### Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 37

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

## **Rolf Weingartner**

## Regionalhydrologische Analysen Grundlagen und Anwendungen

Bern, Oktober 1999

Druck: Schüler AG, Jurastrasse 10, 2501 Biel

Bezugsadresse: Geographisches Institut ETH Bibliothek Winterthurerstrasse 190 CH-8057 Zürich

Telefon 01 - 635 52 13 Fax 01 - 362 51 97

Preis: CHF 50 .--

© Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL), Bern 1999

## Vorwort

lst es nicht immer wieder faszinierend, von einem Berggipfel aus unterschiedliche Landschaften zu überblicken und miteinander zu vergleichen? Eine ähnliche Faszination geht vom Studium einer Karte aus: verschiedenartige Natur- und Kulturlandschaften erkennen und analysieren, Details und Zusammenhänge entdecken, einen räumlichen Überblick gewinnen. Mit dem "Hydrologischen Atlas der Schweiz" (HADES) wurde Ende der 1980er Jahre ein Kartenwerk geschaffen, welches die hydrologischen Verhältnisse der Schweiz thematisch umfassend und in hoher räumlicher Auflösung darstellt. Es sind Karten entstanden, die "neue" Einblicke in die Hydrologie der Schweiz eröffnen und die in Forschung und Praxis gewinnbringend eingesetzt werden können. Dazu mussten umfangreiche regionalhydrologische Analysen durchgeführt werden. Die in früheren Jahren eher vernachlässigten Forschungszweige "Regionalisierung" bzw. "regionalhydrologische Analysen" erhielten dank dem Atlas wesentliche Impulse. Ich hatte und habe das Glück, den "Hydrologischen Atlas der Schweiz" aktiv mitgestalten zu dürfen. Der Atlas hat denn auch meine wissenschaftlichen Aktivitäten, aber auch jene der von mir geleiteten Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern massgeblich beeinflusst. Er bildete den Ausgangspunkt für umfassende regionalhydrologische Analysen, welche weit über den Rahmen des Atlasses hinausgingen. In der vorliegenden Arbeit werden die in diesen Aktivitäten gewonnenen Erfahrungen in ein Ganzes gefügt und zusammenfassend dargestellt. Im Mittelpunkt stehen dabei Untersuchungen, die von mir selber, mit meiner Beteiligung oder unter meiner Leitung entstanden sind.

Ohne die stete Unterstützung des "Hydrologischen Atlasses" und weiterer Projekte meiner Gruppe im In- und Ausland durch Prof. Manfred Spreafico wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. In verschiedenen Arbeitsphasen durfte ich mit Kolleginnen und Kollegen innerhalb und ausserhalb des Geographischen Instituts der Universität Bern einen regen Gedankenaustausch pflegen. Mit dem HADES-Team verbindet mich eine langjährige, freundschaftliche Zusammenarbeit. Ich möchte allen für ihre Unterstützung und ihre Beiträge zur vorliegenden Arbeit danken. Ein abschliessender Dank geht an die Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften (SANW), welche den Druck dieser Publikation ermöglichte.

Bern, im Oktober 1999

**Rolf Weingartner** 

.

## Zusammenfassung

Regionalhydrologische Analysen und Modelle tragen zu einem umfassenden Verständnis der räumlichen Variabilität hydrologischer Grössen bei. Sie sind deshalb in Forschung und Praxis unentbehrlich; insbesondere erlauben sie, hydrologische Kennwerte in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen abzuschätzen. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den theoretischen und methodischen Grundlagen solcher Analysen und zeigt anhand von zahlreichen Beispielen Anwendungsmöglichkeiten in Forschung und Praxis auf; dadurch eröffnet sie auch einen Einblick in die hydrologischen Verhältnisse der Schwelz.

Die räumliche Auflösung regionalhydrologischer Modelle erschliesst mesoskalige Einzugsgebiete mit Flächen zwischen etwa 10 und 1000 km<sup>2</sup>. Zusammengefasst unter dem Oberbegriff "Regionale Übertragung" lassen sich aus methodischer Sicht "Regionale Übertragungsfunktionen" und "Regional-taxonomische Verfahren" unterscheiden (s. Kapitel 1 der vorliegenden Arbeit). Bei diesen Verfahrensgruppen spielen Gebietskenngrössen als unabhängige Modellparameter eine entscheidende Rolle. Im zweiten Kapitel werden deshalb verschiedene Ansätze zur Gewinnung hydrologisch relevanter Gebietskenngrössen vorgestellt. Mit den Geographischen Informationssystemen ergeben sich dabei interessante Perspektiven; so lässt sich die Zahl ableitbarer Kenngrössen im Vergleich zu früher entscheidend erhöhen und die Prozessnähe durch die Berücksichtigung des Konzepts der beitragenden Flächen massgeblich verbessern.

Das dritte Kapitel unterstreicht den Stellenwert der Gebietskenngrössen bei der Entwicklung und Anwendung regional-taxonomischer Verfahren. Unter anderem werden die Ergebnisse einer Typisierung der 1050 Basisgebiete der Schweiz diskutiert. Bei dieser Typisierung stehen Ähnlichkeiten im Mittelwasserbereich im Vordergrund. Mit graphischen Ansätzen wie Gesichter-Darstellungen oder Andrews-Kurven können regional-taxonomische Verfahren transparenter gestaltet werden, wie das Beispiel der Identifikation von Repräsentativgebieten für die Abschätzung mittlerer Monatsabflüsse verdeutlicht.

Regionalhydrologische Modelle finden bei der Hochwasserabschätzung in der Praxis breite Verwendung. In einer umfangreichen Untersuchung, die im vierten Kapitel beschrieben wird, wurden deshalb die Güte und die Eignung jener Modelle beurteilt, welche in der Schweiz in den letzten Jahren entwickelt wurden. Es zeigt sich, dass auch die "besten" Modelle nur in rund 67% der Fälle exakte oder zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Verbesserungen ergeben sich in der kombinierten Anwendung dieser Modelle. In die Untersuchung einbezogen wurde auch das neu entwickelte Modell "GIUB", das aus einer Analyse der in schweizerischen Einzugsgebieten beobachteten höchsten Hochwasserspitzen (HHQ) hervorgegangen ist und eine Abschätzung 100jährlicher und extremer Hochwasserspitzenabflüsse erlaubt.

In der Schweiz besteht mit dem "Hydrologischen Atlas" seit 1989 ein einmaliges Medium zur Umsetzung und Verbreitung der Ergebnisse regionalhydrologischer Forschungsarbeiten. Das letzte Kapitel stellt diesen Atlas aus historischer, methodischer und inhaltlicher Sicht vor und zeigt sein breites Anwendungsspektrum in Forschung und Praxis auf.

## Résumé

Les analyses des variables hydrologiques régionalisées donnent une compréhension étendue de la variabilité spatiale des grandeurs hydrologiques. Elles sont indispensables, aussi bien dans la recherche que dans la pratique et permettent par exemple d'estimer certaines caractéristiques hydrologiques des bassins, sans mesures directes. Le travail présenté ici est consacré aux bases théoriques et méthodologiques de telles analyses et montre, par le biais d'un grand nombre d'exemples, comment elles peuvent être utilisées aussi bien dans le domaine de la recherche que dans la pratique. En même temps il permet une vision des conditions hydrologiqes qui prévalent en Suisse.

La résolution spatiale des modèles hydrologiques régionaux donne des résultats pour des bassins de grandeur moyenne, entre 10 et 1000 km<sup>2</sup>. Réunis sous l'appellation générale de 'transferts régionalisés' ("Regionale Übertragung"), ces procédés se distinguent du point de vue méthodologique en 'fonctions de transfert régionalisées' ("Regionale Übertragungsfunktionen") et 'procédures taxonomiques régionalisées' ("Regional-taxonomische Verfahren") (voir chapitre 1). Dans ce genre de procédures, les caractéristiques des bassins jouent un rôle décisif comme paramètres indépendants des modèles. C'est pourquoi on a présenté dans le deuxième chapitre un certain nombre de procédures permettant d'obtenir des caractéristiques des bassins versants. C'est là qu'interviennent les systèmes d'information géographique, qui permettent d'augmenter très nettement le nombre des caractéristiques pouvant être relevées et de se rapprocher des processus de formation des écoulements.

Dans un troisième chapitre sont soulignées les possibilités d'utilisation de ces caractéristiques de bassin, lors du développement et de l'application de procédures taxonomiques régionalisées. Entre autres, les résultats d'une caractérisation des 1050 bassins de base couvrant le territoire suisse sont discutés. Le but principal de cette caractérisation était d'identifier les ressemblances entre les bassins de base du point de vue des débits moyens. Des procédés graphiques ingénieux, dont certains utilisent la représentation stylisée de visages humains ('faces') ou des courbes dites d'Andrews, permettent d'appréhender d'un coup d'oeil des classifications complexes. Un exemple est donné ici avec l'identification de bassins représentatifs convenant à l'estimation de débits moyens mensuels.

En pratique, lors de l'estimation des débits de crue, les modèles hydrologiques régionaux se révèlent des plus fructueux. Une étude détaillée décrite dans un quatrième chapitre évalue les avantages et l'utilité des modèles développés en Suisse ces dernières années. Il s'est avéré que même avec les meilleurs modèles de crue, on n'obtient des résultats exacts ou simplement satisfaisants que dans environ 67% des cas. Des améliorations peuvent être obtenues en utilisant une combinaison de plusleurs modèles. Cette étude porte aussi sur le modèle GIUB conçu récemment en Suisse, qui est issu de l'analyse des pointes de crue extrêmes observées (HHQ). Ce modèle permet d'estimer les crues centennales et les débits de crue extrêmes.

Depuis 1989, l'Atlas hydrologique de la Suisse est l'outil de travail idéal pour la mise en oeuvre et la diffusion des travaux de recherche dans le domaine de l'hydrologie régionale. Cet Atlas est donc présenté dans un dernier chapitre, tant sur le plan de son histoire et de la méthodologie utilisée que sur celul du contenu. On y insiste sur son large spectre d'applications, dans la recherche comme dans la pratique.

## Summary

Regional hydrological analyses and models provide comprehensive information on the spatial variability of hydrological data and are thus essential to research and practice. By using such analyses and models it is possible to estimate hydrological values in catchments lacking direct measurements. The present work addresses the theoretical and methodological basis of such analyses and demonstrates, through a large number of examples, how they can be used in research and practice. At the same time they provide an insight into the hydrological conditions in Switzerland.

Regional hydrological models can supply estimations for mesoscale catchments of between 10 and 1000 km<sup>2</sup> (see Chapter 1). In connection with these models basin characteristics play a decisive role as independent parameters. For this reason, various procedures for obtaining hydrologically relevant basin characteristics are presented in the second chapter. Geographical Information Systems (GISs) offer interesting possibilities in this respect: the number of deducible characteristics can be considerably increased and accuracy improved.

The third chapter stresses the significance of basin characteristics in developing and implementing mesoscale hydrological models. Among other things, the results of a classification of the 1050 basic catchments in Switzerland are discussed. The central focus of this classification was to identify

similarities in respect to mean flow. It is possible to make procedures of classification more comprehensible using graphic aids such as faces or Andrews curves, as illustrated by the identification of representative stations for estimating mean monthly runoff.

In practice, regional hydrological models are widely acknowledged with regard to estimating floods. In a comprehensive study described in chapter 4, the advantages and suitability of such mesoscale models developed in Switzerland over the past few years were evaluated. This study showed that even the best models provide precise or at least acceptable estimations in only 67% of cases. Better results are obtained using a combination of models. The evaluation included the recently developed GIUB model which resulted from an analysis of maximum flood peaks (HHQ) observed in Swiss catchments; this model enables hydrologists to estimate 100-year and extreme flood peaks.

Since 1989 the Hydrological Atlas of Switzerland has represented a unique vehicle for implementing and publishing the results of regional hydrological research. The final chapter of the present work describes the historical and methodological aspects of the Atlas, as well as the thematic ground it covers. It also gives a good idea of the many ways in which it can be used in research and practice.

## Inhalt

| Vorwo                                            | rt                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | iii                              |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Zusam                                            | mentassung, Résumé, Summary                                                                                                                                                                                                                                                                                | v                                |
| Teil I:                                          | Grundlagen                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                  |
| 1                                                | Einleitung                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1                                |
| 1.1                                              | Zur Einordnung regionalhydrologischer Analysen                                                                                                                                                                                                                                                             | 1                                |
| 1.2<br>1.2.1<br>1.2.2<br>1.2.3                   | Methodische Aspekte regionalhydrologischer Analysen<br>Regionale Übertragungsfunktionen<br>Regional-taxonomische Verfahren<br>Regionale Übertragung                                                                                                                                                        | 3<br>3<br>4<br>5                 |
| 1.3<br>1.3.1<br>1.3.2<br>1.3.3<br>1.4            | Die Bedeutung des Betrachtungsmassstabs bei der hydrologischen Modellierung<br>Mikroskale<br>Mesoskale<br>Makroskale<br>Zielsetzung der Arbeit                                                                                                                                                             | 8<br>10<br>13<br>16<br>16        |
| 2                                                | Gehletskennarössen als Grundlage für regionalhydrologische                                                                                                                                                                                                                                                 |                                  |
| -                                                | Analysen                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 19                               |
| 2.1                                              | Einleitung                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 19                               |
| 2.2<br>2.2.1<br>2.2.2<br>2.2.3<br>2.2.4          | GIS-gestützte räumlich ungewichtete Erhebung von invarianten Gebietskenngrössen<br>A-priori-Raumgliederung<br>Bereitstellung der Datengrundlagen<br>Berechnung der Kenngrössen<br>Fazit                                                                                                                    | 23<br>25<br>28<br>30<br>31       |
| 2.3<br>2.3.1<br>2.3.2<br>2.3.3<br>2.3.4<br>2.3.5 | Prozessorientierte Erhebung von Gebietskenngrössen<br>Beitragende Flächen als Parametrisierungsebene<br>Der relative Flächenbeitrag<br>Prozessorientierte Berechnung der Gebietskenngrössen<br>Berechnung der beitragenden Fläche eines Einzugsgebietes<br>Bestimmung der Hochwasser-Disposition (HQ-DISP) | 31<br>32<br>34<br>37<br>40<br>40 |
| 2.4                                              | Analyse der linearen Zusammenhänge zwischen den invarianten Gebietskenngrössen der schweizerischen Basisgebiete                                                                                                                                                                                            | 43                               |
| 2.4.1                                            | Gesamtschweizerisches Kollektiv                                                                                                                                                                                                                                                                            | 44                               |
| 2.4.2                                            | Nordalpine Basisgebiete<br>Südalpine Basisgebiete                                                                                                                                                                                                                                                          | 46<br>50                         |
| 2.4.4                                            | Linear unabhängige Gebietskenngrössen – Zusammenfassung                                                                                                                                                                                                                                                    | 51                               |
| Teil II                                          | : Anwendungen                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                  |

| 3     | Identifikation hydrologisch ähnlicher Einzugsgebiete auf der Basis<br>von Gebietskenngrössen – Anwendungen im Mittelwasserbereich | 55 |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3,1   | Visualisierung der mehrdimensionalen Gebietseigenschaften in Gesichter-                                                           |    |
|       | Darstellungen                                                                                                                     | 55 |
| 3.1.1 | Konstruktion der Gesichter                                                                                                        | 55 |
| 3.1.2 | Anwendungsmöglichkeiten                                                                                                           | 58 |

| 3.2    | Klassifikation der Basisgebiete auf der Grundlage invarianter Gebietskenngrössen –<br>ein Beitrag zu einer regionalhydrologischen Taxonomie der Schweiz | 61         |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.1  | Methodische Aspekte                                                                                                                                     | 63         |
| 3.2.2  | Raumtypen der Mittelwasservariante                                                                                                                      | 64         |
| 3.2.3  | Hydrologische Interpretation                                                                                                                            | 66         |
| 3.2.4  | Beurteilung der Ergebnisse                                                                                                                              | 69         |
| 3.3    | Identifikation ähnlicher Einzugsgebiete mittels Andrews-Kurven zur Optimierung                                                                          |            |
|        | der Abschätzung mittlerer Monatsabflüsse                                                                                                                | 70         |
| 3.3,1  | Ausgangslage                                                                                                                                            | 70         |
| 3.3.2  | Andrews-Kurven                                                                                                                                          | 72         |
| 3.3.3  | Abschätzung des Jahresabflusses                                                                                                                         | 73         |
| 3.3.4  | Bestimmung des Repräsentativgebietes                                                                                                                    | 74         |
| 3.3.5  | Abschätzung der mittleren Monatsabflüsse                                                                                                                | 75         |
| 3.3.6  | Weitere Beispiele                                                                                                                                       | 77         |
| 3.3.7  | Folgerungen                                                                                                                                             | 78         |
| 4      | Regionalhydrologische Analysen im Hochwasserbereich                                                                                                     | 81         |
| 4.1    | Einleitung                                                                                                                                              | 81         |
| 4.2    | Hochwasserbeobachtungen und -analysen in der Schweiz                                                                                                    | 83         |
| 4.2.1  | Statistische Basisauswertungen der Hochwassermessreihen                                                                                                 | 85         |
| 4.2.2  | Auswertung der Unwetterschadensstatistik der Schweiz                                                                                                    | 86         |
| 4.2.3  | Zeitliche Extrapolation der Hochwasserreihen                                                                                                            | 91         |
| 4.3    | Regionale Übertragungsfunktionen und einfache Konzeptmodelle                                                                                            | 93         |
| 4.3.1  | Beurteilung regionalhydrologischer Modelle                                                                                                              | 94         |
| 4.3.2  | Einfache Formeln                                                                                                                                        | <b>9</b> 5 |
| 4,3.3  | Erweiterte Formein                                                                                                                                      | 96         |
| 4.3.4  | Momentenabschätzung und Regressionsanalyse (Modelle "Momente" und<br>"Regression")                                                                      | 96         |
| 4.3,5  | Das Laufzeitverfahren als einfaches Konzeptmodell (Modelle "Kölla" und "Kölla <sub>mod</sub> ")                                                         | 98         |
| 4.4    | Regional-taxonomische Verfahren                                                                                                                         | 103        |
| 4.4.1  | Ein regional-taxonomisch begründetes Abschätzverfahren für seltene Hochwasser                                                                           | 105        |
| 442    | Abschätzung extremer und 100iābrlicher Hochwasserspitzen über Hochwasser-                                                                               | 100        |
| 1. 1.2 | regionen (Modelle "GIUB-Q" und "GIUB-HQ")                                                                                                               | 111        |
| 15     | Hochwassorahschätzung in mososkaligen Einzugsgehisten mit kurzen Messreihen                                                                             |            |
| 4.0    | (ModellUnit Hydrograph")                                                                                                                                | 127        |
| 4.5.1  | Das Unit-Hydrograph-Verfahren                                                                                                                           | 127        |
| 4.5.2  | Analyse wichtiger Parameter der N/A-Ereignisse                                                                                                          | 129        |
| 4.5.3  | Ermittlung des repräsentativen Unit Hydrographen                                                                                                        | 132        |
| 4.5.4  | Hochwasserbernessung (Synthese)                                                                                                                         | 135        |
| 4.5.5  | Schlussbetrachtungen zum Unit-Hydrograph-Verfahren                                                                                                      | 138        |
| 4.6    | Vergleich der regionalhydrologischen Hochwasserabschätzverfahren                                                                                        | 138        |
| 4.6.1  | Grundlagen des Modellvergleichs                                                                                                                         | 139        |
| 4.6.2  | Modellvergleich                                                                                                                                         | 142        |
| 4.6.3  | Kombination mehrerer Modelle                                                                                                                            | 144        |
| 4.6.4  | Schlussempfehlungen                                                                                                                                     | 145        |

X\_\_\_\_\_

| Teil I                         | II: Umsetzung                                                                                                                                                                             |                          |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 5                              | Der "Hydrologische Atlas der Schweiz" (HADES)                                                                                                                                             | 147                      |
| 5.1                            | Einleitung                                                                                                                                                                                | 147                      |
| 5.2                            | Planung und Realisation des HADES                                                                                                                                                         | 148                      |
| 5.3<br>5.3.1<br>5.3.2<br>5.3.3 | Der HADES als Kartenwerk<br>Bedeutung der Karten<br>Kartenmassstab<br>Inhaltlicher und graphischer Aufbau                                                                                 | 152<br>152<br>153<br>154 |
| 5.4                            | Methodische Aspekte des HADES                                                                                                                                                             | 155                      |
| 5.5<br>5.5.1<br>5.5.2          | Bedeutung und Anwendungsmöglichkeiten des HADES<br>Kartenblatt-Typ "Messnetz"<br>Kartenblatt-Typ "Informationen zum Zustand der Gewässer bzw. der Systemelemente<br>des Wasserhausbaltes" | 156<br>156<br>158        |
| 5.5.3                          | Kartenblatt-Typ "Bemessungsverfahren"                                                                                                                                                     | 163                      |
| Litera                         | turverzeichnis                                                                                                                                                                            | 167                      |

xi

*,* 

# Teil I: Grundlagen

## 1 Einleitung

### 1.1 Zur Einordnung regionalhydrologischer Analysen

Die hydrologischen Beobachtungen, ihre Bearbeitung und Analyse bilden eine unentbehrliche Grundlage zur optimalen Nutzung und zum quantitativen wie qualitativen Schutz der Ressource Wasser. Aber auch zum Schutz der Bevölkerung vor Schäden, die durch das manchmal entfesselte Wasser verursacht werden, besteht ein grosser Bedarf an verlässlichen Unterlagen. Dimensionierungen und Planungen in der Hydrologie, in der Wasserwirtschaft und im Umweltschutz erfordern Daten und Informationen in unterschiedlichen Massstäben. Die Erfahrungen – nicht nur in der Schweiz – zeigen, dass die dazu notwendigen Unterlagen oftmals fehlen. Untersuchungen zur räumlichen Variabilität hydrologischer Grössen, die sich unter dem Begriff "regionalhydrologische Analysen" zusammenfassen lassen, tragen entscheidend zur Erweiterung der hydrologischen Kenntnisse bei; sie führen letztlich zu einer Abschätzung hydrologischer Grössen in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen.

In der Literatur wird anstelle von "regionalhydrologischen Analysen" oft von "Regionalisierung in der Hydrologie" gesprochen. Die Verwendung des Begriffs "Regionalisierung" kann jedoch zu Missverständnissen führen. Aus geowissenschaftlicher Sicht besitzt er eine fest umrissene Bedeutung im Sinne der Ausweisung räumlich zusammenhängender, in bezug auf eine Zielgrösse möglichst homogener Regionen. Regionalisierung in dieser engeren Definition ist ein Spezialfall der Typisierung von Raumeinheiten mit der zusätzlichen Bedingung der räumlichen Kontingenz (vgl. Schwentker und Streit 1983). Eine derart definierte Regionalisierung bildet einen Teilbereich regionalhydrologischer Analysen. In den folgenden Ausführungen wird "Regionalisierung" trotzdem synonym zum Fachausdruck "regionalhydrologische Analysen" verwendet, da sich "Regionalisierung" in weiten Teilen der Literatur als Oberbegriff etabliert hat.

Einen ausgezeichneten Überblick über Umfang und Bedeutung regionalhydrologischer Analysen vermittelt Beran im Vorwort zum Symposium "Regionalization in Hydrology" (IAHS 1990): "[..] regionalization is a scientifically and practically important subdivision of hydrological science. Two broad approaches are encompassed in the term of 'regionalization':

- · Quantifying the components of the hydrological cycle at a regional scale;
- Establishing links between hydrological variables and the physiographic, climatic and land cover characteristics of the region.

Regionalization enables hydrologists (i) to order and understand their observation; (ii) to construct models at the basin scale from knowledge and data which have been accumulated from smaller scale units; and (iii) to make predictions about hydrological quantities at sites where data are absent or inadequate, frequently for design purposes."

Zwei Aspekte, die später noch eingehend diskutiert werden, sind hier besonders hervorzuheben:

- 1. Der Betrachtungsmassstab bildet ein wichtiges Kriterium zur Einordnung regionalhydrologischer Analysen;
- Gebietskenngrössen und damit alle räumlichen Aspekte sind für regionalhydrologische Analysen und für die dabei entwickelten Modelle von grundlegender Bedeutung. Der geographische Raum als Träger hydrologischer Informationen steht im Mittelpunkt des Interesses.

Das Zitat von Beran unterstreicht im weiteren den Stellenwert regionalhydrologischer Analysen bei der Lösung von Fragen der täglichen Praxis, deren Bedürfnisse stets eine wichtige Triebfeder für die Entwicklung regionalhydrologischer Modelle bildeten. Dabei wurde und wird oftmals sehr pragmatisch vorgegangen. Gefragt waren und sind einfache, eingespielte Verfahren, die mit geringem Zeitaufwand zu einer Abschätzung hydrologischer Grössen in Einzugsgebieten führen, welche über keine oder nur wenige Messdaten verfügen. Den zunehmenden Genauigkeitsansprüchen genügen diese einfachen Ansätze aber in der Regel nicht mehr. Lang (1992) weist zu Recht darauf hin, dass dieser Pragmatismus die Weiterentwicklung der Hydrologie behinderte. Bei einfachen Modellen ist der Aufwand, um zu einem Ergebnis zu gelangen, meistens sehr klein; es besteht jedoch ein erhebliches Risiko darin, dass ein System nicht genügend repräsentiert wird und sich somit ungenaue Abschätzungen ergeben. Hingegen scheitert die Anwendung komplexer Modelle, welche ein System in der Regel sehr gut abbilden, oftmals am Aufwand zur Kalibrierung des Modells.



A: Risiko, dass das Modell das System nicht repräsentiert

B: Aufwand zur Modellierung

Abbildung 1-1: Zur Bedeutung der Modellkomplexität Figure 1-1: Significance of model complexity (A: Risk that the system is not represented by the model; B: Effort in modelling)

Diese Zusammenhänge zwischen der Modellkomplexität auf der einen, dem Risiko/Aufwand auf der anderen Seite sind in Abbildung 1-1 in allgemeiner Form festgehalten: Die optimale Modellkomplexität liegt im Schnittpunkt der beiden Kurven A und B, bei dem die Summe aus Rislko und Aufwand minimal ist, bei dem also ein möglichst kleines Risiko einem möglichst kleinen Modellierungsaufwand gegenübersteht. Um dieses Optimum zu erreichen, müssen die regionalhydrologischen Verfahren erweitert und verbessert werden: "We are forever trying to push the regional approach deeper into the hydrological system as practical requirements demand more and more from our subject" (Beran 1990). Zukunftsgerichtet meint Beran weiter: "It is my belief that we are entering a time where the regional approach is more than a tool for incorporating regional information into site estimates, and is becoming a necessity in its own right because of the problems be faced are of regional nature". Auf die wachsende Bedeutung der regionalhydrologischen Betrachtungsweise weist auch der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft veröffentlichte Bericht "Regionalisierung in der Hydrologie" (Kleeberg 1992) hin. Diese Studie verdeutlicht, dass die mit den regionalhydrologischen Analysen zusammenhängenden Probleme seit Jahren wohl diskutiert werden, ohne dass es aber bisher gelungen ist, die Aktivitäten zu konzentrieren, um die bestehenden Forschungsdefizite zu beseitigen.

In der Schweiz hat die regionalhydrologische Forschung in den letzten Jahren nicht zuletzt dank des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" (Weingartner und Spreafico 1992, 1995, 1997, 1999) entscheidende Impulse erhalten. Ausgehend von den bei der Bearbeitung dieses Atlasses gewonnenen Erfahrungen will die vorliegende Arbeit - wie in Kapitel 1.4 beschrieben -

- die Grundlagen zur Durchführung regionalhydrologischer Studien verbessern,
- Neu- und Weiterentwicklungen regionalhydrologischer Modelle vorstellen und
- Möglichkeiten der Umsetzung regionalhydrologischer Erkenntnisse in Forschung und Praxis diskutieren.

## 1.2 Methodische Aspekte regionalhydrologischer Analysen

Stellvertretend für die zahlreichen Definitionen der Regionalisierung bzw. der regionalhydrologischen Analysen seien im folgenden Acreman und Wiltshire (1989) sowie Gottschalk (1985) zitiert. Die beiden Zitate bilden den Ausgangspunkt zur Diskussion der zwei wesentlichen methodischen Eckpfeiler regionalhydrologischer Analysen.

### 1.2.1 Regionale Übertragungsfunktionen

"Regionalisation, in its traditional useage, may be defined as the interpolation of location-specific data across a spatially continuous area. Use of the technique is widespread in the geographical sciences whenever the need arises to transfer information from points where it is available to points where it is absent or in some way deficient. The most widely used product of regionalisation is the isoline map" (Acreman und Wiltshire 1989). Gemäss dieser Definition bildet die Lage im Raum ein entscheidender Faktor für die Ausprägung eines Geoelements. Wie die beiden Autoren aber an anderer Stelle richtig bemerken, trifft die Voraussetzung des räumlichen Kontinuums - das Phänomen, dass sich Geoelemente über den Raum hinweg stetig ändern – nur für bestimmte hydrologische Grössen und für bestimmte Raum- und Zeitskalen zu. Der Abfluss beispielsweise, der von einer Reihe varianter und invarianter Faktoren gesteuert wird, zeigt in der Regel ein räumlich diskontinuierliches Verhalten: Benachbarte Einzugsgebiete weisen oft ein unterschiedliches Abflussverhalten auf. Isolinienkarten, wie sie von Acreman und Wiltshire erwähnt werden, sind aus diesem Grund als Darstellungsform nicht immer geeignet. Geostatistische Verfahren, die von räumlichen Persistenzeffekten ausgehen, können in diesen Fällen nicht zur Beschreibung der räumlichen Variabilität hydrologischer Grössen eingesetzt werden. Die Wahl des Verfahrens hängt somit entscheidend von der hydrologischen Zielgrösse ab. Das Ziel dieser Verfahren ist die Entwicklung von Modellen, welche die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen erklären.

Die Analyse, Simulation sowie die Inter- und Extrapolation raumvarianter Strukturen sind Schwerpunkte der regionalhydrologischen Forschung. Dabei spielen die sogenannten regionalen Übertragungsfunktionen (Schwentker und Streit 1983) eine wichtige Rolle. Das grundlegende Prinzip bei den regionalen Übertragungsfunktionen besteht darin, hydrologische Grössen oder die Parameter eines hydrologischen Modells in Funktion varianter und invarianter Gebietskenngrössen zu setzen. Prozesse, die im Einzugsgebiet ablaufen, werden dabel nicht im kausalanalytischen Sinn betrachtet. 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 Landnutzungverhältnisse (z.B. Anteil bewaldeter Flächen),
- die klimatologischen Bedingungen (z.B. Strahlung, Temperatur, Niederschlag) sowie
- die anthropogenen Beeinflussungen (z.B. Versiegelungsgrad).

Mit den regionalen Übertragungsfunktionen wird die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen mathematisch formuliert, so dass sich räumliche Prognosen ableiten lassen, die eine möglichst exakte Abschätzung hydrologischer Grössen in Raumeinheiten erlauben, für die keine Messwerte zur Verfügung stehen. Dabei lassen sich im wesentlichen drei Verfahrensgruppen unterscheiden:

- Nachbarschaftsverfahren: Die Werte benachbarter Stationen werden direkt oder indirekt beispielsweise unter Verwendung einer Distanzgewichtung – übertragen.
- Regressionsanalytische Verfahren: Bei den Regressionsmodellen werden hydrologische Kenngrössen in Funktion unabhängiger Gebietskenngrössen dargestellt. Die Optimierung dieser Funktion erfolgt in gemessenen Gebieten mit bekannten Parameterwerten. Regressionsmodelle sind als regionale Übertragungsfunktionen sehr beliebt und werden entsprechend häufig eingesetzt.

Eine wichtige Anwendung der multiplen Regressionsanalyse ist die Trendflächenanalyse, welche über die koordinatenmässige Flxierung einer Raumeinheit versucht, einen Variablenwert zu schätzen. Die Regressions- und die Trendflächenanalyse liefern kein physikalisch begründetes, erklärendes Modell der raumvarianten Strukturen, sondern primär eine formale Darstellung der räumlichen Variabilität einer hydrologischen Grösse (vgl. Nipper 1981).

Geostatistische Ansätze: Zur Beschreibung der räumlichen Variabilität der interessierenden hydrologischen Zielgrösse wird als erstes ein Variogramm berechnet, das die räumliche Variabilität quantitativ beschreibt: "Das Variogramm liefert Informationen über die 'Kontinuität' des Parameters. Messwerte, die in kleinerer Entfernung voneinander liegen als der Einflussbereich des Variogramms, werden als statistisch nicht unabhängig betrachtet" (Bárdossy 1995). Diese Messwerte können deshalb für die Schätzung einer hydrologischen Grösse herangezogen werden. Dazu werden sie gewichtet. Die Grösse dieser Gewichte wird mit dem Kriging-Gleichungssystem bestimmt, das mit Hilfe des Variogramms und der Lageparameter (Koordinaten) der Messpunkte aufgestellt wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, sogenannte externe Informationen (Gebietskenngrössen) in die Berechnung mitelnzubeziehen.

Regionale Übertragungsfunktionen werden in der Literatur recht häufig beschrieben (vgl. Schmidt 1988). Für den schweizerischen Raum ist in diesem Zusammenhang auf die Arbeiten von Binggell (1974), Lang (1978), Baumgartner, Reichel und Weber (1983), Naef (1983), Aschwanden (1985), Mäder (1985), Spreafico (1986) und Weingartner und Spreafico (1990) hinzuweisen. Die in diesen Aufsätzen diskutlerten regionalen Übertragungsfunktionen wurden für bestimmte hydrologische Grössen und bestimmte Räume entwickelt. Räumlich und thematisch breit angelegte Untersuchungen fehlten bisher in der Schweiz.

#### 1.2.2 Regional-taxonomische Verfahren

"Regionalization means areal classification; i.e. the ability to attach to some location a label or number which is hydrologically meaningful". Die Definition von Gottschalk (1985) geht vom klassischen Verständnis der Regionalisierung aus, im Sinne einer "Unterteilung der Landoberfläche in Regionen mit ähnlichem oder einheitlichem hydrologischen Regime" (Becker 1992). Hydrologische Prozesse sind allgemein sehr variabel in Raum und Zeit. Das Bestreben hydrologischer Analysen ist es, das Mass an Determiniertheit und Regelmässigkeit in den hydrologischen Prozessen herauszuarbeiten. Mit den beiden von Gutknecht (1993) geprägten Begriffen "Differenzierung" und "Struktur" wird das Phänomen angesprochen, dass bei hydrologischen Prozessen immer wieder zeitliche und räumliche Abschnitte mit ähnlichem Verhalten auftreten. Ein markantes Beispiel für die zeitliche Differenzlerung "bildet das Auftreten von 'Ereignissen' und 'Pausen' im Niederschlagsprozess, das auch alle vom Niederschlagsgeschehen beeinflussten Vorgänge - Bodenfeuchteentwicklung, Verdunstung, Abfluss, Feststofftransport etc. - prägt" (Gutknecht 1993). Bei räumlichen Analysen lässt sich oftmals die Existenz von Strukturen beobachten, d.h. von Gebieten, Zonen oder Regionen mit einer bestimmten Ausprägung eines hydrologischen oder eines hydrologisch relevanten Merkmals. Hinter dem klassischen Ansatz steht somit die Absicht, hydrologisch aussagekräftige Raumstrukturen zu erkennen, also Einzugsgebiete oder Räume mit einem ähnlichen hydrologischen Verhalten zu ermitteln.

In den 1960er Jahren wurde von der UNESCO im Rahmen der "Internationalen Hydrologischen Dekade" die Schaffung von sogenannten Repräsentativgebieten gefördert. "Hydrological data are of the greatest value when they are derived from a long-term record. It is impractical, however, to develop long-term records at too great number of sites, and the best method of overcoming this difficulty is by selecting one catchment to represent a particular region within which there is a hydrological similarity. 'Hydrological similarity' implies similarity in hydrological characteristics, such as mean flows, low flows, infiltration capacities within a region" (Toebes 1963). Obwohl weltweit eine grosse Zahl solcher Repräsentativgebiete geschaffen wurde, ist der eigentliche methodische Durchbruch bis heute noch nicht gelungen. Das Konzept der Repräsentativgebiete ist deshalb nicht mehr unbestritten: Zwar lassen sich für die Repräsentativgebiete interessante Aussagen in bezug auf die intern ablaufenden hydrologischen Prozesse ableiten (z.B. Schädler und Bigler 1995), eine befriedigende räumliche Übertragung der Messergebnisse ist jedoch nur in den wenigsten Fällen gelungen, weil die Frage der räumlichen Repräsentativität dieser Gebiete im nachhinein nicht befriedigend beantwortet werden konnte. Dies verdeutlicht die Problematik des klassischen Ansatzes: Die Ausweisung hydrologisch ähnlich reagierender Gebiete stellt eine grosse Herausforderung dar und gelingt nicht immer. Einzugsgebiete, Regionen oder Raumtypen mit gleichen oder sehr ähnlichen hydrologischen Elgenschaften im umfassenden Sinn gibt es nicht; Ähnlichkeiten lassen sich – wenn überhaupt – nur problembezogen, also bezüglich einer bestimmten hydrologischen Grösse bestimmen. Beim Repräsentativgebietsansatz ist deshalb bei jeder hydrologischen Grösse die Frage "repräsentativ wofür?" neu zu beantworten!

Schwentker und Streit (1983) fassen die 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; sie erlauben es, die Komplexität der realen Welt zu reduzieren. Taxonomische Verfahren basieren auf Gebietskenngrössen und/oder auf hydrologischen Grössen.

Bei der Abschätzung hydrologischer Grössen in ungemessenen Einzugsgebieten ist folgendes Vorgehen denkbar:

- 1. Bildung von Raumtypen oder Regionen nach einem geeigneten, zielgrössenorientierten Typisierungsansatz;
- 2. Zuordung des Gebietes ohne Messdaten zu einem Raumtyp bzw. zu einer Region;
- 3. Übernahme der typspezifischen hydrologischen Kennwerte oder Modellparameter.

Streit (1992) diskutiert den Einsatz taxonomischer Verfahren bei regionalhydrologischen Analysen und gelangt zum Schluss, dass die Möglichkeiten mathematisch-statistischer Klassifikationsverfahren bislang noch zu wenig genutzt wurden. Anwendungsbeispiele liegen im deutschsprachigen Raum beispielsweise von Herrmann (1973), Symader (1980), Weingartner und Aschwanden (1992), Düster (1994) und Breinlinger (1995) vor. Im angelsächsischen Raum sind unter anderem die Arbeiten von Julian et al. (1967), de Coursey (1972), White (1975), NERC (1975), Mosley (1981), Acreman und Sinclair (1986) und Nathan und Mc Mahon (1990) erwähnenswert. Sie vermitteln einen guten Überblick über die Entwicklung regional-taxonomischer Methoden in den letzten dreissig Jahren.

#### 1.2.3 Regionale Übertragung

Die beiden Ansätze "regional-taxonomische Verfahren" und "regionale Übertragungsfunktionen" lassen sich unter dem Oberbegriff "regionale Übertragung" zusammenfassen (Schwentker und 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 regional differenzierter Modelle 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. Dies soll am Beispiel der Abschätzung mittlerer Jahresabflüsse in schweizerischen Einzugsgebieten verdeutlicht werden: Auf den ersten Blick fällt in Tabelle 1-1 auf, dass das für die gesamte Schweiz gültige Globalmodell und die regional differenzierten Modelle ähn-

Modellen erkennbar sind. Eine genauere Analyse zeigte aber (Aschwanden 1985),

- dass die Standardabweichung der Residuen bei den regional differenzierten Modellen kleiner ist als beim Globalmodell und
- dass das Globalmodell die mittleren Jahresabflüsse der Alpennordselte tendenziell überschätzt, jene der Alpensüdseite tendenziell unterschätzt. Die Residuen des Globalmodells sind somit räumlich autokorreliert.

Die in Tabelle 1-1 beschriebenen regional differenzierten Modelle basieren auf sehr groben, nur geographisch, aber nicht hydrologisch begründeten räumlichen Strukturen. Durch eine gezielte, hydrologisch motivierte Raumgliederung liesse sich die Aussagekraft dieser Modelle weiter verbessern. Mit regional differenzierten Modellen wurden auch in anderen Untersuchungen sehr gute Erfahrungen gemacht. Es sei in diesem Zusammenhang beispielsweise auf die Arbeiten von Newson (1978) und von Baumgartner, Reichel und Weber (1983) verwlesen.

Tabelle 1-1: Globalmodell und regional differenzierte Modelle zur Abschätzung langjähriger mittlerer Jahresabflusshöhen in schweizerischen Einzugsgebieten zwischen 10 und 500 km² (aus Weingartner und Aschwanden 1992)

Table 1-1: Global and regional models for estimating long-term mean annual runoff in Swiss catchments ranging between 10 and 500 km<sup>2</sup>

| Region                    | Modell                                                                                                                      | r <sup>2</sup> [%] | Wertebereiche                                                                                                                               |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Globalmodell              |                                                                                                                             |                    |                                                                                                                                             |
| Schweiz                   | $A = 1.51 N_{so} - 147.72 (N_{so}/N_{v,l})^2 - 8381.87 \ln (Temp + 273.15) + 49.49 \ln(mV + 1) + 47135$                     | 87                 | $500 \le N_{\infty} \le 1500 \text{ mm}$<br>$0.6 \le N_{\infty}/N_{w'} \le 2.1$<br>$-5 \le Temp \le 11.5 \text{ °C}$<br>$0 \le mV \le 67\%$ |
| Regional differenzierte M | odelle                                                                                                                      |                    |                                                                                                                                             |
| Alpennordselte            | $A = 1.39 N_{so} - 158.45 (N_{so}/N_{wh})^2$<br>- 11152.54 ln ( <i>Temp</i> + 273.15)<br>+ 66.59 ln( <i>mV</i> + 1) + 62792 | 95                 | 500 ≤ N <sub>∞</sub> ≤ 1500 mm<br>1.0 ≤ N <sub>∞</sub> /N <sub>W/</sub> ≤ 1.8<br>– 2 ≤ Temp ≤ 9 °C<br>0 ≤ mV ≤ 36%                          |
| Inneralpiner Bereich      | $A = 1.08 N_{so} - 134.73 (N_{so}/N_{wi})^2 + 105.99 \ln(mV + 1) + 362$                                                     | 80                 | $600 \le N_{so} \le 1500 \text{ mm}$<br>$0.6 \le N_{so}/N_{wi} \le 1.8$<br>$0 \le mV \le 67\%$                                              |
| Alpensüdseite             | $A = 2.06 N_{so} - 18901.57 \text{ in } (Temp + 273.15) - 0.24 Rel + 105978$                                                | 87                 | 800 <i>≤ N<sub>so</sub> ≤</i> 1300 mm<br>–1.5 <i>≤ Temp ≤</i> 11.5 °C<br>350 <i>≤ Rel ≤</i> 3050 m                                          |

- A langjährige mittlere Höhe des Jahresabflusses (mm)
- N<sub>so</sub> Gebletsniederschlag Sommer (mm)
- $N_{SO}/N_{W7}$  Quotient aus Sommer- und Wintergebietsniederschlag [-]
- Temp Jahresmitteltemperatur [°C ]
- Rel Maximale Höhendifferenz im Einzugsgebiet (m)
- mV areale Vergletscherung [%]
- r<sup>2</sup> Bestimmtheitsmass

In der bisherigen Diskussion wurde stets davon ausgegangen, dass das grundlegende Problem bei regionalhydrologischen Analysen allein in der Übertragung von hydrologischen Informationen von einem gemessenen auf ein ungemessenes Einzugsgebiet liegt. Es müssen aber weitere Varianten berücksichtigt werden, insbesondere

- die Übertragung hydrologischer Daten und Informationen von einem Punkt auf einen anderen,
- die Übertragung von punktuell vorliegenden Informationen auf die Fläche,
- die Übertragung von Informationen kleinerer Flächen auf grössere und
- die Übertragung von Informationen von grösseren Flächen auf kleinere.

In Anlehnung an Becker (1992) lassen sich drei Haupttypen der Übertragung unterscheiden:

#### 1) "Generalisierung und Verallgemeinerung":

Bestimmen der flächenmässigen Verteilung bzw. der räumlichen Variabllität einer hydrologischen Grösse mittels Verfahren der regionalen Übertragung. Dabei bleibt der räumliche Datentyp erhalten. Liegen beispielsweise als Ausgangsdaten Punktwerte vor, so werden bei diesem ersten Haupttyp wiederum Aussagen bezüglich Raumpunkten abgeleitet.

#### 2) "Flächenmässige Aggregation" (Upscaling):

Räumliche Integration punktuell oder kleinflächig vorliegender Daten und Informationen über grössere Räume durch die Bildung von Flächensummen oder Flächenmittelwerten. Die räumliche Struktur der Daten wird dadurch verändert und vereinfacht. Ein bekanntes Beispiel für die flächenmässige Aggregation ist die Bestimmung des Gebietsnlederschlags. Die räumlichen Aggregationsverfahren werden auch bei der Berechnung von Gebietskenngrössen häufig eingesetzt: Die meisten heute zur Anwendung gelangenden Übertragungsansätze sind sogenarinte Punktmodelle (Kleeberg und Cemus 1992). Die räumlich differenzierten Informationen über ein Einzugsgebiet müssen dazu mittels flächenmässiger Aggregation auf einen Punkt (z.B. Gebietsausgang, Schwerpunkt des Einzugsgebletes) reduziert werden. Dabei werden räumliche Mittelwerte wie die mittlere Gebietshöhe oder Flächenanteile wie der Vergletscherungsgrad berechnet. Diese Gebietskenngrössen werden bei der regionalen Übertragung mit den räumlich integral vorliegenden hydrologischen Informationen (Gebietsniederschlag, -abfluss, -verdunstung usw.) verbunden. In vielen Fällen stellt somit die flächenmässige Aggregation einen wichtigen Vorbereitungsschritt zur regionalen Übertragung hydrologischer Grössen dar. Aus Gründen der Datenvergleichbarkeit muss gerade bei der Berechnung von Gebietskenngrössen darauf geachtet werden, dass Aggregationsansätze nur in Einzugsgebieten ähnlicher Grösse angewandt werden, damit die Daten einen vergleichbaren Generalisierungsgrad aufweisen. Ein gewichtiger Nachteil der flächenmässigen Aggregation ist der Verlust an Informationen über die Lagebeziehungen im Raum. So ist es für die Beurteilung der Abflussbildung wichtig zu wissen, in weicher gerinnenahen bzw. gerinnefernen Position ein hydrologisch relevanter Parameter wie beispielsweise eine Waldfläche liegt. In Kapitel 2.3 werden wir deshalb einen Ansatz vorstellen, bei dem der Informationsverlust der flächenmässigen Aggregation minimiert wird.

#### 3) "Flächenmässige Disaggregation" (Downscaling):

Zlel der flächenmässigen Disaggregation ist die räumliche Verfeinerung der auf einem höheren räumlichen Integrationsniveau vorliegenden Daten und Informationen (vgl. Streit 1984). Besonders im Bereich des Abflusses sind Disaggregationsansätze sehr wichtig, da hier a priori keine räumliche Differenzierung des an einem Pegel räumlich integral gemessenen Abflusses innerhalb des Einzugsgebietes möglich ist. Ein Beispiel dazu bildet die Disaggregation der Abflussepende: Aschwanden (1985) hat für schweizerische Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 500 km<sup>2</sup> ein Modell entwickelt, das bei der Disaggregation die Höhen- und Niederschlagsverhältnisse mitberücksichtigt (Formel 1-1).

$$Mq = \left(0.6617 \cdot \frac{mH}{mH_{ref}} + 0.3904 \cdot \frac{N}{N_{ref}}\right) \cdot Mq_{ref}$$
(1-1)

| Mq  | mittlere Jahresabflussspende des ungemessenen             |
|-----|-----------------------------------------------------------|
| -   | Einzugsgebietes [l/s km²]                                 |
| mН  | mittlere Gebietshöhe des ungemessenen Einzugsgebietes [m] |
| N   | Jahresniederschlag des ungemessenen Einzugsgebietes [mm]  |
| ref | Werte des gemessenen Referenzgebietes                     |

In grösseren Einzugsgebieten können regional-taxonomische Ansätze, die auf Gebietskenngrössen basieren, einen Beitrag zur Disaggregation hydrologischer Grössen leisten.

Mit den bisher diskutierten Bausteinen lässt sich das in Abbildung 1-2 dargestellte "Gebäude" regionalhydrologischer Analysen aufbauen: Bei den regionalhydrologischen Analysen wird die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen untersucht; dazu werden die methodischen Möglichkeiten der regionalen Übertragung eingesetzt, um vor allem auch praxistaugliche Modelle zur Abschätzung hydrologischer Grössen in ungemessenen Einzugsgebieten zu entwickeln.



Abbildung 1-2: Das "Gebäude" regionalhydrologischer Analysen Figure 1-2: Framework for regional hydrological analyses

### 1.3 Die Bedeutung des Betrachtungsmassstabs bei der hydrologischen Modellierung

Die Anwendbarkeit und Aussagekraft hydrologischer Modelle hängt wesentlich vom Betrachtungsmassstab ab. Mit der Skale<sup>1</sup> wird weitgehend entschieden, wie und in welchem Detaillierungsgrad sich die physikalischen Prozesse eines hydrologischen Systems abbilden lassen. Der Betrachtungsmassstab bestimmt die Kausalität, die räumliche Differenzierung und die zeitliche Auflösung eines hydrologischen Modells. Deshalb bilden die räumliche und zeitliche Differenzierung eines Modells die Hauptmerkmale einer Modellklassifikation (Nemec 1993).

Becker (1986) erstellte eine Übersicht über die hydrologisch relevanten Raumskalen und die damit zusammenhängenden Zeitskalen. Wie Abbildung 1-3 verdeutlicht, sind für jeden Skalenbereich (Grössenklasse) spezifische hydrologische Aussagen und Ergebnisse zu erwarten. Ausgehend von dieser Abbildung unterscheiden wir im folgenden drei Skalenbereiche, wobei die Übergänge zwischen den einzelnen Skalenbereichen fliessend sind.

#### Mikroskale:

Die mikroskalige Ebene umfasst einerseits die topische Dimension, bei der die Flächen der betrachteten Einheiten sehr klein sind (Quadratmeter- bis Hektarbereich) und andererseits die chorische Dimension mit Raumgrössen im Bereich mehrerer Hektaren bis einiger Quadratkilometer. Die chorische Dimension ihrerseits deckt nach Abbildung 1-3 auch grosse Teile der "small mesoscale", des unteren mesoskaligen Bereichs, ab.

<sup>&</sup>quot;Skale" abgeleitet vom engl. "scale".

#### Mesoskale:

Die mesoskalige Ebene schliesst Einzugsgebiete mit Flächen zwischen etwa 10 und etwa 1000 bis 10'000 km<sup>2</sup> ein und entspricht damit weitgehend der "large mesoscale". In Abweichung zur Abbildung 1-3 bezeichnen wir diese Dimension als "regional".

#### Makroskale:

Die (sub-) kontinentale bis globale Dimension der Makroskale beinhaltet Raumeinheiten mit Flächen von über 10'000 km<sup>2</sup>.



Abbildung 1-3: Skalen in der Hydrologie (nach Becker 1986, aus Nemec 1993) Figure 1-3: Hydrological scales

Zwischen diesen Skalen und den hydrologischen Modellen lässt sich folgender genereller Zusammenhang ableiten: Ein hydrologisches Modell  $y = g(x_k, y_k, z_k, t)$  muss in der Lage sein, die Ausprägung bzw. den Zustand einer hydrologischen Grösse y zum Zeltpunkt t an beliebigen Raumpunkten  $x_{k_1}, y_{k_2}, z_{k_3}$  die eine bestimmte Fläche repräsentieren, abzuschätzen (Plate 1992). Die Skalen bestimmen die Grösse der Raumeinheiten, über welche die Funktion g räumlich integriert wird, und damit die räumliche Auflösung und den Generalisierungsgrad eines hydrologischen Modells. In der Mikroskale sind diese Raumeinheiten sehr klein, so dass ein mikroskaliges hydrologisches Modell eine sehr hohe räumliche Auflösung besitzt und entsprechend detailliert und physikalisch basiert aufgebaut werden muss. In der Makroskale führt die räumliche Integration der Funktion g über Raumeinheiten >10'000 km² hingegen nur zu generellen wasserhaushaltlichen Aussagen. Es stehen hier Prozesse im Vordergrund, "die durch globale Effekte wie Wirkung der Erdumdrehung, Sonneneinstrahlung und Landmassenverteilung bewirkt oder beeinflusst werden" (Plate 1992). Jede der drei Skalen beinhaltet spezifische Ansätze zur hydrologischen Analyse und Modellierung (Abb. 1-4). Entsprechend unterschiedlich fallen die Aussagen und Anwendungsmöglichkeiten dieser Modelle aus (Abb. 1-3). Im folgenden werden die skalenspezifischen Aspekte der hydrologischen Modellierung übersichtsmässig diskutiert, um die regionalhydrologischen Analysen auch aus der Sicht des Betrachtungsmassstabs einzuordnen. Dabei ist jedoch stets zu beachten, dass zwischen den Skalenbereichen keine eindeutigen Grenzwerte bestehen, so dass sich einzelne der nachfolgenden Aussagen auch auf den nächsthöheren oder nächsttieferen Skalenbereich beziehen können.



Abbildung 1-4: Mikro-, Meso- und Makroskale im Vergleich Figure 1-4: Comparison of micro-, meso- and macroscales

#### 1.3.1 Mikroskale

Um elne hohe räumliche Auflösung der oben dargestellten Funktion  $g(x_k, y_k, z_k, t)$  zu erreichen, müssen die hydrologisch relevanten Prozesse physikalisch möglichst exakt abgebildet werden. Dazu gelangen deterministische Modelle zum Einsatz, bei denen vorausgesetzt wird, dass der Systemoutput und/oder der Systemzustand zum Zeitpunkt *t* vollständig vom Systeminput und den Systemzuständen zu den Zeitpunkten *t-1, t-2* usw. abhängen. Die Abbildung 1-5 zeigt den Entwurf eines solchen deterministischen Modells für ein alpines Wildbacheinzugsgebiet. Dabei wird grundsätzlich zwischen Reglern und Flüssen unterschleden. Die Regler steuern die Flüsse im System; ihre physikalisch exakte Beschreibung ist deshalb sehr wichtig.

Es besteht eine Vielzahl deterministischer Modelle, die sich in ihrer physikalischen Abstützung, ihrer räumlichen Strukturlerung, ihrer zeitlichen Differenzierung und ihrer Bauart unterscheiden. Generell lassen sich drei Hauptgruppen voneinander abheben:

1) Die White-box-models der topischen Dimension sind vollständig physikalisch basiert. Beispielsweise werden die Wasserflüsse im Boden durch das Darcy-Gesetz beschrieben, deren Parameter aus Laborversuchen an Bodenproben zu bestimmen sind. Wegen des grossen Aufwandes zur Ermittlung der Modellparameter beschränkt sich der Einsatz der White-Box-Modelle auf sehr kleine, homogene Einzugsgebiete. Mit den White-Box-Modellen lassen sich deshalb vor allem Punktprozesse oder kleinflächig ablaufende Prozesse in homogenen Teilräumen beschreiben. Eine einfache Übertragung dieser Modelle auf andere gemessene und ungemessene Einzugsgebiete ist in der Regel nicht möglich.

2) Beim Übergang von der topischen in die chorische Dimension – also bei grösseren Raumeinheiten und komplexeren naturräumlichen Verhältnissen – sind die White-Box-Modelle rasch überfordert: "Es müssen hier qualitativ neue Wirkungsmechanismen berücksichtigt werden, die vor allem auf die Vielgestaltigkeit und Heterogenität der Landflächen, die Flächenvariabilität der Systemkennwerte und verschiedene grossflächig wirkende Rückkopplungsmechanismen zurückzuführen sind. Hier stösst man beim Arbeiten mit den elementaren Grundgesetzen der Physik rasch an Grenzen, während bei der richtigen Anwendung geeigneter konzeptioneller Modelle häufig gute Simulationsergebnisse erreicht werden können" (Becker 1992). Bei den Grey-Box-Modellen oder konzeptionellen Modellen werden wichtige hydrologische Prozesse physikalisch möglichst exakt wiedergegeben, weniger wichtige hingegen in vereinfachter Form abgebildet oder sogar weggelassen (Hugget 1985).



Abbildung 1-5: Entwurf eines mikroskaligen Modells für ein alpines Wildbacheinzugsgebiet (aus Weingartner und Kienholz 1994)

Figure 1-5: Design of a microscale model for an alpine catchment

Ablagerung und Überflutung

Abfluss Im Gerinne

Ablagerung im Gerinne

Sohlenerosion

Abl UF

Gabfl

SEr

Sal

Ein hydrologisches Modell sollte möglichst einfach sein, aber nicht einfacher (Plate 1992). Moore, Greyson und McMahon (1992) weisen zurecht darauf hin, dass die verbreitete Annahme, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Modellierungen korreliere positiv mit der Modellkomplexität, vielfach nicht zutrifft. Ein wesentlicher Grund dafür liegt im ungenügenden räumlichen Detaillierungsgrad der für die Modellierung benötigten Parameter. Deshalb leisten Konzeptmodelle oftmals bessere Dienste als White-Box-Modelle, da sie mit ihrem Detaillierungsgrad den vorhandenen Informationen besser angepasst sind. Im Gegensatz zu den White-Box-Modellen können die Modellparameter der meisten Konzeptmodelle nicht direkt aus physikalischen Grundkonstanten wie zum Beispiel den räumlich differenzierten Infiltrationsraten bestimmt werden; vielmehr müssen zumindest einzelne Modellparameter der. Dadurch Eichung, basierend auf gemessenen Niederschlags-Abfluss-Ereignissen, ermittelt werden. Dadurch sind die Möglichkeiten einer breiten Anwendung der Konzeptmodelle zur Abschätzung hydrologischer Grössen in ungemessenen Einzugsgebieten stark eingeschränkt.



Abbitdung 1-6: Modellierung der hydrologischen Verhältnisse im Sommer und Herbst 1987 im Rotenbach (Kanton Freiburg) mit Hilfe des BROOK-Modells (aus Weingartner und Kienholz 1994)

Figure 1-6: Modelling of the hydrological conditions during summer and autumn 1987 in the Rotenbach catchment, using the BROOK-model

Bekannte Konzeptmodelle sind etwa das BROOK-Modell (Federer und Lash 1978) und das TOPMODEL (Beven et al. 1995). Ersteres kann beispielsweise zur Abbildung der zeitlichen Dynamik der hydrologisch relevanten Speicher (Bodenwasser, Grundwasser), welche für das Verständnis des Hochwassergeschehens von grundlegender Bedeutung sind, eingesetzt werden (Abbildung 1-6). Das TOPMODEL wird unter anderem zur Standortanalyse In Wildbacheinzugsgebieten, d.h. zur räumlichen Differenzierung der Abflussbildung (Abbildung 1-7) und zur Ausscheidung rutschungsoder erosionsgefährdeter Hänge, verwendet (Brünisholz 1999).



Abbildung 1-7: Modellierung der Dynamik der beitragenden Fläche im Rotenbach mit Hilfe des TOPMODEL (aus Kienholz et al. 1996)

Figure 1-7: Modelling of the spatial variation of the contributing areas in the Rotenbach catchment, using TOPMODEL

Das Laufzeitverfahren ("Rational Formula", Formel 1-2), das zur Hochwasserabschätzung in der Praxis häufig eingesetzt wird, kann als Belspiel für ein einfaches konzeptionelles Modell angeführt werden:

$$HQ_x = \psi \cdot r_x \cdot Fn \tag{1-2}$$

| HQx   | x-jährlicher Spitzenabfluss            |
|-------|----------------------------------------|
| Ψ     | Abflussbeiwert                         |
| $r_x$ | x-jährlicher massgebender Niederschlag |
| Fn    | Gebietsgrösse                          |

Die "Rational Formula" wird auch häufig in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen angewandt, wobei der Abflussbeiwert  $\psi$  geschätzt werden muss. Dazu stehen verschiedene Ansätze wie zum Beispiel das SCS-Verfahren zur Verfügung. Die Erfahrung zeigt aber, dass der Abflussbeiwert mit solchen Ansätzen meist nicht zufriedenstellend bestimmt werden kann (Weingartner 1989, Naef 1993). Beran (1985) meint deshalb: "The rational formula may be regarded as regional in spirit." Damit welst er auf die Problematik einer regionalen Übertragung dieses – aber nicht nur dieses – Konzeptmodells hin.

3) Die einfachsten deterministischen Modelle sind die Black-Box-Modelle: "Models which do not explicitly take into account the governing laws but only the cause-effect relation of system inputs and outputs, in a very general and purely empirical manner" (Nemec 1993). Das Unit-Hydrograph-Verfahren darf als klassisches Black-Box-Modell für den Hochwasserbereich bezeichnet werden. Es wurde primär in Einzugsgebieten eingesetzt, für die einige gemessene Niederschlags-Abfluss-Ereignisse dokumentiert sind. Es bestehen aber auch Verfahren für ungemessene Einzugsgebiete. So werden synthetische Unit Hydrographen und sogenannte geomorphologische Unit Hydrographen aus Gebietskenngrössen abgeleitet (Snyder 1938, Rodriquez-Iturbe 1993). Wegen der geringen Modellkomplexität besteht bei Black-Box-Modellen ein nicht zu unterschätzendes Risiko darin, dass das hydrologische System nicht genügend repräsentiert wird (vgl. Abbildung 1-1).

Einfachere Konzeptmodelle wie die "Rational Formula" und Black-Box-Modelle wie das Unit-Hydrograph-Modell eignen sich grundsätzlich auch zur Anwendung in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen (s. Kapitel 4.3.5 und 4.5). Sie gelangen oftmals auch in grösseren mesoskaligen Einzugsgebieten zum Einsatz. Aus methodischer Sicht ist der Übergang von den Konzept- und Black-Box-Modellen zu den regionalhydrologischen Modellen des mesoskaligen Bereichs fliessend.

#### 1.3.2 Mesoskale

Die im letzten Kapitel vorgestellten Modelle sind aus der Sicht der räumlichen Diskretisierung im Fall der Black-Box-Modelle "lumped", im Fall der Konzeptmodelle mehrheitlich "semi-distributed" und im Fall der White-Box-Modelle "distributed" (Abbildung 1-8). Sie erfordern also eine grosse bis sehr grosse räumliche Auflösung der relevanten Informationen. Ihre Prozessnähe muss mit einem hohen Mess-, Kartierungs- und Kalibrierungsaufwand erkauft werden.

In grösseren Einzugsgebieten stösst man mit dlesen mikroskaligen Modellen mangels räumlich hochaufgelöster Daten rasch an Grenzen, so dass hier mit den mesoskaligen regionalhydrologischen Modellen ein anderer Modelltyp im Mittelpunkt steht. "Dieser black-box-, in günstigsten Fällen grey-box-Modelltyp ist in jedem Gebiet, für das hydrometrische Informationen auf hohem Auflösungsniveau vorliegen, deterministisch angelegten Modelltypen unterlegen. Hingegen ist er für Regionalisierungskonzepte mit räumlicher Übertragung auf Gebiete, in denen detaillierte Informationen nicht vorhanden sind, bisher ohne Konkurrenz" (Schmidt 1992).

#### a) "lumped" (mit vier Teilsystemen)



Abbildung 1-8: Rāumliche Auflösung mikroskaliger Modelle (aus Nemec 1993) Figure 1-8: Spatial resolution of microscale models

Die eingangs beschriebene Funktion  $g(x_k, y_k, z_k, t)$  erlaubt in der Mesoskale hauptsächlich Aussagen für Raumpunkte, die ein grösseres Einzugsgebiet repräsentieren (Abbildung 1-9). Dazu müssen die Informationen räumlich aggregiert werden (vgl. Kap. 1.2.3). Durch diesen Generalisierungsschritt geht der direkte standortgebundene Prozessbezug verloren. Mesoskalige Modelle erlauben deshalb vor allem Aussagen in bezug auf hydrologische Grössen, nicht aber in bezug auf hydrologische Prozesse. Es handelt sich um stochastische Modelle, deren Aufbau sich – im Gegensatz zu den deterministischen Modellen – nicht direkt an den Prozessabläufen orientiert. Die unabhängigen Modellparameter sind Gebietskenngrössen, welche die hydrologisch relevanten Eigenschaften eines Einzugsgebietes in einer generellen, integralen Art wiedergeben. Deshalb wird auch bei regionalhydrologischen Modellen oftmals von Grey-Box- oder Black-Box-Modellen gesprochen.

