird (englisch: Probable Maximum Flood, PMF). Das Modell CRUEX wird in Kapitel 4.3.3 vorgestellt.

Der Vorteil dieser Modelle liegt darin, dass komplexe Gebiete, welche aus mehreren Teileinzugsgebieten mit unterschiedlichem Abflussverhalten bestehen, simuliert werden können. Ausserdem kann dadurch das Niederschlags-Abflussverhalten von Gebieten, die stark durch Verbauungen (vor allem Staumauern) beeinflusst sind, bestimmt werden. Im Falle einer Anwendung für ausserordentliche Wiederkehrperioden hat dieser auf einem Bemessungsregen basierende Ansatz jedoch seine Grenzen:

- An erster Stelle sollte das Problem der Bestimmung der ausserordentlichen Niederschlagsintensitäten erwähnt werden. Die am häufigsten benutzte Methode, nämlich die Extrapolation der maximalen gemessenen Intensitäten auf ausserordentliche Wiederkehrperioden, führt zu denselben Unsicherheiten, welche schon bei der Extrapolation des maximalen Abflusses angeführt wurden.
- Zudem müssen die Grenzen hinsichtlich der Wahl der verschiedenen Variablen oder Parametrisierungen, die zur Charakterisierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Bemessungsregens notwendig sind, aufgezeigt werden. Die räumliche und zeitliche Struktur des Niederschlages ist zum Beispiel sehr variabel, und es ist schwierig, für eine gegebene Regenhöhe die für ein System kritischen, plausiblen Strukturen eines Niederschlages a priori zu bestimmen.
- Zudem hat auch der hydrologische Anfangszustand des Systems (Sättigungsgrad des Gebietes, Füllungsgrad der natürlichen und künstlichen Speicherbecken) einen grossen Einfluss auf die hydrologische und hydraulische Reaktion des Systems auf eine bestimmte Niederschlagsbelastung. Dieser Anfangszustand ist natürlich ebenfalls sehr variabel. Er hängt vor allem vom Vorregen ab. Es ist klar, dass ein ausserordentlicher Regenfall nicht die gleiche Wirkung auf einen Stausee hat, wenn er nach einer Trockenzeit fällt und der Seespiegel tief liegt, wie wenn er im Anschluss an eine feuchte Periode auf einen gut gefüllten Stausee trifft. Im zweiten Fall

[1] Hydram: Labor «HYDRologie et AMénagement, der EPF-Lausanne

kann das für die Reduktion einer Hochwasserspitze vorgesehene Rückhaltevolumen bereits durch das erste Hochwasser gefüllt worden sein, was bedeutet, dass kein weiterer Platz für die Rückhaltung des zweiten Niederschlagsereignisses zur Verfügung steht. In diesem Zusammenhang hat das «Bureau of Meteorology, Australia» verschiedene Richtlinien herausgegeben, um unter Berücksichtigung eines Bemessungs-Vorregens realistische Bemessungsregen zu erarbeiten (MINTY & MEIGHEN 1999). Die Verfasser erwähnen die Schwierigkeiten bei der Bestimmung eines typischen Bemessungs-Vorregens, die durch die grosse räumliche und zeitliche Variabilität der zu beobachtenden Vorregen bedingt sind. Sie schlagen vor, eher einen stochastischen Ansatz zu wählen, um durch die Verwendung einer geeigneten bedingten Wahrscheinlichkeit zufallsbedingte Vorregen zu erhalten.

Generell kann gesagt werden, dass dieser Ansatz, welcher auf einem ausserordentlichen Bemessungsregen basiert, die Festlegung einer bestimmten Anzahl von Parametern erfordert. Diese sind zur Beschreibung der Regenbelastung und des Anfangszustandes des Systems sowie auch für die spätere Anwendung der Methode notwendig. Es ist anzumerken, dass dieser Ansatz auch für extreme Ereignisse angewandt werden kann. Hierzu werden die verschiedenen Variablen und Parameter so festgelegt, dass die resultierenden Hochwasserganglinien maximal sind. Die oben erwähnten Grenzen sind jedoch für solche extremen Ereignisse nicht mehr stichhaltig.
Im Zusammenhang mit ausserordentlichen Ereignissen ist der Begriff der Wiederkehrperiode kaum von Interesse, noch macht er viel Sinn. Möchte man gleichwohl einen Wert für die Wiederkehrperiode einer Variablen der errechneten Hochwasserganglinie bestimmen (z.B. für Abflussganglinien, die entweder aus einem ausserordentlichen Niederschlag oder aus einem üblichen Bemessungsregen entstanden sind), führt der Versuch sicherlich zu einer schlechten Annäherung der Wiederkehrperiode. Dies begründet sich durch die grosse natürliche Variabilität der kritischen Variablen und vor allem der Anfangsbedingungen, die eine eindeutige Zuweisung zwischen der Wiederkehrperiode einer Variablen der Hochwasserganglinie und einer Variablen des Niederschlags verunmöglicht.
Abschliessend kann – wie auch für den auf synthetischen Abflussganglinien basierenden Ansatz – gesagt werden, dass es wenig wahrscheinlich ist, dass eine Methode, die sich auf eine ereignisbasierte Modellierung stützt, es erlaubt, die Form oder eine der Formen des kritischen ausserordentlichen Hochwassers *a priori* zu bestimmen. Die Methode, die am Labor HYDRAM im Rahmen des Projekts CONSECRU (CONSUEGRA et al. 1998) entwickelt wurde, basiert auf der stochastischen Erzeugung von verschiedenen Niederschlagsereignissen und auf der darauf folgenden Simulation der Reaktion des Einzugsgebietes auf diese hydrologischen Inputs anhand eines geeigneten Niederschlag-Abfluss-Modells. Dieser Multi-Ereignis-Ansatz, der es erlaubt, einige der oben erwähnten Probleme zu lösen, ist für die Untersuchung von ausserordentlichen Hochwassern angebracht. Er wird in Kapitel 4.3.2 genauer vorgestellt.

4.3.2 Die Methode CONSECRU (ausserordentliche Hochwasser)

Der hier vorgestellte Ansatz zur Untersuchung von seltenen Hochwassern (Wiederkehrperioden in der Grössenordnung von 100 Jahren) wurde am Labor HYDRAM erarbeitet. Er kann aber auch zur Untersuchung von ausserordentlichen Hochwassern angewendet werden (längere Wiederkehrperioden). Die Nachteile eines ereignisbasierten Ansatzes, im Wesentlichen durch die ungenaue Kenntnis der hydrologischen Anfangsituation bedingt, sind im vorhergehenden Abschnitt besprochen worden. Die Methode, die im Rahmen des Projektes CONSECRU entwickelt wurde, basiert auf einem sogenannten Multi-Ereignis-Ansatz und wurde schon im Kapitel 4.1.2 ausführlich beschrieben. Im folgenden Kapitel werden daher nur die spezifischen, ausserordentliche Hochwasser betreffenden Aspekte, besprochen.
Die Methode kann wie folgt beschrieben werden: In einer ersten Phase wird ein Modell zur stochastischen Erzeugung von Niederschlägen angewandt. Damit können beliebig viele chronologische Niederschlagsserien (kontinuierliche Serien) simuliert werden. Jeder dieser Serien werden dann auf Grund eines gegebenen Selektionskriteriums die kritischen Niederschlagsereignisse entnommen. Jedes ausgewählte Niederschlagsereignis wird mit einem räumlichen Niederschlagsverminderungs-Schema modifiziert und dient daraufhin der Initialisierung des hydrologischen Modells (mit einer möglichen, stochastisch erzeugten Grundkonfiguration des Einzugsgebietes). Dieses Modell wird schliesslich zur Berechnung eines entsprechenden Hochwasser-Szenarios benutzt. Man erhält also für jede chronologische Niederschlagsserie eine Serie von Hochwasserszenarien, anhand derer die gebräuchlichen statistischen Analysen durchgeführt werden können. Um ausserordentliche Hochwasser zu analysieren, können einfach die chronologischen Niederschlagsserien vervielfacht werden, um daraus die gleiche Anzahl fiktiver Abflussreihen zu erhalten. Mit der Vervielfachung der Niederschlagsszenarien

werden auch die möglichen hydrologischen Konfigurationen vermehrt. Dank der Niederschlags-Abfluss-Simulation entstehen dadurch zwangsläufig auch eine oder mehrere sehr ungünstige Konfigurationen (kurze Folge von zwei oder mehreren kritischen Niederschlägen und komplette Sättigung des Einzugsgebietes). Diese sind durchaus realistisch und sie können für eine gegebene hydrologische Variable (Hochwasservolumen oder maximaler Abfluss) zu einem bedeutenden kritischen Hochwasserereignis führen. Diesen stochastisch erzeugten Serien können ebenfalls verschiedene ausserordentliche Hochwasser entnommen werden.
Im speziellen Fall des Projektes CONSECRU wurde zur Erzeugung der zeitlichen Niederschlagsserien das Neymann-Scott Rectangular Pulses Modell (NSRPM) verwendet (siehe Kapitel 4.1.2, Abschnitt c). Für alle so erzeugten Niederschlagsereignisse wurde daraufhin das «Binn – Simplon» Schema zur räumlichen Niederschlagsverminderung benutzt. Zur Unterscheidung zwischen flüssigen und festen Niederschlägen wurde jedem Niederschlagsereignis eine Nullgrad-Isotherme (Schneefallgrenze) zugeordnet, die zufällig aus einer empirischen Verteilung (basierend auf Messungen der Monate August und September) gezogen wurde. Zur Initialisierung des hydrologischen Modells (für unsere Studie das SOCONT Modell) wurde jedem Bemessungs-Hyetogramm zufällig ein anfänglicher Basisabfluss zugewiesen. Diese Zuweisung erfolgt – wie schon für die Isothermen – anhand einer empirischen Verteilung, die aus Messungen während der uns interessierenden Periode abgeleitet wurde. Ein gleichwertiger Ansatz wurde auch für die Gletscherzuflüsse gewählt: Zu den durch das hydrologische Modell erzeugten Hochwasserganglinien wird ein Zufallswert addiert. Dieser stammt aus einer empirischen Verteilung, die ebenfalls auf Messungen basiert. Anhand dieser erzeugten Hochwasserganglinien kann daraufhin ein Katalog erstellt werden, der die ausserordentlichen Hochwasser umfasst.
Für die Rhone in Sion ergeben die zehn simulierten und auf der Figur 4-21 dargestellten Niederschlagsszenarien einige Hochwasser mit Abflussspitzen über 1500 m³/s. Dieser Wert entspricht ungefähr 1,25 mal dem Jahrhundertabfluss unter naturgegebenen Bedingungen, das heisst ohne Einfluss von Stauwerken (NIGGLI et al. 1997). Diese Ereignisse können als ausserordentliche Hochwasser betrachtet werden, selbst wenn es schwierig ist, ihnen eine Wiederkehrperiode zuzuordnen.

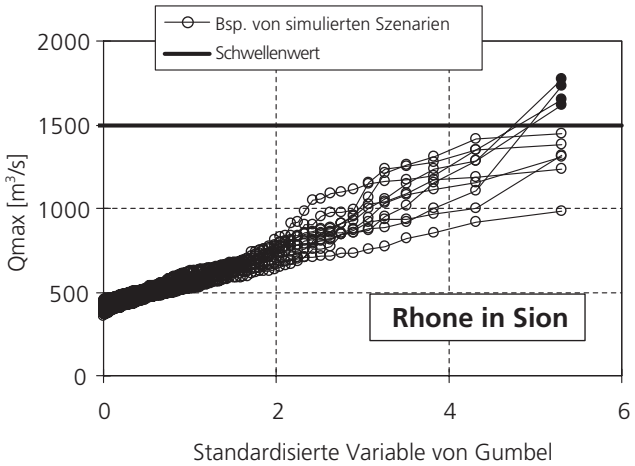


Fig. 4-21: Statistische Verteilung des simulierten Abflusses.
Die schwarzen Punkte entsprechen Hochwassern, deren Maximalabfluss höher als der Schwellenwert ist.

Es ist zu präzisieren, dass die grössten durch diese Methode erhaltenen Hochwasser nicht zwangsläufig ausserordentlichen Hochwassern entsprechen. Die Methode könnte unter Umständen sogar kein einziges ausserordentliches Hochwasser erzeugen. Dies ist der Fall, wenn die Zahl der stochastisch erzeugten Hochwasser zu klein ist und/oder wenn durch Zufall keine Kombination von hydro-meteorologischen Bedingungen erzeugt wurde, die zu ausserordentlichen Hochwassern führt. Der ausserordentliche Charakter eines Hochwasser und/oder die Auswahl der Hochwasser, die als ausserordentlich gelten, müssen also einer Überprüfung unterzogen werden. Dies kann zum Beispiel anhand eines Schwellenwertes für den maximalen Hochwasserabfluss erfolgen (aber auch anhand jedes anderen kritischen Merkmals der Hochwasserganglinien). Dieser Schwellenwert entspricht in diesem Fall der Wiederkehrperiode, die als repräsentativ für ausserordentliche Ereignisse erachtet wird. Dieses Schwellen-Quantil kann zum Beispiel bestimmt werden mittels einer Frequenzanalyse der Abflussserien, welche mit dieser Methode erzeugt wurden. Eine Gumbel-Anpassung kann (sofern diese Verteilung geeignet ist) auf jede der N Abflussserien angewendet werden. Der Medianwert der so ermittelten N Abschätzungen kann zur Abschätzung des Quantils verwendet werden, das einer ausserordentlichen Wiederkehrperiode entspricht (500, 1000 Jahre, …).
Eine andere Methode besteht darin, den maximalen Abfluss für eine bestimmte Wiederkehrperiode (typischerweise 100 Jahre) mit einem gewählten Faktor zu multiplizieren.
In der Folge können den erzeugten Hochwassern diejenigen entnommen werden, deren maximale Abfluss-

menge oberhalb dieses Schwellen-Quantils liegt. Diese Hochwasser können auf der Basis dieses Kriteriums als ausserordentliche Hochwasser betrachtet werden. Figur 4-22 zeigt zwei Beispiele von möglichen ausserordentlichen Hochwassern. Sollte sich die Anzahl der ausgewählten Hochwasser im Vergleich zu den Projektanforderungen als zu niedrig herausstellen, würde es ausreichen, einige zusätzliche Hochwasserserien zu erzeugen. Die Zahl der möglichen ausserordentlichen Hochwasserszenarien kann so nach Belieben erhöht werden, indem die Zahl der stochastisch generierten Serien und der nachfolgenden numerischen Simulationen erhöht wird. Die Methode kann also eine Vielzahl an Hochwasserganglinien liefern, was bedeutend interessanter ist als die einfache Abschätzung des maximalen Abflusses. Daraus resultiert die Möglichkeit, Probleme zu studieren, die mit dem Volumen

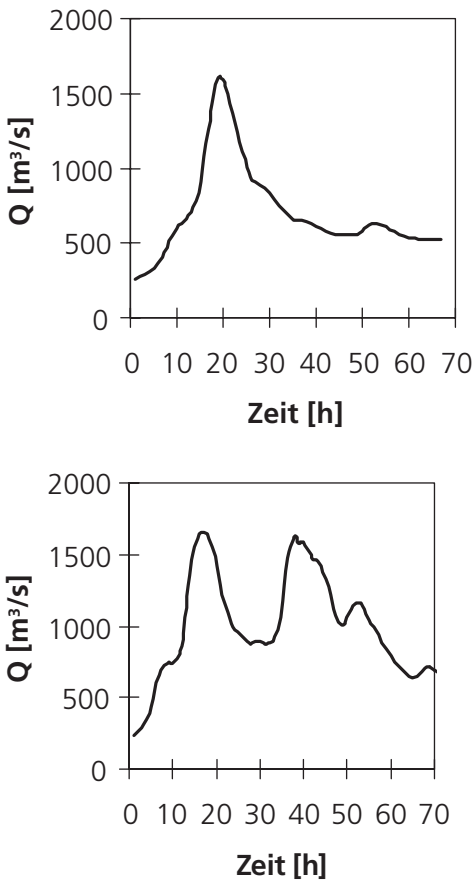


Fig. 4-22: Beispiele von ausserordentlichen Hochwassern der Rhone in Sion.

zusammenhängen, wie dies zum Beispiel für die Kartierung von Hochwasser-Gefahrenzonen oder bei der Beurteilung von Rückhaltebecken sehr hilfreich ist.

Es muss klar festgehalten werden, dass es die vorgeschlagene Methodik grundsätzlich nicht erlaubt und auch nicht zum Ziel hat, das höchste wahrscheinliche Hochwasser (PMF) eines Einzugsgebiets zu bestimmen. Ein Beispiel einer am HYDRAM entwickelten Methode zur Bestimmung eines PMF wird im folgenden Kapitel vorgestellt (Ansatz CRUEX). Für die Methodik, die im gegenwärtigen Kapitel vorgestellt wird, resultieren die generierten Hochwasser aus einer zufälligen Kombination von verschiedenen Variablen und hydrologischen Phänomenen. Letztere werden dabei anhand eines stochastischen Modells erzeugt, das an die beobachteten Prozesse oder hydro-meteorologischen Variablen angepasst wurde. Die statistischen Merkmale der anhand des NSRPM-Modells erzeugten Niederschläge sind zum Beispiel denen der beobachteten Niederschläge gleichwertig. Daher beinhalten die erzeugten Niederschlagsserien nicht zwangsläufig den maximalen möglichen Niederschlag (PMP) im engeren Sinn. Aber wenn diese Generatoren auch nicht unbedingt eine solche Art von Ereignissen liefern, kann schon allein die zufällige Kombination von ungünstigen, auf Grund von Beobachtungen erhaltenen hydro-meteorologischen Bedingungen zu verschiedenen ausserordentlichen Hochwasserszenarien führen. Diese können sich im Übrigen dem Wert des PMF annähern.

4.3.3 Das Modell CRUEX (extreme Hochwasser)

a) Beschreibung

Das Modell CRUEX ist ein Niederschlag-Abfluss-Modell, das speziell auf die Modellierung des höchsten möglichen Hochwassers (auf Englisch: Probable Maximum Flood, PMF) von alpinen Einzugsgebieten oberhalb der grossen Schweizer Stauseen ausgelegt ist. Es wurde im Rahmen des Projekts CRUEX am Labor HYDRAM entwickelt. Je nachdem, ob das Modell auf Gebiete mit oder ohne Messungen angewendet wird, ändert sich die Vorgehensweise zur Abschätzung seines Hauptparameters. Dieses Modell, dass sich an die Entwicklungen von BÉROD (1994) und diejenigen von CONSUEGRA et al. (1998) anlehnt, ist in ZELLWEGER & MUSY (2000 a, b, c) genauer beschrieben.

Das Modell CRUEX verknüpft die Infiltrationsfunktion von Philip (Umwandlung des Gesamtniederschlags in effektiven Niederschlag) mit einer Transferfunktion (Umwandlung des effektiven Niederschlags in Direktabfluss), die einem nicht-linearen Reservoir entspricht. Es benötigt als Eingangsvariable einen maximal möglichen Niederschlag (englisch: Probable Maximum Precipitation, PMP) in Stundenzeitschritten. Dies erfordert die Festlegung eines Volumens für diese PMP über eine bestimmte Dauer und die Zuweisung einer zeit-

lichen Struktur im Stundenschritt. Die Wahl der Dauer und der zeitlichen Struktur muss so vorgenommen werden, dass die Kombination dieser beiden Charakteristiken das PMF maximiert. Vorschläge zur Berechnung des PMP und zur Bestimmung der zeitlichen Struktur findet man vor allem in CHOW et al. (1988) und in BÉROD et al. (1992).
Anhand der Infiltrationsfunktion von Philip *f(t)* kann die Infiltrationskapazität zu einem Zeitpunkt *t* wie folgt ausgedrückt werden:

$$f(t) = \frac{s}{2\sqrt{t}} + a$$

wobei *s* der Sorption [mm/h^{0,5}] entspricht und a ein Parameter ist, welcher der hydraulischen Leitfähigkeit [mm/h] gleichgesetzt werden kann. Der Wert des Parameters *a* kann auf $7{,}8 \cdot 10^{-9}$ mm/h festgelegt werden (BÉROD 1994). Es handelt sich dabei um einen experimentellen Wert, der für alpine Regionen erstellt wurde. Der Parameter *s* wird so angepasst, dass er einen «Ziel-Abflusskoeffizienten» (Verhältnis zwischen dem Volumen des Direktabflusses und des Gesamtniederschlags) – repräsentativ für extreme Bedingungen – ergibt. Letzterer wurde auf 0,9 geschätzt. Es handelt sich auch dabei um einen experimentellen Wert, der mit Hilfe von Beregnungsversuchen erhalten wurde.

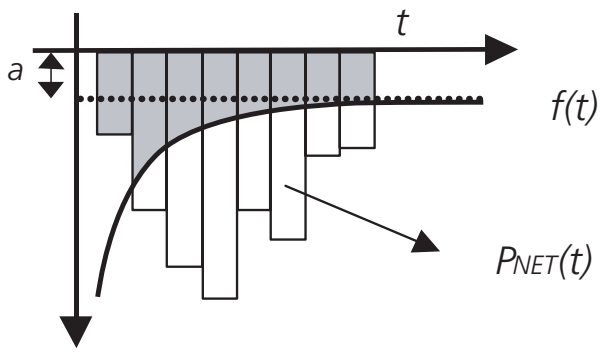


Fig. 4-23: Infiltrationsfunktion, die im Modell CRUEX verwendet wird

Der Effektive Niederschlag zum Zeitpunkt *t, $P_{NET}(t)$,* wird also erhalten, indem man vom Bemessungs-Gesamtniederschlag $P_{BRUT}(t)$ den Wert *f(t)* abzieht (siehe Figur 4-23). Es muss angemerkt werden, dass in der hier vorgeschlagenen Logik der Maximierung der komplette Gesamtniederschlag in flüssiger Form anfällt.
Die Transferfunktion, anhand derer der Oberflächenabfluss zum Zeitpunkt *t ($Q_{RUISS}(t)$)* berechnet wird, schematisiert das Einzugsgebiet als eine geneigte rechteckige Ebene. Mathematisch kann diese durch eine Kombination der Kontinuitätsgleichung und der Speichergleichung ausgedrückt werden:

$$\frac{dV(t)}{dt} = A\,\frac{dH(t)}{2dt} = A \cdot P_{NET}(t) - A \cdot Q_{RUISS}(t)$$

$$Q_{RUISS}(t) = H(t)^{5/3} \cdot \beta \cdot p^{1/2}$$

Wobei *V(t)* das Volumen des Wassers im Reservoir und *H(t)* die Wasserhöhe an der talseitigen Limite der Ebene zum Zeitpunkt *t* darstellt. In diesem Fall wird angenommen, dass für jedes beliebige *t* die Wasserhöhe an der bergseitigen Limite gleich 0 ist und dass die Änderung der Wasserhöhe von oben nach unten linear ist (siehe Figur 4-24). Dabei sind *p* und *A* die durchschnittliche Steigung [-] und die Fläche des Einzugsgebietes [km^2]. Der Parameter β schliesst alle physikalischen Charakteristiken ein, die nicht in der Modellierung berücksichtigt wurden.

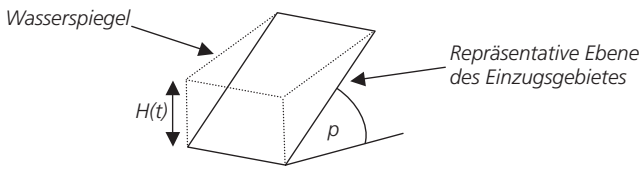


Fig. 4-24: Die Schematisierung des Abflusses auf einer geneigten rechteckigen Ebene, wie sie durch die Transferfunktion benutzt wird.

Falls für das zu untersuchende Einzugsgebiet Abflussdaten vorhanden sind, kann β anhand der beobachteten Hochwasser durch Kalibrierung erhalten werden. Ansonsten kann dieser Parameter anhand einer Potenzfunktion in Abhängigkeit von der Länge des Flussnetzes *L* [km] (auf einer Karte im Massstab 1:25'000 gemessen) ausgedrückt werden.

$$\beta = 670 \cdot L^{0,62}$$

Schliesslich kann der Hochwasserganglinie Q_{RUISS} (aus der oben genannten Infiltrations- und Transferfunktion erhalten) noch ein konstanter Basisabfluss Q_{BASE} hinzugefügt werden. Q_{BASE} kann mit Hilfe der Fläche *A [km^2]* und der Vergletscherungsrate p_{GLAC} [-] des Einzugsgebietes berechnet werden. Die Formel wurde für die Sommerperiode in den Alpen aufge-

stellt, da zu diesem Zeitpunkt der Anteil der Schnee- und Gletscherschmelze am Basisabfluss am grössten ist.

$$Q_{BASE} = A \cdot (0{,}42 \cdot p_{GLAC} + 0{,}037)$$

Es bleibt festzustellen, dass die Infiltrationsfunktion das Schlüsselelement des Niederschlag-Abfluss-Modells ist. Für einen Abfluss-Koeffizienten nahe bei 1 (was bei der hier vorgestellten Methode der Fall ist) sollte die Berücksichtigung oder das Weglassen der Infiltration auf das Endergebnis im Allgemeinen keinen grossen Einfluss haben. Dasselbe gilt für den Basisabfluss, der praktisch immer einige Grössenordnungen unterhalb des Oberflächenabflusses liegt.

b) Gültigkeitsbereich

Wiederkehrperiode
Wegen seiner ereignisbasierten Eigenschaften und in Anbetracht der oben getroffenen Hypothesen darf das Modell CRUEX nur unter den hydro-meteorologischen Bedingungen angewendet werden, welche das Bemessungshochwasser maximieren. Aus diesem Grund wird die Wiederkehrperiode des erzeugten Hochwassers nicht abgeschätzt. Dieser Ansatz ist hingegen nicht angebracht für die Modellierung von Hochwassern einer bestimmten Eintretenswahrscheinlichkeit. Dies würde die zu stark bindende Hypothese erfordern, dass die Wiederkehrperiode des Bemessungsregens derjenigen des Bemessungshochwassers entspricht. Man kann jedoch gleichwohl einige Elemente des Modells beibehalten (zum Beispiel die Transferfunktion und ihre Parametrisierung) und in einem kontinuierlichen oder Multi-Ereignis-Modus arbeiten, was ermöglicht, den Hochwassern eine Wiederkehrperiode zuzuordnen. Der Multi-Ereignis-Ansatz wurde von CONSUEGRA et al. (1998) zur Bestimmung der Hochwasser der Rhone im Wallis eingesetzt. Er wurde im Kapitel 4.1.2 (Abschnitt b) beschrieben.

Fläche des Einzugsgebietes
Das Modell CRUEX wurde so ausgelegt und parametrisiert, dass es die PMF für alpine Einzugsgebiete, deren Flächen zwischen 20 und 200 km^2 liegen, simuliert. Diese Flächenspanne entspricht ungefähr den alpinen Gebieten, die sich oberhalb der wichtigsten Schweizer Stauseen befinden. Es ist nicht empfehlenswert, das Modell ausserhalb dieser Flächenspanne zu benutzen.

Geografische Lage
Die Anwendungsgebiete des Modells sind die alpinen Regionen der Schweiz. Das hydrologische Regime des Einzugsgebietes muss vom Typ «alpin» – nach der Tabelle 5.2 des Hydrologischen Atlasses der Schweiz (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992) – sein. Dieser Typ entspricht ungefähr den Einzugsgebieten, deren durchschnittliche Höhe ungefähr 1550 m oder mehr beträgt. Die Methode ist nicht anwendbar auf Gebiete, deren natürlicher Abfluss stark durch hydroelektrische Bauwerke beeinflusst ist.

Notwendige Basisdaten
Neben dem PMP, welcher die Eingangsvariable darstellt, kann die Mehrzahl der zur Anwendung des Modells CRUEX benötigten Basisdaten beim Bundesamt für Landestopographie (L+T) bezogen werden. Die Höhe und das durchschnittliche Gefälle können mit Hilfe des digitalen Höhenmodells DHM25 berechnet werden. Das Bundesamt für Landestopographie kann ebenfalls das auf der Basis der Karte 1:25'000 gemessene und digitalisierte Flussnetz (VECTOR25) zur Verfügung stellen, anhand dessen der Paramter β berechnet werden kann. Zur Bestimmung und Berechnung der Fläche eines Einzugsgebietes können die Landeskarten verwendet werden.
Eine weitere Informationsquelle, die benutzt werden kann, ist der Hydrologische Atlas der Schweiz (SPREAFICO et al. 1992), anhand dessen das hydrologische Regime und die Vergletscherungsrate eines Einzugsgebiets bestimmt werden kann.

Leistungsfähigkeit des Modells CRUEX
Selbstverständlich ist es nicht möglich, die Leistungsfähigkeit des Modells CRUEX zur Wiedergabe der PMF durch Zahlen auszudrücken. Man kann jedoch seine Fähigkeit zur Wiedergabe der beobachteten Ereignisse – die zur Validierung der regionalen Formel von β und der Transferfunktion beigetragen haben – auswerten. Die verwendeten Ereignisse fanden alle im Sommer statt (kein Niederschlag in Form von Schnee) und die ereignisbasierten Abflusskoeffizienten wurden mit Hilfe einer Basisabflusstrennung der Hochwasserganglinien festgelegt. Der mittlere relative Fehler zwischen den simulierten und den beobachteten Spitzenabflüssen beträgt ungefähr +/–30%.

5 Hochwasserabschätzung ohne Einbezug von Abflussmessungen

Die Erfahrungen in der Schweiz zeigen, dass es sinnvoll ist, bei der Hochwasserabschätzung zwischen *mittelgrossen Einzugsgebieten (10–500 km²)* und *kleinen Einzugsgebieten (<10 km²)* zu unterscheiden. Methoden für mittelgrosse Einzugsgebiete können nämlich 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 dazu, dass nur für sehr wenige Gebiete genügend lange Messreihen zur Verfügung stehen, um die Abschätzverfahren zu eichen.

5.1 Mittelgrosse Einzugsgebiete (10–500 km²)

5.1.1 Vorgehen

Die Hydrologen und Hydrologinnen wissen, dass es *keine universelle Methode* für die Hochwasserabschätzung gibt und in absehbarer Zeit auch nicht geben wird. Dank der grossen Fortschritte der elektronischen Datenverarbeitung ist man heute aber nicht mehr gezwungen, sich auf eine einzige Methode zu beschränken. Man kann viele verschiedene Abschätzverfahren anwenden und ihre Ergebnisse analysieren, was noch vor 20 Jahren aus Zeit- und Kostengründen in diesem Umfang nicht möglich war. So gelangt man heute zu einer breit abgestützten und damit insgesamt plausibleren Hochwasserabschätzung. Dabei nutzt man die Tatsache, dass jede Methode ihre Stärken und Schwächen hat und diese je nach Einzugsgebiet unterschiedlich zum Tragen kommen.
Dank intensiver Bemühungen von Hochschulen und Bundesstellen verfügen wir heute also über vielfältige Hilfsmittel und Instrumente zur effizienten Abschätzung von Hochwassern. 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 kleiner als früher und es bleibt mehr Zeit für vertiefende Analysen und für die Plausibilisierung der Resultate.
Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen den älteren und den neueren Ansätzen ergibt sich bezüglich ihrer Zielgrösse: Bei den älteren Ansätzen, die auf Hüllkurven basieren, wird in der Regel ein Q_{max}, bei den neueren Methoden oftmals ein HQ_{100} bestimmt. Das bedeutet, dass die seltenen Hochwasserabflüsse mit den älteren Ansätzen (z.B. Kürsteiner oder Müller-Zeller) methodenbedingt überschätzt werden und man mit ihnen in Dimensionierungsfragen auf der sicheren, aber auch auf der teureren, Seite liegt. Die neueren Methoden ergeben im allgemeinen genauere Resultate, wobei eine Unterschätzung des «wahren Wertes» genau so wahrscheinlich ist wie eine Überschätzung. Da die hier vorgeschlagene Strategie zur Hochwasserabschätzung aber immer mehrere Methoden kombiniert, wird das Risiko einer Unterschätzung stark vermindert und man erreicht eine insgesamt genauere Abschätzung.
Die Hochwasserabschätzung kann – gemäss der im Folgenden vorgeschlagenen Strategie – in vier Arbeitsschritte gegliedert werden (vgl. Fig. 5-1):

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

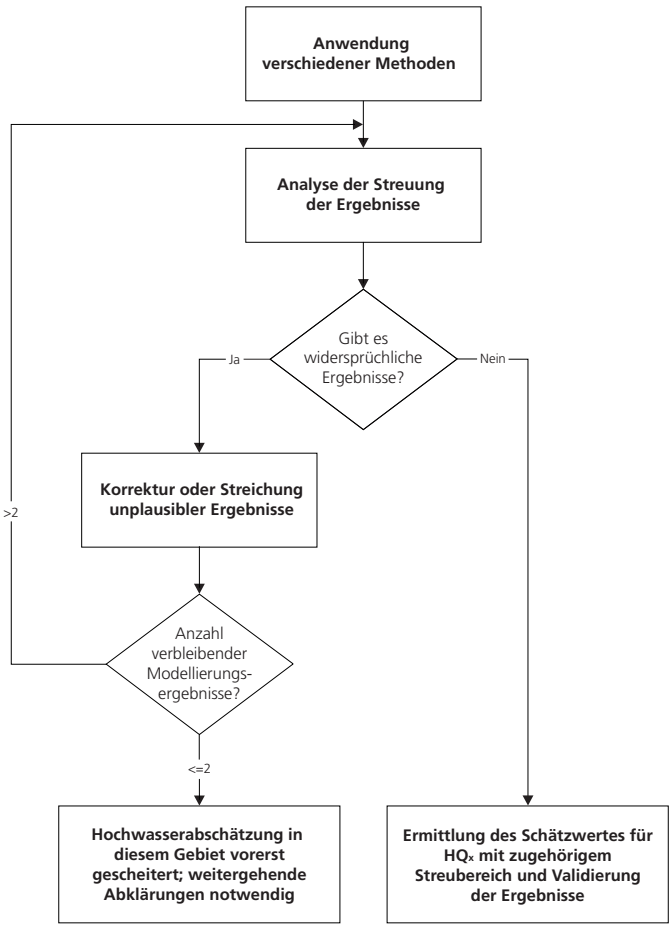


Fig.5-1: Hochwasserabschätzung in mittelgrossen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen.

Mit diesem Vorgehen erhalten wir also sowohl einen *Schätzwert* als auch einen zugehörigen *Streubereich.* Dieser Streubereich kann als «Ersatz» für das Vertrauensintervall (vgl. Kapitel 4.2, Extremwertstatistik) angesehen werden, welches im Zusammenhang mit wasserbaulichen Überlegungen sehr wichtig ist.
In den folgenden Kapiteln (5.1.2–5.1.6) werden verschiedene Methoden zur Hochwasserabschätzung vorgestellt und allfällige Schwierigkeiten bei der Bearbeitung werden anhand konkreter Beispiele erläutert.

5.1.2 Methoden

In diesem Kapitel werden verschiedene Methoden vorgestellt, die sich für die Abschätzung von Hochwasserspitzen in mittelgrossen schweizerischen Einzugsgebieten eignen. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Methoden unterschiedliche Zielgrössen haben:

– Q_{max}: Methoden, die auf Hüllkurven basieren, welche Datenkollektive der höchsten beobachteten Hochwasserspitzen (HHQ) umhüllen (Kürsteiner, Müller-Zeller und GIUB'96). Die Q_{max}-Werte verschiedener Methoden können jedoch nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden, da die Herleitung der verschiedenen Ansätze nicht auf denselben Datengrundlagen beruht. Q_{max}-Werte werden oftmals verwendet, um ein sogenanntes EHQ (Extremhochwasser) einzugrenzen (vgl. Kapitel 4.3).

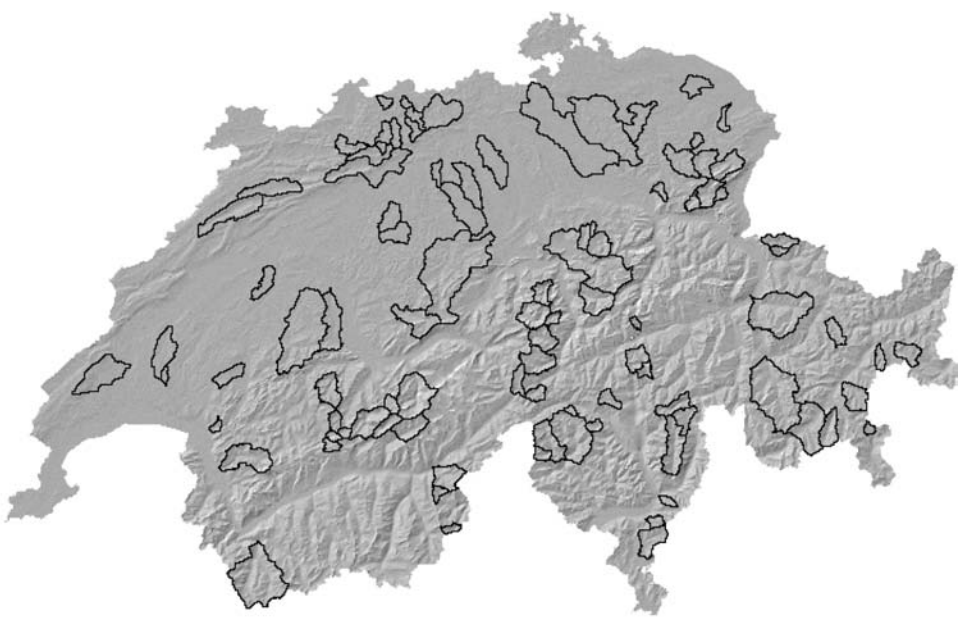


Fig. 5-2: Karte der Testgebiete.

– HQ_{20}, HQ_{100}: Methoden, die Hochwasserspitzen bestimmter Wiederkehrperioden berechnen (Kölla, GIUB'96)
– HQ_x: Methoden, bei denen die Wiederkehrperiode frei gewählt werden kann (Momente, BaD7)

Die meisten der hier vorgestellten Methoden wurden in einer umfassenden Studie (BARBEN 2001) miteinander verglichen und in ein Softwarepaket mit dem Namen HQx_meso_CH (vgl. Kapitel 5.1.3) integriert. Um die Eignung der unterschiedlichen Methoden abzuklären, wurden die Berechnungsergebnisse von 95 Testgebieten (Fig. 5-2) mit entsprechenden Referenzwerten verglichen. Die Referenzwerte wurden durch extremwertstatistische Auswertungen der Abflussmessreihen der Testgebiete ermittelt (Extrapolation auf das HQ_{100}, vgl. auch Kapitel 4.2, Extremwertstatistik).
Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Referenzwerten ist im Anschluss an die jeweilige Modellbeschreibung im Abschnitt «Güte der Resultate» dargestellt (Grafik und Korrelationskoeffizienten). Die Abweichungen werden auch räumlich analysiert:
– Die relativen Abweichungen [%] vom Referenzwert werden in einer Pseudo-3D-Grafik der Schweiz (Rasterweite 10 km) aufgetragen, wobei die Abweichungen bei den 95 Referenzstationen als Stützstellen für die räumliche Interpolation dienten. Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
– Die Informationen der räumlichen Interpolation wurden verwendet, um die mittleren relativen Abweichungen pro Basisgebiet zu berechnen. Die Basisgebiete entstammen dem «Hydrologischen Atlas der Schweiz» (HADES). Die relativen Abweichungen wurden klassiert; die Werte reichen von dunkelrot für Unterschätzung der Referenzwerte über 50% bis dunkelgrün für Überschätzung der Referenzwerte über 500%.

Legende zu den Abbildungen im Abschnitt «Güte der Resultate».

Abweichung von den Referenzwerten [%]

Unterschätzung	geringe Abweichung	Überschätzung
<–50	–25 bis 25	25 bis 50
–50 bis –25		50 bis 100
		100 bis 500
		> 500

Die Beschreibungen der Methoden orientieren sich an den Originalarbeiten der jeweiligen Autoren. Mit der Anwendung der Methoden in HQx_meso_CH werden die Modellparameter automatisch erhoben. Es ist aber auch möglich, einzelne Modellparameter aufgrund eigener Erfahrungen und Kenntnisse zu verändern. Bei den neueren Ansätzen ist die automatische Parameterwahl in der Regel unproblematisch, da die Modellentwicklungen auf digitalen Datensätzen basieren. Bei älteren Methoden kann es aber im Vergleich zur klassischen Anwendung zu geringfügigen Abweichungen kommen. Das Verfahren Kölla wird einerseits im Kapitel 5.1 (Mittelgrosse Einzugsgebiete) vorgestellt und andererseits auch im Kapitel 5.2 (Kleine Einzugsgebiete) beschrieben. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird das Verfahren Kölla deshalb im Kontext mit mittelgrossen (mesoskaligen) Einzugsgebieten als «Kölla meso» bezeichnet.
Die Wahl der Modellparameter hängt von der Erfahrung und von den Ortskenntnissen der Anwenderinnen und Anwender ab. In dieser Publikation werden Vergleiche präsentiert, die sich bei der Anwendung von objektiv erhobenen Parametern ergeben, d. h. die verwendeten Parameter werden durch das Programm HQx_meso_CH berechnet. Es sei aber darauf hingewiesen, dass es möglich ist, bei der Software-Anwendung einzelne Modellparameter aufgrund von Expertenwissen zu verändern.

a) Kürsteiner

Beschreibung des Modells

KÜRSTEINER (1917) verwendet eine Hüllkurve der Form $Q_{max} = a \cdot F^b$ für die Abschätzung von Spitzenabflüssen. Dabei ist *a* nicht konstant, sondern variiert in Abhängigkeit der Hangneigung gemäss Tabelle 5-1. Da der Faktor *a* in der Schweiz unter dem Namen *c* bekannt ist, wird im Folgenden vom *c-Wert nach Kürsteiner* gesprochen.

$$Q_{max} = c \cdot F^{2/3}$$

Q_{max} Abflussspitze [m^3/s]
c Beiwert zur Charakterisierung des Einzugsgebietes [-]
F Einzugsgebietsgrösse [km^2]

	c
ausgesprochen flaches Gelände, mit leicht hügeligen Randgebieten; Kanäle aus Riedentwässerungen	2,5 bis 4
teilweise flaches und teilweise hügeliges Einzugsgebiet	4 bis 6
meist hügeliges Voralpengelände	6 bis 9
steiles gebirgiges Einzugsgebiet	9 bis 12
vergletscherte Einzugsgebiete	3 bis 5

Tab. 5-1: c-Werte nach Kürsteiner resp. Heusser[1].