Ein mesoskaliges regionalhydrologisches Modell beschreibt folglich die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen im regionalen Kontext und ermöglicht es damit, hydrologische Grössen in ungemessenen Einzugsgebieten abzuschätzen (Abbildung 1-9). Die Eichung regionalhydrologischer Modelle erfolgt auf der Grundlage mehrerer Einzugsgebiete, die über Messdaten verfügen, etwa durch die Koppelung von unabhängigen varianten und invarianten Gebietskenngrössen mit abhängigen hydrologischen Grössen (vgl. Kap. 1.2). Im Gegensatz dazu werden mikroskalige Modelle in einem einzigen Einzugsgebiet mit Hilfe mehrerer Niederschlags-Abfluss-Ereignisse geeicht.



- Auflösung eines hydrologischen Modells bzw. der im Text beschriebenen Funktion  $g(x_x, y_w, z_w, t)$
- ✗ Abflusspegel

Abbildung 1-9: Räumliche Auflösung mikro- und mesoskaliger hydrologischer Modelle Figure 1-9: Spatial resolution of micro- and mesoscale hydrological models

Die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen nimmt mit der Verkleinerung des Zeitschrittes zu, wie dies die Tabelle 1-2 am Beispiel der jährlichen, saisonalen sowie ausgewählter monatlicher und täglicher Abflussspenden im Berner Oberland verdeutlicht. Bei kleinen Zeitschritten stossen die Verfahren der regionalen Übertragung wegen des fehlenden direkten Prozessbezugs an Grenzen; in diesen Fällen lässt sich die grosse räumliche Variabilität modellmässig nicht oder nur ungenau erfassen. Deshalb sind mit regionalhydrologischen Analysen vor allem grössere Zeitskalen wie Jahr, Halbjahr und Monat erschliessbar (vgl. Abbildung 1-3).

Tabelle 1-2: Räumlicher Variationskoeffizient der Abflussspende im Jahr 1984 bei unterschiedlichen Zeitskalen (Jahr, Halbjahr, Monat und Tag), berechnet auf der Basis von sechs Einzugsgebieten im Flussgebiet der Aare bis Thun (z.B. Variationskoeffizient Jahr: Quotient aus der Standardabweichung der mittleren Jahresabflussspende der sechs Gebiete und dem Mittelwert der mittleren Jahresabflussspende der sechs Gebiete)

Table 1-2: Coefficient of variation of specific discharge in 1984 for different time resolutions, calculated on the basis of six sites in the Aare basin at Thun

| Jahr | 8ommer-<br>halbjahr | Winter-<br>halbjahr | Januar | April | Juni | September | Dezember |
|------|---------------------|---------------------|--------|-------|------|-----------|----------|
| 14%  | 25%                 | 20%                 | 31%    | 30%   | 20%  | 17%       | 21%      |

| 15. Januar | 15. April | 15. Juni | 15. Sept. | 15.Dez. |
|------------|-----------|----------|-----------|---------|
| 59%        | 38%       | 20%      | 16%       | 17%     |

Tabelle 1-3: Anwendungsbereiche mikro- und mesoskaliger hydrologischer Modelle (nach Simmers 1985, erweitert) Table 1-3: Applications of micro- and mesoscale hydrological models

| Anwendungsbereich                              | larger mesoscale                 |                 | microscale           |                |
|------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------|----------------|
|                                                | regionalhydrologische<br>Modelle | lumped<br>model | distributed<br>model | Zelt-<br>skala |
| Erweiterung von Zeitreihen des Abflusses       |                                  | 1               | 1                    |                |
| Hochwasserganglinie                            |                                  | ~               |                      |                |
| real time Abflussvorhersage                    |                                  | 1               |                      | hoch-          |
| räumlich variable hydrologische Prozessgrössen |                                  |                 |                      | auf-           |
| Auswirkungen von Nutzungsänderungen            |                                  |                 | ~                    | lösend         |
| Stoff- und Sedimenttransport                   |                                  | 1               |                      |                |
| Wasserqualität                                 |                                  | ~               | ✓                    |                |
| mittlerer Jahresabfluss                        | 1                                |                 |                      | wenig          |
| mittlerer Monatsabfluss                        | 1                                |                 |                      | auf-           |
| Niedrigwasserparameter                         | 1                                |                 |                      | lösend         |
| Jahreshochwasserspitzen                        | ✓                                |                 |                      |                |

In eine ähnliche Richtung zielt die folgende Überlegung: Die zeitlichen Schwankungen einer hydrologischen Grösse an einem Raumpunkt oder in einem Einzugsgebiet sind über die statistischen Kennwerte einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wie Lageparameter, Streuungsmasse und Extremwerte generell beschreibbar. Solche statistischen Kennwerte lassen sich mittels mesoskaliger Modelle regionalisieren. Zur Erklärung und somit zur zeitlich korrekten Abbildung dieser Variationen etwa in Form von Ganglinien sind hingegen deterministische Modellansätze nötig. In einer Übersichtsdarstellung von Simmers (1985) gelangen diese Unterschiede in den Zeitskalen und damit in den Anwendungsmöglichkeiten mikro- und mesoskaliger Modelle deutlich zum Ausdruck (Tab. 1-3).

In Zukunft ist im mesoskaligen Bereich vor allem auf eine bessere physikalische Begründung der Modelle hinzuarbeiten. Nur so lässt sich die zeitliche Auflösung regionalhydrologischer Modelle verbessern (vgl. Abbildung 1-3, "Required developments"). Die Stossrichtung ist klar; die Auffassungen über die Lösungswege sind aber recht unterschiedlich:

- "Um eine Anwendung deterministischer Modelle, die die Beschreibung des gesamten Prozessgeschehens beinhalten, bei der Regionalisierung zu ermöglichen, müssen hoch aufgelöste Daten für potentielle Übertragungsregionen erhoben werden, wenn die Modelle strukturell nicht zu vereinfachen sind" (Schmidt 1992).
- "Eine der wichtigsten Forderungen betrifft die Entwicklung physikalisch begründeter hydrologischer Modelle, deren Parameter aus allgemein verfügbaren Geokennwerten abgeleitet werden können" (Becker 1992).

Dabei ist stets auch zu beachten, dass die Übertragung und Umsetzung physikalischer Zusammenhänge von einer Skale auf eine andere, im vorliegenden Fall von der Mikro- auf die Mesoskale, nicht unproblematisch ist, wie das folgende Zitat zur Skalenproblematik abschliessend verdeutlicht: "The scale problems in hydrology and other geophysical sciences stem from the recognition that the mathematical relationships describing a physical phenomenon are mostly scale dependent in the sense that different relationships manifest themselves at different space-scales" (Gupta et al. 1986).

#### 1.3.3 Makroskale

Der makroskaligen Betrachtungsweise liegen Raumelemente von subkontinentaler bis globaler Grösse zugrunde. Sie hat zum Ziel, den Wasserhaushalt und das hydrologische Grundverhalten dieser Raumelemente in Abhängigkeit des Klimas, der Vegetation und des Untergrundes vergleichend zu beschreiben (Abbildung 1-4). Es handelt sich dabei um ein geographisch motiviertes Arbeitsgebiet, das im englischsprachigen Raum mit dem Begriff "comparative hydrology" (Falkman und Chapman 1989) treffend beschrieben wird. Im deutschen Sprachraum spricht man oft von "Regionaler Hydrologie" (Baumgartner und Liebscher 1988).

Bei der hydrologischen Modellierung derart grosser Raumeinheiten (>10'000 km<sup>2</sup>) ist man angesichts der räumlichen Heterogenität und der inhaltlichen Komplexität (noch) überfordert. Im Rahmen der Weltklimamodellierung werden in neuerer Zeit allerdings grosse Anstrengungen unternommen, die Variabilität hydrologischer Grössen – insbesondere des Abflusses – im globalen Rahmen quantitativ zu erfassen (vgl. z.B. Becker und Nemec 1987, Wilkinson 1993). Dabei steht die Abschätzung hydrologischer Grössen für Gitterpunkte mit einer Auflösung bis zu 0.5° im Vordergrund (Vörösmarty et al. 1993). Um dieses Ziel zu erreichen, sollten vermehrt auch methodische Erkenntnisse der Mesoskale auf diese oberste Skalenebene transformiert werden.

### 1.4 Zielsetzung der Arbeit

Die einleitenden Ausführungen haben gezeigt, dass mesoskalige regionalhydrologische Analysen zu einem umfassenden Verständnis der räumlichen Variabilität hydrologischer Grössen beitragen. Es erstaunt deshalb um so mehr, dass die Möglichkeiten solcher Analysen bisher nur wenig genutzt wurden: es fehlen nicht nur in der Schweiz systematische, räumlich und thematisch breit angelegte regionalhydrologische Untersuchungen. Die vorliegende Arbeit soll zur Schliessung dieser Lücken

im mesoskaligen Bereich beitragen. Sie orientiert sich an den drei Teilschritten, die bei regionalhydrologischen Studien grundsätzlich auszuführen sind (Abbildung 1-10):

- 1. Aufbereitung der punktuellen oder räumlich integral vorliegenden hydrologischen Messdaten und Informationen,
- 2. Analyse der hydrologisch relevanten Raumstrukturen und
- 3. Entwicklung geeigneter regionalhydrologischer Modelle als Synopse der Teilschritte 1) und 2).

#### 1) Aufbereitung der Messdaten: Vom Hydrographen zu den hydrologischen Kennwerten



3) Entwicklung regionalhydrologischer Modelle (Beispiel: Übertragung von mittleren Jahresabflussspenden)

$$Mq = \left(0.6617 \cdot \frac{mH}{mH_{ref}} + 0.3904 \cdot \frac{N}{N_{ref}}\right) \cdot Mq_{ref}$$

237

639

Abbildung 1-10: Teilschritte regionalhydrologischer Untersuchungen Figure 1-10: Essential steps in regional hydrological analyses

– 237 km

641 km

Wir werden uns im folgenden schwerpunktmässig auf die Schritte 2) und 3) konzentrieren. Ausgehend von Untersuchungen des Autors und von Arbeiten, die unter der Leitung oder mit Beiträgen des Autors entstanden sind, sollen am *Fallbeispiel Schweiz* als erstes

• Wege zur Bereitstellung hydrologisch relevanter Gebietskenngrössen aufgezeigt werden.

Im Teil II der vorliegenden Arbeit werden dann unter dem Leitthema "Anwendungen"

- methodische Aspekte der regionalhydrologischen Modellierung an Beispielen vor allem aus dem Mittelwasserbereich diskutiert,
- bestehende mesoskalige Hochwassermodelle analysiert sowie
- neue Hochwassermodelle entwickelt.

Gemäss dieser Zusammenstellung werden wir bei der Modellierung den Abfluss in den Vordergrund stellen, wobei ein besonderes Gewicht auf den Hochwasserbereich gelegt wird.

Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass der Umsetzung und Verbreitung der Ergebnisse regionalhydrologischer Untersuchungen in Forschung und Praxis bisher nur wenig Beachtung geschenkt wurden. Dies hat beispielsweise zur Folge, dass in der Bemessungspraxis häufig "veraltete" Informationen und Modelle verwendet werden, die zu entsprechend grossen Fehlern führen können. Der Teil III dieser Schrift wird deshalb diesen Umsetzungsaspekt behandeln: Es sollen Möglichkeiten zur Umsetzung regionalhydrologischer Erkenntnisse besprochen werden; dabei steht das vom Autor geleitete Projekt "Hydrologischer Atlas der Schweiz" im Mittelpunkt der Überlegungen.

## 2 Gebietskenngrössen als Grundlage für regionalhydrologische Analysen

## 2.1 Einleitung

Bei regionalhydrologischen Analysen müssen zur Charakterisierung von Einzugsgebieten variante und invariante Gebietskenngrössen erhoben werden. "Sie zu erfassen und quantitativ zu beschreiben, ist Grundlage für alle weiteren hydrologischen Arbeiten" (Wilhelm 1987). Die invarianten Gebietseigenschaften und die varianten Kenngrössen dienen zur Entwicklung mesoskaliger regionalhydrologischer Modelle und damit zur Beschreibung der räumlichen Variabilität hydrologischer Grössen (Abbildung 2-1).

Die invarianten Gebietskenngrössen lassen sich in drei Gruppen gliedern:

- Kenngrössen, welche die morphometrischen Eigenschaften eines Einzugsgebietes und des Gewässernetzes beschreiben: Fläche, Länge, Relief (Höhenverhältnisse, Gefälle) und Gestalt;
- Kenngrössen, welche ein Einzugsgebiet aus der Sicht der Vegetation und der Landnutzung charakterisieren: Flächenanteile von Wald, Wiese, versiegelten Flächen usw.;
- Kenngrössen, welche die Eigenschaften des Bodens und des Gesteins erfassen, insbesondere deren Permeabilität und Wasserspeicherungsvermögen.

Beispiele dazu sind in Tabelle 2-1 aufgeführt. "Invariant" bedeutet, dass die Gebietskenngrössen über den betrachteten Zeitraum hinweg keinen signifikanten Veränderungen unterliegen.



Abbildung 2-1: Gebietskenngrössen in regionalhydrologischen Modellen Figure 2-1: Basin characteristics in regional hydrological models

Die varianten Kenngrössen beschreiben insbesondere die Systemantriebe, d.h. die klimatischen und witterungsbedingten Verhältnisse in einem Einzugsgebiet. Die beiden "Antriebsgrössen" Regen und Schnee sind nach der In Mitteleuropa weit verbreiteten Definition der Hydrologie von de Haar (1974)<sup>2</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> "Erforschung des Wassers des festen Landes über, auf und unter der Erdoberfläche hinslchtlich seiner Verteilung in Raum und Zeit, seiner Zirkulation und seinen physikalischen und chemischen sowie biologisch verursachten Eigenschaften und Wirkungen"

selber hydrologische Grössen. Zur Untersuchung der räumlichen Variabilität dieser sogenannten hydrometeorologischen Grössen werden in der Regel ebenfalls Verfahren der regionalen Übertragung eingesetzt. Als Beispiel dazu sei der methodisch sehr interessante Ansatz von Kirchhofer und Sevruk (1992) erwähnt, der zur Erstellung einer Karte des Jahresniederschlags im "Hydrologischen Atlas der Schweiz" diente. Als Datengrundlage verwendeten die beiden Autoren Messwerte, die nach dem systematischen Messfehler z.T. beträchtlich korrigiert wurden. So beträgt der mittlere Korrekturwert bei Stationen auf 1000 m ü. M. 5 bis 10%, jener bei Stationen auf 2000 m ü. M. 15 bis 25%. Der in Abbildung 2-2 skizzierte Ansatz vereinigt den klassischen – nota bene nicht unproblematischen – Höhengradienten des Niederschlags mit modernen rasterorientierten räumlichen Interpolationsalgorithmen.

#### 1. Reduktion der Werte auf eine einheitliche Höhe



Niederschlagsstation

- (Reduktionsfaktor 80 mm/100 m)
- Reduzierter Wert

#### 2. Interpolation der reduzierten Werte auf ein Gitternetz mit einer Maschenweite von 1 km



Reduzierter Wert

· Mittels Kriging auf Gitterpunkte interpolienter, reduzierter Wert

#### 3. Umrechnung der reduzierten Werte auf das wahre Relief



- Umrechnung auf das wahre Relief (80 mm/100 m)
- Reduzierter, auf 1 km-Gitternetz interpolierter Wert
- Niederschlagsstation

Abbildung 2-2: Methodisches Vorgehen bei der regionalen Übertragung des mittleren Jahresniederschlags (nach Kirchhofer und Sevruk 1992)

Figure 2-2: Procedure for the regionalization of mean annual precipitation

Reduktion der Messwerte auf das 1000 m ü.M.-Niveau

Die Gebietskenngrössen sollten die Eigenschaften eines Einzugsgebietes vollständig beschreiben, also möglichst alle Aspekte eines Einzugsgebietes erfassen, und zudem die folgenden Bedingungen erfüllen (vgl. u.a. Streit 1979):

- a) hydrologisch relevant,
- b) repräsentativ für den mittleren Zustand eines Einzugsgebietes und
- c) aus Datenträgern (Karten, digitale Raumdaten, Luftbilder), die für den gesamten Untersuchungsraum zur Verfügung stehen und die in ihrer räumlichen Auflösung der Fragestellung angepasst sind, normiert ableitbar.

#### a) Zur hydrologischen Relevanz der Gebietskenngrössen

Die Frage nach der hydrologischen Relevanz von Gebietskenngrössen ist oftmals schwierig zu beantworten. Deshalb wird in der Literatur häufig von "vermutlich relevanten Gebietskenngrössen" gesprochen. In Abbildung 2-3 ist ein möglicher Weg zur Ermittlung hydrologisch relevanter Kenngrössen skizziert. Dieses Vorgehen wird entscheidend von den verfügbaren Datengrundlagen und vom Aufwand, der zur Gewinnung der Gebietskenngrössen benötigt wird, beeinflusst. Vor wenigen Jahren, als noch keine Geographischen Informationssysteme (GIS) zum Einsatz gelangten, waren die Möglichkeiten stark eingeschränkt, so dass nur relativ einfache Gebietskenngrössen erhoben werden konnten. Heute bestehen dazu wesentlich bessere Voraussetzungen.



Abbildung 2-3: Methodisches Vorgehen zur Herleitung hydrologisch relevanter, linear unabhängiger Gebietskenngrössen (nach Aschwanden und Weingartner 1986, modifiziert und erweitert). Das Fallbelspiel "Mittelwasser Schweiz" zeigt, welche invarianten Gebietskenngrössen für eine regionalhydrologische Analyse der mittleren Abflussverhältnisse der Schweiz berücksichtigt wurden (Aschwanden 1985)

Figure 2-3: Methodology to derive hydrologically relevant and linear independent basin characteristics, based on existing literature and principal component analysis

Breinlinger (1995), dem dank des GIS-Einsatzes eine grosse Zahl invarianter Kenngrössen zur Verfügung standen, schlägt für den Mittel- und Hochwasserbereich die in Tabelle 2-1 zusammengestellten, durch Gewichte differenzierten, hydrologisch relevanten Gebietskenngrössen vor. Diese Auswahl basiert weitgehend auf Literaturrecherchen. Allerdings wurden die linearen Zusammenhänge zwischen den Gebietskenngrössen, wie sie in Kapitel 2.4 aufgedeckt werden, nur teilweise berücksichtigt. Während Breinlinger für den Mittelwasserbereich – ähnlich wie bei Aschwanden und Weingartner (1986) (Abbildung 2-3) – vor allem die morphometrischen Eigenschaften in den Mittelpunkt stellt, dominieren im Hochwasserbereich Kenngrössen der Vegetation und der Landnutzung, des Bodens und des Gesteins. Gerade letztere dürften auch im Niedrigwasserbereich eine entscheidende Rolle spielen. Wie die Zusammenstellung in Tabelle 2-1 verdeutlicht, hängt die Relevanz der einzelnen Gebietskenngrössen massgeblich von der hydrologischen Zielgrösse ab.

Tabelle 2-1: Hydrologisch vermutlich relevante invariante Gebietskenngrössen in Abhängigkeit der hydrologischen Zielgrösse (aus Breinlinger 1995)

| Kenngrösse                                     | Mittelwasser | Hochwasser |
|------------------------------------------------|--------------|------------|
| Morphometrische Eigenschaften                  |              |            |
| mittere Gebietshöhe                            |              |            |
| maximale Gebietshōhe                           |              |            |
| minimale Gebietshöhe                           |              |            |
| Relletenergie                                  |              |            |
| mittlere Hangneigung des Gebietes              |              |            |
| Flächenanteil der Hangneigungen < 3°           |              |            |
| Rächenanteil der Hangneigungen von 15° bis 25° |              |            |
| Flächenanteil Südexposition                    | <b>A</b>     |            |
| Flächenanteil WNW-Exposition                   | <b>A</b>     |            |
| Kreisförmigkeitsindex                          |              |            |
| Flussdichte                                    | <b>A</b>     |            |
| Vegetation und Landnutzung                     |              |            |
| Vergletscherungsgrad                           |              |            |
| Versiegelungsgrad                              |              |            |
| Dauergrünland- und Ackerlandflächen            |              | <b>A</b>   |
| Waldfläche                                     |              |            |
| Fläche des Weldelands                          |              | <b>A</b>   |
| Boden und Gestein                              |              |            |
| bodenbedeckte flächen                          |              |            |
| mittleres Wasserspeicherungsvermögen           |              |            |
| mittlere Permeablilität                        |              |            |

Table 2-1: Potentially relevant time invariant basin characteristics (after Breinlinger 1995)

A; Gewichtung/Bedeutung der Gebietskenngrösse

Nathan und McMahon (1990) versuchten, die subjektive Komponente bei der Auswahl der Gebietskenngrössen mit statistischen Verfahren zu objektivieren: Mittels einer Regressionsanalyse suchten sie in einem möglichst vollständigen Prädiktorenvariablensatz jene Kenngrössen, welche hinsichtlich der hydrologischen Zielgrösse relevant sind, welche also bei einem vorgegebenen Signifikanzniveau ins Regressionsmodell aufgenommen werden. Mit dem derart eingeengten Parametersatz führten sie anschliessend die regionalhydrologischen Analysen durch.

#### b) Zur Repräsentativität der Gebietskenngrössen

Die Verfahren der regionalen Übertragung sind in der Regel als sogenannte Punktmodelle aufgebaut (vgl. Kapitel 1.2.3: "Flächenmässige Aggregation"). Deshalb müssen die Gebietskenngrössen den mittleren Zustand eines Einzugsgebietes – z.B. mittlere Gebietshöhe – beschreiben. Dabei bleiben

die gebietsinternen Strukturen eines Einzugsgebietes weitgehend unberücksichtigt. Diese Vereinfachungen und Generalisierungen sind vor allem bei grösseren und/oder naturräumlich heterogenen Einzugsgebieten problematisch, da die ausgewiesenen Gebietseigenschaften nur noch eine geringe Aussagekraft in bezug auf die realen Bedingungen besitzen. Mit prozessorientierten Erhebungsansätzen, welche den gebietsinternen Strukturen besser Rechnung tragen, lassen sich Verbesserungen erzielen, wie die Ausführungen in Kapitel 2.3 zeigen.

#### c) Zur Bedeutung Geographischer Informationssysteme

Mit den digitalen Geländemodellen und den Geographischen Informationssystemen eröffnen sich für die Kenngrössenerhebung neue Perspektiven: "Hier existiert noch ein erhebliches Defizit an Forschungsaktivität. [..] Die grosse Chance in der Nutzung von digitalen Informationen liegt in der Möglichkeit einer kontrollierten Normierung der Parameterbestimmung durch die Anwendung einheitlicher Programme" (Schmidt 1992). Dank Geographischer Informationssysteme können invariante Gebietskenngrössen räumlich umfassend, effizient und – falls die entsprechenden Datengrundlagen vorhanden sind – möglichst vollständig erhoben werden. Insbesondere lassen sich auch neue Parameter erschliessen, deren Berechnung bisher am Aufwand scheiterte, wie beispielsweise die Flächenantelle der verschiedenen Expositions- und Hangneigungsklassen. Diese Entwicklung dürfte sich insgesamt sehr positiv auf die regionalhydrologische Modellierung auswirken.

Wir werden uns im folgenden schwerpunktmässig mit den invarianten Gebietskenngrössen auseinandersetzen, weil zu diesen Aspekten in der Schweiz bisher keine systematischen Analysen durchgeführt wurden. Bei unseren Arbeiten konnten wir von den Möglichkeiten Geographischer Informationssysteme profitieren, welche erstmals eine inhaltlich wie räumlich umfassende Erhebung von Gebietskenngrössen erlaubten.

### 2.2 GIS-gestützte räumlich ungewichtete Erhebung von invarianten Gebietskenngrössen

Durch den "Hydrologischen Atlas" (Weingartner und Spreafico 1992, 1995, 1997, 1999) hat die regionalhydrologische Forschung in der Schweiz entscheidende Impulse erhalten (vgl. Kapitel 5). Um die thematisch breit gefächerten Analysen zu unterstützen, wurde eine umfassende, flächendeckende Datengrundlage mit invarianten, räumlich ungewichteten Gebietskenngrössen geschaffen (Breinlinger, Gamma und Weingartner 1992). "Räumlich ungewichtet" bedeutet, dass die gebietsinternen Strukturen, die räumliche Anordnung der relevanten Faktoren innerhalb eines Einzugsgebietes, nicht explizit berücksichtigt werden. Die methodisch wichtigsten Aspekte dieser Kenngrössenerhebung werden im folgenden zusammenfassend dargestellt.

Bei einer Erhebung von Gebietskenngrössen sind als erstes die Raumeinheiten zu definieren, für welche die Berechnungen durchgeführt werden sollen. Dazu bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

1) Die Raumeinheiten/Einzugsgebiete werden *a priori* durch eine Raumgliederung festgelegt (Abbildung 2-4):

Vorteile: Die Grösse der Raumeinheiten lässt sich der Fragestellung anpassen. Wegen des stets gleichen Raumbezugs sind unterschiedliche Daten und Informationen direkt vergleichbar. Bei der Berechnung der Gebietskenngrössen können die Möglichkeiten Geographischer Informationssysteme optimal genutzt werden. Die berechneten Daten sind einfach, benutzerfreundlich und GIS-unabhängig verwaltbar. Weitere zu einem späteren Zeitpunkt als relevant erkannte Kenngrössen lassen sich problemlos berechnen und dem Parametersatz beifügen. Werden zudem gemessene hydrologische Einzugsgebiete als Raumeinheiten gewählt, ist ein direkter Bezug zwischen den Gebietskenngrössen und den hydrologischen Messwerten gegeben.

Nachteile: Der Raumbezug ist starr. Werden beispielsweise Kenngrössen für andere Raumeinheiten benötigt, die nicht mit den vorgegebenen Raumstrukturen übereinstimmen, sind Neuberechnungen notwendig.



Abbildung 2-4: Kenngrössenerhebung basierend auf a priori festgelegten Raumeinheiten, 20511: Nummer der Raumeinheit bzw. des Basisgebietes

Figure 2-4: Assessment of basin characteristics derived from spatial patterns previously defined

2) Die Raumeinheiten/Einzugsgebiete werden a posteriori durch "Verschneiden" der relevanten Gebietskenngrössen abgeleitet (Abbildung 2-5). Es entstehen sogenannte kleinste gemeinsame Geometrien (KGG):

**Vorteile:** Die kleinsten gemeinsamen Geometrien erlauben eine (mesoskalige) Standortbeurteilung, indem räumliche Einheiten mit geringen internen Variationen der Gebietskenngrössen ausgeschieden werden (z.B. KGG mit einer vorherrschenden Landnutzung, einem bestimmten Höhenbereich und einer dominanten Hangneigung). Über die kleinsten gemeinsamen Geometrien können die Variabilitäten der Gebietseigenschaften innerhalb grösserer Einzugsgebiete, die aus mehreren derartigen Basiseinheiten aufgebaut sind, gut beurteilt werden. Der Ansatz ermöglicht es im weiteren, räumliche Zusammenhänge zwischen den Gebietskenngrössen aufzudecken (z.B. den Zusammenhang zwischen Hangneigung und Waldbedeckung). Ferner lassen sich die kleinsten gemeinsamen Geometrien zu grösseren Raumeinheiten oder Einzugsgebieten aggregieren, so dass Gebietskenngrössen für unterschiedliche Raumeinheiten berechenbar sind.

**Nachteile:** Die KGG-Struktur ist von den ausgewählten Gebietseigenschaften abhängig und damit zielgrössenorientiert. Bei Berücksichtigung weiterer oder anderer Gebietseigenschaften müssen die kleinsten gemeinsamen Geometrien jeweils neu bestimmt werden. Ferner ist eine räumliche Übereinstimmung mit hydrologischen Einzugsgebieten in der Regel nicht gegeben.

Für die im folgenden vorgestellte, gesamtschweizerische, räumlich ungewichtete Erhebung von Gebietskenngrössen wurde der einfachere, übersichtlichere, bezüglich einer breiten Anwendung flexiblere erste Ansatz mit einer vorgeschalteten Raumgliederung gewählt.


Abbildung 2-5: Raumeinheiten als kleinste gemeinsame Geometrien von Gebietseigenschaften Figure 2-5: Spatial patterns derived by using least common geometry (KGG) of relevant basin characteristics

## 2.2.1 A-priori-Raumgliederung

Im Rahmen der Bearbeitung des "Hydrologischen Atlasses" wurde für die Schweiz eine räumliche Struktur geschaffen, welche drei Ebenen umfasst (Breinlinger, Gamma und Weingartner 1992):

- Basisgebiete mit Flächen zwischen 30 und 50 km<sup>2</sup>
- Bilanzierungsgebiete mit Flächen zwischen 100 und 200 km<sup>2</sup>
- Flussgebiete mit Flächen grösser 1000 km<sup>2</sup>

Jede Ebene beinhaltet Einzugsgebiete einer bestimmten Grössenordnung. Die drei Ebenen lassen sich widerspruchsfrei durch Aggregation bzw. Disaggregation verbinden (Abbildung 2-6): Ein Flussgebiet besteht aus mehreren Bilanzierungsgebieten, welche wiederum aus mindestens zwei Basisgebieten aufgebaut sind.

## a) Basisgebiete

Die unterste Ebene der räumlichen Struktur schweizerischer Einzugsgebiete umfasst 1050 Basisgebiete mit einer mittleren Grösse von 39 km<sup>2</sup>. Die Basisgebiete bilden die räumlichen Einheiten zur Gewinnung von Gebietskenngrössen nach dem in Abbildung 2-4 skizzierten Vorgehen. Bei ihrer Begrenzung wurde auf eine grösstmögliche interne Homogenität geachtet, damit die den mittleren Gebietszustand beschreibenden Kenngrössen eine hohe räumliche Aussagekraft besitzen. Die Homogenität von Einzugsgebieten ist skalenabhängig und darf nie absolut verstanden werden. Homogene Areale, wie sie beispielsweise Neef (1964) beschreibt, treten in der Mesoskale nicht auf: "Wir bezeichnen ein geographisches Areal als 'homogen', wenn es gleiche Struktur und gleiches Wirkungsgefüge aufweist und dadurch einen einheitlichen Mechanismus des stofflichen Haushaltes, also gleiche ökologische Verhaltensweisen zeigt." Homogene Einzugsgebiete können in der Mesoskale nur als (theoretischer) Endpunkt einer Reihe von Einzugsgebieten mit abnehmender Heterogenität betrachtet werden, wobei die Heterogenität stark von der Gebietsgrösse beeinflusst wird. In der



Mesoskale bilden Gebiete zwischen etwa 10 und 50 km<sup>2</sup> die kleinsten räumlichen Einheiten (vgl. Abbildung 1-3); sie können deshalb aus mesoskaliger Sicht als relativ homogen bezeichnet werden.

Abbildung 2-6: Untergliederung der Schweiz in Basis-, Bilanzierungs- und Flussgebiete Figure 2-6: Subdivision of Switzerland into small catchments, water balance- and river basins

Aufgrund dieser Überlegungen stellte die Gebietsfläche ein entscheidendes Kriterium zur Ausscheidung möglichst homogener Basisgebiete dar. Um die interne Variabilität der Gebietseigenschaften klein zu halten, wurden auch die Höhenunterschiede innerhalb eines Gebietes minimiert, da verschiedene Gebietskenngrössen stark höhenabhängig sind (vgl. Kapitel 2.4). Zudem wurden die Basisgebiete als hydrologische Einzugsgebiete ausgeschieden. In grösseren Alpentälern musste allerdings in elnigen Fällen von diesem Prinzip abgewichen werden.

Als Kartengrundlage für die Abgrenzung der Basisgebiete fand die Landeskarte 1:200'000 Verwendung. Die Gebletsgrenzen wurden digitalisiert; sie stehen als GIS-Layer zur Verfügung (BFS 1999) und sind in der Tafel 1.2 des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" kartiert. Die Basisgebiete lassen sich zu grösseren Elnzugsgebieten – insbesondere den Bilanzierungsgebieten – aggregieren; in diesem "bottom-up-approach" können die für die Basisgebiete erhobenen Gebietskennwerte flächengewichtet auf grössere, mehrere Basisgebiete umfassende Einzugsgebiete hochgerechnet werden. Damit erhält die a-priori-Raumgliederung trotz des starren Raumbezugs eine bestmögliche Flexibilität.

#### b) Bilanzierungsgebiete

Die rund 300 Bilanzierungsgebiete mit einer mittleren Grösse von 145 km<sup>2</sup> bilden die nächsthöhere Ebene. Sie orientieren sich primär am hydrometrischen Netz; Bei rund zwei Drittel der Gebiete befindet sich am Gebietsausgang eine Abflussstation. Mit dem Begriff "Bilanzierungsgeblet" wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dank der Direktmessungen des Abflusses hydrologische Bilanzen aufzustellen. Im Gegensatz zu den Bilanzierungsgebieten sind nur rund 3% der Basisgebiete mit Abflussdaten belegt, so dass auf dieser untersten Ebene hydrologische Grössen vor allem mit Verfahren der regionalen Übertragung abzuschätzen sind, was die Bedeutung einer umfassenden Bereitstellung von Gebietskenngrössen unterstreicht.

#### c) Flussgebiete

Durch Aggregation der Bilanzierungsgebiete ergeben sich die Flussgebiete der Schweiz, die alle mit langjährig gemessenen hydrologischen Daten belegt sind. Diese Messreihen ermöglichen insbesondere auch Aussagen zu den Varlationen, Periodizitäten und langfristigen Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten (Abbildung 2-7).





Geglättete Jahreswerte

Abbildung 2-7: Zeitreihen des Abflusses ausgewählter Flussgebiete der Schweiz (aus Schädler und Bigler 1992) Figure 2-7: Time series of runoff for selected river basins in Switzerland

Dieser Überblick zeigt, dass die hydrologische Raumstruktur der Schweiz für verschiedene Fragestellungen eingesetzt werden kann. Sie bildet auch die räumliche Basis für eine GIS-unabhängige, raumorientierte hydrologische Datenbank der Schweiz (Stettler 1995). Über die vorgestellten Raumstrukturen lassen sich nun unterschiedliche hydrologische Informationen direkt vergleichen. Diese Begegnung im Raum darf nicht unterschätzt werden. Beispielsweise zeigt eine Studie von Weingartner und Schädler (2001), dass bei der Aufstellung hydrologischer Jahresbilanzen in den Bilanzierungsgebieten noch grosse Probleme bestehen, da die unabhängige Erhebung bzw. Abschätzung von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung zum Teil zu widersprüchlichen Bilanzen führt, wie das Beispiel in Tabelle 2-2 eindrücklich belegt: Der für ein alpines Einzugsgebiet physikalisch nicht plausible Verdunstungswert von 962 mm wie auch die Differenzen zwischen den Verdunstungswerten erstaunen und belegen, dass weitere Forschungsarbeiten dringend notwendig sind. Tabelle 2-2: Nach verschiedenen Ansätzen berechnete bzw. geschätzte Verdunstung des alpinen Einzugsgebietes der Lütschine, Gsteig (mittlere Höhe: 2050 m, Fläche: 379 km², Periode 1961–80)

|                                                                  | N    | A    | V   |
|------------------------------------------------------------------|------|------|-----|
| Bilanz unter Verwendung unkorrigierter Niederschläge             | 1995 | 1439 | 556 |
| Bilanz unter Verwendung korrigierter Niederschläge               | 2401 | 1439 | 962 |
| Verdunstung nach Baumgartner et al. (1983): V (mm) = 693-0,18 mH |      |      | 324 |
| Verdunstung nach Menzel et al. (1999)                            |      |      | 281 |

Table 2-2: Estimated evaporation from the alpine Lütschine basin using different methods

N: mittlerer Jahresniederschlag (mm) V: mittlere Jahresverdunstung (mm)

A: mittlerer Jahresabfluss [mm] mH: mittlere Gebietshöhe [m]

## 2.2.2 Bereitstellung der Datengrundlagen

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, fordert Streit (1979) Vollständigkeit in der Erfassung der Gebietseigenschaften. Diese Vollständigkeit ist schwer zu realisieren, zumal es letztlich nicht zu definieren ist, welche Gebietskenngrössen einem vollständigen Datensatz angehören sollten. Sie hängt vor allem auch von den verfügbaren (digitalen) Datengrundlagen ab. Deshalb folgten wir bei der Datenbereitstellung dem Grundsatz, dass alle über die gesamte Schweiz verfügbaren Datensätze mit hydrologisch relevanten Daten berücksichtigt werden. Es sind dies einerseits das Geländernodell RIMINI und das Landnutzungs-Hektarraster, andererseits wurden wichtige, nur in Kartenform vorhandene Grundlagendaten digitalisiert: Gewässernetz 1:200'000, Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000, Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000. Die technischen Grundlagen der Datenbereitstellung sind in Gamma (1992) detallliert beschrieben.

Tabelle 2-3: Aus den verfügbaren Datensätzen abgeleitete Gebietskenngrössen

Table 2-3: Basin characteristics, derived from available digital data sets

| Parametergruppe               | Verfügbare Datensätze                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Abgeleitete Kenngrössen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Morphometrische Eigenschaften | <ul> <li>Digitales Geländemodell RIMINI, Maschenweite<br/>250 m, Auflösung der Höhenklassen 100 m<br/>(GRD)</li> <li>Gewässernetz 1:200'000 (L.+T 1985)</li> <li>Basisgebietsgrenzen, Erhebungsmassslab<br/>1:200'000</li> </ul>                                                                                                                        | <ul> <li>Fläche (Horizontalprojektion) [km²] (Fn)</li> <li>miltlære Gebietshöhe [m] (mH)</li> <li>maximale Gebietshöhe [m] (Hmax)</li> <li>minimale Gebietshöhe [m] (Hmax)</li> <li>minimale Gebietshöhe [m] (Hmin)</li> <li>Reliefenergie [m] (Ref)</li> <li>mittlære Hangnelgung {°] (Im)</li> <li>Flächenanteile von sechs Hangneigungsklassen [%)<br/>(0°-3°, 3°-8°, 8°-15°, 15°-25°, 25°-45°, &gt; 45°) (Nelg1, Nelg2,<br/>Neig3,)</li> <li>Flächenanteile von acht Expositionsklassen [%)<br/>(337.5°-22.5°, 22.5°-67.5°, 67.5°-112.5° usw.) (Exp1, Exp2,)</li> <li>Krelsförmigkeitsindex [-] (Kfl)</li> <li>Gebietsumfang [km] (U)</li> <li>Flussdichle [km/km²] (FD)</li> </ul> |
| Vegetalion und Landnutzung    | <ul> <li>Landnutzungsraster, Maschenweite 100 m,<br/>12 Nutzungsklassen basierend auf den Landes-<br/>karten 1:25'000 und 1:50'000 (BFS 1972)</li> <li>Gletscherinventar der Schweiz 1:50'000,<br/>nicht digitalisiert (Müller, Caflisch und<br/>Müller 1973)</li> <li>Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000,<br/>136 Klassen (EJPD 1980)</li> </ul> | <ul> <li>Wakdfläche [km² bzw. %] (Wald)</li> <li>Dauergrünland und Ackerland [km² bzw. %] (Wiose)</li> <li>Weldeland [km² bzw. %] (Welde)</li> <li>versiegelte Flächen [km² bzw. %] (Vers.)</li> <li>Ödlandflächen [km² bzw. %] (Oed.)</li> <li>Verglelscherungsgrad [%] (Vgl.)</li> <li>Seeflächen [km² bzw. %] (See)</li> <li>vernässte Flächen [km² bzw. %] (Sumpf)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Boden und Gestein             | <ul> <li>Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000,<br/>136 Klassen (EJPD 1980)</li> <li>Geotechnische Karte 1: 200'000,<br/>30 Klassen (BWW 1990)</li> </ul>                                                                                                                                                                                            | <ul> <li>bodenbedeckle Flächen {km²] (Barea)</li> <li>Penneabilität des Bodens {cm/s} (Perm.)</li> <li>Wasserspelcherungsvermögen des Bodens [mm] (mWs)</li> <li>Permeabilitätsindex des Gesteins, Magnin (1990) (P-Index) [-]</li> <li>Homogenitätsindex des Gesteins, Magnin (1990) (H-Index) {-}</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

In Tabelle 2-3 sind die verfügbaren Datensätze und die aus ihnen abgeleiteten invarianten Gebietskenngrössen zusammengestellt. Die Tabelle gibt gemeinsam mit Abbildung 2-8 auch einen Hinweis auf die räumliche Auflösung und Genauigkeit der Datengrundlagen. Der in der Geographie gültige Grundsatz, bei Verwendung verschiedener Datengrundlagen grosse Sprünge in den Massstäben zu vermeiden, gilt auch bei der Verwendung Geographischer Informationssysteme. Die GIS-Algorithmen erlauben es zwar, Informationen in verschiedene Massstäbe umzusetzen, eine Transformation von kleinmassstäblichen Grundlagen in grössere Massstäbe suggeriert jedoch eine Genauigkeit, die meist nicht vorhanden ist. Deshalb wurden hier nur Datensätze ausgewählt, die sich für den Arbeitsmassstab 1:200'000 eignen. In diesem mittleren Massstab liegen die Datengrundlagen und die abgeleiteten Gebietskenngrössen in generalisierter Form vor, so dass deren Absolutwerte mit Vorsicht zu verwenden sind. Für den relativen Vergleich der Gebiete, der bei den Verfahren der regionalen Übertragung wesentlich ist, sind die erhobenen Werte gleichwohl aussagekräftig genug. Hier liegt die eigentliche Stärke dieses umfassenden, gesamtschweizerischen Datensatzes.

Geotechnische Karte 1:200 000

Landnutzung (Hektarraster)



Gewässemetz 1:200 000



Bodeneignungskarte 1:200 000



Abbildung 2-8: Verkleinerte Ausschnitte aus den digitalen Karten zur Geologie (Geotechnische Karte), zur Landnutzung, zum Gewässernetz und zur Bodeneignung im Gebiet des Puschlavs (aus Gamma 1992)

Figure 2-8: Scaled down portions of digital maps on geology, landuse, river network and soil suitability of the Poschiavo area

## 2.2.3 Berechnung der Kenngrössen

Das sogenannte "map processing model" gibt darüber Auskunft, wie die Daten in einem Geographischen Informationssystem verarbeitet werden (Bracken und Webster 1990). Zur Berechnung der invarlanten Gebietskenngrössen verwendeten wir das "composite map processing model", das die folgenden charakteristischen Eigenschaften besitzt:

- Für Jeden räumlich unterscheidbaren Ort existiert eine Anzahl von unabhängigen Attributen entsprechend den verfügbaren Datensätzen oder Layern (vgl. Abbildung 2-4). In vektororientierten Systemen können pro Layer auch mehrere Attribute in einer Tabelle zusammengefasst werden.
- Durch die Kombination (Überlagerung, Verschneidung) mehrerer Layer werden neue Informationen und Layer generiert. Die neuen Layer werden in der Datenbank permanent gespeichert und sind damit jederzeit wieder abrufbar; sie können auch als Input für nachfolgende Überlagerungen verwendet werden.



Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der GIS-gestützten Berechnung invarianter Gebietskenngrössen (nach Breinlinger 1990, modifiziert)

Figure 2-9; Schematic depiction of a GIS-based assessment of invariant basin characteristics

In Abbildung 2-9 ist das grundsätzliche Vorgehen bei der GIS-gestützten Gewinnung der invarianten Gebietskenngrössen skizziert. Bei der Berechnung gelangten die beiden Programme ARC/INFO und SPANS zur Anwendung. Als erstes wurden die als Raster- oder Vektordaten vorliegenden Attribute mit den Basisgebieten verschnitten. Anschliessend folgte mit Hilfe der in den beiden GIS implementierten Statistikfunktionen für jedes der über tausend Basisgebiete die Berechnung von rund dreissig invarianten, räumlich ungewichteten Gebietskenngrössen. Die Tabelle 2-4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Datensatz der 1050 Basisgebiete. Diese Daten werden in Kapitel 2.4 näher analysiert und in Kapitel 3.1 visualisiert. Sie dienen unter anderem als Grundlage für die in den Kapitein 3.2, 3.3 und 4 vorgestellten regionalhydrologischen Modelle.

Tabelle 2-4: Invariante Gebietskenngrössen der schweizerischen Basisgebiete; Ausschnitt aus der Tafel 1.2 des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" (Breinlinger, Gamma, Weingartner 1992)

Table 2-4: Basin characteristics of small Swiss catchments - an extract of map 1.2 of the "Hydrological Atlas of Switzerland\*

| -                    |                                      |           | H8H<br>Alti | ie<br>tude              |                         | Ne<br>Per             | igan<br>ite | g         | Ob<br>Sur   | erflä<br>face           | che i<br>et s          | a. Be     | oden        |
|----------------------|--------------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------|-----------|-------------|-------------------------|------------------------|-----------|-------------|
| NZ<br>N <sup>o</sup> | F <sub>N</sub><br>[km <sup>2</sup> ] | P<br>(km) | mH<br>(m)   | K <sub>max</sub><br>[m] | H <sub>min</sub><br>[m] | l <sub>m</sub><br>[°] | l3<br>[%]   | h5<br>[%] | Fygl<br>[%] | F <sub>vsg</sub><br>[%] | F <sub>B0</sub><br>(%) | Fw<br>[%) | WSV<br>[mm] |
| Rhein                |                                      |           | -           |                         | -                       | -                     |             |           |             |                         |                        |           |             |
| 10011                | 27.4                                 | 24.7      | 2401        | 3050                    | 1550                    | 24,1                  | 1.2         | 81.4      | 6.9         | 0.0                     | 38.4                   | 6.1       | 14.1        |
| 10012                | 31.4                                 | 27.6      | 2287        | 3050                    | 1350                    | 23.6                  | 0.7         | 84.8      | 4.5         | 0.0                     | 45.7                   | 6.3       | 20.7        |
| 10013                | 70.4                                 | 45.7      | 2131        | 3350                    | 1250                    | 23.4                  | 0.5         | 82.2      | 2.3         | 0.3                     | 69.4                   | 4.9       | 24.9        |
| 10014                | 26.6                                 | 30.0      | 1791        | 2950                    | 1050                    | 20,1                  | 0.4         | 73.0      | 0.4         | 0.3                     | 927                    | 31.0      | 28.5        |
| 10021                | 27.3                                 | 23.6      | 2350        | 3150                    | 1550                    | 25.4                  | 0.5         | 87.8      | 7.3         | 0.1                     | 51.1                   | 0.0       | 10.2        |
| 10022                | 50.9                                 | 36.4      | 2313        | 3150                    | 1550                    | 22.0                  | 11          | 80.6      | 1.8         | 0.0                     | 81.8                   | 0.1       | 16.5        |
| 0023                 | 22.9                                 | 23.7      | 2274        | 3250                    | 1350                    | 23.2                  | 0.4         | 79.3      | 15.9        | 0.1                     | 57.2                   | 8.0       | 21.4        |
| 10024                | 27.8                                 | 27.7      | 1908        | 3150                    | 1050                    | 228                   | 0.5         | 81.9      | 7.4         | 0.5                     | 78.5                   | 20.5      | 22.4        |
| 0031                 | 53.3                                 | 35.3      | 2316        | 3550                    | 1150                    | 28.3                  | 0.3         | 91.0      | 5.5         | 0.0                     | 41.7                   | 4.5       | 16.5        |
| 0032                 | 60.9                                 | 41.0      | 1767        | 3050                    | 850                     | 22.9                  | 1.3         | 84.6      | 0.2         | 0.7                     | 76.3                   | 27.2      | 28.7        |
| 1004131              | 18.6                                 | 20.8      | 2440        | 3150                    | 1550                    | 22.2                  | 1.6         | 75.2      | 1.2         | 0.0                     | 55.3                   | 0.0       | 22.4        |
| 10042                | 20.3                                 | 23.5      | 2371        | 3150                    | 1350                    | 25.B                  | 0.5         | 84.7      | 17.1        | 0.0                     | 34.7                   | 1.8       | 18.2        |
| 10043                | 43.6                                 | 28.9      | 1934        | 2950                    | 850                     | 25.0                  | 0.5         | 87.1      | 0.4         | 1.0                     | 64.1                   | 74.4      | 20.8        |
| 1005131              | 11.4                                 | 14.6      | 2455        | 3350                    | 1350                    | 30.4                  | 0.0         | 88.3      | 18.6        | 0.0                     | 14.0                   | 1.5       | 22.5        |
| 10052                | 28.2                                 | 27.3      | 2202        | 3450                    | 1250                    | 24.8                  | 0.9         | 83.7      | 6.5         | 0.3                     | 65.1                   | 6.3       | 21.2        |
| 10053                | 25.1                                 | 26.5      | 1859        | 3050                    | 850                     | 18.6                  | 1.3         | 64.7      | 0.8         | 0.5                     | 83.5                   | 13.8      | 28.3        |
| 0054                 | 44.7                                 | 30.2      | 2021        | 3150                    | 150                     | 21.8                  | 0.9         | 19.3      | 5.3         | 0.1                     | 66.5                   | 16.9      | 20.5        |
| 0055                 | 24.1                                 | 23.6      | 2016        | 3050                    | 750                     | 18.8                  | 0.3         | 79.1      | 0.7         | 0.0                     | 91.3                   | 20.4      | 23.3        |
| 0056                 | 728                                  | 40.0      | 1655        | 3150                    | 750                     | 222                   | 11          | 851       | 04          | 0.0                     | 100                    | 31.5      | 26.1        |

Nr. Nummer des Basisgebietes

- Fĸ Gebletsfläche
- p Umfang
- mН mittlere Gebietshöhe Höchster Punkt
- Kinax
- $H_{ab}$ Tiefster Punkt
- **I**\_m Mittlere Geländeneigung
- Antell der Flächen bis 3° Neigung la la
- Anteil der Flächen über 15° Neigung 1<sub>15</sub>
- Vergletscherungsgrad Fvor
- Antell versiegelter Flächen Feso
- Antell bodenbedeckter Flächen F₅₀
- Waldanteil Fw
- WSV Mittleres Wasserspeicherungsvermögen des Bodens

## 2.2.4 Fazit

Vor der Einführung Geographischer Informationssysteme musste man sich bei der Erhebung von Gebietskenngrössen auf einfach berechenbare Parameter beschränken. Räumlich umfassende Erhebungen - wie die hier diskutierte - erforderten einen gewaltigen Zeitbedarf und wurden nur in Ausnahmefällen durchgeführt (vgl. EDI 1896 bis 1924 (!)). Mit dem GIS-Einsatz konnten diese Grenzen gesprengt werden. Limitierend sind nun nicht mehr der Arbeitsaufwand, sondern die verfügbaren digitalen Datensätze. Hier bestehen allgemein noch beträchtliche Lücken. Die Datensätze sind deshalb unbedingt thematisch zu erweitern und in ihrem räumlichen Auflösungsvermögen zu verbessern. In der Schweiz fehlt vor allem auch eine hydrologisch interpretierte, mittel- bis grossmassstäbliche Bodenkarte, die Informationen zu den Infiltrations- und Wasserspeicherungseigenschaften vermittelt.

# 2.3 Prozessorientierte Erhebung von Gebietskenngrössen

Eine der häufigsten Aufgaben in der hydrologischen Praxis ist die Abschätzung von Hochwasserabflüssen zur Planung wasserbaulicher Massnahmen. Für diesen Zweck werden Kenntnisse der Hochwasserabflüsse bestimmter Wiederkehrwahrscheinlichkeiten benötigt. Stehen keine langjährigen Abflussreihen zur Verfügung, gelangen Verfahren der regionalen Übertragung zum Einsatz (vgl. Kapitel 4). Sie basieren auf der Annahme, dass Einzugsgebiete mit ähnlicher naturräumlicher Ausstattung und damit ähnlichen hochwasserrelevanten Gebietskenngrössen auch ein ähnliches Hochwasserabflussverhalten aufweisen. In Anlehnung an Düster und Weingartner (1993) und Düster (1994) wird im folgenden ein prozessorientiertes Verfahren vorgestellt, das die naturräumliche Ausstattung eines Einzugsgebietes unter Berücksichtigung der gebietsinternen Strukturen für den Hochwasserfall charakterisiert.

Als erstes stellt sich wiederum die Frage nach der Relevanz der Gebietskenngrössen: In der Literatur sind unzählige Kenngrössen beschrieben, die in regionalhydrologischen Hochwassermodellen eingesetzt werden (vgl. z.B. NERC 1975). Wie in Kapitel 2.1 bereits diskutiert wurde, ist ihre Auswahl nicht unproblematisch; sie hängt wesentlich vom verfügbaren Datenmaterial ab. Auf diesen Fragenkomplex soll hier aber nicht weiter eingegangen, sondern vielmehr die Frage diskutiert werden, wie solche Kenngrössen mit Hilfe Geographischer Informationssysteme prozessorientiert aus digitalen Datengrundlagen berechenbar sind.

#### 2.3.1 Beitragende Flächen als Parametrislerungsebene

Normalerweise wird zur Kenngrössenerhebung das relevante Hochwassereinzugsgebiet dem hydrologischen Einzugsgebiet gleichgesetzt. Die Parametrisierung erfolgt – wie in Kapitel 2.2 beschrieben – auf der Grundlage des Gesamtgebietes ohne Rücksicht darauf, ob alle Teile eines Einzugsgebietes am Hochwasserprozess beteiligt sind. Wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben (u.a. Hewtett und Nutter 1970, Kölla 1986), trägt lediglich ein Teil des Einzugsgebietes massgeblich zu einem Hochwasser bel (Abbildung 2-10). Nur diese beitragenden Flächen besitzen einen hydraulischen Anschluss an den Vorfluter. Das restliche Gebiet ist im Hochwasserfall von geringer Bedeutung.



Abbildung 2-10: Beitragende Flächen im Einzugsgebiet des Dorfbachs in Zofingen: "Infolge der grossen Speicherfähigkeit des Bodens und des Untergrundes trägt (...) nur ein kleiner Teil der Fläche (grau marklent) zum Hochwasserabfluss bei" (Naef, Scherrer und Fach 1994)

Figure 2-10: Contributing areas to runoff within the Dorfbach catchment near Zolingen

Die Ausdehnung der beitragenden Flächen ist von der naturräumlichen Ausstattung eines Einzugsgebietes und von der Intensität und Dauer eines Niederschlagsereignisses abhängig (vgl. Naef, Scherrer und Zurbrügg 1999). Es bestehen verschiedene Ansätze, welche versuchen, die räumliche Ausdehnung der beitragenden Flächen zu modellieren; zwei in diesem Zusammenhang wichtige seien hier kurz vorgestellt:

a) Das TOPMODEL (beschrieben z.B. in Beven et al. 1995) ist ein zeitlich und räumlich hochauflösendes Hochwassersimulationsmodell, das auf dem Konzept der beitragenden Flächen beruht. Der Topoindex (*TI*) bildet die Grundlage zur Abbildung der räumlichen Dynamik im Hochwasserfall (s. Abbildung 1-7). Dabei handelt es sich um einen aus den topographischen Verhältnissen abgeleiteten Index, der für jede Rasterzelle eines digitalen Höhenmodells berechnet wird:

$$TI_{i} = \ln \frac{a_{i}}{\tan \beta_{i}}$$
(2-1)

- *TI*, Topoindex der *i*-ten Rasterzelle
- *a*<sub>i</sub> Fläche, welche in die *i*-te Rasterzelle entwässert
- $\beta_i$  Hangneigung der *i*-ten Rasterzelle

Der Topoindex beschreibt die Sättigungsbereitschaft der einzelnen Rasterzellen und erlaubt es dadurch, die Ausgangsbedingungen bei der Abflussbildung räumlich zu differenzieren. Rasterzellen mit grossen Topoindex-Werten werden bei einem Niederschlagsereignis rasch gesättigt und tragen entsprechend schnell zum Abfluss bei. Wie unsere Untersuchungen im Gebiet des Rotenbachs (Kt. Freiburg) belegen, eignet sich der Topoindex in Wildbächen mit eher schlecht durchlässigen Böden hervorragend zur realitätsnahen Modellierung der Sättigungsbereitschaft und damit der beitragenden Flächen: Im Rotenbach-Gebiet fallen grosse Topoindex-Werte mit Böden mit deutlichen Nässezeigern (Hanggleye ohne Oxydationsflecken), kleine Werte mit weniger nassen Böden (verbraunte Hanggleye) zusammen (Weingartner und Kienholz 1994).

Die benötigten Datengrundlagen – detailliertes Geländernodell, evtl. grossmassstäbliche Bodenkarte – verunmöglichen allerdings noch eine breite Anwendung dieses interessanten Ansatzes in mesoskaligen Untersuchungen. Zusätzlich zur Berechnung des Topoindexes müssten auch die Fliesswege in einem Einzugsgebiet modelliert werden, um die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Rasterzellen und den Vorflutern zu ermitteln.



Abbildung 2-11: Modellierung der Sättigungsbereitschaft im Einzugsgebiet des Rotenbachs (Schwarzsee, Kt. Freiburg) mit Hilfe des Topolndexes (aus Weingartner und Kienholz 1994); Kennwerte des Rotenbachs: Fläche: 1.66 km<sup>2</sup>, mittlere Höhe: 1455 m, Geologie: Wildflysch der Gurnigelzone

Figure 2-11: Modelling of the saturation potential of Rotenbach catchment by means of Topoindex

b) Nach Kölla (1986) können die vorfluternahen Flächen, die innerhalb einer von der Jährlichkeit des Hochwasserereignisses abhängigen Distanz zum Vorfluter liegen, als beitragende Flächen angesehen werden. Bei diesem pragmatischen Ansatz bleiben allerdings die topographischen Verhältnisse im allgemeinen und die massgebenden Abflussbildungsprozesse im speziellen weitgehend unberücksichtigt. Mit der Einführung der GIS-Technologie und der verstärkten Forschung im Bereich der Geoinformatik kann die Abflussbildung heute räumlich differenzierter betrachtet werden, als dies bei Kölla der Fall war. Bei dem im folgenden vorgestellten Ansatz werden die Teilflächen eines Einzugsgebietes über den sogenannten relativen Flächenbeitrag bewertet, für dessen Herleitung das Konzept der beitragenden Flächen den gedanklichen Hintergrund bildet.

## 2.3.2 Der relative Flächenbeitrag

Faktoren wie Dauer und Intensität der Niederschläge, Distanz zum nächsten Vorfluter, Hangneigungsverhältnisse, Vegetation, Landnutzung und insbesondere die Bodeneigenschaften beeinflussen die Abflussbildung massgeblich und bestimmen den Hochwasserbeitrag der Teilflächen eines Einzugsgebietes (Scherrer 1997). Die räumlich differenzierte Quantifizierung ihres Einflusses ist aber aufgrund des heutigen Kenntnisstandes nur in sehr gut untersuchten Einzelfällen möglich (vgl. Naef, Scherrer und Zurbrügg 1999). Deshalb wird hier ein Ansatz zur räumlichen Differenzierung des Hochwasserbeitrags vorgestellt, bei dem nur die wesentlichsten Faktoren bzw. Prozesse in vereinfachter Form berücksichtigt werden und welcher der Datenlage in mittelgrossen schweizerischen Einzugsgebieten angepasst ist.

Der Ansatz geht davon aus, dass alle Gebietsteile zu einem Hochwasser beltragen, dies jedoch in einem unterschiedlichen Ausmass, das durch den relativen Flächenbeitrag erfasst wird. Über den Flächenbeitrag werden die Teilflächen eines Einzugsgebietes hinsichtlich ihrer Hochwasserrelevanz relativ zueinander verglichen. Der relative Flächenbeitrag beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Raumelement zum Hochwasserabfluss beiträgt. Diese Wahrscheinlichkeit lässt sich über die beiden nachfolgend diskutierten Faktoren "Distanz zum nächstgelegenen Gerinne" und "Gefälleverhältnisse" beurteilen (Abbildung 2-12):

#### 1) Distanz zum nächstgelegenen Gerinne



Befund für den Hochwasserfall: Standort 2 ist relevanter als Standort 1: g2 > g1

 Gefälleverhältnisse Beurteilung des Aufwandes ("Kosten"), um von einem Standort zum Gerinne zu gelangen



Befund für den Hochwasserfall: Standort 2 ist relevanter als Standort 1: g2 > g1

Abbildung 2-12: Prozessorientierte Erhebung von Gebietskenngrössen – Darstellung des Prinzips in vereinfachter, eindimensionaler Betrachtungsweise; g: Gewichtungslaktor zur Beschreibung der Hochwasserrelevanz eines Standortes Figure 2-12: Process-based assessment of basin characteristics - outline of principle

- Distanz zum nächstgelegenen Gerinne: Die Wahrscheinlichkeit, zu einem Hochwasser beizutragen, nimmt unabhängig vom dominanten Prozess bei der Abflussbildung mit zunehmender Distanz zum Gerinne ab. Im Vergleich zum Ansatz Kölla (1986), der nur zwischen beitragenden gerinnenahen und nicht beitragenden gerinnefernen Teilflächen unterscheidet, wird die Hochwasserrelevanz im hier diskutierten Vorgehen in Funktion der Entfernung zum Vorfluter räumlich differenzierter bewertet (vgl. Abbildung 2-12). Für die Berechnung der kürzesten Euklidischen Distanz zwischen den einzelnen Rasterzellen und dem jeweils nächstgelegenen Fliessgewässerabschnitt wurde ein rasterorientiertes Geographisches Informationssystem (IDRISI 4.0) verwendet. Die entsprechenden Berechnungsalgorithmen stammen von Eastman (1989).
- Die Berücksichtigung der Gefälleverhältnisse basiert auf der sicherlich nicht ganz unbestrittenen Annahme, dass das Gefälle die lateralen Fliesszeiten im Hang massgeblich beeinflusst. Je flacher eine Rasterzelle ist, um so grösser wird die zum Durchqueren der Rasterzelle benötigte Fliesszeit. Mit zunehmender Fliesszeit nimmt die Wahrscheinlichkeit ab, dass eine Rasterzelle direkt zum Hochwasserabfluss beiträgt.

Das Vorgehen wurde an rund neunzig schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 200 km<sup>2</sup> erprobt. Dazu wurden die Einzugsgebiete in Rasterzellen mit einer Grösse von 100 m · 100 m unterteilt. Als digitale Datenbasis standen das Gewässernetz 1:25'000 und das RIMINI-Höhenmodell mit einer Rasterweite von 100 m zur Verfügung<sup>3</sup>.

Die Berechnung des relativen Flächenbeitrags basiert nun auf der Kombination der beiden Faktoren "Distanz" und "Gefälleverhältnisse". Dazu wurde als erstes ein Faktor *c* berechnet, der indirekt die Zeit beschreibt, welche benötigt wird, um eine Rasterzelle mit einem bestimmten Gefälle zu überwinden. Die Berechnung der *c*-Werte der Rasterzellen eines Einzugsgebietes geht – in Anlehnung an Potter (1953) – davon aus, dass sich die Fliessgeschwindigkeit (*v*) proportional zur Quadratwurzel des Gefälles ( $\varphi$ ) verhält:

$$\nu \sim \sqrt{\varphi}$$
 (2-2)

Mit v=s/t (s: Strecke, t: Zeit) lässt sich Formel 2-2 umformen zu:

$$\frac{s}{t} \sim \sqrt{\varphi} \to t \sim \frac{s}{\sqrt{\varphi}}$$
(2-3)

Da alle Rasterzellen gleich gross sind, ist *s* konstant, so dass Formel 2-3 vereinfacht geschrieben werden kann:

$$I \sim \frac{1}{\sqrt{\varphi}}$$
(2-4)

Der Faktor c soll nun proportional zur Zeit t sein, welche gebraucht wird, um eine Rasterzelle mit dem Gefälle  $\varphi$  zu überwinden:

$$c \sim t \sim \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \tag{2-5}$$

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Das RIMINI-Höhenmodell hat im Original eine Rasterweite von 250 m; letztere wurde von Düster (1994) durch bilineare Interpolation auf 100 m verkleinert.

Aus praktischen Gründen wird c normiert. Für ein Gefälle von 90° soll c einen minimalen Wert von 1 erhalten, da die Zeit zur Überwindung einer solchen Rasterzelle am kleinsten ist. Damit ist c in Abhängigkeit des Gefälles definiert als:

$$c = \sqrt{\frac{90^{\circ}}{\varphi}} \quad filr \quad 0^{\circ} < \varphi \le 90^{\circ} \tag{2-6}$$

Für  $\phi \rightarrow 0^{\circ}$  strebt c gegen unendlich. Je grösser c wird, um so länger sind die lateralen Fliesszeiten in einer Rasterzelle, um so grösser ist also der "Widerstand", der dem lateralen Fliessen entgegengesetzt wird. Etwas salopp formuliert, darf c als Widerstandskoeffizient bezeichnet werden. Mit Formel 2-6 wird nun für jede Rasterzelle der Koeffizient c berechnet. Dazu muss ein mit einem Geographischen Informationssystem bestimmtes Hangneigungsraster zur Verfügung stehen.

In einem nächsten Arbeitsschritt wurde die "Distanz zum nächstgelegenen Gerinne" mitberücksichtigt. Aus der GIS-gestützten Distanzanalyse lässt sich für jede Rasterzelle ermitteln, welches der kürzeste Weg zum nächstgelegenen Fliessgewässerabschnitt ist und durch welche Rasterzellen dieser Weg führt. Durch Summieren der Widerstandkoeffizienten der Rasterzellen, welche zwischen einer Ausgangszelle und dem Gewässerabschnitt durchquert werden, erhält man für jede Ausgangszelle *i* den sogenannten Beitrags-Distanz-Wert (*BD<sub>i</sub>*). Werden dem lateralen Fliessen grosse Widerstände *c* entgegengesetzt, resultiert für *BD<sub>i</sub>* ein grosser Wert. In diesem Fall soll der relative Flächenbeitrag, der den Beitrag zu einem Hochwasser beschreibt, klein sein. Der relative Flächenbeitrag (*g<sub>i</sub>*) der *i*-ten Rasterzelle ist demnach definiert als:

$$g_i = \frac{1}{BD_i} \quad mit \; BD_i > 0 \tag{2-7}$$

Die Bestimmung des relativen Flächenbeitrags basiert also auf der Kosten-Distanz-Berechnung, die bei vielen Geographischen Informationssystemen implementiert ist. Als Ergebnis erhält man einen Raster, bei dem in jeder Rasterzelle der relative Flächenbeitrag (g) abgelegt ist.

In Abbildung 2-13 sind für die Einzugsgebiete der Emme-Eggiwil und der Suze-Sonceboz die relativen Flächenbeiträge kartiert:

- Im voralpinen Einzugsgebiet der Emme sind die Flussdichte und die Reliefenergie sehr gross, so dass die Flächen mit grossen Hochwasserbeiträgen sowohl im Mittel- wie im Oberlauf stark vertreten sind. Die Eigenschaften dieser Teilflächen sind für die Beurteilung der Hochwasserverhältnisse entscheidend und sollten – wie im folgenden gezeigt wird (Formel 2-9 und 2-11) – entsprechend gewichtet werden. Bei Rasterzellen mit identischer Distanz zum nächstgelegenen Vorfluter ist der relative Flächenbeitrag in jenen Zellen grösser, die in den steileren Partien des Einzugsgebletes liegen.
- Das Einzugsgebiet der Suze liegt im Jura. Es welst eine sehr kleine Flussdichte auf; dementsprechend klein ist der Anteil der Rasterzellen mit hohen relativen Flächenbeiträgen. Diese sind entlang der Suze und beidseitig der Zuflüsse aus den nordwestexponierten Hängen der Chasseralkette angeordnet. Auf der hydrographisch linken Talseite sind die Hangneigungsverhältnisse ziemlich ausgeglichen, so dass bei der Berechnung der relativen Flächenbeiträge vor allem der Distanzfaktor differenzierend wirkt. Dies zeigt sich in einer deutlichen horizontalen Abgrenzung der Flächenbeiträge. Die besonderen geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Suze (Karst) und deren Beeinflussung des Abflussgeschehens werden durch das Verfahren, das ausschliesslich auf den oberflächlichen Gebietsstrukturen beruht, allerdings nicht berücksichtigt (vgl. Naef, Scherrer und Zurbrügg 1999).



Abbildung 2-13: Klassierte relative Flächenbeiträge der Rasterzellen (100 m • 100 m) in den Einzugsgebieten der Emme-Eggiwil (Gebietsfläche: 124 km²) und der Suze-Sonceboz (195 km²) Figure 2-13: Spatial differentiation of flood relevance in the Emme-Eggiwil and Suze-Sonceboz catchments

Insgesamt konnte trotz vereinfachender Annahmen und starker Generalisierung des Abflussbildungsprozesses eine plausible, auf mesoskalige Analysen zugeschnittene Gliederung der Einzugsgebiete erreicht werden, die nun als Grundlage für die Berechnung der Gebietskenngrössen dient.

## 2.3.3 Prozessorientierte Berechnung der Gebietskenngrössen

Bei der prozessorientierten Berechnung ist zwischen nominal und metrisch skalierten Gebietskenngrössen zu unterscheiden.

## a) Nominal skalierte Grössen

Zur Parametrisierung nominal skalierter Grössen wie Wald, See oder Fels wird deren prozentualer Anteil an der Einzugsgebietsfläche berechnet. Zu diesem Zweck wird ein binär kodierter Raster erzeugt. Alle Zellen *i*, in denen der Parameter  $P_j$  auftritt (z.B. Zellen mit Wald), erhalten den Wert  $P_{ij}=1$ , die restlichen Zellen den Wert  $P_{ij}=0$ . • Bei konventioneller, ungewichteter Berechnung wird die Anzahl der Rasterzellen mit  $P_{ij}=1$  bestimmt ( $\Sigma P_{ij}$ ). Diese Summe wird mit der konstanten Grundfläche der Rasterzellen ( $F_1=F_2=...=F_i=F$ ) multipliziert und durch die Einzugsgebletsfläche dividiert:

$$\overline{P}_{j}(konv.) = \frac{F\sum_{i=1}^{n} P_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} F_{i}} \cdot 100 = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{ij}}{n} \cdot 100 [\%]$$
(2-8)

| $\overline{P}_{i}(konv_{i})$                 | Flächenanteil des nominal skalierten Parameters P <sub>i</sub> bei konventioneller |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>,</b> , , , , , , , , , , , , , , , , , , | Berechnung                                                                         |
| $P_{ij}$                                     | Nominal skallerte Gebietskenngrösse j der i-ten Rasterzelle                        |
| $\vec{F_i}$ $F_i$                            | Fläche einer Rasterzelle                                                           |
| n                                            | Anzahl der Rasterzellen eines Einzugsgebietes                                      |
|                                              |                                                                                    |

 Bei Berücksichtigung der relativen Flächenbeiträge fliessen die Gewichte g<sub>i</sub>, welche in Formel 2-7 bestimmt wurden, in die Berechnung ein:

$$\overline{P}_{j}(gew_{.}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_{i} P_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} g_{i}} \cdot 100 [\%]$$
(2-9)

 $\overline{P}_{j}(gew.)$  Flächenanteil des nominal skalierten Parameters  $P_{j}$  bei prozessorientierter Berechnung  $g_{i}$  relativer Flächenbeitrag

#### b) Metrisch skalierte Grössen

Für metrisch skalierte Grössen muss eine etwas andere Berechnungsart gewählt werden: In diesem Fall repräsentiert der Zellenwert  $P_{ij}$  (mit  $P_{ij} \in R$ ) den mittleren Zustand des Parameters  $P_{j}$  in der *i*-ten Zelle (z.B. mittlere Bodentiefe).

• Die mittlere Ausprägung ( $\overline{P}_j(konv.)$ ) eines Parameters  $P_j$  in einem Einzugsgebiet wird konventionell wie folgt berechnet;

$$\overline{P}_{j}(konv.) = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{ij}}{n}$$
(2-10)

n Anzahl der Rasterzellen eines Einzugsgebietes

Dabei wird davon ausgegangen, dass jede Rasterzelle die gleiche Fläche aufweist.

$$\overline{P}_{j}(gew.) = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_{i} P_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} g_{i}}$$
(2-11)

relativer Flächenbeitrag

Die Abbildung 2-14 veranschaulicht nochmals die deutlichen Unterschiede zwischen konventioneller und prozessorientierter Berechnung: In den beiden Einzugsgebieten A und B befindet sich nach konventioneller Berechnung eine Weldefläche, die 20% des Einzugsgebietes bedeckt. Durch die Berücksichtigung der relativen Flächenbeiträge wird die gerinnenahe Weidefläche im Einzugsgebiet B weit stärker gewichtet (55%) als im Gebiet A (10%), so dass die Weidefläche im Gebiet B aus hochwasserhydrologischer Sicht als wichtiger eingestuft wird.



Weide

gi

|          | Weideanteil konventionell, ohne Berücksichligung<br>des relativen Flächenbeitrages | Weideanteil mit Berücksichtigung des relativen<br>Flächenbeitrages |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Gebiet A | 20 %                                                                               | 10 %                                                               |
| Gebiet B | 20 %                                                                               | 55 %                                                               |

Abbildung 2-14: Konventionelle (ungewichtete) und prozessorientierte (gewichtete) Berechnung von Gebietskenngrössen (fiktives Beispiel)

Figure 2-14: Conventional (unweighted) and process-based (weighted) assessment of basin characteristics

Der prozessorientierte Ansatz ist zielgrössenorientiert und deshalb streng genommen nur für regionalhydrologische Analysen im Hochwasserbereich einsetzbar, während bei der in Kapitel 2.2 vorgestellten konventionellen Erhebungsmethode der Anwendungsbereich nicht a priori eingeschränkt ist.

#### 2.3.4 Berechnung der beitragenden Fläche eines Einzugsgebietes

Die Summe der Flächenbeiträge  $g_i$  eines Einzugsgebietes stellt ein Mass für die Grösse der beitragenden Flächen ( $Fn_{beitr}$ ) dar:

$$Fn_{bellr} = F \sum_{i=1}^{n} g_i \tag{2-12}$$

girelativer FlächenbeitragFFläche einer Rasterzelle

Mit den derart berechneten beitragenden Flächen lassen sich einfache Hochwasserabschätzverfahren, die nur auf der Fläche als unabhängige Grösse beruhen, verbessern:

| Unabhängige Grösse                                            | Modell                                | Bestimmtheitsmass |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| konventionelle Gebietsfläche (Fn [km²])                       | $mHQ = 1.194 \cdot Fn^{0.76}$         | 0.46              |
| relativ beitragende Fläche ( <i>Fn<sub>belt</sub> [km²]</i> ) | $mHQ = 2.254 \cdot Fn_{beinr}^{0.86}$ | 0.65              |

*mHQ*: mittlere Jahreshochwasserspltze  $[m^3/s]$ Stichprobenumfang n = 88

Beide Modelle wurden auf der Grundlage von 88 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 200 km<sup>2</sup> kalibriert. Das Modell, das auf der konventionellen Gebietsfläche beruht, ist nicht brauchbar. Zwar befriedigt auch das zweite Modell mit der beitragenden Fläche als unabhängige Grösse mit einem Bestimmtheitsmass von 0.65 noch nicht; es verdeutlicht aber, dass mit der Berücksichtigung der relativ beitragenden Fläche bereits bei einfachen Modellen Fortschritte erzielt werden.

## 2.3.5 Bestimmung der Hochwasser-Disposition (HQ-DISP)

Die Werte des relativen Flächenbeitrags  $(g_i)$  sind in der Regel kleiner als 1. Deshalb ist die nach Formel 2-12 berechnete beitragende Fläche  $(Fn_{beitr})$  stets kleiner als die konventionelle Gebietsfläche (Fn). Über den Quotienten

$$HQ - DISP = \frac{Fn_{bestr}}{Fn}$$
(2-13)

lässt sich die Grunddisposition eines Einzugsgebietes für Hochwasser (*HQ-DISP*) beurteilen. Unter Disposition verstehen wir in Anlehnung an Kienholz (1990) "die Anlage oder Bereitschaft des Untersuchungsobjektes für einen bestimmten gefährlichen Prozess." Mit dem Begriff "Grunddisposition" wird zum Ausdruck gebracht, dass mit der relativ beitragenden Fläche nur ein erster, allerdings entscheidender Faktor zur Beurteilung der Hochwasser-Disposition berücksichtigt wurde.

In stellen Einzugsgebieten mit grosser Flussdichte liegen die Werte für HQ-DISP näher bei 1 als in flachen Gebieten mit einem wenig ausgeprägten Gewässernetz. Hohe HQ-DISP-Werte sind ein Indikator für günstige Bedingungen zur Erzeugung von Hochwasserabflüssen. HQ-DISP wurde für rund neunzig ausgewählte Einzugsgebiete<sup>4</sup> berechnet. Die folgenden statistischen Masszahlen fassen die Ergebnisse zusammen:

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Auswahlkriterien: Gebietsgrösse 10 bis 200 km<sup>2</sup>, anthropogen nur wenig beeinflusst, Messreihen > 10 Jahre.

| Mittelwert | 0.33                        | Variationsbreite   |
|------------|-----------------------------|--------------------|
| Maximum    | 0.62 (Cassarate-Pregassona) | Standardabweichung |
| Minimum    | 0.09 (Suze-Sonceboz)        | Stichprobenumfang  |

Zur vergleichenden Beurteilung der Hochwasser-Grunddisposition wurde der Wertebereich [0.09, 0.62] klassiert und kartlert (Abbildung 2-15). Deutlich fallen das Voralpengebiet und die Südschweiz mit allgemein hohen Dispositionswerten auf. Alpine Einzugsgebiete mit mittleren Gebietshöhen >1550 m sind im Vergleich zu den voralpinen Einzugsgebieten weniger hochwasseranfällig, da hier der Anteil der relativ beitragenden Fläche an der Gesamtfläche bedeutend kleiner ist. In Abbildung 2-13 ist je ein Beispiel für ein Gebiet mit einem grossen (Emme-Eggiwil, *HQ-DISP*=0.53) und einem kleinen Dispositionswert (Suze-Sonceboz, *HQ-DISP*=0.09) dargestellt. Das Gebiet der Suze weist unter den untersuchten Gebieten den kleinsten Anteil der beitragenden Flächen an der Gesamtfläche auf.



Abbildung 2-15: Hochwasser-Grunddisposition (HQ-DISP) ausgewählter Einzugsgebiete mit Gebietsflächen zwischen 10 und 200 km² (Berechnung von HQ-DISP s. Formel 2-13) Figure 2-15: Flood potential (HQ-DISP) of selected catchments

Der Abflussbeiwert beschreibt den Anteil des Niederschlags, der bei einem Hochwasserereignis direkt zum Abfluss gelangt. Er unterliegt – wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben – grossen räumlichen und zeitlichen Schwankungen, welche die individuelle und ereignisbezogene Reaktionsweise der einzelnen Einzugsgebiete repräsentieren. Es ist bisher noch nicht gelungen, diese Schwankungen zufriedenstellend zu erklären. Wichtige Einflussfaktoren sind die Grösse der beitragenden Flächen und die Niederschlagsmenge und -intensität. Mit HQ-DISP wird der Anteil der beitragenden Fläche an der Gesamtfläche, also ein für die Ausprägung des Abflussbeiwertes wichtiger Faktor, beschrieben. Es wurde deshalb untersucht, ob es bis zu einem gewissen Grad möglich ist, die räumlichen Schwankungen des Abflussbeiwerts mit Hilfe von HQ-DISP zu erklären.

0.53 0.12 88



0.52 HQ-DISP

Klasse 1 HQ-DISP, klassiert

Abflussbelwert des grössten und zweltgrössten Hochwasserereignisses

Abbildung 2-16: Die Abflussbeiwerte der beiden grössten gemessenen Hochwasser (aus Nael, Zuidema und Kölla 1986) im Vergleich mit der Hochwasser-Grunddisposition (HQ-DISP)

Figure 2-16: Runoff coefficients from the two largest flood events, compared to the flood potential (HQ-DISP)

in Abbildung 2-16 sind die Abflussbeiwerte der zwei grössten beobachteten Hochwasser der Grunddisposition gegenübergestellt. Es lassen sich einige interessante Strukturen erkennen:

- In Gebieten mit grosser Hochwasser-Grunddisposition (Klasse 1) sind die Abflussbeiwerte der beiden grössten beobachteten Hochwasser stets grösser als 0.3 mit einer oberen Grenze im Bereich von 0.5 (Ausnahme: Necker).
- In der Klasse 2, deren Einzugsgebiete eine mittlere bis grosse Hochwasser-Grunddisposition aufweisen, liegen die Beiwerte zwischen 0.2 und 0.5. Auffallend sind die grosse Differenz der beiden Beiwerte im ostschweizerischen Einzugsgebiet der Simmi und die tendenziell kleineren Beiwerte des alpinen Dischmabaches.
- Einzugsgebiete mit mittlerer bis kleiner Hochwasser-Grunddisposition (Klasse 3) weisen aus der Sicht der grössten Hochwasser ein relativ enges Spektrum der Beiwerte im Bereich von 0.1 bis 0.4 auf, wobel die Mehrzahl der Werte zwischen 0.15 und 0.35 liegen.
- Sehr heterogen hingegen fällt das Bild in der Klasse 4 aus: Andere Faktoren als HQ-DISP scheinen hier die räumliche Variabilität der Beiwerte massgeblich zu beeinflussen.

In Abbildung 2-17 werden die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Abflussbeiwerte in vier Einzugsgebieten mit der Hochwasser-Grunddisposition verglichen. Diese Gegenüberstellung zeigt, dass sich die unterschiedlichen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Beiwerte in den vier Einzugsgebieten über die Werte für *HQ-DISP* wiederum strukturieren lassen.



Abbildung 2-17: Die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Abflussbeiwerte (Abflusskoeffizienten) in vier Einzugsgebieten (aus Naef 1993) im Vergleich mit den HQ-DISP-Werten

Figure 2-17: The probable occurence of runoff coefficients in four catchments, compared to the flood potential (HQ-DISP)

Die aufgedeckten Zusammenhänge zwischen der Hochwasser-Grunddisposition und dem Abflussbeiwert belegen die Plausibilität des vorgestellten Ansatzes zur Berechnung von prozessorientierten Gebietskenngrössen. Letztere dienen unter anderem als Basis für die Entwicklung eines Hochwasserabschätzverfahrens, das in Kapitel 4.4.1 vorgestellt wird.

# 2.4 Analyse der linearen Zusammenhänge zwischen den invarianten Gebietskenngrössen der schweizerischen Basisgebiete

Bei der in Kapitel 2.2 diskutierten GIS-gestützten Erhebung wurden gesamtschweizerisch für die rund 1050 Basisgebiete über dreissig invariante, räumlich ungewichtete Gebietskenngrössen berechnet (s. Tabelle 2-4). Dazu wurden alle verfügbaren digitalen Datensätze mit hydrologisch relevanten Daten beigezogen (s. Tabelle 2-3). Fragen der linearen Zusammenhänge zwischen den Kenngrössen blieben dabei weitgehend unberücksichtigt. Kenntnisse dieser Korrelationsstrukturen sind aber eine wichtige Voraussetzung für die Verwendung von Gebietskenngrössen bei der regionalhydrologischen Modellierung. Ziel dieses Kapitels ist es deshalb, die wichtigsten Zusammenhänge zwischen den Gebietskenngrössen regional differenziert aufzudecken und linear möglichst unabhängige Gebietskenngrössen herauszuarbeiten. Zur Erreichung dieses Ziels wurden vornehmlich statistische Analysen durchgeführt. Zusammen mit sachlogischen Kriterien bilden diese Ergebnisse die Grundlage zur Bestimmung hydrologisch relevanter Gebietskenngrössen (vgl. Abbildung 2-3).

Die Tabellen 2-5, 2-7 und 2-10 vermitteln – gegliedert nach unterschiedlichen Raumeinheiten – einen Überblick über die linearen Zusammenhänge zwischen den Gebietskenngrössen. Um die Korrelationsmatrizen besser zu strukturieren und die Vergleichbarkeit zu erleichtern, wurden nur Korrelationen mit einem Koeffizienten  $|r| \ge 0.5$  berücksichtigt, obschon die kritischen Werte des Produktmoment-Korrelationskoeffizienten bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit ( $\alpha$ ) von 5% je nach Zahl der berücksichtigten Einzugsgebiete (n) zwischen 0.06 und 0.2 liegen. In den Tabellen sind von den insgesamt 34 erhobenen Gebietskenngrössen nur sechzehn aufgeführt, da die Berücksichtigung aller Neigungs- und Expositionsparameter die Übersichtlichkeit erschwert und die Gesamtvarianz wesentlich erhöht hätte.

Zur Ermittlung linear unabhängiger Gebietskenngrössen wurde zusätzlich zur Korrelationsanalyse auch die Hauptkomponentenanalyse eingesetzt (Tabellen 2-6, 2-8 und 2-11). Sie lässt sich als "Sortierungsmechanismus" für die in der Korrelationsmatrix gespeicherten Informationen einsetzen: Neben dem Auffinden von Wechselbeziehungen zwischen den Variablen dient dieses Verfahren auch zur Variablenreduzierung bei minimalem Informationsverlust (Symader 1980). Bei der hier angewandten Hauptkomponentenanalyse wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Standardisierung der Variablen mit Mittelwert und Standardabweichung,
- Startwert für die Kommunalitätenschätzung: 1,
- Anwendung des Kaiser-Kriteriums: Zahl der extrahierten Hauptkomponenten entspricht der Zahl der Hauptkomponenten mit Eigenwerten >1,
- rechtwinklige Varimax-Rotation.

## 2.4.1 Gesamtschweizerisches Kollektiv

Da ein Teil der Basisgebiete ganz oder teilweise im benachbarten Ausland liegt, konnten nicht für alle Basisgebiete sämtliche Gebietskenngrössen berechnet werden. Deshalb ist die Fallzahl (n) der bei den Korrelations- und Hauptkomponentenanalysen berücksichtigten Gebiete kleiner (n=872) als die Gesamtzahl der Gebiete (n=1050).

Tabelle 2-5: Korrelationen zwischen den in den schweizerischen Basisgebieten (n=872) erhobenen invarianten Gebietskenngrössen

|       |    | Mor  | phometr | ische E | igensch | aften |      |      | L     | andnutzu | ng und '   | Vegetali | on   | 1   | Boden |     |
|-------|----|------|---------|---------|---------|-------|------|------|-------|----------|------------|----------|------|-----|-------|-----|
|       | mH | Hmax | Hmin    | Rel     | lm      | Exp-S | Kfi  | Wald | Wiese | Welde .  | Vers.      | Oed.     | Vgl. | See | Perm. | mWs |
| πН    | 1  |      |         |         |         |       |      | -0   | -     | D        | <b>-</b> D |          | ۵    |     | a     | -   |
| Hmax  |    | 1    | a       |         |         |       |      |      |       | Q        | Ъ-         |          | D    |     | D     | -   |
| Hmin  |    |      | 1       |         |         |       |      | -0   | -0    | ۵        |            | Q        | Q    |     |       | -0  |
| Rel   |    |      |         | 1       |         |       | Care |      |       | D        | -0         |          |      |     | Q     |     |
| lm    |    |      |         |         | 1       |       |      |      |       | Q        | q          | D        |      |     | a     |     |
| Exp-S |    |      |         |         |         | 1     |      |      |       |          |            |          |      |     |       |     |
| Kfi   |    |      |         |         |         |       | 1    |      |       |          |            |          |      |     |       |     |
| Wald  |    |      |         |         |         |       |      | 1    |       |          |            | -0       |      |     |       |     |
| Wiese |    |      |         |         |         |       |      |      | 1     |          |            | -0       |      |     | -0    |     |
| Weide |    |      |         |         | ł       |       |      |      |       | 1        | -0         |          |      |     |       | D   |
| Vers. |    |      |         |         |         |       |      |      |       |          | 1          |          |      |     |       | Q   |
| Oed.  |    |      |         |         |         |       |      |      |       |          |            | 1        |      |     | D     | -D  |
| Vgl.  |    |      |         |         |         |       |      |      |       |          |            |          | 1    |     |       |     |
| See   |    |      |         |         |         |       |      |      |       |          |            |          |      | 1   |       |     |
| Perm. |    |      |         |         |         |       |      |      |       |          |            |          |      |     | 1     |     |
| mWs   |    |      |         |         |         |       |      | 1    |       |          |            |          |      |     |       | 1   |

Table 2-5: Correlation of basin characteristics from small catchments within Switzerland (n=872)

Ir1≥0.75 □ 0.50≤3r1<0.75 -■, -□ negative Korrelationen</p>

*mH*: mittlere Gebletshöhe [m], *Hmax*: maximale Gebletshöhe [m], *Hmin*: minimale Gebletshöhe [m], *Rel*: Relietenergie (m), *Im*: mittlere Hangneigung [°], *Exp-S*: Flächenanteil der Südexposition [%], *Kll*: Kreisförmigkeitsindex [-], *Wald*: Flächenanteil des Waldes [%], *Wiese*: Anteil der Dauergrünland- und Ackerflächen [%], *Weide*: Flächenanteil der Weiden [%]; *Vers.*: Anteil versiegelter Flächen [%], *Oed.*: Ödlandanteil [%], *Vgl.*: Vergletscherungsgrad [%], *See*: Anteil der Seeflächen {%], *Perm.*: Permeabilität des Bodens (cm/s], *mW*s: mittleres Wasserspelcherungvermögen des Bodens [mm], *Neig1*: Anteil der Flächen mit Hangneigungen unter 3° [%], *Neig15*: Anteil der Flächen mit Hangneigungen über 15° [%] Bei der Betrachtung der in Tabelle 2-5 zusammengestellten Korrelationen fällt die – allerdings erwartete – Dominanz der Höhe auf: Sowohl die Neigungsparameter wie auch die Landnutzungs- und Bodenparameter hängen stark von der Höhe ab. Die durch die Korrelationsanalyse aufgedeckten Zusammenhänge, wie zum Beispiel die höhenbedingte Abnahme des Acker- und Dauergrünlandanteils (Wiese) oder des Wasserspeicherungsvermögens der Böden (*mWs*) sprechen für die Plausibilität des Datensatzes.

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse in Tabelle 2-6 bestätigen die Dominanz der Höheninformation: Durch einen Topographiefaktor (Hk 1), den unter anderem die mittlere Hangneigung hoch lädt, und einen höhenabhängigen Bodennutzungsfaktor (Hk 2), den insbesondere der Waldanteil hoch lädt, können über 60% der Gesamtvarianz der Gebietskenngrössen erklärt werden. Höhenunabhängige Grössen sind die Expositionsparameter – hier stellvertretend durch die Expositionen S, SW und W beschrieben –, der Kreisförmigkeltsindex und der Seeanteil.

Tabelle 2-6: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse basierend auf allen schweizerischen Basisgebieten und allen nordalpinen Basisgebieten (aufgeführt sind die Faktorenladungen und die durch die Hauptkomponenten erklärten Anteile an der Gesamtvarianz; es werden nur Hauptkomponenten mit Eigenwerten > 1 berücksichtigt)

|        |          | Gesamt | e Schweiz |      | Alpennordseite (gesamt) |       |      |      |  |  |  |  |
|--------|----------|--------|-----------|------|-------------------------|-------|------|------|--|--|--|--|
| 1.00   | Hk 1     | Hk 2   | Hk 3      | Hk 4 | Hk 1                    | Hk 2  | Hk 3 | Hk 4 |  |  |  |  |
| mН     | 0        | 0      |           |      | 0                       | 0     |      |      |  |  |  |  |
| Hmax   | <u> </u> |        |           |      | D                       |       |      |      |  |  |  |  |
| Hmin   |          | 0      |           |      |                         | 0     |      |      |  |  |  |  |
| Rel    | a        |        |           |      | D                       |       |      |      |  |  |  |  |
| lm     |          |        |           |      |                         |       |      |      |  |  |  |  |
| Neig1  | -0       |        |           |      | <b>P</b>                |       |      |      |  |  |  |  |
| Neig15 |          |        |           |      |                         |       |      |      |  |  |  |  |
| Exp-S  |          |        |           |      |                         |       |      |      |  |  |  |  |
| Exp-SW |          |        |           |      |                         |       |      |      |  |  |  |  |
| Exp-W  |          |        | D         |      |                         |       | 0    |      |  |  |  |  |
| Kli    |          |        |           |      |                         |       |      |      |  |  |  |  |
| Wald   |          |        |           |      |                         |       |      |      |  |  |  |  |
| Wiese  | -0       |        |           |      | ф                       |       |      |      |  |  |  |  |
| Weide  | ū        |        |           |      | ū                       |       |      |      |  |  |  |  |
| Oed.   |          | 0      |           |      |                         | 0     |      |      |  |  |  |  |
| Vgl.   |          | 0      |           |      |                         | 0     |      |      |  |  |  |  |
| Perm.  |          |        |           |      |                         | 0     |      |      |  |  |  |  |
| mWs    | -0       |        |           |      | -0                      |       |      |      |  |  |  |  |
|        | 50.9%    | 10.4%  | 8.0%      | 6.7% | 52.0%                   | 10,7% | 7.9% | 6.4% |  |  |  |  |
|        |          | 7      | 6%        |      |                         | 77    | %    |      |  |  |  |  |

Table 2-6: Results of a principle component analysis for Switzerland and the North Alpine region

Faktorenladungen:

■ >0.9

0.81-0.9

O 0.6-0.8

Variable mit höchster Faktorenladung

Bei der Interpretation der Korrelationsmatrix sind auch Inhomogenitätskorrelationen und formale Korrelationen (Sachs 1992) in Betracht zu ziehen:

 Die bei der Korrelationsanalyse festgestellte ausgeprägte Höhenabhängigkeit der Gebietskenngrössen wird vermutlich durch sogenannte Inhomogenitätskorrelationen beeinflusst: Die Basisgebiete erstrecken sich in einem Höhenbereich von 150 bis 4450m. Wird dieser gesamte Bereich berücksichtigt – werden also keine Höhenstufen unterschieden –, ergibt sich allein durch die Lageunterschiede in der Punktewolke ein Korrelationseffekt, der innerhalb höhenmässig homogeneren Teilmengen vermutlich weniger ausgeprägt ist. Zur Verringerung des Höheneinflusses wurden deshalb auch regionale Teilmengen untersucht, wobei die Höhenstufen in Anlehnung an Aschwanden und Weingartner (1985) festgelegt wurden. Aus Gründen der Fallzahl ist dieses Vorgehen allerdings nur auf der Alpennordseite möglich (vgl. Kapitel 2.4.2).

 Formale Korrelationen ergeben sich zwischen Variablen, welche sich zu 100% ergänzen. Solche Korrelationen bestehen im vorliegenden Fall vor allem zwischen den Landnutzungsparametern.

Zusammenfassend lassen sich im gesamtschweizerischen Kollektiv die folgenden linear weitgehend unabhängigen, invarianten Gebietskenngrössen bestimmen: mittlere Hangneigung, Waldanteil, Exposition, Kreisförmigkeitsindex, evtl. Seeanteil.

## 2.4.2 Nordalpine Basisgeblete

Die Ergebnisse der Korrelations- und Hauptkomponentenanalyse im gesamten nordalpinen Kollektiv weichen nur unwesentlich von den gesamtschweizerischen Resultaten ab, da rund 85% der untersuchten Basisgebiete auf der Alpennordseite liegen (Tabelle 2-6). Aufgrund der vermuteten Inhomogenitätskorrelationen werden im folgenden höhenmässig abgegrenzte Teilkollektive untersucht, die nach hydrologischen Kriterien (Aschwanden und Weingartner 1985) festgelegt wurden (Tabellen 2-7 und 2-8).

Tabelle 2-7: Korrelationen zwischen den in den nordalpinen Basisgebieten erhobenen invarianten Gebietskenngrössen Table 2-7: Correlation of basin characteristics from small catchments in the North Alpine region (n=313)

| The second | Sugar St. | Mor  | phometr | ische E | igensch | atten | 1 1/4 | 15.00 | L        | andnutzu | ing und | Vegetati | on   |     | Boden |         |  |
|------------|-----------|------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|----------|------|-----|-------|---------|--|
|            | mH        | Hmax | Hmln    | Rel     | lm      | Exp-S | Kii   | Wald  | Wiese    | Welde    | Vers.   | Oed.     | Vgl. | See | Perm. | mWs     |  |
| mН         | 1         |      |         |         |         |       |       | 9     | <b>-</b> |          |         | ū        | D    |     |       |         |  |
| Hinax      |           | 1    |         | ۵       |         |       |       | -0    |          | -D       |         |          | Q    |     |       |         |  |
| Hmin       |           |      | 1       |         |         |       |       | -0    |          |          |         |          |      |     |       |         |  |
| Rel        |           |      |         | 1       |         |       |       |       |          |          |         |          |      |     |       |         |  |
| lm         |           |      |         |         | 1       |       |       |       |          |          |         |          |      |     |       |         |  |
| Exp-S      |           |      |         |         | [       | 1     |       |       |          |          |         |          |      |     | 12232 |         |  |
| Kli        |           |      | C       |         |         |       | 1     |       |          |          |         |          |      |     |       |         |  |
| Wald       |           |      |         |         |         |       |       | 1     | a        |          |         | _Q       |      |     |       | -       |  |
| Wiese      |           |      |         |         |         |       |       |       | 1        |          | a       | -0       |      |     |       | 12801 0 |  |
| Weide      |           |      |         |         |         |       |       |       |          | 1        |         |          | þ    |     |       |         |  |
| Vers.      |           |      |         |         |         |       |       |       |          |          | 1       |          |      |     |       |         |  |
| Oed.       |           |      |         |         |         |       |       |       |          |          |         | 1        |      |     |       | þ       |  |
| Vgl.       |           |      |         |         |         |       |       |       |          |          |         |          | 1    |     |       |         |  |
| See        |           |      |         |         |         |       |       |       |          |          |         |          |      | 1   |       |         |  |
| Perm.      |           |      |         |         |         |       |       |       |          |          |         |          |      |     | 1     | Ъ-      |  |
| mWs        |           |      |         |         |         |       |       |       |          |          |         |          |      |     |       | 1       |  |

Alpine Einzugsgebiete (mH > 1550 m, n = 313)

Irl≥ 0.75

Q.50 ≤ {r} | < 0.75</p>

-**-**,-Q r

negative Korrelationen

46

#### Tabelie 2-7 (Fortsetzung)

|       | 4  | Mor  | phometr | ische El | gensch | aften | 1  | Lun Lin | L     | andnutzu   | ing und | Vegetati | on   |     | Boden |          |
|-------|----|------|---------|----------|--------|-------|----|---------|-------|------------|---------|----------|------|-----|-------|----------|
|       | mH | Hmax | Hmin    | Rel      | lm     | Exp-S | KI | Wald    | Wiese | Weide      | Vers.   | Oed.     | Vgl. | See | Perm. | mWs      |
| тН    | 1  | a    |         |          | Q      |       |    |         | -0    | ۵          |         |          |      |     |       | -0       |
| Hmax  |    | 1    |         |          |        |       |    |         |       |            |         |          |      |     |       | -0       |
| Hmin  |    |      | 1       | -D-      |        |       |    |         |       |            |         |          |      |     |       |          |
| Rel   |    |      |         | 1        | 1      |       |    |         |       |            |         |          |      |     |       | -0       |
| lm    |    |      |         |          | 1      |       |    |         |       |            |         | D        |      |     |       |          |
| Exp-S |    |      |         |          |        | 1     |    |         |       |            |         |          |      |     |       |          |
| KII   |    |      |         |          |        |       | ٢  |         |       |            |         |          |      |     |       |          |
| Wald  |    |      |         |          |        |       |    | 1       |       | P-         |         |          |      |     |       |          |
| Wiese |    |      |         |          |        |       |    |         | 1     | <b>P</b> - |         |          |      |     |       |          |
| Walde |    |      |         |          |        |       |    |         |       | 1          |         |          |      |     |       |          |
| Vers. |    |      |         |          |        |       |    |         |       |            | 1       |          |      |     |       |          |
| Oed.  |    |      |         |          |        |       |    |         |       |            |         | 1        |      |     |       | <b>-</b> |
| Val.  |    |      |         |          |        |       |    |         |       |            |         |          | 1    |     |       |          |
| See   |    |      |         |          | }      |       |    |         |       |            |         |          |      | 1   |       |          |
| Parm. |    |      |         |          |        |       |    |         |       |            |         |          |      |     | 1     |          |
| mWs   |    |      |         |          |        |       |    |         |       |            |         |          |      |     |       | 1        |

#### Voralpine Einzugsgebiete (1000 m $< mH \le 1550$ m, n = 133)

|       | 1.1 | Mor  | phometr | lische E | igensch | aften |      | Landnutzung und Vegetation |       |       |       |      |      |     |       | Boden      |  |
|-------|-----|------|---------|----------|---------|-------|------|----------------------------|-------|-------|-------|------|------|-----|-------|------------|--|
|       | mH  | Hmax | Himin   | Rel      | lm      | Exp-S | Kifi | Wald                       | Wlese | Weide | Vers, | Ded. | Vgl. | See | Perm. | mWs        |  |
| mH    | 1   |      | Q       | D        | Q       |       |      |                            |       | Q     |       |      |      |     |       |            |  |
| Hmax  |     | 1    |         |          |         |       |      |                            |       |       |       |      |      |     |       |            |  |
| Hmin  |     |      | 1       |          |         |       |      |                            |       |       |       |      |      |     |       |            |  |
| Rol   |     |      |         | 1        | -       |       |      |                            | 1     | D     |       |      |      |     |       | <b>P</b> - |  |
| lm .  |     |      |         |          | 1       |       |      | Q                          | -0    | Q     |       |      |      |     |       | þ          |  |
| Exp-S |     |      |         |          |         | í     |      |                            |       |       |       |      |      |     |       |            |  |
| Kli   |     |      |         |          |         |       | 1    |                            |       |       |       |      |      |     |       |            |  |
| Wald  |     |      |         |          |         |       |      | 1                          |       |       |       |      |      |     |       |            |  |
| Wiese |     |      |         |          |         |       |      |                            | 1     | þ     |       |      |      |     |       | a          |  |
| Weide |     |      |         |          |         |       |      |                            |       | 1     |       |      |      |     |       |            |  |
| Vers. |     |      |         |          |         |       |      |                            |       |       | 1     | E    |      |     |       |            |  |
| 0ed.  |     |      |         |          |         |       |      | -                          |       |       |       | 1    |      |     |       |            |  |
| Vgl.  |     |      |         |          |         |       |      |                            |       |       |       |      | 1    |     |       |            |  |
| See   |     |      |         |          |         |       |      |                            |       |       |       |      |      | 1   |       |            |  |
| Perm. |     |      |         |          |         |       |      |                            |       |       |       |      |      |     | 1     |            |  |
| mWs   |     |      |         |          |         | 1     |      |                            |       |       |       |      |      |     |       | 1          |  |



-**-**, -Q

negative Korrelationen

*mH*: mittlere Gebietshöhe [m], *Hmax*: maximale Gebietshöhe [m], *Hmin*: minimale Gebietshöhe (m), *Rel*: Reliefenergie [m], *Im*: mittlere Hangnelgung [°], *Exp-S*: Flächenanteil der Südexposition [%], *Kl*i: Kreisförmigkeltsindex [-], *Wald*: Flächenanteil des Waldes [%], *Wiese*: Anteil der Dauergrünland- und Ackerflächen [%], *Weide*: Flächenanteil der Weiden [%]; *Vers.*: Anteil versiegelter Flächen [%], *Oed.*: Ödlandanteil [%], *Vgl.*: Vergletscherungsgrad [%], *See*: Anteil der Seeflächen [%], *Perm.*: Permeabilität des Bodens (cm/s], *mWs*: mittleres Wasserspeicherungsvermögen des Bodens [mm], *Neig1*: Anteil der Flächen mit Hangneigungen unter 3° [%], *Neig15*: Anteil der Flächen mit Hangneigungen über 15° [%] Tabelle 2-8: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse basierend auf nordalpinen Basisgebieten, differenziert nach Höhenbereichen

|        |       | (     | Alpine<br>mH > 1 | Gebleti<br>1550 m | e<br>1) |      |       | Vo<br>(1000 | oralpino<br>) < mł | e Gebie<br>$d \le 153$ | Mittelländisch-jurass, Gebiete $(mH \le 1000 \text{ m})$ |      |       |       |      |      |  |
|--------|-------|-------|------------------|-------------------|---------|------|-------|-------------|--------------------|------------------------|----------------------------------------------------------|------|-------|-------|------|------|--|
|        | Hk 1  | Hk 2  | Hk 3             | Hk 4              | Hk 5    | Hk 6 | Hk 1  | Hk2         | Hk 3               | Hk 4                   | Hk 5                                                     | Hk 6 | Hk 1  | Hk 2  | Hk 3 | Hk 4 |  |
| mН     | a     |       |                  |                   |         |      |       | 0           | · · · · · ·        |                        |                                                          |      |       | 0     |      |      |  |
| Hmax   |       | 0     |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      | 0     |       |      |      |  |
| Hmín   | a     |       |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| Rel    |       | 0     |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      | 0     |       |      |      |  |
| lm     |       |       |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| Neig1  |       |       |                  |                   |         |      |       | -0          |                    |                        |                                                          |      | -0    |       |      |      |  |
| Neig15 |       |       | Ū                |                   |         |      | ū     |             |                    |                        |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| Exp-S  |       |       |                  |                   |         | [    |       |             |                    |                        |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| Exp-SW |       |       |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      |       |       | 0    |      |  |
| Exp-W  |       |       |                  |                   |         |      |       |             |                    | 0                      |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| Kli    |       |       |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| Wald   |       |       |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      | 0     |       |      |      |  |
| Wiese  | -0    |       |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      | -0    |       |      |      |  |
| Welde  |       |       |                  |                   |         |      |       | 0           |                    |                        |                                                          |      | 0     |       |      |      |  |
| 0ed.   | 0     |       |                  |                   |         |      | 0     |             |                    |                        |                                                          |      |       | -0    |      |      |  |
| Vgl.   |       | 0     |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| Perm.  |       |       |                  |                   |         |      |       |             |                    |                        |                                                          |      |       |       |      |      |  |
| mWs    | ]     |       |                  |                   |         |      | -0    |             |                    |                        |                                                          |      | -0    |       |      |      |  |
|        | 30.3% | 15.7% | 9.5%             | 8.2%              | 6.3%    | 6.1% | 34.1% | 14.9%       | 8.1%               | 7.6%                   | 6.7%                                                     | 5.6% | 38.2% | 13.3% | 8.5% | 6.3% |  |
|        |       |       | 76               | .1%               |         |      |       |             | 7                  | 7%                     |                                                          |      |       | 66.3% |      |      |  |

Table 2-8: Results of a principle component analysis for the North Alpine region, stratified by altitude

Faktorenladungen:

>0.9

0.81~0.9

O 0.6-0.8

Variable mit höchster Faktorenladung

#### a) Alpine Basisgebiete (mittlere Höhe > 1550 m)

Durch die Einengung des Höhenbereichs konnte die Dominanz der Höhenverhältnisse innerhalb der Korrelationsstruktur etwas reduziert werden. Die höhendominierten Hauptkomponenten 1 und 2 beschreiben hier "nur" noch 46% der Gesamtvarianz (Tabelle 2-8). Der eher schwache Zusammenhang zwischen den Höhen- und Neigungsverhältnissen wird durch Abbildung 2-18 bestätigt: Unterhalb einer mittleren Höhe von 1550m besteht ein starker Zusammenhang zwischen der mittleren Gebietshöhe und der mittleren Hangneigung, oberhalb dieser Höhe ein nur noch schwacher Zusammenhang.

Insgesamt lassen sich im alpinen Kollektiv folgende linear weitgehend unabhängige, invariante Gebietskenngrössen erkennen: mittlere Gebietshöhe, Weideanteil, mittlere Hangnelgung, Exposition, Kreisförmigkeitsindex, mittleres Wasserspeicherungsvermögen der Böden, evtl. Seeanteil. Diese auf der Korrelations- und Hauptkomponentenanalyse beruhende Beurteilung der linearen Unabhängigkeit der Gebietskenngrössen wird durch die Tabelle 2-9 bestätigt, auch wenn einzelne signifikante Korrelationen zwischen diesen Variablen zu beobachten sind.



Abbildung 2-18: Zusammenhang zwischen der mittleren Gebietshöhe und der mittleren Hangneigung in den Basisgebieten der Schweiz

Figure 2-18: Relationship between mean altitude and mean slope in small Swiss catchments

Tabelle 2-9: Korrelationskoeffizienten zwischen den linear weitgehend unabhängigen Gebletskenngrössen der alpinen Basisgeblete ( $r_{kt}(\alpha=5\%) = 0.113$ )

Table 2-9: Correlation coefficients of "independent" basin characteristics in the North Alpine region (mean altitude  $\geq$  1550m)

|       | mH | Welde | Im    | Exp-S | KI    | mWs   |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| mH    | 1  | -0,40 | 0.04  | -0.07 | 0,15  | -0.44 |
| Welde |    | 1     | -0.38 | 0.03  | -0.04 | 0.42  |
| lm    |    |       | 1     | -0.14 | 0.12  | -0.42 |
| Exp-S |    |       |       | 1     | -0.08 | 0.03  |
| KII   |    |       |       |       | 1     | 0.00  |
| m₩s   |    |       |       |       |       | 1     |

*mH*: mittlere Gebietshöhe [m], *Weide*: Flächenanteil der Weiden [%], *Im*: mittlere Hangneigung [°], *Exp-S*: Flächenanteil der Südexposition (%), *Kl*: Kreisförmigkeitsindex [-], *mWs*: mittleres Wasserspeicherungsvermögen des Bodens [mm]

#### b) Voralpine Basisgebiete der Alpennordseite (1000 m < mittlere Gebietshöhe ≤ 1550 m)

Die Gebietskenngrössen, welche die einzelnen Hauptkomponenten in Tabelle 2-8 hoch laden, können durch folgende Sammelbegriffe beschrieben werden:

- Hk 1: Neigungsverhältnisse
- Hk 2: höhenabhängige Landnutzung
- Hk 3: höhenunabhängige Landnutzung
- Hk 4 und 5: Exposition
- Hk 6: Form des Einzugsgebietes

Höhenabhängig sind vor allem die Hangneigungsparameter und die Anteile der Dauergrünland- und Ackerflächen sowie der Anteil der Weideflächen.

Im voralpinen Kollektiv wurden folgende invariante Gebietskenngrössen als linear weitgehend unabhängig erkannt: Reliefenergie, Flächenanteil des Dauergrünlands und der Äcker, Waldanteil, Expositionen, Kreisförmigkeitsindex, Permeabilität, evtl. Seeanteil.

#### c) Mittelländische und jurassische Basisgebiete (mittlere Gebietshöhe ≤ 1000 m)

Bei den tiefer liegenden nordalpinen Basisgebieten bestehen enge lineare Zusammenhänge vor allem zwischen den Höhen- und Neigungsverhältnissen (Tabelle 2-7). Bei der Landnutzung ist insbesondere der Weideanteil höhen- bzw. neigungsabhängig. Insgesamt ergeben sich folgende linear weitgehend unabhängige, invariante Gebietskenngrössen (vgl. Tabelle 2-8): mittlere Hangneigung, minimale Gebietshöhe, Expositionen, KreisförmigkeitsIndex, Permeabilität, evtl. Seeanteil.

## 2.4.3 Südalpine Basisgebiete

Charakteristisch für die Alpensüdseite sind (Tabelle 2-10)

- die ausgeprägten Korrelationen zwischen der Gebietshöhe und der Landnutzung, wobei auch hier Inhomogenitätskorrelationen nicht auszuschliessen sind, und
- die vergleichsweise geringe Abhängigkeit der Neigungsverhältnisse von der Höhenlage.

Letzteres ist ein Indiz für die besonderen Reliefbedingungen auf der Alpensüdseite.

Tabelle 2-10 Korrelationen zwischen den in den südalpinen Basisgebieten (n=83) erhobenen invarianten Gebietskenngrössen

|       |    | Mor  | phometr | lische El | igensch | aften | Ster 1 | Landnutzung und Vegetation |       |       |       |      |      |     |       | Boden |  |
|-------|----|------|---------|-----------|---------|-------|--------|----------------------------|-------|-------|-------|------|------|-----|-------|-------|--|
|       | mН | Hmax | Hmin    | Rel       | lm      | Exp-S | Kli    | Wald                       | Wiese | Weide | Vers. | Oed. | Vgl. | See | Perm. | mWs   |  |
| mH    | 1  |      |         |           |         |       |        | -                          | -8    |       | -0    | Q    |      |     |       |       |  |
| Himax |    | 1    | ū       | D         | D       |       |        | þ                          | þ     |       | D     | Q    |      |     |       |       |  |
| Hmin  |    |      | 1       |           |         |       |        | -                          | -0    |       |       | a    |      |     |       |       |  |
| Rel   |    |      |         | 1         |         |       |        |                            |       |       |       |      |      | 1   |       |       |  |
| lm    |    |      |         |           | 1       |       |        |                            |       |       | -0    |      |      |     | a     | -     |  |
| Exp-S |    |      |         |           |         | 1     |        |                            |       |       |       |      |      |     |       |       |  |
| KII   |    |      |         |           |         |       | 1      |                            |       |       |       |      |      |     |       |       |  |
| Wald  |    |      |         |           |         |       |        | 1                          | D.    |       |       | -    |      |     |       |       |  |
| Wiese |    |      |         |           |         |       |        |                            | 1     |       |       | -0   |      |     | -     |       |  |
| Weide |    |      |         |           |         |       | -      |                            |       | 1     |       |      |      |     |       |       |  |
| Vers. |    |      |         |           |         |       |        |                            |       |       | 1     |      |      |     |       | ū     |  |
| Oed.  |    |      |         |           |         |       |        |                            |       |       |       | 1    |      |     |       |       |  |
| Vgl.  |    |      |         |           |         |       |        |                            |       |       |       |      | 1    |     |       |       |  |
| See   |    |      |         |           |         |       |        |                            |       |       |       |      |      | 1   |       |       |  |
| Perm. |    |      |         |           |         |       |        |                            |       |       |       |      |      |     | 1     | -0    |  |
| mWs   |    |      |         |           |         |       |        |                            |       |       |       |      |      |     |       | 1     |  |

Table 2-10: Correlation of basin characteristics from small catchments in the South Alpine region (n=83)

mH: mittlere Gebietshöhe [m], Hmax: maximale Gebietshöhe [m], Hmin; minimale Gebietshöhe [m], Rel: Rellefenergie [m], Im: mittlere Hangnelgung [°], Exp-S: Flächenanteil der Südexposition [%], Kli: Kreisförmigkeitsindex [-], Wald: Flächenanteil des Waldes [%], Wiese: Anteil der Dauergrünland- und Ackerflächen [%), Weide: Flächenanteil der Welden [%]; Vers.: Anteil verslegelter Flächen [%], Oed.: Ödlandanteil [%], Vgl.: Vergletscherungsgrad [%], See: Anteil der Seeflächen [%], Perm.: Permeabilität des Bodens [cm/s], mWs: mittleres Wasserspeicherungsvermögen des Bodens [mm], Neig 1: Anteil der Flächen mit Hangneigungen unter 3° [%], Neig 15: Anteil der Flächen mit Hangneigungen über 15° {%]

|        | Hk 1  | Hk 2  | Hk 3  | Hk 4 |
|--------|-------|-------|-------|------|
| mH     |       |       |       |      |
| Hmax   | 0     |       |       |      |
| Hmin   | a     |       |       |      |
| Rel    |       |       | 0     |      |
| Im     |       |       |       |      |
| Neig 1 |       | -0    |       |      |
| Neig15 |       |       |       |      |
| Exp-S  |       |       |       | -0   |
| Exp-SW |       |       |       |      |
| Exp-W  |       |       |       |      |
| Kli    |       |       |       |      |
| Wald   | -0    |       |       |      |
| Wiese  | -0    |       |       |      |
| Weide  |       |       |       |      |
| Oed.   | 0     |       |       |      |
| Vgl,   | 0     |       |       |      |
| Perm.  | 1     | 0     |       |      |
| mWs    |       | -0    |       |      |
|        | 32.5% | 20.8% | 10.4% | 7.0% |
|        |       | 7(    | ).7 % | •    |

Tabelle 2-11: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse basierend auf allen südalpinen Basisgebieten Table 2-11: Results of a principle component analysis for the South Alpine region

#### Faktorenladungen:

| 1 0000 | Singengen                            |
|--------|--------------------------------------|
|        | >0.9                                 |
|        | 0.81-0.9                             |
| 0      | 0.6–0.8                              |
|        | Variable mit höchster Faktorenladung |

Mit einem Höhenfaktor (Hk 1), einem Neigungsfaktor (Hk 2), einem Nutzungs- und Expositionsfaktor (Hk 3 und 4) lassen sich rund 70% der Gesamtvarianz erklären (Tabelle 2-11).

Im südalpinen Kollektiv, das sich aus Gründen der Fallzahl nicht weiter untergliedern liess, können folgende Gebietskenngrössen als linear weitgehend unabhängig bezeichnet werden: mittlere Gebietshöhe, mittlere Hangneigung, Weideanteil, Expositionen, Kreisförmigkeitsindex, evtl. Seeanteil.

## 2.4.4 Linear unabhängige Gebietskenngrössen - Zusammenfassung

Die linearen Zusammenhänge zwischen den Gebietskenngrössen sollten bei regionalhydrologischen Analysen unbedingt mitberücksichtigt werden. Die lineare Unabhängigkeit bildet bei der Auswahl hydrologisch relevanter Gebietskenngrössen ein entscheidendes Kriterium (s. Abbildung 2-3).

Die Tabelle 2-12 fasst die Ergebnisse der Korrelations- und Hauptkomponentenanalysen zusammen. Sie zeigt, welche invarianten Gebietskenngrössen als linear weitgehend unabhängig angesehen werden können. Es wird hier bewusst von "weitgehend unabhängig" gesprochen, da die aufgeführten Gebietskenngrössen aus statistischer Sicht nicht vollständig unabhängig sind (vgl. Tabelle 2-9). Im konkreten Fall wird man sich entscheiden müssen, welcher Grad der Abhängigkeit zwischen den Gebietskenngrössen tolerierbar ist. Dazu bieten die Tabellen dieses Kapitels 2.4 wichtige Entscheidungshilfen.

|       | Gesamte Schweiz<br>Alpennordseite | Alpine Basisgebiete | Voralpine<br>Basisgebiete | Mittelländ jurass.<br>Basisgebiete | Alpensüdseite |
|-------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------|
| mН    |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Hmax  |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Hmin  |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Rel   |                                   |                     |                           |                                    |               |
| lm    |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Exp-S |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Kfi   |                                   | ŧ.                  |                           |                                    |               |
| Wald  |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Wiese |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Weide |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Vers. |                                   |                     |                           |                                    |               |
| 0ed.  |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Vgl.  |                                   |                     |                           |                                    |               |
| See   |                                   |                     |                           |                                    |               |
| Perm. |                                   |                     |                           |                                    |               |
| mWs   |                                   |                     |                           |                                    |               |

Tabelle 2-12: Linear (weitgehend) unabhängige invariante Gebietskenngrössen – Zusammenfassung Table 2-12: Summary of "independent" basin characteristics

*mH*: mittlere Gebietshöhe [m], *Hmax*: maximale Gebietshöhe [m], *Hmin*: minimale Gebietshöhe [m], *Rei*: Reliefenergie [m], *Im*: mittlere Hangneigung [°], *Exp-S*: Flächenanteil der Südexposition [%], *Kli*: Kreisförmigkeitsindex [-], *Wald*: Flächenanteil des Waldes [%], *Wiese*: Anteil der Dauergrünland- und Ackerflächen [%], *Weide*: Flächenanteil der Weiden [%]; *Vers.*: Anteil versiegelter Flächen [%], *Oed.*: Ödlandanteil [%], *Vgl.*: Vergletscherungsgrad {%], See: Anteil der Seeflächen [%], *Perm.*: Permeabilität des Bodens [cm/s], *mWs*: mittleres Wasserspeicherungsvermögen des Bodens [mm]

Tabelle 2-13: Faktorenwerte der standardisierten Gebietskenngrössen für das gesamtschweizerische Kollektiv sowie Mittelwerte und Standardabweichungen, die für die Standardisierung der Variablen verwendet wurden Toble 2-12: Foster und verwendet der die die standardisierung der Variablen verwendet wurden

Table 2-13: Factor values of standardized basin characteristics for Switzerland, as well as the mean and standard deviation

|        | 1 Same and a | Faktorenwerte |        |        | Statistische | e Masszahlen |
|--------|--------------|---------------|--------|--------|--------------|--------------|
|        | Hk 1         | Hk 2          | Hk 3   | Hk 4   | Mittelwert   | Standardabw. |
| mН     | 0.046        | 0.141         | 0.010  | -0,069 | 1370 m       | 720 m        |
| Hmax   | 0.091        | 0.057         | 0.001  | -0.003 | 2106 m       | 1056 m       |
| Hmin   | -0.030       | 0.240         | 0.026  | -0.187 | 768 m        | 432 m        |
| Rel    | 0.135        | -0.054        | -0.013 | 0.096  | 1436 m       | 815 m        |
| lm     | 0.150        | -0.066        | -0.001 | 0.065  | 16°          | 9.           |
| Neig1  | -0.184       | 0.144         | -0.014 | 0.048  | 15%          | 22%          |
| Neig15 | 0.153        | -0.066        | -0.002 | 0.041  | 49%          | 36%          |
| Exp-S  | 0.006        | 0.006         | -0.618 | 0.210  | 11%          | 8%           |
| Exp-SW | -0.029       | -0.040        | -0.011 | 0.669  | 10%          | 8%           |
| Exp-W  | -0.004       | -0.050        | 0.549  | 0.238  | 13%          | 8%           |
| KII    | 0.025        | 0.023         | 0.103  | -0.009 | 0.55         | 0.11         |
| Wald   | 0.128        | -0.355        | -0.027 | 0.140  | 26%          | 16%          |
| Wiese  | -0.140       | 0.034         | 0.020  | 0.032  | 26%          | 25%          |
| Weide  | 0.187        | -0.140        | 0.044  | -0.252 | 24%          | 20%          |
| 0ed.   | -0.070       | 0.259         | -0,039 | 0.106  | 23%          | 17%          |
| Vgl.   | -0.120       | 0.308         | -0.040 | 0.066  | 3.0%         | 9.2%         |
| Perm.  | -0.010       | 0.113         | -0,075 | 0.298  | 0.02 cm/s    | 0.02 cm/s    |
| mWs    | -0.130       | 0.026         | 0.044  | -0.056 | 43 mm        | 24 mm        |

Da die Höhen- und Neigungsverhältnisse in der Regel stark korrelieren, sind in Tabelle 2-12 nur wenige Höhen- oder ein Neigungsparameter vertreten. Im statistischen Sinn vollkommen andere Informationen als die Höhen- und Neigungsparameter tragen die Expositionsparameter, der Kreisförmigkeitsindex und der Seeanteil. Seen treten allerdings nur in rund einem Zehntel der Basisgebiete auf. Von grosser hydrologischer Bedeutung sind auch die beiden von den anderen invarianten Kenngrössen weitgehend unabhängigen Parameter Permeabilität und Wasserspeicherungsvermögen der Böden.

Es sei abschliessend auch auf die Möglichkeit hingewiesen, bei regionalhydrologischen Analysen die berechneten Hauptkomponenten, dle eine Linearkombination der Gebietskenngrössen darstellen, als unabhängige Variablen einzusetzen. Für Untersuchungen im gesamtschweizerischen Kollektiv können dazu die in Tabelle 2-13 zusammengestellten Faktorenwerte verwendet werden.

.

# Teil II: Anwendungen

# 3 Identifikation hydrologisch ähnlicher Einzugsgebiete auf der Basis von Gebietskenngrössen – Anwendungen im Mittelwasserbereich

# 3.1 Visualisierung der mehrdimensionalen Gebietseigenschaften in Gesichter-Darstellungen

Die Eigenschaften der schweizerischen Basisgebiete konnten durch eine Vielzahl invarianter Gebietskenngrössen beschrieben werden (vgl. Kapitel 2.2). Zur Durchführung vergleichender Analysen, aber auch zur Unterstützung regional-taxonomischer Untersuchungen ist es hilfreich, den *k*-dimensionalen Variablenraum der Einzugsgebiete – aufgespannt durch *k* invariante Gebietskenngrössen – graphisch darzustellen.

Zur Visualisierung mehrdimensionaler Daten stehen zweidimensionale Symbole zur Verfügung. Häufig verwendet werden Profilkurven (Hartigan 1975), Sternprofile (Fienberg 1979), Andrews-Kurven (Andrews 1972, vgl. Kapitel 3.3.2), Bäume oder Burgen (Kleiner und Hartigan 1981) und Gesichter (Chernoff 1973). Die Variablen werden den Merkmalen dieser Symbole zugeordnet. Die Symbole sollten der menschlichen Wahrnehmung möglichst angepasst sein. Deshalb eignen sich Gesichterdarstellungen ganz besonders. Der Mensch ist es gewohnt, Gesichter differenziert zu betrachten und auch feine Unterschiede zwischen Gesichtern festzustellen. Es liegt deshalb nahe, mehrdimensionale Daten mittels Gesichtern zu visualisieren.

# 3.1.1 Konstruktion der Gesichter

Die Idee zur Gesichterdarstellung stammt von Chernoff (1973). Bei unserem Visualisierungsversuch verwendeten wir anstelle der originalen Chernoff-Faces die gegenüber dem Original verbesserten Riedwyl-Flury-Köpfe, welche es erlauben, bei symmetrischer Betrachtung der Gesichtshälften 18 Variablen, bei asymmetrischer Behandlung der Gesichtshälften 36 Variablen darzustellen (Flury und Riedwyl 1981).

Für die Konstruktion von Gesichtern müssen die Variablen (X) in einen Standardbereich [0,1] transformiert werden:

$$z_i = \frac{x_i - Min(x)}{Max(x) - Min(x)}$$
(3-1)

| Z <sub>i</sub> | standardisierter Wert der Variablen X im <i>i</i> -ten Einzugsgebiet |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|
| <i>x,</i>      | Wert der Variablen X im I-ten Einzugsgebiet                          |
| Min(x)         | minimaler Wert der Variablen X                                       |
| Max(x)         | maximaler Wert der Variablen X                                       |

Jedem Gesichtsteil (Haar, Augen, Mund) werden eine oder mehrere Variablen zugeordnet (Abbildung 3-1). Die Gesichtsteile sind in Funktion des standardisierten Wertes z, unterschiedlich geformt und/oder verschieden lang. In Abbildung 3-1 sind die beiden Extremgesichter aufgeführt, bei denen die Variablen minimale bzw. maximale Werte annehmen. Die beiden Gesichter zeigen somit die Variationsbreite der Darstellungsmöglichkeiten auf.



Exp-NW: Flächenanteil der Nordwestexposition [%], Exp-W: Flächenanteil der Westexposition [%], Hmax: maximale Gebietshöhe [m], Im: mittlere Hangneigung [°], mH: mittlere Gebietshöhe [m], mWs: mittleres Wasserspeicherungsvermögen des Bodens [mm], Nelg1: Anteil der Flächen mit Hangneigungen unter 3° [%], Nelg15: Anteil der Flächen mit Hangneigungen über 15° [%], Oed.: Ödlandanteil [%], Rel: Reliefenergie [m], Vers.: Anteil verslegelter Flächen [%], Vgl.: Vergletscherungsgrad [%], Wald: Flächenanteil des Waldes [%], Welde: Flächenanteil der Weiden [%]; Wiese: Anteil der Dauergrünland- und Ackerflächen [%]

Abbildung 3-1: Zuordnung der invarianten Gebietskenngrössen zu den Gesichtsmerkmalen sowie Darstellung der beiden Extremgesichter

Figure 3-1: Representation of the invariant basin characteristics by facial features and the two extreme faces

Bei der Konstruktion der Gesichter der schweizerischen Basisgebiete gingen wir von den in Kapitel 2.4 diskutierten Ergebnissen der Hauptkomponentenanalyse aus (vgl. Tabelle 2-6: "Gesamte Schweiz"). Die hochladenden Gebietskenngrössen (mittlere Hangneigung (*Im*), Flächenanteil der steilen Flächen (*Neig15*) etc.) der ersten Hauptkomponente, die 51% der Gesamtvarianz erktärt, wurden dem Bereich der Augen zugeordnet, da die Augen für die Wahrnehmung eines Gesichtes sehr wichtig sind (Abbildung 3-1). Der Bereich der Haare umschreibt die zweite, jener des Mundes die dritte Hauptkomponente.