Das Programm HQx_meso_CH enthält einen flächendeckenden Datensatz der c-Werte für die Schweiz, welcher auf der Hangneigung und der Gletscherbedeckung gemäss Tab. 5-1 basiert. Jedem Gitterpunkt des Rasters des Höhenmodells (RIMINI, auf 100 m Raster interpoliert) wird ein Neigungswert zugeordnet. Daraus lässt sich nach der Beziehung aus Figur 5-3 ein mittlerer c-Wert für ein beliebiges Einzugsgebiet berechnen. Die Grenze zwischen flach und hügelig wurde bei einer Hangneigung von 5° und die Grenze zwischen hügelig und steil bei einer Hangneigung von 25° festgelegt. Die Gletscherflächen wurden der Arealstatistik (BFS 1985) entnommen. Den Gletscherflächen wird ein c-Wert von 4 zugewiesen.

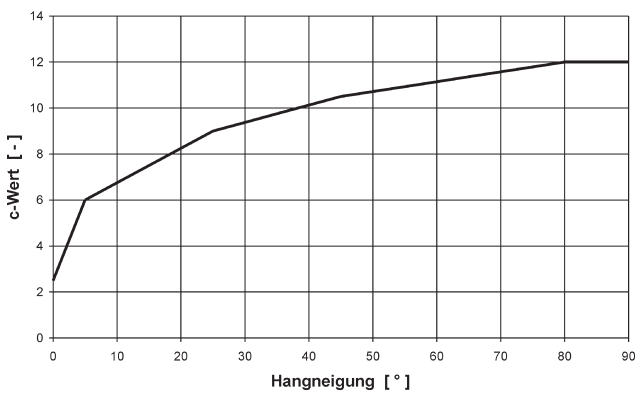


Fig. 5-3: c-Wert im Programm HQx_meso_CH, umgesetzt nach HEUSSER (1947).

Unter dem Namen *Kürsteiner* haben sich in der Schweiz auch Verfahren etabliert, die von KÜRSTEINER (1917) nur den Exponenten *b* übernommen haben, den Koeffizienten *c* aber nicht aus den Gebietseigenschaften ableiten, sondern anhand beobachteter Hochwasserereignisse bestimmen[2].

[1] Die Abschätzmethode ist zwar unter dem Namen Kürsteiner bekannt, HEUSSER (1947) hat jedoch die c-Werte detaillierter bestimmt. KÜRSTEINER (1917) hat sich nämlich nur sehr knapp zu den c-Werten geäussert: «Die spezifischen Abflussmengen sind nach der empirischen, an einer grossen Zahl von tatsächlich beobachteten Hochwassermengen abgeleiteten Formel q = (9 bis 12)/$F^{1/3}$ berechnet worden, unter Berücksichtigung des höchsten Wertes, der Zahl 12».

[2] Die Ergebnisse im Abschnitt «Güte der Resultate» beziehen sich nur auf die hier dargestellten Originalansätze von Kürsteiner und Heusser.

Anwendungsbereiche und Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses
HEUSSER (1947) erwähnt, dass das Q_{max} ungefähr einem HQ_{100} entspreche. Der Vergleich der Referenzwerte (HQ_{100}) mit den Abschätzungen nach Kürsteiner zeigt jedoch eine mittlere Überschätzung der Referenzwerte um knapp 40%.

Einzugsgebietsgrösse
KÜRSTEINER (1917) äussert sich in seinem Aufsatz leider nicht, für welche Einzugsgebietsgrössen seine Formel gilt und welche Einzugsgebiete er für die Eichung verwendet hat. HEUSSER (1947) publiziert hingegen eine Abbildung, in der die meisten Einzugsgebiete Flächen zwischen 5 und 500 km^2 aufweisen.

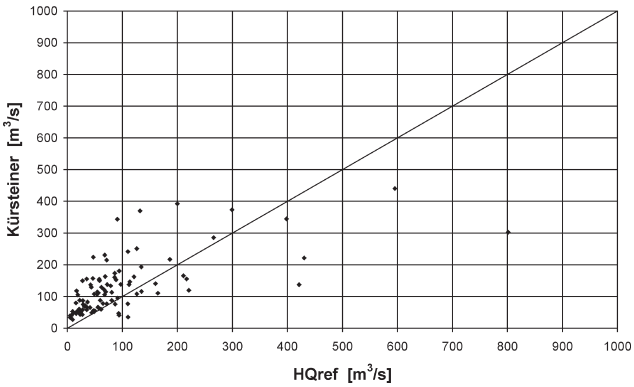
Naturräumliche Zuordnung
Weder Kürsteiner noch Heusser machen naturräumliche Einschränkungen bei der Anwendung ihres Ansatzes. Daraus wird gefolgert, dass das Modell in der ganzen Schweiz ohne Einschränkung eingesetzt werden kann.

Eingabegrössen
Das Modell benötigt die Einzugsgebietsgrösse und den c-Wert als Eingabegrössen. Das Programm HQx_meso_CH berechnet den c-Wert automatisch aus den bereitstehenden Datensätzen.

Fallbeispiel Langeten
c aus HQx_meso_CH = 5,81
$Q_{max} = 5{,}81 \cdot 58{,}7^{2/3} = 88\ m^3/s$

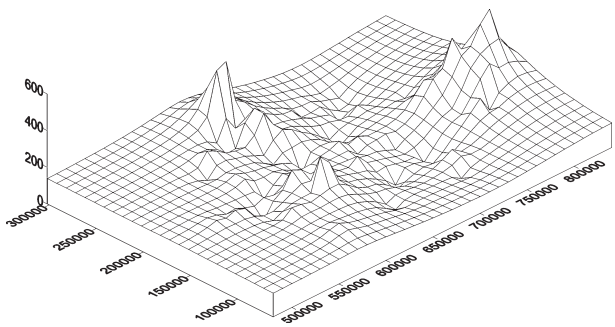
Güte der Resultate
Der Vergleich der Ergebnisse nach Kürsteiner mit den Referenzwerten (HQ_{100}) zeigt eine recht grosse Streuung. Der Schwerpunkt der Resultate liegt deutlich über der 1:1-Geraden. Im allgemeinen ist das Q_{max} nach Kürsteiner also deutlich grösser als das HQ_{100}. Bei Kürsteiner gibt es zwei ausgeprägte Problemzonen im Bereich des Kantons Basel-Landschaft und im Unterengadin (Fig. 5-4, nächste Seite unten). Dazwischen, in einem breiten Band, das von Süden nach Nordosten läuft, liefert das Modell relativ gute Ergebnisse.

Der Ansatz nach Kürsteiner ist sehr einfach aufgebaut. Verbesserungen könnten durch die Bildung von homogenen Regionen mit regionalen c-Werten erzielt werden.



Korrelationskoeffizienten Kürsteiner / Referenz

alle Gebiete (95)	0,648
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,575
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,475



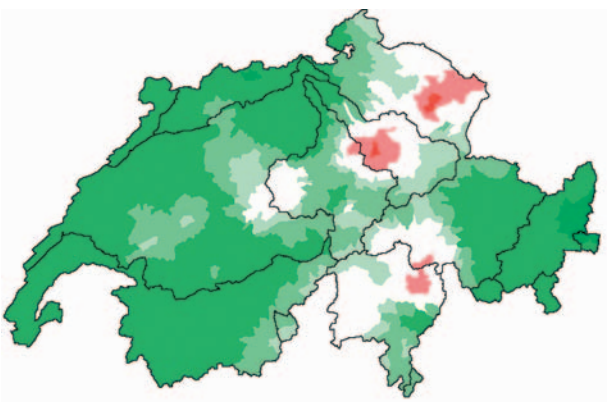


Fig. 5-4: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kürsteiner
oben: Abschätzung nach Kürsteiner und Referenzwerte (HQ_{100})
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent (Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

b) Müller-Zeller

Beschreibung des Modells

Der Ansatz von MÜLLER (1943) gleicht demjenigen von KÜRSTEINER (1917). Auch Müller verwendet eine Hüllkurve der Form $Q_{max} = a \cdot F^b$ und der Exponent beträgt ebenfalls ⅔. Der Abflusskoeffizient *a* wird bei Müller ψ genannt, er hängt von der Vegetation und von der Hangneigung ab (vgl. Tab. 5-2). ZELLER (1975) hat den Ansatz verfeinert und mit einer Zonenkarte der Starkniederschläge ergänzt (vgl. Fig. 5-5).

$$Q_{max} = \alpha \cdot \psi \cdot F^{2/3}$$

Q_{max} Abflussspitze [m³/s]
α Zonenkoeffizient [-]
ψ Abflusskoeffizient [-]
F Einzugsgebietsgrösse [km²]

Höhenlage	Charakter	ψ flach bis steil
oberhalb Waldgrenze	undurchlässige Weideböden, Fels	0,4 bis 0,8
	Schutthalden (Zeller)	0,05 bis 0,4
Waldgrenzgebiet	Alpweiden mit Sträuchern, einzelne Bäume	0,3 bis 0,7
	lichter Wald ohne Schluss	0,2 bis 0,6
tiefere Lagen	junger Wald, Wies- und Ackerland	0,1 bis 0,5
	vernässte Gebiete, Sumpf (Zeller)	0,3 bis 0,6

Tab. 5-2: Abflusskoeffizient ψ nach Müller resp. Zeller.

Der Abflusskoeffizient ψ ist eine Funktion der Hangneigung und der Landnutzung. Das Programm HQx_meso_CH ermittelt die Landnutzung anhand der Arealstatistik (BFS 1985) und ordnet sie den ψ-Werten aus Tabelle 5-2 zu. Für jede Landnutzungsklasse wurde eine Funktion bestimmt, die den Verlauf von ψ in Abhängigkeit von der Hangneigung definiert (wie bei Kürsteiner). Die Grenze zwischen flach und mittel wurde bei 5°, die Grenze zwischen mittel und steil bei 25° gezogen. Um flächendeckende Landnutzungsinformationen bereitzustellen, müssen die Landnutzungsklassen der Arealstatistik ziemlich pragmatisch den Klassen von Müller zugeordnet werden. Gletscherflächen (flächenmässig nicht unbedeutend) erhalten generell einen Abflusskoeffizienten ψ von 0,1, Gewässer ein ψ von 1,0 und Siedlungen ein ψ von 0,5 (unabhängig von der Hangneigung). Alter und junger Wald werden in der Arealstatistik nicht unterschieden. Anwenderinnen und Anwender können den vom Programm HQx_meso_CH bestimmten ψ-Wert aufgrund ihrer Gebietskenntnisse und Erfahrungen anpassen. ZELLER (1975) unterscheidet drei verschiedene Zonen

mit α-Werten von 20, 35 und 50 (vgl. Karte Fig. 5-5). Die Zonen bilden indirekt die Starkniederschlagsgebiete der Schweiz ab.

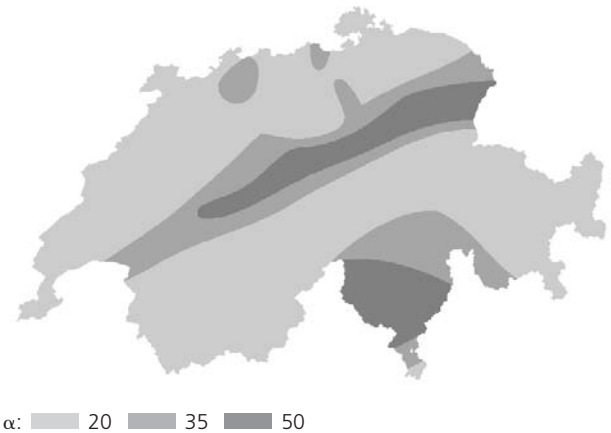


Fig. 5-5: Zonenkarte für die α-Werte nach Zeller.

Anwendungsbereiche und Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses
Müller macht keine Angaben zur Jährlichkeit. Der Vergleich der Referenzwerte (HQ_{100}) mit den Abschätzungen nach Müller-Zeller ergibt eine mittlere Überschätzung der Referenzwerte um rund 80%.

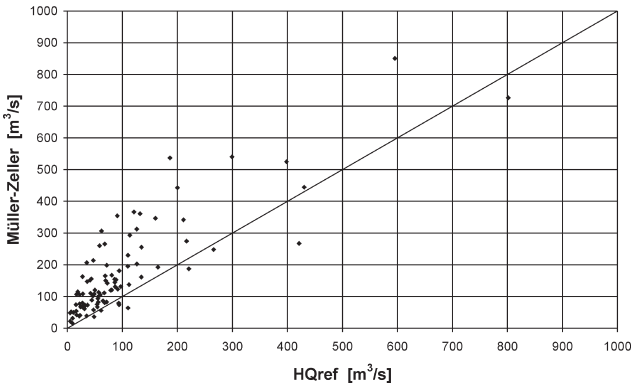
Einzugsgebietsgrösse
Müller nennt für seine ursprüngliche Methode (ohne die Regenzonen) einen Gültigkeitsbereich von 2 bis 1000 km². Zeller schränkt die Anwendung seiner Zonenkarte auf Einzugsgebietsgrössen von 0,5 bis 100 km² ein. Bei der Verwendung von Müller in Verbindung mit Zeller gilt somit ein Einsatzbereich von 2 bis 100 km².

Naturräumliche Zuordnung
Müller macht für die Anwendung seines Ansatzes keine naturräumlichen Einschränkungen. Bei der Anwendung mit dem Programm HQx_meso_CH dürften die grössten Probleme in grossen Höhen (ungünstige Angaben zur Landnutzung) und in stark überbauten Gebieten auftreten. Es wird empfohlen, den Abflusskoeffizienten ψ in solchen Fällen zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Eingabegrössen
Das Modell benötigt die Einzugsgebietsgrösse, den α- und den ψ-Wert als Eingabegrössen. Das Programm HQx_meso_CH berechnet diese Parameter automatisch aus den bereitstehenden Datensätzen.

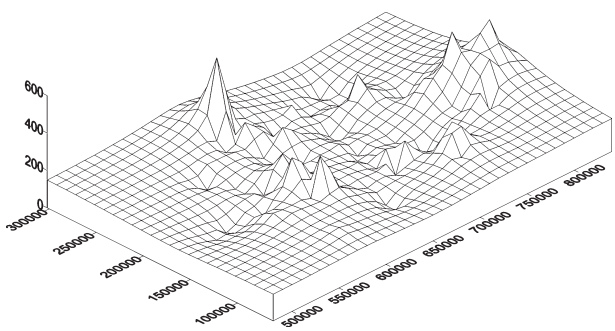
Fallbeispiel Langeten
α aus HQx_meso_CH = 34,7
ψ aus HQx_meso_CH = 0,20
$Q_{max} = 34{,}7 \cdot 0{,}2 \cdot 58{,}7^{2/3} = 105$ m³/s

Güte der Resultate
Die Korrelationskoeffizienten sind – verglichen mit dem Modell Kürsteiner – deutlich angestiegen. Das heisst, dass die Hochwasserabschätzung nach Müller-Zeller zuverlässiger ist als nach Kürsteiner. Dies lässt sich durch den Einbezug der Niederschlagsverteilung und die differenziertere Charakterisierung der Regionen erklären. Die bereits bei Kürsteiner erläuterten grossen Problemzonen (Basel-Landschaft und Unterengadin) sind aber auch bei Müller-Zeller vorhanden (vgl. Fig. 5-6).



Korrelationskoeffizienten Müller-Zeller / Referenz

alle Gebiete (95)	0,840
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,798
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,649



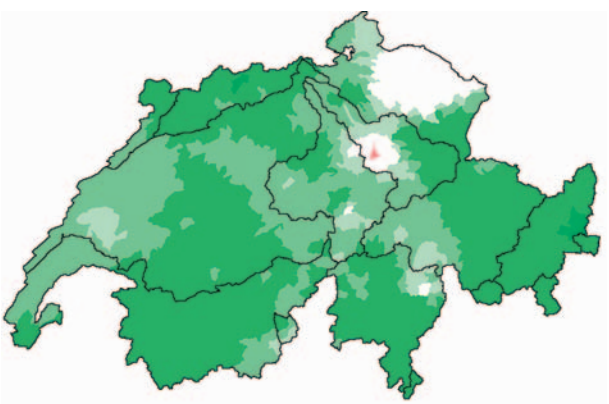


Fig. 5-6: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Müller-Zeller
oben: Abschätzung nach Müller-Zeller und Referenzwerte (HQ_{100})
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent (Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

c) Kölla meso

Beschreibung des Modells

Die Methode KÖLLA (1986) ist eine Vertreterin der *Laufzeitverfahren.* Diese Verfahren gehen davon aus, dass die Hochwasserspitze dann eintritt, wenn das gesamte Einzugsgebiet zum Abfluss beiträgt, d. h. wenn der zuhinterst im Einzugsgebiet gefallene Regen den Kontrollquerschnitt erreicht. Die Zeitspanne vom Regenbeginn bis zur Hochwasserspitze nennt man *Konzentrationszeit.*

Die *Rational Formula* ist die einfachste Form der Hochwasserabschätzung mit dem Laufzeitverfahren:

$$HQ_x = r_x(t_c) \cdot \psi_s \cdot Fn$$

HQ_x	x-jährliche Abflussspitze [m³/s]
r_x	x-jährliche Niederschlagsintensität [mm/h]
t_c	Konzentrationszeit des Einzugsgebietes [h]
ψ_s	Spitzenabflussbeiwert [-]
Fn	Einzugsgebietsgrösse [km²]

Der Ansatz von Kölla ist eine Weiterentwicklung der Rational Formula. Der Spitzenabflussbeiwert fällt bei Kölla weg. An seine Stelle tritt die sogenannte *beitragende Fläche,* die mit zunehmender Wiederkehrperiode grösser wird.

$$HQ_x = (r_x(t_{c(x)}) + r_s - f_x) \cdot (FL_{eff(x)} + FL_b) \cdot 0{,}278 + Q_{vgl(x)}$$

r_x	Niederschlagsintensität [mm/h] eines Blockregens der Dauer t_c
t_c	Konzentrationszeit [h] mit $t_c = t_1 + t_2$
t_1	Benetzungszeit [h]
t_2	Laufzeit im Gerinne [h]
r_s	Schmelzwasseräquivalent der Schneedecke [mm/h]
f_x	Verluste [mm/h]
FL_{eff}	beitragende Fläche [km²]
FL_b	befestigte Fläche [km²]
Q_{vgl}	Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]
0,278	Umrechnungsfaktor [mm/h] >> [m³/s]

KÖLLA (1986) umschreibt den Ansatz folgendermassen: «Ein Hochwasser entsteht aus einem Regen bestimmter Intensität, der auf hydraulisch an ein Gerinne angeschlossene Flächen fällt und von dort – abzüglich des Verlustanteils an den Untergrund und an die Erweiterung der gerinnenahen Sättigungszonen – zum Gerinne und schliesslich zum Kontrollquerschnitt abfliesst. Hochwasserspitze, effektiv beitragende Fläche und eventuell der Verlust sind Funktion einer gewählten Jährlichkeit x».

Anwendungsbereiche und Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses
Die Methode Kölla liefert Abschätzungen für das HQ_{20}, das HQ_{100} und das $HQ_{2,33}$. Die Umsetzung im Programm HQx_meso_CH beschränkt sich jedoch auf die Berechnung des HQ_{20} und des HQ_{100}.

Einzugsgebietsgrösse
KÖLLA (1986) nennt einen Gültigkeitsbereich von 1 bis 100 km². Im Programm HQx_meso_CH können die Gebietsniederschläge wahlweise abgemindert werden, was in der Originalarbeit von Kölla nicht vorgesehen ist. Deshalb kann das Programm *Kölla meso* auch in *Einzugsbieten über 100 km² (bis etwa 500 km²)* verwendet werden. In diesem Fall sollte das Programm aber immer mit Niederschlagsabminderung eingesetzt werden, da die implizierten Punktregen nur für kleinere Gebiete gelten. Die von KÖLLA (1986) angegebene Untergrenze von 1 km² liegt für die Anwendung mit HQx_meso_CH zu tief, weil das Programm die Gerinnelängen anhand des digitalen Gewässernetzes 1:25'000 (L+T 1999) bestimmt. Dieses umfasst jedoch nur die ganzjährlich wasserführenden (perennierenden), auf der Landeskarte blau eingezeichneten Gewässer. Nach KÖLLA (1986) sollten zusätzlich aber auch die trockenfallenden (episodischen) Gerinne berücksichtigt werden, welche auf der Landeskarte mit einer schwarz gepunkteten Liniensignatur eingetragen sind. Bei kleinen Einzugsgebieten kann die Vernachlässigung der episodischen Gerinne stark ins Gewicht fallen, weshalb bei der Anwendung von Kölla meso mit HQx_meso_CH eine *Untergrenze von 10 km²* empfohlen wird. Bei Einzugsgebieten mit verhältnismässig vielen episodischen Gerinnen kann die Gerinnelänge aber auch manuell aus der Landeskarte 1:25'000 herausgelesen und im Programm eingegeben werden.

Naturräumliche Zuordnung
Die Ermittlung der Landschaftscharakteristik und die Zuordnung des erforderlichen Regenvolumens und der Verluste erfolgt sowohl in der Originalarbeit von Kölla als auch im Programm HQx_meso_CH anhand der Bodeneignungskarte (BFS 1980). Die Bodeneignungskarte stellt die Eignung bezüglich der landwirtschaftlichen Nutzung dar. Aus diesem Grund wurden höhergelegene Gebiete, welche sich nicht für die Landwirtschaft eignen, nicht sehr genau kartiert. Bei der Anwendung des Programms in diesen Höhen ist deshalb eine kritische Beurteilung der automatisch ermittelten Parameter unerlässlich.

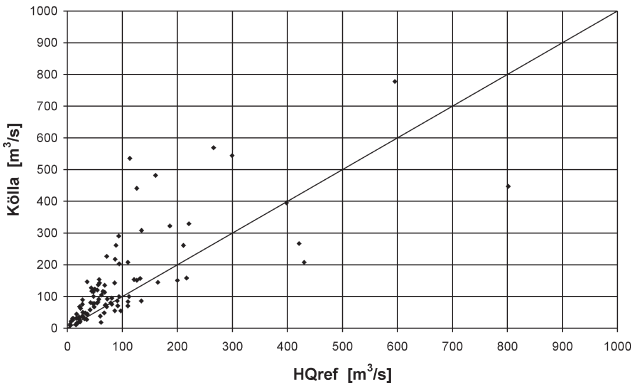
Eingabegrössen
Das Modell benötigt verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter als Eingabegrössen. Das Programm HQx_meso_CH berechnet diese Parameter automatisch aus den bereitstehenden Datensätzen. Die Starkniederschlagsdaten stammen aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz, Tafel 2.4 (GEIGER et al. 1992). Die Niederschlagsdaten können manuell verändert werden (z.B. durch die Eingabe der Starkniederschläge gemäss Tafel 2.4²). Die Niederschlagsintensität r_x wird von HQx_meso_CH iterativ ermittelt.

Fallbeispiel Langeten
alle Werte aus HQx_meso_CH:
r_x = 13,59 mm/h
t_c = 4,98 h
r_s = 1,66 mm/h
f_x = 4,37 mm/h
FL_{eff} = 22,00 km²
FL_b = 1,49 km²
Q_{vgl} = 0 m³/s

HQ_{100} = 71 m³/s

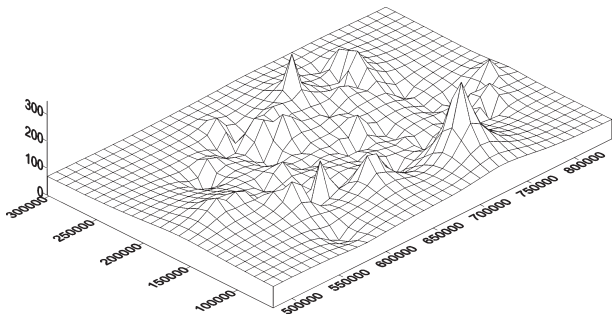
Güte der Resultate
Die Streuung der Resultate ist recht gross (vgl. Fig. 5-7, oben). Der Vergleich der Abschätzungen nach Kölla meso mit den Referenzwerten (HQ_{100}) zeigt, dass die Datenpunkte nicht symmetrisch um die 1:1-Gerade verteilt sind. Man muss im Durchschnitt mit einer Überschätzung der Referenzwerte von rund 25% durch die Methode Kölla meso rechnen. Die Regionen mit starker Überschätzung der Referenzwerte liegen gleichmässiger über die Schweiz verteilt als bei den flächendominierten Verfahren (Kürsteiner, Müller-Zeller).

Die Analysen zeigen, dass das Verfahren Kölla meso sehr empfindlich auf den Parameter r_x (Niederschlagsintensität) reagiert. In Regionen mit extremen Niederschlagsgradienten, beispielsweise um die Rigi (vgl. Tab. 5-7), können die Differenzen zu den Referenzwerten beträchtlich werden. In solchen Regionen sollten zum Vergleich auch andere Methoden eingesetzt werden.



Korrelationskoeffizienten Kölla meso / Referenz

alle Gebiete (95)	0,728
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,631
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,627



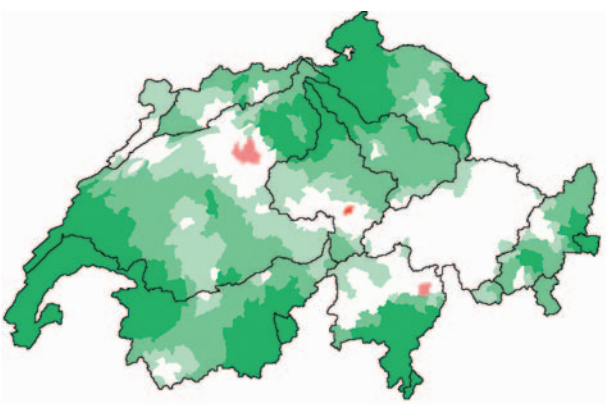


Fig. 5-7: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kölla meso
oben: Abschätzung nach Kölla meso und Referenzwerte (HQ_{100})
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent (Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

d) GIUB'96

Beschreibung des Modells

KAN (1995) und WEINGARTNER (1999) haben als Grundlage für das Modell *GIUB'96* über 700 Hochwasserspitzen ausgewertet, die vom ehemaligen Amt für Strassen- und Flussbau (ASF 1974) und von der LHG (SPREAFICO & STADLER 1986 und 1988, SPREAFICO & ASCHWANDEN 1991) gesammelt wurden (vgl. Fig. 5-8). Die Beobachtungen stammen aus dem Zeitraum 1869 bis 1991.

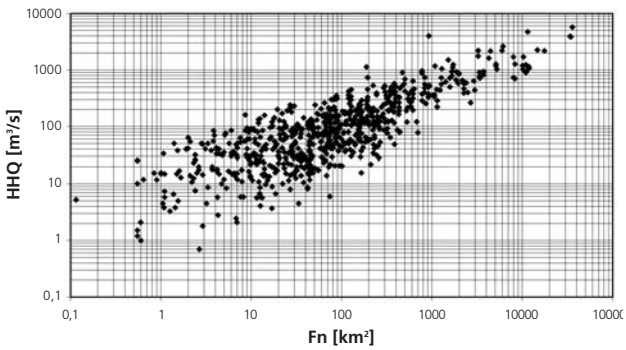


Fig. 5-8: Datengrundlage für das Modell GIUB'96 (aus WEINGARTNER 1999).

Aus diesem gesamtschweizerischen Datenkollektiv wurden Regionen mit vergleichbarem Hochwasserverhalten abgeleitet (vgl. Fig. 5-10). In KAN (1995) und WEINGARTNER (1999) ist das Vorgehen ausführlich beschrieben.
Für alle Hochwasserregionen wurden Kennwerte bestimmt, welche die Abschätzung von 100jährlichen Hochwasserspitzen und von Q_{max}-Werten erlauben (vgl. Fig. 5-9).

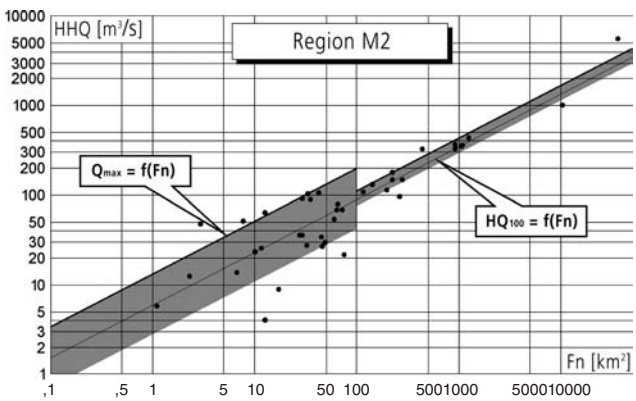


Fig. 5-9: Regionenspezifische Hüllkurve (Q_{max} = f(Fn) und HQ_{100} = f(Fn)) der Region M2 (aus WEINGARTNER 1999).

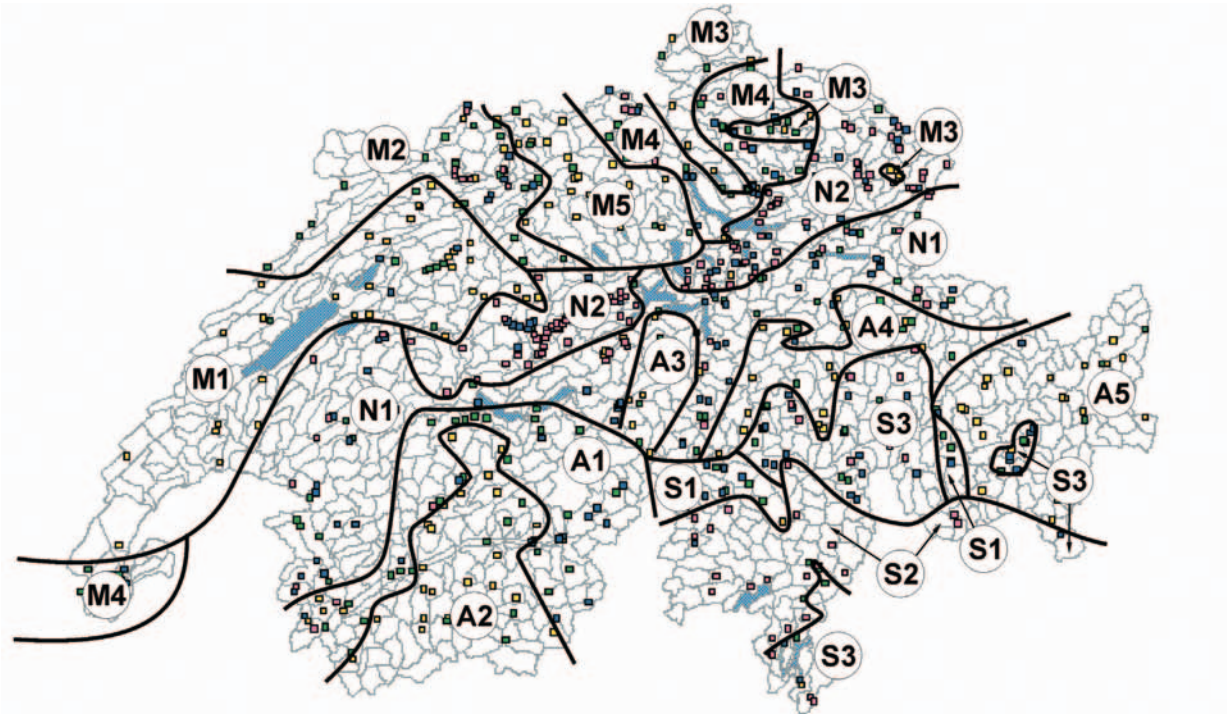


Fig. 5-10: Hochwasserregionen der Schweiz nach KAN (1995).

WEINGARTNER (1999) präsentiert mit *GIUB'96* zwei Modelle: Der erste Ansatz betrachtet den Spitzenabfluss als Funktion der Einzugsgebietsfläche – dieses Modell heisst im Folgenden *GIUB'96 (Fn).* Der zweite Ansatz modelliert den Spitzenabfluss als Funktion des mittleren Jahresabflusses; er wird *GIUB'96 (MQ)* genannt. Beide Modelle enthalten Parameter zur Bestimmung des HQ_{100} und des Q_{max}:

Ansatz 1: $HQ_{100} = a \cdot Fn^b$ und $Q_{max} = a \cdot Fn^b$
Ansatz 2: $HQ_{100} = a \cdot MQ^b$ und $Q_{max} = a \cdot MQ^b$

Q_{max} maximale Abflussspitze [m³/s]
HQ_{100} hundertjährliche Abflussspitze [m³/s]
a, b regionenspezifische Parameter [-]
MQ mittlerer Jahresabfluss [m³/s]
Fn Einzugsgebietsgrösse [km²]

Vom Aufbau her gleichen diese Funktionen derjenigen von KÜRSTEINER (1917). Bei Kürsteiner wurde aber ein genereller Ansatz für die ganze Schweiz formuliert, während bei GIUB'96 möglichst homogene Regionen gebildet wurden, die es erlauben, regionenspezifische Parameter herzuleiten. Zudem ist die Datengrundlage beim Modell GIUB'96 umfassender als bei anderen Modellen älteren Datums.

Region	n	b	a			r^2
			Q_{max} (Fn ≤100 km²)	Q_{max} (Fn >100 km²)	HQ_{100}	
M1	46	0,73	2,37	2,82	1,44	0,90
M2	41	0,59	13,18	7,59	5,98	0,81
M3	24	0,61	4,79	3,63	2,65	0,84
M4	54	0,58	11,89	12,30	7,86	0,92
M5	24	0,79	1,51	1,02	0,68	0,94
N1	108	0,60	13,18	12,02	7,18	0,88
N2	138	0,54	33,11	23,99	17,66	0,83
A1	55	0,64	7,08	6,03	4,36	0,91
A2	34	0,74	2,0	1,88	1,30	0,86
A3	15	0,78	2,40	(1,78)	1,40	0,85
A4	28	0,91	1,51	(1,68)	0,94	0,87
A5	27	0,83	1,26	1,20	0,90	0,95
S1	27	0,58	11,22	(11,48)	0,83	0,72
S2	27	0,69	19,95	19,50	12,41	0,79
S3	68	0,74	7,08	7,50	4,41	0,87
Schweiz	717	0,566	–	–	7,20	0,67

(1.78): Stichprobenumfang zur Bestimmung von *a* sehr klein

Tab. 5-3: Regionenspezifische Parameter *a* und *b* zur Ermittlung der Hüllkurve $Q_{max} = a \cdot Fn^b$ und der Regressionsgeraden $HQ_{100} = a \cdot Fn^b$ in Funktion der Gebietsfläche *Fn (Modell GIUB'96 (Fn)); n:* Stichprobenumfang, r^2: Bestimmtheitsmass des Regressionsmodells; Q_{max} und HQ_{100} [m³/s], *Fn* [km²].

Region	n	b	a			r^2
			Q_{max} (MQ ≤3 m³/s)	Q_{max} (MQ >3 m³/s)	HQ_{100}	
M1	28	0,71	33,11	31,62	22,29	0,94
M2	21	0,71	–	57,54	37,27	0,91
M3	10	0,64	–	–	23,76	0,87
M4	27	0,59	–	81,28	53,98	0,96
M5	22	0,75	15,85	–	14,81	0,94
N1	62	0,62	56,23	75,86	41,14	0,86
N2	34	0,65	141,25	109,65	75,10	0,87
A1	46	0,70	41,69	37,58	26,74	0,87
A2	32	0,81	20,41	19,95	12,80	0,86
A3	12	0,66	–	–	17,13	0,89
A4	23	0,87	24,55	–	14,67	0,83
A5	26	0,89	23,99	22,39	15,34	0,92
S1	23	0,69	50,12	–	33,46	0,82
S2	24	0,68	–	141,25	94,79	0,67
S3	62	0,75	118,85	63,10	47,20	0,79
Schweiz	453	0,714	–	–	31,06	0,79

–: zu kleiner Stichprobenumfang

Tab. 5-4: Regionenspezifische Parameter *a* und *b* zur Ermittlung der Hüllkurve $Q_{max} = a \cdot MQ^b$ und der Regressionsgeraden $HQ_{100} = a \cdot MQ^b$ in Funktion des mittleren Jahresabflusses *MQ (Modell GIUB'96 (MQ)); n:* Stichprobenumfang, r^2*:* Bestimmtheitsmass des Regressionsmodells; *MQ, Q_{max}* und *HQ_{100}* [m³/s].

Anwendungsbereiche und Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses
GIUB'96 eignet sich für die Abschätzung von 100jährlichen Spitzenabflüssen (HQ_{100}) und von maximalen Hochwassern (Q_{max}).

Einzugsgebietsgrösse
WEINGARTNER (1999) liefert die Grundlagen für die grafische Festlegung des Gültigkeitsbereichs. Die für die Berechnung der Regressionsgeraden verwendeten Hochwasserbeobachtungen wurden regionenweise dargestellt (vgl. Fig. 5-9). Die Punkteverteilung in den Diagrammen ist ein Indiz für den Gültigkeitsbereich. Für mittelgrosse Einzugsgebiete ist das Modell ohne Einschränkung einsetzbar.

Naturräumliche Zuordnung
Die Hochwasserregionen wurden flächendeckend für die ganze Schweiz festgelegt. Bei der Anwendung im Bereich von Regionsgrenzen ist allerdings Vorsicht geboten, da die Ergebnisse je nach gewählter Region beträchtlich variieren können.

Eingabegrössen
Das Modell benötigt die Einzugsgebietsgrösse, den mittleren Jahresabfluss (MQ) und die Lage des Ausflusspunktes aus dem Einzugsgebiet (für die Bestimmung der Regionszugehörigkeit) als Eingabegrössen. Die übrigen Parameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen automatisch berechnet resp. ausgewählt. In HQx_meso_CH ist ein Modell von WEINGARTNER & ASCHWANDEN (1992) integriert, welches den mittleren Jahresabfluss *MQ* schätzt. Falls bessere Angaben zum mittleren Jahresabfluss vorliegen, kann der Wert manuell angepasst werden.

Fallbeispiel Langeten
alle Werte aus HQx_meso_CH:
HQ-Region M2
MQ = 1,49 m³/s

$HQ_{100} = a \cdot Fn^b$ a = 5,98 b = 0,59
HQ_{100} = 66,1 m³/s

$HQ_{100} = a \cdot MQ^b$ a = 37,27 b = 0,71
HQ_{100} = 49,4 m³/s

$Q_{max} = a \cdot Fn^b$ a = 13,18 b = 0,59
Q_{max} = 145,6 m³/s

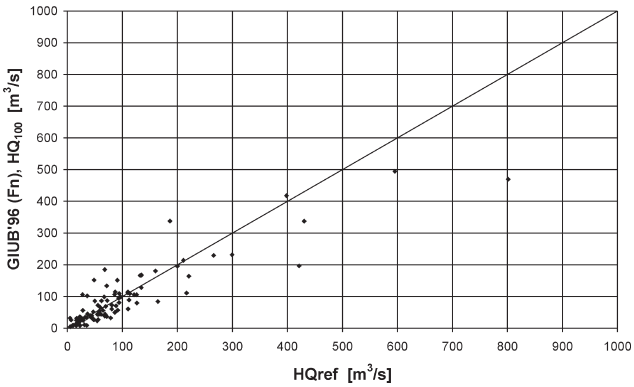
$Q_{max} = a \cdot MQ^b$ a = --- b = 0,71
(zu kleine Stichprobe in dieser Region)
Q_{max} = --- m³/s

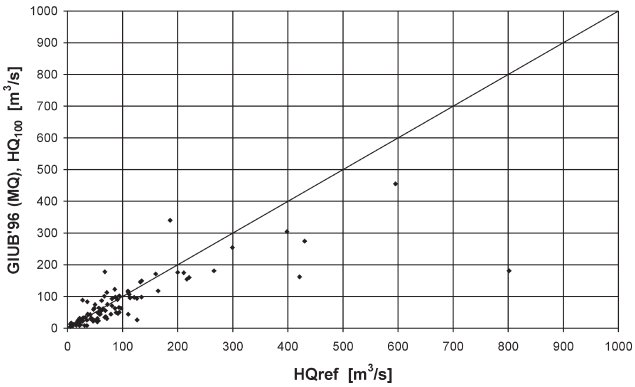
Güte der Resultate
Beide Modelle GIUB'96 (HQ_{100} = f(Fn) und HQ_{100} = f(MQ)) ergeben zuverlässige Resultate in mittelgrossen Einzugsgebieten. Die Streuung ist sehr klein (vgl. Fig. 5-11 und 5-12, oben) und auch das allgemeine Niveau der Pseudo-3D-Grafik liegt in z-Richtung nahe bei Null. Das heisst, dass die abgeschätzten Werte sehr gut den 100jährlichen Spitzenabflüssen entsprechen.

In grossen Teilen der Schweiz gibt es weder bedeutende Über- noch bedeutende Unterschätzungen der Referenzwerte (vgl. Fig. 5-11 und 5-12, unten). Es ist jedoch zu beachten, dass der Ansatz HQ_{100} = f(MQ) die HQ_{100}-Abflüsse in Teilgebieten des Mittellandes um 25 bis 50% unterschätzt.

Die Modelle GIUB'96 (Q_{max} = f(Fn) und Q_{max} = f(MQ)) weisen ebenfalls eine geringe Streuung auf. Bei GIUB'96 (Fn) liegt Q_{max} im Durchschnitt um 45% und bei GIUB'96 (MQ) um knapp 10% über dem HQ_{100}.

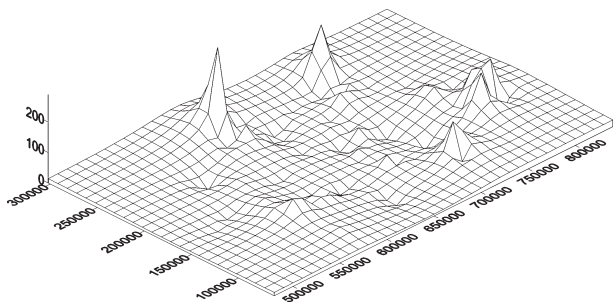
Das Modell GIUB'96 (Fn) ist noch einfacher aufgebaut als das Modell Kürsteiner. Mit der Bildung von Hochwasserregionen ist es aber gelungen, die Genauigkeit der Ergebnisse stark zu erhöhen.