In Abbildung 3-2 ist der Nord-Süd-Wandel der Gebietskenngrössen mit Riedwyl-Flury-Köpfen an ausgewählten Basisgebieten festgehalten. Die Abbildung dokumentiert den Übergang von einem mittelländischen "Positivgesicht" mit z<sub>r</sub>-Werten nahe bei 1 (Basisgebiet 20621 im Berner Seeland) zu einem hochalpinen "Negativgesicht" mit z<sub>r</sub>-Werten nahe bei 0 (Gebiet 50031: Fiescher Bach) und welter zu einem Gesicht südalpiner Ausprägung (Gebiet 60211: Vedeggio).

Das für mittelländische Verhältnisse charakteristische Gesicht des Basisgebletes 20621 zeichnet sich unter anderem aus durch

- einen grossen Anteil wenig geneigter Flächen (Neig1) (⇔ grosse Pupillen),
- einen geringen Anteil der Weldeflächen (⇔ feine Augenbrauen),
- einen hohen Anteil an Dauergrünland- und Ackerflächen (⇔ nach oben gebogene Augenbrauen),
- einen hohen Anteil an bodenbedeckten Flächen bzw. einen geringen Anteil an Ödlandflächen (⇔ dichte Schraffur der Haare),
- eine kleine mittlere Gebietshöhe (⇔ geringer Abstand zwischen den Augen und den Augenbrauen),
- eine tiefe maximale Gebietshöhe (⇔ breites Kinn),
- eine minimale Reliefenergie (⇔ fehlender Abstand zwischen den Augenbrauen) und
- ein hohes Wasserspeicherungsvermögen (⇔ grosser Augenabstand).

Das hochalpine Gesicht 50031 lässt sich wie folgt charakterisleren:

- geringer Anteil bodenbedeckter Flächen bzw. hoher Ödlandanteil (⇔ Haare nicht schraffiert),
- hoher Vergletscherungsgrad (⇔ Ansatz zu einer Glatze, "Geheimratsecken"),
- kleiner Waldanteil (⇔ spitze obere Begrenzung der Haare bzw. des Kopfs),
- kleiner Weideanteil (⇔ feine Augenbrauen),
- grosse maximale Gebietshöhe (⇔ ausgemergelte (untere) Gesichtsform) und
- grosse mittlere Hangneigung (⇔ Schrägstellung der Augen) usw.



#### Nord

Süd

Abbildung 3-2: Der Wandel der Gebietskenngrössen entlang eines Nord-Süd-Profils durch die Schweiz dargestellt mit Hilfe von Gesichtern; 10651: Nummer des Basisgebietes (vgl. Abbildung 2-6) Figure 3-2: Change in basin characteristics along a north-south-profile through Switzerland as represented by faces

Wie diese Beispiele belegen, braucht es eine gewisse Einarbeitungszeit, um die Unterschiede zwischen den Gesichtern bzw. den Basisgebieten zu erkennen. Es sind immer nur qualitative und relative Aussagen möglich. Je nach Zuordnung zu den Gesichtsmerkmalen lassen sich einige Variablen sehr gut, andere etwas weniger gut beurteilen und interpretieren. In der vorliegenden Variante ist der Mundform wenig Beachtung geschenkt worden. Ein lachendes oder ein trauriges Gesicht, das durch die Mundform wesentlich geprägt wird, fällt aber sofort auf. Infolgedessen ist zu überlegen, ob dem Mund bei einer zukünftigen Anwendung nicht eine höhere Bedeutung beigemessen werden müsste. So könnte beispielsweise die aus regionalhydrologischer Sicht sehr wichtige Kenngrösse "mittlere Gebietshöhe" mit den Merkmalen des Mundes dargestellt werden, um ihr ein höheres Gewicht zu verleihen.

## 3.1.2 Anwendungsmöglichkeiten

Im wahrsten Sinne des Wortes interessante Perspektiven eröffnet die Nutzung der Asymmetrie der Gesichtshälften (Abbildung 3-3). Wird die linke Gesichtshälfte einem ersten, die rechte einem zweiten Einzugsgebiet zugewiesen und werden die sich entsprechenden Variablen den gleichen Gesichtsmerkmalen zugeteilt (18 Variablen pro Gesichtshälfte), so entstehen – bei Unterschieden in den Variablenwerten – Asymmetrien, die den paarweisen Vergleich von Einzugsgebieten wesentlich erleichtern. Dies soll an einem Beispiel kurz erläutert werden: Die in Abbildung 3-3 (ganz links) einander gegenübergestellten Basisgebiete 20593 und 20572 liegen beide im Emmental (vgl. Abbildung 3-2). Es fallen sofort die Unterschiede auf im Haarwuchs, also im Ödlandanteil, in der oberen Begrenzung der Haare, also im Waldanteil, in der Dichte der Augenbrauen, also im Weidelandanteil, und in der Schrägstellung von Augen und Mund, also in den Hangneigungs- und Expositionsverhältnissen. Das Basisgebiet 20593 besitzt demnach im Vergleich zum Gebiet 20572 einen kleineren Ödlandanteil bzw. einen grösseren Anteil an Flächen, die mit gewachsenem Boden bedeckt sind, einen grösseren Waldanteil, einen geringeren Weidelandanteil und eine kleinere mittlere Hangneigung; es ist aus hydrologischer Sicht somit anders zu beurteilen.



Abbildung 3-3: Paarweise Einzugsgebietsvergleiche mittels Gesichter, basierend auf Gebietskenngrössen; 20593: Nummer des Basisgebletes (vgl. Abbildung 2-6)

Figure 3-3: Pair-wise comparison of catchments based on basin characteristics using faces

Die asymmetrischen Gesichter können beispielsweise auch zum Vergleich von Zeitreihen (Parameter einer ersten Zeitreihe versus Parameter einer zweiten Zeitreihe) oder zur Darstellung der Güte eines hydrologischen Modells (gemessene versus geschätzte Parameter) eingesetzt werden (vgl. Renner 1990).

Die eigentliche Stärke der Gesichterdarstellung liegt in der Möglichkeit, den *k*-dimensionalen Variablenraum – in unserem Fall die Gebietseigenschaften der Basisgebiete – als Ganzes auf einen Blick zu erfassen. So ist es mit den Gesichterdarstellungen möglich,

- sich einen ersten Überblick über die Daten zu verschaffen und Ausreisser zu erkennen oder
- die Daten zu strukturieren, d.h. in unserem Fall, Grundtypen von Basisgebieten mit ähnlichen Gebietseigenschaften zu identifizieren; Grundtypen, die anschliessend durch geeignete statistische Verfahren weiter untergliedert werden können.

Mit Hilfe der Gesichterdarstellungen lassen sich ferner die Resultate regional-taxonomischer Analysen interpretieren und überprüfen, wie das folgende Beispiel belegt: Gamma (1992) hat mit Hilfe des TWINSPAN-Verfahrens (Hill, Bunce und Shaw 1975) die Basisgebiete der Schweiz auf der Grundlage der in Kapitel 2.2 beschriebenen invarianten Gebietskenngrössen in sechzehn hydrologische Raumtypen unterteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-1 dokumentiert. Auf eine Darstellung der räumlichen Verbreitung sowie auf eine hydrologische Interpretation der Typen wird verzichtet (s. Gamma 1992), da hier methodische Überlegungen im Vordergrund stehen. Eine kurze Beschreibung des TWINSPAN-Verfahrens folgt in Kapitel 3.2.

Tabelle 3-1: Eigenschaften (Gruppenmittelwerte) der sechzehn hydrologischen Raumtypen – Ergebnis einer Klassifikation der schweizerischen Basisgebiete über invariante Gebietskenngrössen (Gamma 1992) Table 3-1: Mean values of basin characteristics of the 16 Swiss hydrological classes, described by Gamma (1992)

| í         |      | Raumtyp |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1         | A    | B       | C    | D    | E    | F    | G    | Н    | 到福   | J    | K    | L    | М    | N    | 0    | P    |
| mH [m]    | 2862 | 2528    | 1760 | 1990 | 1970 | 2365 | 2129 | 1814 | 1393 | 1436 | 989  | 852  | 734  | 626  | 495  | 487  |
| Hmax (m)  | 4032 | 3649    | 3030 | 3146 | 3103 | 3226 | 3113 | 2963 | 2485 | 2268 | 1582 | 1524 | 1138 | 863  | 750  | 666  |
| Hmin [m]  | 1685 | 1410    | 675  | 952  | 903  | 1561 | 1312 | 842  | 650  | 892  | 597  | 522  | 523  | 494  | 389  | 420  |
| Rel [m]   | 2347 | 2239    | 2355 | 2194 | 2200 | 1665 | 1801 | 2121 | 1835 | 1376 | 985  | 1002 | 615  | 369  | 361  | 246  |
| lm [°]    | 21.6 | 25.4    | 28.9 | 25.6 | 21.4 | 21.5 | 20.9 | 23.6 | 20.0 | 17.0 | 12.7 | 10.0 | 7.8  | 4.0  | 4.3  | 2.0  |
| Kîi (-)   | 0.60 | 0.61    | 0.59 | 0.59 | 0.55 | 0.56 | 0.57 | 0.54 | 0,57 | 0.55 | 0.49 | 0.47 | 0.53 | 0.50 | 0.48 | 0.47 |
| Wald [%]  | 0.7  | 3.8     | 23.9 | 21.8 | 26.6 | 6.5  | 15.3 | 22.2 | 33.8 | 28.9 | 42.9 | 38.8 | 34.7 | 24.2 | 32.8 | 20.1 |
| Wiese [%] | 0.1  | 1.1     | 6.9  | 5.8  | 12.2 | 1.9  | 7.7  | 8,1  | 20.4 | 14,7 | 28.9 | 38.2 | 54.2 | 65.8 | 49.5 | 68.4 |
| Weide [%] | 10.1 | 23,1    | 25,9 | 32.3 | 38.5 | 46.2 | 44.1 | 40.3 | 33.6 | 44.8 | 23.4 | 14.7 | 4.0  | 0.9  | 0    | 0.1  |
| Vers. [%] | 0.02 | 0.07    | 0.46 | 0.35 | 0.5  | 0.03 | 0.42 | 0.45 | 1.11 | 0.40 | 0.91 | 2.45 | 2.52 | 3.13 | 7.25 | 4.23 |
| Vgl. [%]  | 50.9 | 22.9    | 3.8  | 2.9  | 1.0  | 5.6  | 1.9  | 2.2  | 0.1  | 0.5  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0ed. [%]  | 89.4 | 69.6    | 33.0 | 31.3 | 17.5 | 44.2 | 29.3 | 25.9 | 7.5  | 7.5  | 1.6  | 4.0  | 3.6  | 3.2  | 11.9 | 5.2  |
| n         | 17   | 52      | 55   | 51   | 19   | 46   | 63   | 88   | 71   | 43   | 44   | 53   | 83   | 90   | 36   | 60   |

mH: mittlere Gebietshöhe (m), Hmax: maximale Gebietshöhe (m), Hmin: minimale Gebietshöhe (m), Rel: Reliefenergie (m), Im: mittlere Hangneigung [°), Kfi: Kreisförmigkeltsindex (-), Wald: Flächenanteil des Waldes (%), Wiese: Anteil der Dauergrünland- und Ackerflächen (%), Weide: Flächenanteil der Weiden (%), Vers.: Anteil versiegelter Flächen (%), Vgl.: Vergletscherungsgrad (%), Oed.: Ödlandanteil (%), n: Anzahl der Baslsgebiete pro Raumtyp

Die in Tabelle 3-1 beschriebenen Gruppenmittelwerte wurden mit Hilfe von Riedwyl-Flury-Köpfen dargestellt, um einerseits die Unterschiede zwischen den Typen zu erkennen und andererseits diskriminierende Gebietskenngrössen zu identifizieren (Abbildung 3-4): Deutlich ist eine Grundgliederung in hoch gelegene (Typen A bis H) und in tief gelegene Basisgebiete (Typen I bis P) feststellbar. Diese Grundgliederung ergibt sich vor allem gestützt auf folgende Gesichtsmerkmale:

- Gesichtsform ⇔ maximale Gebietshöhe (Hmax); Typen A bis H: Hmax > 2900 m, I bis P: Hmax < 2500 m;</li>
- Helligkeit und Schraffur der Haare ⇔ Ödlandanteil (Oed.): A bis H: Oed. > 15%, I bis P: Oed. < 15%;</li>
- Obere Begrenzung der Haare ⇔ Waldanteil (Wald): A bis H: Wald < 30%, I bis P: Wald > 20%;
- Krümmung der Augenbrauen ⇔ Anteil des Dauergrünlandes und der Ackerflächen (Wiese): A bis H: Wiese < 15%, I bis P: Wiese > 15%;
- Form der Nase ⇒ Versiegelungsgrad (Vers.): A bis H: Vers. < 0.5%, I bis P: Vers. > 0.4%.

Die Wertebereiche der Gebletskenngrössen<sup>s</sup> wurden in dieser Übersicht aufgeführt, um die visuell abgeleitete Grundgliederung zu verifizieren. Neben den beiden Grundtypen A bis H und I bis P, welche im wesentlichen die alpinen und mittelländisch-jurassischen Basisgebiete beinhalten, lassen sich aus Abbildung 3-4 auch feinere Zusammenhänge zwischen den Raumtypen ableiten. So sind sich folgende Raumtypen recht ähnlich: A und B, C bis E, F bis H, I und J, K und L, M und N.



Abbildung 3-4: Darstellung der Gruppenmittelwerte der sechzehn von Gamma (1992) beschriebenen hydrologischen Raumtypen (A bis P) der Schweiz. Die Zuordnung der Gebietskenngrössen zu den Gesichtsmerkmalen erfolgte gemäss Abbildung 3-1 (aus Kan 1993)

Figure 3-4: Representation of the mean values of basin characteristics of the 16 Swiss hydrological classes, described by Gamma (1992)

Mit den Riedwyl-Flury-Köpfen können also Verwandtschaften zwischen den Raumtypen wie auch diskriminierende Gebietskenngrössen erkannt werden. Für eigentliche Klassifikationsaufgaben sind allerdings statistische Verfahren einer "graphischen Clusterung" mittels Gesichtern vorzuziehen. Wegen der grossen Zahl von Köpfen, die es manuell zu beurteilen und zu klassieren gilt, und der subjektiven Komponente ist von einer graphisch orientierten, allein auf Gesichtern beruhenden Klassifikationsmöglichkeiten multivariater Daten. So kann die Gesichterdarstellung beispielsweise auch eingesetzt werden, um die Homogenität von Gruppen durch den Vergleich der Gesichter der Gruppenmitglieder zu prüfen (Abbildung 3-5). Solche Analysen haben übrigens gezeigt, dass die Raumtypen von Gamma (1992) teilweise recht heterogen zusammengesetzt sind und dass viele Fehlklassifikationen auftreten. Deshalb wurde eine gegenüber dem TWINSPAN-Verfahren verbesserte Klassifikation der Basisgeblete durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2).

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Die Wertebereiche wurden aufgrund der in Tabelle 3-1 aufgeführten Gruppenmittelwerte bestimmt.


30022: Nummer des Basisgebietes (s. Abb. 2-6)

Abbildung 3-5: Prüfung der Homogenität des Raumtyps C von Gamma (1992) Figure 3-5: Examination of the homogeneity of hydrological class C, described by Gamma (1992)

Insgesamt besitzen die Gesichterdarstellungen wegen ihrer Anschaulichkeit und guten Interpretierbarkeit ein breites Anwendungsspektrum, das von der explorativen Datenanalyse bis zur Verifikation und Visualisierung von Forschungsergebnissen reicht. Gerade auch im letzten Bereich, in der Umsetzung von (regionalhydrologischen) Forschungsergebnissen, lassen sich Gesichter als eine attraktive, schnell wahrnehmbare Darstellungsform einsetzen. Hingegen eignen sich Gesichterdarstellungen nicht für Klassifikationen multivariater Daten mit quantitativen Aussagen bezüglich der Ähnlichkeit von Realisierungen. Hierzu können – neben den statistischen Verfahren – andere graphische Verfahren wie die Andrews-Kurven eingesetzt werden (vgl. Kapitel 3.3).

# 3.2 Klassifikation der Basisgebiete auf der Grundlage invarianter Gebietskenngrössen – ein Beitrag zu einer regionalhydrologischen Taxonomie der Schweiz

Regional-taxonomische Analysen stellen einen wesentlichen methodischen Beltrag zu regionalhydrologischen Untersuchungen dar (vgl. Kapitel 1.2.2). Zlei dieser Analysen ist es, räumliche Verteilungsmuster hydrologischer Grössen zu erkennen, zu beschreiben und zu modellieren. Es werden Regionen oder Raumtypen gesucht, deren Einzugsgebiete bezüglich einzelner hydrologischer Grössen ein ähnliches Verhalten aufweisen. Auf der Grundlage dieser Regionen oder Raumtypen lassen sich hydrologische Grössen in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen abschätzen. Dazu bieten sich im wesentlichen drei Möglichkeiten an (Abbildung 3-6):

- 1. Die Regionen oder Raumtypen bilden die Grundlage zur Entwicklung regional differenzierter Übertragungsfunktionen;
- 2. die klassenspezifischen hydrologischen Kennwerte können für eine Abschätzung in einem ungemessenen Einzugsgebiet, dessen Klassenzugehörigkeit bekannt ist, direkt übernommen werden;
- 3. eine regionale Taxonomie kann die Suche nach Repräsentativgebieten, von denen hydrologische Kennwerte auf das ungemessene Einzugsgebiet übertragen werden, massgeblich unterstützen.



Abbildung 3-6: Elnordnung und Einsatzmöglichkeiten regional-taxonomischer Verfahren zur Abschätzung hydrologischer Grössen in Einzugsgebieten ohne Messungen

Figure 3-6: Possible applications of regional taxonomic methods to estimate hydrological parameters in catchments without measurements

Bei der Bestimmung der hydrologischen Ahnlichkeit von Einzugsgebieten stellt sich das grundsätzliche Problem, dass die Lage im Raum und damit die Entfernung zwischen zwei Gebieten wegen des räumlich diskontinuierlichen Verhaltens vieler hydrologischer Grössen nur ein ungenügendes Mass zur Beschreibung der Ähnlichkeit darstellen. Mosley (1981) bringt es auf den Punkt: "Grouping catchments on the basis of similarity of hydrologic behaviour demonstrates clearly that catchments within a given geographic area may have completely different hydrologic regimes in response to differences in physical characteristics. Geographic location, used as a surrogate for these physical characteristics, is simply not sensitive enough to account for the residual variance in the sample of gauging sites used [..]. One cannot therefore have an acceptably high level of confidence in the proposition that all catchments in a given area have similar hydrologic regimes." Zur Ausweisung hydrologischer Ahnlichkeiten von Einzugsgebieten müssen deshalb weitere Faktoren beigezogen werden. Hierbei spielen Gebietskenngrössen eine wichtige Rolle. Mit ihnen lassen sich die Unterschiede in den hydrologisch relevanten Eigenschaften der Einzugsgebiete beschreiben. Nathan (1993) weist darauf hin, dass eine allein auf Gebietskenngrössen basierende Einzugsgebietstaxonomie allerdings nur dann befriedigende Resultate liefern kann, wenn sie zielgrössenorientiert konzipiert ist, wenn also zur Raumtypisierung nur solche Gebietskenngrössen verwendet werden, welche in bezug auf die interessierende hydrologische Zielgrösse relevant sind.

Bei regional-taxonomischen Untersuchungen in der Hydrologie wurde bisher vor allem die Clusteranalyse oftmals in Verbindung mit der Diskriminanzanalyse als Klassifikationsverfahren eingesetzt (z.B. Mosley 1981, Acreman und Sinclair 1986). Dabel ist der sachlogischen Interpretation der Ergebnisse der statistischen Analysen grosse Beachtung zu schenken, wie das folgende Zitat verdeutlicht: "With cluster analysis, literally any group of variables is capable of generating clusters. [..] Furthermore, the plethora of different linkage algorithms and distance measures available mean that different clustering techniques of the same data will often produce structures that are substantially different" (Nathan 1993).

In der Schweiz wurden bisher keine systematischen, auf Gebietskenngrössen basierenden regionaltaxonomischen Analysen durchgeführt. Dank der in Kapitel 2.2 vorgestellten Kenngrössenerhebung liegt nun aber ein Inhaltlich umfassender, flächendeckender, auf die Basisgebiete zugeschnittener Datensatz vor, der sich für regional-taxonomische Studien hervorragend eignet. Deshalb sind in den letzten Jahren in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern unter der Leitung des Autors zwei regional-taxonomische Arbeiten entstanden. Mit ihnen sollten einerseits Erfahrungen im methodischen Bereich gesammelt und andererseits die Bedeutung taxonomischer Ansätze für regionalhydrologische Untersuchungen ausgelotet werden:

Das Ziel der Untersuchung von Gamma (1992) war eine Eignungsprüfung des von Hill, Bunce und Shaw (1975) ursprünglich für pflanzensoziologische Anwendungen entwickelten TWINSPAN-Klassifikationsverfahrens für regionalhydrologische Fragestellungen. Beim TWINSPAN-Ansatz (Two-Way Indicator Species Analysis) handelt es sich um ein hierarchisches, divisives Klassifikationsverfahren, das die Grundgesamtheit der betrachteten Objekte (Basisgebiete) in eine vom Anwender vorgegebene Zahl von Klassen unterteilt. Zu Beginn wird eine eindimensionale "Reciprocal Averaging Ordination" (RA Ordination) durchgeführt, welche mit der Hauptkomponentenanalyse verwandt ist (s. Gamma 1992). Im Schwerpunkt der resultierenden Achse wird eine provisorische Spaltung in zwei Klassen vorgenommen. Sodann wird die Teilung dahingehend verfelnert, dass der trennende Einfluss einer kleinen Anzahl sogenannter "indicator species" (Schlüsselfaktoren) möglichst gross ist. Auf jeder der derart gewonnenen Klassen wird anschliessend erneut eine unabhängige RA Ordination durchgeführt, deren erste Achse wiederum im Schwerpunkt gespalten wird usw. Das Verfahren liefert einen Klassifikationsschlüssel, der für jede Aufspaltung einer Klasse jene Schlüsselfaktoren enthält, welche die Klassenaufteilung am besten reproduzieren. Dieser Klassifikationsschlüssel macht das Verfahren sehr attraktiv, hilft er doch, die Klassen sachlogisch zu interpretieren. Er war ein wesentlicher Beweggrund für die Wahl des TWINSPAN-Verfahrens zur Klasslfikation der Basisgebiete. Für die regional-taxonomischen Analysen verwendete Gamma (1992) alle in Tabelle 2-3 beschriebenen Gebietskenngrössen; die Auswahl der Kenngrössen erfolgte somit nicht zielgrössenorientiert.

Insgesamt konnte der Klassifikationsansatz die in ihn gesetzten Erwartungen nicht ganz erfüllen. Die Erfahrungen bei der Klassifikation der Basisgebiete haben gezeigt, dass der Klassifikationsschlüssel nicht klassenspezifisch exklusiv ist, so dass sich Einzugsgebiete, welche im nachhinein zu klassieren sind, nicht eindeutig zuordnen lassen. Erstaunlich ist der hohe Prozentsatz fehlklassierter Gebiete (pro Klasse 50% und mehr!). Zwar liesse sich die Zuordnung mittels diskriminanzanalytischer Verfahren verbessern, doch dann würde der vom TWINSPAN-Verfahren erzeugte Klassifikationsschlüssel jegliche Aussagekraft verlieren.

 Die unbefriedigenden Ergebnisse der TWINSPAN-Klassifikation hatten Breinlinger (1995) dazu bewogen, eine eigenständige zielgrössenorientierte Klassifikation – getrennt für den Mittel- und Hochwasserbereich – zu entwickeln. Die Grundzüge und die Ergebnisse dieser regionalhydrologischen Analyse werden im folgenden kurz dargestellt und diskutiert, wobei ein Schwergewicht auf den Mittelwasserbereich gelegt wird.

## 3.2.1 Methodische Aspekte

Ziel der Klassifikation von Breinlinger (1995) war es, hydrologisch ähnlich reagierende Basisgebiete zu Klassen bzw. aus räumlicher Sicht zu Regionen oder Raumtypen zusammenzufassen. Dazu wurden invariante Gebietskenngrössen bestimmt, die für das Zielfeld "mittleres Abflussverhalten" (mittlerer Jahresabfluss, mittlerer Abfluss im Sommer- und Winterhalbjahr, Abflussregime) vermutlich relevant sind. Durch Gewichte, welche in die Klassifikation miteinflossen, wurde versucht, die Bedeutung der Gebietskenngrössen weiter zu differenzieren. Die Auswahl und Gewichtung der Gebietskenngrössen beruht auf Literaturstudien. Die zur regional-taxonomischen Untersuchung des Mittelwasserbereichs schliesslich verwendeten Gebietskenngrössen sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt. Problematisch bei dieser Auswahl der Klassifikationsparameter ist sicherlich, dass keine varianten Kenngrössen – wie zum Beispiel Niederschlagsparameter – berücksichtigt wurden und dass die Korrelationen zwischen den Parametern (s. Kapitel 2.4) unberücksichtigt blieben.

Zur Klassifikation setzte Breinlinger in einem ersten Arbeitsschritt die Clusteranalyse (Ward-Verfahren) ein. In Anlehnung an die Untersuchung der Abflussregimes von Aschwanden und Weingartner (1985), welche zeigte, dass sich das hydrologische Spektrum der Schweiz im Mittelwasserbereich mit sechzehn Typen gut abdecken lässt, wurde die maximale Klassenzahl auf zwanzig festgelegt. Die Clusteranalyse lieferte allerdings nur eine Anfangslösung für die Klassifikation, die mittels diskriminanzanalytischer Korrekturverfahren zu einer statistisch befriedigenden Lösung verfeinert werden musste.

Eine Überprüfung der Homogenität der gefundenen fünfzehn Klassen mit Andrews-Kurven (s. Kapitel 3.3.2) ergab, dass die Unterschiede in den Gebietskenngrössen jener Basisgebiete, welche einer Klasse angehören, noch relativ gross sind. Trotz der statistischen Optimierung liegen lediglich ein Drittel der Basisgebiete in der Nähe der Klassenzentroide<sup>6</sup>. Diese klasseninterne Heterogenität ist wesentlich dafür verantwortlich, dass die hydrologischen Parameter innerhalb einer Klasse relativ stark streuen, so dass nur klassenspezifische hydrologische Richtwerte ausgewiesen werden konnten (s. Kapitel 3.2.3). Viele Basisgebiete liegen im Übergangsbereich von mehreren Klassen, so dass eine starre Klassenzuteilung zwangsläufig zu beachtlichen Unschärfen führen muss. Hier könnten mit Verfahren, welche diese Unschärfen mitberücksichtigen ("fuzzy logic"), Verbesserungen erzielt werden. Ein Beispiel dazu ist in Kapitel 4.4.1 beschrieben.

## 3.2.2 Raumtypen der Mittelwasservariante

Die Abbildung 3-7 zeigt die Zuordnung der Basisgebiete zu den fünfzehn Klassen des Mittelwasserbereichs: Obwohl regionale Muster deutlich zu erkennen sind, muss strenggenommen von Raumtypen gesprochen werden, da die einzelnen Klassen räumlich nicht vollumfänglich zusammenhängen. Einzelne Raumtypen sind sowohl auf der Alpennordseite wie auf der Alpensüdseite vertreten. Beispielsweise gehören die Trueb im Emmental (Basisgebiet 20593, vgl. Abbildung 3-2) und der Unterlauf der Cassarate bei Lugano (Basisgebiet 60192) aufgrund ihrer physiographischen Ausstattung zum Raumtyp C. Der Vergleich wichtiger Gebietskenngrössen bestätigt die Plausibilität der Klassierung. Er verdeutlicht aber auch, dass die klasseninterne Streuung der Klassifikationsparameter recht gross ist:

|           | mittlere Höhe<br>[m] | maximale Höhe<br>(m) | mittlere Hangnelgung<br>[°] | Waldanteil<br>[%] | Wasserspeicherungsvermögen<br>[mm] |
|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Trueb     | 1029                 | 1350                 | 11.4                        | 50                | 58.9                               |
| Cassarate | 725                  | 1650                 | 15.8                        | 46                | 32.6                               |

Würden bei der Klassifikation auch variante Gebietskenngrössen mitberücksichtigt, so wäre dieses Klassifikationsergebnis – Trueb und Cassarate in derselben Klasse – wegen der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen beidseitig der Alpen nicht denkbar. Mit einer vorgeschalteten klimatisch orientierten Gliederung der Schweiz könnte also die Aussagekraft der vorgestellten Gliederung wesentlich erhöht werden.

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Das Trennkriterium zwischen zentroidnahen und zentroidfernen Basisgebieten ist in Breinlinger (1995) unter dem Stichwort "A-Index" beschrieben.



Abbildung 3-7: Raumtypen der Mittelwasservariante – Ergebnis der auf Gebietskenngrössen basierenden Klassifikation von Breinlinger (1995)

Figure 3-7: Classes relevant for mean water, using basin characteristics (after Breinlinger 1995)

| Klasse | mittlere Höhe<br>[m] | maximale Höhe<br>[m] | minimale Höhe<br>[m] | Wald<br>[%] | Vergletscherung<br>[%] | Ödland<br>[%] |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------------------|---------------|
| A      | 537                  | 809                  | 413                  | 34.4        | 0                      | 6.1           |
| B      | 586                  | 817                  | 466                  | 21.0        | 0                      | 3.9           |
| C      | 843                  | 1349                 | 575                  | 37.3        | 0                      | 2.3           |
| D      | 991                  | 1450                 | 624                  | 41.2        | 0                      | 2             |
| ٤      | 1156                 | 2235                 | 566                  | 38.3        | 0                      | 5.5           |
| F      | 1372                 | 2430                 | 514                  | 47.8        | 0                      | 7             |
| G      | 1558                 | 2656                 | 716                  | 30.3        | 0                      | 10.6          |
| Н      | 1951                 | 3194                 | 806                  | 18.5        | 3.2                    | 33.8          |
| 1      | 1983                 | 3093                 | 686                  | 13.2        | 2.7                    | 48.4          |
| J      | 1989                 | 3042                 | 1166                 | 20.2        | 0.7                    | 18.9          |
| К      | 2288                 | 3157                 | 1272                 | 7.7         | 2.2                    | 36.3          |
| L      | 2358                 | 3229                 | 1563                 | 8.2         | 2.5                    | 44.2          |
| М      | 2443                 | 3564                 | 1410                 | 5.3         | 16.1                   | 61.7          |
| N      | 2610                 | 3831                 | 1364                 | 3.6         | 32.2                   | 77.3          |
| 0      | 2852                 | 4061                 | 1638                 | 0.9         | 51.7                   | 90.4          |

Tabelle 3-2: Klassenmittelwerte wichtiger Klassifikationsparameter der Mittelwasservariante (nach Breinlinger 1995) Table 3-2: Mean basin characteristics of the classes relevant for mean water, presented by Breinlinger (1995) Aus geographischer Sicht liefert die Klassifikation der Basisgebiete eine statistisch optimierte naturräumliche Gliederung der Schweiz, die sich in eine Reihe ähnlicher Studien einfügt (z.B. Grosjean 1985). In Tabelle 3-2 sind die Klassenmittelwerte einzelner zur hydrologischen Raumgliederung verwendeter invarianter Gebietskenngrössen zusammengestellt. Wegen der ausgeprägten Höhenabhängigkeit wichtiger Klassifikationsparameter wird die Klassifikation vor allem Aussagen in bezug auf hydrologische Grössen erlauben, die ebenfalls höhenabhängig sind, wie z. B. der Jahresabfluss oder die Abflussregimes.

### 3.2.3 Hydrologische Interpretation

Das Ergebnis der regional-taxonomischen Analyse konnte mit 65 Basisgebieten, die über hydrologische Messwerte verfügen, verifiziert werden. Dazu wurden – auf der Grundlage der gemessenen Basisgebiete – für jeden Regimetyp hydrologische Kennwerte berechnet. Es sollte überprüft werden, welche Zusammenhänge zwischen den Raumtypen, die ausschliesslich mit Gebietskenngrössen ermittelt wurden, und diesen hydrologischen Kennwerten bestehen.

Trotz der schwierigen Verifikationssituation – pro Klasse standen nur wenige gemessene Basisgebiete zur Verfügung (vgl. Tabelle 3-3) – lässt sich feststellen, dass es die Raumtypen erlauben, das Mittelwasserverhalten zu differenzieren: Wichtige Mittelwasserparameter wie der mittlere Jahres- und Halbjahresabfluss (Abbildung 3-8), das Abflussregime (Abbildung 3-9) und die Dauerkurven (Abbildung 3-10) lassen sich über die Raumtypen gliedern.



Abbildung 3-8: Verifikation der Mittelwasservariante: Differenzierung der beiden Mittelwasserparameter Jahresabflussspende ( $Mq_{Jahr}$ ) und Abflussspende des Sommerhalbjahres ( $Mq_{Sommer}$ ) durch die Raumtypen von Breinlinger (1995) Figure 3-8: Verification of Breinlinger's classification, using annual ( $Mq_{Jahr}$ ) and summer ( $Mq_{Sommer}$ ) runoff



Abbildung 3-9: Verifikation der Mittelwasservariante: Differenzlerung des Verhältnisses Sommerabflussspende ( $Mq_{sommer}$ ) zu Winterabflussspende ( $Mq_{winter}$ ) sowie des Abflussregimes durch die Raumtypen von Breinlinger (1995) Figure 3-9: Verification of Breinlinger's classification, using summer ( $Mq_{sommer}$ ) and winter ( $Mq_{winter}$ ) runoff as well as the flow regime

| Tabelle 3-3: Hydrologische Richtwerte der Raumtypen der Mittelwasservariante                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Table 3-3: Expected values of hydrological parameters of the classes relevant for mean water |

| Raumtyp mittlere Abflussspend |         | sspende [l/s·km²] | Abliussregime                       | mittlere  | N/n       |           |        |
|-------------------------------|---------|-------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|
|                               | Jahr    | Sommerhalbjahr    | en må som <sup>sk</sup> er          | q91       | q182      | q274      |        |
| A                             | 10 – 25 | 10 - 25           | pโบvial                             | 20 – 25   | 10 – 20   | 5 –15     | 114/13 |
| В                             | 15 – 35 | 15 – 35           | płuvial                             | 20 – 40   | 10 – 20   | 5 – 15    | 117/7  |
| C                             | 20 - 40 | 15 - 40           | pluvial                             | 20 - 35   | 15 – 20   | 5 – 10    | 76/4   |
| D                             | 15 30   | 10 ~ 30           | nivo-pluvial                        | (40)      | (20)      | (10)      | 35/2   |
| ٤                             | 25 – 50 | 30 – 70           | nivo-pluvial                        | (30 – 60) | (15 – 25) | (10 – 15) | 81/2   |
| F                             | _       |                   | -                                   | -         | _         | _         | 17/0   |
| G                             | 40 – 55 | 70 – 90           | nival                               | (50)      | (20)      | (10)      | 114/2  |
| Н                             | 40 – 65 | 60 - 110          | nival, nivo-glaciaire, glaclo-nival | (55)      | (30)      | (15)      | 68/5   |
| 1                             | 55 – 75 | 90 - 110          | nival                               | (70)      | (30)      | (10)      | 14/2   |
| J                             | 40 – 55 | 65 – 85           | nival                               | (55)      | (30)      | (15)      | 57/3   |
| К                             | 40 - 65 | 65 115            | nival, nivo-glaciaire, glacio-nival | (50 - 80) | (20 - 25) | (10 - 15) | 27/2   |
| L                             | 20 - 40 | 30 – 70           | nival, nivo-glaciaire, glacio-nival | 40 – 50   | 15 – 20   | 5 –10     | 67/8   |
| M                             | 30 – 70 | 50 - 120          | glacio-nival, glaciaire             | 90 - 100  | 25 – 30   | 10 – 15   | 42/4   |
| N                             | 40 - 80 | 70 – 150          | glaciaire                           | 65 – 125  | 10 – 35   | 0 – 10    | 21/7   |
| 0                             | 50 - 90 | 90 - 165          | glaciaire                           | 85 – 115  | 10 - 20   | 0 - 5     | 22/4   |

q91 Abflussspende, die an 91 Tagen erreicht oder überschritten wird

N Anzahl Basisgebiete

n Anzahl Basisgeblete mit hydrologischen Messwerten zur Ermittlung der Richtwerte des mittleren Abflusses

(50) sehr kleine Stichprobe, welche zur Herleitung des ausgewiesenen Wertes zur Verfügung stand

Wegen der Heterogenität der Raumtypen und der Nichtberücksichtigung klimatischer (varianter) Gebietskenngrössen besteht bei den hydrologischen Kenngrössen allerdings ein teilweise beträchtlicher Unschärfebereich, der es nicht erlaubt, die klassenspezifischen Kennwerte ohne zusätzliche Anpassungen und Verfeinerungen zu übernehmen, wie dies in Abbildung 3-6 für die Abschätzung hydrologischer Grössen in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen vorgeschlagen wird. Deshalb wird in Tabelle 3-3 bewusst von Richtwerten gesprochen.



Abbildung 3-10: Verifikation der Mittelwasservariante von Breinlinger (1995) über die mittleren Dauerkurven (abszissengemittelt)

Figure 3-10: Verification of Breinlinger's classification, using mean duration curves

Einzelne Raumtypen lassen sich auf der nächsthöheren Aggregationsstufe zusammenfassen (Abbildung 3-8 und 3-9). Es sind dies vor allem

- dle Klassen A bis D, welche das Mittelland und den Jura abdecken (Abbildung 3-7) und welche sich durch ein saisonal ausgeglicheries mittleres Abflussverhalten auszeichnen (Abbildung 3-9),
- die Klassen G, H und J, welche vor allem den nivalen Bereich der alpinen Basisgebiete umfassen und
- die Klassen K, M und evtl. N, welche den Übergangsbereich zwischen den nivalen und den glazialen Regimes abdecken.

Allein schon diese Aufstellung verdeutlicht die starke Anlehnung der Breinlingerschen Raumgliederung an die schweizerischen Regimetypen von Aschwanden und Weingartner (1985). Das bei der Regimetypisierung angewandte Verfahren weist gegenüber der hier vorgestellten Mittelwasservariante allerdings den entscheidenden Vorteil auf, dass in einem ersten Schritt hydrologische Kenngrössen analysiert und typisiert und erst in einem zweiten Schritt invariante Gebietskenngrössen zur Modellierung der räumlichen Variabilität verwendet wurden (Abbildung 3-11). Dank dieser Vorgehensweise ist eine eindeutige Zielgrössenorientierung der Untersuchung gegeben.

| Regimetyp      | a-glaciaire     | b-glaciaire             | a-glacio-nival          | b-glacio-nival                       | nivo-glaciaire                     | nival                              |
|----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Regimekurve    |                 |                         |                         |                                      |                                    |                                    |
| Rang           | Jul-Aug-Jun-Sep | Jul-Aug-Jun-Sep         | Jul-Jun-Aug-Mai         | Jun-Jul-Aug-Mal                      | Jun-Jul-Mai-Aug                    | Jun-Mai-Jul-Aug                    |
| Gv(Jun)        | 21              | 21                      | 16                      | 17                                   | 16                                 | 20                                 |
| Gv(Jul)        | 11              | 13                      | 14                      | 21                                   | 19                                 | 24                                 |
| Räumliche      | mH>2400         | mH>2100                 | mH>2400                 | 1900 <i><mh< i="">&lt;2300</mh<></i> | 1550 <i><mh<< i="">1900</mh<<></i> | 1550 <i><mh<< i="">1900</mh<<></i> |
| Einordnung     | $Vgl. \geq 36$  | $22 \le Vgl. < 36$      | 12 ≤ <i>Vgl.</i> <22    | 6 <i>≤ Vgl.</i> <12                  | $3 \leq Vgl. < 12$                 | $0 \leq Vgl. < 3$                  |
| Repräsentativ- | Kander,         | Simme,                  | Hinterrhein,            | Dischmabach,                         | Albula,                            | Allenbach,                         |
| gebiet         | Gasterntal      | Oberried                | Hinterrhein             | Davos                                | Tiefencastel                       | Adelboden                          |
| (Fläche)       | (40.7 km²)      | (35.7 km <sup>2</sup> ) | (53.7 km <sup>2</sup> ) | (43.3 km²)                           | (346 km²)                          | (28.8 km²)                         |

Abbildung 3-11: Alpine Regimetypen und ihre räumliche Einordnung (aus Weingartner und Aschwanden 1994, verändert);

Rang: Rangfolge der höchsten mittleren Monatsabflüsse, Cv: Variationskoeffizient [%], mH: mittlere Gebietshöhe [m], Vgl.: Vergletscherungsgrad [%]

Figure 3-11: Swiss alpine flow regimes and their spatial distribution

# 3.2.4 Beurtellung der Ergebnisse

Der Aufwand zur Realisierung der vorgestellten Klassifikation war beträchtlich – ob er sich durch die erzielten Ergebnisse rechtfertigen lässt? Diese Frage soll abschliessend durch eine Gegenüberstellung positiver und negativer Aspekte der regional-taxonomischen Untersuchung beantwortet werden:

### a) Positive Aspekte

- Im Mittelwasserbereich ist es möglich, Einzugsgeblete mit ähnlichen hydrologischen Kennwerten zu identifizieren; es lassen sich Erwartungs- oder Richtwerte ableiten.
- Die einzelnen Klassen oder mehrere verwandte Klassen können als räumlicher Ausgangspunkt zur Entwicklung regional differenzierter Übertragungsfunktionen verwendet werden. Damit lassen sich die Werteintervalle der unabhängigen Modellparameter verkleinern und erfahrungsgemäss die Güte der Abschätzmodelle wesentlich verbessern (vgl. Kapitel 1.2.3). Hier liegt die eigentliche Bedeutung des vorgestellten regional-taxonomischen Ansatzes!

### b) Negative Aspekte

- Hydrologische Kennwerte wurden zur Ausarbeitung der regionalen Taxonomie nicht mitberücksichtigt. Es lässt sich deshalb nicht mit Bestimmtheit festlegen, welche hydrologischen Grössen in welchem Ausmass auf das Klassifikationsergebnis ansprechen.
- Variante Gebletskenngrössen wurden nicht in das Klassifikationsverfahren einbezogen. Somit blieben alle klimatischen Aspekte bei der Raumgliederung unberücksichtigt.
- Die Inhomogenität der Klassen bewirkt eine starke klasseninterne Streuung der hydrologischen Kenngrössen, so dass nur Richwerte ausgewiesen werden konnten.
- Die starre Klassenzuteilung führt dazu, dass viele Basisgebiete im Übergangsbereich von mehreren Klassen liegen. Damit verliert das Klassifikationsergebnis entscheidend an Aussagekraft.
- Die Klassifikation ist ausschliesslich auf die Basisgebiete ausgerichtet.

Diese Gegenüberstellung verdeutlicht, dass die vorgestellte, nur auf invarianten Gebietskenngrössen beruhende Klassifikation nicht direkt zur Abschätzung von Mittelwasser-Parametern eingesetzt werden darf. Hingegen liefert sie eine zweckmässige Raumgliederung, von der bei der Abschätzung hydrologischer Grössen ausgegangen werden kann, um regional differenzierte Modelle zu entwikkeln (Abbildung 3-6). Angesichts des beträchtlichen Aufwandes, der nötig ist, um über Klassifikationsverfahren zu einer statistisch zwar optimalen, hydrologisch aber nur bedingt anwendbaren Raumgliederung zu gelangen, sind für Anwendungen in der Praxis flexiblere Lösungsansätze zu suchen. Interessante Alternativen werden im nächsten Kapitel beschrieben.

Zum Abschluss dieses Kapitels sei kurz auf die Ergebnisse der Hochwasservariante hingewiesen, bei der zur Raumgliederung ebenfalls invariante Gebietskenngrössen verwendet wurden, welche sich aber von jenen der Mittelwasservariante deutlich unterscheiden (vgl. Tabelle 2-1). Breinlinger (1995) gelangt zum Schluss, dass die Raumtypen der Hochwasservariante wichtige Aspekte des Hochwasserverhaltens nicht oder nur ungenügend repräsentieren, so dass es nicht möglich ist, klassenspezifische Richtwerte auszuweisen. Diese Ergebnisse bestätigen einerseits, dass es – im Vergleich zum Mittelwasser – noch weit schwieriger ist, aussagekräftige regionalhydrologische Hochwassermodelle zu entwickeln und belegen andererseits die Problematik, im Hochwasserbereich regional-taxonomische Analysen durchzuführen, die allein auf invarianten Gebietskenngrössen beruhen.

# 3.3 Identifikation ähnlicher Einzugsgebiete mittels Andrews-Kurven zur Optimierung der Abschätzung mittlerer Monatsabflüsse

Wie die Ergebnisse des vorangehenden Kapitels belegen, ergeben statistisch gestützte regionaltaxonomische Verfahren oftmals nur eine Grundgliederung und erlauben in den wenigsten Fällen eine direkte Übernahme von klassenspezifischen Kenngrössen zur Abschätzung hydrologischer Grössen In Einzugsgebleten, die über keine Messdaten verfügen. Mit graphischen Verfahren lässt sich die Aussagekraft dieser taxonomischen Ansätze verfeinern und vertiefen. Sie unterstützen die Identifikation hydrologisch ähnlicher Gebiete und tragen damit zu einer Optimierung der regionalhydrologischen Modelle bei. Die Vorteile des kombinierten Einsatzes von statistischen und graphischen Klassifikationsverfahren soll im folgenden am Beispiel der Abschätzung mittlerer Monatsabflüsse aufgezeigt werden.

# 3.3.1 Ausgangslage

Aschwanden und Weingartner (1985) haben ein Verfahren zur Abschätzung langjähriger mittlerer monatlicher Abflüsse in 10 bis 500 km<sup>2</sup> grossen Einzugsgebieten ohne Abflussdaten entwickelt. Mittels regional-taxonomischer Untersuchungen bestimmten die belden Autoren gesamtschweizerisch sechzehn Regimetypen, welche Einzugsgebiete mit einem vergleichbaren saisonalen Abflussverhalten zusammenfassen (Abbildung 3-13). Für jeden Regimetyp konnten mehrere Repräsentativgebiete mit langjährigen Messreihen ausgewiesen werden (vgl. Abbildung 3-11). Diese Regimetypen bilden

das Kernstück des Abschätzverfahrens, das im wesentlichen drei Arbeitsschritte umfasst (Abbildung 3-12):



Abbildung 3-12: Verfahren zur Abschätzung mittlerer Monatsabflüsse Figure 3-12: Method to estimate mean monthly discharges (*Mq*<sub>1</sub>)

- Abschätzung des langjährigen mittleren Jahresabflusses (MQ<sub>Jahr</sub>) des ungemessenen Einzugsgebietes mit regionalen Übertragungsfunktionen (vgl. Tabelle 1-1) oder durch Übertragung der Abflussspende übergeordneter gemessener Einzugsgebiete;
- Bestimmung des Regimetyps des ungemessenen Einzugsgebietes mit Hilfe der Tafel 5.2 des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz", in welcher die Ergebnisse der regional-taxonomischen Untersuchung der Abflussregimes kartiert sind (vgl. Abbildung 3-13);
- 3. Wahl eines typspezifischen Repräsentativgebletes und Übertragung der monatlichen Pardé-Koeffizienten (*PK*<sub>i</sub>) des Repräsentativgebietes auf das Einzugsgebiet ohne Abflussmessung.



Abbildung 3-13: Abflussregimes der Schweiz - Ausschnitt aus der Tafel 5.2 des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" (aus Weingartner und Aschwanden 1992)

Figure 3-13: Flow regimes in Switzerland - an extract of map 5.2 from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

Die Pardé-Koeffizienten sind definiert als:

$$PK_{i} = \frac{MQ_{i}}{MQ_{Jahr}}$$

$$PK_{i} = \frac{MQ_{i}}{MQ_{Jahr}}$$

$$PK_{i} = \frac{MQ_{i}}{MQ_{i}}$$

$$Pardé-Koeffizient des /-ten Monats [-]$$

$$MQ_{i} = \frac{langjähriger mittlerer Monatsabfluss des i-ten Monats [m3/s]}$$

$$MQ_{Jahr} = \frac{langjähriger mittlerer Jahresabfluss [m3/s]}{langjähriger mittlerer Jahresabfluss [m3/s]}$$

Durch Multiplikation der Pardé-Koeffizienten ( $PK_i$ ) mit dem geschätzten Jahresabfluss ( $MQ_{Jabr}$ ) erhält man eine Schätzung der mittleren monatlichen Abflüsse ( $MQ_i$ ):

$$MQ_i = PK_i \cdot MQ_{Jahr} \tag{3-3}$$

Aufgrund unserer bisherigen Erfahrungen liegt der mittlere Schätzfehler beim Jahresabfluss bei 10 bis 15%, bei den Monatsabflüssen zwischen 15 und 25%. Im folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem sich das Ergebnis der Abschätzung verbessern lässt:

Ein wichtiger Tellschritt, der das Endergebnis massgeblich beeinflusst, liegt in der Auswahl eines Repräsentativgebietes, von dem die Pardé-Koeffizienten auf das ungemessene Einzugsgebiet übertragen werden. In der Erläuterung zum Verfahren schreiben Weingartner und Aschwanden (1992): "Da pro Regimetyp mehrere Repräsentativgebiete zur Verfügung stehen, wird jenes gewählt, das den naturräumlichen und klimatischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet am nächsten kommt. Als Entscheidungshilfen sind insbesondere Kenngrössen zu berücksichtigen, die das Regime bestimmen (mittlere Höhe und Vergletscherung). Aber auch die räumliche Lage (Nachbarschaft) sowie Grössen, deren Einfluss auf den Abfluss als gesichert gilt (z.B. pedologische und hydrogeologische Kennwerte), sollten in die Beurteilung miteinbezogen werden." Aus diesem Zitat ist zu schliessen, dass bei der Festlegung eines Repräsentativgebietes unliebsame Freiheiten bestehen. Deshalb wird im folgenden dieser entscheidende Tellschritt mit Hilfe eines graphischen Verfahrens, den sogenannten Andrews-Kurven, objektiviert und verfeinert.

### 3.3.2 Andrews-Kurven

Andrews-Kurven sind zweidimensionale Symbole zur Visualisierung mehrdimensionaler Daten (vgl. Kapitel 3.1). Das von Andrews (1972) vorgeschlagene Darstellungsverfahren ist sehr einfach: Bei k-dimensionalen Daten lässt sich ein Datenpunkt  $x' = (x_1, x_2, ..., x_k)$  mit der Funktion

$$f_x(t) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin t + x_3 \cos t + x_4 \sin 2t + x_5 \cos 2t + \dots$$
(3-4)

graphisch darstellen. Diese Funktion wird im Bereich  $-\pi \le t \le \pi$  aufgezeichnet (Abbildung 3-14).

Datenpunkte, welche im k-dimensionalen Raum benachbart sind, ergeben ähnliche Andrews-Kurven. Die Ähnlichkeit von zwei Andrews-Kurven  $f_x(t)$  und  $f_y(t)$  lässt sich über die Fläche ( $D_{Andr.}$ ) zwischen diesen Kurven quantifizieren:

$$D_{Andr.}(f_x, f_y) = \int_{-\pi}^{\pi} \left| f_x(t) - f_y(t) \right| dt$$
(3-5)

| D <sub>Andr.</sub> | Distanzmass                       |
|--------------------|-----------------------------------|
| $f_{\rm x}(t)$     | Andrews-Kurve des Datenpunktes x' |
| ſ <sub>v</sub> (1) | Andrews-Kurve des Datenpunktes y' |

Andrews (1972) zeigt, dass sich die Fläche zwischen den Kurven proportional zur Euklidischen Distanz zwischen den beiden Datenpunkten x' und y' verhält.  $D_{Andr.}$  wird deshalb als Distanzmass bezeichnet. Durch die Einführung dieses Distanzmasses kann der subjektive Vergleich der Kurven auf Ähnlichkeit objektiviert werden, was die Bedeutung der Andrews-Kurven weiter unterstreicht.



Abbildung 3-14: Beispiele von Andrews-Kurven: x' = (3,5,7,8), y' = (9,5,5,1), z' = (4,6,8,9): Distanzen zwischen den Kurven:  $D_{Andr.}(f_{x}, f_{y}) = 165.03, D_{Andr.}(f_{x}, f_{y}) = 117.96, D_{Andr.}(f_{y}, f_{y}) = 234.39$ Figure 3-14: Examples of Andrews-curves

Zur Berechnung der Andrews-Kurven müssen die Gebietskenngrössen standardisiert werden. Die Reihenfolge, in der die Variablen  $x_i$  in die Funktion  $f_x(t)$  aufgenommen werden, bestimmt die Gewichte der Variablen: Die zuerst aufgenommenen Variablen  $(x_1, x_2, ...)$  erhalten vor allem auch visuell ein höheres Gewicht, weil sie für die niederfrequenten Schwingungen verantwortlich sind, welche das Kurvenbild prägen. Diese Gewichtung beeinflusst allerdings das Distanzmass  $D_{Andr.}$  nur unwesentlich.

Insgesamt stellen die Andrews-Kurven ein äusserst flexibles, einfach berechenbares, objektives graphisches Verfahren dar, um mehrdimensionale Daten zu visualisieren und auf quantitativer Basis zu vergleichen. Im Hinblick auf die Abschätzung mittlerer monatlicher Abflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten werden sie nun zur Bestimmung eines geeigneten Repräsentativgebietes eingesetzt (vgl. Abbildung 3-12). Das Vorgehen soll beispielhaft an der Bavona-Bignasco erläutert werden. Die Bavona wird dabei zuerst als ungemessenes Gebiet behandelt, um anschliessend die Ergebnisse der Abschätzung mit den vorhandenen Messwerten vergleichen zu können.

### 3.3.3 Abschätzung des Jahresabflusses

Das Einzugsgebiet der Bavona in Bignasco mit einer Fläche von 122 km<sup>2</sup> liegt im Valle Maggia auf der Alpensüdseite. Mittels der regionalen Übertragungsfunktion für die Alpensüdseite (Weingartner und Aschwanden 1992)

$$A = 2.06 \cdot N_{so} - 1890157 \cdot \ln(Temp + 273.15) - 0.24 \cdot Rel + 105978$$
(3-6)

| A    | langjährige mittlere Höhe des Jahresabflusses [mm] |
|------|----------------------------------------------------|
| Nso  | Gebietsniederschlag Sommer [mm]                    |
| Temp | Jahresmitteltemperatur [°C ]                       |
| Rel  | Maximale Höhendifferenz im Einzugsgebiet (m)       |

erhält man mit  $N_{so} = 1191$  mm, Temp = 2.5 °C und Re/ = 2845 m einen Schätzwert für den langjährigen mittleren Jahresabfluss von 1538 mm (A) oder 5.92 m<sup>3</sup>/s ( $MQ_{Jahr}$ ). Im Vergleich dazu beträgt der

gemessene natürliche Jahresabfluss der Bavona 6.40 m³/s (Periode 1929 bis 1950)<sup>7</sup>. Der Schätzfehler beträgt somit nur rund –7%.

### 3.3.4 Bestimmung des Repräsentativgebletes

Die Bavona besitzt ein Regime "nlval méridional", das durch neun Einzugsgebiete, die auf der Alpensüdseite zwischen dem Simplongebiet und dem Puschlav liegen, repräsentiert wird: Brenno-Campra, Brenno-Olivone, Calancasca-Buseno, Krummbach-Klusmatten, Maggia-Bignasco, Moesa-San Giacomo, Poschiavino-La Rösa, Riale di Calneggia-Cavergno und Ticino-Piotta. Mit Hilfe relevanter Gebietskenngrössen sollen nun jene Gebiete bestimmt werden, welche die mittleren Abfluss-verhältnisse der Bavona möglichst gut repräsentieren, von welchen also die Pardé-Koeffizienten ohne Veränderung auf die Bavona übertragen werden können.

Die Auswahl der regime-relevanten Gebietskenngrössen fusst einerseits auf Erfahrungswerten aus der regional-taxonomischen Untersuchung der Abflussregimes. So ist die mittlere Gebietshöhe für die räumliche Einordnung der Regimetypen im alpinen Raum der entscheidende Faktor. Andererseits sollten auch die In den Tabellen 2-10 und 2-11 dokumentierten linearen Zusammenhänge zwischen den Gebietskenngrössen mitberücksichtigt werden. Für den vorliegenden Fall wurden folgende regime-relevanten Gebietskenngrössen ausgewählt:

- aus der ersten Hauptkomponente: mittlere Gebietshöhe (mH),
- aus der zweiten Hauptkomponente: mittlere Hangneigung (Im),
- aus der dritten Hauptkomponente: Reliefenergie (Rel),
- aus der vierten Hauptkomponente: Flächenanteil der Exposition Süd (Exp-S).

Bei der Bestimmung der relevanten Gebietskenngrössen ist eine gewisse Subjektivität nicht auszuschliessen. Die Orientierung der Auswahl der Gebietskenngrössen an den Hauptkomponenten bietet allerdings dafür Gewähr, dass das ganze Spektrum der Informationen, das in den Gebietskenngrössen liegt, zum Tragen kommt. Zudem können dank der Flexibilität des Verfahrens mehrere Varianten mit unterschiedlichen Gebietskenngrössen gerechnet werden; schliesslich kann jene Variante gewählt werden, deren aufsummierte Distanzen (*D<sub>Ardr.</sub>*) am kleinsten sind.



Abbildung 3-15: Andrews-Kurven der Bavona und ausgewählter Repräsentativgebiete des Regimes \_nival méridional" Figure 3-15: Andrews-curves for the Bavona river and for catchments representative of the "nival méridional" flow regime

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Periode vor der Beeinflussung des Abflussregimes durch den Kraftwerksbau.

| Repräsentativgebiet         | D Ant. |
|-----------------------------|--------|
| Maggia-Bignasco             | 52.6   |
| Calancasca-Buseno           | 55.9   |
| Ríale di Calneggia-Cavergno | 112.9  |
| Brenno-Olivone              | 126.3  |
| Ticino-Plotta               | 151.1  |
| Krummbach-Klusmatten        | 185.0  |
| Poschlavino-La Rõsa         | 204.0  |
| Brenno-Campra               | 226.1  |
| Moesa-San Giacomo           | 266.8  |
|                             | 1      |

 Tabelle 3-4: Distanzen D<sub>Andr.</sub> zwischen der Bavona und den Repräsentativgebieten des Regimes "nival méridional"

 Table 3-4: Distances, D<sub>Andr.</sub>, between the Bavona river and catchments representative of the "nival-méridional" regime

Mit den oben beschriebenen Gebietskenngrössen wurden die Andrews-Kurven der Bavona und der Repräsentativgebiete gezeichnet (Abbildung 3-15) und die Distanzmasse ermittelt (Tabelle 3-4). Mit Hilfe dieser Grundlagen lassen sich nun jene Repräsentativgebiete ableiten, welche der Bavona aus der Sicht des Abflussregimes am ähnlichsten sind: Es handelt sich um die Maggia und Calancasca. Die Maggia welst mit  $D_{Andr.} = 52.6$  die kleinste Distanz zur Bavona auf. Die Distanzmasse der restlichen Einzugsgebiete zeigen, dass die Ähnlichkeit zur Bavona vom Riale di Calneggia über den Krummbach bls zur Moesa weiter abnimmt.

### 3.3.5 Abschätzung der mittleren Monatsabflüsse

Zur Abschätzung der mittleren Monatsabflüsse wurden die Pardé-Koeffizienten der beiden ähnlichsten Gebiete – Maggia und Calancasca – unverändert auf die Bavona übertragen und mit dem geschätzten Jahresabfluss multipliziert:

$$MQ_i(Bavona) = PK_i(repr.) \cdot MQ_{Jahr} \qquad i = 1, 2, .., 12$$
(3-7)

| MQı                     | Mittlerer Abfluss des <i>i</i> -ten Monats [m³/s] |
|-------------------------|---------------------------------------------------|
| PK <sub>i</sub> (repr.) | Pardé-Koeffizient des Repräsentativgebietes [-]   |
| MQJahr                  | Mittlerer mit regionaler Übertragungsfunktion     |
|                         | geschätzter Jahresabfluss [m³/s]                  |

Das Ergebnis der Abschätzung ist in Abbildung 3-16 dargestellt: Die Niedrigwasserperiode von Dezember bis Mārz, der Beginn der Schneeschmelze im April und die nivale Hauptabflussphase im Mai und Juni werden sehr gut wiedergegeben. Grössere Abweichungen sind in den Sommermonaten festzustellen. Die Unterschätzung der Abflüsse in diesen drei Monaten ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auf den unterschiedlichen Vergletscherungsgrad der Einzugsgebiete zurückzuführen. Der Anteil glazialer Abflüsse in den Sommermonaten ist bei der Bavona mit einer Vergletscherung von 4.7% weit grösser als bei der Maggia (0.2%) und der Calancasca (0.7%). Der mittlere monatliche Schätzfehler liegt in beiden Fällen – bei der Verwendung der Pardé-Koeffizienten der Calancasca oder der Maggia – zwischen 9 und 10% (Tabelle 3-5). In ihm sind die Fehler enthalten, die

- durch die Abschätzung des mittleren Jahresabflusses nach Formel 3-6 und
- durch die Übertragung der Pardé-Koeffizienten

verursacht wurden. Gegenüber den eingangs erwähnten "erwarteten" Schätzfehlern im Bereich von 15 bis 25% konnten also namhafte Verbesserungen erzielt werden.



Abbildung 3-16: Abschätzung der Monatsabflüsse der Bavona nach Formel 3-7 unter Verwendung der Pardé-Koeffizienten der beiden Repräsentativgebiete Maggia und Calancasca. Die zur Beurteilung der Abschätzung aufgezeichneten Monatsabflüsse der Bavona sind Mittelwerte der Periode 1929–1950 (naturnahe Verhältnisse vor dem Kraftwerksbau im oberen Teil des Einzugsgebietes)

Figure 3-16: Estimate of monthly discharge for the Bavona river using Pardé coefficients from the representative catchments of Maggia and Calancasca rivers, compared to the observed discharge



Abbildung 3-17: Abschätzung der Monatsabflüsse der Bavona nach Formel 3-7 unter Verwendung der Pardé-Koeffizienten anderer Repräsentativgebiete mit einem geringeren Verwandtschaftsgrad als die Maggia und die Calancasca (vgl. Tabelle 3-4). Die zur Beurteilung der Abschätzung aufgezeichneten Monatsabflüsse der Bavona sind Mittelwerte der Periode 1929–1950

Figure 3-17: Estimate of monthly discharge for the Bavona river using Pardé coefficients from representative catchments with  $D_{undr}$ -values > 100, compared to the observed discharge

Tabelle 3-5: Güte der Abschätzung mittlerer Monatsabflüsse der Bavona bei Übertragung der Pardé-Koeffizienten unterschiedlicher Repräsentativgebiete

Table 3-5: Relationship between D<sub>Andr</sub> and the mean error in the estimate of monthly discharge for the Bavona river

| Repräsentativgebiet         | D Andr. | Mittlerer monallicher Schätztehler [%] |
|-----------------------------|---------|----------------------------------------|
| Maggia-Bignasco             | 52.6    | 9.9                                    |
| Calancasca-Buseno           | 55.9    | 9.4                                    |
| Riale di Calneggia-Cavergno | 112.9   | 20.1                                   |
| 8renno-Olivone              | 126.3   | 33.1                                   |
| Ticino-Piotta               | 151.1   | 32.0                                   |
| Krummbach-Klusmatten        | 185.0   | 18.9                                   |
| Poschiavino-La Rösa         | 204.0   | 21.1                                   |
| Brenno-Campra               | 226.1   | 57.7                                   |
| Moesa-San Glacomo           | 266.8   | 13.6                                   |

Wie Abbildung 3-17 verdeutlicht, nimmt die Güte der Schätzung bei Verwendung von Repräsentativgebieten mit geringerer Ähnlichkeit zur Bavona ab. Der Krummbach, der Poschiavino und vor allem die Moesa ergeben allerdings bessere Schätzungen, als aufgrund des Distanzmasses erwartet werden durfte (Tabelle 3-5). Um den Einfluss eines falsch beurteilten Repräsentativgebietes zu minimieren, wurde in einem Folgeschritt das Distanzmass *D*<sub>Andr.</sub> verwendet, um über die *n* ähnlichsten Gebiete zu einer gewichteten Abschätzung folgender Form zu gelangen:

$$MQ_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{D_{Andr.j}} PK_{ij} \cdot MQ_{Johr}}{\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{D_{Andr.j}}}$$
(3-8)

| MQı                  | Mittlerer Abfluss des i-ten Monats des Einzugsgebietes ohne    |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|
|                      | Abflussmessungen [m³/s]                                        |
| PK,j                 | Pardé-Koeffizient des j-ten Einzugsgebletes im i-ten Monat [-] |
| MQJahr               | geschätzter Jahresabfluss [m³/s]                               |
| D <sub>Andr. j</sub> | Distanz zwischen den Andrews-Kurven des ungemessenen           |
|                      | Einzugsgebietes und dem <i>j</i> -ten Repräsentativgebiet [-]  |
| n                    | Anzahl berücksichtigter Repräsentativgebiete (im vorliegenden  |
|                      | Fall: <i>n</i> = 3)                                            |

Die Abbildung 3-18 veranschaulicht das Ergebnis der distanzgewichteten Schätzung der mittleren Monatsabflüsse mit den drei ähnlichsten Einzugsgebieten Maggia, Calancasca und Riale di Calneggia. Die winterliche Niedrigwasserperlode und die Schneeschmelzphase bis zum Maximum der Ganglinie im Juni sind sehr gut modelliert, während die sommerlichen Monatsabflüsse aus den bekannten Gründen erneut unterschätzt werden. Der mittlere monatliche Schätzfehler beträgt 10%.



Abbildung 3-18: Distanzgewichtete Abschätzung der Monatsabflüsse der Bavona nach Formel 3-8 unter Verwendung der Distanzmasse und Pardé-Koeffizienten folgender drei Einzugsgebiete: Maggia, Calancasca und Riale di Calneggia (vgl. Tabelle 3-5)

### 3.3.6 Weitere Belspiele

In Abbildung 3-19 sind für die Saane im Berner Oberland und die Langeten im Berner Mittelland die Ergebnisse weiterer Abschätzungen nach dem oben beschriebenen distanzgewichteten Ansatz dargestellt:

Figure 3-18: Distance-weighted estimate of monthly discharge for the Bavona river, using D<sub>Andr</sub>-values and Pardé coefficients from Maggia, Calancasca and Riale di Calneggia rivers (see equation 3-8)

- Bei der Saane wurden die Pardé-Koeffizienten der Plessur-Chur (D<sub>Andr.</sub>=114), des Fildrichs-Riedli (D<sub>Andr.</sub>=123) und des Allenbachs-Adelboden (D<sub>Andr.</sub>=127) distanzgewichtet übertragen und mit dem geschätzten Jahresabfluss multipliziert. Die Übertragungsfunktion zur Berechnung des Jahresabflusses ist in der Tabelle 1-1 aufgeführt. Erstaunlich ist, dass mit der Plessur das räumlich entfernteste Gebiet die grösste Ähnlichkeit zur Saane aufweist. Dies bestätigt einmal mehr, dass die räumliche Entfernung zwischen zwei Gebieten kein taugliches Mass zur Ausweisung der hydrologischen Verwandtschaft darstellt (vgl. Kapitel 3.2). Mit einem mittleren monatlichen Schätzfehler von 18% darf das Ergebnis als gut bis sehr gut bezeichnet werden. Insbesondere die Hauptabflussphase während der Schneeschmeize (Mai bis Juli) und die Abflussverhältnisse im Sommer und Herbst wurden sehr gut modelliert. Klammert man die schlecht modellierten Abflüsse der winterlichen Niedrigwasserperiode aus, so erhält man einen mittleren monatlichen Schätzfehler von nur 6%.
- Bei der Modellierung der mittleren Monatsabflüsse der Langeten stellt sich das Problem, dass der Jahresabfluss mit der regionalen Übertragungsfunktion für die Alpennordseite (Tabelle 1-1) um rund 33% überschätzt wurde. Dies verdeckt etwas die Tatsache, dass das saisonale Abflussverhalten der Langeten mit der distanzgewichteten Übertragung der Pardé-Koeffizienten der drei Einzugsgebiete Broye-Payerne (*D<sub>Andr.</sub>*=58.5), Wyna-Unterkulm (*D<sub>Andr.</sub>*=63.5) und Murg-Wängi (*D<sub>Andr.</sub>*=104) grundsätzlich richtig modelliert wurde. Deshalb erfolgte eine zweite Schätzung, bei welcher anstelle des geschätzten der gemessene mittlere Jahresabfluss eingesetzt wurde. In diesem Fall beträgt der mittlere monatliche Schätzfehler 14%.



Abbildung 3-19: Distanzgewichtete Abschätzung der Monatsabflüsse der Saane in Saanen (Regime "nival alpin") und der Langeten in Huttwil (Regime "pluvial inférieur").

Langeten, Schätzung 1: MQ<sub>July</sub> über regionenspezifische Übertragungsfunktion (Tabelle 1-1) bestimmt; Langeten, Schätzung 2: gemessener Jahresabfluss übernommen

Figure 3-19: Distance-weighted estimates of monthly discharge for the Saane river at Saanen (flow regime type "nival alpin") and the Langeton river at Huttwil (flow regime type "pluvial inférieur")

### 3.3.7 Folgerungen

Insgesamt lässt sich mit den Andrews-Kurven die Identifikation und Auswahl von Repräsentativgebieten erleichtern und objektivieren und die Abschätzung mittlerer Monatsabflüsse in Einzugsgebleten ohne Abflussmessungen verbessern. Die kombinierte Anwendung statistischer und graphischer Klassifikationsverfahren weist entscheidende Vorteile auf: Durch statistisch gestützte Untersuchungen werden Einzugsgebiete mit ähnlichen hydrologischen Kennwerten zu Klassen zusammengefasst. Mit Andrews-Kurven, die mittels hydrologisch relevanter Gebletskenngrössen berechnet werden, können anschliessend die klasseninternen Zusammenhänge sowohl visualisiert als auch analysiert werden. Es besteht natürlich auch die Möglichkeit, ausschliesslich graphische Verfahren zur Abschätzung hydrologischer Grössen einzusetzen. Andrews-Kurven sind gerade in jenen häufig auftretenden Situationen von Vorteil, in denen wegen des kleinen Stichprobenumfangs keine statistischen Klassifikationsverfahren eingesetzt werden können. Dabei ist zur Abschätzung einer hydrologischen Grösse folgendes Vorgehen denkbar:

- 1. Zielgrössenorientierte Wahl der relevanten Gebietskennwerte;
- 2. Bestimmung der Verwandtschaft zwischen dem ungemessenen Gebiet und den Gebieten, die über hydrologische Messwerte verfügen, mit Hilfe der Andrews-Kurven;
- Eichung einer regionalen Übertragungsfunktion auf der Basis der gemessenen, ähnlichsten Einzugsgebiete;
- 4. Anwendung der regionalen Übertragungsfunktion im Einzugsgebiet ohne Abflussmessungen.

Befriedigt die Güte des regionalhydrologischen Modells nicht oder ist die Stichprobe zur Eichung der Übertragungsfunktion zu klein, so können die hydrologischen Kennwerte von Repräsentativgebieten direkt nach dem Vorbild der Formel 3-8 übertragen werden.

NII.

# 4 Regionalhydrologische Analysen im Hochwasserbereich

# 4.1 Einleitung

Zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen stehen in Abhängigkeit der Datenlage, der Gebietsgrösse und der Kenntnisse über die ablaufenden hydrologischen Prozesse verschiedene Ansätze zur Verfügung. Grundsätzlich ist zwischen Einzugsgebieten mit und solchen ohne Abflussmessreihen zu unterscheiden (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Übersicht über die Verfahren der Hochwasserabschätzung Figure 4-1: Outline of flood estimation methods

Der erfolgreiche Einsatz von physikalisch basierten, deterministischen White- und Grey-Box-Modellen scheitert oftmals an den fehlenden Grundlagen, aber auch daran, dass sich der Abflussprozess im Normalfall – aber nicht in den Extrembereichen (!) – "gutmütig" verhält. "Aus diesem Grund blieb lange Zeit verborgen, dass die Modelle den Abflussprozess grundsätzlich nicht richtig erfassen und deshalb Extrapolationen auf Zustände, die in der Eichperiode nicht vorkommen, Glückssache sind" (Naef und Faeh 1992). Es fehlen aber auch häufig Zeit und Finanzen, um diese räumlich-zeitlich hochauflösenden Modelle zu kalibrieren. Wie wir In Kapitel 1.3 diskutiert haben, stossen sie In mesoskaligen Einzugsgebieten, die in der Hochwasserbemessung von hervorragender Bedeutung sind, rasch an Grenzen. Aus diesen Gründen werden in der Bemessungspraxis mehrheitlich Verfahren der regionalen Übertragung, einfache Konzeptmodelle oder Black-BoxModelle eingesetzt (Abbildung 4-1). Dabei stehen in Anlehnung an das neue Bundesgesetz über den Wasserbau aus dem Jahr 1993, welches mit dem differenzierten Hochwasserschutz auf einem zeitgemässen, wegweisenden Bemessungskonzept beruht (BWW 1995), seltene Hochwasser mit Wiederkehrperioden zwischen etwa 50 und 200 Jahren im Vordergrund (Abbildung 4-2). Von hohem praktischem Wert sind aber auch Informationen zu den Grenzwerten der Hochwasserspitzen, wobei zwischen dem sogenannten Extremhochwasser (EHQ oder  $Q_{max}$ ) und dem vermutlich grössten Hochwasserabfluss ("probable maximum flood" (pmf)) zu unterscheiden ist. Weitere Parameter wie die Hochwasserfrachten oder die Anstiegszeiten von Hochwasserwellen wurden in der Schweiz bisher noch nicht systematisch untersucht.



Grössere Schäden oder Veränderungen zugelassen

### T Jährlichkeit des Ereignisses

Abbildung 4-2: Differenzierung der Schutzziele in einem zeitgemässen Hochwasserschutz (nach BWW 1995): Ziel des differenzierten Hochwasserschutzes ist es, Menschen und bedeutende Sachwerte zweckmässig und umfassend vor schädlichen Auswirkungen des Wassers zu schützen. Die Differenzierung der Schutzziele bedeutet, dass teure und empfindliche Anlagen einen besseren Schutz vor Hochwasser erhalten als weniger empfindliche. Das nach der Realisierung der Schutzmassnahmen verbleibende Restrisiko soll durch eine Katastrophenplanung vermindert werden, *Fi*gure 4-2: Modern flood protection requirements (BWW 1995)

Die für den Einsatz in mesoskaligen Einzugsgebieten geeigneten Ansätze lassen sich aus methodischer Sicht weiter differenzieren:

- Die Verfahren der regionalen Übertragung, die im mesoskaligen Bereich eine hervorragende Rolle spielen, können in Anlehnung an Kapitel 1.2 in regional-taxonomische Verfahren und regionale Übertragungsfunktionen gegliedert werden. Die Abbildung 3-6 in Kapitel 3.2 belegt die intensive Verknüpfung beider Verfahrensgruppen.
- Während die Verfahren der regionalen Übertragung auf einem stochastischen Modellkonzept beruhen, sind Konzept- und Black-Box-Modelle deterministisch begründet.
- Black-Box-Modelle können zwar auch in ungemessenen Einzugsgebleten zum Einsatz gelangen (z.B. synthetischer Unit Hydrograph); ihre Hauptanwendung finden sie aber in Einzugsgebieten, in denen (wenlge) Messungen zur Modelleichung zur Verfügung stehen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese Verfahrensgruppen im folgenden gesondert betrachtet. Nach einem Überblick über grundlegende Fragen der Hochwasserbeobachtung und -auswertung sowie der zeitlichen Extrapolation von Hochwasserreihen in gemessenen Einzugsgebieten werden die in der Schweiz angewandten regionalhydrologisch orlentlerten Hochwasserabschätzverfahren dargestellt und verglichen. Ein Ziel dieser Ausführungen ist es, die in den letzten Jahren in der Gruppe für Hydrologie des Berner Geographischen Instituts entwickelten Ansätze vorzustellen und einzuordnen.

# 4.2 Hochwasserbeobachtungen und -analysen in der Schweiz

Die Landeshydrologie und -geologie, einzelne Kantone und private Unternehmen betreiben in der Schweiz ein im internationalen Vergleich relativ dichtes Abflussmessnetz mit einer Station pro 100 km<sup>2</sup>. Allerdings bestehen namhafte regionale Unterschiede (vgl. Abbildung 4-3): Mit Mess-stationen schlecht erschlossen sind insbesondere die höheren Lagen des Alpenraums.



Abbildung 4-3: Abflussmessnetz der Schweiz. Ausschnitt aus der Tafel 5.1 des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" (Schädler und Bigler 1992)

Figure 4-3: Flow measurement network of Switzerland - Extract of map 5.1 from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

Problematisch sind ausserdem die kurzen Abflussmessreihen. Die durchschnittliche Messreihenlänge der Abflussstationen liegt bei 25 Jahren. Nach einem in der Statistik verbreiteten Ansatz zur Schätzung des Stichprobenumfangs kann die Anzahl der Messjahre (*n*) bestimmt werden, die notwendig ist, um den Mittelwert der Hochwasserspitzen ( $HQ_{mean}$ ) mit einer Genauigkeit / zu ermitteln (vgl. Rosenberg 1978). In Anlehnung an Riedwyl (1974) wurde *n* – bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95% – nach Formel 4-1 berechnet.

$$n \equiv 4 \frac{Cv^2}{I^2} \tag{4-1}$$

| n                  | notwendige Beobachtungsdauer [Jahre]                         |
|--------------------|--------------------------------------------------------------|
| Cv                 | Variationskoeffizient der Jahreshochwasserspitzen            |
| Ι                  | relativer Fehler ( $I = \frac{mHQ - HQ_{mean}}{HQ_{mean}}$ ) |
| HQ <sub>mean</sub> | Mittelwert der Grundgesamtheit der Hochwasserspitzen         |
| mHQ                | Mittelwert der Stichprobe                                    |

Der Variationskoeffizient der Jahreshochwasserspitzen (*Cv*) wurde aus den bestehenden Messreihen geschätzt. In Abbildung 4-4 ist die beobachtete der notwendigen Messdauer für den Fall I = 0.1 gegenübergestellt, und zwar für Einzugsgebiete mit Messreihen  $\geq 10$  Jahren: Wie die drei nach Höhenstufen gegliederten Diagramme belegen, genügen die in der Schweiz verfügbaren Messreihen in nur einem kleinen Prozentsatz der Fälle, um ein mittleres Hochwasser mit einem relativen Fehler von

weniger als 10% zu bestimmen.<sup>8</sup> Die sich daraus ergebenden Konsequenzen sollen im folgenden kurz diskutiert werden.



Abbildung 4-4: Notwendige Beobachtungsdauer zur Ermittlung der mittleren Jahreshochwasserspitzen mit einer Genauigkeit von 10% im Vergleich mit den verfügbaren Messreihen; *mH*: mittlere Gebietshöhe

Figure 4-4: Length of observations necessary for the determination of mean annual peak flows with a relative error of  $\leq$  10%, compared with available time series

Zur Ermittlung eines 7-jährlichen Hochwassers kann die sogenannte hydrologische Grundgleichung verwendet werden (Kaller und Riebe 1979):

$$HQ_T = mHQ + K_T \cdot s(HQ) \tag{4-2}$$

| HQr   | T-jährliches Hochwasser                                                |
|-------|------------------------------------------------------------------------|
| mHQ   | mittlere Jahreshochwasserspitze                                        |
| Kτ    | Koeffizient, von der Jährlichkeit und der Verteilungsfunktion abhängig |
| s(HQ) | Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen                         |

Dazu sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen sowie der Koeffizient  $K_7$  zu bestimmen. Da nicht die Grundgesamtheit der Hochwasserspitzen zur Verfügung steht, müssen die Schätzungen für Mittelwert und Standardabweichung aus der verfügbaren Stichprobe abgeleitet werden. Aus Abbildung 4-4 geht deutlich hervor, dass die Messreihen in der Mehrzahl der Fälle zu kurz sind, um den Mittelwert der Grundgesamtheit mit einem relativen Fehler von

In dieser Aussage steckt zwar eine gewisse Unsicherheit, weil die Voraussetzung der Normalverteilung der Jahreshochwasserspitzen in der Regel nicht erfüllt ist. Wie Rosenberg (1978) zeigt, ist der Fehler, der sich durch die Verletzung dieser Voraussetzung ergibt, allerdings sehr klein. Im weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Schätzung des Varlationskoeffizienten der Grundgesamtheit bei kurzen Messreihen in der Regel schlechter ist als bei langen, womit die teilweise sehr grossen Werte für die notwendige Beobachtungsdauer erklärbar sind. Mit der Abbildung 4-4 sollen indes prinzipielle Probleme des Messnetzes aufgezeigt werden, so dass diese Unsicherheiten tolerierbar sind.

weniger als 10% zu schätzen, was sich entsprechend negativ auf die Ermittlung eines T-jährlichen Hochwassers nach Formel 4-2 auswirkt. Ähnliches lässt sich zur Standardabweichung bemerken.

Für optimale räumliche Analysen benötigt man also längere Messreihen, genauere Abflussmessungen in den Extrembereichen und zusätzliche Messstationen. Deshalb wurden in der Schweiz in den letzten Jahren verschiedene Massnahmen zur Verbesserung der Datengrundlagen ergriffen:

- Seit 1984 erstellt und betreibt die Landeshydrologie und -geologie (LHG) im Rahmen des "Nationalen Programms Hochwasser" ein zusätzliches Hochwassermessnetz mit heute rund neunzig Stationen. In diesem Netz sollen mit möglichst geringem Aufwand die Spitzenabflüsse kleiner Einzugsgebiete erfasst werden. Mit einem von der LHG entwickelten Hochwassergrenzwertpegel wird der höchste Wasserstand während eines Hochwassers gemessen, um anschliessend mit Hilfe hydraulischer Berechnungen die Abflussmengen zu bestimmen. In der Regel werden in der Nähe dieser Messstellen auch die Geschiebefrachten in Geschiebesammlern erfasst.
- Die bisher übliche Bestimmung der Hochwasserabflüsse mit dem hydrometrischen Flügel ist infolge der kurzen Ereignisdauer, des Geschiebetriebs, des Geschwemmsels, der Bettveränderungen und der Rückstaueffekte sehr problematisch. Die Einführung der Seilffügelanlagen hat zu einer Verbesserung der Flügelmessung beigetragen. Weitere Verbesserungen ergeben sich aus dem Einsatz künstlicher Tracer. Dazu wurden spezielle feldtaugliche Messgeräte entwickelt (z.B. Gees et al. 1995) und neue Tracer evaluiert (z.B. Wernli, Weingartner und Spreafico 1995).

Trotz dieser Fortschritte ist den Ungenauigkeiten der Messungen, welche von den allgemeinen Messbedingungen massgeblich beeinflusst werden, stets genügend Rechnung zu tragen. Hochwasserabflüsse in stabilen Gerinnen mit optimalen Fliessbedingungen und geringem Transport von Feststoffen lassen sich relativ genau erfassen. Der Messfehler liegt in diesen Fällen nach Schädler (1992) unterhalb von 5%. Wegen der meist grossen Gefälle der schweizerischen Fliessgewässer, der vielfach grossen Feststofffrachten, aber auch wegen der beschränkten Möglichkeiten, mit wasserbaulichen Massnahmen die Abflussmessungen zu verbessern, sind diese günstigen Bedingungen allerdings eher selten anzutreffen, so dass mit Messfehlern zwischen 10 und 20%, in Einzelfällen sogar über 20% zu rechnen ist (Schädler 1992).

## 4.2.1 Statistische Basisauswertungen der Hochwassermessreihen

Mit langen Messreihen kann die Variabilität der Abflüsse über grössere Zeiträume erfasst werden; daraus lassen sich unter anderem Schlüsse über deren Häufigkeiten und Veränderungen im Laufe der Zeit ziehen. Die Landeshydrologie und -geologie hat rund 350 Abflussmessreihen analysiert, die ihrem Messnetz entstammen und mehr als zehn Beobachtungsjahre aufweisen (Aschwanden und Spreafico 1995). Es wurden Stationsbeschreibungen erstellt, Homogenitätsuntersuchungen durchgeführt, statistische Masszahlen bestimmt, Abflussregimes erfasst, Hochwasserspitzenabflüsse dargestellt, Hochwasserfrachten berechnet und Hochwasserwahrscheinlichkeiten abgeschätzt.

Die Prüfung der Konsistenz und der Homogenität erwies sich als schwierig und zeitaufwendig, obschon die Messstationen bzw. Messrelhen relativ gut dokumentiert sind (Spreafico und Weingartner 1992). Homogenitätsuntersuchungen wurden mit verschiedenen statistischen Tests durchgeführt. Bald zeigte sich die beschränkte Aussagefähigkeit solcher Tests. Nur bei starken Inhomogenitäten führten sie zu übereinstimmenden Ergebnissen. Es wurde deshalb zusätzlich versucht, aufgrund von Unterlagen über die Messstation und deren Einzugsgebiet Hinweise auf wesentliche anthropogene Eingriffe in den natürlichen Wasserhaushalt zu erhalten und diese wo möglich zu quantifizieren.

Bei einer Analyse der zeitlichen Trends der jährlichen, sommerlichen und winterlichen Hochwasserspitzen wurde festgestellt, dass allgemein keine systematischen Trends – etwa in Form einer generellen Erhöhung der Spitzenabflüsse – zu beobachten sind (Spreafico und Weingartner 1992, Weingartner, Schwab und Barben 1999). Die Spitzenwerte an der Station Orbe-Orbe in Abbildung 4-5 vermitteln dazu ein charakteristisches, für die Mehrzahl der Stationen gültiges Bild: Es treten erhebliche Schwankungen zwischen den Einzeljahren auf, aber es ist kein allgemeiner Trend zu einer Zuoder Abnahme der Hochwasserspitzen erkennbar. Hingegen nehmen die Hochwasserspitzen der Station Vispa-Visp seit Beginn der sechziger Jahre ab. Dafür verantwortlich sind die Überleitungen aus dem Mattertal zum Lac des Dix und die Ableitungen im Saastal zum Stausee Mattmark. Solche Situationen sind im Alpenraum verschiedentlich anzutreffen (Hauenstein 1998). Trotz dieser starken anthropogenen Beelnflussung können bei speziellen Verhältnissen – beispielsweise bei vollen Speichern oder nach einer Schliessung der Ab- und Überleitungssysteme – Extremabflüsse auftreten. Bei der Station Sitter-Bernhardzell fällt die kontinuierliche Zunahme der Spitzenabflüsse auf, welche nicht mit künstlichen Eingriffen erklärbar ist.



Abbildung 4-5: Die grössten beobachteten Jahres-, Sommer- und Winterhochwasserabflüsse an drei ausgewählten Stationen (aus Spreafico und Weingartner 1992)

Figure 4-5: The largest observed annual, summer and winter peak flows

## 4.2.2 Auswertung der Unwetterschadensstatistik der Schweiz

Aufschlussreiche Zusatzinformationen zu Fragen der zeitlichen Variationen der Hochwasserabflüsse liefert die von Röthlisberger (1991) erarbeitete, von Gees (1996) erweiterte und als Datenbank umgesetzte Statistik der in den letzten 200 Jahren vor allern von Hochwassern verursachten Schäden. Die Datenbank beinhaltet rund 4000 Einträge aus dem Zeitraum 1800 bis 1994 (Gees und Weingartner 1998). Allgemein ist eine Zunahme der Schäden seit 1800 festzustellen (Abbildung 4-6). Dies hängt einerseits mit der Nutzungsintensivierung und Besiedlung der ufernahen Zonen zusammen. Andererseits wurden die Ereignisse durch die Verbesserung der Quellenlage im Laufe der Zeit immer vollständiger erfasst; seit Beginn der 1970er Jahre darf von einer Vollerhebung gesprochen werden. Innerhalb des von der Erhebungsmethodik wesentlich beeinflussten "Trends" zu einer grösseren Zahl von Schadensereignissen pro Jahr fällt die Periode 1940–1965 mit einer markant geringeren Ereigniszahl auf. In dieser Periode nahmen sowohl die Gesamtzahl als auch die Zahl der schweren bis katastrophalen Ereignisse ab. Das Jahr 1964 blieb – nota bene als einziges dieses Jahrhunderts – frei von Hochwasserschäden. Die Periode 1940–1965 ist vermutlich die schadensärmste der letzten 200 Jahre. Sie wirft viele Fragen auf, die auch im Zusammenhang mit dem Problemkreis "Klimaänderung" von Interesse sind. Aus diesem Grund sollen die Verhältnisse der Periode 1940– 1965 etwas genauer betrachtet werden:



#### Gesamtzahl der Ereignisse

Katastrophale, sehr schwere und schwere Ereignisse



Abbildung 4-6: Jährliche Häufigkeit der durch Unwetter verursachten Schäden in der Schweiz, Periode 1800–1994 (nach Röthlisberger 1991 und Gees 1996)

Figure 4-6: Annual occurence of storm damage in Switzerland

Aus meteorologischer Sicht kann die Periode 1940 bis 1965 als warm und trocken bezeichnet werden (Abbildung 4-7). Zudem war die Häufigkeit der Westwindlagen in diesem Zeitraum bedeutend kleiner als zwischen 1890 und 1935 sowie zwischen 1970 und 1990 (Caspary und Bárdossy 1995, Gees 1996). Wanner und Beniston (1995) bringen es auf den Punkt: "[..] the warming tendency was due to very hot and dry summer seasons with strong anticyclonic blocking." Dies gilt im besonderen Masse für die 1940er Jahre.



Abbildung 4-7: Zeitreihen meteorologischer Grössen (aus Beniston et al. 1994) Figure 4-7: Time series of selected meteorological parameters

Bei der Periode 1940 bis 1965 handelt es sich also um einen schadensarmen Zeitraum in einer relativ warmen Atmosphäre, der sich im Zusammenhang mit Fragen der "Klimaänderung" für detaillierte und räumlich differenzierte Analysen geradezu aufdrängt. Beispielsweise kann man in dieser Periode bei der Emme und der Sense, welche aus naturräumlicher und klimatischer Sicht sehr ähnlich sind, ein deutliches Auseinanderklaffen der Hochwasserspitzen beobachten, das bisher noch nicht befriedigend erklärt werden konnte (Abbildung 4-8). Faktoren wie die Häufigkeit von konvektiven und advektiven Lagen und das damit zusammenhängende Niederschlagsgeschehen scheinen eine wichtige Rolle zu spielen.



Abbildung 4-8: Das Hochwassergeschehen der Sense-Laupen und der Emme-Emmenmatt im Vergleich; gleitende Mittel der jährlichen Hochwasserspitzen (nach Gees 1996) Figure 4-8: Comparison of flood conditions for the Sense and Emme rivers; data has been smoothed by a 10-year moving average

Aus hydrologischer Sicht ergibt sich für die Periode 1940–1965 ein uneinheitliches Bild, wie die Abbildung 4-9 und die Tabelle 4-1 verdeutlichen: Beim Rhein, bei der Aare und bei der Reuss sind die mittleren Hochwasserspitzen der Periode 1940–1965 signifikant kleiner als jene der Periode 1965–1990; sie unterscheiden sich aber nicht von den mittleren Hochwasserspitzen der Periode 1920–1940. Ein entgegengesetztes Bild ergeben die Flussgebiete der Limmat und des Ticino: Während die mittleren Hochwasserspitzen der ersten Periode 1920–1940 signifikant höher sind als jene der Periode 1940–1965, lassen sich zwischen den Perioden 1940–1965 und 1965–1990 keine signifikanten Unterschiede erkennen. Bei der Rhône nahmen die mittleren Hochwasserspitzen im Laufe dieses Jahrhunderts ab; hierbei dürfte der Ausbau der Wasserkraftnutzung eine entscheidende Rolle gespielt haben (vgl. Abbildung 4-5, Vispa). Die Reaktion des Hochwassergeschehens auf die veränderten meteorologischen Bedingungen varliert demnach von Region zu Region. Ein allgemeingültiger Trend ist nicht zu erkennen.



Abbildung 4-9: Gleitende tiefpassgefilterte Mittel der jährlichen Hochwasserspitzen schweizerischer Flussgebiete Figure 4-9: Low-pass filter of annual peak flows of Swiss river basins

Tabelle 4-1: Mittlere Jahreshochwasserspitzen (*mHQ*) unterschiedlicher Perioden von ausgewählten Flussgebieten der Schweiz

| Aussgebiet          | mHQ (1920-1940) | 0 | mHQ (1940-1965) | Ø | mHQ (1965-1990) |
|---------------------|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|
| Rhein-Rekingen      | 1140            | = | 1104            | < | 1226            |
| Aare-Brugg          | 717             | = | 767             | < | 912             |
| Reuss-Mellingen     | 464             | = | 452             | < | 528             |
| Ummat-Zürich        | 385             | > | 307             | × | 311             |
| Ticino-Bellinzona   | 1051            | > | 832             | = | 873             |
| Rhône-Porte du Scex | 807             | > | 720             | > | 628             |

Table 4-1: Mean annual peak flows (mHQ) for different time periods, from selected river basins of Switzerland

• Mittelwertsvergleich mittels z-Test ( $\alpha = 5\%$ ) zwischen der Periode 1920–1940 und 1940–1965 • Mittelwertsvergleich mittels z-Test ( $\alpha = 5\%$ ) zwischen der Periode 1940–1965 und 1965–1990

Aus historischer Sicht kann festgestellt werden, dass überschwemmungsarme Perioden immer wieder aufgetreten sind: Nach einer Mitteilung des NFP-31 (1996) lassen sich im Alpenraum über die letzten fünf Jahrhunderte zwei Perioden mit einer geringen Zahl an Überschwemmungen nachweisen: 1641–1706 und 1925–1975. Die Überschwemmungslücke von 1641–1706 fällt exakt in das sogenannte Maunder-Minimum, einer Periode mit geringer Sonnenaktivität. Der zweite Zeitraum von 1925 bis 1975 beinhaltet die hier diskutierte schadensarme Periode 1940–1965. Auf der Grundlage einer Analyse von 119 historischen Hochwassern stellte Röthlisberger (1995) ebenfalls gewisse zeitliche Konzentrationen im Hochwassergeschehen der Schweiz fest. Als Perioden mit einer geringen Hochwasseraktivität erwähnt er die Warmphase 1525–1565, die Trockenphase 1630–1687 und den "Höhepunkt der 'Kleinen Eiszeit'" von 1688–1701. Perioden geringer Hochwasseraktivität können demnach offensichtlich unter ganz verschiedenen klimatischen Bedingungen auftreten.

Erschwerend für die Interpretation der schadensarmen Periode 1940–1965 kommt hinzu, dass durch Hochwasserschutzmassnahmen der direkte Zusammenhang zwischen der Grösse von Hochwasserereignissen und den aufgetretenen Schäden oftmals verwischt wird, wie das folgende Beispiel der Emme-Emmenmatt belegt: 1910 bewirkte ein Hochwasser mit einer Spitze von ca. 330 m<sup>3</sup>/s sehr grosse Schäden. Im Anschluss daran wurden die Schutzbauten erneuert und verbessert, so dass das noch grössere Hochwasser von 1912 mit einer Spitze von ca. 420 m<sup>3</sup>/s ablaufen konnte, ohne nennenswerte Schäden zu verursachen (Gees 1996).



Abbildung 4-10: Entwicklung des Hochwasserrisikos (nach Vischer 1998; Jahreszahlen ergänzt) Figure 4-10: Flood risk development over time

Als weiterer wichtiger Faktor für die Einordnung der Periode 1940-1965 ist neben den Massnahmen zum Hochwasserschutz die Entwicklung des Schadenpotentials in den flussnahen Zonen zu berücksichtigen (Weingartner 1998). Es lassen sich interessante Zusammenhänge zwischen den Hochwasserschutzmassnahmen, der Entwicklung des Schadenpotentials und den beobachteten Schäden ableiten. Das Bundesgesetz über die Forst- und Wasserpolizei von 1876 bzw. 1877 legte die Grundlagen für Schutzmassnahmen im grossen Stil (Schnitter 1991). Nach Ulmi und Bertschmann (1977) wurden zwischen 1877 und 1977 rund 6.3 Mia. Fr. - umgerechnet auf die heutige Kaufkraft - in Schutzwasserbauten investiert. Damit reduzierte sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines schädlichen Hochwassers stark, wie Vischer (1996) modellhaft darlegt (Abbildung 4-10, erstes Diagramm). Die Nutzung der durch die Schutzmassnahmen nun "sicher" gewordenen Gebiete wurde in der Folge nicht nur im Agrarsektor intensiviert; es entstanden auch Siedlungen, Industrie- und Gewerbeanlagen sowie Verkehrswege, so dass sich das Schadenpotential teilweise massiv erhöhte (Abbildung 4-10, zweites Diagramm). Das Resultat dieser Entwicklungen hält das letzte Diagramm der Abbildung 4-10 fest, das die Veränderung des jährlichen Schadenserwartungswerts beschreibt. Diese Modellkurve entspricht weitgehend der Entwicklung der effektiv beobachteten Schäden (vgl. Abbildung 4-7). In diesem Licht kann die schadensarme Periode 1940-1965 folgendermassen interpretiert werden: In den 1940er Jahren waren die Hochwasserschutzmassnahmen weit fortgeschritten, während die flussnahen Gebiete in der Regel noch extensiv genutzt wurden. Anschauliche Beispiele dazu liefert Koblet (1995). Im Zuge der Wirtschaftsentwicklung nach dem 2. Weltkrieg wurden die flussnahen Gebiete jedoch zunehmend intensiver genutzt, so dass sich allmählich ein Schadenpotential aufbauen konnte und sich dadurch der jährliche Schadenserwartungswert auch bei unverändertem Hochwassergeschehen laufend erhöhte.

Somit ist anzunehmen, dass die schadensarme Periode 1940-1965 je nach Region sowohl durch meteorologisch-klimatische wie anthropogene Faktoren bedingt war. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in Deutschland gemacht: "Unterstützt durch eine Periode geringerer Hochwasseraktivität in den 50er, 60er und 70er Jahren hat auch der wachsende Wohlstand zur Vergrösserung der Schadenspotentiale und damit zum Anwachsen von Hochwasserschäden geführt" (LAWA 1995).

## 4.2.3 Zeitliche Extrapolation der Hochwasserreihen

Beim heute praktizierten differenzierten Hochwasserschutz werden Kenntnisse zu Hochwassern mit Wiederkehrperioden bis zu etwa 200 Jahren benötigt (vgl. Abbildung 4-2). In Einzugsgebieten, in denen lange Messreihen zur Verfügung stehen, können solche seltene Hochwasser durch die zeitliche Extrapolation mittels geeigneter Verteilungsfunktionen bestimmt werden (Abbildung 4-1):

Zur Extrapolation ihrer Hochwasserreihen verwendet die Landeshydrologie und -geologie in Anlehnung an den DVWK (1976) wenn möglich die Log-Pearson-III-Verteilung, um die Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten (Aschwanden und Spreafico 1995). Die vorhandenen Unsicherheiten wie die Wahl des Parameterschätzverfahrens, die Festlegung der "plotting position", die Datenqualität sowie die getroffenen Annahmen wie die Unabhängigkeit der Hochwasserspitzen und die Stationarität der Messreihen bedingen aber eine vorsichtige Verwendung der extrapolierten Werte. Die Verteilungsfunktion, mit der die Hochwasserspitzen zeitlich extrapoliert werden, beeinflusst das Ergebnis massgeblich (Gottschalk 1996). Untersuchungen von Elsasser (1996) haben gezeigt, dass die Gumbel-, die Pearson-III- und die Goodrich-Verteilung bei der Extrapolation signifikant kleinere Werte ergeben als die Log-Normal- und die Log-Pearson-III-Verteilung. Diese Ergebnisse werden durch den Vergleich der 100jährlichen Hochwasserspitzen abflüsse aus 69 schweizerischen Einzugsgebieten, die sowohl mittels der Gumbel- als auch mittels der Log-Pearson-III-Verteilung extrapoliert wurden, weitgehend bestätigt (Abbildung 4-11). Die 100jährlichen über die Log-Pearson-III-Verteilung ermittelten Werte sind in der Regel grösser als jene, welche mit Hilfe der Gumbel-Verteilung extrapoliert wurden.



Abbildung 4-11: Mit der Gumbel- und Log-Pearson-III-Verteilung extrapolierte 100jährliche Hochwasserspitzen von 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Messreihen ≥ 10 Jahren und Gebietsflächen zwischen 10 und 100 km<sup>2</sup> Figure 4-11: 100-year peak flows from 69 Swiss catchments, extrapolated from the Gumbel and the log-Pearson-III distributions

Neben den oben erwähnten Unsicherheiten können insbesondere auch folgende Aspekte das Ergebnis der zeitlichen Extrapolation massgeblich beeinflussen:

- Bei der Verwendung von Verteilungsfunktionen wird angenommen, dass die Hochwasser mit abnehmender Auftretenswahrscheinlichkeit stetig grösser werden. Dies ist aber nicht immer der Fall. Der Abfluss kann sich nicht über die Gerinnekapazität erhöhen; bei Ausuferungen ergeben sich Unstetigkeiten (Haider 1994). Andererseits tritt, wenn das Speicherungsvermögen eines Einzugsgebietes erschöpft ist, eine sprunghafte Veränderung im Hochwassergeschehen ein, die mit einer Verteilungsfunktion nicht beschrieben werden kann.
- Bei der statistischen Analyse und der zeitlichen Extrapolation sind die j\u00e4hrlichen Spitzenabfl\u00fcsse aus ihrem Ereigniszusammenhang gerissen; so werden Hochwasser unterschiedlicher Entstehungsart direkt miteinander verglichen, obwohl beispielsweise ein Fr\u00fchjahreshochwasser im Bereich der Schneeschmeize ganz andere Rahmenbedingungen aufweist als ein durch sommerliche Starkregen gebildetes Hochwasser.

Damit stellt sich auch die Frage, ob sich das hydrologische Extremverhalten eines Einzugsgebietes mit statistisch begründeten Verfahren überhaupt beschreiben lässt. Bardsley (1994) gelangt in seinem anregenden Aufsatz "Against Objective Statistical Analysis of Hydrological Extremes" angesichts dieser Probleme zum naheliegenden Schluss, dass es ein bestes Extrapolationsverfahren nicht gibt und dass deshalb eine einfache graphische Extrapolation statistischer Raffinesse vorzuziehen ist: "A realistic new philosophy of analysis would be for an investigator to start with their own subjective extrapolation curve passing through the data and extending beyond as far as they have confidence. Any parametric distribution producing a closely similar curve could be used to create a return period scale for that particular case." In eine ähnliche Richtung zielt die Empfehlung von Elsasser (1996), die auf einer Analyse der Möglichkeiten und Grenzen von Extrapolationsverfahren in schweizerischen Einzugsgebieten basiert: "Man führe für alle sieben Verteilungsfunktionen<sup>®</sup> die zeitliche Extrapolation nach konventioneller Methode durch und wähle daraus jene Funktion mit der visuell besten Anpassung." Im weiteren weist Elsasser zu Recht darauf hin, dass bei der zeitlichen Extrapolation auch vermehrt die Konfidenzintervalle beachtet werden sollten.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Exponentialverteilung, Gumbel-Verteilung, zweifache, gemischte Exponentialverteilung, Pearson-III-Verteilung, Goodrich-Verteilung, Log-Normalverteilung und Log-Pearson-III-Verteilung.

Bei der zeitlichen Extrapolation können historische Hochwasser, also Hochwasser, welche vor Messbeginn abgelaufen sind, wertvolle Zusatzinformationen liefern; sie ermöglichen eine Verlängerung der Beobachtungsreihen und damit eine Verbesserung der Extrapolationsergebnisse (Weingartner 1998). So gelang es, durch die Quantifizierung historischer Hochwasser im Emmental (Station Emmenmatt, Fläche: 443 km<sup>2</sup>) eine Hochwasserreihe von 1837 bis 1995 zu rekonstruieren (Weingartner und Gees 1994). Aus dieser Reihe erhält man einen 100jährlichen Hochwasserspitzenabfluss von 443 m<sup>3</sup>/s. In Tabelle 4-2 wird dieser "wahre" Wert mit Schätzungen verglichen, die aus unterschiedlichen Messperioden extrapoliert wurden. Da im Emmental die grössten Hochwasser mit Messreihen des 20. Jahre Im 19. Jahrhundert aufgetreten sind, wird das 100jährliche Hochwasser mit Messreihen des 20. Jahrhunderts systematisch unterschätzt. Die aktuelle Periode 1960 bis 1990 führt gar zur grössten Unterschätzung.

Tabelle 4-2: Abschätzung der 100jährlichen Hochwasserspitzen der Emme-Emmenmatt mit Hilfe der Gumbel-Verteilung, basierend auf unterschiedlichen Zeitperioden (Gees 1996)

Table 4-2: Estimates of the 100-year peak flow  $(HQ_{100})$  for the Emme river at Emmenmatt, using a Gumbel distribution, based on various time periods

| Parioda                       | HQ <sub>100</sub><br>[m <sup>3</sup> /s] | Abweichung [%] vom<br>Wert 1837-1995 |
|-------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1837–1995                     | 443                                      | -                                    |
| 1900–1930                     | 428                                      | -3%                                  |
| 1930–1960                     | 367                                      | -17%                                 |
| 1960–1990                     | 333                                      | -25%                                 |
| 1897–1995 (Messreihe der LHG) | 396                                      | -11%                                 |

LHG: Landeshydrologie und -geologie

Zeitlich extrapolierte Hochwasserspitzen weisen, so zeigen diese kurzen Ausführungen, grössere Unsicherheiten auf. Zuverlässigere Werte sind zu erwarten, wenn hydrologisches Prozesswissen in die Extrapolationsverfahren einfliesst. Das in den letzten Jahren entwickelte AGREGEE-Modell (Margoum et al. 1994) ist ein Anstoss in diese Richtung. Bei diesem Modell werden zur Extrapolation die Niederschlagsverhältnisse und das Speicherungsvermögen eines Einzugsgebietes mitberücksichtigt. Unsere Untersuchungen zur Anwendung des AGREGEE-Modells in schweizerischen Einzugsgebieten haben allerdings gezeigt, dass es die Erwartungen in bezug auf die zeitliche Extrapolation von Hochwasserspitzen nicht erfüllt (Elsasser 1996). In fast allen Fällen ergaben die Modell-anwendungen unrealistische Werte. Dies hängt im wesentlichen damit zusammen, dass die Extrapolation der Hochwasserspitzen auf der Basis der höchsten mittleren Tagesabflüsse erfolgt und zur Bestimmung der Hochwasserspitzen ein sehr problematischer Umrechnungsfaktor eingeführt werden muss, um die extrapolierten Tageswerte auf Hochwasserspitzen umzurechnen.

Im Hinblick auf die Entwicklung und Anwendung regionalhydrologischer Verfahren im Hochwasserbereich lassen diese Ausführungen erkennen, dass die regionalhydrologischen Modelle, welche von den zeltlich extrapolierten Werten ausgehen, auf oftmals ungenauen Ausgangsdaten beruhen. Andererseits ist es schwierig, die Güte regionalhydrologischer Modelle abschliessend zu beurteilen, weil die wahren Werte seltener Hochwasser nicht bekannt sind und sich je nach Verteilungsfunktion andere Vergleichswerte ergeben.

# 4.3 Regionale Übertragungsfunktionen und einfache Konzeptmodelle

Zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen bestehen viele regionale Übertragungsfunktionen. In einer Literaturrecherche fand Chow (1964) über hundert solcher Formeln. Naef (1983) nennt dafür zwei wesentliche Gründe: Erstens werden in der Praxis einfachste Verfahren eingesetzt; der Praktiker "behilft sich mit schlechtem Gewissen mit sehr primitiven Methoden. Darum stellt er an die Forschung die dringliche Aufgabe, ihm eine zuverlässige Methode zur Abschätzung der Hochwasser zur Verfügung zu stellen." Die Forschung nahm und nimmt diese Aufgabe dankbar an und entwickelte und entwickelt immer wieder neue regionalhydrologische

Modelle. Bisher konnte sich aber - und damit sind wir beim zweiten Grund angelangt - keln Verfahren durchsetzen, weil

- mangelnde Prozesskenntnisse die Parametrisierung der Abflussbildung in regionalen Übertragungsfunktionen erschweren; der Aspekt der Abflussbildung ist unter allen Teilproblemen, die bei der Hochwasserbemessung auftreten, am weitesten von einer Lösung entfernt;
- die Verfahren in der Regel nur eine regionale G
  ültigkeit besitzen: In den Koeffizienten der regionalen 
  Übertragungsfunktionen sind implizit regionale Informationen wie die geologischen und klimatischen Rahmenbedingungen enthalten, so dass sie nicht direkt in anderen geographischen Regionen einsetzbar sind.

Bevor wir uns im folgenden auf die "schweizerische Szene" beschränken, müssen wir kurz auf den Flood Studies Report (NERC 1975) hinweisen, welcher auf die regionalhydrologische Forschung im Hochwasserbereich entscheidende Impulse ausübte. In dieser umfangreichen Studie wurden Daten aus über 500 britischen Einzugsgebieten verwendet. Der beachtliche Stichprobenumfang, aber auch die im Vergleich zu schweizerischen Einzugsgebieten grössere Homogenität der britischen Gebiete bildeten ausgezeichnete Voraussetzungen, um zuverlässige Verfahren zu entwickeln (vgl. Naef 1983). Trotzdem – und dies ist für die Situation in der Hochwasserabschätzung bezeichnend – wird als sicherste Vorgehensweise empfohlen, eine Abflussmessstation zu installieren, um eine kurze Mess-Serie zu gewinnen, da die Auswertung auch kurzer Messreihen zu zuverlässigeren Ergebnissen führe als die Anwendung regionalhydrologischer Modelle.

## 4.3.1 Beurteilung regionalhydrologischer Modelle

Im folgenden werden verschiedene regionalhydrologische Hochwassermodelle diskutiert und verglichen. Zur Beurteilung der Güte dieser Modelle eignet sich das von Naef (1983) vorgeschlagene Bewertungsschema ausgezeichnet. Es beruht auf der richtigen Annahme, dass es bei Dimensionierungsfragen um die Festlegungen einer Grössenordnung geht und deshalb Abweichungen vom "wahren" Wert bis zu einem gewissen Mass durchaus tolerierbar sind.

Für die Modellbeurteilung werden – in Einzugsgebieten, die über Abflussdaten verfügen – die prozentualen Abweichungen der modellierten Werte von den Vergleichswerten bestimmt. Die Vergleichswerte müssen mit Hilfe zeitlicher Extrapolationsverfahren aus bestehenden Messdaten ermittelt werden. Anschliessend werden die Abweichungen von den Vergleichswerten klassiert und der Prozentsatz der Realisierungen in den einzelnen Klassen ermittelt.

Vergleichswert: 100%

- modelliertes Hochwasser < 50%, > 200% ⇔ Abschätzung unbrauchbar

In Abbildung 4-12 ist eine fiktive Modellbeurteilung dargestellt. Der Anteil der Realisierungen in den beiden Klassen "exakt" und "genügend" wird als Trefferwahrscheinlichkeit bezeichnet. Dadurch kann die Modellbeurteilung auf eine einzige Masszahl reduziert werden.

Zur vergleichenden Beurteilung der hier vorgestellten regionalhydrologischen Hochwassermodelle wurden die 100jährlichen Hochwasser der stets gleichen 69 Einzugsgebiete abgeschätzt. Diese Einzugsgebiete weisen eine Fläche zwischen 10 und 100 km<sup>2</sup> auf<sup>10</sup>; sie sind über alle geographischen Regionen der Schweiz verteilt (vgl. Tabelle 4-19 in Kap. 4-6). Ihre mittlere Messreihenlänge beträgt 25 Jahre mit einer Varlationsbreite von 10 bis 55 Jahren. Die 100jährlichen Vergleichswerte wurden mit

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Die diskutierten Hochwassermodelle können für verschiedene Gebietsflächen eingesetzt werden. Der Flächenbereich 10 bis 100 km<sup>2</sup> ist die Schnittmenge dieser Gültigkeitsbereiche.

statistischen Verfahren zeitlich extrapoliert. Wegen der in Kapitel 4.2.3 geschilderten Unsicherheiten bei der Extrapolation wurden zwei Vergleichswerte verwendet:

- die von der Landeshydrologie und -geologie (Aschwanden und Spreafico 1995) publizierten Werte, welche mehrheitlich mittels der Log-Pearson-III-Verteilung extrapoliert wurden;
- dle von Düster (1994) mit Hilfe der Gumbel-Verteilung berechneten Werte.



① Vergleich der modellierten Werte mit den von der Landeshydrologie und -geologie publizierten Werten

- Ø Vergleich der modellierten Werte mit den mittels der Gumbel-Verteilung extrapolierten Werten
- h Prozentsatz der Realisierungen in einer Güteklasse
- $\varSigma$  Summenhäufigkeit

Abbildung 4-12: Fiktive Bewertung eines Modells nach dem Vorschlag von Naef (1983) Figure 4-12: Assessment of flood model accuracy after Naef (1983)

## 4.3.2 Einfache Formeln

In den letzten Jahrzehnten wurden zur Hochwasserabschätzung vielfach einfache Übertragungsfunktionen eingesetzt, bei denen nur die Einzugsgebietsfläche als unabhängige Grösse eingeht:

$$HQ_T = a \cdot Fn^b$$

(4-3)

| HQτ  | T-jährlicher Spitzenabfluss |
|------|-----------------------------|
| Fn   | Gebietsfläche               |
| a, b | Koeffizienten               |

Die regionalen Übertragungsfunktionen dieses Typs, die ihre Wurzeln im letzten Jahrhundert haben, liefern oftmals auch Werte der Umhüllenden, also jener Kurve, welche die höchsten beobachteten Abflussspitzen nach oben begrenzt. Bei der Anwendung der Hüllkurven kann es allerdings zu beachtlichen Überschätzungen kommen. Es sei in diesem Zusammenhang auf Kapitel 4.4.2 verwiesen, in welchem die Hüllkurven der schweizerischen Einzugsgebiete analysiert werden und eln regionaltaxonomisch begründeter Ansatz vorgestellt wird, mit dem sich die Aussagekraft dieser einfachen Formeln wesentlich erhöhen lässt.

Wird in Formel 4-3 anstelle der konventionellen Gebietsfläche (*Fn*) die beitragende Fläche ( $Fn_{beitr}$ ) als unabhängige Grösse verwendet, so ergeben sich Verbesserungen, wie wir in Kapitel 2.3.4 gesehen haben. Das verbesserte Modell lautet:

$$mHQ = 2.254 \cdot Fn_{bear}^{0.86} \tag{4-4}$$

*mHQ* mittlere Jahreshochwasserspitze [m<sup>3</sup>/s] *Fn<sub>beltr</sub>* beitragende Fläche [km<sup>2</sup>] In dieser Form eignet sich das Modell aber noch nicht zur Abschätzung von Spitzenabflüssen, wie das Bestlmmtheitsmass von 65% belegt.

### 4.3.3 Erweiterte Formeln

Ab den 1930er Jahren wurden in der Hydrologie vermehrt Feldexperimente durchgeführt, bei denen die Abflussbildung im Mittelpunkt stand und die insofern auch Auswirkungen auf die Bauart der Hochwasserformeln hatten, indem nun der Abflussbeiwert ( $\psi$ ) explizit mitberücksichtigt wurde:

$$HQ_T = \psi \cdot a \cdot Fn^b \tag{4-5}$$

| HQτ  | 7-jährlicher Spitzenabfluss |
|------|-----------------------------|
| Fn   | Gebietsfläche               |
| Ψ    | Abflussbeiwert              |
| a, b | Koeffizienten               |

Zur Schätzung von  $\psi$  bestehen verschiedene Ansätze. Diesbezüglich kann der Bogen von einem Ansatz Müller (1943), der den Abflussbeiwert in Funktion der Höhenlage, der Vegetation und der mittleren Hangneigung festlegt, bis hin zum Verfahren des US-Soil Conservation Service (SCS-Verfahren) gespannt werden. Das Infiltrationskonzept von Horton (1933), das heute als zu undifferenziert angesehen werden muss (vgl. z.B. Zuidema 1985), bildete meist den Ausgangspunkt für die Entwicklung dieser Verfahren. Im Abflussbeiwert sollten sich alle jene Gebietseigenschaften widerspiegeln, welche die Transformation des Niederschlags in den Abfluss massgeblich beeinflussen. Diesem Anspruch als universelle Gebietskenngrösse konnte und kann der Abflussbeiwert nicht genügen. Deshalb resultieren häufig unbefriedigende Ergebnisse.

## 4.3.4 Momentenabschätzung und Regressionsanalyse (Modelle "Momente" und "Regression")

Unter den regionalen Übertragungsfunktionen ist aus schweizerischer Sicht vor allem auch das methodisch interessante Modell von Sydler, Widmoser und Zollinger (1982) hervorzuheben, welches auf der hydrologischen Grundgleichung (Formel 4-2) beruht: Die beiden Parameter der hydrologischen Grundgleichung, die mittlere Jahreshochwasserspitze (mHQ) und die Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen (s(HQ)), werden über invariante Gebietskenngrössen, welche direkt aus topographischen Karten ableitbar sind, geschätzt (Momentenschätzung):

$$\ln mHQ = -0.95 - 0.77 \ln F_1 + 1.65 \ln F_2 + 1.04 \ln F_3$$

$$\ln s(HQ) = -1.37 - 0.69 \ln F_1 + 1.49 \ln F_2 + 1.00 \ln F_3$$
(4-6)
(4-7)

| $F_1$ | Fläche/(Umfang · Schwerpunktabstand) |
|-------|--------------------------------------|
| $F_2$ | Fläche/Tallänge                      |
| $F_3$ | Flussdichte                          |

( - - a)

----

Anschliessend wird ein Spitzenabfluss der Jährlichkeit 7 unter Annahme der Gumbel-Verteilung bestimmt zu:

| $HQ_T = mHQ$   | $+K_T \cdot s(HQ)$                                                 | (4-8)     |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| HQτ            | 7-jährliches Hochwasser [m <sup>3</sup> /s]                        |           |
| mHQ            | mittlere Jahreshochwasserspitze [m <sup>3</sup> /s]                |           |
| s(HQ)          | Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen [m <sup>3</sup> /s] |           |
| K <sub>T</sub> | Koeffizient, von der Jährlichkeit und der Verteilungsfunktion abhä | ingig [-] |

. . .

96
Zur Schätzung von *mHQ* und *s*(*HQ*) werden allerdings nicht unproblematische Gebietskenngrössen verwendet: Die Flussdichte wird je nach Massstab und Generalislerungsgrad einer Karte unterschiedliche Werte annehmen; die kombinierten Kenngrössen  $F_1$  und  $F_2$  sind hydrologisch nicht oder nur schwer interpretierbar. Erstaunlich ist auch, dass im Abschätzverfahren keine varianten Gebietskenngrössen verwendet werden.

Die Idee der Momentenschätzung von Sydler, Widmoser und Zollinger (1982) wurde in einer Untersuchung am Geographischen Institut der Universität Bern wieder aufgenommen. Düster (1994) berechnete die beiden Momente *mHQ* und *s(HQ)* auf der Basis verbesserter Grundlagendaten neu; insbesondere verwendete er die in Kapitel 2.3 vorgestellten prozessorientlerten, gewichteten Gebietskenngrössen. Die Kalibrierung des Modells "Momente" erfolgte über rund neunzig Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 200 km<sup>2</sup>:

$$mHQ = \frac{Fn_{beitr}^{0.8398}}{(Vgl+1)^{0.1573}} \cdot 10^{b}$$
(4-9)  

$$mit b = 0.0372 \cdot \sqrt{N_{gew}} - 0.1086 \cdot \sqrt{Im_{gew}} + 0.008 \cdot Oed_{gew} + 0.0043 \cdot WSV_{gew} - 1.1434$$

$$r^{2} = 0.84$$

$$s(HQ) = Fn_{beitr}^{0.812} \cdot 10^{0.000+N_{grw}+0.00674WSV_{grw}-1.0737}$$
(4-10)  

$$r^{2} = 0.63$$
(4-10)  

$$r^{2}$$

 Imgew
 mittlere Hangneigung [\*], gewichtet

 Oedgew
 Ödlandanteil [%], gewichtet

WSV<sub>gew</sub> mittleres Wasserspeicherungsvermögen [mm], gewichtet

In Tabelle 4-3 ist die Güte des Modells "Momente" dokumentiert. Für die 100jährlichen Hochwasserspitzen liegt die Trefferwahrscheinlichkeit – je nach Vergleichswerten – bei 55% bzw. 65%. Naef (1983) weist für das Momenten-Modell von Sydler, Widmoser und Zollinger (1982) für ein 20jährliches Hochwasser eine Trefferwahrscheinlichkelt von 58% aus; die entsprechende Trefferwahrscheinlichkeit für das Modell "Momente" beträgt 66%. Dies belegt, dass durch die Bereitstellung neuer, prozessorientierter Gebietskenngrössen die Modellgüte verbessert werden konnte.

Mit dem Modell "Momente" erreicht man ein leicht besseres Ergebnis als mit einem Regressionsmodell, bei dem das 100jährliche Hochwasser aus der relativ beitragenden Fläche und weiteren Gebletskenngrössen abgeschätzt wird (Modell "Regression", Düster 1994):

$$HQ_{100} = Fn_{Nll}^{0.7834} \cdot 10^{0.0384} \sqrt{N_{yrr} + 0.00693VSV_{yrr} - 1.0959}$$
(4-11)

| HQ100              | 100jährliches Hochwasser [m³/s]                      |
|--------------------|------------------------------------------------------|
| Fnbeitr            | beitragende Fläche [km²]                             |
| Ngew               | Jahresniederschlag [mm], gewichtet                   |
| WSV <sub>gew</sub> | mittleres Wasserspeicherungsvermögen [mm], gewichtet |

Tabelle 4-3: Beurteilung der Modelle "Momente" und "Regression" anhand einer Abschätzung der 100jährlichen Spitzenabflüsse in 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km² (Erläuterungen zur Beurteilungstabelle s. Kap. 4.3.1)

Table 4-3: Assessment of the models "Momente" and "Regression", based on the estimate of a 100-year peak flow from 69 catchments with areas between 10 and 100 km<sup>2</sup>

| A CONTRACTOR OF A CONTRACT OF | Lange - | Modell "I | Nomente"   |       | Modell "Regression" |      |          |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------|------------|-------|---------------------|------|----------|-------|
| Güteklasse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ① (LHG) |           | Ø (Gumbel) |       | ① (LHG)             |      | (Gumbel) |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | h (%)   | Σ[%]      | h [%]      | Σ [%] | h [%]               | Σ[%] | h (%)    | Σ [%] |
| exakt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 13.0    | 13.0      | 17.4       | 17.4  | 17.4                | 17.4 | 18.8     | 18.8  |
| genügend                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 42.1    | 55.1      | 47.8       | 65.2  | 31.9                | 49.3 | 39.2     | 58.0  |
| ungenau                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 27.5    | 82.6      | 23.2       | 88.4  | 30.4                | 79.7 | 21.7     | 79.7  |
| unbrauchbar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 17.4    | 100       | 11.6       | 100   | 20.3                | 100  | 20.3     | 100   |

D Vergleich der modellierten Werte mit den von der Landeshydrologie und -geologie (Aschwanden und Spreafico 1995) publizierten Werten

Ø Vergleich der modellierten Werte mit den mittels der Gumbel-Vertellung zeitlich extrapolierten Werten

h Prozentsatz der Realisierungen in einer Güteklasse

*S* Summenhäufigkeit

Der wesentliche Vorteil des Weges über die Momentenschätzung liegt in der Flexibilität des Verfahrens, welche es erlaubt, Hochwasser verschiedener Jährlichkeiten abzuschätzen. Das Modell "Regression" ermöglicht nur eine Abschätzung 100jährlicher Hochwasser; es ist wie das Modell "Momente" auf Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 200 km<sup>2</sup> ausgerichtet.

# 4.3.5 Das Laufzeltverfahren als einfaches Konzeptmodell (Modelle "Kölla" und "Kölla<sub>mod</sub>")

Das Laufzeitverfahren, das sich in der Kanalisationstechnik bewährt hat, ist auch in der Hydrologie sehr beliebt. Den vielen Varianten des Verfahrens gemeinsam ist die Vorstellung der sogenannten Konzentrations- oder Anlaufzeit; sie basiert auf der anschaulichen Annahme, dass der Hochwasserabfluss – bei konstanter Regenintensität – dann maxImal ist, wenn das gesamte Einzugsgebiet bzw. dessen hochwasserrelevanten Teile zum Abfluss beitragen. Gegenüber den oben erwähnten Modellen hat das deterministisch ausgelegte Laufzeitverfahren den Vorteil, dass es die Inputgrösse Niederschlag explizit mitberücksichtigt. Die einfachste Form der Abschätzung einer Hochwasserspitze mit dem Laufzeitverfahren bildet das Produkt aus Niederschlagsintensität, Abflussbeiwert und Gebietsfläche (Rationa) Formula):

$$HQ_x = r_x(t_c) \cdot \psi_s \cdot Fn \tag{4-12}$$

| x-jährlicher Spitzenabfluss                      |
|--------------------------------------------------|
| x-jährliche Niederschlagsintensität der Dauer ta |
| Konzentrationszeit des Einzugsgebietes           |
| Spitzenabflussbeiwert                            |
| Gebietsfläche                                    |
|                                                  |

Nach Kringold (zit. in Chow 1964) müssen zur Anwendung der Rational Formula die folgenden, allerdings nicht unbestrittenen Bedingungen erfüllt sein:

- die Jährlichkelt des verursachenden Regens und des Hochwasserspitzenabflusses sind gleich;
- der Abflussbeiwert ist von der Regenintensität sowie von der Jährlichkeit des Ereignisses unabhängig.

In der bemerkenswerten Arbeit von Kölla (1986), welche die Hochwasserabschätzung in der Schweiz massgeblich beeinflusste, wurde die Rational Formula weiterentwickelt zu (Modell "Kölla"):

$$HQ_{x} = (r_{x}(l_{c(x)}) + r_{s} - f_{x}) \cdot (FL_{eff(x)} + FL_{b}) \cdot k_{gong} \cdot \frac{1}{3.6} + Q_{vgl(x)}$$
(4-13)

| rNiederschlagsIntensität [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] $f$ Verluste [mm/h] $FL_{eff}$ beitragende Flächen <sup>11</sup> [km²] $FL_b$ versiegelte Flächen [km²] $k_{gong}$ beschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-<br>$Q_{vgl}$ $Q_{vgl}$ Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>Wiederkehrperiode | HQ                    | Spitzenabfluss [m³/s]                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $t_c$ 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] $f$ Verluste [mm/h] $FL_{eff}$ beitragende Flächen <sup>11</sup> [km²] $FL_b$ versiegelte Flächen [km²] $k_{gong}$ beschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-<br>$Q_{vgl}$ $Q_{vgl}$ Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>Wiederkehrperiode                                                                   | r                     | Niederschlagsintensität [mm/h] eines Blockregens der Dauer te                                                                                  |
| 1,       Benetzungszeit [h]         1,       Benetzungszeit [h]         1,       Laufzeit im Gerinne [h]         rs       Schmelzwasseräquivalent der Schneedecke [mm/h]         f       Verluste [mm/h]         FLegr       beitragende Flächen <sup>11</sup> [km²]         FLb       versiegelte Flächen [km²]         kgong       beschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-         Qvgl       Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]         x       Wiederkehrperiode          | l <sub>c</sub>        | Konzentrationszeit [h] mit $t_c = t_1 + t_2$                                                                                                   |
| t_2Laufzeit im Gerinne [h]r_sSchmelzwasseräquivalent der Schneedecke (mm/h]fVerluste [mm/h]FL_{eff}beitragende Flächen <sup>11</sup> [km²]FLbversiegelte Flächen [km²]kgongbeschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-<br>QvglQvglAbfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>Wiederkehrperiode                                                                                                                                                                                      | 1,                    | Benetzungszeit [h]                                                                                                                             |
| rsSchmelzwasseräquivalent der Schneedecke (mm/h)fVerluste (mm/h)FLeffbeitragende Flächen <sup>11</sup> [km²]FLbversiegelte Flächen [km²]kgongbeschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [- $Q_{vgl}$ Abfluss aus den vergletscherten Tellen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>x                                                                                                                                                                                                                                     | 12                    | Laufzeit im Gerinne [h]                                                                                                                        |
| fVerluste [mm/h]FLeffbeitragende Flächen <sup>11</sup> [km²]FLbversiegelte Flächen [km²]kgangbeschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-<br>Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>xQvglAbfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]                                                                                                                                                                                                                       | r <sub>s</sub>        | Schmelzwasseräquivalent der Schneedecke (mm/h)                                                                                                 |
| FLegrbeitragende Flächen <sup>11</sup> [km²]FLbversiegelte Flächen [km²]kgongbeschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-<br>QvglQvglAbfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>Wiederkehrperiode                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ſ                     | Verluste [mm/h]                                                                                                                                |
| $FL_b$ versiegelte Flächen [km²] $k_{gong}$ beschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-<br>$Q_{vgl}$ $Q_{vgl}$ Abfluss aus den vergletscherten Tellen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | FLeft                 | beitragende Flächen'' [km²]                                                                                                                    |
| kgongbeschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung ein<br>Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [-<br>Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>xXWiederkehrperiode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | FL                    | versiegelte Flächen [km²]                                                                                                                      |
| $Q_{vgl}$ Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m <sup>3</sup> /s]<br>$\tilde{x}$ Wiederkehrperiode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $k_{gang}$            | beschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung einer<br>Niederschlagsganglinie anstelle elnes Blockregens entstehen würde [-] |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Q <sub>vgl</sub><br>x | Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]<br>Wiederkehrperiode                                                         |

Die Formel 4-13 lässt sich wie folgt in Worte fassen: "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" (Kölla 1986). Grundlegende Merkmale des Ansatzes sind:

- Das Verfahren basiert auf dem Konzept der beitragenden Flächen (vgl. Kapitel 2.3.1), das heute weitgehend akzeptiert ist. Es versucht – ähnlich wie das später diskutierte Modell "Fuzzy" – trotz oder gerade wegen seiner mesoskaligen Ausrichtung – eine gewisse Prozessnähe zu erreichen.
- Die Abschätzformel verwendet den Abflussbeiwert nicht explizit; implizit wird er allerdings über die Ausdehnung der beitragenden Flächen berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.5.4 b).
- Mehrere Parameter sind von der J\u00e4hrlichkeit des Ereignisses abh\u00e4ngig; so nimmt be\u00e4spielsweise die Gr\u00f6sse der beitragenden Fl\u00e4chen mit zunehmender J\u00e4hrlichkeit zu.
- Das Modell "Kölla" erlaubt primär Abschätzungen von 20jährlichen Spitzenabflüssen in 1 bis 100 km<sup>2</sup> grossen Einzugsgebieten. Überdies bestehen Extrapolationsmöglichkeiten auf ein 2.33jährliches und ein 100jährliches Hochwasser.