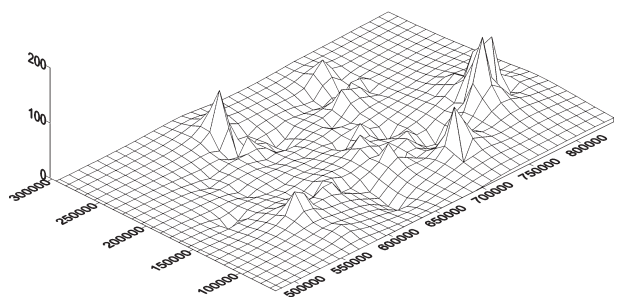


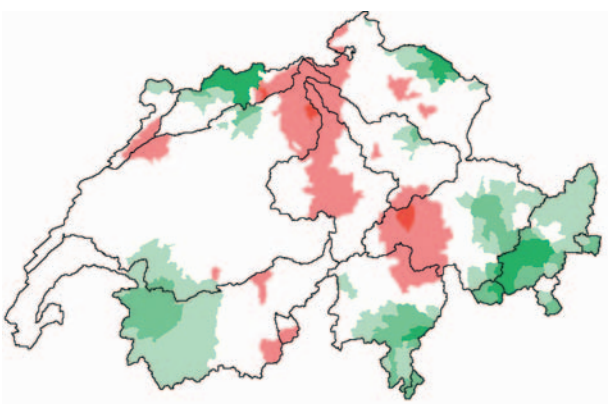


Korrelationskoeffizienten GIUB'96 (Fn), HQ100/Referenz	
alle Gebiete (95)	0,897
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,858
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,766

Korrelationskoeffizienten GIUB'96 (MQ), HQ100/Referenz	
alle Gebiete (95)	0,784
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,670
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,784







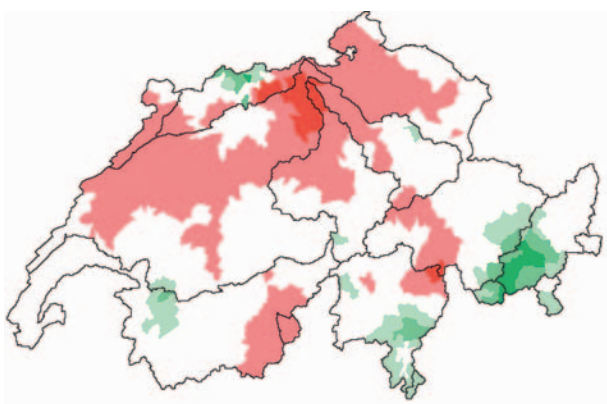
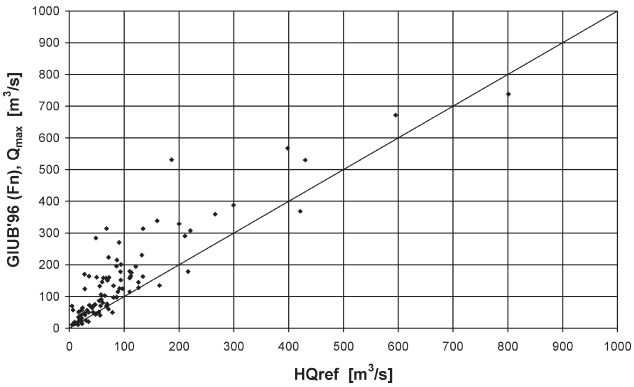
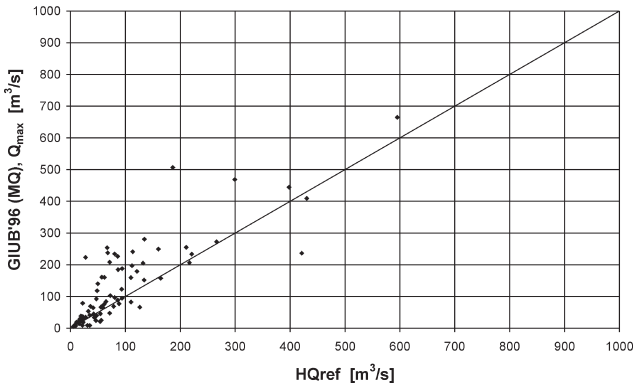


Fig. 5-11: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (Fn), HQ100
oben: Abschätzung nach GIUB'96 (Fn), HQ100 und Referenzwerte (HQ100)
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen/Referenzwerte (HQ100)
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent (Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

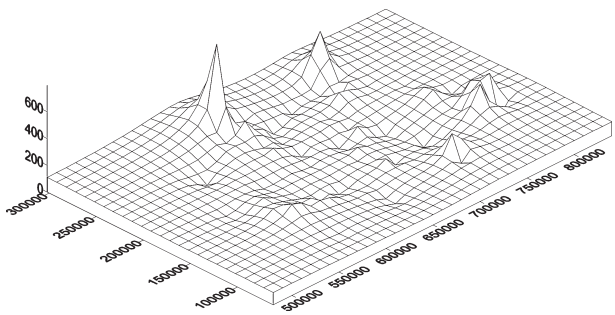
Fig. 5-12: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (MQ), HQ100
oben: Abschätzung nach GIUB'96 (MQ), HQ100 und Referenzwerte (HQ100)
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen/Referenzwerte (HQ100)
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent (Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

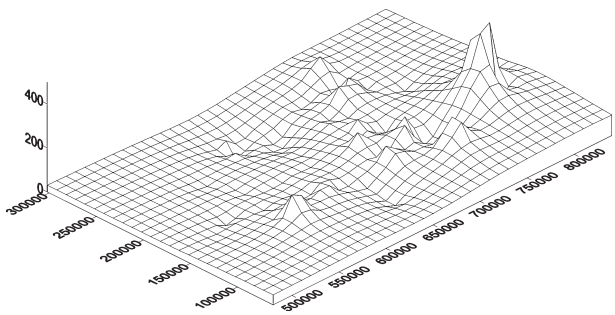


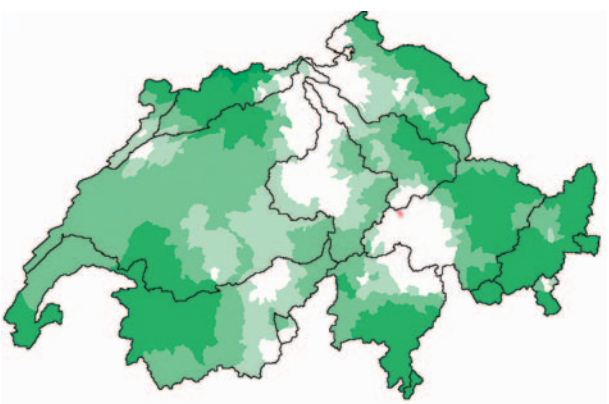


Korrelationskoeffizienten GIUB'96 (Fn), Q_{max} / Referenz	
alle Gebiete (95)	0,887
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,845
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,758

Korrelationskoeffizienten GIUB'96 (MQ), Q_{max} / Referenz	
alle Gebiete (78)	0,838
Gebiete mit Fn <200 km² (73)	0,712
Gebiete mit Fn <100 km² (58)	0,660







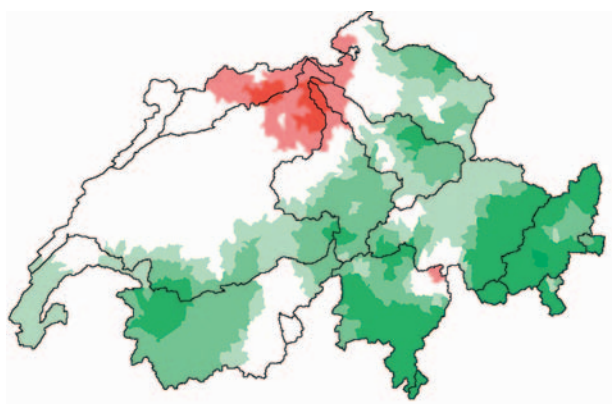


Fig. 5-13: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (Fn), Q_{max}
oben: Abschätzung nach GIUB'96 (Fn), Q_{max} und Referenzwerte (HQ_{100})
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent
(Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

Fig. 5-14: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (MQ), Q_{max}
oben: Abschätzung nach GIUB'96 (MQ), Q_{max} und Referenzwerte (HQ_{100})
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent
(Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

e) Momente

Beschreibung des Modells

Die Methode Momente von DÜSTER (1994) bestimmt den Hochwasserabfluss anhand der *mittleren Jahreshochwasserspitze mHQ* und der *Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen s(HQ).* Die beiden Momente der hydrologischen Grundgleichung werden mithilfe von Gebietsparametern geschätzt.

$HQ_x = mHQ + K_x \cdot s(HQ)$

mHQ mittlere Jahreshochwasserspitze [m³/s]
s(HQ) Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen [m³/s]
K_x f (Jährlichkeit, Verteilungsfunktion) [-]

Ein erster auf der hydrologischen Grundgleichung basierender Ansatz wurde in der Schweiz von SYDLER et al. (1982) entwickelt. Sie verwendeten zur Schätzung der beiden Momente *mittlere Jahreshochwasserspitze* und *Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen* die Einzugsgebietsparameter Fläche, Umfang, Schwerpunktabstand, Tallänge und die Flussdichte. Düster hat die Momente zwölf Jahre später mit verbesserten Datengrundlagen neu berechnet:

mHQ = f (Fn,Vgl,N,Im,Oed,WSV)

s(HQ) = f (Fn,N,WSV)

Fn beitragende Fläche [km²], rFb
Vgl Vergletscherungsgrad [%]
N Jahresniederschlag [mm]
Im mittlere Hangneigung [°], rFb
Oed Oedlandanteil [%], rFb
WSV mittleres Wasserspeichervermögen [mm], rFb

Da sich die Datenlage in der Zwischenzeit weiter verbessert hat, wurden die Modellparameter bei der Umsetzung im Programm HQx_meso_CH neu geeicht, so dass gegenüber den Vorgaben von DÜSTER (1994) gewisse Abweichungen bestehen. Der Parameter *Im* wird nicht mehr verwendet.

Die Gebietsparameter werden über den sogenannten *relativen Flächenbeitrag (rFb)* gewichtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Bereiche des Einzugsgebietes zum Hochwasserabfluss beitragen, jedoch mit unterschiedlichem Gewicht. Je grösser die Hangneigung und je kleiner die Entfernung vom Gewässernetz ist, desto grösser wird der relative Beitrag zum Hochwasserabfluss.

Anwendungsbereiche und Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses
Die Methode Momente kann Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeit abschätzen. Die Momente *mHQ* und *s(HQ)* bleiben konstant, während der Koeffizient K_x abhängig von der Wiederkehrperiode *x* und der Verteilungsfunktion ist. Er kann für beliebige Wiederkehrperioden bestimmt werden. DÜSTER (1994) verwendete für seine Berechnungen stets die Gumbel-Verteilung.

Einzugsgebietsgrösse
Das Modell wurde anhand 95 schweizerischer Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 500 km² geeicht. Es wird deshalb empfohlen, das Modell nur in diesem Grössenbereich einzusetzen.

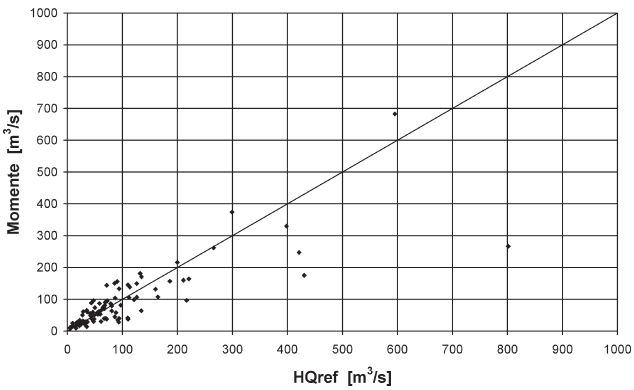
Naturräumliche Zuordnung
Das Modell eignet sich nicht für den Einsatz in Einzugsgebieten mit extremen Parameterkombinationen (z. B. städtische Einzugsgebiete oder stark vergletscherte Gebiete). Die Verteilung der Gebietsparameter der Eichgebiete gibt die Bandbreite für den Einsatz des Modells an (vgl. Tab. 5-6b).

Eingabegrössen
Das Modell benötigt verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter als Eingabegrössen. Das Programm HQx_meso_CH berechnet alle Modellparameter aus den bereitstehenden Datensätzen.

Fallbeispiel Langeten
alle Werte aus HQx_meso_CH:
mHQ = 23,58 m³/s
s(HQ) = 10,16 m³/s
K_x = 3,137

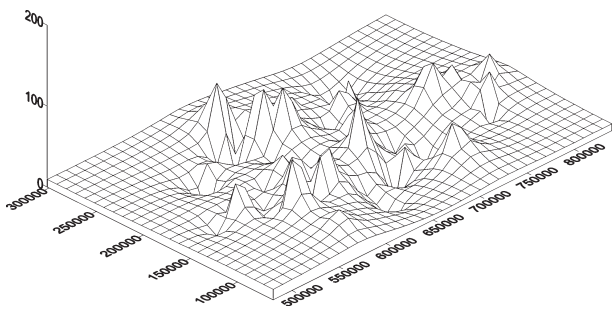
HQ_{100} = 55 m³/s

Güte der Resultate
Die Abschätzungen zeigen im Vergleich mit den Referenzwerten eine relativ kleine Streuung (vgl. Fig. 5-15, oben). Die Datenpunkte sind mehr oder weniger symmetrisch um die Gerade verteilt. Das heisst, es gibt keine systematischen Unter- oder Überschätzungen. Das sieht man auch sehr gut am tiefen Niveau in z-Richtung der Pseudo-3D-Grafik in der Fig. 5-15, unten. Das eben skizzierte Bild zeigen auch die klassierten relativen Abweichungen in Fig. 5-15. Ein sehr grosser Flächenanteil der Schweiz liegt in der neutralen Klasse (symmetrisch um Null) und es gibt nur wenige Gebiete mit grossen Unter- beziehungsweise Überschätzungen.



Korrelationskoeffizienten Momente / Referenz

alle Gebiete (95)	0,814
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,797
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,833



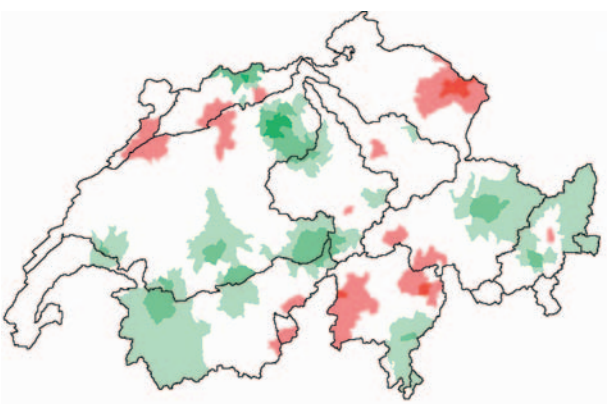


Fig. 5-15: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Momente
oben: Abschätzung nach Momente und Referenzwerte (HQ_{100})
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent (Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

Die mit dem relativen Flächenbeitrag gewichteten Parameter können nicht von Hand bestimmt werden, sie werden vom Programm HQx_meso_CH berechnet. Das hat den Vorteil, dass bei ihnen keine subjektive Komponente einfliessen kann. Auf der anderen Seite ist es schwieriger abzuschätzen, ob plausible Werte für ein Einzugsgebiet erhoben wurden.

Weil es in der Schweiz nur eine beschränkte Zahl von Einzugsgebieten gibt, die sich für hydrologische Studien eignen, wurden bei der Überprüfung des Modells Momente dieselben Gebiete verwendet wie bei der Eichung des Modells. Die Überprüfung ist somit nicht unabhängig, sondern es handelt sich um eine reine Insample-Überprüfung. Bei weiteren Modellen, die hier vorgestellt werden, gilt dieser Punkt zwar auch, aber nicht in demselben Ausmass wie beim Modell Momente.

f) BaD7

Beschreibung des Modells

Bei BaD7 von BARBEN (2001) wurden bestehende Ansätze von DÜSTER (1994) mit neuen Ideen kombiniert und zu einem neuen Modell zusammengesetzt. Das Modell geht von der *mittleren spezifischen Jahreshochwasserspitze mHq* und der *Standardabweichung der spezifischen Jahreshochwasserspitzen sx* in 95 über die Schweiz verteilten Referenzgebieten aus. Mit diesen beiden Parametern kann über die hydrologische Grundgleichung (vgl. Abschnitt e) eine spezifische Hochwasserspitze mit beliebiger Wiederkehrperiode berechnet werden.

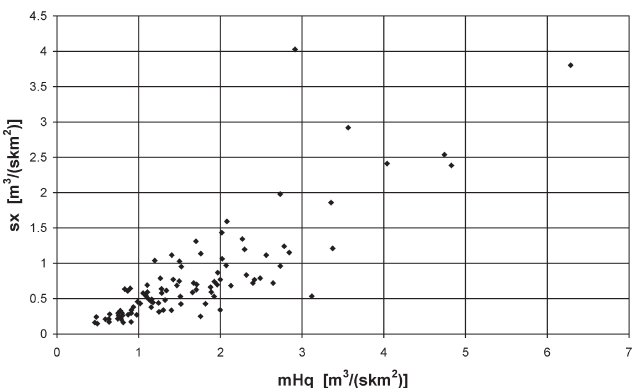


Fig. 5-16: Die Momente der spezifischen Jahreshochwasserspitzen der 95 Referenzgebiete.

BaD7 bestimmt die beiden Momente des zu berechnenden Einzugsgebietes durch Mittelung der Momente der sechs ähnlichsten Referenzgebiete. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Mit den standardisierten Gebietsparametern[3]

Elongationsfaktor	[-]
Gletscheranteil	[%]
Jahresniederschlag	[mm]
Neigung	[°], rFb
Ödlandanteil	[%], rFb
Versiegelungsgrad	[%]
Weideanteil	[%], rFb

wird ein siebendimensionaler Raum aufgespannt (daher der zweite Teil des Namens *D7*). Das zu berechnende Einzugsgebiet bildet den Startpunkt in diesem Raum. Vom Startpunkt aus wird die euklidische Distanz zu allen 95 Referenzgebieten berechnet. Dann werden die mittleren Jahreshochwasserspitzen *mHq* und die Standardabweichungen der Jahreshochwasserspitzen *sx* (vgl. Fig. 5-16) der sechs Referenzgebiete mit den kleinsten euklidischen Distanzen zum gesuchten Gebiet gemittelt und damit eine spezifische Hochwasserspitze beliebiger Wiederkehrperiode berechnet.

Ein grosser Vorteil dieses Modells ist seine hohe Flexibilität. Die Liste der Referenzgebiete kann erweitert werden, ohne dass sich dabei etwas am Modell ändert. Das Modell muss nicht geeicht werden, und es können Hochwasserspitzen beliebiger Wiederkehrperioden ermittelt werden.

Anwendungsbereiche und Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses
Das Modell BaD7 kann Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeit abschätzen. Die Momente der hydrologischen Grundgleichung bleiben konstant, während der Koeffizient K_x abhängig von der Wiederkehrperiode und der Verteilungsfunktion ist. Er kann für beliebige Wiederkehrperioden bestimmt werden.

Einzugsgebietsgrösse
Das Modell wurde anhand 95 schweizerischer Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 500 km^2 entwickelt. Es wird empfohlen, das Modell nur in diesem Grössenbereich einzusetzen.

Naturräumliche Zuordnung
Das Modell sucht im Pool der 95 Referenzgebiete die sechs ähnlichsten Einzugsgebiete. Es liefert also nur dann vernünftige Werte, wenn die Parameterkombination des fraglichen Einzugsgebietes im Pool einigermassen vertreten ist. Deshalb eignet sich das Modell nicht für den Einsatz in Einzugsgebieten mit extremen Parameterkombinationen (z. B. städtische Einzugsgebiete oder stark vergletscherte Gebiete).

Eingabegrössen
Das Modell benötigt verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter als Eingabegrössen. Das Programm HQx_meso_CH berechnet alle Modellparameter aus den bereitstehenden Datensätzen.

Fallbeispiel Langeten
alle Werte aus HQx_meso_CH:

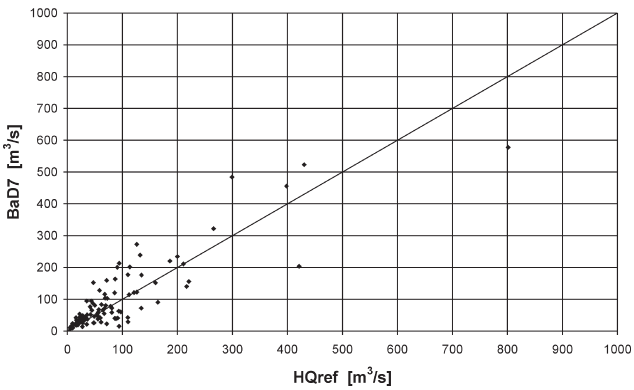
Elongationsfaktor	=	0,0853
Gletscheranteil	=	0,0%
Jahresniederschlag	=	1374 mm
Neigung	=	6,7°, rFb
Ödlandanteil	=	0,1%, rFb
Versiegelungsgrad	=	2,5%
Weideanteil	=	0,0%, rFb

HQ_{100} = 58 m^3/s

Güte der Resultate
Die Streuung ist relativ klein und der lineare Zusammenhang ziemlich gross (vgl. Fig. 5-17, oben). Die Datenpunkte sind mehr oder weniger symmetrisch um die Gerade verteilt. Das heisst, es gibt keine systematischen Unter- oder Überschätzungen.

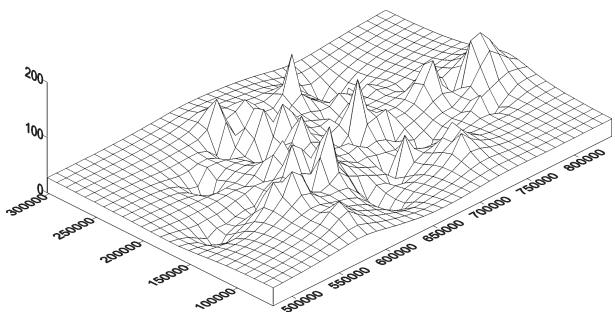
Die Modellgüte könnte durch die Ergänzung mit weiteren zuverlässigen Referenzgebieten verbessert werden. Dabei sollte der Pool mit Einzugsgebieten ergänzt werden, die über seltene Parameterkombinationen verfügen. Damit würde das Spektrum breiter und die Zuordnung der sechs ähnlichsten Gebiete besser abgestützt.

[3] Es sind die Gebietsparameter, die DÜSTER für das Modell Fuzzy verwendet hat.



Korrelationskoeffizienten BaD7/Referenz

alle Gebiete (95)	0,859
Gebiete mit Fn <200 km² (87)	0,868
Gebiete mit Fn <100 km² (70)	0,715



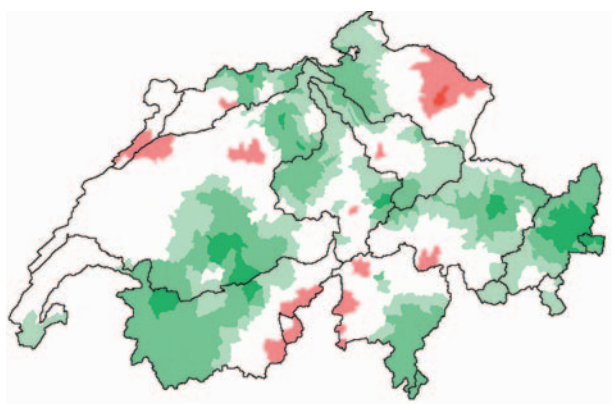


Fig. 5-17: Resultate der Hochwasserabschätzung nach BaD7
oben: Abschätzung nach BaD7 und Referenzwerte (HQ_{100})
Tabelle: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen/Referenzwerte (HQ_{100})
unten: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent (Legende zur untersten Abbildung siehe Seite 56).

5.1.3 Software HQx_meso_CH

Die im Kapitel 5.1.2 beschriebenen Methoden wurden ins Programm HQx_meso_CH integriert *(HQx:* Hochwasser mit beliebiger Wiederkehrperiode; *meso:* mesoskalige Einzugsgebiete; *CH:* schweizerische Einzugsgebiete). Das Programm dient der Abschätzung von Hochwasserspitzenabflüssen in mittelgrossen (10 bis ca. 500 km²) Einzugsgebieten der Schweiz.

HQx_meso_CH ist so konzipiert, dass keine weiteren Zusatz-Programme benötigt werden. Sämtliche Modell-Inputparameter und das ausführbare Programm befinden sich auf einer CD-ROM. Die benötigten Daten wurden flächendeckend über die ganze Schweiz in einem 100 m-Raster aufbereitet.

Das Programm umfasst drei Module (vgl. Fig. 5-18):
1. Definition: Festlegen des zu berechnenden Einzugsgebietes (linke Spalte)
2. Berechnung: Anwendung verschiedener Hochwasser-Abschätzmodelle (mittlere Spalte)
3. Resultate: Erstellen der Protokolle zur Darstellung und Ausgabe der Daten (rechte Spalte)

Die Resultate der Hochwasserabschätzung mit den verschiedenen Modellen werden grafisch dargestellt (Balkendiagramm) und in einer Textdatei abgelegt. Zudem können die wichtigsten Modellparameter und die erwarteten Fehler der Abschätzung in einer kleinmassstäblichen Karte abgefragt werden. Dies sind gute Hilfsmittel für die Interpretation der Ergebnisse.

HQx_meso_CH wurde in Borland Delphi, Professional, Version 3.0 programmiert und läuft unter Windows 95, 98, 2000, NT und XP. Die Delphi-Software wird für die Anwendung des Programms nicht benötigt.

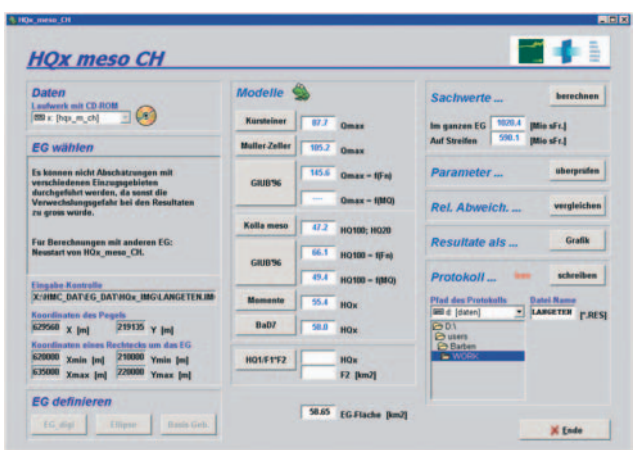


Fig. 5-18: Hauptformular von HQx_meso_CH.

Die Anwenderinnen und Anwender werden mit integrierten Hilfefunktionen durch das Programm geführt, so dass sich auch Erstbenutzer schnell zurechtfinden.

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

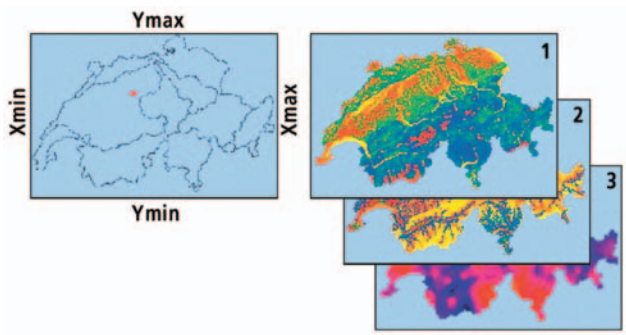


Fig. 5-19: Datensätze in HQx_meso_CH.
Links: Festlegen des Einzugsgebietes
Rechts: Modellparameter oder Parameter, die weiterverarbeitet werden.

Alle räumlichen Datensätze in HQx_meso_CH haben die gleiche Ausdehnung (Xmin, Xmax, Ymin und Ymax in Landeskoordinaten) und dieselbe Auflösung (Hektarraster). Deshalb muss auch das Einzugsgebiet in Landeskoordinaten definiert werden. In vielen Fällen sind die von HQx_meso_CH berechneten Parameter Mittelwerte aller Rasterpunkte des Einzugsgebietes (so z. B. beim c-Wert nach Kürsteiner). Es gibt aber auch Kenngrössen, die aus Punktinformationen abgeleitet werden (z. B. die Starkniederschläge im Modell Kölla meso).
In Figur 5-19 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 nach HADES-Tafel 2.4).

Die Philosophie von HQx_meso_CH kann am Beispiel des Modells GIUB'96 gut dargestellt werden (vgl. Fig. 5-20). GIUB'96 umfasst zwei Ansätze für die Bestimmung der Hochwasserspitzen (siehe Kapitel 5.1.2, Abschnitt d): 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 ohne weiteres verfügbar. HQx_meso_CH beinhaltet deshalb ein MQ-Modell von WEINGARTNER & ASCHWANDEN (1992), 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.

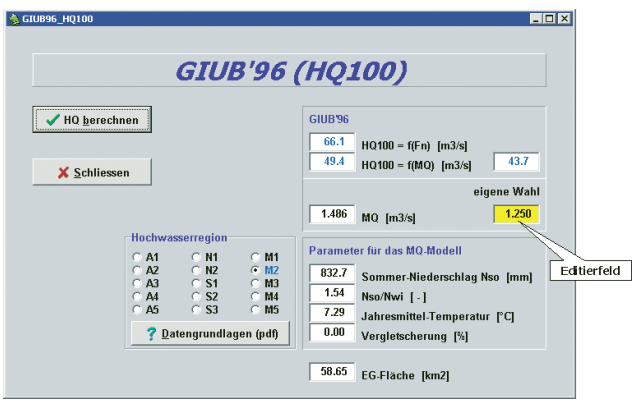


Fig. 5-20: Hochwasserabschätzung mit dem Modell GIUB'96.

Die von HQx_meso_CH automatisch erhobenen Parameter sind immer als Vorschläge zu verstehen. Falls vertrauenswürdigere Daten zur Verfügung stehen, können (und sollen!) diese manuell eingefügt werden.

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.

5.1.4 Berechnungsablauf und Interpretation der Ergebnisse

Ziel des hydrologischen Beitrags zur Hochwasserabschätzung ist die möglichst gute Eingrenzung des gesuchten Hochwasserabflusses. Basierend auf diesen Unterlagen ermittelt der Wasserbauer dann unter Einbezug von Risikoüberlegungen den sogenannten Bemessungsabfluss. In Kapitel 5.1.1 wurde die Strategie zur Hochwasserabschätzung im Überblick dargestellt (vgl. Fig. 5-1). Diese Strategie, die vier Schritte umfasst, soll nun im Detail erläutert werden.

Schritt 1: Anwendung verschiedener Methoden
Figur 5-21 verdeutlicht den ersten Schritt der Strategie. Durch die Anwendung vieler geeigneter Methoden

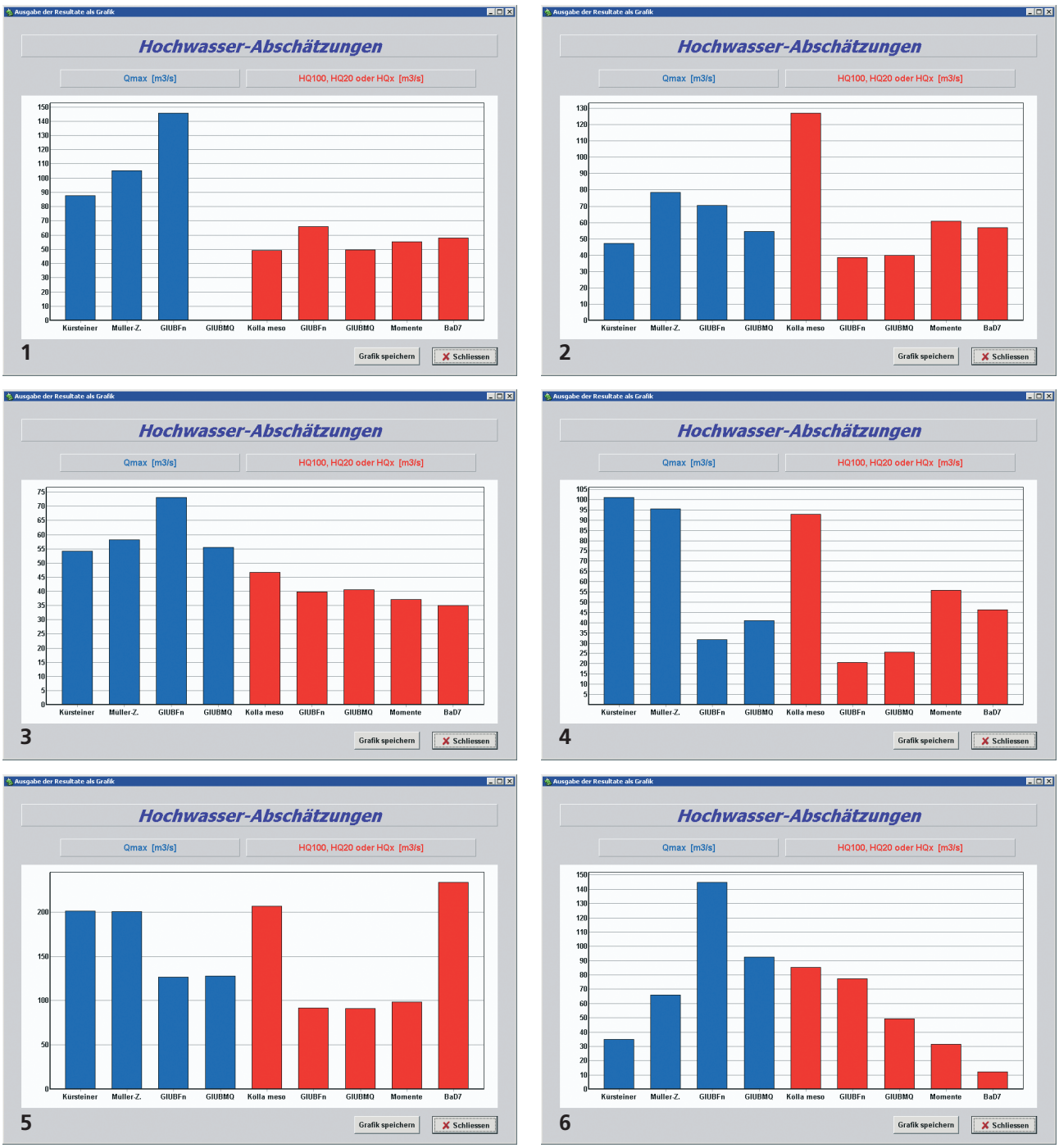


Fig. 5-21: Hochwasserabschätzungen in verschiedenen Einzugsgebieten (Berechnung und Darstellung mit HQx_meso_CH).

soll ein möglichst breites Spektrum an Hochwasserabschätzungen bereitgestellt werden. Dabei spielt es im Prinzip keine Rolle, ob die Resultate mit einem Computerprogramm oder «von Hand» ermittelt wurden.

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 5-21 erläutert werden:

1. Die 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).

2. Die 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 ab. Die folgenden Tabellen helfen bei der Suche nach den Ursachen eines allfälligen Modellversagens.

Modell	Gültigkeitsbereich Fn [km²]
Kürsteiner	5 < Fn < 500
Müller-Zeller	2 < Fn < 100
Kölla meso	10 < Fn < 500
GIUB'96	10 < Fn < 500
Momente	10 < Fn < 200
BaD7	10 < Fn < 200

Tab. 5-5: Gültigkeitsbereich der verschiedenen Modelle in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse.

Bemerkungen: Viele dieser Angaben sind mit Unsicherheiten behaftet. Als allgemeine Empfehlung könnte gelten: Abschätzungen in Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 200 km² sind generell möglich. Kleinere Einzugsgebiete sollten nicht behandelt werden, grössere nur mit sorgfältiger Überprüfung der Gebietsparameter.

Modell	Naturräumliche Zuordnung
Kürsteiner	Keine Einschränkung. Das muss nicht heissen, dass das Modell überall vernünftige Ergebnisse liefert; es heisst bloss, dass der Autor keine expliziten Problemregionen (z. B. wegen fehlender Parameter) ausscheidet.
Müller-Zeller	In alpinen und stark überbauten Einzugsgebieten ist die Bestimmung des Abflusskoeffizienten wegen ungünstiger Datengrundlagen (Bodeneignungskarte und Arealstatistik) problematisch. In HQx_meso_CH können die Modellparameter allerdings interaktiv verändert werden.
Kölla meso	Die Parameterbestimmung orientiert sich sehr stark an der Bodeneignungskarte. In alpinen und stark überbauten Einzugsgebieten müssen die automatisch erhobenen Parameterwerte besonders kritisch überprüft werden. In extremen Situationen (z. B. bei sehr starker Vergletscherung oder in Einzugsgebieten mit grossen mittleren Höhen) sollte das Modell nicht eingesetzt werden. HQx_meso_CH geht auf dieses Problem ein und erlaubt eine manuelle Korrektur des erforderlichen Benetzungsvolumens (Vo).
GIUB'96	Keine Einschränkung. Das muss nicht heissen, dass das Modell überall vernünftige Ergebnisse liefert; es heisst bloss, dass die Autoren keine expliziten Problemregionen (z. B. wegen fehlender Parameter) ausscheiden.
Momente	Das Modell ergibt die besten Resultate in Einzugsgebieten ohne extreme Parameterkombinationen (z. B. stark vergletschert oder grosser Versiegelungsgrad), das heisst, wenn das Einzugsgebiet von den für die Eichung verwendeten Gebieten gut repräsentiert wird (vgl. Tabelle 5-6b).
BaD7	Das Modell ergibt die besten Resultate in Einzugsgebieten ohne extreme Parameterkombinationen, das heisst, wenn das Einzugsgebiet von den für die Eichung verwendeten Gebieten gut repräsentiert wird (vgl. Tabelle 5-6c).

Tab. 5-6a: Räumlicher Gültigkeitsbereich der verschiedenen Modelle.

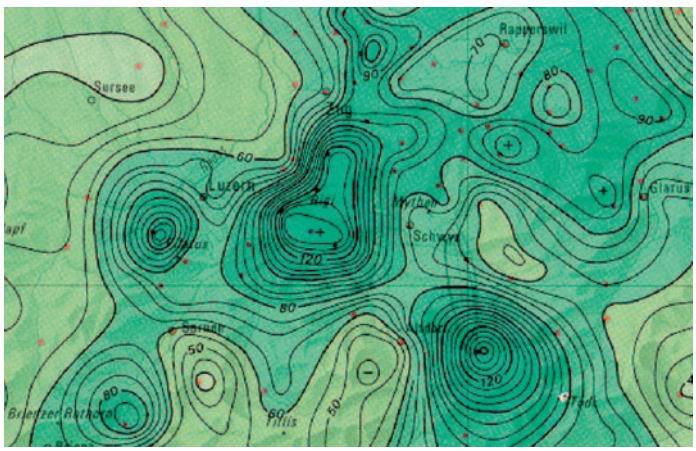
	Fn	Gletscher	N_J	Ödland	SPK
Min	2,4	0,0	1042	0,0	11,0
Median	17,8	0,0	1999	8,3	36,1
Max	243,7	48,1	3156	79,0	90,3

Tab. 5-6b: Statistische Masszahlen der Gebietsparameter für das Modell Momente.

	Elong	Gletscher	N_J	Neigung	Ödland	Versieg	Weide
Min	0,016	0,0	1042	1,7	0,0	0,0	0,0
Median	0,097	0,0	1999	17,8	8,3	0,0	27,2
Max	0,386	48,1	3156	32,4	79,0	31,9	86,6

Tab. 5-6c: Statistische Masszahlen der Gebietsparameter für das Modell BaD7.

Fn	Einzugsgebietsfläche [km²], rFb	**SPK**	Speicherkapazität [mm], rFb	**Min**	kleinster Parameterwert
Gletscher	Gletscheranteil [%]	**Elong**	Elongationsfaktor [-]	**Median**	Median
N_J	Jahresniederschlag [mm]	**Versieg**	Versiegelungsgrad [%]	**Max**	grösster Parameterwert
Neigung	Neigung [°], rFb	**Weide**	Weideanteil [%], rFb	rFb	mit relativem Flächenbeitrag gewichtet
Ödland	Ödlandanteil [%], rFb				

Modell	**Problematische Punkte bei der Anwendung**
Kürsteiner	Bei Einzugsgebieten mit einem sehr steilen Teileinzugsgebiet im Oberlauf und einem flachen Teilgebiet im Unterlauf kann es zu massiven Fehleinschätzungen der Abflussspitze kommen, weil das mittlere Gebietsgefälle, von dem der Ansatz ausgeht, hier nur eine geringe Aussagekraft besitzt. Dieser Typ von Einzugsgebieten kann aber auch bei den anderen Modellen grosse Probleme verursachen.
Müller-Zeller	Siehe *Naturräumliche Zuordnung* (vgl. Tab. 5-6a).
Kölla meso	Im Bereich grosser Starkniederschlagsgradienten (s. Karte) ist die Bestimmung der Niederschlagsintensität problematisch. Abweichungen können die Abschätzung sehr stark beeinflussen.  *Extreme 100jährliche, 1stündige Punktregen; Ausschnitt aus der Tafel 2.4 des HADES (Geiger et al. 1992).* Die Gerinnelänge aus HQx_meso_CH kann in ganz kleinen Einzugsgebieten und bei sehr dichtem Gewässernetz stark vom klassisch ermittelten Wert abweichen (vgl. Kap. 5.1.2). HQx_meso_CH erlaubt eine manuelle Korrektur der beiden Parameter *Starkniederschlag* und *Gerinnelänge*.
GIUB'96	Der Wechsel von einer Hochwasserregion in eine andere kann das Ergebnis sehr stark beeinflussen. Bei jeder Anwendung des Modells sollte abgeklärt werden, ob eine Regionsgrenze in der Nähe des Einzugsgebiets liegt (diese Informationen können in HQx_meso_CH abgefragt werden) und ein allfälliger Wechsel der Region auf das Resultat ist abzuklären.
Momente	Siehe Naturräumliche Zuordnung (vgl. Tab. 5-6a und 5-6b).
BaD7	Siehe Naturräumliche Zuordnung (vgl. Tab. 5-6a und 5-6c).

Tab. 5-7: Weitere Ursachen für ein allfälliges Modellversagen.

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. Fig. 5-1). Dann wird der gesuchte Hochwasserspitzenabfluss wie folgt abgeschätzt:

1. Der (gewichtete) Mittelwert aus den verbleibenden Ergebnissen führt zum Schätzwert für *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 Vertrauensintervalls zu verwenden als auf einen einzigen fixen Schätzwert zu setzen.
3. Validierung der Ergebnisse.

Bemerkungen zu 1: Als Schätzwert für 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. Als Beurteilungskriterium können auch die erwarteten relativen Abweichungen [%], wie sie HQx_meso_CH zur Verfügung stellt, verwendet werden (vgl. Abbildung zu den einzelnen Modellportraits).

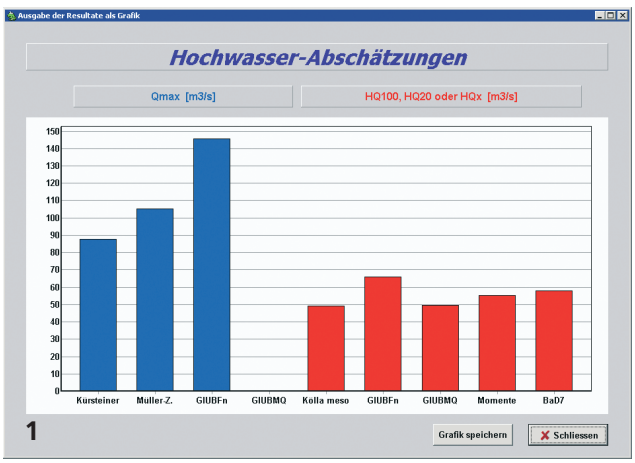
Bemerkungen zu 2: Die Obergrenze des Streubereiches für das HQ_x sollte nicht über dem Mittel der Q_{max}-Werte liegen, da sich daraus weitere Widersprüche ergeben würden.