Als Grundlagen zur Anwendung des Modells "Kölla" werden benötigt:

- Landeskarte 1:25'000 zur Bestimmung der Gerinnelänge (L) und davon abgeleitet der beitragenden Flächen (FL<sub>eff</sub>) und der Laufzeit im Gerinne (t<sub>2</sub>) sowie zur Bestimmung der vergletscherten (FL<sub>vgf</sub>) und versiegelten (FL<sub>b</sub>) Flächen;
- Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000 (EJPD 1980) zur Ermittlung der relevanten Bodengesellschaft, welche für die Bestimmung des zur Deckung der Sättigungsdefizite erforderlichen Regenvolumens (v<sub>o</sub>) und der Verluste (f) benötigt wird (Tabelle 4-4);

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Zur Unterscheidung der beiden in dieser Arbeit diskutierten Verfahren zur Berechnung der Ausdehnung der beitragenden Flächen werden unterschiedliche Abkürzungen verwendet:

FL<sub>en</sub> Beitragende Flächen berechnet nach Kölla (1986)

Fnbor GIS-gestützte Berechnung gemäss Kapitel 2.3

 Niederschlags-Intensitäts-Diagramme (Zeller, Geiger, Röthlisberger 1976–1992, Geiger et al. 1992) zur Ableitung der massgebenden Regenintensität in Funktion der Benetzungszeit (t,) und der Laufzeit im Gerinne (t<sub>2</sub>).

Tabelle 4-4: Grundlagen zur Anwendung des Modells "Kölla": Bestimmung des erforderlichen Regenvolumens (v<sub>o</sub>) und der Verluste (/) für 2.33-, 20- und 100jährliche Ereignisse (aus Kölla 1986)

Table 4-4: Essential elements for the application of the "Kölla" model: determination of the required rainfall volume ( $v_o$ ) and losses (f), for different return periods

| Landschafts^                                                            | Alı<br>krisc<br>Be<br>Landsc | pine<br>alline<br>trg-<br>thaften | Alg<br>Ka<br>Be<br>Landso | olne<br>)k-<br>rg-<br>chaften | Flys<br>Bûnd<br>schie<br>Tandso | sch-/<br>Iner-<br>efer-<br>shaften | Voral<br>Ragel<br>Jandsci | Dine<br>flun-<br>haften | Mola<br>Landsc<br>di<br>Mittel | assé-<br>chaí ten<br>es<br>Tandes | Jui<br>Kal<br>Landsc | ra-<br>Ik-<br>haf ten |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| charakteristik                                                          | Standard                     | 7rogtåler mit<br>Talschotter      | Standard                  | 7rogtäler mit<br>Talschotter  | Standard                        | Trogtaler mit<br>Talschotter       | Scandard                  | Sonlentäler             | Slandard                       | Sahlentbler                       | Standard             | 50hlantë ler          |
| Bodenkarte                                                              | V,¥                          | R,Y<br>(V8,WB)                    | U                         | R,Y<br>(U8)                   | 2<br>(T)                        | R,Y<br>(9)                         | N.N,O,<br>P,X,(G)         | 8,Y<br>(0)              | б,Я,<br>К,L                    | G1.H4.<br>J1,0                    | A,B,C,<br>D,E        | B2,B5                 |
| BASISWERT                                                               | Ε                            | В                                 | С                         | В                             | D                               | В                                  | С                         | B                       | D                              | В                                 | С                    | В                     |
| Tiefgründigare<br>Böden (starke<br>Bæwsldung o.š.)                      | F                            | с                                 | D                         | с                             | D                               | с                                  | С                         | С                       | D                              | С                                 | D                    | с                     |
| Flachgründigere<br>Bäden (oberflä-<br>chennine Slau-<br>schichten 0.8.) | D                            | В                                 | B                         | в                             | 8                               | в                                  | B                         | в                       | D                              | в                                 | с                    | B                     |
| Starkes Relief                                                          | E                            | В                                 | с                         | 8                             | с                               | в                                  | B                         | в                       | С                              | в                                 | B                    | ₿                     |
| Scimaches Reliser                                                       | E                            | B                                 | с                         | в                             | D                               | B                                  | D                         | 8                       | E                              | в                                 | с                    | в                     |
| FLerr hauptsäch-<br>lich in der Hähe<br>des Vorfluters                  | в                            | A                                 | B                         | A                             | Ð                               | A                                  | С                         | B                       | D                              | A                                 | с                    | А                     |

J.

|   | V <sub>e(2.33)</sub> [mm] | 1210 [mm/h] | V <sub>e(20)</sub> [mm] | f <sub>20</sub> [mm/h] | V <sub>e(100)</sub> [mm] | 1100 [mm/h] |
|---|---------------------------|-------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------|
| A | 10                        | 1.0         | 20                      | 2.0                    | 26                       | 2.6         |
| В | 12.5                      | 1.25        | 25                      | 2.5                    | 32.5                     | 3.25        |
| С | 15                        | 1.5         | 30                      | 3.0                    | 39                       | 3.9         |
| D | 17.5                      | 1.75        | 35                      | 3.5                    | 45.5                     | 4.55        |
| ε | 20                        | 2.0         | 40                      | 4.0                    | 52                       | 5.2         |
| ۶ | 22.5                      | 2.25        | 45                      | 4.5                    | 58.5                     | 5.85        |

Eine Schlüsselgrösse im Verfahren von Kölla stellt das erforderliche Benetzungsvolumen bzw. das erforderliche Regenvolumen  $v_o$  dar<sup>12</sup>: "Weil für sämtliche Hochwasserabflussvorgänge unabhängig von der Regenintensität im weiteren Sinne Speicherdefizite gefüllt werden müssen, damit ein Spitzenabfluss zustande kommt, besteht die Bedingung, dass das Regenereignis solange dauert, bis das erforderliche Regenvolumen [ $v_o$ ] gefallen ist und das schliesslich abfliessende Regenwasser den Kontrollquerschnitt im Hauptgerinne erreicht hat. Die massgebende Regendauer  $t_c$  setzt sich deshalb aus einer Benetzungszeit ("Füllzeit")  $t_r$  und einer effektiven Fliesszeit im Gerinne  $t_2$  zusammen" (Kölla 1986). Wie bereits erwähnt, kann  $v_o$  aus der Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000 abgeleitet werden. Die entsprechenden Entscheldungsgrundlagen sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Die Erfahrung zeigt, dass bei der Zuordnung eines Einzugsgebietes zu einer Klasse (A, B, ..., F) – und damit bei der Ermittlung der beiden Parameter  $v_o$  und f – ein grosser Freiraum besteht: In welchen Fällen soll der Basiswert übernommen werden, in welchen Fällen drängen sich alternative Zuordnungen auf? Was

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Kölla (1986) verwendet die beiden Begriffe "erforderliches Benetzungsvolumen" und "erforderliches Regenvolumen" synonym.

versteht man unter einem "starken Relief", was unter einem "schwachen Relief"? Sind in einem Einzugsgebiet mehrheitlich "flachgründigere" oder "tiefgründigere Böden" anzutreffen? Welches ist der Schwellenwert zwischen beiden Gruppen? Bereits diese Fragen verdeutlichen, dass bei der Hochwasserabschätzung nach dem Modell "Kölla" subjektive Entscheide zu treffen sind, so dass das Ergebnis der Abschätzung je nach Anwenderin oder Anwender differiert. Oftmals ist es auch schwierig, ein mesoskaliges Einzugsgebiet, das eine recht grosse interne Heterogenität aufweisen kann, einer einzigen Klasse zuzuordnen.

Wegen dieser subjektiven Komponente ist es nicht möglich, das Modell "Kölla" abschliessend zu beurteilen. Um eine grobe Modellbeurteilung zu erhalten, wurden die Abschätzungen mit den in der Tabelle 4-4 vorgeschlagenen Basiswerten durchgeführt. Das Ergebnis in Tabelle 4-5 zeigt allerdings, dass es nicht sinnvoll ist, mit diesen Basiswerten zu operieren.

Zur Objektivierung des methodisch interessanten Verfahrens von Kölla schlagen wir deshalb eine neue, GIS-gestützte Vorgehensweise zur Bestimmung von  $v_o$  vor (Modell "Kölla<sub>mod</sub>", Manser 1996). Sie basiert auf der Annahme, dass das erforderliche Benetzungsvolumen  $v_o$  mit zunehmender Bodentiefe grösser wird. Die Bodentiefe wird nach dem in Kapitel 2.3.3 vorgestellten prozessorientierten Ansatz aus der digital vorliegenden Bodeneignungskarte der Schweiz (1:200'000) bestimmt. Die derart objektiv ermittelte Bodentiefe wird anschliessend in den von Kölla für  $v_o$  aufgespannten Wertebereich (vgl.Tabelle 4-4) umgerechnet:

$$v_{o_{2,11}} = 8.75 + 0.1125 \cdot soil_{gev} \tag{4-14}$$

$$v_{o_{20}} = 17.5 + 0.225 \cdot soil_{gew} \tag{4-15}$$

$$v_{o_{100}} = 22.75 + 0.2925 \cdot soil_{gew} \tag{4-16}$$

voerforderliches Benetzungsvolumen [mm]soilgewBodentiefe [cm], gewichtet (Berechnung nach Formel 2-11)

Die Objektivierung des Verfahrens muss allerdings mit einem beträchtlichen Mehraufwand gegenüber dem originalen Modell erkauft werden (Digitalisierung des Gewässernetzes, GIS-Einsatz). Zusätzlich wird im modifizierten Verfahren "Kölla<sub>mod</sub>" ein Abminderungsfaktor des Niederschlags eingeführt. Dieser Faktor erhält aufgrund der Resultate der Modelleichung einen Wert von 0.7. Er lässt sich mit der Abnahme des Niederschlags vom Punkt zur Fläche begründen (vgl. Grebner, Roesch und Schwarb 1999).

Tabelle 4-5: Beurteilung der Modelle "Kölla-Basiswerte" und "Kölla<sub>mod</sub>" anhand einer Abschätzung der 100jährlichen Spitzenabflüsse in 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km² (Erläuterungen zur Beurteilungstabelle s. Kap. 4.3.1)

Table 4-5: Assessment of the "Kölla" models using basic values ("Kölla-Basiswerte") and a modified Kölla model ("Kölla<sub>mod</sub>"), based on 100-year peak flow estimates from 69 catchments with areas between 10 and 100 km<sup>2</sup>

|             | M       | odell "Kölla | a-Basiswer | le"   |         | Modell , | Kölla <sub>med</sub> " | enere and |
|-------------|---------|--------------|------------|-------|---------|----------|------------------------|-----------|
| Güteklasse  | O (LHG) |              | Ø (Gumbel) |       | ① (LHG) |          | @ (Gumbel)             |           |
|             | h [%]   | Σ [%]        | h [%]      | Σ [%] | h (%)   | Σ [%]    | h [%]                  | Σ[%]      |
| exakt       | 10.1    | 10.1         | 7.2        | 7.2   | 8.7     | 8.7      | 14.5                   | 14.5      |
| genügend    | 17.4    | 27.5         | 18.9       | 26.1  | 40.6    | 49.3     | 39,1                   | 53.6      |
| ungenav     | 26.1    | 53.6         | 29.0       | 55.1  | 24.6    | 73.9     | 29.0                   | 82.6      |
| unbrauchbar | 46.4    | 100          | 44.9       | 100   | 26.1    | 100      | 17,4                   | 100       |

D Vergleich der modellierten Werte mit den von der Landeshydrologie und -geologie (Aschwanden und Spreafico 1995) publizierten Werten

D Vergleich der modellierten Werte mit den mittels der Gumbel-Verteilung zeitilch extrapolierten Werten

h Prozentsatz der Reallsierungen in einer Güteklasse

 $\mathcal{E}$  Summenhäufigkeit

Die Trefferwahrscheinlichkeit des Modells "Köllamod" liegt bei rund 50% (Tabelle 4-5). Somit ist in etwa der Hälfte der Fälle mit einer genügenden bls exakten Abschätzung zu rechnen.

Abschliessend werden die beiden Varianten "Kölla" und "Kölla<sub>mod</sub>" am Beispiel einer Abschätzung des 20jährlichen Spitzenabflusses des Taschinasbachs in Seewis (Gebietsfläche 47.7 km<sup>2</sup>, Kt. Graubünden) einander gegenübergestellt. Beim Symbol "*e*s" werden die in den einzelnen Arbeitsschritten berechneten Werte ausgewiesen.

| Modell "Kõlla"                                                                                                                                                                                                                                 | Modell "Kõlla <sub>mod</sub> "                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bereitstellung der                                                                                                                                                                                                                             | Datengrundlagen                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Landeskarte 1:25'000:<br>Kartierung der vergletscherten ( $FL_{vgl}$ ) und versie-<br>gelten Flächen ( $FL_b$ ); Bestimmung der Länge der<br>perennierenden und der bei Hochwasser wasser-<br>führenden Gerinne (Gerinnelänge L)               | Landeskarte 1:25'000, digitale Bodeneignungs-<br>karte:<br>Digitalisierung des Gewässernetzes, der Ge-<br>bietsgrenzen und der vergletscherten Flächen;<br>GIS-gestützte Bestimmung der verslegelten Flä-<br>chen                                                                               |
| $\not \!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!$                                                                                                                                                                | $\mathscr{K}$ : $FL_{vgl} = 0$ , $FL_b = 0$ , $L = 117.7$ km                                                                                                                                                                                                                                    |
| Für die Abflussspende vergletscherter Gebiete $(q_{vgl}$<br>gende Richtwerte:<br>$-q_{vgl(k<20)} \approx 0.35 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ,<br>$-q_{vgl(k\geq20)} \approx 0.4$ bis $0.5 \text{ m}^3/\text{s km}^2$                              | ) gelten in Abhängigkeit der Jährlichkeit <i>x</i> fol-                                                                                                                                                                                                                                         |
| $\mathscr{A}: Q_{vg'} = 0 \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Nach Kölla (1986) besteht zwischen der Gerinne-<br>länge ( $L$ [km]) und der zu einem 20jährlichen<br>Hochwasser beitragenden Fläche ( $FL_{eff (20)}$ [km <sup>2</sup> ])<br>folgender Zusammenhang:<br>$FL_{eff (20)} = 0.12 \cdot L^{1.07}$ | Digitales Geländemodell RIMINI, digitales Ge-<br>wässernetz 1:25'000, digitale Gebietsgrenzen:<br>Prozessorientierte Ableitung der beitragenden<br>Flächen ( <i>Fn<sub>betr</sub></i> ) und Beurteilung der Hoch-<br>wasserrelevanz der Teilflächen des Einzugsge-<br>bietes gemäss Kapitel 2.3 |
|                                                                                                                                                                                                                                                | $\mathscr{K}$ : $Fn_{beitr} = 21.17  \mathrm{km}^2$                                                                                                                                                                                                                                             |
| Die totale Fliesszeit im Gerinne $t_2$ [h] lässt sich –<br>in Abhängigkeit der betrachteten Jährlichkeit –<br>berechnen zu:<br>$t_{2(20)} = FL_{ell(20)}^{0.2}$                                                                                | Die totale Fliesszeit im Gerinne $t_2$ [h] wird in<br>Anlehnung an Kölla (1986) wie folgt<br>berechnet:<br>$t_{2(20)} = (0.12 \cdot L^{107})^{0.2}$                                                                                                                                             |
| $\frac{45}{2} t_{2(20)} = 1.81 \text{ h}$                                                                                                                                                                                                      | $\swarrow t_{2(20)} = 1.81 \text{ h}$                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Bodeneignungskarte 1:200'000:<br>Zuordnung zu einer Bodengesellschaft; Ableitung<br>des erforderlichen Benetzungsvolumens ( $v_{o(20)}$ )<br>und der Verluste ( $f_{20}$ ) (s. Tabelle 4-4)                                                    | Digitale Bodeneignungskarte:<br>GIS-gestützte, prozessorientierte Berechnung<br>der mittleren Bodentiefe ( <i>soil<sub>gew</sub></i> ) mit den in Kap.<br>2.3.3 vorgestellten Algorithmen und Berechnung<br>von $v_{o(20)}$ nach Formel 4-15; es gilt $f = 0.1 \cdot v_o$                       |
| ✓ Der Taschinasbach wird den "Flysch-,<br>Bündnerschieferlandschaften mit starkem Relief"<br>zugeordnet (Klasse C)<br>$\Rightarrow V_{o(20)} = 30$ mm, $f_{20} = 3$ mm/h                                                                       | $\mathcal{K}$ soil <sub>gew</sub> = 38.61 cm $\Rightarrow v_{o(20)} = 25.7$ mm,<br>$f_{20} = 2.6$ mm/h                                                                                                                                                                                          |

| Modell "Kölla"                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Modell "Kölla <sub>mod</sub> "                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Berücksichtigung der Stark                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | niederschlagsverhältnisse                                                                                                                                                                                                           |
| Die Konzentrationszeit <i>t<sub>c</sub></i> setzt sich aus der Benetzu<br>zusammen. Die zu einer bestimmten Niederschlags<br>wird iterativ aus einem für das Einzugsgebiet mögli<br>Diagramm hergeleitet, wobei folgende Bedingunge                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ungszeit $t_r$ und der totalen Fliesszeit im Gerinne $t_2$<br>sdauer gehörende Niederschlagsintensität (r)<br>ichst repräsentativen Niederschlags-Intensitäts-<br>en erfüllt sein müssen: $t_1 \cdot r = v_0$ und $t_0 = t_1 + t_2$ |
| Niederschlags-Intensitäts-Diagramm der Station<br>Seewis:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Niederschlags-Intensitäts-Diagramm der Station<br>Seewls:                                                                                                                                                                           |
| $\swarrow$ iterative Berechnung, erster Versuch:<br>$t_{2(20)} = 1.81$ h, $t_{c(20)}$ (geschâtzt) = 4 h,<br>$t_{1(20)} = t_{c(20)} - t_{2(20)} = 2.19$ h                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                     |
| Aus dem Niederschlags-Intensitäts-Diagramm<br>erhält man bei einer Jährlichkeit von 20 Jahren<br>und einer Niederschlagsdauer von 4 h eine Re-<br>genintensität $r_{20}$ von 16 mm/h. Daraus ergibt sich<br>ein erster Wert für $v_{o(20)}$ von 35 mm. Das oben<br>ausgewiesene erforderliche Benetzungsvolumen<br>beträgt aber nur 30 mm. In weiteren Berech-<br>nungsschritten wird dieser Wert angenähert; die<br>optimale Variante beinhaltet folgende Parameter:<br>$t_{r(20)} = 1.68$ h, $t_{2(20)} = 1.81$ h,<br>$t_{c(20)} = 3.5$ h, $r_{20} = 18$ mm/h |                                                                                                                                                                                                                                     |

### Zusätzliche Parameter

Das Schmelzwasseräquivalent  $r_s$  muss in der alpinen Zone nicht berücksichtigt werden. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt  $k_{gang}$ ; der abflusserhöhende Effekt einer Regenganglinie kommt nach Kölla (1986) nur bei Gebieten < 10 km<sup>2</sup> und bei einer Niederschlagsdauer < 3 h zum Tragen

|                                                    | Berücksichtigung des Abminderungsfaktors für<br>den Gebietsniederschlag von 0.7 |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Einsetzen der Parameter in                         | n die Abschätzformel 4-13                                                       |
| <i>⊠ HQ</i> <sub>20</sub> : 82.1 m <sup>3</sup> /s | ∠ HQ <sub>20</sub> : 66.9 m³/s                                                  |

Der aus der 12jährigen Messreihe (1960–1971) extrapolierte 20jährliche Abfluss liegt im Bereich von 57 m<sup>3</sup>/s (Gumbel-Verteilung) bis 61 m<sup>3</sup>/s (Vergleichswert der LHG). Somit erhalten wir beim Modell "Kölla" eine genügende, beim Modell "Kölla" eine genügende bis exakte Übereinstimmung zwischen dem Vergleichswert und dem modellierten Wert.

# 4.4 Regional-taxonomische Verfahren

Die Abschätzung seltener Hochwasser über klassierte Einzugsgebiete ist ein häufig gewählter Ansatz. Dieses Vorgehen wurde erstmals von Dahymple (1960) beschrieben und daraufhin in einer Reihe von Untersuchungen angewandt. Das Ziel regional-taxonomischer Verfahren ist es, ähnliche Einzugsgebiete zu homogenen Klassen zusammenzufassen. In homogenen Klassen sind die Hochwasserkennwerte der einzelnen Einzugsgebiete durch repräsentative klassenspezifische Kennwerte ersetzbar (vgl. Abbildung 3-6). Die grundlegende Problematik dieses Ansatzes liegt in der Suche nach homogenen Hochwasserklassen bzw. -regionen oder Raumtypen:

• Im Flood Studies Report (NERC 1975) wurden Einzugsgebiete, die in derselben geographischen Region liegen, zu Klassen zusammengefasst. Dies setzt allerdings voraus, dass elne geographi-

sche Region auch im hydrologischen Sinn homogen ist, was nach unseren Erfahrungen eher seiten der Fall ist.

- Acreman und Sinclair (1986) führten zur Identifikation homogener Klassen eine Clusteranalyse auf der Basis hydrologisch relevanter Gebietskenngrössen durch.
- Mosley (1981) verwendete zur Klassifikation neuseeländischer Einzugsgebiete vor allem Hochwasserkennwerte.

Diese drei Arbeiten vermitteln einen guten Überblick über die in zahlreichen Untersuchungen verfolgten Lösungsansätze.

In der Schweiz wurden nur sehr wenige regional-taxonomisch orientierte Analysen durchgeführt: Bruschin und North (1977) veröffentlichten einen an der Index-Flood-Methode orientierten Ansatz, der auf zwei Parametern aufbaut: Für den ersten Parameter, das 2jährliche Hochwasser ( $HQ_2$ ), wurden für sechs unterschiedliche Regionen der Schweiz Diagramme entwickelt, welche es ermöglichen, das  $HQ_2$  in Funktion der Gebietsfläche herauszulesen. Der zweite Parameter ist der sogenannte Varianzindex, der dem Verhältnis zwischen dem 10- und dem 2jährlichen Hochwasser entspricht; der Varianzindex wurde kartiert. Die beiden Parameter sind allerdings nur für etwa zwei Drittel der Fläche der Schweiz definiert. Im restlichen Drittel ist die Wertestreuung so gross, dass keine Regionen ausgewiesen werden konnten. Auf zwei weitere Problempunkte dieses Verfahrens weisen Naef (1983) und Düster (1994) hin:

- Die Anwendung in Einzugsgebieten kleiner 100 km² führt zu Werten, die systematisch zu klein sind;
- das Modell von Bruschin und North basiert hauptsächlich auf 2- und 10jährlichen Hochwassern; es ist deshalb für den Bereich seltener Hochwasser mit Jährlichkeiten von mehr als etwa fünfzig Jahren nur bedingt anwendbar. Dieser Problempunkt gilt folgerichtig auch für viele andere Verfahren, die ebenfalls auf der Grundlage eher kurzer Messreihen entwickelt wurden.

Zudem zelgt Düster (1994), dass der Variationskoeffizient der Jahreshochwasserspitzen (s(HQ)/mHQ) und damit vermutlich auch der Varianzindex  $HQ_{10}/HQ_2$  nicht regionalisierbar sind, "was auf den dominanten Einfluss eines nicht regionalisierbaren Faktors schliessen lässt."

Mit den Untersuchungen von Kölla (1986) und Breinlinger (1995) lassen sich weitere grundsätzliche Probleme einer hochwasserhydrologisch motivierten räumlichen Taxonomie schweizerischer Einzugsgebiete aufzeigen:

- Kölla (1986) gelangt auf der Basis einer Kartierung der 20jährlichen Spitzenabflüsse von rund 200 Einzugsgebieten zum Schluss, dass in der Schweiz keine Hochwasserregionen im engeren Sinne erkennbar sind: "Die kleinräumig grossen Unterschiede sprechen dafür, dass sich offenbar zumindest für kleine Einzugsgebiete keine Regionen gleichen spezifischen Abflusses bilden lassen.
   [..] Die Kennwerte der einzelnen Einzugsgebiete scheinen den Hochwasserabfluss massgebend zu beeinflussen, was heisst, dass eine Hochwasser-Schätzmethode, die sich auf eine Regionalisierung abstützt, nicht zu einem zufriedenstellenden Resultat führen kann."
- Trotz einer umfassenden Bereitstellung von invarianten Gebietskenngrössen (vgl. Tabelle 2-1) ist es Breinlinger nicht gelungen, die Basisgebiete der Schweiz aus der Sicht des Hochwasserverhaltens sinnvoll zu klassieren. Im Gegensatz zur Mittelwasservariante, die in Kapitel 3.2 dokumentiert ist, liessen sich keine klassenspezifischen Richtwerte ableiten.

Diese beiden Beispiele belegen, dass der in Abbildung 3-6 skizzierte Weg Klassifikationsverfahren ⇔ Raumtypen/Regionen ⇔ Übernahme klassenspezifischer hydrologischer Kennwerte im Hochwasserbereich bisher eher selten zum Erfolg führte. Dank einer umfassenden Bereitstellung von Gebietskenngrössen, dank interessanter "neuer" Methoden und EDV-gestützter Werkzeuge (Geographische Informationssysteme) hat sich die Ausgangslage zur Anwendung taxonomischer Ansätze in den letzten Jahren jedoch wesentlich verbessert; deshalb haben wir uns in der Berner Gruppe für Hydrologie entschlossen, neben der bereits zitierten Arbeit von Breinlinger weitere Analysen in diesem methodischen Umfeld durchzuführen (Düster 1994: Modell "Fuzzy"; Kan 1995; Arbeiten des Autors: Modell "GIUB"). Die Ergebnisse dieser neuesten regional-taxonomischen Untersuchungen werden in den Kapiteln 4.4.1 und 4.4.2 zusammenfassend dargestellt.

# 4.4.1 Ein regional-taxonomisch begründetes Abschätzverfahren für seitene Hochwasser (Modell "Fuzzy")

#### a) Bereitstellung von Gebietskenngrössen

Ein grundlegender erster Schritt in der Entwicklung des neuen Hochwasserabschätzverfahrens für Einzugsgebiete zwischen 10 und 200 km<sup>2</sup> bestand in der GIS-gestützten, prozessorientierten Bereitstellung von Gebietskenngrössen, welche sich wesentlich von den konventionell erhobenen unterscheiden. Dieser erste Teilschritt des Modells "Fuzzy" ist in Kapitel 2.3 ausführlich beschrieben.

#### b) Klassifikationsschritt

Ein Hochwasser mit einer Jährlichkeit von T-Jahren ( $HQ_T$ ) lässt sich über die hydrologische Grundgleichung bestimmen (Formel 4-2). Diese Grundgleichung besteht aus dem Mittelwert (mHQ) und der Standardabweichung (s(HQ)) der Jahreshochwasserspitzen und einem von der Verteilungsfunktion und der Jährlichkeit T abhängigen Koeffizienten  $K_T$ . Soll ein Hochwasser einer bestimmten Jährlichkeit abgeschätzt werden, müssen Mittelwert und Standardabweichung bekannt sein. Zur Entwicklung und Eichung des regionalhydrologischen Hochwassermodells standen rund neunzig Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 200 km<sup>2</sup> zur Verfügung. Analysen haben gezeigt, dass die Hochwasserreihen dieser Gebiete mit der Gumbel-Verteilung zufriedenstellend angepasst werden können. Deshalb kann  $K_T$  nach Chow (1953) wie folgt berechnet werden:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{3.1415} \left( 0.5772 + \ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) \right)$$
(4-17)

T Jährlichkeit

Eine hochwasserhydrologisch homogene Klasse zeichnet sich nun dadurch aus, dass die Verteilungsfunktionen ihrer Einzugsgebiete im statistischen Sinn mit der repräsentativen klassenspezifischen Verteilungsfunktion identisch sind. Die Unterschiede der einzelnen Hochwasserreihen zur repräsentativen Verteilungsfunktion dürfen nur zufallsbedingt sein. Zur Ermittlung homogener Klassen eignet sich der Kolmogorov-Smirnov-Test, mit dem die Güte der Anpassung einer Stichprobe an eine theoretische Verteilungsfunktion geprüft werden kann (Sachs 1992). Das Klassifikationsverfahren von Düster (1994) geht von einem zweidimensionalen Datenraum aus, der vom Mittelwert (*mHq*) und von der Standardabweichung der Abflussspenden der Jahreshochwasserspitzen (*s*(*Hq*)) aufgespannt wird. Es lässt sich in Anlehnung an Abbildung 4-13 prinzipiell in folgende Arbeitsschritte gliedern:

- Den Ausgangspunkt für die Klassifikation bildet jene Hochwassermessreihe, deren Parameter im 2-dimensionalen Datenraum die k
  ürzeste Euklidische Distanz zum Koordinatenursprung aufweisen (
  ⇒ Einzugsgebiet 1 in Abbildung 4-13). Diese Reihe hat die kleinste mittlere Jahreshochwasserspende und/oder die kleinste Standardabweichung aller zu klasslerenden Hochwasserreihen.
- 2. Im nächsten Schritt wird jene Messreihe gesucht, deren Distanz zur bereits gewählten Messreihe minimal ist (⇔ Einzugsgebiet 2).
- Die Einzugsgeblete 1 und 2 werden zu einer Klasse zusammengefasst. Aus den statistischen Parametern der beiden Messreihen wird das multivariate arithmetische Mittelzentrum durch die Mittelung der mHq- und s(Hq)-Werte bestimmt (⇔ Zentroid Z<sub>1</sub>).
- Aus der mHq/s(Hq)-Koordinate des Zentroiden Z, wird die klassenspezifische, repräsentative Verteilungsfunktion nach der hydrologischen Grundgleichung (Formel 4-2) unter Verwendung der K<sub>7</sub>-Werte der Formel 4-17 berechnet.



Abbildung 4-13: Prinzip der Klassifikation der Hochwasserreihen (aus Düster 1994) Figure 4-13: Classification principle for flood series (after Düster 1994)

5. Schliesslich wird mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test geprüft, ob die empirischen Verteilungsfunktion tionen der Einzugsgebiete 1 und 2 statistisch gesehen mit der repräsentativen Verteilungsfunktion identisch sind. Ist dies – wie im vorliegenden Beispiel – der Fall, kann die Klasse auf dem vorgegebenen Signifikanzniveau als homogen betrachtet werden. Der Klassifikationsprozess geht in Punkt 2 weiter, indem nun jene Hochwassermessreihe gesucht wird, die im Datenraum die kleinste Euklidische Distanz zum Zentroiden Z₁ aufweist (⇔ Einzugsgebiet 3). Wird die Homogenität der neuen Klasse mit dem Zentroiden Z₂ durch den Kolmogorov-Smirnov-Test abgelehnt, stellt die zuletzt berücksichtigte Messreihe den Ausgangspunkt für eine neue Klasse dar, und die Klassifikation wird erneut in Punkt 2 fortgesetzt. Im vorliegenden Beispiel unterscheidet sich das Einzugsgebiet 3 hochwasserhydrologisch signifikant von den zuvor klassierten Gebieten. Die Einzugsgebiet 1 und 2 bilden deshalb eine homogene Klasse, während das Einzugsgebiet 3 einer anderen Klasse angehört.

Die Klassifikation ist dann beendet, wenn alle Hochwassermessreihen klassiert sind bzw. wenn sich keine Reihe mehr einer Klasse zuordnen lässt, ohne dass Heterogenität hervorgerufen wird. Mit diesem Klassifikationsschritt konnten gesamtschweizerisch insgesamt zwölf Hochwasserklassen identifiziert werden.

#### c) Räumliche Einordnung der Hochwasserklassen

Zur Abschätzung seltener Hochwasser in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen müssen die Gebiete einer der zwölf homogenen Hochwasserklassen zugeordnet werden, um mit den klassenspezifischen Werten der belden Parameter mHq und s(Hq) – unter Verwendung der hydrologischen Grundgleichung – ein 7-jährliches Hochwasser zu berechnen. Dazu wurde eine Diskriminanzanalyse durchgeführt: Ausgehend von 21 Gebietskenngrössen (vgl. Teilschritt a)) konnten über eine schrittweise Diskriminanzanalyse sieben erklärende Gebietskenngrössen selektiert und sieben Diskriminanzfunktionen ( $Y_k$ ) abgeleitet werden. Folgende Kenngrössen tragen zu einer optimalen Trennung der zwölf Hochwasserklassen bei: Gebietsniederschlag, Vergletscherungsgrad, Versiegelungsgrad, mittleres Gefälle, Ödlandanteil, Weidelandanteil und Elongationsfaktor.

#### d) Berechnung von Klassifizierungswahrscheinlichkeiten

Soll nun für ein Einzugsgebiet ohne Abflussmessungen eine Hochwasserabschätzung durchgeführt werden, kann das Einzugsgebiet über die Diskriminanzfunktionen mit den selektierten Gebietskenngrössen einer der zwölf Hochwasserklassen zugeordnet werden. Oftmals wird ein Gebiet i nach dem Distanzkonzept (s. Backhaus et al. 1994) in diejenige Klasse eingeordnet, bezüglich welcher die Distanz D<sup>2</sup><sub>la</sub> (s. Formel 4-18) zwischen dem i-ten Gebiet und dem Zentroid der g-ten Klasse minimal wird:

$$D_{ig}^{2} = \sum_{k=1}^{K} (y_{ki} - \overline{y}_{kg})^{2} \qquad (g = 1, 2, ..., G)$$
(4-18)

- $D_{lg}^2$ quadrierte Euklidische Distanz zwischen i-tem Element und Zentrold der g-ten Klasse
- Diskriminanzwert von Element i bezüglich Diskriminanzfunktion k
- у<sub>к</sub>, У У <sub>кр</sub> Zentroid der Klasse g bezüglich Diskriminanzfunktion k

Aufgrund der unterschiedlichen Distanzen der Elemente (Gebiete) zu den Klassenmittelpunkten entstehen allerdings Unschärfen in der Klassenzuordnung. Bei den sogenannten "fuzzy sets" werden diese Unschärten mitberücksichtigt. Dabei werden die Klassen nicht diskret über Klassengrenzen getrennt; vielmehr wird angenommen, dass die Übergänge zwischen den Klassen fliessend sind, so dass ein Element i mehreren Klassen mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden kann. Zur Bestimmung dieses Unschärfebereichs müssen die Klassifizierungswahrschelnlichkeiten  $P(g | Y_i)$  ermittelt werden. Dabei bezeichnet  $P(g | Y_i)$  die Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit von Element / mit Diskriminanzwert Y, zur Klasse g. Nach Backhaus et al. (1994) lässt sich diese Wahrscheinlichkeit, die in der statistischen Entscheidungstheorie als a-posteriori-Wahrscheinlichkelt bezeichnet wird, unter Anwendung des Bayes-Theorems wie folgt berechnen:

$$P(g|Y_{i}) = \frac{P(Y_{i}|g) P_{i}(g)}{\sum_{g=1}^{G} P(Y_{i}|g) P_{i}(g)} \qquad (g = 1, 2, ..., G)$$
(4-19)

P(g|Y)a-posteriori-Wahrscheinlichkeit

P(Y,|g)bedingte Wahrscheinlichkeit

 $P_i(g)$ a-priori-Wahrscheinlichkeit

Im Bayes-Theorem werden die a-priori gegebenen Wahrscheinlichkeiten, welche sich aus dem Quotient zwischen der Anzahl Elemente der Klasse g und der Gesamtzahl der Elemente berechnen lässt, mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten verbunden. Letztere hängen von den in den Merkmalsvariablen (Gebietskenngrössen) enthaltenen Informationen ab. Die bedingte Wahrscheinlichkeit "gibt an, wie wahrscheinlich ein Diskriminanzwert Y, für das Element / wäre, wenn dieses zur Gruppe g gehören würde. Sie lässt sich durch Transformation der Distanz D<sup>2</sup><sub>la</sub> ermitteln" (Backhaus et al. 1994). Diese Distanz wird nach Formel 4-18 bestimmt. Somit ergibt sich abschliessend folgende Formel zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit von Element i zur Klasse g:

$$P(g|Y_i) = \frac{e^{(-D_{ig}^2/2)} \cdot P_i(g)}{\sum_{g=1}^{G} e^{(-D_{ig}^2/2)} \cdot P_i(g)} \qquad (g = 1, 2, ..., G)$$
(4-20)

Auf unseren Fall übertragen, lässt sich mit dieser Formel berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein ungemessenes Einzugsgebiet zu jeder der zwölf Hochwasserklassen gehört. Mit der Berücksichtigung der Klassifikationswahrscheinlichkeiten kann also ein entscheidender Nachteil bisheriger taxonomischer Ansätze, nämlich die starre Zuordnung eines Gebietes zu einer einzigen Hochwasserklasse, umgangen werden. Dadurch lassen sich die Unterschiede im Hochwasserverhalten differenzierter erfassen.

#### e) Abschätzung

Bei der Abschätzung eines *T*-jährlichen Spitzenabflusses eines ungemessenen Einzugsgebietes  $(HQ_T)$  werden die im Schritt d) bestimmten a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten  $(P(g | Y_i))$  als Gewichte eingeführt.  $HQ_T$  wird dann über die hydrologische Grundgleichung als gewichtetes Mittel der klassenspezifischen *T*-jährlichen Hochwasserspenden unter Berücksichtlgung der beitragenden Flächen ( $Fn_{beitr}$ ) berechnet:

$$HQ_T = Fn_{beitr} \sum_{g=1}^{12} P(g|Y_t) \cdot \left( mHq_g + K_T \cdot s_g(Hq) \right)$$
(4-21)

| HQr                 | 7-jährliche Hochwasserspitze [m³/s]                                               |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| P(g Y)              | a-posteriori-Wahrscheinlichkeit                                                   |
| mHq                 | Mittelwert der Abflussspenden der Jahreshochwasserspitzen<br>[m³/s km²]           |
| s(Hq)               | Standardabweichung der Abflussspenden der Jahreshochwasser-<br>spitzen [m³/s km²] |
| $K_{T}$             | Koeffizient (vgl. Formel 4-17)                                                    |
| Fn <sub>beitr</sub> | beitragende Fläche [km²]                                                          |
| g                   | Hochwasserklasse                                                                  |

In Tabelle 4-6 sind die klassenspezifischen Werte zur Anwendung dieser Formel zusammengestellt.

Tabelle 4-6: Klassenspezifische Kennwerte; mHq: Mittelwert der Abflussspenden der Jahreshochwasserspitzen, s(Hq): Standardabweichung der Abflussspenden der Jahreshochwasserspitzen, P(g): a-priori-Wahrscheinlichkeit (nach Düster 1994)

Table 4-6: Specific values for the flood classes after Düster (1994): mean values (mHq) and standard deviation (s(Hq)) of annual peak flows, a-priori-probability (P(g))

| Klasso | <b>mHq</b><br>[m³/s km²] | s(Hq)<br>[m <sup>3</sup> /s km <sup>2</sup> ] | P(g) |
|--------|--------------------------|-----------------------------------------------|------|
| 1      | 0.50                     | 0.17                                          | 0.04 |
| 2      | 0.72                     | 0.30                                          | 0.07 |
| 3      | 0.88                     | 0.43                                          | 0.11 |
| 4      | 1.03                     | 0.29                                          | 0.07 |
| 5      | 1,15                     | 0.57                                          | 0.09 |
| 6      | 1.45                     | 0.49                                          | 0.06 |
| 7      | 1.58                     | 0.78                                          | 0.17 |
| 8      | 2.16                     | 0.73                                          | 0.15 |
| 9      | 2.30                     | 1.38                                          | 0.09 |
| 10     | 2.96                     | 1.23                                          | 80.0 |
| 11     | 3.59                     | 2.42                                          | 0.05 |
| 12     | 5.26                     | 3.01                                          | 0.02 |

Somit ergibt sich zusammenfassend folgendes Vorgehen bei der Hochwasserabschätzung nach dem Modell "Fuzzy" in einem Einzugsgeblet ohne Abflussmessungen:

- 1. Bestimmung der für die Berechnung der Diskriminanzwerte notwendigen Gebletskenngrössen mittels GIS,
- 2. Berechnung der Diskriminanzwerte und der Distanzen zu den Klassenmittelwerten,
- 3. Berechnung der Klassifizierungswahrscheinlichkeiten,
- 4. Anwendung der hydrologischen Grundgleichung.

## f) Anwendungsbeispiel

Mit einer Abschätzung des 100jährlichen Hochwassers des Buuserbachs in Maisprach (Kanton Basel-Land) soll eine konkrete Modellanwendung dargestellt werden. Dabei orientieren wir uns an den oben erwähnten Teilschritten 1 bis 4. Die Daten stammen aus Düster (1994).

### Bestimmung der f ür die Berechnung der Diskriminanzwerte notwendigen Gebietskenngr össen mittels GIS

Ø

Elongationsfaktor (*El*): 0.37 Gebietsniederschlag (*N<sub>gew</sub>*): 1223mm Ödlandanteil (*Oed<sub>gew</sub>*): 0% Weideanteil (*Weide<sub>gew</sub>*): 1.11% Vergletscherungsgrad (*Vgl*): 0% mittleres Gefälle (*Im<sub>gew</sub>*): 6.46° Versiegelungsgrad (*Vers<sub>gew</sub>*): 0%

Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von 11.5 km<sup>2</sup>; die Grösse der relativ beitragenden Fläche beträgt 2.44 km<sup>2</sup>.

### 2. Berechnung der Diskriminanzwerte und der Distanzen zu den Klassenmittelwerten

Die allgemeine Gleichung der Diskriminanzfunktionen  $Y_k$  lautet:  $Y_k = const_k + \alpha_{1k}El + \alpha_{2k}Vgl + \alpha_{3k}N_{gew} + \alpha_{4k}Im_{gew} + \alpha_{5k}Oed_{gew} + \alpha_{6k}Vers_{gew} + \alpha_{7k}Weide_{gew}$ 

Tabelle 4-7: Parameter der Diskriminanzfunktionen Yk

Table 4-7: Parameter of discriminant functions Yk

|       | <i>k</i> =1 | k=2      | k=3     | k=4     | k=5      | k=6     | k=7      |
|-------|-------------|----------|---------|---------|----------|---------|----------|
| const | -5.0460     | 0.9980   | -1.3591 | 1.4462  | -3.0335  | -2.5767 | -0.5040  |
| αί    | 8.399       | 5.306    | -2.902  | -1.023  | -8.639   | 0.3547  | 6.7634   |
| α2    | 0.1110      | -0.0638  | 0.0896  | 0.0128  | 0.0371   | 0.0125  | 0.0765   |
| α3    | 0.00215     | -0.00256 | 0.00155 | 0.00024 | -0.00185 | 0.00046 | -0.00094 |
| α4    | -0.0266     | 0.2537   | 0.0085  | -0.0331 | 0.0484   | 0.1707  | 0.0718   |
| α5    | 0.0685      | -0.0140  | -0.0551 | -0.0099 | 0.0397   | -0.0443 | -0.0333  |
| α6    | 0.0834      | 0.0740   | 0.0500  | 0.1051  | 0.0228   | -0.0042 | 0.0085   |
| α7    | -0.0228     | -0.0124  | -0.0349 | 0.0458  | -0.0026  | -0.0093 | 0.0140   |

Die Konstante und die Koeffizienten der sieben Diskriminanzfunktionen sind der Tabelle 4-7 zu entnehmen. Damit können die Diskriminanzwerte  $y_k$  für den Buuserbach berechnet werden:

Ø

 $y_1 = 0.49, y_2 = 1.46, y_3 = -0.52, y_4 = -1.7, y_5 = -2.11, y_6 = -0.79, y_7 = 1.33.$ 

In Tabelle 4-8 sind die Zentroide ( $\overline{y}_{kg}$ ) der zwölf Hochwasserklassen bezüglich der k Diskriminanz-

funktionen aufgeführt. Mit  $y_{kl}$  und  $\overline{y}_{kg}$  können nun die quadrierten Euklidischen Distanzen  $D_{lg}^2$  zwischen dem Buuserbach (*i*-tes Element) und den Zentroiden der *g*-Klassen berechnet werden (Formel 4-18). Für die Klasse 1 erhalten wir:

 $\mathcal{L}_{1}^{2} = (0.49 - (-1.29))^{2} + (1.46 - 0.99)^{2} + (-0.52 - (-1.53))^{2} + (-1.70 - 0.23)^{2} + (-2.11 - 0.40)^{2} + (-0.79 - (-0.13)^{2} + (1.33 - 0.22)^{2} = 16.10$ 

Wird diese Berechnung für alle zwölf Hochwasserklassen durchgeführt, ergeben sich folgende Werte:

 $\mathcal{L}$  $D_1^2 = 16.10, D_2^2 = 17.35, D_3^2 = 7.77, D_4^2 = 14.96, D_5^2 = 12.46, D_6^2 = 11.89, D_7^2 = 12.55, D_8^2 = 20.08, D_9^2 = 15.68, D_{10}^2 = 17.18, D_{11}^2 = 23.44, D_{12}^2 = 23.13$ 

Tabelle 4-8: Matrix der Zentroide der Hochwasserklassen bezüglich der Diskriminanzfunktionen (aus Düster 1994) Table 4-8: Matrix of centroids of flood classes for each discriminant function

| Klassø | y <sub>1</sub> | y <sub>2</sub> | y3    |       |       |       |       |
|--------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1      | -1.29          | 0.99           | -1,53 | 0.23  | 0.40  | -0.13 | 0.22  |
| 2      | -1.14          | 0.68           | -0.64 | 0.44  | 0.47  | 0.22  | -0.04 |
| 3      | -0.21          | 1.27           | 0.36  | -0.59 | -0.29 | -0.18 | 0.08  |
| 4      | -0.45          | 0.37           | 0.49  | 0.03  | 0.50  | -0.28 | -0.02 |
| 5      | -0.80          | 0.52           | 0.30  | -0.55 | 0.01  | 0.25  | -0.21 |
| 6      | -0.48          | 0.08           | 0.26  | -0.12 | -0.24 | 0.36  | 0,27  |
| 7      | -0.31          | 0.07           | -0.34 | 0.24  | -0.28 | -0.13 | -0.08 |
| 8      | -0.26          | -1.33          | 0.65  | -0.00 | 0.19  | -0.01 | 0.06  |
| 9      | -0.07          | -0,94          | -0.36 | 0.40  | -0.46 | 0.04  | -0.01 |
| 10     | ť.81           | -0.96          | -0.45 | -0.38 | 0.22  | -0.05 | -0.05 |
| 11     | 2.92           | 1.69           | 0.98  | 1.15  | 0.02  | 0.09  | -0.14 |
| 12     | 4.11           | 0.29           | -1.35 | -0.99 | 0.13  | 0.15  | 0.08  |

#### 3. Berechnung der Klassifizierungswahrscheinlichkeiten

Mit  $D_{\tau}^2 = 16.10$  und einer a-priori-Klassifizierungswahrscheinlichkeit von 0.04 (Tabelle 4-6) erhalten wir nach Formel 4-20 folgende Wahrscheinlichkeit, dass der Buuserbach zur Hochwasserklasse 1 gehört:

Ø

$$P(1|Y_i) = \frac{e^{(-16.10/2)} \cdot 0.04}{0.0029} = 0.0044$$

Diese Wahrschelnlichkeit ist sehr klein; sie beträgt nur 0.4%. Wie die nachfolgende Aufstellung zeigt, ist die Klassifizierungswahrscheinlichkeit bei der Hochwasserklasse 3 mit 74.4% am grössten:

Ľ

 $\begin{array}{l} P(1 \mid Y_i) = 0.4\%, \ P(2 \mid Y_i) = 0.4\%, \ P(3 \mid Y_i) = 74.4\%, \ P(4 \mid Y_i) = 1.3\%, \ P(5 \mid Y_i) = 5.8\%, \ P(6 \mid Y_i) = 5.2\%, \\ P(7 \mid Y_i) = 10.6\%, \ P(8 \mid Y_i) = 0.2\%, \ P(9 \mid Y_i) = 1.2\%, \ P(10 \mid Y_i) = 0.5\%, \ P(11 \mid Y_i) = 0\%, \ P(12 \mid Y_i) = 0\% \end{array}$ 

#### 4. Anwendung der hydrologischen Grundgleichung

Die berechneten Klassifizierungswahrscheinlichkeiten werden anschliessend als Gewichtungsfaktoren in die hydrologische Grundgleichung eingeführt (Formel 4-21). Die klassenspezifischen Werte für mHq und s(Mq) sind in Tabelle 4-6 enthalten. Der Koeffizient  $K_r$  kann nach Formel 4-17 bestimmt werden; für  $T \approx 100$  Jahre ist  $K_T \approx 3.1367$ . Somit erhalten wir folgende Abschätzung für die 100jährliche Spitzenabflussspende (m<sup>3</sup>/s·km<sup>2</sup>]:

Ľ

 $Hq_{100} = (0.74 \cdot (0.88 + 3.1367 \cdot 0.43)) + (0.01 \cdot (1.03 + 3.1367 \cdot 0.29)) + (0.06 \cdot (1.15 + 3.1367 \cdot 0.57)) + (0.05 \cdot (1.45 + 3.1367 \cdot 0.49)) + (0.11 \cdot (1.58 + 3.1367 \cdot 0.78)) + (0.01 \cdot (2.30 + 3.1367 \cdot 1.38)) = 2.503$ 

Wird diese Abflussspende mit der beitragenden Fläche von 2.44 km<sup>2</sup> multipliziert, erhalten wir als 100jährliche Spitzenabflussmenge einen Wert von 6.1 m<sup>3</sup>/s. Der aufgrund einer 11jährigen Messreihe extrapolierte Wert des Buuserbachs beträgt 7.5 m<sup>3</sup>/s (Aschwanden und Spreafico 1995) bzw. 6.5 m<sup>3</sup>/s (Gumbel-Verteilung).

## g) Güte des Modells

Die Ergebnisse der Beurteilung des Modells "Fuzzy" in 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km<sup>2</sup> sind der Tabelle 4-9 zu entnehmen. In rund 65% der Fälle liefert das Verfahren genügende oder gar exakte Abschätzungen, wobei der hohe Anteil exakter Abschätzungen bemerkenswert ist. In nur 10 bis 20% der Fälle sind die Abschätzungen unbrauchbar.

Tabelle 4-9: Beurtellung des Modells "Fuzzy" anhand einer Abschätzung der 100jährlichen Spitzenabflüsse in 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km² (Erläuterungen zur Beurteilungstabelle s. Kapitel 4.3.1)

Table 4-9: Assessment of model "Fuzzy", based on 100-year peak flow estimates from 69 catchments with areas between 10 and 100 km<sup>2</sup>

|             | Modell "Fuzzy" |      |            |      |  |
|-------------|----------------|------|------------|------|--|
| Güteklasse  | O (LHG)        |      | Ø (Gumbel) |      |  |
|             | h [%]          | Σ[%] | h [%]      | Σ[%] |  |
| exakt       | 20.3           | 20.3 | 30.4       | 30.4 |  |
| genügend    | 42.0           | 62.3 | 37.7       | 68.1 |  |
| ungenau     | 18,9           | 81.2 | 21.8       | 89.9 |  |
| unbrauchbar | 18.8           | 100  | 10.1       | 100  |  |

O Vergleich der modellierten Werte mit den von der Landeshydrologie und -geologie (Aschwanden und Spreafico 1995) publizierten Werten

- Ø Vergleich der modellierten Werte mit den mittels der Gumbel-Verteilung zehtlich extrapolierten Werten
- h Prozentsatz der Realisierungen In einer Güteklasse
- Σ Summenhäufigkeit

# 4.4.2 Abschätzung extremer und 100jährlicher Hochwasserspitzen über Hochwasserregionen (Modelle "GIUB-Q<sub>max</sub>" und "GIUB-HQ<sub>100</sub>")

Bei der Hochwasserbemessung splelen (Grenzwert-) Überlegungen zu extremen Hochwassern, die in einem Einzugsgebiet auftreten können, eine wichtige Rolle. Solche Extremereignisse unterscheiden sich von "normalen" Hochwasserereignissen durch ihre Grösse, ihren Ablauf und ihre Auswirkungen. "Dieses Ausserordentliche kommt darin zum Ausdruck, dass solche Ereignisse schwer innerhalb einer statistischen Auswertung einzuordnen sind. Sie wirken darin als "Ausreisser", denen eine wesentlich höhere Jährlichkelt zugeordnet werden müsste, als sich aufgrund der Einordnung in den Beobachtungszeitraum ergibt" (Gutknecht 1994). Mit dem Bedarf nach einem nachhaltigen Schutz vor Hochwasserkatastrophen wächst die Notwendigkeit einer besseren Kenntnis solcher Extrema. "Higher number of humans living on Planet Earth, and growing aspiration for appropriate standards of living of increasingly risk-averse societies are conditions which strengthen the needs for extreme hydrological events in the research agenda" (Kundzewicz et al. 1993).

Die Hydrologie unternimmt seit über 100 Jahren Anstrengungen, extreme Hochwasser bzw. Höchsthochwasser ( $Q_{max}$ ) abzuschätzen. Aus mitteleuropäischer Sicht müssen in diesem Zusammenhang vor allem die Arbeiten von Iszkowski (1886), Lauterburg (1887), Hofbauer (1916), Kürsteiner (1917), Melli (1924) und Kreps (1952) erwähnt werden. Das Vorgehen war grundsätzlich stets dasselbe: Ausgehend von den grössten in den einzelnen Einzugsgebieten beobachteten Hochwasserspitzen (*HHQ*) wurden sogenannte Hüllkurven der Form

$$\log Q_{\max} = \log a + b \cdot \log Fn \tag{4-22}$$

bzw.

$$Q_{\max} = a \cdot F n^b \tag{4-23}$$

| $Q_{max}$ | extremes Hochwasser, Höchsthochwasser |
|-----------|---------------------------------------|
| Fn        | Gebietsfläche                         |
| a, b      | Parameter                             |

bestimmt. Dazu wurden die *HHQ*-Werte in einem doppeltlogarithmischen Papier der Gebletsfläche gegenübergestellt. Doppeltlogarithmisches Papier wurde verwendet, um die Wertestreuung, die namentlich durch die teilweise grossen Messfehler im Hochwasserbereich und durch die Inhomogenitäten der *HHQ*-Werte verursacht wird, "optisch etwas zu unterdrücken" (Vischer und Huber 1993). Die Umhüllende ist jene Kurve, welche die *HHQ*-Werte nach oben begrenzt. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, dass die flächenabhängigen  $Q_{max}$ -Werte der Umhüllenden in einem Einzugsgebiet überschritten werden, sehr klein.  $Q_{max}$  darf deshalb als praxisrelevanter Grenzwert des Hochwasserabflusses bezeichnet werden, der allerdings deutlich vom "probable maximum flood" (*pmf*), dem vermutlich grössten Abfluss aus einem Einzugsgebiet, übertroffen wird (vgl. Abbildung 4-2).

#### a) Datengrundlage

Gegenüber den oben erwähnten Arbeiten verfügen wir heute über eine umfangreiche, räumlich breit abgestützte Datenbasis: Vom ehemaligen Amt für Strassen- und Flussbau (ASF 1974) sowie von der Landeshydrologie und -geologie (Spreafico und Stadler 1986, Spreafico und Aschwanden 1991) wurden die in der Schweiz aufgetretenen maximalen Hochwasserspitzen (*HHQ*) gesammelt, so dass nun über 700 Beobachtungen aus dem Zeitraum 1869 bis 1990 vorliegen. Es wird hier bewusst von Beobachtungen und nicht von Messungen gesprochen. Direkte Messungen im Hochwasserbereich sind selten verfügbar. Die meisten der dokumentierten Abflusswerte wurden aus Wasserständen über extrapolierte Wasserstands-Abfluss-Beziehungen und/oder über hydraulische Berechnungen abgeleitet. Sie sind deshalb oftmals ungenau. Im weiteren muss auf die Heterogenität der *HHQ*-Daten hingewiesen werden, welche durch die Unterschiede in der Länge der Messreihen und in den Zeitperioden verursacht wird:

Bei rund 540 Stationen bildet der *HHQ*-Wert die grösste beobachtete Hochwasserspitze einer mehrjährigen Messreihe. Die längste Messreihe umfasst 122 Jahre (Rhein-Basel). Ein Achtel der 540 Stationen beinhaltet mehr als 50, ein Drittel weniger als 10 Messjahre. Die durchschnittliche Messreihenlänge beträgt 24 Jahre. Über die Binomialverteilung lässt sich die Wahrscheinlichkeit  $(P(X \ge HQ_T))$  berechnen, dass in *n* Messjahren ein *T*-jährlicher Spitzenabfluss  $(HQ_T)$  mindestens einmal erreicht oder überschritten wird:

$$P(X \ge HQ_T) = 1 - (1 - \frac{1}{T})^n$$
(4-24)

TJährlichkeitnAnzahl Messjahre

Bei der durchschnittlichen Messreihenlänge von 24 Jahren beträgt die Wahrscheinlichkeit 38%, dass mindestens ein 50jährliches Hochwasser erfasst wurde (Formel 4-24). Die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für ein 100- und 150jährliches Hochwasser betragen 21% bzw. 15%.

Rund 200 *HHQ*-Werte sind *Einzelbeobachtungen* von meist kleineren Einzugsgebieten. Diese Werte entbehren zwar jeglicher statistischer Abstützung durch lange Messreihen; sie markieren aber durchwegs Extremsituationen, da sie nur im Anschluss an Extremereignisse erhoben wurden. Wie die Abbildung 4-14 (links) belegt, sind diese Einzelbeobachtungen für die Festlegung der Hüllkurven vor allem im Bereich kleiner Einzugsgebiete unter ca. 200 km<sup>2</sup> massgebend.



Abbildung 4-14: HHQ-Werte der ASF- und LHG-Dokumentation:

Diagramm links: Daten gegliedert nach ihrer Erhebungsart

*Dlagramm rechts:* Die Einzelbeobachtungen kleiner Einzugsgebiete im Vergleich mit den *HHQ*-Werten von Stationen mit langen Messreihen, bei denen die Wahrscheinlichkeit, dass sie mindestens ein 100jährliches Hochwasser enthalten, grösser als 30% (0.30) ist

Figure 4-14: Largest observed floods (*HHQ*) from the ASF and LHG documentation, split according to the data sources (*chart on the left*). The single observations of small catchments ("Einzelbeobachtungen") in comparison to the *HHQ* values from stations with long records ("lange Messreihen"), for which the probability of containing at least one 100-year peak flow is greater than 30% (*chart on the right*)

Zusammenfassend lässt sich die Datenbasis der HHQ-Werte wie folgt charakterisieren:

- Das HHQ beschreibt den grössten in einem Einzugsgebiet beobachteten Spitzenabfluss.
- Die Stichprobe der HHQ-Werte basiert auf rund 540 mehrjährigen Messreihen und rund 200 Einzelbeobachtungen.
- Die durchschnittliche Messreihenlänge der kontinuierlich registrierenden Stationen, die für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung standen, beträgt 24 Jahre. Nach Formel 4-24 sind in 38% der HHQ-Werte, welche über Messreihen erfasst wurden, Hochwasser mit Jährlichkeiten ≥ 50 Jahre enthalten. Diese Aussage wird durch Abbildung 4-15 bestätigt: Die HHQ bewegen sich häufig in der Grössenordnung eines 50- (HQ<sub>50</sub>) bis 100jährlichen (HQ<sub>100</sub>) Hochwassers; die Wertepaare HHQ-HQ<sub>50</sub> und HHQ-HQ<sub>100</sub> liegen oftmals im Bereich der Linie, auf der beide Werte gleich sind. Hingegen verdeutlicht die Position der Wertepaare HHQ-mHQ im Diagramm, dass das HHQ in der Regel deutlich grösser ist als ein mittleres Hochwasser (mHQ).
- Die Jährlichkeiten der HHQ-Werte, die aus Einzelbeobachtungen abgeleitet wurden, liegen vielfach in der Grössenordnung jener der HHQ der längsten Beobachtungsreihen (Abbildung 4-14, rechts). Ihnen ist somit eine grosse Jährlichkeit zuzuordnen.

Insgesamt weisen also mehr als 40% der in der Stichprobe erfassten Hochwasserspitzen Jährlichkeiten von 50 und mehr Jahren auf. Die Umhüllende ( $Q_{max}$ ) der grössten beobachteten Hochwasserspitzen, welche die *HHQ* nach oben begrenzt, liegt in einem Bereich sehr grosser Jährlichkeiten (>100 Jahre). Sie beschreibt damit einen flächenabhängigen Grenzwert, der nur in seltenen Fällen erreicht oder überschritten wird. Obwohl sich die  $Q_{max}$ -Werte statistisch nicht eindeutig definieren lassen, sind sie für die Praxis wegen ihres "Grenzwertcharakters" von grosser Bedeutung, zumal sie aus einer sehr grossen Zahl von Beobachtungen abgeleitet werden konnten.



Abbildung 4-15: Vergleich der Wertepaare HHQ-mHQ, HHQ-HQ<sub>50</sub>, HHQ-HQ<sub>50</sub>: In jedem Einzugsgebiet wurden dem HHQ-Wert die berechneten bzw. geschätzen Hochwasserkennwerte mHQ, HQ<sub>50</sub> und HQ<sub>100</sub> gegenübergestellt. Figure 4-15: Pair-wise comparison of HHQ, mHQ, HQ<sub>50</sub> and HQ<sub>100</sub>, where HHQ: largest observed peak flow, mHQ: mean annual peak flow, HQ<sub>50</sub>: 50-year peak flow and HQ<sub>100</sub>: 100-year peak flow

### b) Die beiden Kennwerte Q<sub>max,90%</sub> und HHQ<sub>Reg</sub>

In einigen Ansätzen zur Ermittlung des eben beschriebenen "Grenzabflusses" werden anstelle der Hüllkurven, welche das gesamte Kollektiv nach oben begrenzen, 90%-Hüllkurven ( $Q_{max,00\%}$ ) verwendet (z.B. Kreps 1952). Dabel wird also in Kauf genommen, dass in durchschnittlich 10% der Fälle grössere Werte als  $Q_{max,00\%}$  auftreten. Dadurch kann aber vermieden werden, dass der Verlauf der Hüllkurven zu stark durch Ausreisser, die beispielsweise durch Messfehler verursacht sind, beeinflusst wird. Bei der Verwendung von  $Q_{max,00\%}$  vermindert sich folglich das Risiko, den Grenzwert erheblich zu überschätzen. Bei den räumlichen Analysen werden wir deshalb auch diesen Kennwert berücksichtigen.