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 (vgl. Kapitel 3)

5.1.5 Allgemeine Anwendungsbeispiele

Anhand allgemeiner Anwendungsbeispiele wird in diesem Kapitel der Berechnungsablauf nach den in Figur 5-1 beschriebenen Schritten verdeutlicht (ohne die Validierung der Ergebnisse im Schritt 4). Von den in der Figur 5-21 aufgeführten Beispielen werden hier die Nr. 1, 4 und 6 behandelt. Dabei wurde die Software HQx_meso_CH eingesetzt.

Anwendungsbeispiel Nr. 1
Schritt 1: Anwendung verschiedener Methoden



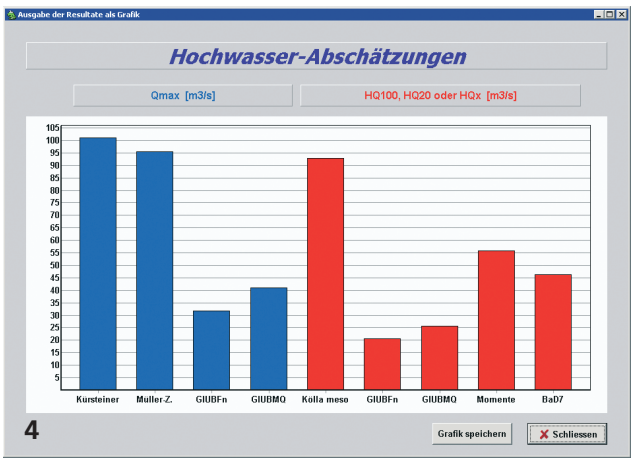
F = 59 km², HQ-Region M2

Schritt 2: Analyse der Streuung der Ergebnisse
Die Streuung der Ergebnisse ist sehr klein. Sie liegt bei der HQ_{100}-Gruppe zwischen 49 m³/s und 66 m³/s. Es gibt keinen Anlass, ein Ergebnis von der Betrachtung auszuschliessen oder bei einem Modell Parameter zu verändern. In der Q_{max}-Gruppe fehlt das Ergebnis von GIUB'96 (MQ). In der HQ-Region M2 (vgl. Tab. 5-4), in der sich das Einzugsgebiet befindet, konnte dieses Modell wegen des zu kleinen Stichprobenumfangs nicht geeicht werden.

Schritt 3: Korrektur oder Streichung unplausibler Ergebnisse
Hier nicht nötig.

Schritt 4: Ermittlung des Schätzwertes für HQ_x mit zugehörigem Streubereich
Als Schätzwert für das HQ_x wird das arithmetische Mittel aus allen fünf Abschätzungen gebildet: HQ_{100} = 56 m³/s. Der Streubereich geht von 49 m³/s bis 66 m³/s. Die Obergrenze des Streubereichs (66 m³/s) liegt unter dem Mittelwert der Q_{max}-Gruppe (113 m³/s).

Anwendungsbeispiel Nr. 4
Schritt 1: Anwendung verschiedener Methoden

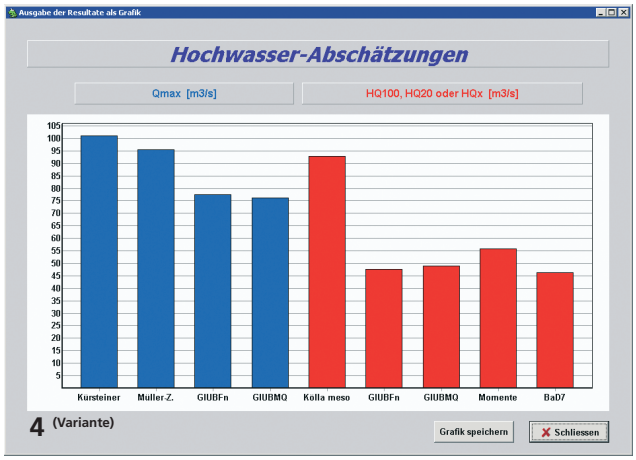


F = 42 km², HQ-Region A2

Schritt 2: Analyse der Streuung der Ergebnisse
Die Streuung der Ergebnisse ist sowohl in der Q_{max}- als auch in der HQ_{100}-Gruppe sehr gross. Dies ist ein Hinweis, dass es problematisch ist, die Abschätzungen auf dem Mittel der Ergebnisse zu basieren.

Schritt 3: Korrektur oder Streichung unplausibler Ergebnisse
Mit 42 km² liegt das Einzugsgebiet Nr. 4 bezüglich der Einzugsgebietsgrösse in einem zulässigen Bereich. Das Ergebnis der Abschätzung nach Kölla meso ist sehr hoch und übertrifft die anderen Resultate der Gruppe deutlich. Grosse Teile des Einzugsgebietes liegen in Zonen, wo die Arealstatistik und die Bodeneigungskarte schlechte Daten zur Verfügung stellen. Zudem sind die Starkniederschlagsgradienten gross; die Bestimmung eines zuverlässigen Gebietsniederschlags kann deshalb Schwierigkeiten bieten. Aus diesen Gründen wird das Ergebnis von Kölla meso gestrichen.

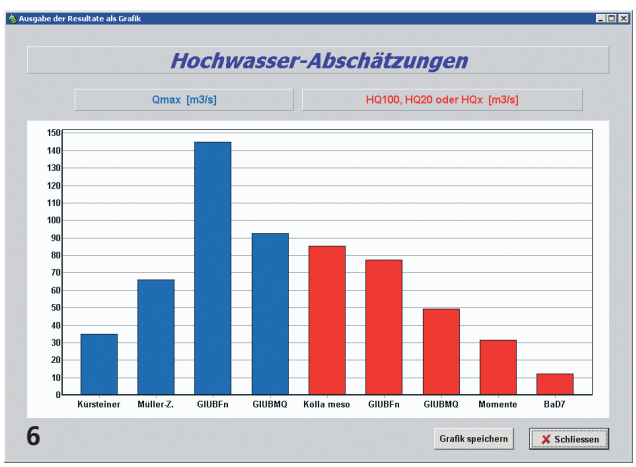
Die mit GIUB'96 errechneten Abschätzungen sind im Vergleich zu den restlichen Q_{max}- und HQ_{100}-Werten eher klein. Dies dürfte mit der räumlichen Position des Pegels zusammenhängen (vgl. Tab. 5-7): In unmittelbarer Nachbarschaft des Pegels verläuft die Grenze zwischen zwei Hochwasserregionen. In dieser Situation ist es angezeigt, die Berechnungen auch unter der Annahme der Zugehörigkeit zur Nachbarregion durchzuführen. Wie die nachfolgende Darstellung zeigt, führt diese Massnahme zu plausibleren Resultaten.



F = 42 km², HQ-Region A1

Schritt 4: Ermittlung des Schätzwertes für HQ_x mit zugehörigem Streubereich
Das HQ_{100} wird als Mittelwert aus den vier Ergebnissen GIUB'96 (Fn und MQ), Momente und BaD7 bestimmt: HQ_{100} = 50 m³/s; mit einem Streubereich von 46 m³/s bis 56 m³/s. Die Obergrenze des Streubereichs (56 m³/s) liegt unter dem Mittelwert der Q_{max}-Gruppe (88 m³/s).

Anwendungsbeispiel Nr. 6
Schritt 1: Anwendung verschiedener Methoden



F = 15 km², HQ-Region N2

Schritt 2: Analyse der Streuung der Ergebnisse
Die Ergebnisse deuten auf ein ausgesprochen schwieriges Einzugsgebiet hin. Die Modelle Kürsteiner und Müller-Zeller aus der Q_{max}-Gruppe liefern auffällig niedrige Werte und die Bandbreite der HQ_{100}-Gruppe ist sehr gross.

Schritt 3: Korrektur oder Streichung unplausibler Ergebnisse
Das Einzugsgebiet weist einen steilen oberen und einen sehr flachen unteren Teil auf. Bei Einzugsgebieten mit derart gegensätzlichen topografischen Bedingungen kann es zu massiven Fehleinschätzungen der Abflussspitze kommen (vgl. Tab. 5-7). Deshalb sollte die Abschätzung nur für den oberen, steileren Teil vorgenommen werden. Das flache untere Teileinzugsgebiet weist ein dichtes Strassen- und Kanalnetz auf, welches zu komplex ist, um mit den verwendeten Modellen nachgebildet zu werden. Es ist deshalb nicht sinnvoll, mit diesen Modellen weiterzuarbeiten.

Schritt 4: Ermittlung des Schätzwertes für HQ_x mit zugehörigem Streubereich
Eine Abschätzung ist hier nicht möglich, weitergehende Analysen sind notwendig. Dazu gehört beispielsweise der Einbezug von Kurzzeitmessungen, die Berücksichtigung historischer Hochwasser oder der Einsatz eines Niederschlag-Abfluss-Modells.

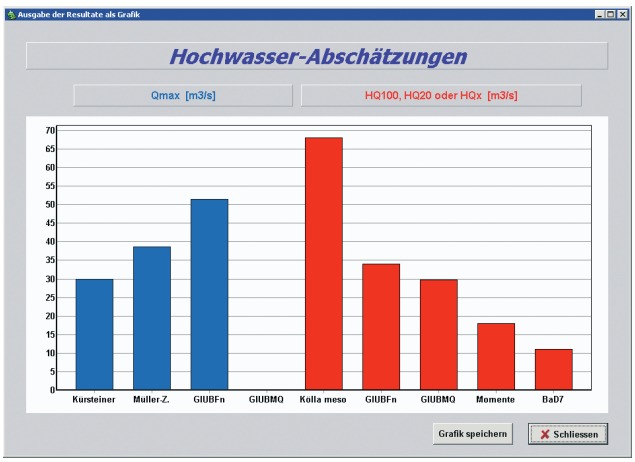
5.1.6 Anwendungsbeispiele aus der Praxis

Die folgenden Anwendungsbeispiele zeigen die Programmanwendung und die Beurteilung der Ergebnisse. Dabei werden die in der Praxis wichtigen Überlegungen zu den Modellgrenzen, zu allfälligen Vergleichseinzugsgebieten, zur Hochwassergeschichte und zur Gerinnekapazität erläutert.

Anwendungsbeispiel 1: Aabach

Einzugsgebiet:	Mittelland, 12,5 km²
befestigte Fläche:	0,03 km²
Vergletscherung:	0,00 km²
Höhenlage:	412 bis 752 m ü. M.
Kumulative Gerinnelänge:	21,6 km
Gesuchte Grösse:	Spitzenabfluss HQ_{100}

Schritt 1: Anwendung verschiedener Methoden



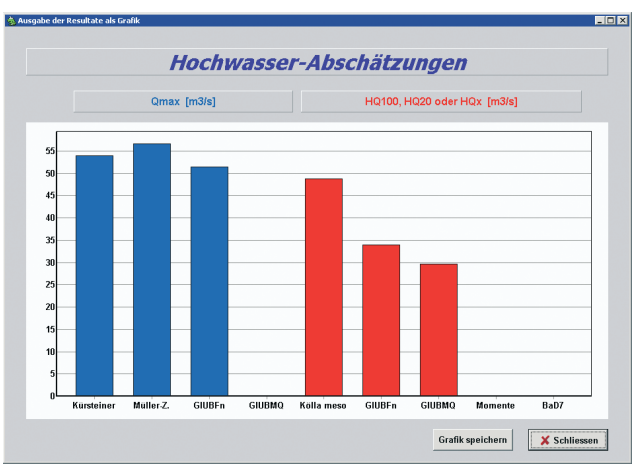
Aabach: Erste Berechnungsresultate (HQx_meso_CH)

Schritt 2: Analyse der Streuung der Resultate
Die Streuung der Ergebnisse in der HQ_{100}-Gruppe (rote Balken) ist gross. Kölla meso ergibt ein HQ_{100} von 68 m³/s, welches die Resultate der Q_{max}-Gruppe deutlich übertrifft. Die Ursachen für die grosse Streuung werden im Schritt 3 analysiert.

Schritt 3: Korrektur oder Streichung unplausibler Ergebnisse
a) Überlegungen zum Einzugsgebiet
- Das Einzugsgebiet ist lang und schmal (Länge ca. 9 km, Breite ca. 1,5 km). Seine Grösse liegt mit 12,5 km² knapp innerhalb des Gültigkeitsbereiches der verwendeten Ansätze (10–200 km²).
- Es gibt mehrere kleinere Stauweiher im untersuchten Einzugsgebiet. Die verwendeten Modelle vernachlässigen den Einfluss dieser Stauweiher. Das ist jedoch zulässig, weil die Weiher bei Extremereignissen sehr rasch gefüllt werden und kein massgebender Hochwasserrückhalt stattfindet.
- Der Einfluss der Drainagen und einzelner Sumpfgebiete kann hier nicht beurteilt werden.

b) Überlegungen zu den Ergebnissen
- Kürsteiner: Der vom Programm vorgeschlagene c-Wert von 5,54 ist viel tiefer als der von der kantonalen Fachstelle vorgegebene Wert: Er wurde wegen der hohen Niederschlagsintensitäten und aufgrund von Hochwasserereignissen in Nachbareinzugsgebieten auf c = 10 festgelegt. Mit c = 10 beträgt das Q_{max} 54 m³/s statt 30 m³/s.
- Müller-Zeller: Der vom Programm ermittelte ψ-Wert von 0,2 wird aufgrund eigener Erfahrungen und Gebietskenntnisse auf 0,3 erhöht. Damit beträgt das Q_{max} 57 m³/s statt 39 m³/s.

– GIUB'96: Das gesamte Einzugsgebiet liegt in der Hochwasserregion M4 und es gibt keine Hochwasserregionen-Grenze in unmittelbarer Nähe, die Zuordnung ist deshalb eindeutig. Das Einzugsgebiet ist hinsichtlich seiner Grösse gut im Datenkollektiv der entsprechenden Hochwasserregion vertreten.
– Kölla meso: Die von HQx_meso_CH standardmässig vorgeschlagene Niederschlagsabminderung scheint für das mit 12,5 km² recht kleine Einzugsgebiet nicht angebracht; deshalb wird die Berechnungsoption «ohne Niederschlagsabminderung» gewählt. Die Starkniederschlagsgradienten im untersuchten Einzugsgebiet sind gross (HADES ,Tafel 2.4[1]). Der Anwender interpretiert die vom Programm gemäss Tafel 2.4[1] ermittelten Niederschlagsintensitäten als obere Grenzwerte. Er verwendet deshalb in diesem Fall die tieferen Niederschlagsintensitäten aus Tafel 2.4[2]. Die Neuberechnung mit den tieferen Niederschlagsintensitäten ergibt ein HQ_{100} von 49 m³/s gegenüber der ersten Berechnung von 68 m³/s.
  Tafel 2.4[1]: A = 84 mm, B' = 173 mm, C = 22 mm, D' = 65 mm
  Tafel 2.4[2]: A = 65 mm, B' = 160 mm, C = 22 mm, D' = 62 mm
– Momente und BaD7: Da das Einzugsgebiet durchschnittliche Parameterkombinationen aufweist (keine starke Versiegelung oder Vergletscherung), können die Modelle Momente und BaD7 theoretisch eingesetzt werden. Die HQ_{100}-Ergebnisse liegen mit 18 m³/s (Momente) und 11 m³/s (BaD7) aber auffallend tief. Die bei BaD7 verwendeten Einzugsgebiete weisen teilweise sehr kurze Messreihen auf, und zwei der Messstationen sind bekannt für grosse Unsicherheiten im Hochwasserbereich. Vorsichtshalber werden die Ergebnisse Momente und BaD7 aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.



Aabach: Revidierte Berechnungsresultate (HQx_meso_CH)

Schritt 4a: Ermittlung des Schätzwertes für HQ_{100} mit zugehörigem Streubereich
Das arithmetische Mittel der drei Ergebnisse Kölla meso, GIUB'96 (Fn) und GIUB'96 (MQ) wird als Schätzwert für das HQ_{100} verwendet: Er beträgt 38 m³/s, und der zugehörige Streubereich reicht von 30 bis 49 m³/s. Die Obergrenze des Streubereiches liegt unter dem Mittelwert der Q_{max}-Gruppe von 54 m³/s.

Schritt 4b: Validierung der Ergebnisse Übertragung von Abflussmessungen in Nachbareinzugsgebieten
In den beiden Nachbareinzugsgebieten A und B sind langjährige Abflussmessreihen vorhanden. Überträgt man das statistisch ermittelte HQ_{100} der beiden Gebiete A und B mit dem Ansatz $Q_x = Q_a \cdot (E_x/E_a)^{0,85}$ auf das Einzugsgebiet des Aabaches, so resultiert für den Aabach ein HQ_{100} von 32–36 m³/s:

Gebiet A, 23,70 km², HQ_{100} 60 m³/s:
HQ_{100} Aabach = $55 \cdot (12{,}5/23{,}70)^{0,85} = 32$ m³/s
Gebiet B, 9,60 km², HQ_{100} 29 m³/s:
HQ_{100} Aabach = $29 \cdot (12{,}5/9{,}60)^{0,85} = 36$ m³/s

Beurteilung von Gerinnekapazität und Hochwassergeschichte
Die Kapazität des Aabachs beträgt gemäss Staukurvenrechnung ca. 15–20 m³/s. Laut Auskünften der Gemeinde und der Anwohner ist der Aabach in den letzten 30 Jahren nie über die Ufer getreten; einmal war er allerdings bordvoll. Aufgrund dieser Angaben wird das HQ_{30} pragmatisch auf ungefähr 15–20 m³/s geschätzt. Bei einem Verhältnis von HQ_{30}/HQ_{100} von 0,5 (gemäss Abschätzung mit der Momenten-Methode) dürfte das HQ_{100} demnach zwischen 30 und 40 m³/s liegen.

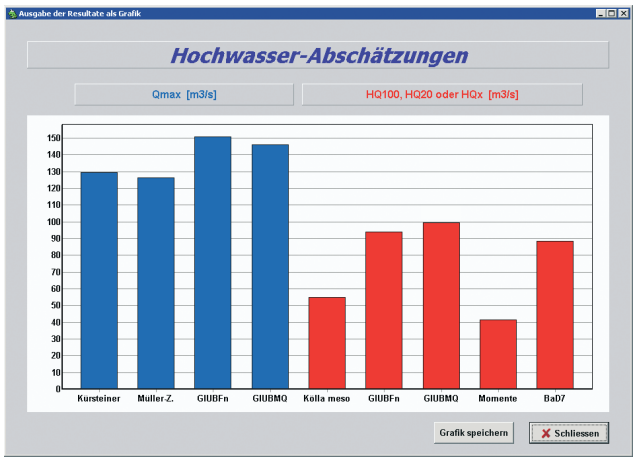
Synthese und Festlegung der Hochwasserabflüsse
Die Übertragung der Abflüsse der Nachbareinzugsgebiete auf den Aabach ergibt ein HQ_{100} von 32–36 m³/s. Die Hochwassergeschichte und die Gerinnekapazität lassen ebenfalls auf ein HQ_{100} in der Grössenordnung von 30–40 m³/s schliessen. Das mit HQx_meso_CH geschätzte HQ_{100} von 38 m³/s konnte somit validiert werden. Bei der anschliessenden Hochwasserbemessung muss man sich jedoch bewusst sein, dass der Streubereich von 30–50 m³/s reicht (gemäss HQx_meso_CH-Berechnung) und die Unsicherheiten dementsprechend gross sind.

Anwendungsbeispiel 2: Wildbach

Einzugsgebiet:	Alpen, 62,4 km²
befestigte Fläche:	0,00 km²
Vergletscherung:	7,50 km²

Höhenlage:	1698 bis 3316 m ü. M.
Kumulative Gerinnelänge:	76,3 km
Gesuchte Grösse:	Spitzenabfluss HQ_{100}

Schritt 1: Anwendung verschiedener Modelle

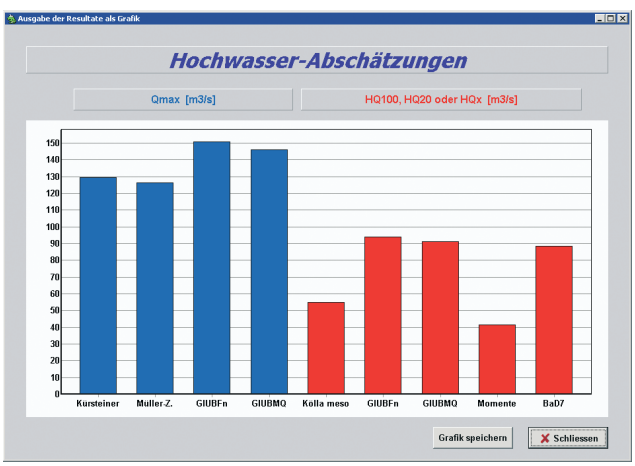


Wildbach: Erste Berechnungsresultate (HQx_meso_CH)

Schritt 2: Analyse der Streuung der Resultate
Die Ergebnisse in der HQ_{100}-Gruppe (rote Balken) streuen relativ stark, die Ergebnisse der Methoden Kölla meso und Momente liegen deutlich tiefer als die übrigen Resultate. Die Streuung in der Q_{max}-Gruppe (blaue Balken) ist gering und alle Resultate der Qmax-Gruppe liegen über denjenigen der HQ_{100}-Gruppe.

Schritt 3: Korrektur oder Streichung unplausibler Ergebnisse
a) Überlegungen zum Einzugsgebiet
– Die Grösse des Einzugsgebietes liegt mit 62,4 km² innerhalb des Gültigkeitsbereiches der verwendeten Ansätze (10–200 km²). Das Einzugsgebiet liegt aber in einer Region, in welcher die Hochwasserabflüsse gemäss HQx_meso_CH (Angabe der relativen Abweichungen) mit allen verwendeten Ansätzen tendenziell überschätzt werden. Eine kritische Beurteilung der Ergebnisse ist deshalb sehr wichtig.
– 12% des Einzugsgebietes sind vergletschert. Dies sollte noch keine Probleme bei der Abschätzung mit den Methoden Momente und BaD7 geben, da solche Gebiete bei den Testgebieten gut abgedeckt sind (der maximale Vergletscherungsgrad liegt gemäss Tabelle 5-6b/c bei 48%).
– Das gebirgige Einzugsgebiet eignet sich, abgesehen von kleinen Teilbereichen, nicht für die landwirtschaftliche Nutzung. Dies erfordert eine kritische Parameterüberprüfung bei den Ansätzen, welche die Bodeneignungskarte verwenden (Müller-Zeller und Kölla meso).

b) Überlegungen zu den Ergebnissen
– Kürsteiner und Müller-Zeller: Der vom Programm vorgeschlagene c-Wert von 8,23 ist aufgrund eigener Erfahrungen und Gebietskenntnisse plausibel. Dasselbe gilt für den ψ-Wert von 0,4 beim Ansatz von Müller-Zeller.
– Kölla meso: Die vom Programm ermittelten Niederschlagsintensitäten, die Gerinnelänge und das Benetzungsvolumen werden aufgrund eigener Erfahrungen und Gebietskenntnisse als plausibel beurteilt.
– GIUB'96: Die verwendete Hochwasserregion S3 liegt als Insel in der Region A5. Das untersuchte Einzugsgebiet liegt aber vollständig innerhalb der Region S3. Zudem ergibt die Vergleichsrechnung mit den Parametern der Region A5 extrem tiefe Hochwasserabflüsse, welche in diesem Fall nicht plausibel scheinen.
- Das Programm verwendet einen mittleren Jahresabfluss von 3,06 m³/s. Überträgt man die mittleren Jahresabflüsse der Messstationen der drei Nachbareinzugsgebiete flächenproportional auf den Wildbach, so ergeben sich mittlere Jahresabflüsse zwischen 2,0 und 2,8 m³/s. Die Berechnungen werden deshalb mit einem mittleren Jahreabfluss von 2,4 m³/s wiederholt. Das HQ_{100}(MQ) nimmt dadurch von 109 auf 91 m³/s ab.
– Momente und BaD7: Das Einzugsgebiet verfügt mit 12% Vergletscherung über Parameterkombinationen, welche durch die Modelle Momente und BaD7 abgedeckt werden. Es wurde keine Erklärung gefunden, weshalb die Momenten-Methode mit 41 m³/s eine deutlich tiefere Hochwasserspitze als die anderen Ansätze ergibt, es gibt aber auch keine offensichtlichen Gründe, welche dagegen sprechen.



Wildbach: Revidierte Berechnungsresultate (HQx_meso_CH)

Schritt 4a: Ermittlung des Schätzwertes für HQ_{100} mit zugehörigem Streubereich
Das arithmetische Mittel der fünf Ergebnisse Kölla meso, GIUB'96 (Fn), GIUB'96 (MQ), Momente und BaD7 wird als Schätzwert für das HQ_{100} verwendet: Er beträgt 74 m³/s und der zugehörige Streubereich geht von 41–94 m³/s. Die Obergrenze des Streubereiches liegt unter dem Mittelwert der Q_{max}-Gruppe von 138 m³/s.

Schritt 4b: Validierung der Ergebnisse
Übertragung von Abflussmessungen in Vergleichseinzugsgebieten
Die Übertragung der Hochwasserabflüsse zweier vergleichbarer Einzugsgebiete auf das Einzugsgebiet des Wildbaches ergibt eine zusätzliche Plausibilitätskontrolle der mit dem Programm ermittelten Hochwasserspitzen. Die gewählten Vergleichseinzugsgebiete sind dem zu untersuchenden Einzugsgebiet sowohl bezüglich Hangneigung, Boden- und Nutzungsverhältnissen sowie der Niederschlagsverteilung ähnlich; zudem werden sie nicht durch Kraftwerke beeinflusst und ihre Messreihen sind mit 44 bzw. 46 Jahren verhältnismässig lang. Das statistisch ermittelte HQ_{100} der beiden Gebiete A und B wird mit dem Ansatz $Q_x = Q_a \cdot (E_x/E_a)^{0,85}$ auf den Wildbach übertragen, wobei ein HQ_{100} von 56 resp. 106 m³/s resultiert:

Gebiet A, 73,3 km², HQ100 65 m³/s:
HQ_{100} Wildbach = $65 \cdot (62,4/73,3)^{0,85}$ = 56 m³/s
Gebiet B, 66,5 km², HQ100 112 m³/s:
HQ_{100} Wildbach = $112 \cdot (62,4/66,5)^{0,85}$ = 106 m³/s

Dimensionierungsabfluss älterer Ausbauprojekte
Als weiterer Anhaltspunkt wird der Dimensionierungsabfluss des Ausbauprojektes von 1957 herangezogen: Er beträgt 88 m³/s, ohne Angabe der zugehörigen Jährlichkeit. Da der Wildbach durch Siedlungsgebiet fliesst, liegt die Dimensionierungswassermenge vermutlich in der Grössenordnung des HQ_{100}. Das Projekt von 1957 wurde jedoch nicht vollumfänglich realisiert, d. h. der Wildbach wurde nicht durchgehend auf 88 m³/s ausgebaut.

Beurteilung von Gerinnekapazität und Hochwassergeschichte
Die Kapazität im Bereich der Brücken beträgt gemäss Staukurvenrechnung ca. 60 m³/s. Laut Auskunft der kantonalen Fachstelle ist der Wildbach seit dem Ausbau um 1960 nie über die Ufer getreten; alle Hochwasser zwischen 1960 und 2001 müssen daher kleiner als 60 m³/s gewesen sein. In der Zeitspanne von 1868 bis 1956 hat der Wildbach jedoch mehrmals grosse Hochwasser geführt, ist über die Dämme getreten und hat das Umland überschwemmt. Es finden sich leider keine Angaben zur Grösse dieser Hochwasser und zur damaligen Gerinnekapazität.

Synthese und Festlegung der Hochwasserabflüsse
Die Übertragung der Abflüsse der Vergleichseinzugsgebiete auf den Wildbach ergibt ein HQ_{100} zwischen 56 und 106 m³/s. Das Projekt von 1957 lässt auf ein HQ_{100} von 88 m³/s schliessen. In den letzten 40 Jahren ist kein Hochwasser über 60 m³/s aufgetreten. Das mit HQx_meso_CH geschätzte HQ_{100} von 74 m³/s konnte somit validiert werden. Bei der Hochwasserbemessung muss man sich jedoch bewusst sein, dass der Streubereich von 41–94 m³/s reicht und die Unsicherheiten dementsprechend gross sind.

5.2 Kleine Einzugsgebiete (<10 km²)

Hochwasserereignisse in kleinen Einzugsgebieten verursachen jedes Jahr Schäden im Wert von 50–100 Millionen Franken. Diesem Schadenpotential steht die kleine Anzahl an Einzugsgebieten mit langjährigen Messreihen gegenüber. Für die Praxis sind Abschätzmethoden bei Bemessungsaufgaben daher ein unentbehrliches Hilfsmittel.

Der wichtigste Unterschied zur Hochwasserabschätzung in mittelgrossen Einzugsgebieten ist die *Verfügbarkeit und die räumliche Auflösung von Gebietsdaten.* Bei kleinen Einzugsgebieten sind diese Daten wegen ihres *zu geringen Detaillierungsgrades* nicht direkt für die Hochwasserabschätzung verwendbar, sie können aber erste Anhaltspunkte liefern. Hochaufgelöste Gebietsdaten sind nur für wenige Regionen erhältlich. Eine *Feldbegehung* ist aus diesem Grund unerlässlich und bildet einen integralen Bestandteil der Hochwasserabschätzung.

Die bestehenden Abschätzmethoden sind in kleinen Einzugsgebieten bisher nicht systematisch untersucht worden. FORSTER & HEGG (2002) haben im Rahmen des Projektes der Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) «Beurteilung von Hochwasserschätzverfahren» verschiedene Methoden auf ihre Tauglichkeit hin überprüft. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde ein Verfahrensvorschlag (FORSTER & HEGG 2002) für die Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten abgeleitet, welcher das Grundgerüst für das Kapitel 5.2 bildet.

5.2.1 Vorgehen

Die Hydrologie kleiner Einzugsgebiete ist durch die *kleinräumige Variabilität der Gebietseigenschaften* geprägt. Einzelne dieser Eigenschaften können, bezogen auf die Flächenanteile, eine dominante Ausprägung erreichen. Natürlich ist diese kleinräumige Kammerung in mittelgrossen Einzugsgebieten auch vorhanden; hier gleicht sich diese, bzw. ihr Einfluss auf den Wasserhaushalt, jedoch eher wieder aus. Die hohe Variabilität der Gebietseigenschaften kommt in Kartenwerken normalerweise nicht zum Ausdruck, da der Massstab dafür zu klein bzw. die Generalisierung zu grob ist. Ein Beispiel ist die Bodeneignungskarte, welche im Massstab 1:200'000 vorliegt. Auf dieser Skala können nur grössere Einheiten dargestellt werden. Um die in der Natur auftretenden Bodenunterschiede darstellen zu können, müsste ein Massstab der Grössenordnung 1:5'000 gewählt werden (EJPD 1980). Die Auflösung räumlicher Informationen muss generell in dieser Grössenordnung liegen, damit die Angaben hinreichend genau sind und direkt für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten verwendet werden können.

Aus diesen Feststellungen ergeben sich folgende Konsequenzen (vgl. auch Fig. 5-22):

- Räumliche Informationen sind zwar flächendeckend für die Schweiz vorhanden, ihre Auflösung ist jedoch zu grob, um daraus direkt Parameter für die Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten abzuleiten.
- Die vorhandenen räumlichen Informationen sind jedoch eine gute Grundlage, um einen ersten Eindruck über die Grössenordnung verschiedener Parameter zu gewinnen und provisorische Werte abzuleiten. Diese Informationen werden in einer *Hypothese der Gebietsbeurteilung* zusammengefasst.
- Eine *Begehung des Einzugsgebietes* ist für die definitive Festlegung der Parameter absolut notwendig. Sie dient dazu, die genaue räumliche Verteilung der Parameter zu bestimmen und die Hypothese zu verifizieren und zu ergänzen.

Nachdem die Parameter aus Kartenwerken und im Feld erhoben worden sind, kann der Hochwasserabfluss mit *verschiedenen Berechnungsverfahren* abgeschätzt werden. Von den Verfahren, die in kleinen Einzugsgebieten erprobt worden sind, ist keines für die alleinige Verwendung zu empfehlen. Das Spektrum der Gebietseigenschaften in den verschiedenen Einzugsgebieten ist zu gross, als dass ein einziges Verfahren alle Fälle abdecken könnte. Jedes Verfahren hat seine Stärken und Schwächen, wobei diese in den verschiedenen Gebieten unterschiedlich stark zur Geltung kommen. Im Kapitel 5.2.3 wird ein Vorschlag präsentiert, bei welchem der Hochwasserabfluss aus einem Set von insgesamt fünf Verfahren bestimmt wird.

Nach dem Einbezug von verschiedenen Verfahren müssen die Resultate der Hochwasserabschätzung überprüft werden. Für die *Plausibilisierung* sollte in jedem Fall die *Gerinnekapazität* abgeschätzt werden. Eventuell sind auch Wasserstände von historischen Ereignissen bekannt, welche sich für hydraulische Abschätzungen verwenden lassen.

Das hier beschriebene Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten hat sich bewährt. Es ist in Figur 5-22 schematisch dargestellt und zusammengefasst. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte näher erläutert.

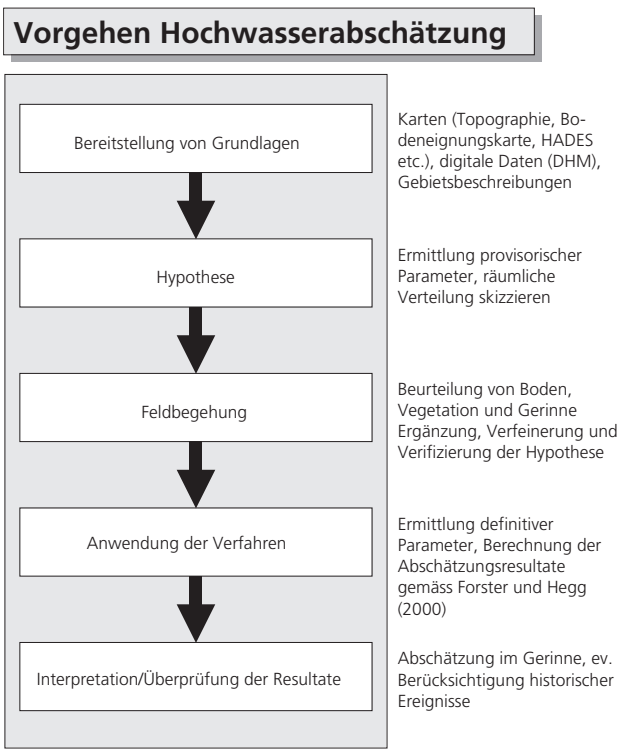


Fig. 5-22: Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten.

a) Bereitstellen der Grundlagen

Am Anfang der Hochwasserabschätzung steht die Beschaffung von Unterlagen über das Untersuchungsgebiet. Neben einem ersten *Überblick über das Untersuchungsgebiet* benötigt man vor allem Grundlagen, um die *Parameter der einzelnen Verfahren provisorisch*

festzulegen und insbesondere deren räumliche Verteilung zu ermitteln. Diese provisorischen Parameter dienen als Arbeitshypothese und werden später bei der Feldbegehung verifiziert.

Einzelne Parameter (z.B. die Niederschlagsintensitäten aus dem HADES) können bereits in der Grundlagenphase definitiv festgelegt werden.

Grundsätzlich können drei Informationsquellen unterschieden werden:

– *Kartographische Informationen*
  Kartenwerke sind die wichtigsten Informationsquellen. Verschiedene Typen wie die topographische Landeskarte, die Bodeneignungskarte und die Blätter aus dem HADES sind flächendeckend vorhanden und somit für jedes Untersuchungsgebiet verfügbar. Vielfach ist der Massstab jedoch zu klein, um aus diesen Karten direkt verwertbare Parameter abzuleiten. Spezialkartierungen (z.B. zur Standortkunde, Vegetation etc.) sind nicht flächendeckend vorhanden, liegen aber oft in besserer Auflösung vor. Immer mehr an Bedeutung gewinnen digitale Daten, als Beispiel kann das Digitale Höhenmodell (DHM) angeführt werden.

– *Gebietsbeschreibungen*
  Wenn in einem Gebiet Untersuchungen über die Vegetation, den Boden oder die Geologie durchgeführt wurden, sind die Resultate oft in Spezialkartierungen und in Gebietsbeschreibungen festgehalten. Diese liefern weitere Informationen, welche in die Hypothese zur Gebietsbeurteilung einfliessen können.

– *Information durch Anwohner*
  Der Kontakt zur lokalen Bevölkerung ergibt sich erfahrungsgemäss am ehesten während der Feldbegehung. Vor allem in Land- und Forstwirtschaft tätige Leute können oft auf besondere Gebietseigenschaften hinweisen, deren Überprüfung sich lohnt.

Im Folgenden werden die wichtigsten Informationsquellen kurz vorgestellt.

Kartographische Informationen
Kartenwerke sind wegen der räumlichen Darstellung der Informationen das *wichtigste Hilfsmittel* bei der Erstellung der Arbeitshypothese. Flächendeckend sind sie jedoch meist in zu kleiner Auflösung verfügbar, als dass aus ihnen direkt verwertbare Informationen abgeleitet werden können. Dennoch können sie Tendenzen und übergeordnete Strukturen aufzeigen und die *Bandbreite* festlegen, innerhalb derer sich ein bestimmter Parameter bewegen kann.

Für eine Gebietsbeurteilung werden primär Informationen über die Topographie, die Verteilung von Wald und Freiland, den Boden und die Geologie benötigt. Diese Informationen sind in den folgenden *konventionellen Kartenwerken* zu finden:

– Landeskarte der Schweiz 1:25'000
– Bodeneignungskarte 1:200'000
– Bodennutzungskarte der Schweiz 1:300'000
– Blätter des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 (nicht flächendeckend vorhanden)

In vielen Fällen sind dies die einzigen Quellen, welche für das Erstellen einer Hypothese zur Verfügung stehen. Für kleine Einzugsgebiete sind jedoch räumlich höher aufgelöste Informationen wünschenswert. Kantonale und kommunale Vermessungsämter, eventuell auch im Untersuchungsgebiet tätige Forschungsinstitutionen können über detailliertere Unterlagen Auskunft geben. Für den Kanton Zürich existiert beispielsweise eine Bodenkarte im Massstab 1:5'000.
Bei den oben genannten Stellen sind eventuell auch *geomorphologische, standort- und vegetationskundliche oder andere fachspezifische Kartierungen* verfügbar. Orientierungslauf-Karten bieten ebenfalls eine sehr hohe Auflösung, sie sind aber nur in wenigen Gebieten vorhanden. Die Interpretation solcher Quellen kann wertvolle Hinweise zur Erstellung der Hypothese geben.

Für die Bestimmung der massgebenden Niederschlagsintensitäten werden die Blätter 2.4 und 2.4[2] «Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970» des Hydrologischen Atlas der Schweiz verwendet. Die Daten des Blattes 2.4 sind auch als Excelfile verfügbar. Falls vorhanden, können auch eigene Auswertungen von Niederschlagsmessstationen herangezogen werden.

Immer mehr kartographische Informationen sind auch digital erhältlich und somit für die Verwendung in einem *Geographischen Informationssystem* geeignet. Durch die Verschneidung verschiedener Informationsebenen kann die Arbeitshypothese für die Feldarbeit wesentlich verfeinert werden. Die Adresse http://www.kogis.ch/sik-gis/ gibt einen Überblick über digitale raumbezogene Daten, welche von Bund und Kantonen zur Verfügung gestellt werden.

Folgende digitale Unterlagen sind flächendeckend vorhanden:

– Pixelkarte 1:25'000 (PK25)
– Digitales Höhenmodell DHM25-Matrixmodell
– Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz
– Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz
– Arealstatistik der Schweiz
– Blatt 2.4 «Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970», HADES

Bei der Pixelkarte PK25 handelt es sich um einen Scan der Landeskarte 1:25'000. Die Karte eignet sich sowohl zum Erstellen der Hypothese als auch als Hintergrund zum Digitalisieren der Gebietseinteilung.
Aus der Pixelkarte abgeleitet wurde das DHM25. Mit einer Maschenweite von 25 m handelt es sich um das höchstauflösende digitale Höhenmodell, welches für die ganze Schweiz verfügbar ist. In einigen Kantonen existieren flächendeckend digitale Höhenmodelle mit einer kleineren Maschenweite (z.B. 10 m im Kanton Bern).
Informationen zur Landnutzung bietet die Arealstatistik des Bundesamtes für Statistik BFS. Sie basiert auf der Auswertung von Luftbildern. Diese wurden mit einem Raster von 100 m Maschenweite überlagert, und für jedes Feld wurde die dominierende Nutzung identifiziert. Trotz der groben Auflösung können daraus relevante Informationen abgeleitet werden. Unter Einbezug der Landeskarte können zum Beispiel Freiflächen, welche landwirtschaftlich intensiv genutzt werden, hypothetisch als verdichtet angenommen werden.

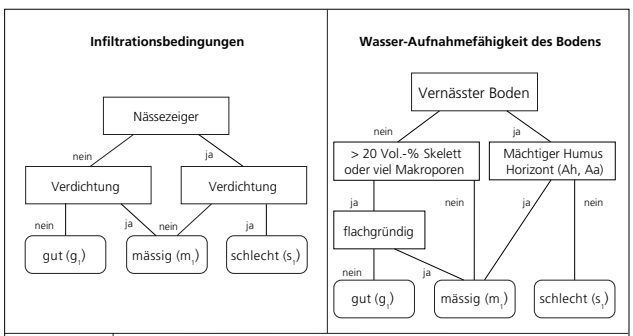
Gebietsbeschreibungen
Häufig sind den oben erwähnten Spezialkartierungen auch Gebietsbeschreibungen beigefügt. Gebietsbeschreibungen können wichtige Zusatzinformationen zur *Landnutzung* (z.B. Verdichtung), *Vegetation* (z.B. Nässezeiger) und anderen Themen liefern.
Um die Abschätzresultate plausibilisieren zu können, lohnt sich auf jeden Fall die Betrachtung vergangener Hochwasserereignisse. In jedem Kanton werden *Ereigniskataster* geführt, sie unterscheiden sich jedoch bezüglich Umfang und Erfassungszeitraum stark.
Unter Umständen finden sich in Chroniken, Zeitungsarchiven und ähnlichen Quellen Angaben zu historischen Ereignissen (Schäden, Hochwassermarken, Überflutungsstellen), mit welchen sich grobe hydraulische Abschätzungen durchführen lassen.

Informationen durch Anwohner
Statistisch betrachtet beträgt die Wahrscheinlichkeit fast 40%, dass in einer 50jährigen Periode ein Hochwasser mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren auftritt; für ein Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren steigt die Wahrscheinlichkeit bereits auf über 80% an. Alteingesessene Personen können daher in vielen Fällen persönliche Eindrücke von schweren Unwetterereignissen schildern. Beobachtungen zum Verlauf und dem räumlichen Schwerpunkt eines Unwetters oder private Niederschlagsmessungen können mithelfen, solche Ereignisse einzuordnen. Angaben zu Überflutungsstellen und Hochwasserständen können für eine *grobe Rekonstruktion der Abflussmenge* herangezogen werden. So wertvoll solche Informationen sein mögen, sie müssen immer mit der gebotenen Vorsicht in eine Beurteilung eingehen.

Aufwand der Informationsbeschaffung
Der Aufwand für die Beschaffung der Informationen kann beträchtlich variieren. Bei Kartenwerken und digitalen Daten wird davon ausgegangen, dass diese vorhanden sind oder in kurzer Zeit beschafft werden können (http://www.swisstopo.ch, http://www.statistik.admin.ch). Wenn sicher ist, dass keine weiteren Unterlagen vorhanden sind und sich weitere Recherchen nicht lohnen, ist der zeitliche Aufwand somit sehr klein.
Bei der Recherche nach Spezialkartierungen und Gebietsbeschreibungen ist mit einem grösseren Aufwand zu rechnen. Ein erster Anknüpfungspunkt ist das Bibliothek-Netzwerk unter http://www.nebis.ch.
Für die Beschaffung von detaillierteren Unterlagen (Gebietsbeschreibungen, Spezialkartierungen) über andere Institutionen muss im allgemeinen mehr Zeit veranschlagt werden, wobei die Bearbeitungszeit der Datenherren zusätzlich berücksichtigt werden muss.

b) Aufstellen der Hypothese für die Gebietsbeurteilung
In der Praxis steht für eine Hochwasserabschätzung normalerweise nur wenig Zeit zur Verfügung. Um so wichtiger ist die sorgfältige Vorbereitung der Feldarbeit, diese Investition zahlt sich später durch die Zeitersparnis bei der Begehung aus. Wesentlicher Bestandteil der Vorbereitung ist die Formulierung einer Hypothese für die Gebietsbeurteilung. *Wo sind am ehesten vernässte Flächen zu erwarten? Wo ist mit verdichteten Böden zu rechnen? Wo sind sie unwahrscheinlich, weil keine Bewirtschaftung möglich ist?*
Eignen sich verschiedene Kartenwerke wegen ihres zu kleinen Massstabes nicht für die direkte Bestimmung von Parametern, so sind sie doch eine (häufig die einzige) Grundlage für die Formulierung der Hypothese. Bei einer guten Informationslage und einfachen Geländeverhältnissen kann die Hypothese so treffend formuliert werden, dass die Gebietseinteilung im Feld nur noch verfeinert werden muss.
Es wird betont, dass hier nur generelle Hinweise für die Erstellung einer Hypothese gegeben werden können. Die Überprüfung im Feld ist unbedingt durchzuführen. Die alleinige Verwendung der Hypothese als

Grundlage für die Hochwasserabschätzung wird der Problemstellung nicht gerecht, da die ausgeprägte kleinräumige Kammerung der Gebietseigenschaften in kleinen Einzugsgebieten mit den generalisierten Kartenwerken nicht hinreichend erfasst wird. Basis für das Aufstellen einer Hypothese bilden die oben beschriebenen Grundlagen-Informationen. Ausser dem Verfahren nach Kölla stützen sich alle beschriebenen Verfahren auf eine flächendifferenzierte Gebietsbeurteilung, welche darauf beruht, dass Flächen mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften ausgeschieden werden. Ein Hilfsmittel zur objektiven Gebietsbeurteilung ist das Beurteilungsschema von RICKLI & FORSTER (1997), vgl. Fig. 5-23. Daher bildet es sowohl für das Aufstellen einer Hypothese als auch für die anschliessende Feldbegehung das Grundgerüst. Einschränkungen bei der Verwendung des Beurteilungsschemas werden im Kapitel 5.2.3 diskutiert.Die Hypothese der Gebietseinteilung wird am besten auf einer (vergrösserten) Kopie der Landeskarte 1:25'000 skizziert.



	Abflusskoeffizienten ψ				
	g_1g_2	g_1m_2, m_1g_2	m_1m_2	m_1s_2, s_1m_2	s_1s_2
Wald	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45
Freiland mit Vegetation	0,1	0,25	0,35	0,45	0,5

Fig. 5-23: Entscheidungsschema zur Bestimmung der Abflusskoeffizienten ψ (nach RICKLI & FORSTER 1997).

Als massgebend für die Abflussbildung werden einerseits die Infiltrationsbedingungen an der Oberfläche und andererseits die Wasser-Aufnahmefähigkeit des Bodens angesehen. Das hydrologische Verhalten des Bodens wird mithilfe folgender Kriterien beurteilt:

Nässezeiger / Vernässung
Vernässten Flächen ist einerseits eine hohe natürliche Wassersättigung eigen, andererseits weisen sie auf Böden mit zum Teil geringer Durchlässigkeit hin. Sie sind deshalb als abflussfreudig zu bewerten. Bei einer Vegetationsansprache weisen sogenannte *Nässezeiger* (typisch ist beispielsweise Pestwurz) auf vernässte Flächen hin.

Vernässte Flächen sind beim Erstellen einer Hypothese nur schwer vorhersagbar. Erste Hinweise können die Geologie, die Bodeneignungskarte und die Gerinnenetzdichte geben. Häufig besteht auch ein Zusammenhang mit kleinräumigen topographischen Variationen. So haben Kreten eine geringere Tendenz zur Vernässung als Mulden bzw. gerinnenahe Flächen, eine entsprechende Unterscheidung lässt sich mithilfe der Landeskarte 1:25'000 oder mit dem DHM25 postulieren.
Für Vernässung besonders förderlich ist *flachgründiger tonreicher Boden.* Ausgangsgestein für solche Böden ist häufig Flysch oder Bündnerschiefer. Als Grundlage für eine entsprechende Beurteilung dienen die Bodeneignungskarte, die geotechnische Karte der Schweiz und das entsprechende Kartenblatt aus dem geologischen Atlas der Schweiz (falls dieses für das Untersuchungsgebiet vorhanden ist).
Ein *dichtes Gerinnenetz* weist auf abflussfreudige Verhältnisse hin. Dient die Landeskarte 1:25'000 als Grundlage zur Beurteilung, so muss berücksichtigt werden, dass sie das Gerinnenetz gerade in Gebieten mit einer hohen Dichte zum Teil stark generalisiert darstellt. In flachen Gebieten mit relativ trockenen Böden sind die Unterschiede zwischen der kartographischen Darstellung und der Realität kleiner. Beim Verfahren Clark-WSL (Kapitel 5.2.2, Abschnitt f) ist der Zustand des Einzugsgebietes im Hochwasserfall von Interesse. Aus diesem Grund müssen episodisch und periodisch wasserführende Runsen und Tiefenlinien nachkartiert werden. Auf der Landeskarte 1:25'000 ausgewiesene Trockenrinnen werden automatisch dem Gewässernetz zugeschlagen, da diese im Starkniederschlagsfall wasserführend sind. Oft sind kleinere, episodisch wasserführende Gerinne nur durch eine Deformation der Höhenlinien erkennbar.
Natürlich sind spezifische Signaturen der Landeskarte 1:25'000 (Sumpf) ebenfalls als vernässt zu kennzeichnen.

Verdichtung
Eine *starke mechanische Beanspruchung des Bodens* (intensive Beweidung, Einsatz schwerer Maschinen, Skipisten) reduziert die Infiltrationsfähigkeit. Feinkörnige, feuchte Böden sind generell anfälliger auf Verdichtung als trockene und grobkörnige (bzw. solche mit hohem Skelettanteil). Die Bodeneignungskarte kann hier erste Hinweise geben.
Verdichtete Gebiete lassen sich auch dort postulieren, wo die Signaturen auf der Landeskarte auf eine *intensive Bewirtschaftung* hinweisen (Obstgärten, Skilifte! etc.) oder entsprechende Flächen der Arealstatistik (landwirtschaftliche Nutzflächen) mit den Freiflächen der Landeskarte verschnitten werden.

Skelettanteil
Ein hoher Skelettanteil (>20%) ist für eine gute Durchlässigkeit förderlich. Der Skelettgehalt des Bodens wird im Wesentlichen durch das Muttergestein bestimmt. Werden in der Bodeneignungskarte Bodentypen wie Rendzinen, Ranker, Lithosol bzw. Formelemente wie Moränen oder Schuttfächer ausgewiesen, darf von einem hohen Skelettanteil ausgegangen werden. Die Lage der angesprochenen Formelemente ist auf der Landeskarte 1:25'000 meistens einfacher zu identifizieren als auf der Bodeneignungskarte.

Makroporen
Durch Bioturbation oder Schwundrisse gebildete Makroporen begünstigen die Infiltration bzw. die Perkolation in tiefere Bodenschichten. Das Vorhandensein von Makroporen lässt sich nur schlecht postulieren. Allenfalls können hier Gebietsbeschreibungen weiterhelfen, ansonsten bringt nur eine Bodenansprache während der Feldbegehung Aufschluss.

Gründigkeit des Bodens
Sind die speichernden Horizonte flachgründig (<40 cm), wirkt sich dies negativ auf die Aufnahmefähigkeit des Bodens aus. Als Grundlage für die Beurteilung können die Bodeneignungskarte und eventuell auch Gebietsbeschreibungen dienen.
Alle Flächen, welche in der Bodeneignungskarte als flach oder sehr flachgründig ausgewiesen werden, werden in der Hypothese entsprechend bewertet.

Humus-Horizont
Ein mächtiger Humushorizont (>20 cm) über einem vernässten Bodenhorizont wirkt sich günstig auf die Wasseraufnahmefähigkeit aus. Wie beim Kriterium «Makroporen» ist das Aufstellen einer Hypothese schwierig, auch hier können Gebietsbeschreibungen nähere Hinweise geben.

Aufwand
Für das Sichten des vorhandenen Informationsmaterials sowie das Erstellen einer Hypothese zur Gebietsbeurteilung muss etwa ein halber Arbeitstag veranschlagt werden.

c) Feldbegehung
Ziel der Feldbegehung ist es, *die hypothetische Gebietseinteilung zu verifizieren und wo nötig zu ergänzen resp. anzupassen.* Auf einer Karte werden die genauen Grenzen zwischen Wald und Freiland gezogen und das Gerinnenetz wird so weit als nötig ergänzt. Die Beurteilung von Bodenprofilen gibt Aufschluss über die Güte der provisorischen Gebietseinteilung.

Die Befunde im Feld sind unbedingt zu dokumentieren, neben einem Feldprotokoll sind auch Fotografien für die nachträgliche Interpretation der Daten im Büro wertvoll.
Für die Plausibilisierung der Resultate wird auch das Gerinne beurteilt. Ergibt sich der Kontakt zu Anwohnern, so lohnt es sich, diese auf vergangene Hochwasserereignisse und Beobachtungen bei Unwettern anzusprechen (vgl. Kapitel 5.2.1, Abschnitt a «Informationen durch Anwohner»).

Die Aussagen zur Gebietsbeurteilung im vorigen Kapitel gelten sinngemäss auch bei der Feldbegehung. Es werden daher nur noch einige ergänzende Punkte erwähnt.

Bei der Bodenansprache wird an ausgewählten Standorten ein *Bodenprofil* gegraben. Dabei empfiehlt sich eine Vorsondierung mit einem *Pürckhauer-Stock.* Dieser kann das Graben nicht ersetzen, da er grössere Skelettanteile nicht erfasst und nur einen kleinen Bodenausschnitt sichtbar macht. Der Pürckhauer-Stock ist hingegen ideal, um sich auf einer grösseren Fläche rasch einen groben Überblick über die Bodenverhältnisse zu verschaffen.
Ein Bodenprofil gibt Aufschluss über die Beschaffenheit der einzelnen Bodenhorizonte. Alle oben erwähnten Kriterien für die Bodenansprache sind mit einem Bodenprofil überprüfbar.
Es versteht sich von selber, dass auf landwirtschaftlichen Nutzflächen Zurückhaltung im Graben von Bodenprofilen geübt werden sollte. Auf jeden Fall sind die Spuren vollständig zu beseitigen. Das Einholen der Erlaubnis beim Landbesitzer bietet zudem oft die Möglichkeit zu einem persönlichen Kontakt, welcher wertvolle Informationen zum Einzugsgebiet und zu vergangenen Ereignissen liefern kann.
Die *Gerinnebeurteilung* dient einerseits der Parametererhebung für das Verfahren Clark-WSL (vgl. Kapitel 5.2.1, Abschnitt e, Kapitel 5.2.2, Abschnitt f oder VOGT (2001)), andererseits werden damit die Grundlagen für die Plausibilisierung der Abschätzresultate geschaffen. Auch hier wird auf Kapitel 5.2.1, Abschnitt e «Interpretation und Validierung der Resultate» hingewiesen.

Aufwand für die Feldbegehung
Für die Feldbegehung muss etwa ein Arbeitstag eingesetzt werden, bei grossen Einzugsgebieten mit einer starken räumlichen Gliederung und grossen Höhenunterschieden ist mit einem Aufwand von zwei Arbeitstagen zu rechnen.

d) Anwendung der Methoden
Mit den Erkenntnissen aus der Feldbegehung können die provisorischen Parameter der Hypothese nun korrigiert und ergänzt werden. In einem ersten Arbeitsschritt wird die endgültige Gebietseinteilung reingezeichnet; die einzelnen Teilgebiete werden planimetriert und bewertet. Der Einsatz eines Geographischen Informationssystems stellt eine wesentliche Arbeitserleichterung dar. Weiter sind aus den Felddaten die übrigen notwendigen Parameter abzuleiten (z.B. Fliessgeschwindigkeiten bei Clark-WSL).

Sind alle Parameter ermittelt, kann die Berechnung der Hochwasserabflüsse erfolgen. Die vorgeschlagenen Methoden zur Hochwasserabschätzung werden im Kapitel 5.2.2 näher vorgestellt, Kapitel 5.2.3 enthält Angaben zur empfohlenen Gewichtung der einzelnen Modelle. Es handelt sich dabei um die fünf Verfahren *Müller, Taubmann, Kölla, modifiziertes Fliesszeitverfahren und Clark-WSL.* Mit den Angaben im Kapitel 5.2.2 und der zitierten Literatur ist eine selbständige Anwendung der Verfahren möglich. Ziel ist die Ermittlung einer Hochwasserspitze und des zugehörigen Streubereiches (Angabe eines oberen und eines unteren Grenzwertes).

Die WSL hat ein Softwarepaket HAKESCH realisiert (**H**ochwasser **A**bschätzung in **K**leinen **E**inzugsgebieten der **SCH**weiz), welches den hier vorgestellten Verfahrensvorschlag umsetzt und eine effiziente Hochwasserabschätzung ermöglicht. Die Feldparameter können mit HAKESCH erfasst werden. Nach der Berechnung der Hochwasserabschätzung mit den hier aufgeführten Abschätzverfahren schlägt HAKESCH unter Berücksichtigung der vorgegebenen Gewichtung eine Hochwasserspitze vor. Die Anzeige erfolgt numerisch und grafisch, alle Daten können abgespeichert und exportiert werden. Dem Softwarepaket liegt ein Handbuch sowie ein Leitfaden für die Feldbegehung bei.

Aufwand bei der Anwendung der Verfahren
Existieren keine Programme für die Anwendung der Abschätzverfahren, so muss mit einem Berechnungsaufwand von mehreren Tagen gerechnet werden. Mit dem Einsatz des Programmpaketes HAKESCH oder auch mit Eigenentwicklungen kann dieser Aufwand auf wenige Stunden reduziert werden.

e) Interpretation und Validierung der Resultate
Das Vertrauen in die Resultate einer Hochwasserabschätzung kann gesteigert werden, wenn diese durch Befunde aus dem Feld plausibilisiert werden können. Dazu bietet sich eine Beurteilung des Gerinnes an.

In natürlichen Gerinnen wird die Gerinnebildung durch Abflussereignisse mit hoher Jährlichkeit dominiert. Die Abflussspitzen können deshalb mit hydraulischen Berechnungen im *Hochwasserquerschnitt* abgeschätzt werden. Als Hochwasserquerschnitt wird dabei jener Teil des Gerinnes betrachtet, bei welchem die Vegetation durch Hochwasserereignisse sichtbar beeinflusst ist. Häufig finden sich Spuren vergangener Hochwasserereignisse, so kann sich z.B. Schwemmmaterial über mehrere Monate an Gebüschen halten. Auf den Böschungen des Gerinnes ist oft eine Stufung der Vegetation sichtbar. Mächtigere Bäume entwickeln sich nur in höher gelegenen Böschungsbereichen, welche sehr selten von Hochwasserereignissen (Wiederkehrperiode >100–200 Jahre) betroffen sind.
Es ist jedoch zu berücksichtigen, das vor allem Gerinne von Wildbächen von verschiedenen Transportprozessen betroffen sind. Es ist abzuklären, ob das Gerinne auch als Sturzbahn von Lawinen fungiert. Lawinen weisen eine grössere Abflusstiefe auf und beeinflussen daher grössere Vegetationsflächen als Hochwasserereignisse. Andererseits können Rutschungen Bodenkompartimente mitsamt der Vegetation ins Gerinne hinab verschieben, was den durchflossenen Gerinnequerschnitt kleiner erscheinen lässt. Auch Murgänge beeinflussen die Vegetation in Gerinnenähe stark. Solche Einflüsse sind bei einer hydraulischen Abschätzung, besonders bei der Wahl des massgebenden Gerinnequerschnittes, zu berücksichtigen.
Wie bereits erwähnt, gibt es eventuell Augenzeugen vergangener Ereignisse, welche mit Angaben zur Abflusshöhe weiterhelfen können.

Aufwand für die Interpretation und die Validierung der Resultate
Die Zeit für die Beschaffung der Vergleichswerte wurde bereits im Kapitel 5.2.1, Abschnitt a «Bereitstellung von Grundlageninformationen» und Abschnitt c «Feldbegehung» einberechnet.

5.2.2 Methoden

Die in diesem Kapitel vorgestellten Methoden sind Bestandteil des Verfahrensvorschlages zur Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten von FORSTER & HEGG (2002). Insgesamt wurden 12 Verfahren untersucht, 6 Verfahren wurden im Verlauf der Untersuchungen aus verschiedenen Gründen wieder ausgeschieden:
Ein Teil der Verfahren wurde im Ausland entwickelt und lässt sich nicht ohne grössere Anpassungen auf hiesige Verhältnisse übertragen (SACKL, TM61), andere weisen in kleinen Einzugsgebieten eine sehr hohe Streuung der Resultate auf (Hager, Regressionsansatz

des IfK-ETH), berücksichtigen die räumlichen Inhomogenitäten kleiner Einzugsgebiete zu wenig (Unit Hydrograph-Verfahren) oder sind zu aufwändig und zu wenig objektiv für eine zuverlässige Hochwasserabschätzung (Laufzeitverfahren nach Zeller).
Die fünf im Folgenden vorgestellten Verfahren weisen in den untersuchten Gebieten relativ einheitliche Tendenzen bezüglich der Unter- bzw. Überschätzung von statistisch erhobenen Werten auf. Kapitel 5.2.3 zeigt, wie mit diesen Verfahren einerseits die Bandbreite der Hochwasserabflüsse (Streubereich) und andererseits ein konkreter Abfluss als Grundlage für Bemessungsaufgaben festgelegt werden kann.

a) Bestimmen der massgebenden Niederschlagsintensitäten

Bis auf das Verfahren von Müller verwenden alle hier vorgestellten Hochwasserabschätzverfahren Niederschlagsintensitäten bzw. -mengen. Mit den *Starkniederschlagskarten aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz (1992)* ist eine gute Basis für die Abschätzung der massgebenden Niederschlagsintensitäten vorhanden.
Die Tatsache, dass zwei verschiedene Versionen dieser Karten existieren, führt in der Praxis immer wieder zur Verunsicherung. FORSTER & BAUMGARTNER (1999) empfehlen zur Bestimmung der massgebenden Niederschlagsintensität diejenige Karte, welche für das Untersuchungsgebiet die höheren Werte liefert. Als oberer Grenzwert dient die Hüllkurve der maximalen in der Schweiz gemessenen Niederschlagsintensitäten (Fig. 5-24).
Falls extremwertstatistische Auswertungen von Niederschlagsmessungen im Gebiet vorhanden sind, können diese verwendet werden.

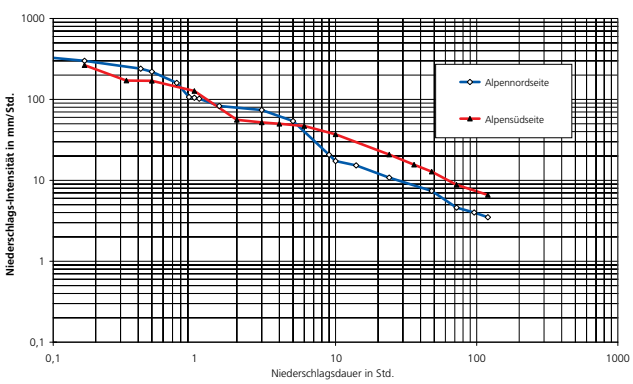


Fig. 5-24: Hüllkurve der maximalen gemessenen Niederschlagsintensitäten, aufgeteilt in Alpennord- und Alpensüdseite (FORSTER & BAUMGARTNER 1999).

b) Müller modifiziert

Beschreibung des Modells
Das modifizierte Verfahren nach Müller ist ein Hüllkurven-Verfahren, das einen empirischen Zusammenhang zwischen dem Hochwasserabfluss Q und der Einzugsgebietsfläche E herstellt. Die Einzugsgebietscharakteristik wird über den Spitzenabflusskoeffizienten ψ berücksichtigt. MÜLLER (1943) hat diesen Zusammenhang wie folgt formuliert:

$$HQ_{max} = 43 \cdot \psi \cdot E^{2/3}$$

HQ_{max}: höchstes mögliches Hochwasser im Einzugsgebiet [m^3/s]
ψ: Abflusskoeffizient, bestimmt nach RICKLI & FORSTER (1997)
E: Einzugsgebietsfläche [km^2]

Jährlichkeit des Ereignisses
Müller entwickelte dieses Verfahren in den frühen 40er Jahren mit den damals zur Verfügung stehenden Abflussdaten. Es bestimmt das «grösste zu erwartende Hochwasser» in einem Einzugsgebiet. In den meisten Einzugsgebieten liefert das Verfahren denn auch Resultate, welche das statistisch bestimmte HQ_{100} bei weitem übertreffen. Eine Ausnahme bilden kleine, sehr abflussfreudige Einzugsgebiete. Hier kann der Fall auftreten, dass das HQ_{100} unterschätzt wird.

Einzugsgebietsgrösse
Das Verfahren ist für Einzugsgebiete mit einer Fläche ≥1 km^2 anwendbar. Für Flächen zwischen 0,5 und 1,0 km^2 ergeben sich konservative Werte, da der Ausdruck $E^{2/3}$ in diesem Fall grösser ist als die Einzugsgebietsfläche E. Bei Einzugsgebieten unter 0,5 km^2 sind die abgeschätzten Hochwasserwerte unrealistisch gross.

Naturräumliche Zuordnung
Die naturräumliche Zuordnung geschieht im wesentlichen über den Abflusskoeffizienten. Dieser ist abhängig von der Landschaftscharakteristik des Einzugsgebietes.

Eingabegrössen
Das Verfahren nach Müller benötigt als Eingabegrösse nur die Einzugsgebietsfläche E und den Spitzenabflusskoeffizienten ψ. Dieser wird während der Feldbegehung flächendifferenziert über das Beurteilungsschema von RICKLI & FORSTER (1997) (Fig. 5-23) erhoben.

Literatur
In MÜLLER (1943) sowie FORSTER & RICKLI (1997) sind die Grundlagen für das Verfahren erläutert.

c) Taubmann/Thiess/Chow

Beschreibung des Modells

Das Verfahren basiert auf dem von CHOW (1962, 1964) in den USA entwickelten Berechnungsverfahren, das sich einerseits auf das SCS-Verfahren stützt und anderseits davon ausgeht, dass das Abflussmaximum dann auftritt, wenn die massgebende Regendauer gleich der Konzentrationszeit ist (Fliesszeitverfahren). Dazu müssen sowohl die massgebenden Starkniederschläge als auch die wichtigsten Gebietskennwerte bekannt sein.
Das Verfahren ermöglicht sowohl die Berechnung der Hochwasserspitze als auch des entsprechenden Hochwasservolumens durch Bestimmung einer Hochwasserganglinie.
Das Verfahren wurde von THIESS (1975) auf die hydrologischen Verhältnisse in Baden-Württemberg angepasst und von TAUBMANN (1986) in verschiedenen schweizerischen Einzugsgebieten getestet.

Die Gleichung nach Taubmann/Thiess lautet:

$$HQ(t,T) = A \cdot X(t,T,\alpha) \cdot Y(t,T) \cdot Z(t)$$

HQ(T):	Hochwasser mit der Jährlichkeit T [m^3/s]
A :	Einzugsgebietsfläche [km^2]
X :	Abflussfaktor [cm/h]
Y :	Klimafaktor [dimensionslos]
Z :	Scheitelreduktionsfaktor [dimensionslos]
t :	massgebende Niederschlagsdauer (Konzentrationszeit) [h]
T :	Jährlichkeit [Jahre]
α:	gemittelter komplexer Abflussbeiwert

Als Abflussfaktor X wird die abflusswirksame Niederschlagsintensität bezeichnet. Sie wird auf die hydrologisch-physiographischen Verhältnisse von Urbana/Illinois (USA) bezogen. Der Abflussfaktor ist abhängig vom gemittelten komplexen Abflussbeiwert α, welcher bei einer Begehung des Einzugsgebietes ermittelt wird. Der Klimafaktor Y in der umgeformten Hochwasserformel bestimmt sich aus dem Verhältnis der massgebenden Niederschlagsintensität des betrachteten Einzugsgebietes zu derjenigen in Urbana (Illinois, USA). Die Niederschlagsintensität ist abhängig von der Konzentrationszeit *t*, welche über die Fliessgesetze von Chézy und Strickler bestimmt wird.
Der Scheitelreduktionsfaktor *Z* ist ein Zeitbeiwert des Fliesszeitverfahrens welcher die Retentionswirkung des Einzugsgebietes berücksichtigt.

Jährlichkeit des Ereignisses

Für die Bestimmung der X-Werte für die Jährlichkeiten 5, 10, 25, 50 und 100 Jahre sind Nomogramme (TAUBMANN & THIESS 1984) vorhanden. Der Jährlichkeit des Hochwasserabflusses liegt wie bei anderen Abschätzverfahren die Jährlichkeit des Niederschlages zugrunde.

Einzugsgebietsgrösse

CHOW (1962) entwickelte das Verfahren für kleine ländliche Einzugsgebiete bis ca. 30 km^2. In TAUBMANN (1986) wird der Anwendungsbereich für Flächen zwischen 1 und 300 km^2 angegeben. Die Anwendung in Gebieten mit Flächen zwischen 0,5–1,0 km^2 ergab in Bezug auf die maximalen Hochwasserspitzen keinen Hinweis auf Unzulässigkeit.

Naturräumliche Zuordnung

Die naturräumliche Zuordnung geschieht über die aus dem SCS-Verfahren bekannten «curve numbers» (CHOW 1964).

Eingabegrössen

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung des Abschätzverfahrens sind die Boden- bzw. Landnutzungskenntnisse, die mit Vorteil aus einer Feldbegehung stammen. Damit lässt sich der Abflussbeiwert α festlegen.

Weitere Eingabegrössen sind:

i_E bzw i_U:	tatsächliche Niederschlagsintensität im zu untersuchenden Einzugsgebiet bzw. in Urbana (Illinois,USA) [mm/h]
L:	Länge des Hauptgerinnes [km]
J:	Mittleres Gefälle des Hauptgerinnes [m/m]
H:	Geschätzte mittlere Fliesstiefe [m]

Aus diesen Parametern lassen sich die Konzentrationszeit und daraus, zusammen mit der Wiederkehrdauer, die massgebenden Niederschlagsintensitäten ableiten. Von den Eingabegrössen ist der Abflussbeiwert α der mit Abstand sensitivste Parameter. Fehlerbetrachtungen haben ergeben, dass Abweichungen von 5 Prozent beim α-Wert beim resultierenden Hochwasserabfluss bis zu 30%ige Differenzen ergeben können. Die Tabelle, welche die Zuordnung der Abflussbeiwerte ermöglicht, ist v.a. auf mittelländische, landwirtschaftlich genutzte Flächen ausgerichtet. Für voralpine und alpine Gebiete hingegen, wo landwirtschaftlich nicht genutzte Flächen (hydrologisch unterschiedlich reagierende Waldflächen, Nassflächen, Schutthalden etc.) grössere Gebietsanteile ausmachen können, ist sie zuwenig ausführlich.

Literatur

In TAUBMANN & THIESS (1984) wird das Verfahren ausführlich erklärt.

d) Modifiziertes Fliesszeitverfahren

Beschreibung des Modells

Das modifizierte Fliesszeitverfahren entspricht im wesentlichen dem allgemein bekannten Fliesszeitverfahren (Rational Formula) (CHOW 1964). Hier wird folgende Form vorgeschlagen:

$$HQ(x) = 0{,}278 \cdot i(T_c, x) \cdot \psi_s \cdot E \quad [m^3/s \cdot km^2]$$

HQ (x): Hochwasserabfluss mit der Wiederkehrperiode x [m^3/s]
i: massgebende Niederschlagsintensität [mm/h]
ψ_s: Spitzenabflusskoeffizient nach Rickli und Forster (dimensionslos)
E : Einzugsgebietsfläche [km^2]
T_c: Konzentrationszeit [min]
x: Wiederkehrdauer [Jahre]

Der Umrechnungsfaktor 0,278 ist durch die gewählten Einheiten bedingt.

Das modifizierte Fliesszeitverfahren geht bezüglich des Niederschlags von folgenden Annahmen aus:

- Die höchsten Spitzenabflüsse treten dann auf, wenn die Dauer des Bemessungsniederschlages der Konzentrationszeit entspricht.
- Die Intensität des Niederschlags ist über die gesamte Dauer konstant.

Als Konzentrationszeit wird allgemein die Zeit bezeichnet, welche ein Wassertropfen benötigt, um vom entferntesten Punkt des Einzugsgebiets bis zum Gebietsauslass zu gelangen. Im *modifizierten Fliesszeitverfahren* setzt sich die Konzentrationszeit aus der Summe der Benetzungszeit T_B und der Fliesszeit T_{Fl} zusammen:

$$T_c = T_{Fl} + T_B$$

Die Fliesszeit T_{FL} wird nach dem Ansatz von Kirpich (CHOW 1964) bestimmt. Die Fliesszeit wird dabei in Beziehung zur maximalen Fliesslänge sowie dem mittleren Gefälle gesetzt:

$$T_{Fl} = 0{,}0195 \cdot L^{0{,}77} \cdot J^{-0{,}385} \quad [min]$$

L: maximale Fliesslänge (Distanz zwischen dem Gebietsauslass und dem entferntesten Punkt des Einzugsgebiets, dem Haupttal folgend) [m]
J: mittleres Gefälle entlang der maximalen Fliesslänge [m/m]

Die Benetzungsdauer T_B ist die Zeit, welche der Bemessungsniederschlag benötigt, um das Benetzungsvolumen aufzufüllen. Das Benetzungsvolumen entspricht dem Regenvolumen, das aufgebracht werden muss, um die obersten Bodenschichten aufzusättigen und damit Abflussprozesse zu ermöglichen. Das Benetzungsvolumen wird nach KÖLLA (1986) bestimmt, es ist primär von den Bodeneigenschaften und der Geologie abhängig. Dabei sind die Erkenntnisse der Gebietsbegehung zu berücksichtigen.
Die Intensität des Bemessungsniederschlags wird iterativ ermittelt, so dass das Benetzungsvolumen während der Benetzungszeit T_B komplett aufgefüllt wird und der Spitzenabfluss innerhalb der Fliesszeit T_{Fl} realisiert werden kann.
Beim modifizierten Fliesszeitverfahren wird die abflusswirksame Fläche aus dem Produkt der gesamten Einzugsgebietsfläche und dem Spitzenabflusskoeffizienten Ψ_s bestimmt. Der Abflusskoeffizient Ψ_s wird nach dem Beurteilungsschema in Fig. 5-23 für jede Teilfläche bestimmt, der Gesamt-Abflusskoeffizient wird flächengewichtet ermittelt.

Jährlichkeit des Ereignisses

Der Jährlichkeit des Hochwasserabflusses liegt wie bei anderen Abschätzverfahren die Jährlichkeit des Niederschlages zugrunde.

Einzugsgebietsgrösse

Das Verfahren wurde von Forster und Hegg bisher nur in Einzugsgebieten getestet, die weniger als 5 km^2 Fläche aufweisen.

Naturräumliche Zuordnung

Die naturräumliche Zuordnung geschieht einerseits über den Abflusskoeffizienten Ψ_s, welcher flächendifferenziert gemäss RICKLI & FORSTER (1997) (Fig. 5-23) ermittelt wird und anderseits über das Benetzungsvolumen V_{o20} nach KÖLLA (1986). Dieses wird aufgrund der Bodeneignungskarte unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Feldbegehung bestimmt.

Eingabegrössen

Die notwendigen Eingabegrössen sind bei der Modellbeschreibung zusammengestellt. Von diesen sind der Abflusskoeffizient Ψ_s sowie die Konzentrationszeit T_c die beiden sensitivsten Parameter.
Je nach Einzugsgebietsform kann es durchaus sein, dass sich durch das Abtrennen eines Teilgebietes ein grösserer (und damit massgebender) Hochwasserabfluss ergibt, weil eine kürzere Konzentrationszeit und damit eine grössere Niederschlagsintensität resultieren. Dies kann insbesondere in Gebieten vorkommen, die im oberen Gebietsteil ein flaches Hochplateau aufweisen.

Literatur
BAUMANN et al. (1992), RICKLI & FORSTER (1997) und KÖLLA (1986) enthalten alle notwendigen Angaben zum Verfahren.

e) Kölla

Beschreibung des Modells
Diese Hochwasser-Schätzmethode basiert auf dem Fliesszeitverfahren. Aufgrund neuerer Erkenntnisse über die Abflussbildung wurde die ursprüngliche Laufzeitformel abgeändert (KÖLLA 1986, 1987).
Kölla geht davon aus, dass nur gerinnenahe Teilfächen zur Abflussspitze beitragen und die gerinnefernen Teilflächen keinen wesentlichen Beitrag leisten. Anstelle der Gesamtfläche des Einzugsgebietes verwendet sie deshalb die *effektiv beitragende Fläche* in Gerinnenähe. Diese Fläche wird beidseitig der Gerinne durch die erste oberirdische Wasserscheide bzw. durch eine maximal beitragende Hanglänge von 100 m begrenzt.
Die massgebende Regendauer (= Konzentrationszeit) ist weitgehend davon abhängig, welches Benetzungsvolumen für das Erreichen einer gewissen Abflussbereitschaft der effektiv beitragenden Fläche notwendig ist.

Damit geht die bekannte Fliesszeitformel über in:

$HQ\ (x) = [i(T_c, x) - f(T_c, x)] \cdot F_{Leff} \cdot k_G + Q_{Gl}$,
mit $T_c = T_B + T_{Fl}$

HQ (x): Hochwasserabfluss der Jährlichkeit x [m³/s]
$i(T_c, x)$: Niederschlagsintensität der Jährlichkeit x und der Dauer T_c [mm/h]
$f(T_c, x)$: Verluste an den Untergrund [mm/h]
F_{Leff}: effektiv zum Hochwasserabfluss beitragende Fläche [km²]
k_G: Faktor, der den abflusserhöhenden Effekt von feuchten Vorbedingungen berücksichtigt
Q_{Gl}: Gletscherabfluss [m³/s]
T_c: Konzentrationszeit [h]
T_B: Benetzungszeit [h]
T_{Fl}: totale Fliesszeit [h]

Das Verfahren wurde für die Bestimmung des 20-jährlichen Hochwassers hergeleitet und nachher mit Umrechnungsmöglichkeiten für 100-jährliche Ereignisse ergänzt.
Die entscheidenden Parameter sind die effektiv beitragende Fläche und das erforderliche Benetzungsvolumen. Die effektiv beitragende Fläche basiert auf einem Perimeter um das aus der Karte 1:25'000 ermittelte, wasserführende Gerinnenetz L_{Ge}. Das Verfahren sieht vor, das erforderliche Benetzungsvolumen aufgrund der Landschaftscharakteristik mithilfe der Bodeneignungskarte zu bestimmen.

Jährlichkeit des Ereignisses
Im Gegensatz zu den anderen hier vorgestellten Schätzverfahren wird die Jährlichkeit des Hochwasserabflusses beim Verfahren nach Kölla nicht nur über die Niederschlagsjährlichkeit, sondern auch durch eine entsprechende Anpassung der beitragenden Fläche F_{Leff} und des Benetzungsvolumens berücksichtigt. Allenfalls muss auch der Faktor k_G angepasst werden, da dieser von der Konzentrationszeit T_c abhängt. Grundsätzlich trifft aber auch Kölla die Annahme, dass der gesuchte Hochwasserabfluss dieselbe Jährlichkeit aufweist wie die massgebende Niederschlagsintensität.

Einzugsgebietsgrösse
Das Verfahren wurde aus Datenserien von ca. 120 Abflussmessstationen in schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 0,5 und 100 km² hergeleitet.

Naturräumliche Zuordnung
Die naturräumliche Zuordnung geschieht im wesentlichen über das Benetzungsvolumen. Dieses ist abhängig von der Landschaftscharakteristik, d.h. von den naturräumlichen Gegebenheiten im Einzugsgebiet. Im weiteren ist der Flächenfaktor, der die beitragende Fläche der Jährlichkeit anpasst, ebenfalls von der naturräumlichen Zuordnung abhängig.

Eingabegrössen
Die notwendigen Eingabegrössen sind in der Modellbeschreibung zusammengestellt.

Literatur
Eine selbständige Anwendung des Verfahrens ist mit KÖLLA (1986) möglich.

f) Clark-WSL

Das Verfahren Clark-WSL ist das jüngste der fünf vorgestellten Verfahren. Es entstand im Rahmen einer Praktikums- und einer Diplomarbeit an der WSL (VOGT 2001). Folgende Zielvorgaben bestanden bei der Entwicklung:

- Erarbeitung eines Hochwasser-Schätzverfahrens für kleine Wildbachgebiete (<1 km² bis ca. 5 km²) für unterschiedliche Jährlichkeiten.
- Generierung einer Hochwasserganglinie.
- Der Zeitaufwand für die Anwendung des Verfahrens soll höchstens ein paar Tage betragen.
- Die Abschätzmethode soll eine gewisse Objektivität ermöglichen, d.h. verschiedene Anwender sollen bei einer Hochwasserbeurteilung in einem bestimmten Gebiet zu Resultaten kommen, die innerhalb einer engen Bandbreite liegen.

Das Verfahren kombiniert die Ansätze von linearer Speicherung und linearer Translation. Ein Teil der Parameter wird mit einem GIS erhoben.

Beschreibung des Modells
Das vorliegende Abschätzverfahren basiert auf dem einfachen Konzeptmodell von Clark, einem Niederschlag-Abfluss-Modell, welches den Abflussvorgang durch die Kombination von linearer Speicherung und linearer Translation beschreibt (KOEHLER 1976).
Der lineare Einzelspeicher wird durch die Speicherkonstante K beschrieben und liegt am Gebietsausgang. Die Speicherkonstante K weist die Dimension der Zeit auf und ist ein Mass für die Speichereigenschaften des Einzugsgebietes. Sie beeinflusst die zeitliche Verteilung des Abflusses und damit die Höhe der Abflussspitze wesentlich.
Die lineare Translation wird über ein Zeit-Flächen-Diagramm berücksichtigt. Das Zeit-Flächen-Diagramm definiert die Inputfunktion zum linearen Speicher. Es wird ermittelt, welcher Anteil des gefallenen Niederschlages als Effektivniederschlag abflusswirksam wird und in welcher zeitlichen Verteilung dieser dem Linearspeicher am Gebietsausgang zugeführt wird.
Die Abflussbildung basiert auf der Unterteilung des gesamten Einzugsgebietes in hydrologisch ähnlich reagierende Teilgebiete (RICKLI & FORSTER 1997), die Abflusskonzentration wird über das Zeit-Flächen-Diagramm berücksichtigt. Für die numerische Berechnung des Hochwasserausflusses Q(t) aus dem linearen Speicher wählte Clark den Übergang zu diskreten Zeitschritten. Dazu bietet sich das Verfahren von Muskingum an (KOEHLER 1976).

Jährlichkeit des Ereignisses
Der Jährlichkeit des Hochwasserabflusses liegt wie bei anderen Abschätzverfahren die Jährlichkeit des Niederschlages zugrunde. Unter dieser Annahme kann das Verfahren für eine beliebige Wiederkehrdauer angewendet werden.

Einzugsgebietsgrösse
Das Verfahren wurde in 10 kleinen Einzugsgebieten getestet, davon waren zwei grösser als 2 km² (3,2 und 4,6 km²).

Naturräumliche Zuordnung
Die naturräumliche Zuordnung geschieht einerseits über die flächendifferenzierte Ermittlung des Wasserspeichervermögens *(WSV)* im Einzugsgebiet und anderseits über die Bestimmung des Zeit-Flächen-Diagrammes. Die Fliessgeschwindigkeiten, welche diesem zugrunde liegen, werden durch die Beschaffenheit und das Gefälle des Gerinnes bzw. der Landoberfläche festgelegt.

Eingabegrössen
Die notwendigen Gebietsparameter, insbesondere jene, welche den Boden und die Landnutzung betreffen, sind durch eine Feldbegehung zu erheben.

Konzentrationszeit t_c
Die zeitliche Verteilung, in welcher der Effektivniederschlag dem Gebietsausfluss zugeführt wird, wird über das Zeit-Flächen-Diagramm festgelegt. Dazu wird der Geländeoberfläche und dem Gerinne in Abhängigkeit der topographischen und hydrologischen Verhältnisse eine Abflussgeschwindigkeit zugewiesen. Daraus ist die für das Einzugsgebiet massgebende Konzentrationszeit t_c und der daraus resultierende massgebende Niederschlag abzuleiten.