Aus der Regression zwischen den beobachteten *HHQ*-Werten und der Gebietsfläche lässt sich die Kenngrösse  $HHQ_{Regr}$  ableiten (vgl. Abbildung 4-16). Sie beschreibt den allgemeinen Zusammenhang zwischen der Gebietsfläche und den Spitzenabflüssen *HHQ*. Aufgrund der vorher angestellten Wahrscheinlichkeitsüberlegungen darf den  $HHQ_{Regr}$ -Werten eine eher grosse Jährlichkeit zugeordnet werden. Die Kenngrösse  $HHQ_{Regr}$  wird deshalb später als Schätzgrösse für einen 100jährlichen Spitzenabfluss verwendet.

#### c) Analyse des gesamtschweizerischen Kollektivs

In Abbildung 4-16 sind die Hochwasserspitzenabflüsse (*HHQ*) von 717 Beobachtungen der Gebietsfläche gegenübergestellt<sup>13</sup>. Die Flächenabhängigkeit der *HHQ*-Werte lässt sich über die Gleichungen

$$\log HHQ_{Regr} = 0.858 + 0.566 \cdot \log Fn$$
 (4-25)

bzw.

$$HHQ_{Reor} = 7.2 \cdot Fn^{0.566}$$
 (4-26)

| HHQ <sub>Regr</sub> | Schätzwert für HHQ [m³/s] |
|---------------------|---------------------------|
| Fn                  | Gebietsfläche [km²]       |
| log                 | Zehnerlogarithmus         |

mit einem Bestimmtheitsmass ( $r^2$ ) von 0.67 beschreiben. Augenfällig in Abbildung 4-16 ist die scharfe Obergrenze der *HHQ*-Werte. Sie verdeutlicht, dass ein flächenabhängiger Grenzwert der Hochwasserspitzen ( $Q_{max}$ ) existiert und motiviert, mit Hülkurven zu arbeiten.



Abbildung 4-16: Zusammenhang zwischen den grössten beobachteten Hochwasserabflüssen (HHQ) und der Gebietsfläche (Fn)

Figure 4-16: Relationship between largest observed peak flow (HHQ) and catchment area (Fn)

In Abbildung 4-17 sind die in der Schweiz gebräuchlichen Hüllkurven-Formein dem Kollektiv der HHQ-Werte gegenübergestellt. Dazu wurde der Parameter a der Hüllkurven (vgl. Formel 4-23) innerhalb der von den Autoren angegebenen Grenzen derart variiert, dass die Kurven die Punktewolke möglichst optimal umhüllen. Dabei zeigt es sich, dass diese Formeln die maximalen HHQ-Werte kleiner Einzugsgebiete eher unterschätzen, jene grosser Einzugsgebiete eher überschätzen. Die Formel von Hofbauer (1916) mit a = 42 scheint zur Umhüllung des gesamtschweizerischen Kollektivs am besten geeignet zu sein. In jenen Fällen, in denen Angaben zum mittleren Jahresabfluss (MQ) zur Verfügung stehen, ist auch der Ansatz von Kreps (1952) anwendbar.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Der Umfang der Gesamtstichprobe beträgt 746; in einzelnen Fällen standen aber keine Angaben zur Gebietsfläche zur Verfügung.





Abbildung 4-17: An den HHQ-Werten des gesamtschweizerischen Kollektivs optimierte Formeln zur Herleitung der Umhüllenden (n = 717)

Figure 4-17: Optimised formulas for deriving enveloping curves (Q<sub>max</sub>)

#### d) Herleitung von Hochwasserregionen

Im gesamtschweizerischen Kollektiv ist die Streuung der *HHQ-Werte* bei gegebener Gebietsfläche sehr gross (Abbildung 4-16). Es wurde deshalb in einem nächsten Schritt versucht, diese Streuung durch eine räumliche Taxonomie der Hochwasserspitzenwerte zu verkleinern, um dadurch die Abschätzung von  $Q_{max,00\%}$  und  $HHQ_{Regr}$  zu verbessern. Es sollen also Hochwasserregionen zur Herleitung spezifischer Hüllkurven und Regressionsgeraden ausgeschleden werden.

Die Flächenabhängigkeit der *HHQ*-Werte überdeckt allfällig vorhandene regionale Muster im Hochwasserverhalten. Deshalb wurde der Flächeneinfluss nach dem in Abbildung 4-18 skizzierten Vorgehen im gesamtschweizerischen Kollektiv eliminiert. Die Regressionsgerade in Formel 4-25 definiert den für eine bestimmte Gebietsfläche zu erwartenden *HHQ*-Wert und beschreibt damit den Einfluss der Gebietsfläche auf den Hochwasserabfluss. Die Differenz zwischen dem tatsächlich beobachteten und dem aus der Gebietsfläche berechneten Wert ergibt das von der Gebietsfläche unabhängige Residuum (*r<sub>i</sub>*). Ein positives Residuum *r<sub>i</sub>* bedeutet, dass im *i*-ten Einzugsgebiet ein höherer Extremabfluss beobachtet wurde, als allein aufgrund der Gebietsfläche zu erwarten wäre, und dass damit in diesem Einzugsgebiet abflussfördernde Faktoren vorherrschen. Im Residuum gelangen die spezifischen Eigenschaften eines Einzugsgebietes zum Ausdruck. Mit Hilfe der Residuen können deshalb Einzugsgebiete mit einem ähnlichen extremen Hochwasserverhalten zu Regionen zusammengefasst werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Residuen auch von Ungenauigkeiten und Inhomogenitäten im Datenmaterial beeinflusst werden.



Abbildung 4-18: Vorgehen zur Elimination des Flächeneinflusses bei den HHQ-Werten (aus Kan 1995) Figure 4-18: Calculation of the residuals to eliminate the influence of the area on the HHQ values

Die standardisierten Residuen (zres,) mit

21

$$es_{i} = \frac{r_{i}}{s(r)} \tag{4-27}$$

riResiduum des i-ten Einzugsgebietess(r)Standardabweichungen der Residuen

sind in Abbildung 4-19 kartiert. Es lassen sich auf Anhieb Gebiete mit ähnlichen Residuen erkennen: Positive Residuen und damit im Vergleich zur Gebietsfläche überdurchschnittliche *HHQ*-Werte treten belspielsweise in den voralpinen Einzugsgebieten der Alpennordseite und in den Einzugsgebieten des Mittel- und Südtessins auf. Unterdurchschnittliche Werte finden sich gehäuft im Mittelland, im mittleren Wallis und in Mittelbünden. Die unterdurchschnittlichen Werte alpiner Einzugsgebiete sind nicht auf eine Beeinflussung durch die Wasserkraftnutzung zurückzuführen.



Abbildung 4-19: Răumliche Verteilung der standardisierten Residuen zres, (aus Kan 1995) Figure 4-19: Spatial distribution of standardized residuals zres,

Die in Abbildung 4-19 kartierten Residuen bildeten den Ausgangspunkt für eine räumliche Taxonomie der *HHQ*-Werte. Die Ermittlung der Hochwasserregionen erfolgte subjektiv: Einzugsgebiete mit ähnlichen Residuen wurden – unter Minimierung der Streuung der Residuen – zu Regionen zusammengefasst. Den naturräumlichen Einheiten der Schweiz wurde bei der Festlegung der Regionen wenig Beachtung geschenkt. Damit sind die für ein geographisch geschultes Auge etwas ungewohnten Grenzverläufe zu erklären. Insgesamt konnten fünfzehn Hochwasserregionen unterschieden werden (Abbildung 4-20).

Am Beispiel der Hochwasserregion N2, welche die voralpinen Einzugsgebiete in der Zentral- und Ostschweiz umfasst, kann mit Abbildung 4-21 gezeigt werden, dass der Streubereich der *HHQ*-Werte innerhalb einer Hochwasserregion bedeutend kleiner ist als im gesamtschweizerischen Kollektiv.

Insgesamt konnte durch die Analyse der Residuen der Flächeneinfluss im gesamtschweizerischen Kollektiv ausgeschaltet werden. Damit liessen sich Regionen identifizieren, welche aus gesamtschweizerischer Sicht über- bzw. unterdurchschnittliche Hochwasserspitzen aufweisen. Innerhalb der einzelnen Regionen besteht aber - wie die Ergebnisse des folgenden Kapitels bestätigen - wiederum ein Zusammenhang zwischen dem *HHQ* und der Gebietsfläche.



Abbildung 4-20; Hochwasserregionen der Schweiz; geographische Bezeichnungen der Regionen nach deren Hauptverbreitungsgebiet (Kan 1995)

Figure 4-20: Flood regions of Switzerland



HHQ der übrigen Regionen

Abbildung 4-21: Die HHQ-Werte der Region N2 innerhalb des gesamtschweizerischen Kollektivs Figure 4-21: Comparison of HHQ-values in the region N2 with the entire sample

# e) Abschätzung regionenspezifischer Hochwasserkennwerte

Im Anschluss an die räumliche Festlegung der Hochwasserregionen erfolgte die Ermittlung der regionenspezifischen Kennwerte  $Q_{max,00\%}$  und  $HHQ_{Regr}$ . Dazu wurden die maximal beobachteten Hochwasserspitzen (HHQ) einer Region der Gebietsfläche gegenübergestellt (Abbildung 4-22) und als erstes die Regressionsgerade zur Bestimmung des Kennwertes  $HHQ_{Regr}$  berechnet. Wie die Bestimmtheitsmasse ( $r^2$ ) in Tabelle 4-10 belegen, ergeben die regionenspezifischen Regressionsmodelle bessere Ergebnisse als das Globalmodell "Schweiz". Der Parameter *b*, der die Steigung der Regressionsgeraden beschreibt, wurde als regionenspezifischer Parameter auch für die Bestimmung der Hüllkurve ( $Q_{max,00\%}$ ) übernommen, während der Parameter *a* für  $Q_{max,00\%}$  neu berechnet werden musste (vgl. Tabelle 4-10).

Bei einer genauen Betrachtung der Diagramme in Abbildung 4-22 fällt auf, dass sich die Daten generell in zwei Kollektive mit einem Schwellenwert bei etwa 100 km<sup>2</sup> unterteilen lassen. Deshalb wurden die Hüllkurven getrennt für die beiden Koltektive ermittelt. Wie bereits erwähnt, wurden die grössten Werte bei der Bestimmung der flächenabhängigen Hüllkurven (Q<sub>max,00%</sub>(Fn)) nicht berücksichtigt.

Aufgrund dieser Analysen ist es nun möglich, in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen über die Gebietsfläche

- den Grenzwert der Hochwasserspitzen abzuschätzen (Modell "GIUB-Q<sub>max</sub>(Fn)"),
- und wie dies unter Punkt h) dleses Kapitels noch erläutert wird mit Hilfe des HHQ<sub>Regr</sub>-Wertes eine Schätzung des 100jährlichen Spitzenabflusses vorzunehmen (Modell "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)").

In der Abbildung 4-22 sind dazu die Unterlagen zu einer graphischen, in Tabelle 4-10 zu einer rechnerischen Ermittlung dieser Kennwerte regional differenziert bereitgestellt. Da die zur Herleitung der Hüllkurven verwendeten *HHQ*-Werte in den Diagrammen eingezeichnet sind, kann für jeden Flächenbereich abgeschätzt werden, wie gut die  $Q_{max}$ -Werte mit *HHQ*-Werten abgestützt sind. Die Lage der einzelnen Hochwasserregionen ist in Abbildung 4-20 kartiert.





Abbildung 4-22: Regionenspezifische Hüllkurven (Q<sub>max,00%</sub>(Fn); Modell "GIUB-Q<sub>max</sub>(Fn)") und Regressionsgeraden (HHQ<sub>Rag</sub>,(Fn); Modell "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)"). Der grau markierte Bereich umfasst 80% der *HHQ*-Werte einer Region. Der Wertebereich der Gebletsfläche (*Fn*) in den einzelnen Regionen *r*ichtet sich nach den verfügbaren Daten Figure 4-22: Enveloping curve (GIUB-Q<sub>max</sub>(Fn) model) and regression line (GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn) model) for each flood region

Tabelle 4-10: Regionenspezifische Parameter *a* und *b* zur Ermittlung der Hüllkurve ( $Q_{max,90\%} = a \cdot Fn^{b}$ ; Modell "GIUB- $Q_{max}(Fn)$ ") und der Regressionsgeraden ( $HHQ_{Regr} = a \cdot Fn^{b}$ ; Modell "GIUB- $HQ_{100}(Fn)$ ") in Funktion der Gebietsfläche (*Fn*); *n*: Stichprobenumfang,  $r^{2}$ : Bestimmtheitsmass des Regressionsmodells;  $Q_{max,90\%}$  und  $HHQ_{Regr}$  [m<sup>3</sup>/s], *Fn* [km<sup>2</sup>]

| Region  | n   | b     |                                                 | r                                       |                     |      |
|---------|-----|-------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|------|
|         |     |       | $Q_{max,90\%}$<br>(Fn $\leq 100 \text{ km}^2$ ) | Q <sub>1140,90%</sub><br>(Fn > 100 km²) | HHQ <sub>Regr</sub> |      |
| M1      | 46  | 0.73  | 2.37                                            | 2.82                                    | 1.44                | 0.90 |
| M2      | 41  | 0.59  | 13.18                                           | 7.59                                    | 5.98                | 0,81 |
| МЗ      | 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)                                 | 6.83                | 0.72 |
| \$2     | 27  | 0.69  | 19.95                                           | 19.50                                   | 12.41               | 0.79 |
| \$3     | 68  | 0.74  | 7.08                                            | 7.50                                    | 4.41                | 0.87 |
| Schwelz | 717 | 0.566 | -                                               | -                                       | 7.20                | 0.67 |

Table 4-10: Regional coefficients *a* and *b* of the enveloping curve ( $Q_{max,00\%} = s \cdot Fn^b$ ; GIUB- $Q_{max}(Fn)$  model) and the regression line ( $HHQ_{Ragr} = a \cdot Fn^b$ ; GIUB- $HQ_{100}(Fn)$  model) as a function of area (Fn)

(1.78): Stichprobenumfang zur Bestimmung von a sehr klein

Tabelle 4-11: Regionenspezifische Parameter a und b zur Ermittlung der Hüllkurve ( $Q_{max,50\%} = a \cdot MQ^b$ ; Modell "GIUB- $Q_{max}(MQ)^a$ ) und der Regressionsgeraden ( $HHQ_{Regr} = a \cdot MQ^b$ ; Modell "GIUB- $HQ_{100}(MQ)^a$ ) in Funktion des mittleren Jahresabflusses (MQ); n: Stichprobenumfang,  $r^2$ : Bestimmtheitsmass des Regressionsmodells; MQ,  $Q_{max,50\%}$  und  $HHQ_{Regr}$  (m<sup>3</sup>/s]

Table 4-11: Regional coefficients a and b of the enveloping curve ( $Q_{max,60\%} \approx a \cdot MQ^b$ ; GIUB- $Q_{max}(MQ)$  model) and the regression line ( $HHQ_{Regr} \approx a \cdot MQ^b$ ; GIUB- $HQ_{100}(MQ)$  model) as a function of mean annual flow (MQ)

| Region  | n   | b     | b a                                                  |                                                     |                     |      |  |
|---------|-----|-------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|------|--|
|         |     |       | $Q_{max,90%}$<br>(MQ $\leq 3 \text{ m}^3/\text{s}$ ) | Q <sub>max,sov,</sub><br>(MQ > 3 m <sup>3</sup> /s) | HHQ <sub>Rear</sub> |      |  |
| 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 |  |
| \$1     | 23  | 0.69  | 50.12                                                | -                                                   | 33.46               | 0.82 |  |
| S2      | 24  | 0.68  | -                                                    | 141.25                                              | 94.79               | 0.67 |  |
| \$3     | 62  | 0.75  | 118.85                                               | 63.10                                               | 47.20               | 0.79 |  |
| Schweiz | 453 | 0.714 | -                                                    | -                                                   | 31.06               | 0.79 |  |

-: zu kleiner Stichprobenumfang

Da es bei Abschätzungen im Hochwasserbereich sehr wichtig ist, unterschiedliche Ansätze zu verwenden, wurden die Hochwasserkennwerte  $Q_{max B0\%}$  und  $HHQ_{Regr}$  auch nach dem Konzept von Kreps (1952) über den mittleren Jahresabfluss (MQ) bestimmt (Tabelle 4-11). Dabei wurde das Kollektiv über den Schwellenwert  $MQ = 3 \text{ m}^3$ /s getrennt. Bei einer mittleren Abflussspende der Bilanzierungsgebiete der Schweiz von 32 l/s km<sup>2</sup> (vgl. Schädler und Weingartner 1992) wird ein Abfluss von 3 m<sup>3</sup>/s in einem ca. 100 km<sup>2</sup> grossen Einzugsgebiet gebildet. Damit erhalten wir einen mit den flächenabhängigen Analysen vergleichbaren Schwellenwert.

#### f) Abschätzung des Kennwertes Q<sub>max</sub> durch die Übertragung des Residuums einer benachbarten Station

Neben den vorgestellten regional differenzierten Ansätzen besteht mit der Übertragung des Residuums einer benachbarten Station, die im gleichen Einzugsgebiet liegen sollte, eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung des Grenzwertes der Hochwasserspitzen ( $Q_{max}$ ). Sie soll am Beispiel einer  $Q_{max}$ Schätzung für das Einzugsgebiet der Sense in Laupen (Fläche (*Fn*): 432 km<sup>2</sup>) kurz erläutert werden:

Nach dem Globalmodeli der Formel 4-25

 $\log HHQ_{Regr} = 0.858 + 0.566 \cdot \log Fn$ 

erhalten wir für die Sense-Laupen einen Schätzwert für HHQ<sub>Regr,Laupen</sub> von 223,7 m<sup>3</sup>/s.

Die oberhalb von Laupen liegende Station Sense-Thörishaus mit einer Gebietsfläche von 352 km<sup>2</sup> verfügt über eine langjährige Messreihe (1928–1990) mit einem beobachteten Höchsthochwasser (*HHQ<sub>boob,Thörlshaus</sub>*) von 495 m<sup>3</sup>/s. Bei Anwendung des Globalmodells (Formel 4-25) ergibt sich ein *HHQ<sub>Regr,Thörlshaus</sub>* von 199.2 m<sup>3</sup>/s. Somit können wir das Residuum, das die Abweichung des beobachteten vom theoretischen, nur flächenabhängigen Höchsthochwasser beschreibt, für die Sense-Thörishaus wie folgt berechnen:

$$r_{Thorishaus} = \log HHQ_{beob, Thorishaus} - \log HHQ_{Rager, Thorishaus} = 0.395$$

 Übertragen wir dieses flächenunabhängige Residuum der Sense-Thörishaus auf die Station Laupen, so erhalten wir als Schätzwert für Q<sub>max</sub>:

 $\log Q_{\max,Loupen} = \log HHQ_{Regr,Loupen} + r_{Th\bar{o}Tshaus} = \log 223.709 + 0.395 = 2.744$ 

 $\Rightarrow Q_{max} \cong 555 \, \text{m}^3/\text{s}$ 

Nach einer Untersuchung von Gees (1996) beträgt der grösste beobachtete Spitzenabfluss der Sense-Laupen 622 m<sup>8</sup>/s (Beobachtungsreihe von 1867 bis 1995). Der Schätzfehler liegt somit bei –11 %.

### g) Anwendungsbeispiele

Die unterschiedlichen Abschätzverfahren für Qmax, Qmax 100% und HHQRegr

- Globalmodelle,
- regional differenzierter Ansatz und
- Übertragung des Residuums einer benachbarten Station

werden nun in den Einzugsgebieten der Sitter-Appenzell, der Emme-Emmenmatt und der Sense-Laupen angewandt, wobei unter den Globalmodellen nur die Verfahren von Hofbauer und Kreps berücksichtigt werden (Tabeilen 4-12 und 4-13). Diese drei Einzugsgeblete wurden ausgewählt, weil ihre Hochwassergeschichte der letzten 130 bis 160 Jahre dank der Untersuchung von Gees (1996) sehr gut dokumentiert ist und auch die grössten, vor den Messungen der Landeshydrologie und -geologie abgelaufenen Hochwasser mittels hydraulischer Berechnungen quantifiziert werden konnten. Die beobachteten Höchsthochwasser (*HHQ*<sub>beob</sub>), an denen wir die Abschätzverfahren im folgenden überprüfen, wurden in den letzten 130 bis 160 Jahren nie überschritten, so dass sie in bezug auf den Grenzwert der Hochwasserspitzen eine sehr hohe Aussagekraft besitzen. Als Nachteil dieser Wahl ergibt sich, dass alle drei Gebiete in der gleichen Hochwasserregion (N2) liegen, in einer Region nota bene, die im gesamtschweizerischen Vergleich sehr grosse Hochwasserspitzen aufweist (vgl. Abbildung 4-21).

Tabelle 4-12: Anwendung unterschiedlicher Verfahren zur Ermittlung der Grenzwerte  $Q_{max}$  und  $Q_{max, 90\%}$  in drei ausgewählten Einzugsgebieten

Table 4-12: Different methods to determine Q<sub>max</sub> and Q<sub>max, 50%</sub> for three selected catchments

|                                                                                                                | Sitter-Appenzell                                                                                                                                                                                                                            | Emme-Emmenmatt                                             | Sense-I        | _aupen                      |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|--|
|                                                                                                                | $Fn=74.2 \text{ km}^2$ , $MQ=3.61 \text{ m}^3/\text{s}$                                                                                                                                                                                     | $Fn = 443 \text{ km}^2$ , $MQ = 12.4 \text{ m}^3/\text{s}$ | Fn= 432 km², / | MQ = 10,2 m³/s              |  |
| Beobachtungen [m³/s]                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                            |                |                             |  |
| HHQ <sub>boob</sub> (Periode)                                                                                  | <b>245</b>                                                                                                                                                                                                                                  | <b>525</b>                                                 | 622            |                             |  |
|                                                                                                                | (1846–1995)                                                                                                                                                                                                                                 | (1837–1995)                                                | (1867–1995)    |                             |  |
| Schätzungen Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s] mit Glo                                                       | balmodellen                                                                                                                                                                                                                                 |                                                            |                |                             |  |
| • Hofbauer ( $a = 42$ ;                                                                                        | 362                                                                                                                                                                                                                                         | 884                                                        | 873            |                             |  |
| s. Abbildung 4-17)                                                                                             | (+48% Abweichung zu <i>HHO<sub>boub</sub>)</i>                                                                                                                                                                                              | (+68%)                                                     | (+40%)         |                             |  |
| • Kreps (s. Abb. 4-17)                                                                                         | 212                                                                                                                                                                                                                                         | 482                                                        | 423            |                             |  |
|                                                                                                                | (-14%)                                                                                                                                                                                                                                      | (-8%)                                                      | (-32%)         |                             |  |
| Schätzungen Q <sub>max</sub> [m³/s] auf der                                                                    | Basis "regionalen Wissens"                                                                                                                                                                                                                  |                                                            |                |                             |  |
| Obertragung des                                                                                                | 239                                                                                                                                                                                                                                         | 427                                                        | 55             | 5                           |  |
| Residuums                                                                                                      | (-2%)                                                                                                                                                                                                                                       | (—19%)                                                     | (-11           | %)                          |  |
| Benachbarte Station                                                                                            | Sitter-Bernhardzell                                                                                                                                                                                                                         | Emme-Eggiwil                                               | Sense-Th       | õrlshaus                    |  |
| Schätzungen Q <sub>max, 80%</sub> [m <sup>3</sup> /s] mit                                                      | dem Modell "GIUB-Q <sub>max</sub> "                                                                                                                                                                                                         |                                                            |                |                             |  |
| <ul> <li>Regional differenziert; in</li></ul>                                                                  | 339                                                                                                                                                                                                                                         | 644                                                        | 636            | 458                         |  |
| Funktion der Gebietstläche                                                                                     | (+38%),                                                                                                                                                                                                                                     | (+23%),                                                    | (+2%),         | (-26%),                     |  |
| (s. Tab. 4-10)                                                                                                 | Region №2                                                                                                                                                                                                                                   | Region N2                                                  | Region N2      | Region N1                   |  |
| <ul> <li>Regional differenziert, In<br/>Funktion des mittleren Jah-<br/>resabflusses (s. Tab. 4-11)</li> </ul> | egional differenziert, In         253         563         496           unktion des mittleren Jah-         (+3%),         (+7%),         (-20%),           esabflusses (s. Tab. 4-11)         Region N2         Region N2         Region N2 |                                                            |                | 320<br>(-49%),<br>Region N1 |  |

HHQ<sub>beob</sub>: Höchste beobachtete Hochwasserspitze nach Gees (1996)

Die Ergebnisse in Tabelle 4-12 lassen sich wie folgt beurteilen:

- Insgesamt am besten angenähert wurden die HHQ-Werte mit der Übertragung des Residuums einer benachbarten Stationen. Die Berücksichtigung des "regionalen Wissens" wirkt sich auf das Ergebnis offenbar vorteilhaft aus. Dies erfordert aber eine sorgfältige Auswahl der repräsentativen Station.
- Die Abschätzungen mit dem Modell "GIUB-Q<sub>max</sub>" ergeben insgesamt bessere Ergebnisse als die Modelle von Hofbauer und Kreps, wobei bei den letzteren die in Abbildung 4-17 ausgewiesenen globalen Parameter übernommen wurden und auf eine regionale Differenzierung, wie sie die beiden Autoren vorsehen, verzichtet wurde. Bemerkenswert ist, dass mit dem Modell von Kreps in den vorliegenden Fällen erstaunlich gute Ergebnisse erzielt werden. Die für diese Modelle benötigten Parameter Gebietsfläche (*Fn*) bzw. Jahresabfluss (*MQ*) sind direkt verfügbar (*Fn*) oder lassen sich über relativ genaue Abschätzverfahren ermitteln (*MQ*, s. Tab. 1-1).
- Bei der Sitter und der Emme (und zum Teil auch bei der Sense) werden die beobachteten HHQ-Werte mit dem Modell "GIUB-Q<sub>max</sub>" stets, aber nicht allzu massiv überschätzt. Dies bestätigt den Grenzwertcharakter dieser Schätzungen.
- An anderer Stelle haben wir bereits darauf hingewiesen, dass eine wichtige Strategie zur Hochwasserabschätzung darin besteht, mehrere Verfahren parallel anzuwenden. Wie die folgende Aufstellung zeigt, können die beobachteten HHQ-Werte durch die arithmetische Mittelung der beiden mit dem Modell "GIUB-Q<sub>max</sub>" durchgeführten Schätzungen sowie des Wertes, den man bei der Übertragung der Residuen erhält, gut bis sehr gut angenähert werden:

| - Sitter: | 277 m³/s | (+13%) |
|-----------|----------|--------|
| - Emme:   | 545 m³/s | (+4%)  |
| - Sense:  | 562 m³/s | (-10%) |

 Am Beispiel der Sense kann gezeigt werden, dass bei den regional differenzierten Ansätzen die Zuordnung einer Station zu einer Hochwasserregion nicht unproblematisch ist: Die Station Sense-Laupen liegt eigentlich in der Region N1, der grösste Teil des Einzugsgebletes aber in der Region N2. Mit den Modellparametern a und b der Region N1 werden schlechte Ergebnisse erzielt, während sich mit den Parametern der Region N2 Resultate ergeben, deren Güte im Bereich der übrigen Abschätzungen liegt.

# h) Abschätzung 100jährlicher Hochwasserspitzen (Modelle "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fπ)" und "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)")

Die über die regional differenzierten Regressionsgleichungen in Funktion der Gebietsfläche bzw. des mittleren Jahresabflusses geschätzten *HHQ<sub>Regr</sub>*-Werte (s. Tabellen 4-10 und 4-11) werden in Tabelle 4-13 mit den "beobachteten" 100jährlichen Abflussspitzen verglichen. Die Tabelle

- verdeutlicht, dass sich die 100j\u00e4hrlichen Abflussspitzen der drei Einzugsgebiete Sitter, Emme und Sense mit dem Sch\u00e4tzwert HHQ<sub>negr</sub> gut bls sehr gut ann\u00e4hern lassen und
- bestätigt somit die auf Wahrscheinlichkeltsüberlegungen beruhende Aussage, dass der HHQ<sub>Regr</sub>.
   Wert im Bereich eines Hochwassers grosser Jährlichkelt einzuordnen ist.

|                    |                                                                                      | Sitter-Appenzell<br>$Fn = 74.2 \text{ km}^2$ , $MQ = 3.61 \text{ m}^3/\text{s}$ | Emme-Emmenmatt<br>$Fn = 443 \text{ km}^2$ , $MQ = 12.4 \text{ m}^3/\text{s}$ | $\frac{\text{Sense-Laupe}}{Fn = 432 \text{ km}^2, MQ =}$ |                               |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Aut Be             | eobachtungen basierender,                                                            | über die Gumbel-Verteilung extr                                                 | rapolierter 100jährlicher Spitzen                                            | abfluss [m³/s]                                           | 1. Carlos and a second second |
| • <b>HQ</b><br>(Pe | neo<br>ariode)                                                                       | <b>210</b><br>(1846–1995)                                                       | <b>443</b><br>(1837–1995)                                                    | <b>462</b><br>(1867–1995)                                |                               |
| Schät              | zungen HHQ <sub>Regr</sub> (m³/s)                                                    |                                                                                 |                                                                              |                                                          |                               |
| in<br>reç<br>(s.   | Funktion der Hochwasser-<br>gion und der Gebietsfläche<br>Tab. 4-10)                 | 181<br>(-14% zu <i>НО<sub>тоо</sub>),</i><br>Reglon N2                          | 474<br>(+7%),<br>Region N2                                                   | 468<br>(+1%),<br>Region N2                               | 274<br>(-41%)<br>Region N1    |
| • in  <br>reg      | Funktion der Hochwasser-<br>gion und des mittleren Jah-<br>sabflusses (s. Tab. 4-11) | 173<br>(-18%)<br>Region N2                                                      | 386<br>(–13%),<br>Region N2                                                  | 340<br>(-26%),<br>Region N2                              | 174<br>(-62%),<br>Region N1   |

Tabelle 4-13: Anwendung unterschiedlicher Verfahren zur Ermittlung von  $HHQ_{Regr}$  in drei ausgewählten Einzugsgebieten Table 4-13: Different methods to determine  $HHQ_{Regr}$  for three selected catchments

Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurde in einem nächsten Schritt untersucht, ob sich die beiden Ansätze allgemein für die Abschätzung 100jährlicher Hochwasserspitzen in schweizerischen Einzugsgebieten eignen. Diesen Eignungstest führten wir in den 69 jeweils zur Modellverifikation beigezogenen Einzugsgebieten durch (Tabelle 4-14). Die Ergebnisse sind sehr ermutigend: Die Güte der Abschätzungen liegt mit einer Trefferwahrscheinlichkeit von rund 65% in der Grössenordnung des Modells "Fuzzy", wobei der Zeitbedarf für die Abschätzung um ein Vielfaches kleiner ist als beim Modell "Fuzzy". Nur rund 5 bis 15% der Abschätzungen sind als unbrauchbar zu bezeichnen. Beachtlich ist insbesondere auch der hohe Anteil exakter Schätzungen beim Modell, das auf dem mittleren Jahresabfluss basiert.

Dieses am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) entwickelte Abschätzverfahren für 100jährliche Spitzenabflüsse wird in der Folge als Modell "GIUB-HQ100" bezeichnet. Eine weitere

Modelldifferenzierung ergibt sich aufgrund der unabhängigen Modellparameter: "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)" und "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)".

Soll nun ein 100jährlicher Hochwasserspitzenabfluss ( $HQ_{100}$ ) abgeschätzt werden, so sind folgende Arbeitsschritte auszuführen:

- 1. Ermittlung der Hochwasserregion, in der sich das Einzugsgebiet befindet (⇔ Abbildung 4-20);
- Bestimmung der regionenspezifischen Parameter a und b f
  ür die Aufstellung der Regressionsgeraden (⇔ Tabelle 4-10);
- 3. Berechnung des HHQ<sub>Reg</sub>-Wertes als Schätzwert für HQ<sub>100</sub>, unter Verwendung der Gebietsfläche des Einzugsgebietes ohne Abflussmessungen als unabhängige Grösse.

Liegen Angaben zum mittleren Jahresabfluss vor, sollte parallel dazu auch das Modell "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)" eingesetzt werden, um die Abschätzung besser abzustützen.

Tabelle 4-14: Beurteilung der Modelle "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)" und "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)" anhand einer Abschätzung der 100jähr-Ilchen Spitzenabflüsse in 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km<sup>2</sup> (Erläuterungen zur Beurteilungstabelle s. Kapitel 4.3.1)

Table 4-14: Assessment of the models "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)" and "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)", based on 100-year peak flow estimates from 69 catchments with areas between 10 and 100 km<sup>2</sup>

|             | Modell "GIUB-HQ <sub>100</sub> (Fn)" |       |            | Modell "GIUB-HQ <sub>100</sub> (MQ)" |         |       | l)"        |       |
|-------------|--------------------------------------|-------|------------|--------------------------------------|---------|-------|------------|-------|
| Güteklasse  | ① (LHG)                              |       | @ (Gumbel) |                                      | ① (LHG) |       | Ø (Gumbel) |       |
|             | h [%]                                | Σ [%] | h [%]      | Σ[%]                                 | h [%]   | Σ [%] | h [%]      | Σ [%] |
| exakt       | 13.0                                 | 13.0  | 20.3       | 20.3                                 | 27.5    | 27.5  | 27.5       | 27.5  |
| genügend    | 49.3                                 | 62.3  | 50.7       | 71.0                                 | 36.3    | 63.8  | 40.6       | 68.1  |
| илдепац     | 27.5                                 | 89.9  | 23.2       | 94.2                                 | 18.8    | 82.6  | 20.3       | 88.4  |
| unbrauchbar | 10.1                                 | 100   | 5.8        | 100                                  | 17.4    | 100   | 11.6       | 100   |

D Vergleich der modellierten Werte mit den von der Landeshydrologie und -geologie (Aschwanden und Spreafico 1995) publizierten Werten

② Vergleich der modellierten Werte mit den mittels der Gumbel-Verteilung zeitlich extrapolierten Werten

h Prozentsatz der Realisierungen In einer Göteklasse

 $\varSigma$  Summenhäufigkeit

#### i) Schlussfolgerungen

Basierend auf einer umfangreichen und in ihrer Art wohl einmaligen Datenbasis ist es gelungen, die räumlichen Variationen der maximalen Hochwasserspitzen mit Hilfe regional-taxonomischer Verfahren zu strukturieren und damit die Abschätzung der Hüllkurven zu verbessern. Die Anwendungsbeispiele haben gezeigt, dass die geschätzten  $Q_{max,00\%}$ -Werte über den *HHQ*-Werten einer 130- bis 150jährigen Beobachtungsreihe liegen.

Interessant ist eine Gegenüberstellung der  $Q_{max,00\%}$ -Werte mit den sogenannten *pmf*-Werten (probable maximum flood), welche den vermutlich grössten Abfluss eines Einzugsgebietes beschreiben. Chaix (1993) führte solche *pmf*-Analysen in den beiden Einzugsgebieten Dischma (*Fn* = 43 km<sup>2</sup>, Kt. Graubünden) und Carassina (*Fn* = 16.5 km<sup>2</sup>, Kt. Tessin) durch. Als erstes berechnete er – basierend auf dem statistisch begründeten Verfahren von Hershfield (1965) und den meteorologischen Untersuchungen von Grebner und Richter (1990) – den maximal möglichen Niederschlag (*pmp*). Mit Hilfe des SCS-Verfahrens zur Abschätzung des Abflussbeiwertes und des Unit-Hydrographen als Übertragungsfunktion schätzte Chaix anschliessend aus dem *pmp* den *pmf*-Wert:

 $Q_{max,00\%}$  ( $Fn = 43 \text{ km}^2$ ): 29 m<sup>3</sup>/s  $Q_{max,00\%}$  ( $MQ = 1.71 \text{ m}^3$ /s): 39 m<sup>3</sup>/s Zum Vergleich: Der 100jährliche Spitzenabfluss des Dischmabachs beträgt rund 20 m<sup>3</sup>/s.

 Beim Einzugsgebiet der Carassina sind die Unterschiede zwischen dem pmf (250 m<sup>3</sup>/s) und dem Q<sub>max,00%</sub> (138 m<sup>3</sup>/s) weniger krass.

Bei den *pmf*-Werten von Chaix handelt es sich also um sehr grosse Spitzenabflüsse, welche physikalisch allerdings schlecht abgestützt sind und sich deshalb nicht abschliessend beurteilen lassen. Sie besitzen eine Grössenordnung, die vor allem für Sicherheitsüberlegungen im Talsperrenbau relevant sein dürften.

Bei den in diesem Kapitel diskutierten regional-taxonomischen Modellen stand ein empirisch festgelegter Grenzwert  $Q_{max}$  bzw.  $Q_{max,90\%}$  im Mittelpunkt, der sich im Bereich der Jährlichkeiten der *HHQ*-Werte der längsten in der Schweiz verfügbaren Messreihen bewegt: Er lässt sich deshalb als realistischer Grenzwert für Dimensionierungsfragen der täglichen Praxis einsetzen. Mit den Modellen "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)" und "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)" ist es gelungen, 100jährliche Spitzenabflüsse mit einer Genauigkeit abzuschätzen, die im Bereich anderer, komplexerer Verfahren liegt (vgl. Kapitel 4.6).

Insgesamt belegen die in Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 vorgestellten Modelle, dass sich regional-taxonomische Verfahren – trotz der eingangs geäusserten Bedenken – für den Einsatz im Hochwasserbereich durchaus eignen.

# 4.5 Hochwasserabschätzung in mesoskaligen Einzugsgebieten mit kurzen Messreihen (Modell "Unit Hydrograph")

### 4.5.1 Das Unit-Hydrograph-Verfahren

Bei der Hochwasserbemessung in Einzugsgebieten, welche über kurze Messreihen verfügen, sollten die Informationen über die beobachteten Hochwasserereignisse unbedingt mitberücksichtigt werden (vgl. u.a. NERC 1975). Mit dem Unit-Hydrograph-Verfahren besteht für diese Fälle ein relativ einfacher, praxisgerechter Ansatz, dessen Eignung für mesoskalige schweizerische Einzugsgebiete nachstehend analysiert und diskutlert wird<sup>14</sup>.

Beim Unit-Hydrograph-Modell, ursprünglich von Sherman (1932) konzipiert, wird das Einzugsgebiet als "Black-Box" betrachtet. Die Systemerregung und die Charakteristik des Systems bestimmen die Systemreaktion vollständig. Zwischen der Systemerregung und der Systemantwort besteht eine Verknüpfung, die als Übertragungsfunktion bezeichnet wird. Wird der verursachende Effektivniederschlag ( $r_w$ ) als Folge von Deltaimpulsen, deren Dauer gegen 0 geht, aufgefasst, so lässt sich der Direktabfluss ( $Q_D$ ) bei Kenntnis des "Instantaneous Unit Hydrograph" durch das in der Formel 4-28 beschriebene Faltungsintegral berechnen (Chow, Maidment und Mays 1988):

$$Q_{D}(t) = \int_{0}^{t} u(t - \tau) \cdot r_{\omega}(\tau) d\tau$$

$$Q_{D} \qquad \text{Direktabfluss}$$

$$r_{w} \qquad \text{abflusswirksamer Niederschlag}$$

$$u \qquad \text{Übertragungsfunktion ("Instantaneous Unit Hydrograph")}$$

$$(4-28)$$

*τ* Zeitpunkt des Niederschlagsinputs

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Diese Untersuchung wurde vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung des wissenschaftlichen Arbeitens finanziell unterstützt (s. Weingartner 1989).

Im diskreten Fall, bei dem der Niederschlag durch Rechtecksimpulse beschrieben wird, führt das Faltungsintegral auf ein lineares Gleichungssystem mit (n+m-1) Gleichungen. Dabei wird die *I*-te Ordinate des Direktabflusses nach Formel 4-29 berechnet.

$$Q_{D_{i}} = dt \sum_{j=1}^{m} \left( u_{i-j+1} \cdot r_{w(j)} \right) \qquad (filr \ 0 < i-j+1 < n)$$
(4-29)

| QD | Ordinaten des Direktabflusses [m³/s]                   |
|----|--------------------------------------------------------|
| 14 | Ordinaten des Unit Hydrographen [m <sup>3</sup> /s mm] |
| rw | abflusswirksamer Niederschlag [mm/h]                   |
| dt | Zeitschritt [h]                                        |
| m  | Anzahl Niederschlagsintervalle ( $j = 1, 2,, m$ )      |
| n  | Anzahl Ordinaten des Unit Hydrographen                 |
| i  | Laufindex des Direktabflusses                          |

Die Ganglinie des Direktabflusses ergibt sich aus der Superposition von Einzelwellen, die je aus einem Intervali des abflusswirksamen Niederschlags entstanden sind und deren Ordinaten sich durch die Multiplikation der Unit-Hydrograph-Ordinaten mit der Grösse des abflusswirksamen Niederschlages bestimmen lassen.

Im Analysefall, bei dem der für ein bestimmtes Geblet repräsentative Unit Hydrograph ermittelt wird, werden die Ordinaten des Unit Hydrographen aus den gemessenen Niederschlägen und der beobachteten Hochwasserwelle hergeleitet. Dazu muss das (m-1)-fach überbestimmte Gleichungssystem, das nach Formel 4-29 aufgebaut wird, gelöst werden. Im Synthesefall, also bei der Hochwasserbemessung, wird die Ganglinie des Direktabflusses aus dem Bemessungsniederschlag und dem repräsentativen Unit Hydrographen berechnet.

Jedes Niederschlag/Abfluss-Modell (N/A-Modell) stellt eine Abstraktion der tatsächlich ablaufenden Prozesse dar; deshalb wird es immer Abweichungen zwischen den Modellierungsergebnissen und den Naturmessungen geben. Das Ausmass dieser Abweichungen wird von vielen Rahmenbedingungen, vor allem aber von der Modellwahl und den damit zusammenhängenden Vereinfachungen beeinflusst (vgl. Abbildung 1-1). Beim Unit-Hydrograph-Modelt werden insbesondere folgende vereinfachende Annahmen getroffen: Die Übertragungsfunktion zwischen Eingabe (Niederschlag) und Antwort (Abfluss) ist linear und zeitinvariant. Die Zeitinvarianz bedeutet, dass die Systemantwort vom Zeitpunkt der Eingabe unabhängig ist. Wegen der Linearität der Übertragungsfunktion gilt das vorhin erwähnte Superpositionsprinzip: Die Reaktion eines Systems auf mehrere Eingangssignale (Niederschlag) kann durch die Übertagerung der Einzelreaktionen (Unit Hydrographen) ermittelt werden. Die meisten hydrologischen Systeme sind zwar nicht-linear und zeitvariant (Jaton 1984); trotzdem zeigt es sich immer wieder, dass auch lineare und zeitinvariante Modelle wie der Unit Hydrograph zu tauglichen Ergebnissen führen können (Aschwanden und Spreafico 1989).

Mit der hier vorgestellten Eignungsprüfung soll untersucht werden, inwieweit sich das Unit-Hydrograph-Verfahren trotz dieser Vereinfachungen zur Hochwasserbemessung in mesoskaligen Einzugsgebleten eignet. Dazu müssen auch wichtige Kenngrössen eines N/A-Ereignisses wie die Vorgeschlchte oder der Abflussbeiwert untersucht werden.

Die Analysen führten wir in siebzehn schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 5 und ca. 200 km<sup>2</sup> durch. Diese Gebiete verfügen über gut dokumentierte und zeitlich hochauflösende Niederschlags- und Abflussmessungen. Die gewählte Gebietsgrösse soll eine gewisse naturräumliche Homogenität gewährleisten. Wie Tabelle 4-15 mit der Spalte "Regimetyp" belegt, repräsentieren diese im folgenden als "Untersuchungsgebiete" bezeichneten Einzugsgebiete das hydrologische Spektrum der Schweiz recht gut.

| Flussgebiet | Untersuchungsgebiet     | Fläche [km²] | mittlere<br>Gebletshöhe (m) | Regimetyp <sup>1)</sup> | Untersuchungsperiode/<br>Anzahl analysierter Hoch-<br>wassererelgnisse |
|-------------|-------------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Rhein       | Hinterrhein-Hinterrhein | 53.7         | 2360                        | glacio-nival            | 1980-85/17                                                             |
|             | Murg-Fravenfeld         | 212          | 580                         | pluvial inférieur       | 1977-85/26                                                             |
| Aare        | Allenbach-Adelboden     | 28.8         | 1856                        | nival                   | 1985/7                                                                 |
|             | Gürbe-Belp              | 124          | 837                         | pluviai supėrieur       | 1975-84/29                                                             |
|             | Mentue-Dommartin        | 12.5         | 831                         | pluvial jurassien       | 1977-80/13                                                             |
|             | Mentue-Yvonand          | 105          | 679                         | pluvia) jurassien       | 1977-80/22                                                             |
|             | Emme-Eggiwil            | 102          | 1330                        | nivo-pluvial préalpin   | 1968-72/17                                                             |
|             | Langeten-Huttwil        | 59.9         | 766                         | pluvial inférieur       | 1975-80/14                                                             |
|             | Rot-Roggwil             | 53.6         | 586                         | pluvial inférieur       | 1982-85/17                                                             |
| Reuss       | Chli Schliere-Alpnach   | 21.8         | 1366                        | nival de transition     | 197885/16                                                              |
| Limmat      | Beerenbach-Amden        | 5.6          | 1470                        | nival de transition     | 1982-85/15                                                             |
|             | Steinenbach-Kallbrunn   | 19.1         | 1112                        | nivo-pluvial préalpin   | 1982-85/15                                                             |
|             | Eubach-Euthal           | 9.0          | 1216                        | nívo-pluvial préalpin   | 1983-84/10                                                             |
| Rhône       | Grande Eau-Algle        | 132          | 1560                        | nival de transition     | 1981-85/18                                                             |
| Ticlno      | Cassarate-Pregassona    | 73.9         | 990                         | pluvio-nivai méridional | 1963-83/37                                                             |
| Adda        | Faloppia-Chiasso        | 27.3         | 342                         | pluvial méridional      | 1970-79/17                                                             |
|             | Breggia-Chiasso         | 47.4         | 937                         | pluvio-nival méridional | 1972-80/24                                                             |

Tabelle 4-15: Untersuchungsgebiete der Unit-Hydrograph-Analyse Table 4-15: Test basins for unit hydrograph analysis

1) nach Aschwanden und Weingartner (1985)

Der Unit-Hydrograph-Ansatz eignet sich vor allem für die Modellierung eingipfliger Hochwasserwellen; deshalb wurden für die Analysen ausschliesslich eingipflige Hochwasserereignisse berücksichtigt. Wenn man aber bedenkt, dass oft gerade mehrgipflige Ereignisse zu den grössten Spitzenabflüssen führen, so sind bei dieser Auswahl sicherlich gewisse Vorbehalte angebracht. Insgesamt wurden über 300 N/A-Ereignisse untersucht und deren Unit Hydrographen berechnet.

# 4.5.2 Analyse wichtiger Parameter der N/A-Ereignisse

### a) Vorgeschichte und Anfangsbedingungen

Der Ablauf eines Hochwasserereignisses wird vom Zustand der abflussrelevanten Speicher bei Ereignisbeginn beeinflusst (vgl. z.B. Naef, Scherrer und Zurbrügg 1999). Zur Charakterisierung dieser Anfangsbedingungen werden oftmals Vorregensummen wie  $VN_s$  und Vorregenindizes wie  $VN_2$ , beigezogen:

$$VN_{5} = \sum_{i=1}^{5} N_{i}$$

$$VN_{21} = \sum_{i=1}^{21} k^{i} \cdot N_{i}$$
(4-30)
(4-31)

| Ν | Tagesniederschlag [mm]         |
|---|--------------------------------|
| i | Tag vor dem Hochwasserereignis |
| k | Koeffizient $k < 1$            |

Verschiedene Studien verdeutlichen nun aber, dass sich diese Parameter nicht eignen, weil sie die Anfangsbedingungen zu pauschal umschreiben (Weingartner 1989, Barben und Weingartner 1995). Deshalb wurde in einer Untersuchung im Wildbacheinzugsgebiet des Rotenbachs (Fläche: 1.6 km<sup>2</sup>, Kanton Freiburg) beispielhaft versucht, die Anfangsbedingungen von Hochwasserereignissen mit dem Bilanzmodell BROOK von Federer und Lash (1978) physikalisch plausibel zu beschreiben (Barben 1995). Mit dem BROOK-Modell lassen sich die Schwankungen des Sättigungsdefizits der relevanten Speicher – Insbesondere jene des Bodenspeichers – auf Tagesbasis erfassen (vgl. Abbildung 1-6). Vergleiche mit real beobachteten Bodenwasserständen bestätigten die Plausibilität der modellierten Werte, so dass die Frage des Zusammenhangs zwischen den Anfangsbedingungen eines Hochwasserereignisses und dem Spitzenabfluss ( $Q_{max}$ ) differenzierter als mit den Vorregenparametern angegangen werden konnte. Als Grundlage zur Beantwortung dieser Frage wurden die Korrelationen zwischen den Spitzenabflussmengen und den folgenden Parametern berechnet (Tabelle 4-16):

- Sättigungsdefizit des Bodenspeichers (Sādef), modelliert mit dem BROOK-Modell,
- Niederschlagssumme des auslösenden Ereignisses (N<sub>sum</sub>),
- maximale Intensität des auslösenden Ereignisses (rmax).

Tabelle 4-16: Korrelationen zwischen der Spitzenabflussmenge ( $Q_{max}$ ) und wichtigen Rahmenparametern von je 18 kurzen und langen Hochwasserereignissen im Rotenbach. Bei den ausgewählten Ereignissen handelt es sich um die grössten, ausserhalb der Schneeschmeizperiode aufgetretenen Hochwasser mit Spitzenabflüssen von mehr als 2 m<sup>3</sup>/s ( $r_{sigh}$  ( $\alpha = 5\%$ ) = 0.47)

Table 4-16: Correlation between peak discharge ( $Q_{max}$ ) and important parameters for long ("lange Hochwasserereignisse") and short duration ("kurze Hochwasserereignisse") events in the Rotenbach catchment

| Korrelatione<br>mit Scheitel | n bei langen Hochwasserereignissen<br>anstiegszeiten über fünf Stunden: | Korrelationen bei kurzen Hochwasserereignissen<br>mit Scheitelanstlegszeiten unter fünf Stunden: |  |  |  |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
|                              | Qmax                                                                    | Q <sub>ma</sub>                                                                                  |  |  |  |
| N <sub>sun</sub>             | 0.20                                                                    | N <sub>sum</sub> 0.68                                                                            |  |  |  |
| r <sub>max</sub>             | 0.53                                                                    | <i>Г<sub>пал</sub></i> 0.36                                                                      |  |  |  |
| Sädef                        | -0.09                                                                   | Sădel 0.60                                                                                       |  |  |  |

Die Analysen zeigten, dass sich die Anfangsbedingungen je nach Ereignistyp ganz unterschiedlich auf den Ablauf der Hochwasserereignisse im Rotenbach auswirken:

- Bei längeren Ereignissen übt das Sättigungsdefizit im Boden keinen signifikanten Einfluss auf den Spitzenabfluss aus. Die Niederschlagsmengen der beobachteten grössten Hochwasserereignisse genügten stets, um das - allerdings nicht allzu grosse - Sättigungsdefizit zu decken. In diesen Fällen wirkt das Sättigungsdefizit vor allem abflussverzögernd. Die Grösse der Abflussspitzen wird auch durch die maximale Niederschlagsintensität (*r<sub>max</sub>*) beeinflusst, wie aus der signifikanten Korrelation zwischen *r<sub>max</sub>* und *Q<sub>max</sub>* hervorgeht. In Abbildung 4-23 (links) ist ein charakteristisches Ereignis dieses Typs dargestellt.
- Grundsätzlich verschieden sind die Verhältnisse bei den Hochwasserereignissen mit kurzen Anstiegszeiten: Grosse Aufmerksamkeit verdient die positive (!) Korrelation zwischen dem Sättigungsdefizit und der Abflussspitze: Je höher das Sättigungsdefizit, um so höher fällt die Abflussspitze aus. Die Wasserleitfähigkeit des Bodens nimmt mit abnehmendem Wassergehalt ab. Das bedeutet, dass ein vor Ereignisbeginn eher trockener Boden eine verhältnismässig kleine Infiltrationskapazität aufweist, so dass die hohen Niederschlagsintensitäten dieses Typs die Infiltrationskapazität aufweist, so dass die hohen Niederschlagsintensitäten dieses Typs die Infiltrationskapazitäten mindestens zeitweilig überschreiten und lokal einen oberflächlichen bis oberflächennahen Abfluss verursachen. Dabei ist aber auch in Betracht zu ziehen, dass nach längeren Trokkenperioden in der tonigen Bodenmatrix des Rotenbach-Gebletes Schwundrisse entstehen können, die als bevorzugte, schnelle Wasserwege dienen. Abbildung 4-23 (rechts) zeigt ein für diesen Typ charakteristisches N/A-Erelgnis, bei dem der Abfluss unmittelbar nach Niederschlagsbeginn einsetzt.



Abbildung 4-23: Charakteristische Hochwasserereignisse im Kleingebiet Rotenbach (Datenquelle: WSL) Figure 4-23: Characteristic flood events in a sub-catchment of the Rotenbach river

Aufgrund dieser Untersuchungen basiert das "worst-case"-Szenario mit maximalen Hochwasserspitzen im Wildbacheinzugsgebiet des Rotenbachs auf jenem Ereignis, bei dem grosse Niederschlagsmengen auf einen stark ausgetrockneten Boden fallen.

Wie dieser Exkurs belegt, können vertiefte Kenntnisse über die Anfangsbedingungen von Hochwasserereignissen zu einem besseren Verständnis der N/A-Prozesse beitragen. Dazu sind allerdings recht aufwendige Modellierungsarbeiten notwendig, welche den Rahmen räumlich breit angelegter, regionalhydrologischer Analysen sprengen. Mit einfachen Parametern wie  $VN_{\delta}$  oder  $VN_{2\tau}$  lassen sich die Anfangsbedingungen von Hochwasserereignissen nicht befriedigend beschreiben. Sie werden deshalb im folgenden nicht mehr weiter berücksichtigt.

### b) Abflussbeiwert

Zur Analyse der räumlich-zeitlichen Variationen der Abflussbeiwerte standen uns rund 300 N/A-Ereignisse aus den siebzehn in Tabelle 4-15 aufgeführten Untersuchungsgebieten zur Verfügung. Die Beiwerte wurden über den Quotienten aus Direktabflussvolumen und Gesamtniederschlag berechnet. Für die Bestimmung des Direktabflusses wurde der Baslsabfluss linear abgetrennt.

|               | 0.1                                     | 0,2     | 0,3         | 0.4 | 0.5 | Beiwert |
|---------------|-----------------------------------------|---------|-------------|-----|-----|---------|
| Hinterrhein   | \$1111111111111111111111111111111111111 | <i></i> |             |     | •   |         |
| Allenbach     |                                         |         | +           |     |     |         |
| Langeten      | Kana kana kana kana kana kana kana kana |         |             |     |     |         |
| Mentue-D.     |                                         |         | +           |     |     |         |
| Mentue-Y.     | <b>7</b> 111110511111                   |         |             |     |     |         |
| Beerenbach    |                                         |         | 1198/////3. |     |     |         |
| Chli Schliere |                                         |         |             |     |     |         |
| Eubach        |                                         |         |             |     | ł.  |         |

Abflussbeiwert des grössten beobachteten Hochwassers (nach Naef et al. 1988)
 Variationsbreite der Abflussbeiwerte der analysierten N/A-Ereignisse

Abbildung 4-24: Streuung der Abflussbeiwerte in ausgewählten Untersuchungsgebieten Figure 4-24: Variation of runoff coefficients of selected catchments Die berechneten Abflussbeiwerte unterliegen erwartungsgemäss sehr grossen zeitlichen und räumlichen Schwankungen, wie dies Abbildung 4-24 beispielhaft belegt. Diese Schwankungen sind weitgehend nicht erklärbar. So zeigten Korrelationsanalysen eine geringe Sensitivität des Abflussbeiwertes auf Schwankungen der Niederschlagsparameter "Gesamtmenge", "Niederschlagsintensität" und "Niederschlagsdauer". Interessant ist der Vergleich zwischen den Beiwerten der analysierten "gewöhnlichen" Hochwasser mit Jährlichkeiten unter zehn Jahren und dem Beiwert des grössten beobachteten Hochwassers. Die Beiwerte der extremen Hochwasser unterscheiden sich - mit Ausnahme jener der beiden alpinen Einzugsgebiete Hinterrhein und Allenbach - nicht oder nur unwesentlich von den Beiwerten gewöhnlicher Hochwasserereignisse (Abbildung 4-24).

Aus dieser kurzen Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse einer Teilstudie im Rahmen der Untersuchung von Weingartner (1989) geht deutlich hervor, dass die entscheidenden Prozesse der Abflussbildung nach wie vor nicht verstanden werden. Dementsprechend schwierig ist es im Bemessungsfall, den Abflussbeiwert zu schätzen. Populäre Verfahren wie der SCS-Ansatz täuschen eine Genauigkeit vor, die zu gefährlichen Fehlschlüssen führen können. Es erstaunt daher nicht, dass Naef (1993) vorschlägt, den Abflussbeiwert bei der Hochwasserbemessung "als Zufallszahl mit einer vorgegebenen Verteilung" zu behandeln. In diese Richtung geht die Analyse von Gottschalk und Weingartner (1998). Die Autoren entwickelten ein Verfahren, um über die Verteilungsfunktionen des Niederschlags und des Abflussbeiwertes sowie unter Belzug des Unit Hydrographen das Hochwasserverhalten eines Einzugsgebietes zu charakterisieren.

# 4.5.3 Ermittlung des repräsentativen Unit Hydrographen

Die bei der Analyse aus den beobachteten N/A-Ereignissen abgeleiteten Unit Hydrographen eines Einzugsgebietes unterscheiden sich deutlich, wie das Beispiel der Unit Hydrographen der Chli Schliere in Abbildung 4-25 beweist. Der gebietsspezifische Unit Hydrograph existiert nicht. Deshalb rückt die Frage der Ereignisabhängigkeit der Unit Hydrographen in den Mittelpunkt des Interesses. Diese wurde bereits in anderen Arbeiten diskutiert und grundsätzlich anerkannt (z.B. Koehler 1971). Lutz (1984) fand einen Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität, der Jahreszeit und dem Abflussbeiwert auf der einen Seite, der Scheitelanstiegszeit des Unit Hydrographen auf der anderen Seite. Plate (1973) weist aber auch darauf hin, dass die Unterschiede der Unit Hydrographen teilweise durch Messungenauigkeiten und ungenügend erfüllte Modellannahmen (Zeitinvarianz, Linearität) beeinflusst werden.



Abbildung 4-25: Schwankungen der Unit Hydrographen<sup>15</sup> der Chli Schliere-Alpnach in Abhängigkeit der Niederschlagsdauer N<sub>D</sub>

Figure 4-25: Variations of unit hydrographs for the Chli Schliere river as a function of precipitation duration (No)

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Die Dimension der UH-Ordinate ist [1/h] bzw. [mm/h·mm]. Die Umrechnung der Dimension [1/h] in die Dimension [m<sup>s</sup>/s·mm] (Direktabfluss pro mm Niederschlag) wird wie folgt durchgeführt: (1/h) • (Fn [km<sup>2</sup>]/3.6)
Zur Klärung der Ereignisabhängigkeit der Unit Hydrographen führten wir in jedem der siebzehn Untersuchungsgebiete eine Korrelationsanalyse durch, bei der die Unit-Hydrograph-Parameter "Scheitelanstiegszeit", "maximale Ordinate" und "Basislänge" den Ereignisparametern "Niederschlagssumme", "Niederschlagsintensität", "Niederschlagsdauer" und "Abflussbeiwert" gegenübergestellt wurden. Dabei zeigte sich die herausragende Bedeutung der Niederschlagsdauer. Mit ihr lässt sich die Verflachung und Verlängerung der Unit Hydrographen gut erklären, wie dies Abbildung 4-25 veranschaulicht. Es liegt aber in der Natur der N/A-Ereignisse begründet, dass damit nicht die gesamte Streuung der Unit Hydrographen erklärbar ist.

Die Form des Unit Hydrographen zeigt, wie die einzelnen Niederschlagsimpulse im Mittel auf den Abfluss übertragen werden. Schnell und steil anstelgende, markante Unit Hydrographen, wie sie in der Regel bel kurzer Niederschlagsdauer auftreten, sprechen für eine schnelle Übertragung des Niederschlags in den Abfluss. Eine verzögerte Übertragung ist hingegen bei den weniger ausgeprägten, "rundlichen" Unit Hydrographen zu erwarten. Der Interpretationsversuch dieser ereignisabhängigen Variationen des Unit Hydrographen in Abbildung 4-26 lehnt sich an das Konzept der beitragenden Flächen an und schliesst Beobachtungen mit ein, wie wir sie in Abbildung 4-23 gemacht haben: Bei kurzen, intensiven Niederschlägen setzt der Abfluss aus den gerinnenahen, hydraulisch mit den Fliessgewässern verbundenen Flächen sofort ein. Die Übertragung des Niederschlags in den Abfluss erfolgt ohne grosse Verzögerung; es resultieren markante Unit Hydrographen. Mit zunehmender Dauer des Niederschlags dehnen sich die beitragenden Flächen aus, indem das Sättigungsdefizit der Böden der gewässerferneren Teile eines Einzugsgebietes allmählich gedeckt wird. Diese Retentionseffekte führen zu einer insgesamt gedämpften und verzögerten Umsetzung des Niederschlags in dem Abfluss und damit zu einem rundlichen Unit Hydrographen.



Abbildung 4-26: Interpretation der Ereignisabhängigkeit des Unit Hydrographen mittels des Konzepts der beitragenden Flächen. D: kurzes Niederschlagsereignis, D: längeres Niederschlagsereignis

Figure 4-26: Interpretation of event dependancy of the unit hydrograph using the concept of contributing areas; (0): short duration precipitation, (0): long duration precipitation

Wegen der ausgeprägten Ereignisabhängigkeit weisen die Unit Hydrographen nur eine geringe Allgemeingültigkeit auf. Es stellt sich deshalb die Frage, wie man zu einem für die praktische Anwendung geeigneten repräsentativen Unit Hydrographen gelangt. Eine Umschau in der Literatur zeigt, dass repräsentative Unit Hydrographen öfters durch die Mittelung der Unit Hydrographen eines Gebietes bestimmt werden. Ein alternativer Weg könnte über die Konzentrationszeit eines Einzugsgebietes (*t<sub>e</sub>*) führen, welche die längste Fliesszeit in einem Gebiet beschreibt. Bei einer Niederschlagsdauer, die der Konzentrationszeit entspricht, werden normalerweise die höchsten Spitzenabflüsse erzeugt. Da die Unit Hydrographen wesentlich von der Niederschlagsdauer abhängen, kann deshalb der Unit Hydrograph jenes Ereignisses als repräsentativ angesehen werden, dessen Niederschlagsdauer der Konzentrationszeit am nächsten kommt. Der springende Punkt liegt nun in der Ermittlung der Konzentrationszeit te. Chow, Maidment und Mays (1988) vermitteln einen umfassenden Überblick über Formeln zur Berechnung der Konzentrationszeit. In der Praxis weit verbreitet ist der Ansatz von Kirpich (1940), der im wesentlichen auf den beiden Gebietskenngrössen "Länge des Einzugsgebietes" und "mittleres Fliessgefälle" beruht und davon ausgeht, dass der Regen sofort oberflächlich abfliesst; er klammert damit Retentionseffekte im Hang weitgehend aus. Mit der Kirplch-Formel werden die Konzentrationszeiten vor allem kleiner Einzugsgebiete stark unterschätzt, so dass Widmoser (1978) empfiehlt, diese Formel nur für eine grobe Schätzung der Fliesszeiten zu verwenden. In der in Kapitel 4.3.5 vorgestellten Untersuchung von Kölla (1986) wurde ein differenzierterer, auf schweizerische Einzugsgebiete zugeschnittener, auf dem Konzept der beitragenden Flächen basierender Ansatz zur Bestimmung von te entwickelt, der in der Folge zur Ermittlung der repräsentativen Unit Hydrographen verwendet wurde. Dabei wird die Konzentrationszeit in eine Benetzungszeit  $(t_1)$  und eine effektive Fliesszeit im Gerinne  $(t_2)$  aufgeteilt. Für die Berechnung der Parameter t, und t, werden, wie in Kapitel 4.3.5 vorgestellt, Angaben zur Grösse der beitragenden Fläche, zum erforderlichen Benetzungsvolumen und zum Starkniederschlagsgeschehen benötigt. Als repräsentativ wird dann der Unit Hydrograph jenes Ereignisses gewählt, dessen Niederschlagsdauer der nach Kölla (1986) berechneten Konzentrationszeit am nächsten kommt.