Wasserspeichervermögen WSV
Als Wasserspeichervermögen wird der während eines Extremniederschlags kurzfristig mobilisierbare Bodenspeicher betrachtet. Dazu werden sowohl die Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche als auch die Wasser-Aufnahmefähigkeit des Bodens beurteilt. Die notwendigen Informationen über die Parameter Vernässung, Verdichtung, Bodenaufbau, Skelettgehalt und Gründigkeit werden über die Beurteilung des Bodens und der Vegetation gewonnen. (RICKLI & FORSTER 1997).

Volumenabflusskoeffizient Ψ_v
Der Effektivniederschlag wird über ein modifiziertes SCS-Verfahren bestimmt, wobei die Speichereigenschaften des Einzugsgebietes über das Wasserspeichervermögen in die Formel eingehen:

$$N_{eff} = \frac{(N - 0{,}2 \cdot WSV)^2}{N + 0{,}8 \cdot WSV} \rightarrow \Psi_v = N_{eff} / N$$

Speicherkonstante K
Die Speicherkonstante K wird im Normalfall aufgrund beobachteter Hochwasserereignisse berechnet. Beim Verfahren Clark-WSL wird die Speicherkonstante K über das Wasserspeichervermögen *WSV* parametrisiert.

Literatur
Mit VOGT & FORSTER (1999) sowie VOGT (2001) kann das Verfahren selbständig angewendet werden.

5.2.3 Wertung

FORSTER & HEGG (2002) haben die verschiedenen Verfahren in sieben kleinen Einzugsgebieten der Schweiz getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass keine der untersuchten Abschätzmethoden das breite Spek-

trum möglicher Gebietseigenschaften und -eigenheiten so abdeckt, dass sie in allen Fällen sehr gute Resultate liefert. Es lassen sich jedoch systematische Tendenzen bezüglich Über- und Unterschätzung von Hochwasserabflüssen erkennen.
Es wird deshalb vorgeschlagen, jeweils alle fünf der hier vorgestellten Methoden anzuwenden. Damit kann einerseits die Bandbreite der Abschätzresultate aufgezeigt werden (Streubereich), andererseits aber auch eine massgebende Hochwasserspitze ermittelt werden, welche als Basis für die Bestimmung des Bemessungswertes dienen kann. Einen ersten Hinweis auf die Streuung der einzelnen Modelle erhält man, indem die verwendeten Parameter variiert werden (oberer und unterer Grenzwert sowie wahrscheinlichster Wert). Sinnvoll ist dieser Schritt aber nur, wenn physikalisch plausible Bandbreiten verwendet werden.
In einem zweiten Schritt werden die Resultate der Modelle untereinander verglichen. Folgende Vorgehensweise hat sich dabei bewährt:

– Das *Verfahren nach Müller* hat bei den Untersuchungen in den meisten Fällen einen *oberen Grenzwert* vorgegeben. Gleichzeitig liegt das *Verfahren nach Taubmann* systematisch am *unteren Rand* der Bandbreite der Abschätzresultate. Diese beiden Verfahren werden somit als Grenzwertverfahren verwendet.
– Die drei Verfahren *Kölla, modifiziertes Fliesszeitverfahren und Clark-WSL* werden für die Bestimmung der massgebenden Abflussspitze herangezogen.
– Eine massgebende Abflussspitze erhält man, indem von diesen drei Verfahren die beiden mit den höheren Resultaten gemittelt werden.
– Liegt das Resultat eines dieser drei Verfahren (Kölla, modifiziertes Fliesszeitverfahren und Clark-WSL) ausserhalb des durch die Grenzwertverfahren vorgegebenen Streubereiches, so wird es für die Bestimmung der massgebenden Abflussspitze nicht verwendet. Tritt dieser Fall ein, so weist dies auf ein bezüglich der Hochwasserabschätzung besonders heikles Gebiet hin.

Die Resultate dieses Abschätzvorschlages können im Allgemeinen als relativ zuverlässig bezeichnet werden. Bei sehr abflussfreudigen Gebieten zeigt sich allerdings eine Tendenz zur Unterschätzung der statistisch extrapolierten Hochwasserabflüsse.

Die folgenden Beispiele zeigen exemplarisch die Vorgehensweise bei der Ermittlung der massgebenden Abflussspitze. Die grauen Säulen sind die Resultate der einzelnen Verfahren, dabei wird der obere Grenzwert durch das Verfahren nach Müller, der untere Grenzwert durch das Verfahren nach Taubmann gegeben. Die Verfahren Kölla, Clark-WSL und das mod. Fliesszeitverfahren sind neutral als Verfahren 1, 2 und 3 gekennzeichnet, der Wert der massgebenden Abflussspitze wird im Diagramm als rote Linie dargestellt.

Normalerweise wird man bei der Hochwasserabschätzung mit einer Situation, wie sie in Figur 5-25 dargestellt ist, konfrontiert.

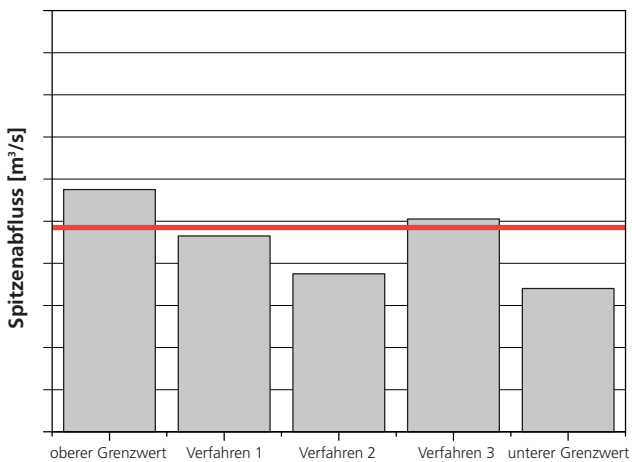


Fig. 5-25: Normalfall, die Verfahren 1–3 liegen zwischen dem oberen und dem unteren Grenzwert.

Die massgebende Abflussspitze wird in diesem Fall aus der Mittelung der beiden höheren Abschätzresultate – in diesem Fall der Verfahren 1 und 3 – gewonnen.

Alle von diesem Normalfall abweichenden Konstellationen weisen auf Gebiete hin, welche bezüglich der Hochwasserabschätzung heikel sind. Bei massiven Über- bzw. Unterschreitungen sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.

Ein empfohlenes Vorgehen für leichte Abweichungen wird anhand der nächsten drei Beispiele illustriert. Aussagen bezüglich Überschreitungen des oberen Grenzwertes gelten sinngemäss auch für Unterschreitungen des unteren Grenzwertes.

In der Figur 5-26 liegt ein Verfahren leicht höher als das obere Grenzwertverfahren nach Müller. Aufgrund der nur geringfügigen Überschreitung wird das Verfahren 1 dennoch berücksichtigt und der massgebende Abfluss wird durch die Mittelung der Verfahren 1 und 3 bestimmt.

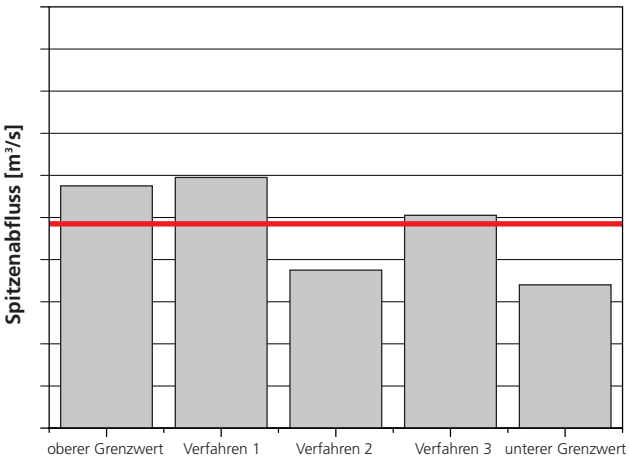


Fig. 5-26: Ein Verfahren überschreitet den oberen Grenzwert leicht.

Die Figur 5-27 zeigt eine Situation, bei der ein Verfahren den oberen Grenzwert massiv überschreitet. Die massgebende Hochwasserspitze wird durch Mittelung der Verfahren 2 und 3 bestimmt.

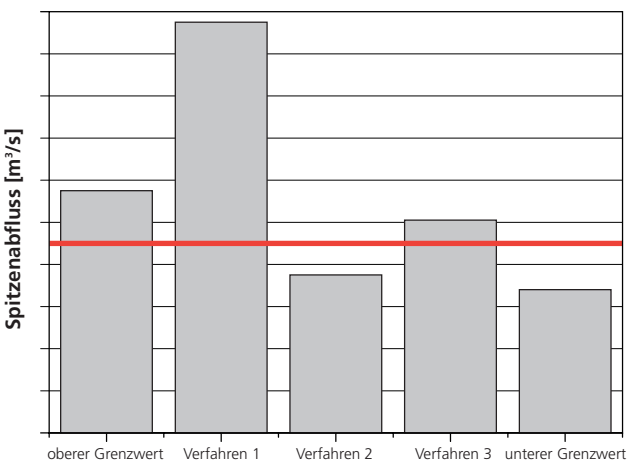


Fig. 5-27: Ein Verfahren überschreitet den oberen Grenzwert massiv.

Im vierten Beispiel (Fig. 5-28) überschreiten zwei Verfahren den oberen Grenzwert leicht. Je nach Resultat des dritten Verfahrens bestätigt sich die Tendenz einer Überschreitung des oberen Grenzwertes. Die massgebende Hochwasserspitze wird gutachtlich im Bereich des oberen Grenzwertes festgelegt.

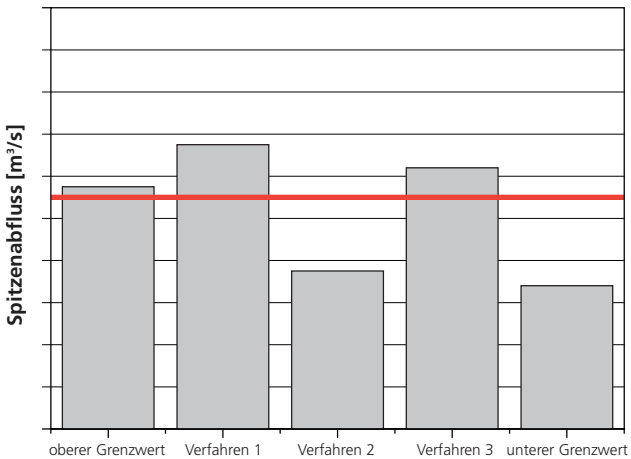


Fig. 5-28: Zwei Verfahren überschreiten den oberen Grenzwert.

Systematisch wurden die Verfahren in voralpinen Einzugsgebieten getestet, wobei bezüglich der Geologie Molasse und Flysch dominierten. Die hier getroffenen Aussagen gelten daher primär auch für diese Regionen. Einzelne der Verfahren wurden auch in kleinen Einzugsgebieten im Mittelland und im Aargauer bzw. Baselbieter Jura getestet (mod. Fliesszeitverfahren, Clark-WSL), wobei keine Probleme bei der Anwendung auftraten. Dennoch muss einschränkend erwähnt werden, dass die Gebietsbeurteilung bei verkarstetem und hochdurchlässigem Boden durch die Untersuchungen nicht abgedeckt wurde. Gleiches gilt auch für hochalpine Gebiete, wo Gletscher, Schuttflächen und Fels dominieren. Bei der Bestimmung der Parameter und beim Einsatz der Verfahren in solchen Gebieten ist daher Vorsicht geboten.

5.2.4 Anwendungsbeispiel: Vogelbach (1,55 km²)

Für den Vogelbach im Kanton Schwyz soll ein Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren abgeschätzt werden.

a) Bereitstellen der Grundlagen

Beim Alptal handelt es sich um ein Forschungsgebiet der WSL, es ist dementsprechend gut dokumentiert. Um den Praxisbezug des Anwendungsbeispiels Vogelbach zu erhöhen, wird jedoch davon ausgegangen, dass für dieses Einzugsgebiet hauptsächlich Standardunterlagen vorhanden sind und die Hypothese nur grob formuliert werden kann. Für das Ausführen einiger Punkte wird auf eine Gebietsbeschreibung von BURCH in SGHL (1994) zurückgegriffen, welche allerdings generell auf das Alptal eingeht. Als Grundlage für das Erstellen der Hypothese dienen somit folgende Kartenwerke:

– Pixelkarte 1:25'000 (PK25)
– Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz (digital)
– Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz

Beim digitalen Höhenmodell konnte auf ein Raster von 5 m zurückgegriffen werden.

b) Aufstellen der Hypothese für die Gebietsbeurteilung

Informationen aus der Pixelkarte 1:25'000 (PK25)
Das Einzugsgebiet des Vogelbaches liegt auf der orographisch linken Talseite des Alptals im Kanton Schwyz. Das Gebiet ist voralpin geprägt und hat eine Höhendifferenz von 485 m, der Gebietsausfluss bei der Messstation liegt auf 1060 m ü. M., der höchste Punkt auf der Krete liegt bei Kote 1545 (siehe Fig. 5-29). Die Höhenkurven scharen sich im unteren Teil des Einzugsgebietes deutlich enger als im oberen Teil, das Einzugsgebiet wird gegen oben also flacher.
63% des Einzugsgebietes sind bewaldet, Freiflächen finden sich in Kretennähe (Chli Tändli, Usser Chessiloch) sowie auf der orographisch linken Talflanke des Vogelbachs. Auffallend ist vor allem im oberen Teil des Einzugsgebietes die hohe Gerinnenetzdichte, was auf abflussfreudige Flächen hinweist.

Informationen aus der Vereinfachten Geotechnischen Karte der Schweiz
In der vereinfachten geotechnischen Karte wird im Gebiet des Vogelbaches nur die Klasse 17 ausgewiesen, es handelt sich dabei um «Mergelschiefer bis Kalkphyllite, mit Einlagerungen von Sandsteinen, z.T. überwiegend».
BURCH (in SGHL 1994) präzisiert die geologischen Gegebenheiten, demnach dominieren Formationen des alttertiären Wäggitaler Flyschs. Für diesen ist eine unregelmässige Schichtung von mächtigen Mergel- und Tonschiefern bzw. Kalk- und Kalksandsteinen charakteristisch. Bei diesem Muttergestein muss mit stark tonhaltigem Boden (Gley) gerechnet werden.

Informationen aus der Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz
Auf der digitalen Bodeneignungskarte sind für den Vogelbach zwei Kartierungseinheiten, S6 und S7 ausgeschieden (siehe Fig. 5-30).
Im unteren Teil des Einzugsgebietes wird die Einheit S7 angegeben. Diese tritt in steilen Nordhängen mit einer Neigung > 35% auf. Am wahrscheinlichsten sind hier Gleysol eutric und Cambisol eutric zu finden. Die Bodeneigenschaften sind etwas günstiger als bei der Einheit S6: Es handelt sich um einen flachgründigen, skelettreichen Boden mit einem geringen Wasserspeichervermögen, einer gehemmten Wasserdurchlässigkeit und grundfeuchten Bedingungen.
Im oberen Teil des Einzugsgebietes wird die Einheit S6 ausgewiesen. Als landschaftliche Formelemente werden tiefergelegene Nordhänge unter 1'500 m mit einer Hangneigung von <35% ausgewiesen. Unter Berücksichtigung der Geologie kommen von den aufgeführten Bodentypen Gleysol humic, Gleysol mollic und eventuell Cambisol gleyic in Frage. Als Eigenschaften werden eine flache Gründigkeit, ein kleiner Skelettanteil, ein mässiges Wasserspeichervermögen, eine stark gehemmte Wasserdurchlässigkeit sowie grundnasse Verhältnisse angegeben. Diese Charakterisierung stimmt mit dem auf der Landeskarte ausgewiesenen dichten Gerinnenetz überein.

BURCH (in SGHL 1994) bestätigt dies im Wesentlichen: tonreiche, gehemmt durchlässige, z.T saure Hanggleyböden machen den überwiegenden Flächenanteil aus. Je nach Vernässungsgrad des Oberbodens variiert die Humusform von Rohhumus bis Anmoor. Die Gründigkeit des Bodens wird mit 30–40 cm angegeben, was sich an den Wurzeltellern von geworfenen Bäumen beobachten lässt. Bezüglich des Vogelbachs wird speziell erwähnt, dass hier auch schwere tonreiche Braunerden (→ Cambisol), welche z.T. tiefgründig und gut durchlässig sind, vorkommen.

Unter Berücksichtigung dieser Informationen und nach Anwendung des Beurteilungsschemas von Rickli und Forster (siehe Fig. 5-23) wird aufgrund folgender Kriterien eine Hypothese aufgestellt:

– Es wird zwischen Wald und Freiland unterschieden.
– Die Unterteilung in einen oberen, flacheren und einen unteren, steileren Teil des Einzugsgebietes drängt sich auf. Die genaue Grenze ist im Feld zu ermitteln.
– Der Hinweis auf das Vorkommen von Braunerden (BURCH, in SGHL 1994) muss im Feld überprüft werden.
– In welchem Perimeter um das Gerinne Vernässung auftritt, ist im Feld zu entscheiden.

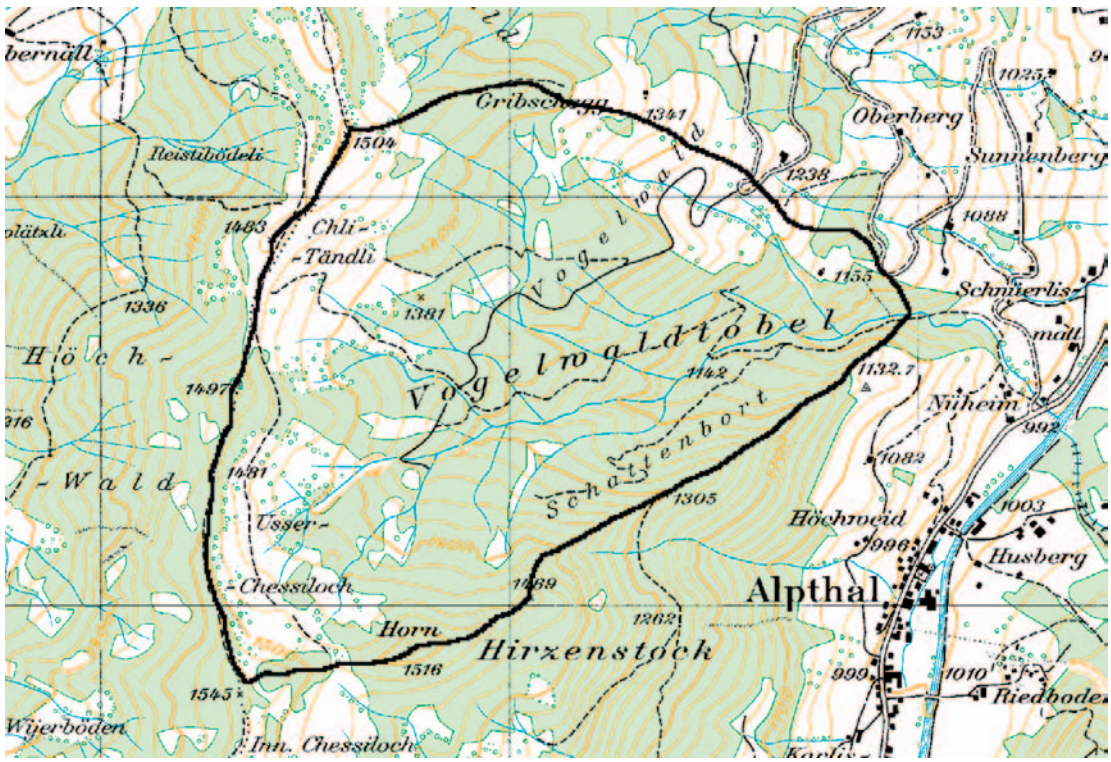


Fig. 5-29: Übersichtskarte über das Einzugsgebiet des Vogelbachs.

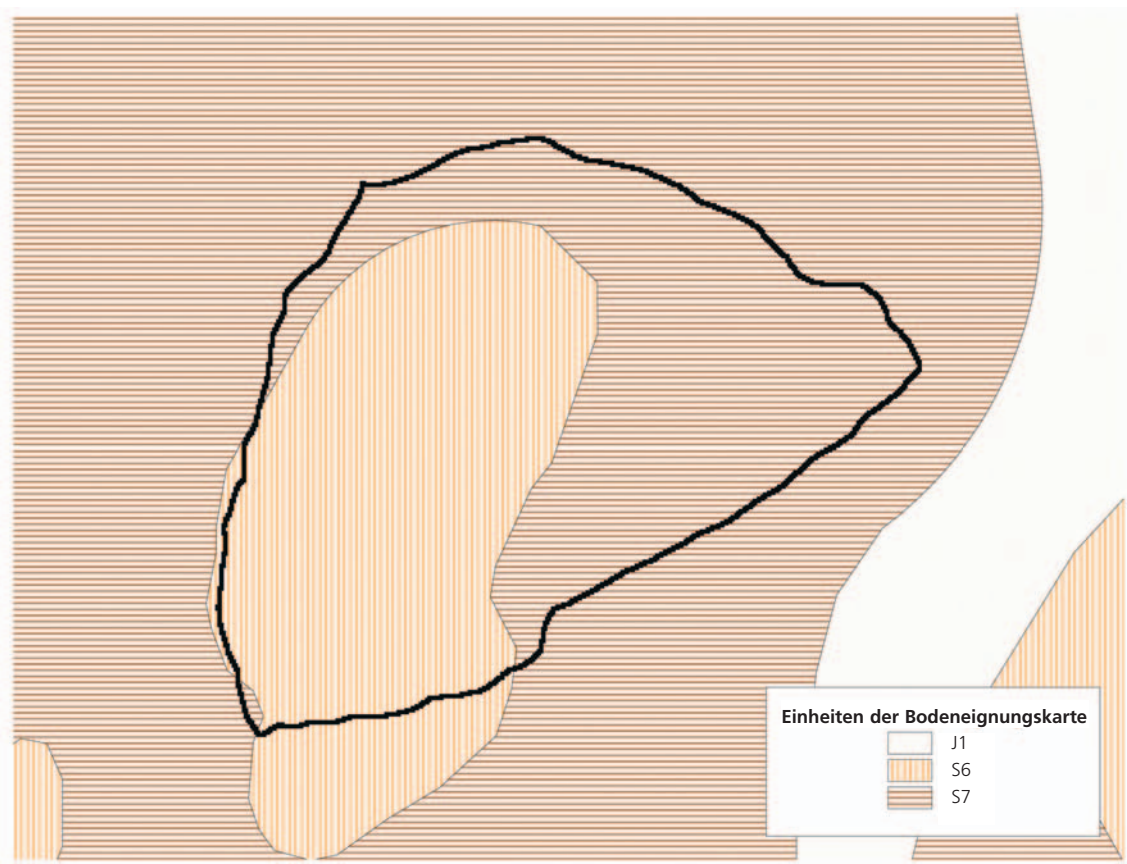


Fig. 5-30: Ausschnitt aus der digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz.

Für die Feldbegehung wird mit folgender Karte gearbeitet:

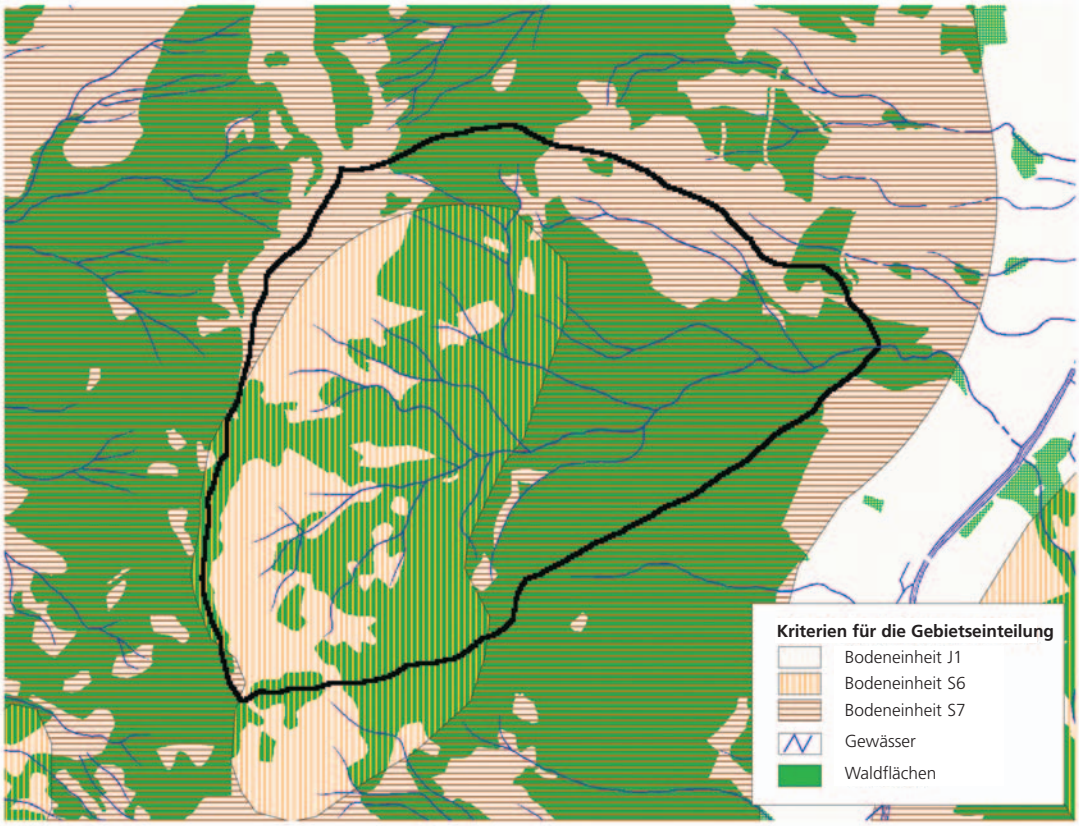


Fig. 5-31: Karte mit einer provisorischen Gebietseinteilung.

c) Feldbegehung

Bei der Feldbegehung wird die Hypothese verifiziert. Mit dem Einsatz des Pürckhauer-Stockes kann der grobe Aufbau des Bodens über eine grössere Fläche rasch überprüft werden. Über den Eindringwiderstand sind auch in beschränktem Mass Informationen über das Vorhandensein von groben Komponenten ableitbar. Pro Teilgebiet werden in jedem Fall einige Bodenprofile gegraben und mit dem Bewertungsschema nach RICKLI & FORSTER (1997) angesprochen. Auszunützen sind auch natürliche Aufschlüsse wie Rutschungen oder entwurzelte Bäume.



Fig. 5-32: Bodenprofil im Vogelwald.

Häufig sind die Grenzen der hydrologischen Teilgebiete über natürliche Änderungen in der Geomorphologie und der Vegetation auszumachen (Grenze Wald/Freiland, Gerinne etc.). Im Fall des Vogelbaches zeigt sich, dass die Hypothese im Grossen und Ganzen bestätigt werden konnte. Die Freiflächen waren durchgehend vernässt, Spuren von Beweidung oder anderer landwirtschaftlicher Nutzung wurden nur vereinzelt festgestellt und die Humushorizonte waren flachgründig. In den bewaldeten Flächen waren erstaunlicherweise nur geringe Flächenanteile vernässt, sodass die Infiltrationsbedingungen grösstenteils als gut bezeichnet werden können. An der oberen Grenze zum Freiland und auf der orographisch rechten, nordexponierten Talseite dominieren flachgründige Böden, was bezüglich der Wasser-Aufnahmefähigkeit des Bodens zur Beurteilung «mässig» führte. In den tieferen

Regionen und den südexponierten Waldflächen ist die oberste Schicht des Bodens mächtiger und somit wird hier die Wasser-Aufnahmefähigkeit mit «gut» beurteilt.
Im Bereich der Messstation Vogelbach wird zudem das Gerinne beurteilt: Der massgebende Querschnitt, die Korngrösse d_{90} und das Gefälle im Bereich des Querschnittes werden bestimmt.

d) Anwendung der Methoden

Die Gebietseinteilung wird mit einem GIS aufgrund der Felddaten erstellt.

Für die verschiedenen Abschätzmethoden werden nun die notwendigen Parameter ermittelt. Dabei wird das Parameterset für die plausibelste Variante angegeben, andererseits wird auch die Bandbreite der Resultate bei einer Variation der einzelnen Parameter aufgezeigt.

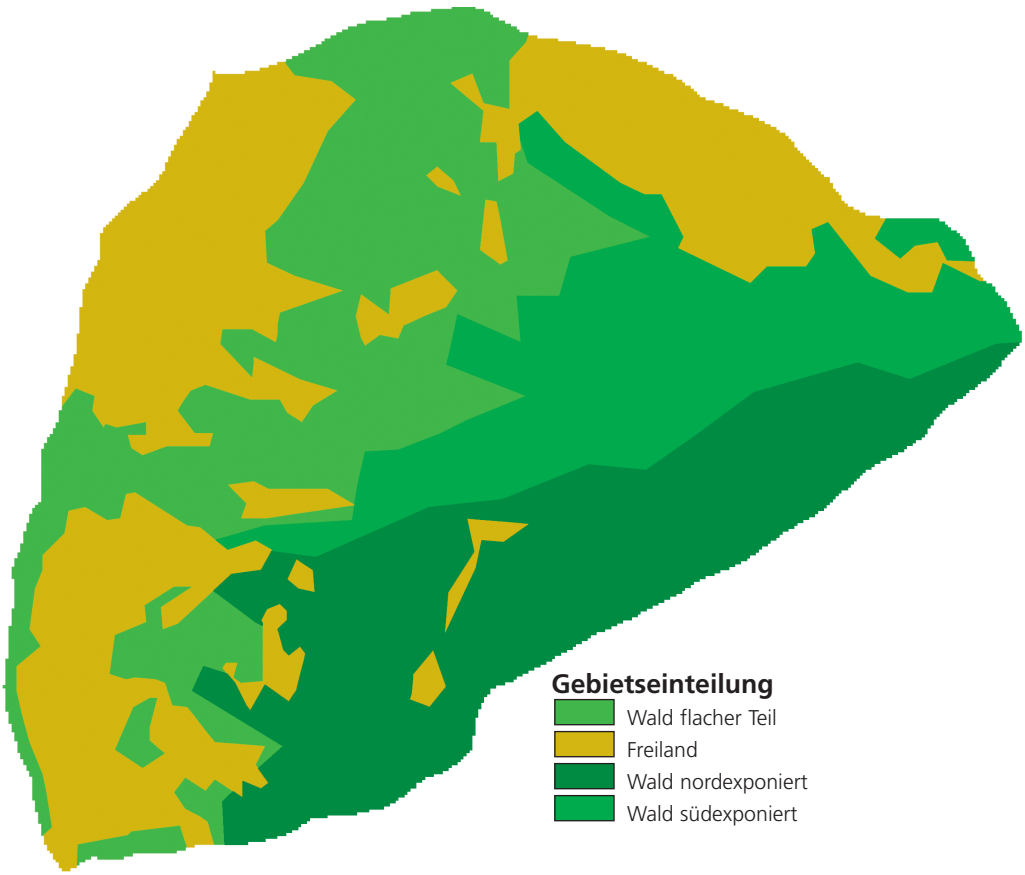


Fig. 5-33: Gebietseinteilung nach der Feldbegehung.

Niederschlagsbestimmung

In einem ersten Schritt werden die Niederschlagshöhen aus dem Hydrologischen Atlas mit den Daten einer Niederschlagswippe im Gebiet verglichen:

Gemäss den Angaben im HADES wird für die Kartenwerte die zweite Extremalverteilung verwendet, für die ausgewerteten Stationsdaten passt hingegen die erste Extremalverteilung besser. Die ermittelten Nieder-

N-Dauer	Jährlichkeit	HADES Karte 2.4	HADES Karte 2.4[2]	aktuelle Stationsauswertung
1 Stunde	2,33 Jahre	25 mm	23 mm	28 mm
1 Stunde	100 Jahre	83 mm	70 mm	69 mm
24 Stunden	2,33 Jahre	72 mm	68 mm	82 mm
24 Stunden	100 Jahre	173 mm	163 mm	156 mm

schlagsintensitäten sind vergleichsweise hoch, sie liegen jedoch nicht im Bereich der in der Schweiz gemessenen Rekordwerte (vergleiche Kap. 5.2.2, Abschnitt a, Fig. 5-24).
Die räumliche Interpolation der Starkniederschlagskarten im HADES basiert in der Region Alptal/Vogelbach auf Stützstellen mit sehr kurzen Messreihen. Die Angaben sind dementsprechend unsicher. Deshalb wird die 30jährige hochauflösende Niederschlagsmessreihe gegenüber den Kartenwerten bevorzugt.

Müller modifiziert
Die Fläche des Einzugsgebietes wird mittels GIS bestimmt, sie beträgt 1,55 km². Die Anwendung des Schemas von Rickli und Forster (Kap. 5.2.1, Abschnitt b, Fig. 5-23) auf die ausgeschiedenen Teilflächen (Fig. 5-33) ergibt einen mittleren Spitzenabflusskoeffizienten ψ von 0,23.

Unter Verwendung dieses Parametersets erhält man ein «grösstes zu erwartendes Hochwasser» von 13,2 m³/s.

Wird der Abflusskoeffizient innerhalb der physikalisch plausiblen Grenzen variiert, so ergibt sich eine Bandbreite der Abflüsse von 11,5–17,3 m³/s.

Taubmann/Thiess/Chow
Die Gebietsbeurteilung erfolgt nach einer Tabelle der Landnutzung aus der Originalpublikation (TAUBMANN & THIESS 1984), welche für die oben eingeführten Teilgebiete einen mittleren komplexen Abflusskoeffizienten α von 68,5 ergibt. Aus der topographischen Karte 1:25'000 wird die Länge des Hauptgerinnes (1850 m) bestimmt, die Höhendifferenz beträgt auf dieser Strecke 400 m. Mit diesen Werten kann die Verzögerungszeit t_v (hier 0,25 h) berechnet werden. Für das Verfahren nach Taubmann muss auch die mittlere Fliesstiefe für das MQ angegeben werden, sie wird auf 0,1 m geschätzt. Mit dem Gefälle des Hauptgerinnes von 0,216 m/m können die Konzentrationsgeschwindigkeit (2,33 m/s), die Konzentrationszeit (0,222 h) sowie die Niederschlagsintensität (211 mm/h) berechnet werden. Dieser Wert wird der Intensität von Urbana (168 mm/h) gegenüber gestellt, und man erhält einen Klimafaktor Y von 3,19. Der Scheitelreduktionsfaktor wird für jeden Zeitschritt separat bestimmt, er ist abhängig von der aktuellen Zeit t, der Fläche (1,55 km²) und der Verzögerungszeit t_v (0,25 h).

Das HQ_{100} nach Taubmann beträgt mit diesen Parametern 7,7 m³/s.

Das Verfahren reagiert vor allem auf die Variation des komplexen Abflusskoeffizienten recht stark, er ist daher besonders vorsichtig zu bestimmen. Die morphologischen Parameter haben auf die Konzentrationszeit und die Niederschlagsintensität einen Einfluss. Die Abflüsse bewegen sich zwischen 5,5 und 11,2 m³/s

Modifiziertes Fliesszeitverfahren
Die Fläche und der Abflusskoeffizient werden vom Abschätzverfahren nach Müller übernommen. Das Benetzungsvolumen nach Kölla wird auf 30 mm geschätzt, und die von den Niederschlagswerten abhängige Benetzungsdauer beträgt 0,24 h. Die Länge des Hauptgerinnes (1850 m) ist bekannt (Taubmann), die gesamte vertikale Erstreckung des Einzugsgebietes beträgt 500 m und die Distanz vom Gerinne-Ende bis zur Einzugsgebietsgrenze beträgt ca. 250 m. Aus diesen Angaben ergibt sich eine Fliesszeit von 0,21 h und eine Konzentrationszeit von 0,45 h (Benetzungsdauer + Fliesszeit). Für diese Dauer beträgt die 100-jährliche Niederschlagsintensität 126 mm/h.

Mit diesen Werten wird ein HQ_{100} von 12,0 m³/s berechnet.

Sensitiv sind vor allem die morphologischen Parameter: Sie beeinflussen die Konzentrationszeit und somit die Niederschlagsintensität massgeblich. Auch der Abflusskoeffizient und das Benetzungsvolumen werden variiert. Je nach Parameterkombination schwankt das HQ_{100} zwischen 8,9 und 18,4 m³/s.

Kölla
Im Gebiet sind weder vergletscherte noch nennenswerte befestigte Flächen vorhanden. Die kumulative Gerinnelänge beträgt ungefähr 10 km, daraus ergibt sich eine effektiv beitragende Fläche von 1,41 km², welche für das HQ_{100} auf 1,69 km² korrigiert wird. Die Fliesszeit beträgt 1,11 h. Bereits für das modifizierte Fliesszeitverfahren wurde ein Benetzungsvolumen von 30 mm ermittelt, die Anpassung auf ein 100jährliches Ereignis ergibt 39 mm. Aus dieser Zahl ergibt sich ein Verlust von 3,9 mm und eine Benetzungsdauer von 0,98 h. Die Konzentrationszeit beträgt 2,09 h (Fliesszeit + Benetzungszeit) und die zugehörige Niederschlagsintensität berechnet sich zu 39,8 mm/h. Da die Gebietsfläche kleiner als 10 km² und die Regendauer kürzer als 3 h ist, fliesst ein Faktor von 1,085 für die Ganglinienkorrektur in die Berechnung ein.

Das HQ_{100} beträgt mit diesem Parameterset 18,3 m³/s.

Beim Verfahren nach Kölla werden das Gerinnenetz und das Benetzungsvolumen variiert. Es ergibt sich eine Bandbreite der Hochwasserabflüsse von 14,1 bis 28,1 m³/s.

Clark-WSL
Durch die Auswertung des digitalen Höhenmodells wurde eine globale Einzugsgebietsneigung von 22% ermittelt, die dominierende Bodenbedeckung ist «Wald mit Streuauflage». Die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses beträgt somit 0,4 m/s. Für Bestimmung der Gerinneabflussgeschwindigkeit (1,4 m/s) wird das Gefälle beim Gebietsausfluss (14%), der Korngrössendurchmesser d_{90} (0,35 m) und ein geschätzter Abflusswert (ca. 10 m³/s) benötigt. In ARC/INFO kann mit diesen Angaben ein Zeitflächen-Diagramm abgeleitet werden, dabei ergeben sich für 10-Minuten-Schritte 4 Zeitzonen. Für diese Konzentrationszeit beträgt die massgebende Niederschlagsintensität 93 mm/h. Die Teilgebiete werden auch hier mit dem Schema von Rickli und Forster beurteilt, diesmal ist jedoch nicht der Spitzenabflusskoeffizient, sondern das Wasserspeichervermögen der Zielwert. Gemittelt beträgt dieser 27,1 mm, korrigiert auf die Konzentrationszeit von 40 Minuten beträgt er 22,6 mm. Die über das Wasserspeichervermögen parametrisierte Speicherkonstante beträgt 42,4 Minuten.

Durch das Verfahren Clark-WSL wird mit diesen Parametern ein HQ_{100} von 15,8 m³/s abgeschätzt.

Auf eine Variation der Parameter für das Zeit-Flächen-Diagramm reagiert Clark-WSL relativ robust. Der einzige frei wählbare Parameter, der somit variiert wird, ist das Wasserspeichervermögen. Clark-WSL bewegt sich für ein HQ_{100} zwischen 12,8 und 17,0 m³/s.

Das Set der plausibelsten Resultate ist in der folgenden Graphik dargestellt:

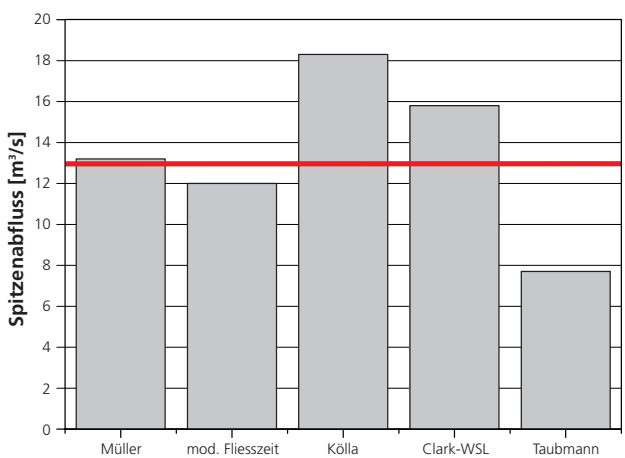


Fig. 5-34: Resultate der Hochwasserabschätzung für den Vogelbach. Die Verfahren nach Müller und Taubmann geben einen unteren bzw. oberen Grenzwert. Unter Einbezug der Gerinnebeurteilung wird ein HQ_{100} von 13 m³/s vorgeschlagen.

Sowohl das Verfahren nach Kölla als auch das Verfahren nach Clark überschreiten den oberen Grenzwert (13,2 m³/s), welcher mit dem Verfahren nach Müller bestimmt wurde. Da auch das modifizierte Fliesszeitverfahren im Bereich des oberen Randes liegt, wird als Vorschlag für das HQ_{100} ein Wert von 13 m³/s gewählt.

e) Interpretation und Validierung der Resultate

Die Tatsache, dass zwei Verfahren den oberen Grenzwert überschreiten, weist darauf hin, dass die Hochwasserabschätzung im Vogelbach heikel ist. Beim Vogelbach handelt es sich um ein Gebiet mit einer Abflussmessstation. Die Extremwertstatistik für die 30-jährige Messperiode ergibt ein 100jährliches Hochwasser von rund 7 m³/s.
Bei der Feldbegehung wurde ein durchflossener Querschnitt von ungefähr 5 m² ermittelt, und die Fliessgeschwindigkeit bei Hochwasser wurde auf ca. 2 m/s geschätzt. Dies ergibt eine Gerinnekapazität von ca. 10 m³/s. Die Extremwertstatistik weist relativ tiefe Werte aus; es scheint wahrscheinlich, dass in der 30jährigen Messperiode noch keine sehr hohen Ereignisse aufgetreten sind
Die Resultate der Hochwasserabschätzung sind gegenüber der Gerinnebeurteilung eher hoch, der Umstand, dass zwei Verfahren den oberen Grenzwert überschreiten, lässt auf eine leichte Tendenz zur Überschätzung des Hochwasserpotentials schliessen.
Unter Berücksichtigung der Gerinnekapazität wird das HQ_{100} somit auf 11,5 m³/s mit einem Streubereich von 10–18 m³/s geschätzt. Als unterer Rand des Streubereiches wird die im Gelände abgeschätzte Gerinnekapazität eingesetzt.

5.3 Massstabsübergreifende Methoden (1–500 km²)

5.3.1 Übersicht

Jede Methode zur Abschätzung von Hochwassern besitzt ihren Gültigkeitsbereich und ist im Prinzip nur für Einzugsgebiete gültig, die den zur Modellerstellung beigezogenen Einzugsgebieten im hydrologischen Sinne ähnlich sind (vergleichbare physiographische Kenngrössen und ähnlicher hydro-klimatischer Kontext). Dieser Gültigkeitsbereich ist häufig durch die Grösse der Einzugsgebiete limitiert. Der im vorliegenden Kapital vorgestellte Ansatz ist ein Beispiel eines massstabsübergreifenden Ansatzes: Die Methode HYDREG liefert einen Ansatz zur Abschätzung von Hochwassern und ist anwendbar auf Westschweizer

Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen, die eine Grösse zwischen 1 und 500 km² haben. Sie wurde am Labor «Hydrologie et Aménagement (HYDRAM)» der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) im Rahmen des Projektes GESREAU (GEStion des Ressource en Eau) entwickelt. Auftraggeber war der Service des Eaux, Sols et Assainissement des Kantons Waadt (SESA).

Die Nutzen der Methode sind vielseitig:
- Die Methode HYDREG wurde ins System GEStion des Ressources en EAU (GESREAU), das vom HYDRAM und SESA gemeinsam erarbeitet wurde (CRAUSAZ & MUSY 1997), integriert. Dieses gut dokumentierte Geographische Informationssystem (GIS) enthält alle notwendigen physiographischen und hydrologischen Kenngrössen (Charakteristiken der Einzugsgebiete, IDF-Kurven), um die Methode HYDREG auf alle Einzugsgebiete des Kantons Waadt anwenden zu können.
- Die Methode erlaubt es, Hochwasserspitzen verschiedener Wiederkehrperioden (2,10…100 Jahre) für alle im oben genannten GIS vorhandenen Einzugsgebiete (mit oder ohne Messungen) abzuschätzen. Zusätzlich liefert diese Methode einen Hinweis-Bereich, anhand dessen die Schätzung des Hochwasserquantils mit Hochwasserspitzen anderer Einzugsgebiete verglichen werden kann. Dieses Intervall wurde unter Miteinbezug aller in der Region vorhandenen hydrologischen Kenngrössen berechnet.
- Die Methode HYDREG ist multiskalar. Sie verwendet zwei miteinander kombinierte Abschätzungsmodelle, deren Leistungsfähigkeit je nach der Grösse der Einzugsgebiete variiert. Das erste Modell (HYDRAT) ist eine Ableitung des Fliesszeitsverfahrens, dessen Leistungsfähigkeit zur Abschätzung von Hochwassern für kleine Einzugsgebiete (weniger als 10 km²) erwiesen ist. Für das zweite Modell (HYDRIF) wurde ein sogenannter «Index-flood»-Ansatz gewählt, der sich – wie sich im Verlauf der Analysen gezeigt hat – für Gebiete mit einer Fläche von über 30 km² eignet. Das kombinierte Modell stellt das Hauptinteresse und die Originalität dieser Methodik dar, da es plausible Resultate für Gebietsgrössen zwischen 0,5 und 500 km² ergibt. Die Kombination wird durch die Charakteristiken des Einzugsgebietes (Fläche, Bodenbedeckung) wie auch durch die relative Leistungsfähigkeit der beiden oben genannten Modelle beeinflusst.

In den drei folgenden Unterkapiteln werden nacheinander das Modell HYDRAT, das Modell HYDRIF und die kombinierte Methode HYDREG vorgestellt.

5.3.2 Modell HYDRAT

a) Beschreibung

Das Modell zur Bestimmung der maximalen Abflussmengen HYDRAT ist eine Anpassung des Fliesszeitverfahrens an die Gegebenheiten der Westschweiz. Dieses Modell wurde am Labor HYDRAM der EPFL entwickelt. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in NIGGLI et al. (2001).
Der jährliche Hochwasserabfluss HQ_x [m³/s] für eine Wiederkehrperiode *x* kann durch die folgende Gleichung dargestellt werden:

$$HQ_x = u \cdot C_r \cdot \beta_R^{\varepsilon_{2(x)}} \cdot p^{-0,5 \cdot \varepsilon_{2(x)}} \cdot \varepsilon_{1\,(x)} \cdot A^{1+0,5 \cdot \varepsilon_{2(x)}}$$

wobei *A* die Fläche des Einzugsgebietes [km²] und *p* sein durchschnittliches Gefälle [m/m] ist. $\varepsilon_1(x)$ und $\varepsilon_2(x)$ repräsentieren die Parameter der IDF-Kurve (Intensität-Dauer-Frequenz) für das entsprechende Einzugsgebiet. Für die Anwendungsregionen dieses Modells wird angenommen, dass die IDF Kurven dem Gesetz von MONTANA folgen:

$$i(x,d) = \varepsilon_{1(x)} \cdot d^{\varepsilon_{2(x)}}$$

Das heisst, dass sich die Logarithmen der Intensität *i* [mm/h] und der Regendauer *d* [min] einer bestimmten Wiederkehrperiode *x* linear zueinander verhalten (siehe Fig. 5-35). Im Faktor β_R werden alle übrigen Faktoren (messbar oder nicht), die an der hydrologischen Reaktion des Einzugsgebietes teilhaben, zusammengefasst. Die Variabilität von β_R erklärt sich vor allem durch die Zugehörigkeit des Einzugsgebietes zu einer der drei folgenden Regionen der Westschweiz: Jura, Mittelland oder Voralpen. Tabelle 5-8 gibt β_R-Werte für diese drei Regionen an. Zur Bestimmung des Abfluss-Koeffizienten C_r wurde die Schweizer Norm SNV verwendet. Diese Norm gibt den Wert des Abflusskoeffizienten in Abhängigkeit von der Bodennutzung an. In Anbetracht der Einheiten der oben erwähnten Formel hat die Konstante *u* einen Wert von 0,28.

Region	Wert von β_R
Voralpen	20
Mittelland	30
Jura	75

Tab. 5-8: Optimale β_R-Werte für die drei Regionen der Westschweiz (unabhängig von der Wiederkehrperiode).

Bei der Zuordnung der Einzugsgebiete zu einer der drei Regionen wurde sowohl die geologische Karte (ATLAS DER SCHWEIZ 1965–1978) als auch die Höhenlage berücksichtigt. Die Einzugsgebiete der Region *Jura* befinden sich in unserem Fall gemäss der geologischen Karte vorwiegend im Falten- oder Tafeljura. In den Einzugsgebieten des *Mittellandes* herrschen Molasse- und Gletscher- oder Fluss-Ablagerungs-Formationen vor. Die mittlere Höhe dieser Einzugsgebiete liegt unter 850 m ü. M. Zu den Einzugsgebieten der *Voralpen* gehören vor allem Gebiete mit «voralpinen» Ablagerungen (im geologischen Sinn), aber auch Gebiete mit Molasse-Formationen. Die mittlere Höhe der Gebiete der Voralpen liegt über 850 m ü. M. Diese Grenze von 850 m ü. M. entspricht ungefähr der Höhe, über der die alljährlichen sommerlichen Hochwasser häufiger sind als die winterlichen. Die mittlere Höhe ist ein Faktor, in dem sowohl die physiographischen Kenngrössen (Gefälle) wie auch die klimatischen Charakteristiken (Niederschlagsmenge, Temperatur) vereint sind.

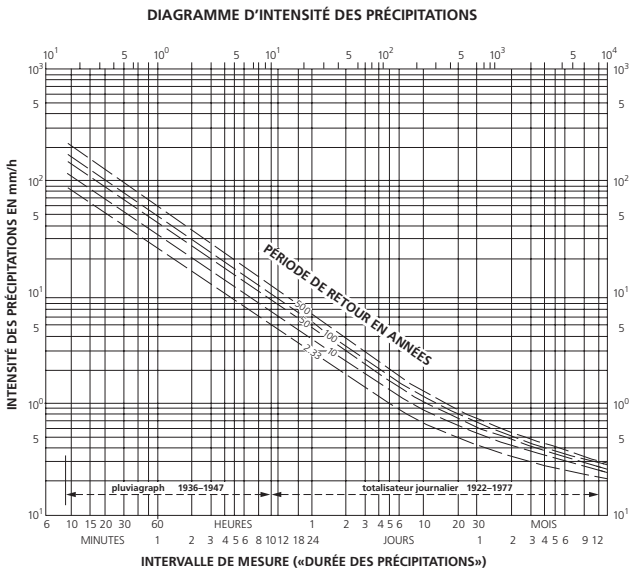


Fig. 5-35: Beispiel einer IDF-Kurve (Starkniederschläge in der Schweiz, RÖTHLISBERGER et al. 1979–1981–1992). Der lineare Teil der Intensität in Abhängigkeit von der Dauer des Niederschlages kann durch das Gesetz von MONTANA ausgedrückt werden. Die Parameter $\varepsilon_1(x)$ und $\varepsilon_2(x)$ können aus dieser Geraden abgeleitet werden.

b) Gültigkeitsbereich

Wiederkehrperiode

Das Modell HYDRAT kann im Prinzip für jede Wiederkehrperiode angewendet werden. Wegen fehlender Daten ist es allerdings schwierig, die Gültigkeit des Modells für Wiederkehrperioden von 100 und mehr Jahren zu überprüfen.

Einzugsgebietsgrösse

Das Modell ist im Prinzip auf kleine Einzugsgebiete anwendbar. Die obere Grenze beträgt 30 km^2. Für Gebiete mit Flächen über 10 km^2 ist eine Kombination von HYDRAT mit anderen Modellen, welche besser für grössere Einzugsgebiete geeignet sind, zu empfehlen (siehe Absatz 5.3.4). Sehr kleine Einzugsgebiete (im km^2-Bereich) sollten ebenfalls mit Vorsicht behandelt werden, da solche Einzugsgebiete meistens ein besonderes Verhalten aufweisen.

Geografische Lage

Das Anwendungsgebiet dieses Modells ist die Westschweiz (siehe. Fig. 5-36). Das Untersuchungsgebiet umfasst das Einzugsgebiet der Aare bis zum Zusammenfluss mit der Reuss, das Einzugsgebiet der Rhone wie auch des Doubs auf Schweizer Gebiet und das Einzugsgebiet des Rheins vom Zusammenfluss mit der Aare bis zur Schweizer Grenze. Die Methode ist nicht anwendbar auf Gebiete mit mittleren Höhen über 1500 m ü. M. (in unserem Fall die Berner wie auch die Walliser Alpen; bei diesen Gebieten wird das hydrologische Verhalten stark durch die Schneeschmelzprozesse beeinflusst). Ebenfalls nicht anwendbar ist sie auf Gebiete, die sehr stark vom Menschen verändert worden sind. Zudem müssen die Einflüsse von Karst-Formationen (Region Jura) beachtet werden. Karstgebiete können natürliche Speicher aufweisen, wodurch die wahren Abflüsse mit vereinfachten Schätzmethoden sowohl unter- als auch überschätzt werden können.

Zudem ist zu beachten, dass das Modell auf der Darstellung der IDF-Kurve durch das Gesetz von MONTANA basiert. Auf Grund von Informationen aus JENSEN et al. (1992) und RÖTHLISBERGER et al. (1979–1981–1992) wird gefolgert, dass diese Bedingung für alle Einzugsgebiete der Westschweiz, die eine Grösse zwischen 0,5 und 30 km^2 haben, gilt.



Fig. 5-36: Untersuchungsgebiet und Lage der Einzugsgebiete, die zur Entwicklung des Modells HYDRAT verwendet wurden. Die Zugehörigkeit der Einzugsgebiete zu einer der drei Regionen *Voralpen, Mittelland* und *Jura* ist ebenfalls dargestellt. a) Einzugsgebiet des Buuserbachs in Maisprach; b) Einzugsgebiet der Veveyse in Vevey; c) Einzugsgebiet der Baye de Montreux in Montreux (vgl. Anwendungsbeispiele der Methoden HYDRAT, HYDRIF und HYDREG in den folgenden Abschnitten).

Basisdaten

Ein Teil der benötigten Basisdaten ist beim Bundesamt für Landestopographie erhältlich. Die Höhe und auch das durchschnittliche Gefälle können zum Beispiel mit Hilfe des digitalen Höhenmodells DHM25 errechnet werden. Zudem können zur Bestimmung und Berechnung der Fläche eines Einzugsgebietes Landeskarten verwendet werden.

Daten zur Bodenbedeckung sind wichtig im Zusammenhang mit der Bestimmung des Abfluss-Koeffizienten C_r. Eine mögliche Informationsquelle dazu ist die Datenbank des Bundesamtes für Statistik GEOSTAT. Daten zur Berechnung der Koeffizienten der IDF-Kurven können anhand des Blattes 2.4[2] des hydrologischen Atlasses (JENSEN et al. 1992) oder mit Hilfe der «Starkniederschläge in der Schweiz» (RÖTHLISBERGER et al. 1979–1981–1992) erhalten werden.

Der Geographische Atlas der Schweiz (ATLAS DER SCHWEIZ 1965–1978) gibt Auskunft über die Geologie. Diese Daten erlauben es (in Verbindung mit der Höhe), die Einzugsgebiete in die drei oben genannten Regionen einzuteilen.

Alle diese Basisdaten sind im Grunde bereits im GIS GESREAU enthalten. Die Gesamtheit des Kantons Waadt ist in 1200 hydrologische Einheiten mit einer durchschnittlichen Fläche von 2,5 km^2 unterteilt. Im GIS sind für jede dieser Einheiten die zur Berechnung des Oberflächenabflusses notwendigen physiographischen und hydrologischen Daten vorhanden. Ebenfalls vorhanden sind die notwendigen Daten, um für eine ausgewählte hydrologische Einheit die Abflussmengen im gesamten oberliegenden Einzugsgebiet (einschliesslich der gewählten hydrologischen Einheit) zu berechnen.

Evaluation der Resultate der Modellanwendung für alle untersuchten Einzugsgebiete

Nach den Kriterien von NAEF (1983) kann eine Schätzung als «exakt» oder «genügend» bezeichnet werden, wenn das Verhältnis zwischen der berechneten und der gemessenen Abflussmenge zwischen 0,7 und 1,5 liegt. Anders ausgedrückt heisst das, dass das Berechnungsresultat die gemessene Abflussmenge maximal um einen Faktor 1,5 unter- oder überschätzt. Dieses Kriterium gilt jedoch nur, falls die gemessene Abflussmenge keinen signifikanten Fehler enthält und die Messungen repräsentative Werte darstellen. Diese Bedingungen sind nur erfüllt, wenn die Messreihe genügend lang ist und/oder die Wiederkehrperiode der zu bestimmenden Abflussmenge genügend klein ist. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Daten haben wir die Gleichung auf 42 Einzugsgebiete im Untersuchungsbereich des Modells für Wiederkehrperioden von 5, 20, 50 und 100 Jahren angewendet

(siehe Tabelle 5-9). Das Referenz-Quantil oder auch «gemessene» Quantil für jedes Einzugsgebiet wurde mit Hilfe einer Anpassung des Gesetzes von GUMBEL (vgl. MEYLAN & MUSY 1998) an die gemessene Serie maximaler jährlicher Abflüsse erhalten.

Fläche A [km²]	**A<20**	**A>20**
Anzahl der Einzugsgebiete	21	21
Überbewertung [%]	52	14
Unterbewertung [%]	48	86
«exakte»/«genügende» Wertungen [%]	71	52

Fläche A [km²]	**A>20**	**A<20**
Anzahl der Einzugsgebiete	15	14
Überbewertung [%]	47	29
Unterbewertung [%]	53	71
«exakte»/«genügende» Wertungen [%]	73	43

Tab. 5-9: Über- und Unterschätzung der Referenz-Abflüsse mit HYDRAT in % (obere Tabelle: Wiederkehrperiode 5 Jahre; untere Tabelle: Wiederkehrperiode 100 Jahre) sowie «exakte resp. genügende» Schätzungen in % (nach NAEF 1983).

Die Resultate für eine Wiederkehrperiode von 5 Jahren (obere Tabelle) zeigen, dass die Abschätzung des Referenz-Quantils für die 21 kleinen Einzugsgebiete gut ist (71% der Annäherungen sind «exakt oder «genügend»). Für die 21 grösseren Gebiete verschlechtert sich die Annäherung merklich, und die Formel ergibt 52% «exakte» oder «genügende» Resultate, wobei eine Tendenz zur Unterbewertung (in 86% der Fällen) festzustellen ist. Derselbe Vergleich ergibt ähnliche Resultate für Wiederkehrperioden von 20, 50 und 100 Jahren (jedoch mit einer verminderten Anzahl von in die Bewertung einbezogenen Einzugsgebieten: Für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren wurden zum Beispiel nur 29 Gebiete mit einer Messreihe von mehr als 15 Jahren in der Bewertung berücksichtigt). Es muss jedoch hinzugefügt werden, dass die Bewertung der Modelleistung mit grösser werdender Wiederkehrperiode an Aussagekraft verliert. Dies erklärt sich dadurch, dass auch das Referenz-Quantil auf einem Modell beruht, welches unvollkommen ist, im Speziellen, wenn die beobachteten Serien von kurzer Dauer sind.

Anwendungsbeispiel
Zu Illustrationszwecken wird der 100jährliche Spitzenabfluss (HQ_{100}) des Buuserbachs in Maisprach ermittelt (Lage des Einzugsgebiets siehe Fig. 5-36). Das Einzugsgebiet befindet sich in der Region Jura.

β_R: β_R = 75 (siehe Tabelle 5-8)
Fläche des Einzugsgebietes: A = 11,5 km²
Parameter $\varepsilon_1(100)$: $\varepsilon_1(100)$ = 630 (Messstation von Wintersingen)
Parameter ε_2: ε_2 = -0,70 (Messstation von Wintersingen)
Abfluss-Koeffizient: C_r = 0,22
Gefälle: p = 0,26

Resultat HYDRAT: HQ_{100} = 5,8 m³/s

5.3.3 Modell HYDRIF

a) Beschreibung
Das Modell HYDRIF zur Bestimmung der maximalen Abflussmenge basiert auf einem Ansatz im Stile der «Index-flood»-Methode, die zum ersten Mal von DALRYMPLE (1960) vorgeschlagen wurde. Eine Anpassung dieses Verfahrens an die Westschweiz wurde vom Labor HYDRAM der EPFL durchgeführt. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in NIGGLI et al. (2001). Der jährliche Hochwasserabfluss HQx [m³/s] für eine Wiederkehrperiode x kann anhand der folgenden Gleichung errechnet werden:

$$HQ_X = 0{,}0056 \cdot f_{(x,R)} \cdot EL^{-0{,}56} \cdot ALT^{0{,}63} \cdot A^{0{,}66}$$

mit

$$EL = 2 \cdot \frac{\sqrt{A / \pi}}{L}$$

A, ALT und *EL* bezeichnen die Fläche [km²], die mittlere Höhe [m ü. M.] und den Elongationsfaktor des Einzugsgebietes. Dieser letzte Parameter wird in Abhängigkeit von der gesamten Länge des hydrographischen Netzes *L* (Summe der Längen aller permanenten und temporären Wasserläufe) angegeben, die mit Hilfe einer Landeskarte im Massstab 1:25'000 ermittelt wird. Der Elongationsfaktor widerspiegelt die Dichte des hydrographischen Netzes. Der Faktor $f_{(x,R)}$ ist ein Multiplikator (Wachstumsfaktor), der von der Wiederkehrperiode *x* und der Region *R,* in der sich das Einzugsgebiet befindet, abhängt. Sein Wert kann anhand der Kurven in Figur 5-37 ermittelt werden.

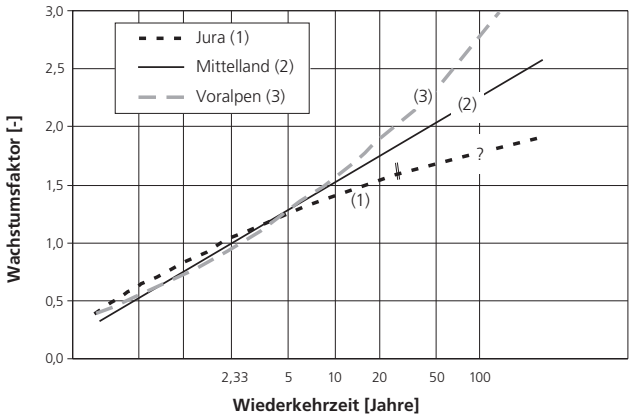


Fig. 5-37: Wachstumskurven für die Regionen *Jura, Mittelland* und *Voralpen*. Der Wachstumsfaktor ist definiert durch das Verhältnis zwischen dem Abfluss HQx einer bestimmten Wiederkehrperiode und dem durchschnittlichen jährlichen Hochwasserabfluss. In Gebieten mit Karst ist davon auszugehen, dass die Wachstumskurven die Verhältnisse wegen Speicherprozessen nur ungenügend abbilden können. Diese Wachstumskurven können besonders für seltene Ereignisse nicht validiert werden.

Die in Figur 5-37 dargestellten Wachstumskurven wurden durch eine statistische Anpassung einer allgemeinen Extremwertverteilung (MEYLAN & MUSY 1998) an die gemessenen Werte einer Region durch die Methode der gewichteten Momente erhalten. Die Westschweiz wurde in drei Regionen unterteilt: *Jura, Mittelland* und *Voralpen*. Der Rückgriff auf eine einzige Wachstumskurve für alle Einzugsgebiete einer Region bedeutet, dass die Koeffizienten der Variation und der Schiefe der jährlichen Hochwasser räumlich invariant sind.
Bei der Zuordnung der Einzugsgebiete zu einer der drei Regionen wurde sowohl die geologische Karte (ATLAS DER SCHWEIZ 1965–1978) als auch die Höhenlage berücksichtigt. Die Einzugsgebiete der Region *Jura* befinden sich in unserem Fall gemäss der geologischen Karte vorwiegend im Falten- oder Tafeljura. In den Einzugsgebieten des *Mittellandes* herrschen Molasse- und Gletscher- oder Fluss-Ablagerungs-Formationen vor. Die mittlere Höhe dieser Einzugsgebiete liegt unter 850 m ü. M. Zu den Einzugsgebieten der Voralpen gehören vor allem Gebiete mit «voralpinen» Ablagerungen (im geologischen Sinn), aber auch Gebiete mit Molasse-Formationen. Die mittlere Höhe der Gebiete der *Voralpen* liegt über 850 m ü. M. Diese Grenze von 850 m ü. M. entspricht ungefähr der Höhe, über der die alljährlichen sommerlichen Hochwasser häufiger sind als die winterlichen. Die mittlere Höhe ist ein Faktor, in dem sowohl die physiographischen Kenngrössen (Gefälle) wie auch die klimatischen Charakteristiken (Niederschlagsmenge, Temperatur) vereint sind.

b) Gültigkeitsbereich

Wiederkehrperiode
Das Modell HYDRIF kann im Prinzip für jede Wiederkehrperiode angewendet werden. Wegen fehlender Daten ist es allerdings schwierig, die Gültigkeit des Modells für Wiederkehrperioden von 100 und mehr Jahren zu überprüfen.

Einzugsgebietsgrösse
Das Modell ist im Prinzip auf Einzugsgebiete mittlerer Flächen anwendbar (10 bis 500 km²). Für Gebiete mit Flächen unter 30 km² ist eine Kombination von HYDRIF mit anderen Modellen, welche besser für kleine Gebiete geeignet sind (z.B. HYDRAT, vgl. Kapitel 5.3.2), zu empfehlen.

Geografische Lage
Das Anwendungsgebiet dieses Modells ist die Westschweiz (siehe Fig. 5-36). Das Untersuchungsgebiet umfasst das Einzugsgebiet der Aare bis zum Zusammenfluss mit der Reuss, das Einzugsgebiet der Rhone wie auch des Doubs auf Schweizer Gebiet und das Einzugsgebiet des Rheins vom Zusammenfluss mit der Aare bis zur Schweizer Grenze. Die Methode ist nicht anwendbar auf Gebiete mit mittleren Höhen über 1500 m ü. M. (in unserem Fall die Berner wie auch die Walliser Alpen; bei diesen Gebieten wird das hydrologische Verhalten stark durch die Schneeschmelzprozesse beeinflusst). Ebenfalls nicht anwendbar ist sie auf Gebiete, die sehr stark vom Menschen verändert worden sind. Zudem müssen die Einflüsse von Karst-Formationen (Region Jura) beachtet werden (die Gründe werden im entsprechenden Kapitel des Modells HYDRAT erläutert).

Basisdaten
Ein Teil der benötigten Basisdaten ist beim Bundesamt für Landestopographie (L+T) erhältlich. Die Höhe und auch das durchschnittliche Gefälle können zum Beispiel mit Hilfe des digitalen Höhenmodells DHM25 errechnet werden. Zudem bietet die L+T auch das digitalisierte Gewässernetz im Massstab 1:25'000 (VECTOR25) an, mit dessen Hilfe man den Parameter *EL* berechnen kann. Schliesslich können die Landeskarten dazu benutzt werden, die Einzugsgebiete abzugrenzen und ihre Fläche zu bestimmen.
Der Geographische Atlas der Schweiz (ATLAS DER SCHWEIZ 1965–1978) gibt Auskunft über die Geologie. Diese Daten erlauben es (in Verbindung mit der Höhe), die Einzugsgebiete in die drei oben genannten Regionen einzuteilen.

Evaluation der Resultate der Modellanwendung für alle untersuchten Einzugsgebiete
Die Leistungsfähigkeit des Modells HYDRIF wurde ebenfalls nach der Methode von NAEF (1983) ermittelt (siehe auch die Evaluation des Modells HYDRAT – Kapitel 5.3.2, Abschnitt b). Die Tabelle 5-10 gibt die Leistungsfähigkeit des Modells für eine Wiederkehrperiode von 5 und 100 Jahren an. Für eine Wiederkehrperiode von 5 Jahren (obere Tabelle) und Einzugsgebiete unter 20 km² werden 43% der Resultate als «exakt» oder «genügend» eingestuft. Für grössere Gebiete wird die Annäherung bedeutend besser, 86% der Resultate werden als «exakt» oder «genügend» beurteilt. Derselbe Vergleich mit anderen Wiederkehrperioden (20, 50 oder 100 Jahre) ergibt ähnliche Resultate (untere Tabelle: Wiederkehrperiode 100 Jahre).

Fläche A [km²]	**A<20**	**A>20**
Anzahl der Einzugsgebiete	21	21
Überbewertung [%]	43	43
Unterbewertung [%]	57	57
«exakte»/«genügende» Wertungen [%]	43	86

Fläche A [km²]	**A>20**	**A<20**
Anzahl der Einzugsgebiete	15	14
Überbewertung [%]	40	35
Unterbewertung [%]	60	64
«exakte»/«genügende» Wertungen [%]	53	85

Tab. 5-10: Über- und Unterschätzung der Referenz-Abflüsse mit HYDRIF in % (obere Tabelle: Wiederkehrperiode 5 Jahre; untere Tabelle: Wiederkehrperiode 100 Jahre) sowie «exakte resp. genügende» Schätzungen in % (nach NAEF 1983). Die Gleichung wurde auf die 42 vorhandenen Einzugsgebiete mit Messungen für Wiederkehrperioden von 5 Jahren angewendet. Für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren wurden nur die 29 Einzugsgebiete mit einer Messreihe von mehr als 15 Jahren berücksichtigt.

Anwendungsbeispiel
Zu Illustrationszwecken wird der 100jährliche Spitzenabfluss (HQ_{100}) der Veveyse in Vevey bestimmt (Lage des Einzugsgebiets siehe Fig. 5-36). Das Einzugsgebiet befindet sich in der Region Voralpen.

Wachstumsfaktor f(100, R): f (100, Voralpen) = 2,75 (siehe Figur 5-37)
Fläche des Einzugsgebietes: A = 62,2 km²
Mittlere Höhe: ALT = 1108 m ü. M.
Länge des Gewässernetzes: L = 200 km

Resultat HYDRIF: HQ_{100} = 110 m³/s

5.3.4 Die Methode HYDREG: Eine kombinierte und massstabsübergreifende Methode

a) Überblick
Die Methode HYDREG basiert auf einer Kombination von Modellen zur Abschätzung des Hochwasserabflusses (HYDRAT und HYDRIF). Sie wurde am Labor HYDRAM der EPFL entwickelt. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in NIGGLI et al. (2001).
Die Methode der Kombination ist empfehlenswert, sobald man die Ergebnisse von zwei sich ergänzenden Modellen gewichten will. Es handelt sich dabei um eine Linearkombination (oder, um es anders auszudrücken, um einen gewichteten Mittelwert). Die Bedingung der Komplementarität ist bei den Modellen HYDRIF und HYDRAT erfüllt (siehe Absatz 5.3.2 und 5.3.3), da sie sich durch verschiedene Gültigkeitsbereiche im Bereich der «optimalen» Fläche charakterisieren. Im Allgemeinen ist das Modell HYDRAT dem Modell HYDRIF vorzuziehen, wenn das Einzugsgebiet kleiner als 10 km² ist. Die Tendenz ist umgekehrt, sobald es sich um Flächen über 30 km² handelt. Der Gewichtungsfaktor in der Linearkombination ist für das Modell HYDRAT also höher, wenn es sich um kleine Einzugsgebiete handelt, und auf der anderen Seite ist die Gewichtung des Modells HYDRIF bei grossen Einzugsgebieten höher. Es ist aber durchaus möglich, dass die beiden Modelle, selbst innerhalb ihres Flächen-Gültigkeitsbereiches angewendet, Ergebnisse liefern, die relativ weit von der Wirklichkeit entfernt liegen. Es ist daher wünschenswert, ein Signal einzuführen, das den Benutzer warnt, falls die Resultate des verwendeten Modells weit weg vom zu erwartenden Quantil HQ_x liegen. Dieses Signal entspricht im Grunde einem dritten Modell, «Rahmen-Regional-Modell» genannt, das zum Ziel hat, die drei geographischen Regionen *(Jura, Mittelland, Voralpen),* die im Abschnitt 5.3.2 und 5.3.3 abgegrenzt wurden, aus der Sicht der Hydrologie zu charakterisieren. Dieses Modell resultiert aus der Synthese aller zur Verfügung stehenden Abflussmessungen im Untersuchungsgebiet, die nach ihrer Zugehörigkeit zu einer geographischen Region und einer Klasse von Einzugsgebietsflächen gegliedert sind. Das Modell liefert einen Variationsbereich des Quantils der Wiederkehrperiode x, der eine Art «Hinweis-Bereich» darstellt. Dieser kann die Einschätzung des Benutzers abrunden (oder wenn eine solche nicht vorhanden ist, die Grundlage zu einer Einschätzung bilden), der dadurch seine Erfahrung und Wahrnehmung der Phänomene überprüfen und die Abschätzung des gesuchten Quantils bestätigen, entkräften oder verfeinern kann. Die Technik zur Bildung des Hinweis-Bereichs ist in TALAMBA et al. (2000) näher beschrieben.

Die Methodik, die zum kombinierten Modell HYDREG geführt hat, ist im Prinzip nicht auf die Verwendung der beiden Modelle HYDRIF und HYDRAT beschränkt. Sie könnte durchaus auch auf andere Modelle (auch mehr als zwei Modelle) angewandt werden.
Zudem ist der Experte, der die Aufgabe hat, einen Hochwasserabfluss abzuschätzen, frei, die vorgeschlagene Prozedur vollständig, in Teilen oder gar nicht anzuwenden. Auch ist es ihm freigestellt, die aus der Verwendung dieses Modells erhaltenen Informationen komplett oder in Teilen zu verwenden.

b) Anwendung in der Westschweiz

Um den Hochwasserabfluss eines Einzugsgebietes der Westschweiz abzuschätzen, wird also die Methodik der Kombination der Modelle HYDRIF und HYDRAT vorgeschlagen. Das daraus entstandene Modell berücksichtigt sowohl die Charakteristiken der Einzugsgebiete als auch die relative Leistungsfähigkeit der einzelnen Modelle. Es umfasst ein «Decision-Support-System», das in Abhängigkeit vom Gültigkeitsbereich der beiden Modelle und von den mit Hilfe des «Rahmen-Regional-Modells» erhaltenen Informationen ausgearbeitet wurde.

Die Bestimmung des Hochwasserabflusses HQ_x für eine Wiederkehrperiode x geschieht wie folgt:

1. Identifizierung des passenden «Rahmen-Regional-Modells» in Abhängigkeit von der geographischen Zugehörigkeit und der Fläche des Einzugsgebietes (siehe Tabelle 5-11). Bestimmung der dazugehörigen Werte für HQx- und HQx_+. Es handelt sich dabei um den spezifischen Abfluss der Tabelle 5-11 Hqx_- und Hqx_+ (zum Beispiel Hq_5- und Hq_{5+}, für eine Wiederkehrperiode von 5 Jahren) multipliziert mit der Fläche des Einzugsgebietes.

2. Berechnung des Quantils HQx durch die Methoden HYDRIF (HQx_{HYDRIF}) und HYDRAT (HQx_{HYDRAT})

3. Berechnung des Quantils HQx_{comb} mit den folgenden Formeln:

   $$HQx_{comb} = p \cdot HQx_{HYDRAT} + (1-p) \cdot HQx_{HYDRIF}$$

   Wobei p der Gewichtungsfaktor des Modells HYDRAT ist

   $p = 1$ wenn $A < 10$ km²

   $p = \frac{\ln(A)-\ln(30)}{\ln(10)-\ln(30)}$ wenn 10 km² $< A < 30$ km²

   $p = 0$ wenn $A > 30$ km²

A ist die Fläche des Einzugsgebietes

4. Vergleich des Wertes HQx_{comb} mit dem «Hinweis-Bereich» (Tabelle 5-11), der durch das «Rahmen-Regional-Modell» gegeben ist, und Bestimmung des Wertes HQ_x. Dazu stehen dem Experten die drei folgenden Hochwasserwerte zur Verfügung: [HQx_- ; HQx_{comb}; HQx_+]

Wobei HQx_- und HQx_+ die Grenzwerte für den regionalen «Hinweis-Bereich» der entsprechenden Region und Flächenklasse darstellen. HQx_{comb} ist die Annäherung des Quantils, die aus dem HYDREG Modell hervorgeht.

Region	Flächenklasse	Hq_{5-}	Hq_{5+}	Hq_{20-}	Hq_{20+}	Hq_{50-}	Hq_{50+}	Hq_{100-}	Hq_{100+}
Voralpen	A<10 km²	1,20	5,60	1,60	8,30	1,90	10,0	2,00	12,0
Voralpen	10<A50 km²	0,50	3,30	0,70	5,60	0,80	7,10	0,80	7,90
Voralpen	50 km²<A	0,20	1,40	0,30	2,10	0,30	2,60	0,40	3,10
Mittelland	A<10 km²	0,22	2,00	0,25	2,75	0,30	3,23	0,40	3,52
Mittelland	10<A<50 km²	0,18	1,65	0,20	2,60	0,25	3,23	0,30	3,50
Mittelland	50 km²<A	0,18	0,70	0,20	1,00	0,25	1,20	0,30	1,52
Jura	A<10 km²	0,16	0,91	0,20	1,47	0,23	1,82	0,25	2,37
Jura	10<A<50 km²	0,16	0,75	0,20	1,10	0,23	1,30	0,23	1,45
Jura	50 km²<A	0,16	0,34	0,18	0,46	0,19	0,55	0,20	0,64

Tab. 5-11: «Rahmen-Regional-Modell»: Spezifische Abflüsse (in m³/s/km²) in Abhängigkeit von der Region, der Flächenklasse und der Wiederkehrperiode x. Hqx- und Hqx+ sind die untere respektive obere Grenze des «Hinweis-Bereichs» der spezifischen Abflüsse.

Je nachdem, wie der Wert HQx_{comb} im Vergleich zu den Grenzen [HQx_-;HQx_+] des regionalen Hinweis-Bereichs steht, sind unterschiedliche Situationen möglich. Es sollte aber bedacht werden, dass eine Abschätzung von HQx_{comb}, welche ausserhalb des Bereichs [HQx_-;HQx_+] liegt, nicht zwangsläufig falsch ist. Es ist nämlich durchaus möglich, dass der Hinweis-Bereich für eine bestimmte Klasse (Region, Fläche) nicht den ganzen Variationsbereich des Quantils HQx für diese Klasse abdeckt. Zur Bestimmung dieser Hinweis-Bereiche wurde ein Grossteil der zum Zeitpunkt der Analyse zur Verfügung stehenden Abflussabgaben verwendet. Einige Daten aber, obgleich wertvoll für die Dimensionierung von Bauten, konnten und können nicht verwendet werden: Dies ist bei punktuellen Abflussangaben der Fall (zum Beispiel Hochwassermarken historischer Hochwasser), aber auch bei sehr kurzen Datenreihen. Solche Daten können für eine Frequenzanalyse zur Abschätzung der Quantile verschiedener Wiederkehrperioden nicht verwendet werden.

Zusammenfassend kann Folgendes gesagt werden: Der Experte kann bei der Wahl des massgebenden Hochwasserabflusses den Wert von HQx_{comb} mit den vom Rahmen-Regional-Modell gegebenen regionalen Informationen vergleichen. Gleichzeitig muss er aber auch seine persönlichen Kenntnisse, Beobachtungen

und insbesondere Informationen, die mit dem Einzugsgebiet in Verbindung stehen, berücksichtigen.

Die hier vorgestellte Methode hat das Ziel, für ein bestimmtes Hochwasser-Quantil einen Zentralwert abzuschätzen und einen Hinweis-Bereich zu erstellen. Es handelt sich hierbei um eine Methode unter vielen. Sie ist modulierbar: Es ist dem Anwender oder der Anwenderin selbstverständlich freigestellt, diese Methode nur in Teilen oder in einer abgeänderten Form zu verwenden. Je nach Kontext wird ein solches Vorgehen empfohlen. Falls z.B. eine Abfluss-Messreihe vorhanden ist, sollte die daraus hervorgehende Schätzung des Quantils in die hier vorgeschlagene Methode integriert werden.
Die Werte der Tabelle 5-11 («Rahmen-Regional-Modell») können zudem für gewisse Einzugsgebiete eine Anpassung erfordern. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn ein Einzugsgebiet nicht klar einer bestimmten Region oder Flächenklasse zugeordnet werden kann. Man kann sich zum Beispiel auf sein Wissen und seine Wahrnehmung der Phänomene stützen, um eine sinnvolle Gewichtung zwischen den Schätzungen für die verschiedenen Regionen und Flächenklassen vorzunehmen. Falls sich ein Einzugsgebiet am Schnittpunkt von zwei Flächenklassen befindet (zum Beispiel ein Einzugsgebiet einer Fläche von ungefähr 10 km^2), wird empfohlen, auf die in TALAMBA et al. (2000) vorgeschlagenen Werte für die Klassen [5, 20 km^2] und [20, 200 km^2] zurückzugreifen. Auch die Variabilitätsbereiche für Einzugsgebiete an der unteren Grenze der kleinsten Flächenklasse (1 km^2) sind mit Vorsicht zu behandeln.
Schliesslich sollte nicht vergessen werden, dass die Schätzung des maximalen Abflusses für kleine Einzugsgebiete eine heikle Aufgabe bleibt und diese sich auf zusätzliche Informationen abstützen sollte (Erfahrung, Feldarbeit, hydrometrische Messungen in einem vergleichbaren Einzugsgebiet etc). *Dieses «Rahmen-Regional-Modell» ist also als Experten-Modell zu verstehen. Dieses sollte – ähnlich wie auch ein Experte sein Gutachten fortwährend verfeinert – weiter verbessert werden, sobald neue Abflussdaten verfügbar sind.*

c) Wiederkehrperiode
Das Modell HYDREG kann im Prinzip für jede Wiederkehrperiode angewendet werden. Wegen fehlender Daten ist es allerdings schwierig, die Gültigkeit des Modells für Wiederkehrperioden von 100 und mehr Jahren zu überprüfen.

d) Einzugsgebietsgrösse
Das Modell ist im Prinzip auf Einzugsgebiete kleiner und mittlerer Flächen anwendbar (das heisst auf Einzugsgebiete einer Grösse zwischen 0,5 und 500 km^2). Resultate für kleine Einzugsgebiete (im km^2-Bereich) sollten jedoch mit Vorsicht behandelt werden, da solche Einzugsgebiete meistens ein besonderes Verhalten aufweisen.

e) Geografische Lage
Das Anwendungsgebiet dieses Modells ist die Westschweiz (siehe Figur 5-36). Das Untersuchungsgebiet umfasst das Einzugsgebiet der Aare bis zum Zusammenfluss mit der Reuss, das Einzugsgebiet der Rhone wie auch des Doubs auf Schweizer Gebiet und das Einzugsgebiet des Rheins vom Zusammenfluss mit der Aare bis zur Schweizer Grenze. Die Methode ist nicht anwendbar auf Gebiete mit mittleren Höhen über 1500 m ü. M. (in unserem Fall die Berner wie auch die Walliser Alpen; bei diesen Gebieten wird das hydrologische Verhalten stark durch die Schneeschmelzprozesse beeinflusst). Ebenfalls nicht anwendbar ist sie auf Gebiete, die sehr stark vom Menschen verändert worden sind. Zudem müssen die Einflüsse von Karst-Formationen (Region Jura) beachtet werden (die Gründe werden im entsprechenden Kapitel des Modells HYDRAT erläutert).

f) Basisdaten
Die notwendigen Basisdaten sind identisch mit den im Abschnitt 5.3.2b und 5.3.3b für die Modelle HYDRAT und HYDRIF erwähnten Grundlagen.

g) Anwendungsbeispiele
Beispiel 1: Das Einzugsgebiet der Baye de Montreux in Montreux
Zu Illustrationszwecken wird der 20jährliche Spitzenabfluss (HQ_{20}) der Baye de Montreux in Montreux berechnet (Lage des Einzugsgebietes siehe Fig. 5-36):

1. Berechnung der Grenzwerte für den Hinweis-Bereich:
   Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes beträgt 1200 m ü. M. und die Geologie ist vom Typ Voralpin. Aufgrund der Einteilungskriterien, die im Abschnitt 5.3.2a definiert wurden, kann dieses Gebiet der Region Voralpen zugeordnet werden. Im Wissen, dass das Einzugsgebiet eine Fläche von 14,6 km^2 aufweist, kann der Hinweis-Bereich für die Wiederkehrperiode von 20 Jahren anhand des «Rahmen-Regional-Modells» bestimmt werden (die Werte Hq_{20min} und Hq_{20max} der Tabelle 5-11 werden mit der Fläche multipliziert) :

   [HQ_{20}-= 10 m^3/s ; HQ_{20+} = 82 m^3/s]

2. Berechnung des Quantils HQ_{20} durch die beiden Modelle:
   In Abhängigkeit von den Charakteristiken der Einzugsgebiete erhält man:

   Methode HYDRIF: $HQ_{20HYDRIF} = 20\ m^3/s$
   Methode HYDRAT: $HQ_{20HYDRAT} = 22\ m^3/s$

3. Berechnung des Quantils HQx_{comb} mit dem folgenden Ansatz:
   $HQ_{20comb} = 0{,}7 \cdot 22 + 0{,}3 \cdot 20 = 21{,}5\ m^3/s$

4. Schlussberechnung des Quantils:
   Wir befinden uns in folgender Situation:
   $HQ_{20-} < HQ_{20comb} < HQ_{20+}$

Da für dieses Einzugsgebiet keine anderen örtlichen Informationen zur Verfügung stehen, die zu einer Modifikation dieser Abschätzung führen könnten, ist das Schlussresultat für HQ_{20} und den Hinweis-Bereich das folgende:

[$HQ_{20-} = 10\ m^3/s$; *$HQ_{20} = 21{,}5\ m^3/s$* ; $HQ_{20+} = 82\ m^3/s$]

Das GESREAU erlaubt es, über die verschiedenen Informationen für jedes Einzugsgebiet oder jede hydrologische Einheit des Kantons Waadt automatisch zu verfügen. Im folgenden Abschnitt sind die Benutzeroberfläche und die Dialogseiten von GESREAU anhand der Anwendung der Methoden HYDRAT, HYDRIF und HYDREG dargestellt.

Beispiel 2: Abflussspitzen HQ_{100} entlang der Mentue zwischen La Corbassière und Yvonnand

Mit Hilfe der im GESREAU enthaltenen Informationen konnten die Quantile HQx für die Teileinzugsgebiete anhand der Methoden HYDRAT, HYDRIF und HYDREG berechnet werden. Aufgrund der durch das SESA festgelegten Berechnungspunkte entlang des Wasserlaufes der Mentue wurden 16 Teileinzugsgebiete definiert: Vom Einzugsgebiet der Corbassière (1,95 km²), welches das höchstgelegene Teileinzugsgebiet darstellt, bis zum gesamten Einzugsgebiet der Mentue in Yvonnand (105 km²). Die Zunahme der Abflussspitzen HQ_{100} entlang des Wasserlaufes ist in Figur 5-40 dargestellt. Die 100jährlichen Spitzenabflüsse der Mentue in Yvonnand und in Dommartin (12,5 km²) wurden auch mit einer statistischen Auswertung und Extrapolation der vorhandenen Messreihen berechnet (Anpassung von Gumbel für die Messreihen mit einer Dauer von 18 und 19 Jahren für Yvonnand respektive Dommartin). Die Abflussmessreihe der Mentue in Corbassière ist zu kurz für eine entsprechende Auswertung.

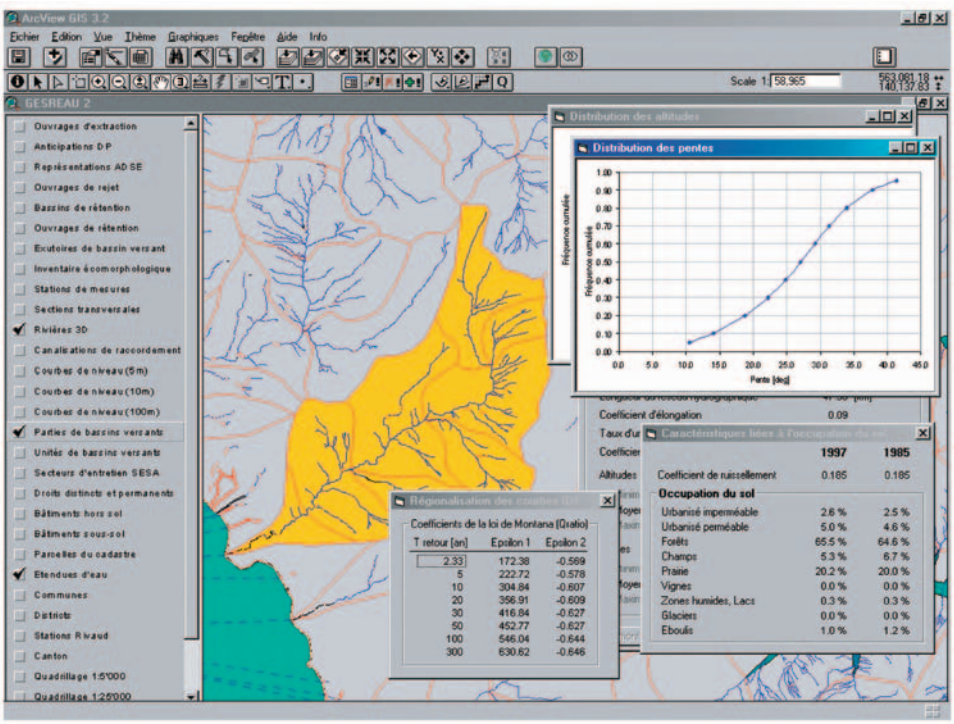


Fig. 5-38: Umgebung des GIS GESREAU: Einzugsgebiet der Baye de Montreux in Montreux (14,6 km²): Bodennutzung und Abfluss-Koeffizient, die Koeffizienten des Modells IDF von Montana für verschiedene Wiederkehrperioden und die hypsometrische Kurve.

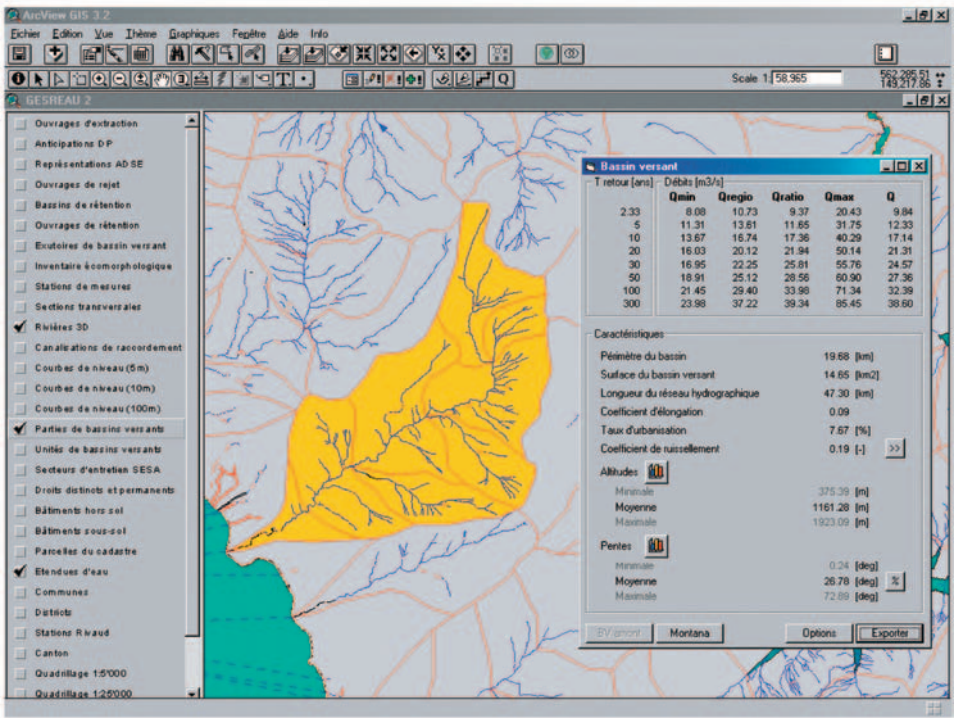


Fig. 5-39: Umgebung des GIS GESREAU (2): Einzugsgebiet der Baye de Montreux in Montreux: hydrographisches Netz, Teileinzugsgebiete, Kenngrössen, erhaltene Quantile durch die Methoden HYDRIF, HYDRAT, HYDREG und die Grenzwert-Quantile des Hinweis-Bereichs für verschiedene Wiederkehrperioden. Die hier vorgestellten Ergebnisse resultieren aus der Anwendung der Methode HYDREG, die vor Kurzem durch einige zusätzliche Entwicklungen verbessert wurde; diese Verbesserungen werden in Kürze das Thema einer neuen Publikation sein. Aus diesem Grunde können die Resultate kleine Abweichungen zur strikten Anwendung der in diesem Teil dargestellten Methode aufweisen.

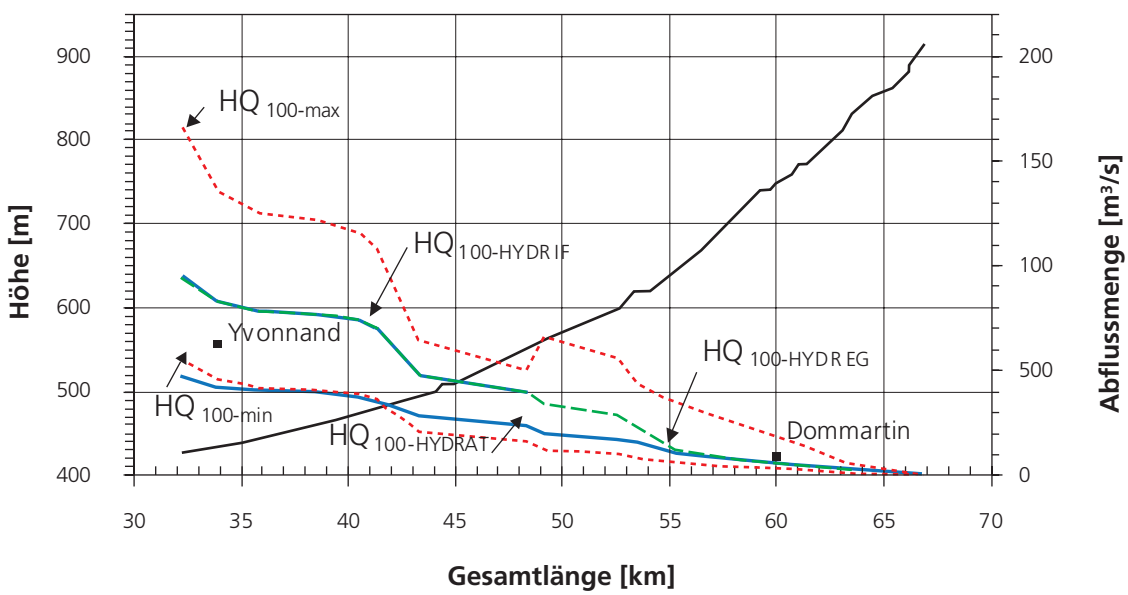


Fig. 5-40: Längenprofil der Mentue von La Corbassière (1,95 km²) bis Yvonnand (105 km²) (Wasserlauf Nr. 6000). Darstellung des mit der Methode HYDREG bestimmten Spitzenabflusses HQ_{100} (grüne gestrichelte Linie) und der Grenzwerte des Hinweis-Bereichs (rote punktierte Linien). Die Abflüsse der Modelle HYDRIF und HYDRAT sind ebenfalls dargestellt (blaue Linien). Die Referenz-Abflüsse, die durch die Auswertung der Abfluss-Messreihen Yvonnand und Dommartin erhalten wurden, sind ebenfalls eingetragen (schwarze Punkte).

Figur 5-40 zeigt die Quantile der Methode HYDREG: Für Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 30 km² (hier zwischen Kilometer 53 und 60) wird der Spitzenabfluss HQ_{100} durch Kombination der Modelle HYDRAT und HYDRIF ermittelt. In diesem Beispiel liegt der Wert HQ_{100} für das Modell HYDRIF durchgehend innerhalb der Grenzwerte HQ_{100-} und HQ_{100+} des Hinweis-Bereichs. Dies trifft für die Ergebnisse des Modells HYDRAT nicht zu, da dieses das HQ_{100} oberhalb Kilometer 40 stark unterbewertet.
Es ist zu vermerken, dass die hydrologisch widersprüchliche Diskontinuität der oberen Grenze des Hinweis-Bereichs bei km 48 durch einen Wechsel der Flächenklasse bedingt ist. Dieses Beispiel zeigt eine Grenze des «Rahmen-Regional-Modells» auf, die auch bei anderen Kombinationsmodellen, die auf einer Klassifizierung der Einzugsgebiete in Abhängigkeit der Fläche oder der zugehörigen hydrologischen Regionen basieren, auftritt. Die Ausarbeitung einer Methodik, die nicht auf einer Klassifizierung – Ursache von unvermeidbarer Unstetigkeit zwischen den Klassen – sondern auf dem Gebrauch des kontinuierlichen Verlaufs der Charakteristiken der Einzugsgebiete aufbaut, stellt eine der interessanten Forschungsperspektiven zur Verbesserung dieser Methode dar.

h) Evaluation der Resultate der Modellanwendung für alle untersuchten Einzugsgebiete

Die Leistungsfähigkeit des Modells HYDREG wurde ebenfalls nach der Methode von NAEF (1983) ermittelt (siehe auch die Evaluation HYDRAT und HYDRIF – 5.3.2b und 5.3.3b). Tabelle 5-12 stellt die Leistungsfähigkeit des Modells dar (oben: Wiederkehrperiode 5 Jahre, unten: Wiederkehrperiode 100 Jahre). Die Leistungsfähigkeit des kombinierten Modells HYDREG ist in der gesamten Flächenbandbreite bedeutend besser als diejenige der beiden separaten Modelle HYDRAT und HYDRIF. Bei Einzugsgebieten unter 20 km² gelten gut 70% der Ergebnisse als «exakt» oder «genügend». Für grössere Gebiete sind die Resultate noch besser: ungefähr 90% der Schätzungen sind «exakt» oder «genügend».

Fläche A [km²]	**A<20**	**A>20**
Anzahl der Einzugsgebiete	21	21
Überbewertung [%]	52	43
Unterbewertung [%]	48	57
«exakte»/«genügende» Wertungen [%]	71	90

Fläche A [km²]	**A>20**	**A<20**
Anzahl der Einzugsgebiete	15	14
Überbewertung [%]	47	36
Unterbewertung [%]	53	64
«exakte»/«genügende» Wertungen [%]	73	86

Tab. 5-12: Über- und Unterschätzung der Referenz-Abflüsse mit HYDREG in % (obere Tabelle: Wiederkehrperiode 5 Jahre; untere Tabelle: Wiederkehrperiode 100 Jahre) sowie «exakte resp. genügende» Schätzungen in % (nach NAEF 1983). Die Gleichung wurde auf die 42 vorhandenen Einzugsgebiete mit Messungen für Wiederkehrperioden von 5 Jahren angewendet. Für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren wurden nur die 29 Einzugsgebiete mit einer Messreihe von mehr als 15 Jahren berücksichtigt.

Literaturverzeichnis

ASCHWANDEN, H., SPREAFICO, M. (1995): Hochwasserabflüsse – Analyse langer Messreihen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.6, Bern.

ASF (EIDG. AMT FÜR STRASSEN- UND FLUSSBAU) (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern.

ATLAS DER SCHWEIZ (1965–1978): Bundesamt für Landestopographie, Bern.

BALOCKI, J.B., BRUGES, S.J. (1994): Relationships between *n*-day flood volumes for infrequent large floods. J. of Water Resources Planning and Manag., 120(6), pp. 794–818.

BARBEN, M. (2001): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.

BAUMANN, P., FORSTER, F., GERBER, W., KIENHOLZ, H., LEHMANN, CH., RICKENMANN, D., RICKLI, CH. (1992): Naturgefahren: Gefahrenbeurteilung, Landschaftsveränderung. Kursunterlagen des Weiterbildungs-Kurses 1992 im Berner Oberland. Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN).

BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11: 16–32, Weinheim.

BENISTON, M. & AL. (1992): Establishment of climatological scenarios for the alpine regions (EPOCH/FUTURALP EUROPROJECT). Final scientific report.

BÉROD, D., DEVRED, D., LAGLAINE, V., CHAIX, O., ALTINAKAR, M., DELLEY, P. (1992): Calcul des crues extrêmes par des méthodes déterministes de type pluie maximale probable/crue maximale probable, Rapport HYDRAM, EPFL, Lausanne.

BÉROD, D. (1994): Contribution à l'estimation des crues à l'aide de méthodes déterministes, Thèse EPFL N°1319, Lausanne.

BÉROD, D., CONSUEGRA, D. (1995): Etude Consecru, Traitements statistiques des séries de débits, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.

BERTOLI, L., MOISELLO, U. (1994): A regional model for estimating the probability distribution of routed peak discharges. J. of Hydrology, 153, pp. 103–138.

BFS (1980): Bodeneignungskarte der Schweiz. In: GEOSTAT, Bern.

BFS (1985): Arealstatistik (AS85R) der Schweiz 1979/85. In: GEOSTAT, Bern.

BIEDERMANN, R. & AL. (1996): Protection contre les crues dans le canton du Valais, Eau, Energie, Air, Tiré à part 10, Baden.

BURCH, H. (1994): Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung im Alptal. In: Hydrologie kleiner Einzugsgebiete. Gedenkschrift Hans M. Keller. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 35. pp. 18–33. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL, Bern und Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.

BWG (2000): Hochwasser 1999. Analyse der Ereignisse, Studienbericht Nr. 10/2000.

BWG (2001): Hochwasserschutz an Fliessgewässern. Wegleitung. Bern.

BWG, DEZA (2001): Hochwasserschutz in der Schweiz – Strategie 2001. Bern.

BWW (1995): Anforderungen an den Hochwasserschutz '95. Bern.

CHOW, V. T. (1962): Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. Bulletin No 462 University of Illinois USA.

CHOW, V.T. (1964): Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, ISBN 07-010724-2.

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. (1988): Applied hydrology. McGraw-Hill International editions, New York.

CONSUEGRA, D., VEZ, E. (1996): AMIE: Analyse et Modélisation Intégrées du cheminement des Eaux en zones habitées, modélisation hydrologique, Application au bassin versant de la Haute Broye, IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.

CONSUEGRA, D., NIGGLI, M., MUSY, A. (1998): Concepts méthodologiques pour le calcul des crues. Application au basin versant supérieur du Rhône. Wasser, Energie und Luft. Vol. 9/10, pp. 223-231.

COWPERTWAIT, P.S. (1991): Further Developments of the Neyman-Scott Clustered Point Process for Modelling Rainfall, Water Ressources Research, 27(7), pp 1431-1438

CRAUSAZ, P.A., MUSY, A. (1997): GESREAU: un outil d'aide à la gestion des eaux par une modélisation du territoire. Revue internationale de Géomatique, 7(2): 127-139.

DALRYMPLE, T. (1960): Flood Frequency analysis, Manual of Hydrology, Pt 3, US Geological Survey.

DÜSTER, H. (1994): Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Geographica Bernensia G44, Bern.

DVWK (1979): Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Nr. 101, Hamburg.

DVWK (1989): Wahl des Bemessungshochwassers. Entscheidungswege zur Festlegung des Schutz- und Sicherheitsgrades. DVWK-Merkblatt, Nr. 209, Hamburg.

DVWK (1999): Merkblatt 251, Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser. ISBN 3-89554-110-9.

EJPD (1980): Bodeneignungskarte der Schweiz, Massstab 1:200'000. Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement, Bundesamt für Raumplanung. Bern.
ELSASSER, A. (1996): Möglichkeiten und Grenzen des Modells AGREGEE in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern.
FAVRE, A.C., CONSUEGRA, D., OVERNEY, O. (1997): A theoretical Framework to Assess Impacts of Precipitation Scenarios, In Popsicle: Production Of Precipitation Scenarios for Impact assessment of Climate change in Europe, EC Framework III, Project RTD EV5V-CT94-0510.
FORSTER, F., BAUMGARTNER, W. (1999): Bestimmung seltener Starkniederschläge kurzer Dauer – Fallbeispiele im Vergleich mit den schweizerischen Starkniederschlagskarten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 150, 6: 209-218.
FORSTER, F., HEGG CH. (2002): A suggestion for the estimation of flood peak discharge in small torrential catchments. Proc. ICFE 2002. Bern
GEES, A. (1996): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz – Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Geographica Bernensia G53, Bern.
GEIGER, H., RÖTHLISBERGER, G., STEHLI, A., ZELLER, J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4 und 2.4², Bern.
GUEX, F., GUEX, D., PUGIN, S., HINGRAY, B., MUSY, A. (2001): Ability of a regionalised lumped conceptual model to reproduce time evolution and statistical characteristics of observed discharge series: application on the Alzette catchment – Luxembourg. – in Flood Risk and HYdrological MAPping. IRMA-SPONGE. EU research project. HYDRAM Final Report.
GUILLOT ET DUBAND (1967): La méthode du GRADEX pour le calcul des probabilités de crue à partie des pluies. Journal des Sciences Hydrologiques, 84: 560–569.
HEUSSER, H. (1947): Die Voraussage der maximalen Hochwassermenge. In: Schweizerische Technische Zeitschrift, 31: 524–526.
HINGRAY, B., MONBARON, E., JARRAR, I., FAVRE, A.C., CONSUEGRA, D., MUSY, A. (2000): Stochastic generation and disaggregation of hourly rainfall series for continuous hydrological modelling and flood control reservoir design. Proc. Fifth International Workshop On Precipitation In Urban Areas. Dec. 10–13, 2000, Pontresina, Switzerland, 8p.
HIRSCH, R.M. (1987): Probability plotting position formulas for flood records with historical information, Journal of Hydrology, 96, pp 185–199
HORAT & SCHERRER AG (2001): Hochwasserabflüsse am Eibach und seiner Seitenbäche. Auftraggeber: Tiefbauamt des Kt. BL, Hauptabteilung Wasserbau.
JENSEN, H., LANG, H., RINDERKNECHT, J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970, Hydrologischer Atlas der Schweiz, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
KAN, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 169, Bern.
KOEHLER, G. (1976): Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete. Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser- und Kulturbauwesen, Heft 25: 41–48. Hamburg – Berlin. Verlag Paul Parey.
KÖLLA, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilung Nr. 87 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich.
KÖLLA, E. (1987): Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr.33–34: 965–972.
KÜRSTEINER, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur. In: Schweiz. Bauzeitung, 1: 4–8, Zürich.
LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A., PAULHUS, J.L. (1982): Hydrology for Engineers, McGraw-Hill Book Company, ISBN 0-07-037956-4.
L+T (1999): Digitales Gewässernetz 1:25'000 (VECTOR25).
MANIAK, U. (1999): Flussgebietsmodelle. In: Mathematische Modelle in der Gewässerkunde. Stand und Perspektiven. BfG-Mitteilungen Nr. 19, Koblenz.
MARGOUM, M., OBERLIN, G., LANG, M., WEINGARTNER, R. (1994): Estimation des crues rares et extrêmes: principes du modèle AGREGEE. In: Hydrologie Continentale, vol. 9 (1):85–100, Paris
MENDEL, H.-G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie, Bericht II-8 der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, ISBN 90-70980-19-3.
MEYLAN, P., MUSY, A. (1998): Hydrologie Fréquentielle, Polycopié HYDRAM, EPFL, Lausanne.
MINTY, L.J., MEIGHEN, J. (1999): Rainfall antecedent to large and extreme bursts over southeast Australia. Bureau of Meteorology, Australia, HRS Report N°6, Melbourne.
MÜLLER, R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauung. Mitteilung Nr. 4 der

Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich.
MUSY, A., HIGY, C. (2000): Hydrologie appliquée, Polycopié HYDRAM, EPFL, Lausanne.
NAEF, F. (1983): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen, Zwischenbericht NF-Projekt «Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen», Zürich.
NAEF, F., SCHERRER, S., FAEH, A. (1998): Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Grösse extremer Hochwasser Schlussbericht Nationalfonds Projekt 31, VDF-Verlag, Zürich.
NAEF F., SCHERRER S., ZURBRÜGG, C. (1999): Grosse Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES), Blatt 5.7.
NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. KHR-Bericht II-7, Lelystad.
NERC NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL (1975): Flood studies Report (Estimation of flood volumes over different durations). pp. 243–264.
NIGGLI, M., CONSUEGRA, D., BÉROD, D. (1997): Etude Consecru, Bases hydrologiques de dimensionnement, Modélisation des crues du Rhône en Valais, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
NIGGLI, M., CONSUEGRA, D. (1997): Etude Consecru, Bases hydrologiques de dimensionnement, Influence du barrage de Mattmark sur les crues de la Viège à Viège, Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
NIGGLI, M., CONSUEGRA, D., CRAUSAZ, P.A., VEZ, E. (1998): Régionalisation des débits de pointe du canton de Vaud, Projet GESREAU, Rapport HYDRAM, EPFL, Lausanne.
NIGGLI, M., TALAMBA, D., HINGRAY, B., MUSY, A. (2001): Estimation des débits de pointe pour des bassins versants non jaugés: Application a la Suisse Occidentale, Wasser, Energie, Luft, 9–10.
OBERLIN, G. (1992): Normalisation des variables dans les modèles hydrologiques descriptifs. Informations techniques du Cemagref, Mars 1992, n°85, note n°4.
OVERNEY, O., CONSUEGRA, D., MUSY, A., LAZARO, P., BOILLAT, J.L., SINNIGER, R.O. (1997): Influence des changements climatiques sur le régime hydrologique des cours d'eau. Rapport final du Programme National de Recherche « Changements Climatiques et catastrophes naturelles en Suisse » PNR31. Hochsch. Verl. an ETH-Zürich.
RICKLI, C., FORSTER, F. (1997): Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweiz. Zeitschr. Forstwesen, 148 Jg., Nr. 5: 367–385.
RÖTHLISBERGER, G., GEIGER, H., ZELLER, J. (1979, 1981, 1992): Starkniederschläge in der Schweiz, Band 4 –9, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf.
SCHERRER, S. (1996): Abflussbildung bei Starkniederschlägen – Identifikation von Abflussprozessen bei Starkniederschlägen. Diss. Nr. 11793 ETH Zürich.
SCHERRER, S. (2001): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen. Auftraggeber: Landesamt für Wasserwirtschaft, Rheinland-Pfalz, Mainz.
SCHERRER, S., NAEF, F. (2002): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes and on temperate grassland, Hydrological Processes; im Druck.
SCHERRER S., DEMUTH, N., MEUSER, A. (2002): A procedure for the identification of dominant runoff processes by field investigations to delineate the relevant contributing areas for flood modelling. Proceedings of Int. Conference on Flood Estimation, 6–8 Marc 2002, Berne (im Druck).
SCHWENTKER, F., STREIT, U. (1983): Regionale Übertragung hydrologischer Parameter – ein Überblick. Manuskript zum Vortrag anlässlich der Jahresversammlung des Arbeitskreises Hydrologie in Göttingen, Göttingen.
SERVICE HYDROLOGIQUE ET GÉOLOGIQUE NATIONAL (SHGN) (1922–1994): Annuaire hydrologique de la Suisse, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
SPREAFICO, M., STADLER, K. (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7, Bern.
SPREAFICO, M., STADLER, K. (1988): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 8, Bern.
SPREAFICO, M., ASCHWANDEN, H. (1991a): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 16, Bern.
SPREAFICO, M., ASCHWANDEN, H. (1991b): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 17, Bern.
SPREAFICO, M., WEINGARTNER, R., LEIBUNDGUT, C. (1992): Hydrologischer Atlas der Schweiz, SHGN (Landeshydrologie und -geologie), Bern.
SYDLER, P.-A., WIDMOSER, P., ZOLLINGER, F. (1982): Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich.

TALAMBA, D., NIGGLI, M., HINGRAY, B., MUSY, A. (2000): Projet GESREAU. Méthode de régionalisation des débits de pointe pour les bassins versants du canton de Vaud, Rapport HYDRAM, EPFL, Lausanne

TAUBMANN, K.-C., THIESS, N. (1984): Ingenieurmässige Anwendung verschiedener Hochwasser-Abschätzmethoden auf kleine und zusammengesetzte Einzugsgebiete am Testbeispiel der Ergolz. Ingenieurschule beider Basel, Muttenz.

TAUBMANN, K.-C. (1986): Ingenieurhydrologische Hochwasserabschätzung. Wasser, Energie, Luft, Jahrg. 78, Nr. 10: 277–281.

THIESS, N. (1975): Ermittlung von Bemessungsganglinien für kleine Einzugsgebiete nach Ven Te Chow, Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.

VOGT, S., FORSTER, F. (1999): Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten. Ein Abschätzverfahren nach Clark zur Bestimmung einer Hochwasser-Bemessungsganglinie. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, unveröffentlichter Praktikumsbericht, Birmensdorf.

VOGT, S. (2001): Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten, Diplomarbeit, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft/Institut für Klimaforschung der ETH, Zürich.

WASY (1997): HQ-EX, Version 2.0 (http://www.wasy.de).

WEINGARTNER, R., ASCHWANDEN, H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2, Bern.

WEINGARTNER, R. (1998): Analyse der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Hochwasser in der Schweiz. Ein Beitrag zur Hochwasserabschätzung. Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.

WEINGARTNER, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern.

ZELLER, J. (1975): Berechnung der Abflusswassermenge. Beilage zur Vorlesung «Wildbach- und Hangverbau», Abteilung VI, ETH Zürich.

ZELLWEGER, F., MUSY, A. (2000a): Mise au point du modèle hydrologique, régionalisation du paramètre de transfert, Projet CRUEX: Rapport d'avancement pour l'année 1999, HYDRAM, EPFL, Lausanne.

ZELLWEGER, F., MUSY, A. (2000b): Mode d'emploi pour le modèle hydrologique CRUEX, Projet CRUEX, HYDRAM, EPFL, Lausanne.

ZELLWEGER, F., MUSY, A. (2000c): CRUEX, rapport de synthèse. Rapport IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1: Stellung der Hydrologie und des Wasserbaus bei der Hochwasserbemessung 8
Fig. 2-1: .Einordnung der Hochwasser-Abschätzverfahren 10
Fig. 2-2: Das Prinzip des Modells GRADEX (aus ELSASSER 1996) 11
Fig. 2-3: Hydrologische Grundlagen der 3. Rhonekorrektion und Hochwasser vom 15. Oktober 2000 (Abflussmessstation von Sitten) 15
Fig. 3-1: Abflussprozesse und Reaktionsweisen bei Starkregen 16
Fig. 3-2: Der Verlauf der Volumenabfluss-Koeffizienten ($\Psi = \Sigma Q / \Sigma N$) der 18 Hangstandorte 17
Fig. 3-3: Bodenprofil mit Schlüsselstellen, welche die Infiltration und Wasserbewegung durch den Boden beeinflussen und entscheiden, welcher Abflussprozess sich an einem Standort einstellt 18
Fig. 3-4: Prozessbeurteilungsschema (PBS) für die Herleitung des dominanten Abflussprozesses unter Berücksichtigung der Schlüsselstellen 19
Fig. 3-5: Die aufgrund von Felduntersuchungen ermittelten dominanten Abflussprozesse an einer Hangsequenz im Hundsrück (Rheinland-Pfalz) 20
Fig. 3-6: a) Die Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet des Allenbachs bei Adelboden (Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, Tafel 5.7) 21
b) Charakteristische Gebietsreaktion des Allenbachs bei Starkregen 21
Fig. 3-7: a) Die Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet der Saltina bei Brig (Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, Tafel 5.7) 22
b) Charakteristische Gebietsreaktion der Saltina bei Starkregen 22
Fig. 3-8: a) Die Flächen unterschiedlicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet der Suze bei Sonceboz (Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, Tafel 5.7) 23
b) Charakteristische Gebietsreaktion der Suze bei Starkregen 23
Fig. 4-1: Erfassung der massgebenden Abflussprozesse in unterschiedlichen Skalenbereichen mit einigen bekannten Niederschlag-Abfluss-Modellen 25
Fig. 4-2: Oben: Zwei Einzugsgebiete von 5 km^2 mit unterschiedlichen Anteilen an rasch beitragenden Flächen (8% und 66%). Unten: Abflussreaktion der beiden Gebiete auf ein Gewitter (violett) und auf Landregen (rot) 26
Fig. 4-3: Vorgehensweise: Modelleinsatz bei der Abschätzung von Hochwasserabflüssen unter Berücksichtigung der Abflussprozesse 28
Fig. 4-4: Einzugsgebiet des Eibach (BL): Die Abflusstypen 1–5 beschreiben die zu erwartende Abflussreaktion der Teilflächen 29
Fig. 4-5: Der Aufbau des Modells QArea 30
Fig. 4-6: Grundlagen des Modells QArea 31
Fig. 4-7: Die Plausibilisierung des NAM anhand von zwei gemessenen Hochwasserereignissen im Eibach 32
Fig. 4-8: Vergleich der statistischen Verteilungen der beobachteten und simulierten Abflussmengen der Rhone in Brig (aus CONSUEGRA et al. 1998) 34
Fig. 4-9: Beobachtete und simulierte Abflussganglinien für die Rhone in Brig und für die Vispa in Visp. Der Vergleich erfolgte ohne Berücksichtigung der Gletscherkomponente (aus CONSUEGRA et al. 1998) 35
Fig. 4-10: Darstellung des Niederschlagsprozesses durch das NSRPM-Modell (FAVRE et al. 1997) 36
Fig. 4-11: Angewandter Ansatz zur Erstellung von Hochwasserszenarien 37
Fig. 4-12: Vergleich der statistischen Verteilungen des beobachteten und simulierten Abflusses der Vispa in Visp (aus CONSUEGRA et al. 1998) 38
Fig. 4-13: Hochwasservolumen, das für ein bestimmtes Ereignis oberhalb des gewählten Schwellenabflusses Qs liegt 38
Fig. 4-14: Hochwasservolumen, die oberhalb eines Schwellenabflusses liegen (Rhone in Brig); Vergleich der generierten Kurven mit den Kurven der beobachteten Hochwasser (aus CONSUEGRA et al. 1998)
Fig. 4-15: ...Vergleich der grössten jährlichen Hochwasserspitzen an der Station Drance de Bagnes – Le Châble 41
Fig. 4-16: Messstation Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch 42
Fig. 4-17: Höchste jährliche Abflussspitzen im Chamuerabach 44
Fig. 4-18: Extrapolation der Jahreshochwasserspitzen an der Station Chamuerabach – La Punt-Chamues-ch: Extremwertverteilung Typ 1 (E1), Allgemeine Extremwertverteilung (AE) und Log-Pearson-Typ 3 Verteilung (LP3) mit 80%-Vertrauensintervallen .. 45
Fig. 4-19: Extrapolation der Jahreshochwasserspitzen an der Station Chamuerabach: Allgemeine Extremwertverteilung (AE) und Parameterschätzverfahren Momentenmethode (MM), Maximum-Likelihood-Methode (MLM) und Methode der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente (WGM) mit 80%-Vertrauensintervallen 46
Fig. 4-20: Extrapolation der Jahreshochwasserspitzen an der Station Chamuerabach: Allgemeine Extremwertverteilung mit Parameterschätzverfahren Maximum-Likelihood und 80%-Vertrauensintervall 46
Fig. 4-21: Statistische Verteilung des simulierten Abflusses. Die schwarzen Punkte entsprechen Hoch-

wassern, deren Maximalabfluss höher als der Schwellenwert ist 50
Fig. 4-22: Beispiele von ausserordentlichen Hochwassern der Rhone in Sion 51
Fig. 4-23: Infiltrationsfunktion, die im Modell CRUEX verwendet wird 52
Fig. 4-24: Die Schematisierung des Abflusses auf einer geneigten rechteckigen Ebene, wie sie durch die Transferfunktion benutzt wird 52
Fig. 5-1: . Hochwasserabschätzung in mittelgrossen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen 55
Fig. 5-2: Karte der Testgebiete 55
Fig. 5-3: c-Wert im Programm HQx_meso_CH, umgesetzt nach HEUSSER (1947) 57
Fig. 5-4: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kürsteiner 58
Fig. 5-5: Zonenkarte für die α-Werte nach Zeller 59
Fig. 5-6: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Müller-Zeller 60
Fig. 5-7: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kölla meso 62
Fig. 5-8: Datengrundlage für das Modell GIUB'96 (aus WEINGARTNER 1999) 62
Fig. 5-9: Regionenspezifische Hüllkurve (Q_{max} = f(Fn) und HQ_{100} = f(Fn)) der Region M2 (aus WEINGARTNER 1999) 62
Fig. 5-10: Hochwasserregionen der Schweiz nach KAN (1995) 63
Fig. 5-11: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (Fn), HQ_{100} 65
Fig. 5-12: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (MQ), HQ_{100} 65
Fig. 5-13: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (Fn), Q_{max} 66
Fig. 5-14: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (MQ), Q_{max} 66
Fig. 5-15: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Momente 68
Fig. 5-16: Die Momente der spezifischen Jahreshochwasserspitzen der 95 Referenzgebiete 68
Fig. 5-17: Resultate der Hochwasserabschätzung nach BaD7 70
Fig. 5-18: Hauptformular von HQx_meso_CH 70
Fig. 5-19: Datensätze in HQx_meso_CH 71
Fig. 5-20: Hochwasserabschätzung mit dem Modell GIUB'96 71
Fig. 5-21: Hochwasserabschätzungen in verschiedenen Einzugsgebieten (Berechnung und Darstellung mit HQx_meso_CH) 72
Fig. 5-22: Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten 81
Fig. 5-23: Entscheidungsschema zur Bestimmung der Abflusskoeffizienten ψ (nach RICKLI & FORSTER 1997) 84
Fig. 5-24: Hüllkurve der maximalen gemessenen Niederschlagsintensitäten, aufgeteilt in Alpennord- und Alpensüdseite (FORSTER & BAUMGARTNER 1999) 87
Fig. 5-25: Normalfall, die Verfahren 1–3 liegen zwischen dem oberen und dem unteren Grenzwert 92
Fig. 5-26: Ein Verfahren überschreitet den oberen Grenzwert leicht 93
Fig. 5-27: Ein Verfahren überschreitet den oberen Grenzwert massiv 93
Fig. 5-28: Zwei Verfahren überschreiten den oberen Grenzwert 93
Fig. 5-29: Übersichtskarte über das Einzugsgebiet des Vogelbachs 95
Fig. 5-30: Ausschnitt aus der digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz 95
Fig. 5-31: Karte mit einer provisorischen Gebietseinteilung 96
Fig. 5-32: Bodenprofil im Vogelwald 96
Fig. 5-33: Gebietseinteilung nach der Feldbegehung 97
Fig. 5-34: Resultate der Hochwasserabschätzung für den Vogelbach 99
Fig. 5-35: Beispiel einer IDF-Kurve (Starkniederschläge in der Schweiz, RÖTHLISBERGER et al. 1979–1981–1992) 101
Fig. 5-36: Untersuchungsgebiet und Lage der Einzugsgebiete, die zur Entwicklung des Modells HYDRAT verwendet wurden. Die Zugehörigkeit der Einzugsgebiete zu einer der drei Regionen Voralpen, Mittelland und Jura ist ebenfalls dargestellt. 102
Fig. 5-37: Wachstumskurven für die Regionen Jura, Mittelland und Voralpen 104
Fig. 5-38: Umgebung des GIS GESREAU: Einzugsgebiet der Baye de Montreux in Montreux (14.6 km^2): Bodennutzung und Abfluss-Koeffizient, die Koeffizienten des Modells IDF von Montana für verschiedene Wiederkehrperioden und die hypsometrische Kurve 108
Fig. 5-39: Umgebung des GIS GESREAU (2): Einzugsgebiet der Baye de Montreux in Montreux: hydrografisches Netz, Teileinzugsgebiete, Kenngrössen, erhaltene Quantile durch die Methoden HYDRIF, HYDRAT, HYDREG und die Grenzwert-Quantile des Hinweis-Bereichs für verschiedene Wiederkehrperioden 109
Fig. 5-40: Längenprofil der Mentue von La Corbassière (1,95 km^2) bis Yvonnand (105 km^2) (Wasserlauf Nr. 6000). Darstellung des mit der Methode HYDREG bestimmten Spitzenabflusses HQ_{100} (grüne gestrichelte Linie) und der Grenzwerte des Hinweis-Bereichs (rote punktierte Linien) 109

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:Abschätzung des 100jährlichen Hochwassers der Sitter – Appenzell mit unterschiedlichen Datengrundlagen; der Referenzwert HQ_{100} beträgt 210 m^3/s (aus WEINGARTNER 1998)..... 11
Tab. 4-1: Abflusstabelle aus dem hydrologischen Jahrbuch der Schweiz..... 43
Tab. 5-1: c-Werte nach Kürsteiner resp. Heusser..... 56
Tab. 5-2: Abflusskoeffizient ψ nach Müller resp. Zeller..... 58
Tab. 5-3: Regionenspezifische Parameter a und b zur Ermittlung der Hüllkurve $Q_{max} = a \cdot Fn^b$ und der Regressionsgeraden $HQ_{100} = a \cdot Fn^b$ in Funktion der Gebietsfläche Fn (Modell GIUB'96 (Fn)) 63
Tab. 5-4: Regionenspezifische Parameter a und b zur Ermittlung der Hüllkurve $Q_{max} = a \cdot MQ^b$ und der Regressionsgeraden $HQ_{100} = a \cdot MQ^b$ in Funktion des mittlerern Jahresabflusses MQ (Modell GIUB'96 (MQ)) 64
Tab. 5-5: Gültigkeitsbereich der verschiedenen Modelle in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse ... 73
Tab. 5-6a: Räumlicher Gültigkeitsbereich der verschiedenen Modelle..... 73
Tab. 5-6b: Statistische Masszahlen der Gebietsparameter für das Modell Momente 74
Tab. 5-6c: Statistische Masszahlen der Gebietsparameter für das Modell BaD7 74
Tab. 5-7: Weitere Ursachen für ein allfälliges Modellversagen 74
Tab. 5-8: .Optimale β_R-Werte für die drei Regionen der Westschweiz (unabhängig von der Wiederkehrperiode) 100
Tab. 5-9: Über- und Unterschätzung der Referenz-Abflüsse mit HYDRAT in % (obere Tabelle: Wiederkehrperiode 5 Jahre; untere Tabelle: Wiederkehrperiode 100 Jahre) sowie «exakte resp. genügende» Schätzungen in % (nach NAEF 1983).....103
Tab. 5-10: Über- und Unterschätzung der Referenz-Abflüsse mit HYDRIF in % (obere Tabelle: Wiederkehrperiode 5 Jahre; untere Tabelle: Wiederkehrperiode 100 Jahre) sowie «exakte resp. genügende» Schätzungen in % (nach NAEF 1983).....105
Tab. 5-11: «Rahmen-Regional-Modell»: Spezifische Abflüsse (in $m^3/s/km^2$) in Abhängigkeit von der Region, der Flächenklasse und der Wiederkehrperiode x.....106
Tab. 5-12: Über- und Unterschätzung der Referenz-Abflüsse mit HYDREG in % (obere Tabelle: Wiederkehrperiode 5 Jahre; untere Tabelle: Wiederkehrperiode 100 Jahre) sowie «exakte resp. genügende» Schätzungen in % (nach NAEF 1983).....110