Abbildung 4-27: Vergleich der repräsentativen Unit Hydrographen der Untersuchungsgebiete Figure 4-27: Comparison of representative unit hydrographs from the test catchments

Der Vergleich der repräsentativen Unit Hydrographen der siebzehn Untersuchungsgebiete in Abbildung 4-27 lässt deutlich vier Gruppen erkennen. Es wurde versucht, diese Gruppierung mit Gebietskenngrössen zu erklären, um die Basis für die Bestimmung eines repräsentativen Unit Hydrographen in einem ungemessenen Einzugsgebiet zu legen (Weingartner 1989). Für die Streuung der repräsentativen Unit Hydrographen scheinen Kenngössen wie die Form und das Wasserspelcherungsvermögen eines Einzugsgebietes eine wichtige Rolle zu spielen. Um zu einer abschliessenden Aussage zu gelangen, sind allerdings noch weitergehende Analysen notwendig. Wir behandeln hier aber nur den Fall jener Einzugsgebiete, In denen sich über elnige gemessene N/A-Ereignisse ein repräsentativer Unit Hydrograph gewinnen lässt, auf dessen Basis dann die Hochwasserabschätzung durchgeführt werden kann.

## 4.5.4 Hochwasserbemessung (Synthese)

Ziel der Bemessung ist es, den Spitzenabfluss und die Ganglinie eines HochwasserereignIsses der Jährlichkeit 7 auf der Basis des Unit-Hydrograph-Verfahrens zu schätzen. Der Bemessungsansatz geht von der Annahme aus, dass ein 7-jährliches Hochwasser von einem Niederschlag derselben Jährlichkeit erzeugt wird. Dieser Zusammenhang zwischen den Jährlichkelten des auslösenden Niederschlags und dem resultierenden Hochwasserspitzenabfluss ist in der Realität allerdings eher selten gegeben (Naef, Kölla und Zuidema 1986).

Im folgenden werden die wichtigsten Punkte der einzelnen Bemessungsschritte kurz erläutert und am Beispiel einer Abschätzung der 20jährlichen Hochwasserspitze des Eubachs in Euthal (Kanton Schwyz; Fläche 9 km<sup>2</sup>) vorgestellt. Es würde hier allerdings zu weit führen, das Abschätzverfahren in allen Details zu diskutieren (s. Weingartner 1989).

# a) Bestimmung der Konzentrationszeit, des Bemessungsniederschlags und des repräsentativen Unit Hydrographen

Die Berechnung der Konzentrationszeit und des Bemessungsniederschlags erfolgt nach dem in Kapitel 4.3.5 vorgestellten Verfahren nach Kölla (1986); es sei auf das Berechnungsbeispiel "Taschinasbach" verwiesen.

Der repräsentative Unit Hydrograph wird von jenem N/A-Ereignis übernommen, das der Konzentrationszeit am nächsten kommt.

1. Abschätzung der beitragenden Flächen ( $FL_{e^{H(20)}}$ ) und der Fliesszeit im Gerinne ( $t_2$ ) nach Kölla (1986):

 $\mathscr{K}$   $FL_{eff(20)} = 6.33 \text{ km}^2 \Rightarrow t_{2(20)} = 1.5 \text{ h}$ 

2. Interaktive Berechnung der Benetzungszeit ( $t_r$ ), der Konzentrationszeit ( $t_c$ ) sowie der massgebenden Niederschlagsintensität ( $r_{20}$ ):

 $\cancel{K} t_{1(20)} = 1.6 \text{ h}, t_c = 3.1 \text{ h}, r_{20} = 22 \text{ mm/h}.$ 

Somit wird bei der Bemessung von einem 3-stündigen Blockregen mit einer Intensität von 22 mm/h ausgegangen.

3. Die Tabelle 4-17 enthält eine Übersicht über charakteristische Unit Hydrographen des Eubachs:

Ereignisses Nr. 3 wird als repräsentativ gewählt, weil er der Konzentrationszeit von 3.1 h am nächsten kommt. In Tabelle 4-18 sind die Ordinaten dieses repräsentativen Unit Hydrographen zusammengestellt.

Tabelle 4-17: Charakteristische N/A-Ereignisse des Eubachs in Euthal ( $VN_5$ : Vorregenindex,  $Q_{max}$ : Abflussspitze,  $QD_{max}$ : grösste Direktabflussmenge,  $u_{max}$ : maximale Ordinate des Unit Hydrographen)

| Nr. | Niederschlag |               |                             |                    | Abfluss                    |                             |         | Ŭ                              | Datum                    |                   |         |
|-----|--------------|---------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|--------------------------------|--------------------------|-------------------|---------|
|     | Dauer [h]    | Menge<br>[mm] | max, Inten-<br>sität (mm/h) | <i>VN₅</i><br>[mm] | 0 <sub>лех</sub><br>[m³/s] | 0D <sub>max</sub><br>[m³/s] | Beiwert | <i>Ա<sub>տա</sub></i><br>[1/h] | Scheitel-<br>anstieg [h] | Basislänge<br>[h] |         |
| 1   | 1.0          | 14.5          | 20.6                        | 16                 | 18.2                       | 17.9                        | 0.58    | 1.004                          | 1.0                      | 5.0               | 24.6.83 |
| 2   | 1.5          | 13.6          | 13.2                        | 47                 | 5.31                       | 4.88                        | 0.27    | 0.645                          | 1.0                      | 6,0               | 3,7.84  |
| 3   | 2.0          | 13,5          | 10.4                        | 41                 | 6.54                       | 6.03                        | 0.46    | 0.444                          | 1,0                      | 6.0               | 28.6.83 |
| 4   | 4.5          | 20.5          | 7.6                         | 61                 | 6.49                       | 4.89                        | 0.33    | 0.508                          | 1.0                      | 6.0               | 16.9.84 |

Table 4-17: Characteristic precipitation/runoff events in the Eubach catchment

| / [h] | # [m <sup>8</sup> /s mm] | u [1/h] |
|-------|--------------------------|---------|
| 0     | 0                        | 0       |
| 0.5   | 0,454                    | 0.184   |
| 1.0   | 1.098                    | 0.444   |
| 1.5   | 0.953                    | 0.385   |
| 2.0   | 0.593                    | 0.240   |
| 2.5   | 0.488                    | 0.197   |
| 3.0   | 0.398                    | 0.161   |
| 3.5   | 0.323                    | 0.131   |
| 4.0   | 0.244                    | 0.099   |
| 4.5   | 0.164                    | 0.066   |
| 5.0   | 0.119                    | 0.048   |
| 5.5   | 0.112                    | 0.045   |
| 6.0   | 0.069                    | 0.001   |
| 6.5   | 0                        | 0       |

 Tabelle 4-18: Ordinaten des repr

 repr

 an Tabelle 4-17)

 Table 4-18: Ordinates of the unit hydrograph representative of the Eubach catchment



0.52 HQ-DISP

+ HQ-DISP

Abflussbelwert des grössten und zweitgrössten Hochwasserereignisses

Abbildung 4-28: Die Abflussbeiwerte der zwei grössten beobachteten Hochwasserereignisse im Vergleich mit der Hochwasserdisposition (*HQ-DISP*). Zur besseren Lesbarkeit der Graphik wurden die beiden Abflussbeiwerte durch eine Gerade verbunden

Figure 4-28: Runoff coefficients of the two largest floods, compared with the flood potential (HQ-DISP)

#### b) Festlegung des Abflussbeiwerts

Die Kenntnisse über die räumlichen und zeitlichen Variationen der Abflussbeiwerte sind, wie wir in dieser Arbeit schon mehrfach erwähnt haben, sehr bescheiden. Deshalb ist es beim Vorliegen einzelner Messungen wohl am naheliegendsten, den grössten Abflussbeiwert der gemessenen N/A-Ereignisse zu übernehmen, um eine "Extremsituation" zu erfassen. Interessant ist in diesem Zusammenhang allerdings der Befund, der sich aus Abbildung 4-24 ableiten lässt, dass sich die Beiwerte der grössten Hochwasser im Bereich jener gewöhnlicher Hochwasser bewegen.

Als weiteren pragmatischen Ansatz, der von Messdaten (beobachteten N/A-Ereignissen) unabhängig ist, schlagen wir ein Vorgehen vor, das erneut auf den beitragenden Flächen basiert: Setzt man voraus, dass der Niederschlag, der auf die hochwasserrelevanten beitragenden Flächen fällt, vollständig zum Abfluss gelangt, so kann der Abflussbelwert aus dem Verhältnis der beitragenden Fläche zur Gesamtfläche des Einzugsgebietes grob geschätzt werden. Den Quotienten aus beitragender Fläche und Gesamtfläche haben wir an anderer Stelle als "Hochwasserdisposition" bezeichnet (Kapitel 2.3.5). Mit Abbildung 4-28 kann gezeigt werden, dass sich der aus der Hochwasserdisposition abgeleitete Abflussbeiwert vielfach in der Grössenordnung der Beiwerte der beiden grössten beobachteten Hochwasser bewegt.

Insgesamt ist die Festlegung des Abflussbeiwertes aber noch weit von einer physikalischen Abstützung entfernt und kann zu entsprechend grossen Fehlern bei der Hochwasserbemessung führen.

- 4. Bestimmung des Abflussbeiwerts ( $\psi$ ):
  - Z Grösster, bei den gemessenen Ereignissen beobachteter Beiwert: 0.58

#### c) Berechnung der Hochwasserganglinie

Mit Hilfe der Formel 4-29 kann nun aus dem abflusswirksamen Niederschlag und dem repräsentativen Unit Hydrographen die Ganglinie des Bemessungshochwassers berechnet werden. Der abflusswirksame Niederschlag wird aus dem Gesamtniederschlag und dem geschätzten Abflussbeiwert bestimmt.

 Berechnung des Spitzenabflusses und der Bemessungsganglinie eines 20jährlichen Hochwasserereignisses:

Aft einem 3-stündigen Blockregen mit einer Intensität von 22 mm/h (bzw. 11mm/0.5h), einem Abflussbeiwert von 0.58 und dem repräsentativen Unit Hydrographen der Tabelle 4-18 erhalten wir für den Eubach einen Spitzenabfluss von 25.4 m<sup>3</sup>/s. Die Bemessungsganglinie ist in Abbildung 4-29 dargestellt.



Abbildung 4-29: Bemessungsganglinie für ein 20jährliches Ereignis im Eubach bei Euthal; der Basisabfluss ist nicht berückslchtigt. Q<sub>0</sub>: Direktabflussmenge.

Figure 4-29: Design hydrograph for a 20-year event in the Eubach catchment (base-flow not considered)

## 4.5.5 Schlussbetrachtungen zum Unit-Hydrograph-Verfahren

Der Schätzwert für den 20jährlichen Spitzenabfluss des Eubachs von 25.4 m<sup>3</sup>/s kommt dem gemessenen Wert von 26 m<sup>3</sup>/s sehr nahe. Bei diesem Schätzwert blieb allerdings der Basisabfluss unberücksichtigt. Die kleine Differenz zwischen dem gemessenen und dem geschätzten Wert täuscht eine Genauigkeit vor, welche von diesem Verfahren - insbesondere bei noch grösseren Jährlichkeiten nicht erwartet werden darf. Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass sich das Verfahren besonders für (Vor-)Projektstudien eignet, in denen mit möglichst geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand Richtwerte festzulegen sind.

Die Vorteile des Unit-Hydrograph-Ansatzes zur Abschätzung *T*-jährlicher Hochwasserereignisse in Einzugsgebieten mit kurzen Messreihen liegen in der einfachen, praxisfreundlichen Handhabung. Mit dem repräsentativen Unit Hydrographen werden bei der Abschätzung der Spitzenabflüsse Informationen verwendet, die aus beobachteten N/A-Ereignissen abgeleitet werden können.

Als Problempunkte des Unit-Hydrograph-Ansatzes sind insbesondere die starke Abstraktion der physikalischen Prozesse und die Linearisierung des an sich nicht-linearen N/A-Prozesses zu nennen. Die geringe Modellkomplexität des Unit-Hydrograph-Modells führt zu einem erheblichen Risiko, dass das hydrologische System durch das Modell nicht genügend repräsentiert wird und damit ungenaue Abschätzungen erzeugt werden (vgl. Kapitel 1.1). Deshalb haben wir vorhin von Richtwerten gesprochen. Der vorgestellte Ansatz macht sich den Umstand zunutze, dass selten auftretende Niederschläge dank der im allgemeinen langen Niederschlagsmessreihen relativ gut bestimmbar sind. Deshalb werden beim Unit-Hydrograph-Modell die zeitlich eher schlecht abgestützten Informationen über den Abfluss mit der zeitlich besser abgestützten Niederschlagsinformation kombiniert. Allerdings ist eine Modellanwendung auf Zustände, die bei der Modelleichung nicht vorgekommen sind, nicht unproblematisch.

Dem Verfahren liegt eine einheitliche, am Konzept der beitragenden Flächen orientierte Betrachtungsweise zugrunde: Auf den beitragenden Flächen basiert die Interpretation der Ereignisabhängigkeit der Unit Hydrographen (vgl. Abbildungen 4-25 und 4-26); sie bilden den Ausgangspunkt für die Bestimmung der Konzentrationszeit und damit des repräsentativen Unit Hydrographen, und sie können auch für eine pragmatische Schätzung des Abflussbeiwertes beigezogen werden.

# 4.6 Vergleich der regionalhydrologischen Hochwasserabschätzverfahren

In den letzten Jahren sind in der Schweiz verschiedene regionalhydrologische Hochwasserabschätzverfahren entwickelt oder weiterentwickelt worden. Sie wurden in den vorhergehenden Kapiteln analysiert und sollen nun vergleichend beurteilt werden, um erste Empfehlungen für ihre Anwendung ableiten zu können. In den Vergleich werden insbesondere Jene Modelle einbezogen, welche eine Abschätzung von Hochwasserspitzen in mesoskaligen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen ermöglichen (vgl. Abbildung 4-30).



Abbildung 4-30: Einordnung der in den Kapiteln 4.2. bis 4.5 diskutierten Modelle Figure 4-30: Classification of the models discussed in chapters 4.2 to 4.5

# 4.6.1 Grundlagen des Modelivergleichs

Der Modellvergleich basiert auf den Erkenntnissen, welche wir bei der Abschätzung 100jährlicher Abflussspitzen in 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km<sup>2</sup> gewonnen haben<sup>15</sup>. Da die Spitzenabflüsse dieser Gebiete zur Eichung der Modelle mitverwendet wurden, bestehen für alle Modelle die gleichen Randbedingungen.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Ausnahme: Grande Eau, Aigle: 132 km<sup>2</sup>

Tabelle 4-19: Ergebnisse der Abschätzung 100jährlicher Hochwasserspitzenabflüsse mit verschiedenen regionalhydrologischen Modellen in 69 ausgewählten Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km²

Table 4-19; Estimates of the 100-year peak flows from 69 selected catchments, using the different models discussed in chapter 4.2 to 4.5

|          |                                     |                 | Vergleichswerte [m³/s] |        |           | modellierte Werte [m³/s] |               |                 |               |               |              |
|----------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|--------|-----------|--------------------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|
| ID       | Einzugsgebiet (Gewässer, Station)   | Fläche<br>(km²) | LHG                    | Gumbel | gemittelt | Fuzzy                    | Monsente      | Re-<br>gression | GIUB-<br>(Fn) | HQ100<br>(MQ) | Köllamod     |
| 448      | Thur, All St. Johann                | 59,0            | 65.00                  | 88.80  | 76,90     | 68.85                    | 59.02         | 70.02           | 82.92         | 87.05         | 114.75       |
| 453      | Melenreuss, Husen                   | 67.6            | 138.00                 | 120.09 | 129.05    | 112,36                   | 103.91        | 121.85          | 89.97         | 107.11        | 118.26       |
| 528      | Murg, Wăngi                         | 78.9            | 49.00                  | 69.12  | 59,06     | 76.82                    | <b>66,9</b> 5 | 76.53           | 38.06         | 33.87         | 72.15        |
| 551      | Piumogna, Dalpe                     | 20.1            | 46.00                  | 49.45  | 47.73     | 60,87                    | 54.00         | 63.50           | 38.93         | 43.24         | 73.06        |
| 618      | Brenno, Campra                      | 35.0            | 80.00                  | 77.81  | 78.90     | 66.10                    | 56.15         | 62.02           | 61.24         | 93.00         | 44.19        |
| 620      | Göschener Reuss, Ablrutt            | 89.6            | 87.00                  | 92.52  | 89.76     | 157.20                   | 150.82        | 140.48          | 106.54        | 122.87        | 309.60       |
| 643      | Alp, Trachslau, Rüli                | 31.4            | 90.00                  | 85.01  | 87.50     | 82.80                    | 87.34         | 108.74          | 113.59        | 98,17         | 136.45       |
| 695      | Schachen Bürglen                    | 95.1            | 100.00                 | 85,35  | 92.68     | 122.04                   | 122.40        | 158.91          | 59.33         | 62.08         | 385.18       |
| 702      | Somvixer Rhein, Alp Sutglatscher    | 22.6            | 58.00                  | 61.00  | 59.50     | 67.64                    | 43./3         | 38.57           | 44.31         | 63.98         | 68.35        |
| 720      | Grande Eau, Algie                   | 132,0           | 107,00                 | 106.51 | 106.76    | 162.33                   | 145.13        | 1//.6/          | 134.85        | 113.11        | 107.29       |
| 722      | Somvicer Rhein, Acla Mulin          | 77,3            | 216.00                 | 225.36 | 220.68    | 147.74                   | 94.91         | 98.24           | 110.08        | 154.50        | 70.19        |
| 735      | Vinterhain, Historhain              | 537             | 166.00                 | 166.09 | 166.40    | 122.15                   | 107.30        | 115.66          | 42.97         | 43.44         | 143.00       |
| 750      | Allenbach Adelboden                 | 28.8            | 71.80                  | 61.60  | 66 70     | 20.56                    | 107.09        | 50.24           | 37.45         | 30.56         | 145.09       |
| 751      | Gomerbach Kinstal                   | 25.6            | 32.50                  | 30.84  | 31.70     | 23.00                    | 20.21         | 40.42           | 34 73         | 34 35         | 47.46        |
| 753      | Kandar Gaslemial                    | 40.7            | 22.60                  | 23.71  | 23.15     | 32.10                    | 31.24         | 37.87           | 20.19         | 23.08         | 46.35        |
| 755      | Epositioenbach Epositioenalo        | 14.4            | 11.60                  | 10.72  | 11 15     | 23.44                    | 17.99         | 21.50           | 9.36          | 11.86         | 39.35        |
| 765      | Krummbach, Klusmallen               | 19.8            | 27.70                  | 26.65  | 27.17     | 28.72                    | 22.32         | 31.91           | 29.47         | 22.27         | 84.17        |
| 766      | Trübbach, Räzliberg                 | 19.5            | 16.30                  | 15.26  | 15.78     | 15.47                    | 14.76         | 16.48           | 11.71         | 8.23          | 12.81        |
| 767      | Zwischbergenbach,im Fah             | 17.3            | 64.00                  | 44.51  | 54.26     | 30.10                    | 28 27         | 38.48           | 27.03         | 25.61         | 89.16        |
| 778      | Roseguach, Pontresina               | 66.5            | 113.00                 | 89.14  | 101.07    | 47.00                    | 34.87         | 42.85           | 98.48         | 99.97         | 45.74        |
| 789      | Biberenkanal, Kerzers               | 50,1            | 21.90                  | 22.40  | 22.15     | 20.22                    | 21.39         | 23.20           | 25.08         | 14.58         | 34.44        |
| 793      | Lonza, Blatten                      | 77.8            | 82.90                  | 76.05  | 79.48     | 78.52                    | 81.91         | 95.23           | 70.75         | 78.06         | 63.10        |
| 795      | Drance de Ferrel, Branche d'en Haut | 66.8            | 47.00                  | 47.19  | 47.09     | 107.76                   | 86.42         | 103.51          | 29.13         | 32.67         | 65.01        |
| 799      | Grosstelbach, Isenthal              | 43.9            | 60.10                  | 47.75  | 53.93     | 50.14                    | 51.82         | 72.02           | 26.75         | 25.16         | 67.54        |
| 803      | Wilenwasserenreuss, Realp           | 30.7            | 82.00                  | 67.26  | 74.63     | 61.66                    | 58.89         | 83.66           | 56.03         | 61,45         | 64.90        |
| 820      | Taschinasbach, Seewis               | 47.7            | 101.00                 | 77.01  | 89.01     | 81.65                    | 73.97         | 94.94           | 72.99         | 70.79         | 75.57        |
| 821      | Alpbach, Erstfeld                   | 20.6            | 67.50                  | 56.15  | 61.82     | 56.10                    | 28.51         | 28.26           | 44.10         | 54.63         | 36.06        |
| 822      | Minsler, Euthal                     | 59.2            | 257.00                 | 207.70 | 232.35    | 167,11                   | 147,73        | 183.72          | 159.97        | 160.92        | 243.38       |
| 826      | Ova dal Fuorn, Zamaz                | 55,3            | 18,50                  | 16.93  | 17.71     | 29,90                    | 30.21         | 31.26           | 25.16         | 16.29         | 26.17        |
| 827      | Glafi, Heriseu                      | 16.2            | 124.00                 | 80.28  | 102,14    | 78.24                    | 42,44         | 59.88           | 79.46         | 49.71         | 66./1        |
| 831      | Steinach, Steinach                  | 24.2            | 115.00                 | 92.67  | 103.84    | 81.57                    | 31.02         | 39.99           | 98.68         | 60.49         | 85.62        |
| 033      | Aach, Saimsach, Hungerouni          | 40.5            | 51.50                  | 49.43  | 50.47     | 120.30                   | 149.22        | 100.44          | 167.65        | 149.60        | 142 77       |
| 034      | Ornason, Hunowii                    | 04.5            | 01.41                  | 143.50 | 144.75    | 10.79                    | 12 27         | 13 15           | 13.83         | 12 44         | 10.78        |
| 843      | Cassomia Pracesson                  | 710             | 63.70                  | 90.90  | 01 75     | 146.97                   | 130.05        | 167.51          | 106 47        | 05.81         | 324 98       |
| 944      | Earrerabach Trun                    | 12.5            | 25.00                  | 23.78  | 24.39     | 37 33                    | 18.42         | 22.46           | 28.59         | 38.42         | 25.75        |
| 848      | Dischmahach Davos                   | 43.3            | 20.50                  | 22.74  | 21.37     | 25.13                    | 27.65         | 33.03           | 20.54         | 24.99         | 30.74        |
| 852      | Thur, Stein                         | 84.0            | 136.00                 | 116.12 | 126.06    | 125.25                   | 106.37        | 127.14          | 102.49        | 97.77         | 88,34        |
| 863      | Langelen, Huttwil                   | 59.9            | 74.70                  | 60,70  | 67.70     | 57.01                    | 52.06         | 60.91           | 66.89         | 45.39         | 32.24        |
| 879      | Ríale di Calneggia, Cavergno        | 24.0            | 122.00                 | 122.23 | 122.11    | 112.18                   | 40.54         | 39.53           | 111.20        | 116.25        | 117.43       |
| 881      | Simmi, Gams                         | 23,2            | 63.00                  | 42.28  | 52.64     | 33.04                    | 37.26         | 49.92           | 47.36         | 26.10         | 46.97        |
| 882      | Steinenbach, Keilbrunn              | 19.1            | 49.80                  | 52.28  | 51.04     | 46.91                    | 61.14         | 88.67           | 86.85         | 74.61         | 76.65        |
| 886      | Sitter, Appenzell                   | 74.2            | 169.00                 | 174.22 | 171.61    | 146.43                   | 120.51        | 151.00          | 180.72        | 172.68        | 235,95       |
| 889      | Moesa, Mesocco                      | 47.0            | 133.00                 | 136.47 | 134.73    | 112.88                   | 96,13         | 116.38          | 76,17         | 26.36         | 66.33        |
| 890      | Poschievino, La Rösa                | 14,1            | 17.50                  | 15.62  | 16.56     | 19.30                    | 14.24         | 19.00           | 8.09          | 8.45          | 25.31        |
| 911      | Necker, Mogelsberg                  | 88.2            | 563.00                 | 242.23 | 402.62    | 173.05                   | 206.35        | 273.77          | 198.40        | 163.50        | 127.90       |
| 916      | Taschinasbach, Grüsch               | 63.0            | 75.00                  | 79.59  | 77.29     | 99,09                    | 88.84         | 114.64          | 86.24         | 75.81         | 99.40        |
| 922      | Chamuerabach, La Punt               | 73.3            | 66.20                  | 30.72  | 48.46     | 52.93                    | 56.59         | 62.89           | 105.83        | 89.87         | 64.96        |
| 926      | Mentus, Dommarlin                   | 12.5            | 9.00                   | 9.49   | 9.25      | 12.85                    | 13.93         | 16,75           | 9,10          | 8.5/          | 12.05        |
| 932      | Siogné, Vuippéns, Châleau           | 45.3            | 54.30                  | 39.46  | 56.88     | 4/./6                    | 45.38         | 100.05          | 10.76         | 49./8         | 40.8/        |
| 1035     | Cigelbergersa, Engelberg            | 12.0            | 71.30                  | 72.04  | 24.57     | 10.22                    | 16.90         | 220.77          | 24.84         | 24.02         | 34.22        |
| -        | Days us Monteux, Monteux            | 27.0            | 20.00                  | 10.06  | 0.73      | 10.02                    | 10.00         | 23.50           | 0.10          | Q 46          | 18.22        |
| <u>-</u> | Wyza Uolarkulm                      | <u>920</u>      | 41.20                  | 44.95  | 41.07     | 229.29                   | 67.07         | 75.62           | 24.20         | 19.40         | 64 04        |
| -        | La Birse Court                      | 91.0            | 50.60                  | 47 17  | 48.88     | 48.09                    | 39 35         | 45.94           | 38 77         | 30.84         | 90.51        |
|          | Fildrich, Riedli                    | 81.2            | 36.60                  | 33.95  | 36.28     | 73.46                    | 61.38         | 77.85           | 33.65         | 25.92         | 52.31        |
| -        | Buuserbach, Maisprach               | 11.5            | 7,50                   | 6.48   | 6.99      | 6.32                     | 7,37          | 9.29            | 4.68          | 5.08          | 4.63         |
| _        | Ergolz, Ormalingen                  | 29.9            | 18.50                  | 19.51  | 19.01     | 16.52                    | 16 17         | 19.38           | 9,96          | 8.81          | <u>11.84</u> |
| <u>·</u> | Elbach, Gellerkinden                | 27.1            | 61.30                  | 41,31  | 51,30     | 17.19                    | 13.00         | 15.04           | 41.89         | 23.75         | 12.11        |
| -        | Diegterbach, Slasach                | 32.2            | 37.10                  | 30.34  | 33.72     | 21.53                    | 19.15         | 23.32           | 46.38         | 25.01         | 15.25        |
| -        | Vordere Frenke, Waldenburg          | 12,6            | 5.40                   | 4,47   | 4,93      | 11.57                    | 10,48         | 14.11           | 26.66         | 18.75         | 12.02        |
| •        | Vordere Frenke, Subendorf           | 45.6            | 34.80                  | 29.13  | 31.97     | 35.40                    | 25.83         | 30.24           | 56.95         | 33,76         | 41.80        |
| •        | Violenbach, Augsl                   | 18.9            | 5.30                   | 5.62   | 5.46      | 9.93                     | 11.63         | 13.75           | 6.35          | 5.39          | 3.41         |

#### Tabelle 4-19 (Fortsetzung)

|    |                                   |                 | Vergi  | elchswerte | [m³/s]    | modellierte Werte [m³/s] |         |                 |              |                |          |
|----|-----------------------------------|-----------------|--------|------------|-----------|--------------------------|---------|-----------------|--------------|----------------|----------|
| ID | Einzugsgeblet (Gewässer, Station) | Fläche<br>(km²) | LHG    | Gumbel     | gemittelt | Fuzzy                    | Momente | Re-<br>gression | GIUB<br>(Fn) | -HQ100<br>(MQ) | Köliamod |
|    | Lüssel, Breitenbach               | 44.5            | 46.50  | 37.80      | 42.15     | 40.41                    | 30.78   | 37.92           | 56.13        | 47.09          | 41.34    |
| •  | Augstbach, Balsthal               | 64.0            | 153.00 | 90,08      | 121.54    | 53,74                    | 37.76   | 44.19           | 69,56        | 41.92          | 70.11    |
|    | Calaccia, Airolo                  | 11.1            | 33.10  | 24.70      | 28.90     | 17.25                    | 20.58   | 28.28           | 27.59        | 24.59          | 15,67    |
| -  | Traversagna, Arbedo               | 16.1            | 30.90  | 21,97      | 26.43     | 26.26                    | 32.87   | 47.58           | 34.47        | 39.55          | 88.57    |
| -  | Vedeggio, Isona                   | 20.3            | 40.90  | 37.76      | 39.33     | 41.52                    | 44.07   | 60.98           | 40.92        | 48.61          | 99.27    |

ID: Stationsnummer der Landeshydrologie und -geologie

Vergleichswerte gemittelt: Mittel des LHG- und des Gumbel-Wertes

In Tabelle 4-19 sind die Ergebnisse der Hochwasserabschätzung mit den verschiedenen Modellen zusammengestellt. Der Modellvergleich basiert auf 100jährlichen Hochwasserspitzen, well alle Modelle mindestens eine Abschätzung dieser Grösse erlauben. Davon ausgenommen sind natürlich die beiden Modelle "GIUB-Q<sub>max</sub>(Fn)" und "GIUB-Q<sub>max</sub>(MQ)", welche im Hinblick auf eine Abschätzung der sogenannten Umhüllenden entwickelt wurden.

Die Beurteilung der Güte der einzelnen Modelle erfolgte auf der Basis von zwei Vergleichswerten (vgl. Kapitel 4.3.1). Es sind dies

- die von der Landeshydrologie und -geologie publizierten Werte, welche mehrheitlich mittels der Log-Pearson-III-Verteilung zeitlich extrapoliert wurden und
- die mit Hilfe der Gumbel-Verteilung berechneten Werte.

Um die abschliessende Modellbeurteilung möglichst übersichtlich zu gestalten und auf wenige Masszahlen zu reduzieren, wurden die beiden Vergleichswerte gemittelt und die modellierten Werte mit diesen gemittelten Werten verglichen. Die Tabelle 4-20 liefert dazu ein Belspieł, von dem sich auch einige generelle Bemerkungen zur Modellbeurteilung ableiten lassen:

- Werden zur Model/beurteilung Vergleichswerte beigezogen, die mittels der Gumbel-Verteilung zeitlich extrapoliert wurden, ergeben sich in der Regel bessere Ergebnisse als mit den von der Landeshydrologie und -geologie (LHG) publizierten Vergleichswerten. Dies hängt damit zusammen, dass die vorgestellten regionalhydrologischen Modelle mit Gumbel-verteilten Werten geeicht wurden.
- Die Vergleichswerte der LHG sind in der Regel grösser als die Gumbel-verteilten Werte (vgl. Abbildung 4-11).

Tabelle 4-20: Gütebeurteilung der regionalhydrologischen Hochwassermodelle auf der Grundlage unterschiedlicher Vergleichswerte, dargestellt am Beispiel des Taschinasbachs (Kt. Graubünden)

| Vergleichswert                           | Kõlla <sub>mod</sub>    | Momente                 | Regression               | Fuzzy         | GIUB-HQ <sub>100</sub> (Fn) | GIU8-HQ <sub>100</sub> (MQ) |
|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| HQ <sub>100</sub> (=100%)                | 75.57 m <sup>3</sup> /s | 73.97 m <sup>3</sup> /s | 94.94 nt <sup>3</sup> /s | 81.65 m³/s    | 72.99 m <sup>3</sup> /s     | 70.79 m <sup>3</sup> /s     |
| 77 m³/s                                  | 98%                     | 96%                     | 123%                     | 106%          | 95%                         | 92%                         |
| (Gumbel)                                 | exakt                   | exakt                   | genDgend                 | exakt         | exakt                       | exakt                       |
| 101 m³/s                                 | 75%                     | 73%                     | 94 %                     | 81%           | 72%                         | 70%                         |
| (LHG)                                    | genügend                | genügend                | exakt                    | genügend      | genügend                    | genügend                    |
| 89 m³/s<br>(Mittelwert Gum-<br>bel, LHG) | 85%<br>genügend         | 83%<br>genûgend         | 107%<br>exakt            | 92 %<br>exakt | 82%<br>genügend             | 80%<br>genügend             |

Table 4-20: Assessment of the various flood models for the Taschinasbach catchment

98%: Anteil des modellierten Wertes am Vergleichswert

exakt: Beurteilung der Schätzung, vgl. Kapitel 4.3.1

# 4.6.2 Modellvergleich

In der Tabelle 4-21 sind die analysierten Modelle zusammenfassend dargestellt, und zwar geordnet nach den Anwendungsmöglichkeiten (Einzugsgebiete mit und Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen) und nach der Trefferwahrscheinlichkeit. Die Modelle "GIUB-Q<sub>max</sub>(Fn)", "GIUB-Q<sub>max</sub>(MQ)" und "Unit Hydrograph" lassen sich nicht direkt mit den anderen Modellen vergleichen, weil sie entweder auf eine andere Zielgrösse ausgerichtet sind ("Q<sub>max,60%</sub>") oder nicht mit den 69 Untersuchungsgebieten überprüft werden konnten ("Unit Hydrograph"). In der Tabelle 4-22 werden die Angaben zur Trefferwahrscheinlichkeit mit Informationen zum Anteil exakter bzw. unbrauchbarer Abschätzungen ergänzt.

Tabelle 4-21: Zusammenfassende Darstellung und Beurteilung der diskutierten regionalhydrologischen Hochwasserabschätzmodelle

Table 4-21: Final assessment of the flood models

| Modell                      | Ziel-<br>grösse                              | Gültigkeits-<br>bereich Fn | Methode                                                                       | Aufwand für<br>Abschätzung | Güte | Haupt-<br>vorteil                             | Haupt-<br>nachteil                   |
|-----------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| GIU8-HQ <sub>100</sub> (Fn) | HQ 100                                       | beliebige<br>Grösse        | regional-laxonomischer Ansalz                                                 | sehr klein                 | 67%  | breite Abstützung<br>durch Beobach-<br>tungen | fehlender<br>Prozessbezug            |
| Fuzzy                       | HQ <sub>x</sub>                              | 10-200 km²                 | regional-taxonomischer Ansatz,<br>prozessorientiert                           | sehr gross                 | 65%  | Prozess-<br>orientierung                      | Aufwand                              |
| Momente                     | HQ,                                          | 10-200 km²                 | regionale Übertragungsfunktion,<br>prozessorientierte Gebletskenn-<br>grössen | gross                      | 62%  | Flexibilität in der<br>Abschätzung            | Aufwand                              |
| Regression                  | HQ 100                                       | 10–200 km²                 | regionale Übertragungsfunktion,<br>prozessorientierte Gebietskenn-<br>grössen | gross                      | 55%  | prozessorientierte<br>Gebietskenn-<br>grössen | nur HQ <sub>100</sub><br>abschätzbar |
| Kõlla <sub>mod</sub>        | тНQ<br>НО₂₀<br>НQ₁∞                          | 1–100 km²                  | modifiziertes Laufzeitverfahren.<br>objektiviert                              | gross                      | 51%  | Prozess-<br>orientlerung                      | Aufwand                              |
| Kölla                       | тНО<br>НО <sub>20</sub><br>НО <sub>100</sub> | 1–100 km²                  | modifiziertes Laufzeitvertahren                                               | mittel                     | -    | Prozess-<br>orientierung                      | subjektive<br>Komponente             |
| GIUB-Q <sub>max</sub> (Fn)  | Q <sub>max</sub>                             | beliebige<br>Grösse        | regional-taxonomischer Ansatz                                                 | sehr klein                 | -    | breite Abstützung<br>durch Beobach-<br>tungen | fehlender<br>Prozessbezug            |

Modelte für Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen

Modelle für Einzugsgebiete mit einigen Abflussmessungen

| Modell                          | Ziel-<br>grösse   | Gültigkeits-<br>bereich Fn | Methode                                                                       | Autwand für<br>Abschätzung | Güte | Haupt-<br>vorteil                                   | Haupt-<br>nachteil                         |
|---------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| GIUB-<br>HQ <sub>100</sub> (MQ) | HQ <sub>100</sub> | beliebige<br>Grösse        | regional-taxonomischer Ansatz                                                 | klein                      | 65%  | breite Abstützung<br>durch Beobach-<br>tungen       | fehlender<br>Prozessbezug                  |
| Unit Hydro-<br>graph            | HQ,               | 5–200 km²                  | Unit Hydrograph in Kombination<br>mit dem Konzept der beitragenden<br>Flächen | gross                      | -    | Nutzung gebiets-<br>spezifischer In-<br>formationen | Unsicherheiten<br>beim Abfiussbei-<br>wert |
| GIUB-Q <sub>max</sub> (MQ)      | Q <sub>max</sub>  | beliebige<br>Grösse        | regional-taxonomischer Ansatz                                                 | klein                      | -    | breite Abstützung<br>durch Beobach-<br>lungen       | fehlender<br>Prozessbezug                  |

Güte: Trefferwahrscheinlichkeit

 $HQ_x$  mlt 2.33  $\leq x \leq$  200 Jahre

Tabelle 4-22: Übersicht über die Güte der diskutierten regionalhydrologischen Hochwasserabschätzmodelle; Vergleichswerte: 100jährliche Spitzenabflussmengen von 69 Einzugsgebieten mit einer Gebietsfläche zwischen 10 und 100 km<sup>2</sup>

| Modell                      | Trefferwahrscheinlichkeit<br>[%] | Anteil exakter Schätzungen<br>[%] | Anteil unbrauchbarer Schätzungen<br>[%] |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| GIUB-HQ <sub>100</sub> (Fn) | 66.7                             | 20.3                              | 11.6                                    |
| Fuzzy                       | 65.2                             | 29.0                              | 14.5                                    |
| GIUB-HQ100(MQ)              | 65.2                             | 27.5                              | 17.4                                    |
| Momente                     | 62.3                             | 11.6                              | 14.5                                    |
| Regression                  | 55.1                             | 21.7                              | 17.4                                    |
| Kölla <sub>med</sub>        | 50.7                             | 10.1                              | 21.7                                    |

Table 4-22: Comparative quality assessment of the discussed flood models

Die beiden einfachen, praxisfreundlichen Modelle "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)" und "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)" erreichen unter den vorgestellten regionalhydrologischen Modellen die höchste Trefferwahrscheinlichkeit. Sie fallen aber auch durch den hohen Anteil exakter und den geringen Anteil unbrauchbarer Schätzungen auf. Einem minimalen Aufwand bei der Abschätzung steht eine "maximale" Trefferwahrscheinlichkeit gegenüber! Die regional differenzierten Diagramme der Abbildung 4-22 erleichtern nicht nur die Bestimmung der 100jährlichen Hochwasserspitzen über die Gebietsfläche, sondern erlauben auch eine Abschätzung des Grenzwertes  $Q_{max00\%}$ , jenes Abflusswertes also, der nur in seltenen Fällen erreicht oder überschritten wird. Diese Diagramme, für deren Bestimmung alle in einer Region verfügbaren Daten (*HHQ*) verwendet wurden, zeigen auch, in welchen Flächenbereichen die regional differenzierten Modelle mit Daten gut abgestützt und damit einsetzbar sind. Als Nachteil ist sicherlich der fehlende Prozessbezug der beiden Modelle zu erwähnen: es handelt sich um Modelle, die ausschliesslich nach regional-taxonomischen Gesichtspunkten entwickelt wurden und die als unabhängige Grösse nur die Gebietsfläche verwenden.

Das Modell "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)" ist strenggenommen nur in Einzugsgebieten einsetzbar, die über einige Abflussmessungen verfügen und dadurch eine Bestimmung des mittleren Jahresabflusses erlauben. In der Schweiz ist es allerdings möglich, mittlere Jahresabflüsse ungemessener Einzugsgebiete mit relativ hoher Genauigkeit abzuschätzen (vgl. Kapitel 3.3).

Erstaunlich ist, dass das Modell "Fuzzy" trotz seiner Prozessnähe und trotz der Ausnützung der Möglichkeiten der "fuzzy logic" nicht über die Güte der beiden einfachen Modelle "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)" und "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)" hinauskommt. Für die Anwendung dieses Modells spricht aber insbesondere seine Flexibilität, erlaubt es doch – im Gegensatz zu den eben erwähnten Modellen – Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeiten abzuschätzen. Diese Flexibilität ist allerdings mit einem beträchtlichen Mehraufwand bei der Modellanwendung zu erkaufen: Digitalisierung des Gewässernetzes 1:25'000, GIS-gestützte Bestimmung des relativen Flächenbeitrags und der gewichteten prozessorientierten Gebietskenngrössen, umfangreiche statistische Berechnungen. Die entsprechenden Programme sind in Düster (1994) dokumentiert.

Wie das Modell "Fuzzy" weist auch das Modell "Momente" eine hohe Flexibilität bezüglich der Zielgrösse  $HQ_x$  auf, da beide auf der sogenannten hydrologischen Grundgleichung (Formel 4-2) basieren. Da der Aufwand zur Bereitstellung der erforderlichen Grundlagen bei beiden Modellen ähnlich gross ausfällt, ist das Modell "Fuzzy" wegen seiner höheren Trefferwahrscheinlichkeit dem Modell "Momente" vorzuziehen.

Bei einer Trefferwahrscheinlichkeit von 55% sind vom Modell "Regression" deutlich schlechtere Ergebnisse zu erwarten. Da es zudem nur eine Abschätzung 100jährlicher Spitzenabflüsse erlaubt, ist es für eine breite Anwendung nicht sehr attraktiv.

Eine abschliessende Beurteilung des Modells "Kölla" ist wegen der subjektiven Komponente bei der Parameterbereitstellung nicht möglich. Die Modellgüte wird massgeblich von der Erfahrung und den (geographischen) Kenntnissen des Modellanwenders beeinflusst. Eine alleinige Verwendung der von Kölla ausgewiesenen Basiswerte ist nicht zu empfehlen. Bei der objektivierten Variante "Kölla<sub>mod</sub>", die

gegenüber dem originalen Modell einen beträchtlichen Mehraufwand bei der Bereitstellung der notwendigen Grundlagen erfordert, liegt die Trefferwahrscheinlichkeit gerade noch bei 51%.

Aus dieser Modellübersicht geht hervor, dass die Trefferwahrscheinlichkeiten der besten Modelle im Bereich von 65% liegen. Manser (1996) konnte diese Ergebnisse durch eine "Outsample-Überprüfung" an rund zwanzig Einzugsgebieten, die nicht zur Modelleichung verwendet wurden, weitgehend bestätigen. Mit diesem Prozentsatz exakter bis genügender Schätzungen scheint nun aber ein Plafond erreicht zu sein. Dies belegt allein schon die Tatsache, dass ganz unterschiedliche Ansätze zu ähnlichen Trefferwahrscheinlichkeiten führen. Da die diskutierten Modelle alle in der Schweiz verfügbaren Hochwasserbeobachtungen berücksichtigen (Modelle "GIUB-HQ<sub>100</sub>"), sich die Modellierungsmöglichkeiten Geographischer Informationssysteme zunutze machen (Modelle "Fuzzy", "Momente", "Regression", "Kölla<sub>med</sub>") oder möglichst prozessnah formuliert sind (Modelle "Kölla", "Fuzzy"), wird dieser Plafond in nächster Zukunft vermutlich kaum zu durchbrechen sein: einem riesigen Mehraufwand bei der Neu- oder Weiterentwicklung regionalhydrologischer Modelle wird vermutlich nur eine bescheidene Zunahme bei der Güte der einzelnen Modelle gegenüberstehen.

Die maximale Trefferwahrscheinlichkeit von rund 65% und der Anteil unbrauchbarer Schätzungen im Bereich von 10 bis 20% hat für die Bemessungspraxis insbesondere zwei Konsequenzen:

- 1. Die Abschätzungen, die mittels der vorgestellten regionalhydrologischen Modelle vorgenommen werden, haben primär den Charakter von Richtwerten, welche eine Grössenordnung angeben, in denen sich die "wahren" Werte bewegen. Die Anwenderinnen und Anwender in Forschung und Praxis müssen deshalb im Einzelfall entscheiden, ob ihnen die Genauigkeit dieser Abschätzung genügt konkret, ob sie das Risiko in Kauf nehmen können, dass in rund einem Drittel der Fälle mit ungenauen oder unbrauchbaren Abschätzungen zu rechnen ist. Bei diesen Diskussionen der Modellgüte sollten wir aber auch berücksichtigen, dass die Praxis hauptsächlich an einer Grössenordnung des x-jährlichen Hochwassers interessiert ist und deshalb Ungenauigkeiten bis zu einem gewissen Masse tolerierbar sind.
- 2. Für präzisere Schätzungen sind zusätzliche, gebietsspezifische Abklärungen notwendig, welche die hydrologischen Prozesse des betrachteten Einzugsgebietes besser berücksichtigen. Hierzu sind vor allem auch Untersuchungen zur Beurteilung abflussfördernder und -hemmender Faktoren notwendig (vgl. Naef, Scherrer und Zurbrügg 1999). Die Rekonstruktion historischer Hochwasser, aber auch die Messung einzelner N/A-Ereignisse können weitere wertvolle Informationen zum Hochwassergeschehen liefern und damit massgeblich zur Verbesserung der Hochwasserabschätzung beitragen.

## 4.6.3 Kombination mehrerer Modelle

An anderer Stelle haben wir bereits darauf hingewisen, dass es bei der Hochwasserabschätzung sinnvoll ist, mehrere Modelle einzusetzen, um einem einzelnen Modell angesichts der Trefferwahrscheinlichkeiten im Bereich von 50 bis 65% kein allzu grosses Gewicht zu verleihen. Dabei geht man von der berechtigten Annahme aus, dass alle Modelle gewisse Fehler und Ungenauigkeiten aufweisen, dass diese aber in der Regel nicht in den gleichen Gebieten auftreten. Auf der Basis dieser Überlegungen führten wir deshalb mit verschiedenen Kombinationen der regionalhydrologischen Hochwassermodelle Abschätzungen 100jährlicher Hochwasserspitzen durch. Dabei wurde der Mittelwert der Abschätzungen der einzelnen Modelle ( $HQ_{100,komb}$ ) als Schätzwert verwendet:

$$HQ_{100,kombl} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (HQ_{100})_i$$
(4-32)

| HQ100,kombi | Schätzung des 100jährlichen Spitzenabflusses [m³/s]        |
|-------------|------------------------------------------------------------|
| (HQ100)i    | Schätzung des 100jährlichen Spitzenabflusses mit dem i-ten |
|             | Modell [m <sup>3</sup> /s], /=1,2,,n                       |
| п           | Anzahl eingesetzter Modelle                                |

Die Trefferwahrscheinlichkeit dieser kombinierten Modelle wurde wiederum mit den 69 Untersuchungsgebieten, die schon bei der Beurteilung der Einzelmodelle Verwendung fanden, ermittelt. Wie die Tabelle 4-23 verdeutlicht, konnte die Güte der Abschätzung durch die kombinierte Anwendung regionalhydrologischer Modelle gegenüber den einzelnen Modellen um mehr als 10% erhöht werden. Das beste Resultat wurde mit der kombinierten Anwendung der beiden Modelle "GIUB-HQ<sub>100</sub>(Fn)" und "Fuzzy" erzielt. Bei einer Trefferwahrscheinlichkeit von knapp 80% liegt der Anteil exakter Schätzungen bei 30%. Der Anteil unbrauchbarer Schätzungen konnte gar auf 4% reduziert werden.

Wie diese Ergebnisse belegen, Johnt es sich also bei der Hochwasserabschätzung, mehrere Modelle gleichzeitig einzusetzten, da dadurch die Fehler der einzelnen Modelle offensichtlich bls zu einem gewissen Grad ausgemittelt werden. Durch die kombinierte Anwendung regionalhydrologischer Hochwassermodelle erhalten die Abschätzungen eine höhere Aussagekraft als die Richtwerte der einzelnen Modelle!

Tabelle 4-23: Abschätzung der 100jährlichen Spitzenabflüsse in den 69 Untersuchungsgebieten durch die kombinierte Anwendung verschiedener regionalhydrologischer Modelle

Table 4-23: Estimates of the 100-year peak flows from 69 selected catchments, based on a combination of the various flood models

| Mittelung der Schätzwerte folgender Modelle                     | Trefferwahrschein-<br>lichkeit<br>[%] | Anteil exakter<br>Schätzungen<br>[%] | Anteil unbrauchbarer<br>Schätzungen<br>[%] |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| GIUB-HQ <sub>100</sub> (Fn), Fuzzy                              | 79.7                                  | 30.4                                 | 4.3                                        |
| GIUB-HQ <sub>100</sub> (MQ), GIUB-HQ <sub>100</sub> (Fn), Fuzzy | 76,8                                  | 21.7                                 | 7.2                                        |
| GIUB-HQ <sub>100</sub> (MQ), Fuzzy                              | 75.4                                  | 23.2                                 | 8.7                                        |
| GIUB-HQ <sub>100</sub> (Fn), Fuzzy, Regression                  | 71.0                                  | 26.1                                 | 5.8                                        |
| GIUB-HQ100(MQ), GIUB-HQ100(Fn), Fuzzy, Regression, Momente      | 68.1                                  | 18.8                                 | 4.3                                        |
| GIUB-HQ <sub>100</sub> (Fn), GIUB-HQ <sub>100</sub> (MQ)        | 65,2                                  | 27.5                                 | 13.0                                       |

# 4.6.4 Schlussempfehlungen

In Abbildung 4-31 werden die neuesten regionalhydrologischen Modelle, die sich zur Hochwasserabschätzung in *mesoskaligen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen* eignen, abschliessend verglichen. Die Abbildung hebt nochmals deutlich hervor, dass

- sich mit den regionalhydrologischen Hochwasserabschätzmodellen maximale Trefferwahrscheinlichkeiten von 65 bis 70% erreichen lassen und
- sich durch die kombinierte Modellanwendung namhafte Verbesserungen ergeben.

In mesoskaligen Einzugsgebieten mit (kürzeren) Abflussmessreihen hängt die Modellwahl massgeblich von der Datenlage und den Kenntnissen der spezifischen hydrologischen Situation des betrachteten Gebietes ab. Wir haben in dieser Arbeit zwei Modelle vorgestellt:

- Das Modell "GIUB-HQ<sub>100</sub>(MQ)" ist ein einfaches Verfahren, welches für eine erste Abschätzung mit Richtwertcharakter einsetzbar ist.
- Das Unit-Hydrograph-Verfahren gestattet es, die spezifischen Informationen des betrachteten Einzugsgebietes über den repräsentativen Unit Hydrographen mitzuberücksichtigen. Die grossen Streuungen des Abflussbeiwertes, welche nur teilweise verstanden werden, führen allerdings zu beträchtlichen Unsicherheiten, so dass eine alleinige Abstützung einer Bemessung auf dieses Modell nicht zu empfehlen ist.

In Einzugsgebieten mit längeren Messreihen lassen sich zeitliche Extrapolationsverfahren einsetzen. In unseren Untersuchungen konnten wir feststellen, dass sich das in neuester Zeit entwickelte Modell AGREGEE zur zeitlichen Extrapolation von Hochwasserspitzen in der Regel nicht eignet.



Abbildung 4-31: Vergleich der Trefferwahrscheinlichkeit und des Anteils unbrauchbarer Schätzungen der verschiedenen Modelle; Zielgrösse: HQ<sub>100</sub>

Figure 4-31: Comparison of the accuracy of the various models (estimated value: HQ<sub>100</sub>), i.e. proportion of exact and satisfactory estimates ("Trefferwahrscheinlichkeit") and proportion of poor results ("unbrauchbare Schätzungen")

Im Rahmen des von der Landeshydrologie und -geologie und der PLANAT<sup>17</sup> unterstützten Projektes "Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in mesoskaligen Einzugsgebleten" werden die hier vorgestellten Untersuchungen in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern weiterverfolgt (Barben 2000). Zudem hat sich im Umfeld der "Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes" (KHR) eine Arbeitsgruppe gebildet, die sich mit ähnlichen Fragen auseinandersetzt. Geplant sind sogenannte Länderberichte, in denen die Erfahrungen, welche bei der Hochwasserabschätzungen in den einzelnen Rheinanliegerstaaten gemacht wurden, zusammengefasst werden. Eine Synthese dieser Berichte wird im Jahr 2000 erfolgen (Spreafico et al. 2001).

<sup>17</sup> Plattform Naturgefahren

# Teil III: Umsetzung

# 5 Der "Hydrologische Atlas der Schweiz" (HADES)

# 5.1 Einleitung

Wissenschaft und Praxis arbeiten unter grundsätzlich verschiedenen Rahmenbedingungen: Die Wissenschaft kann es sich leisten - ja, es ist ihre Aufgabe - mittels breit angelegter und damit oft zeitraubender Analysen zu möglichst optimalen Aussagen zu gelangen, in unserem Fall also regionalhydrologische Modelle zu entwickeln. Die Praxis hingegen muss in möglichst kurzer Zeit Modelle anwenden können, um beispielsweise eine hydrologische Grösse in einem ungemessenen Einzugsgebiet abzuschätzen. Es ist deshalb wichtig, dass die Modelle vom Wissenschafter als Modellentwickler an den Praktiker als Modellanwender weitergegeben werden. Nun besteht aber in der Hydrologie – und nicht nur dort – zwischen der Wissenschaft und der Praxis ein ernst zu nehmendes Kommunikationsproblem: Auf der einen Seite gibt sich der Forschende vielfach mit seinem wissenschaftlichen Ergebnis zufrieden und kümmert sich zu wenig um die Umsetzung und Verbreitung seiner Resultate in der Praxis und in Nachbardisziplinen. Auf der anderen Seite rückt der Praktiker in der Regel nur ungern von seinen seit langem eingesetzten, eingespielten Verfahren ab und interessiert sich deswegen kaum für neuere Ansätze und Modelle. Dieser "Schnittstellenproblematik" zwischen Wissenschaft und Praxis, aber auch zwischen benachbarten Wissenschaftsdisziplinen wurde in der Vergangenheit erstaunlicherweise nur wenig Beachtung geschenkt. Erst in neuerer Zeit sind Ansätze zur Verbesserung der Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Interessengruppen zu erkennen. Dabei spielen Karten, Datenbanken, wissensbasierte Informationssysteme und Computerprogramme eine entscheidende Rolle. Sie erlauben es, Daten und Informationen auf eine einfache und anwenderfreundliche Art und Weise auszutauschen.

Auf internationaler Ebene wird seit Beginn der 1970er Jahre vor allem die Ausarbeitung hydrologischer Karten gefördert. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Publikation "Hydrological Maps" der WMO (1977) zu erwähnen. Wesentliche Impulse gingen auch von der "Internationalen Hydrologischen Dekade" (1965–1975) aus, anlässlich welcher die Staaten aufgerufen wurden, hydrologische Atlanten auszuarbeiten. Neben Deutschland ("Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland", 1978/79, 1:2 Mio. und 1:4 Mio.) folgten vorerst nur noch Kanada ("Hydrological Atlas of Canada", 1978, 1:10 Mio. und 1:20 Mio.) und die Internationale Rheinkommission ("Das Rheingebiet – eine hydrologische Monographie", 1978, 1:2.15 Mio.) dieser Aufforderung.

Wir werden uns im folgenden vor allem auf die hydrologischen Karten konzentrieren, weil sie einerseits das wichtigste Medium zur Umsetzung raumorientierter Forschungsarbeiten darstellen und weil sich der Autor andererseits in diesem Bereich mit der Leitung des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" (HADES) stark engagieren konnte. Der "Hydrologische Atlas der Schweiz" (Weingartner und Spreafico 1992, 1995, 1997, 1999) bietet als Kartenwerk die einmalige Möglichkelt, die räumlich breit gestreuten Daten und Informationen sowie die Ergebnisse regionalhydrologischer Studien zu einem Gesamtbild zusammenzufügen, um so die räumlichen Zusammenhänge hydrologischer Phänomene im gesamtschweizerischen Rahmen zu erkennen. Der "Hydrologische Atlas der Schweiz" richtet sich an Fachspezialistinnen und -spezialisten, an ein breites, naturwissenschaftlich interessiertes Publikum und an die Praxis. Seine Praxisrelevanz wird durch den hohen Käuferanteil aus dem Bereich der Umwelt- und Ingenieurbüros unterstrichen (Abbildung 5-1). Die bisher rund 1400 verkauften Exemplare belegen zudem, dass das Interesse an einer Umsetzung regionalhydrologischer Forschungsarbeiten sehr gross ist und dass sich der Atlas in der Schweiz an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Praxis etablieren konnte.



Abbildung 5-1: Herkunft der Käuferinnen und Käufer des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" (100% = ca. 1400 verkaufte Exemplare)

Figure 5-1: Sales by sector of the "Hydrological Atlas of Switzerland" (100% = approx. 1400 copies sold)

# 5.2 Planung und Realisation des HADES

In der Geschichte der schweizerischen Hydrologie fällt auf, wie wenig die Karte als Darstellungsform genutzt wurde (Schneeberger 1991). Einzig beim Niederschlag kann von einer gewissen Tradition gesprochen werden (Weingartner 1989): Als mutig ist die "Schweizerische Flussgebletskarte mit Niederschlagscurven" von Wolf (1870) zu bezeichnen (Abbildung 5-2): Wolf realisierte sie, wohl beflügelt von der Möglichkeit, dank der im Jahr 1863 aufgenommenen systematischen Niederschlagsmessung erstmals einen Überblick über die Niederschlagsverhältnisse der gesamten Schweiz zu gewinnen. Aus heutiger Sicht zeigt die Karte, wie die räumliche Lage der Niederschlagsstationen das Ergebnis entscheidend beeinflusst; sie verdeutlicht aber auch, dass zur Herleitung plausibler Niederschlagskarten umfassende naturräumliche und klimatologische Kenntnisse notwendig sind.

Das folgende Zitat von Billwiller (1883) dokumentiert, dass man sich der Mängel im Messnetz durchaus bewusst war und bereits im letzten Jahrhundert regionalhydrologische Überlegungen anstellte: "Den Zusammenhang zwischen den orographischen Verhältnissen und den Niederschlagsverhältnissen nachzuweisen wird man erst in der Lage sein, wenn die Lücken im Messnetz aufgefüllt sind." Über hundert Jahre später (!) gelangte Lang (1985) zu einer praktisch identischen Beurteilung: "Die Kenntnisse über die Beziehungen zwischen Niederschlag und Meereshöhe sind durch den Mangel an Messstationen im Hochgebirge und durch die besonderen Schwierigkeiten der N-Messung in höheren Lagen immer noch stark eingeschränkt." An der fundamentalen Tatsache, dass die Aussagekraft regionalhydrologischer Untersuchungen entscheidend vom Messnetz abhängt, hat sich in den letzten hundert Jahren trotz der Entwicklung verschiedenartiger, mehr oder weniger komplexer regionalhydrologischer Modelle nichts geändert. Allgemein gewinnt man den Eindruck, dass die Geschichte der Niederschlagsmessung und -kartographie zwischen Optimismus und eher pessimistischem Realismus pendelte: "Durch die im Laufe des Jahres 1900 in Funktion getretene dritte Serie von neuen Beobachtungsposten hat die mit 1898 begonnene Ergänzung des Netzes der Regenmessstationen ihren Abschluss gefunden. [..] Das so vervollständigte Messnetz dürfte nun so ziemlich hinreichen, um die für die Untersuchung der Wasserverhältnisse des Landes so notwendigen Daten betreffend die atmosphärischen Niederschläge zu liefern" (SMA 1900). Dieser Optimismus wich meist eher pessimistischen Einschätzungen, wenn es darum ging, die punktuellen Niederschlagsdaten zu regionalisieren. So bittet Uttinger, der zwei Niederschlagskarten realisierte (Uttinger 1949 und 1967), welche auch heute noch benutzt werden, seine Niederschlagskarten "nur anzusehen als eine gutachtliche Äusserung von Fachleuten, die aufgrund der vorliegenden Beobachtungen und unter Berücksichtigung der bis jetzt bekanntgewordenen Tatsachen über den Einfluss der Orographie auf die Niederschlagsverteilung das kartographisch wiedergegebene Verteilungsbild als das den natürlichen Verhältnissen am nächsten kommende ansehen" (Uttinger 1967).



Abbildung 5-2: Ausschnitt aus der "Schweizerischen Flussgebletskarte mit Niederschlagscurven, beruhend auf Messungen von 1864–69" (Wolf 1870), Massstab der Originalkarte ca. 1:1 Mio. Figure 5-2: An extract of the first precipitation map of Switzerland (Wolf 1870)

Auch in neuerer Zeit wurden nur wenige hydrologische Karten veröffentlicht, welche das Gebiet der gesamten Schweiz abdecken. Dies war mit ein Grund, dass gegen Ende der 1970er Jahre in der Schweiz die Idee zur Schaffung eines hydrologischen Atlasses entstand. Wesentliche Impulse gingen auch vom bereits erwähnten "Hydrologischen Atlas der Bundesrepublik Deutschland" aus, der damals in der Schlussphase der Bearbeitung stand. Als Hauptantriebsfeder wirkte aber die Erkenntnis, dass die Möglichkeiten regionalhydrologischer Analysen zu wenig genutzt wurden. Standen um die Jahrhundertwende räumlich breit angelegte Analysen im Vordergrund (z.B. Brückner 1905, Pardé 1920), so war im Zuge der "Modernisierung" der Hydrologie thematisch wie räumlich eine Einengung und Spezialisierung zu beobachten. Diese Entwicklung in Richtung Prozessnähe ist an sich begrüssenswert, sofern die regionale Sicht nicht vernachlässigt wird. Mit einem hydrologischen Atlas sollte einerseits der regionalhydrologischen Forschung in der Schweiz neue Impulse verliehen und andererseits ein Medium zur Umsetzung und Verbreitung von regionalhydrologischen Forschungsergebnissen geschaffen werden.

Konkrete Schritte zur Ausarbeitung des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" wurden zu Beginn der 1980er Jahre – auf Initiative von Christian Leibundgut – in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern eingeleitet. Die Publikation von Weingartner (1985) und das Pilotkartenblatt "Abflussregimes der Schweiz" von Weingartner und Aschwanden (1985) schlossen diese konzeptionelle Phase ab. Im Jahr 1988 bewilligte der schweizerische Bundesrat einen namhaften Kredit zugunsten der Ausführungsarbeiten des Atlasses und beauftragte die Landeshydrologie und -geologie mit der Programmleitung sowie die Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern mit der wissenschaftlichen, redaktionellen und kartographischen Leitung. Als Autoren konnten die in der jeweiligen Thematik spezialisierten Hydrologinnen und Hydrologen gewonnen werden. Der "Hydrologische Atlas der Schweiz" darf aufgrund seiner breiten personellen und institutionellen Abstützung als ein Gemeinschaftswerk der Schweizer Hydrologinnen und Hydrologen bezeichnet werden (Abbildung 5-3).

|     | Bundesrat<br>Auftraggeber                                                                                                                    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Landeshydrologie und -geologie<br>Programmleitung und Finanzen                                                                               |
| En  | Atlaskommission<br>Itscheidungen über inhaltliche und finanzielle Fragen<br>Förderung der Projekttätigkeiten<br>Information                  |
|     | Wissenschaftlicher Ausschuss<br>Wissenschaftliche Begleitung und Begutachtung                                                                |
| Geo | graphisches Institut der Universität Bern,<br>Gruppe für Hydrologie<br>Projektleitung<br>enschaftliche und kartographische Gesamtbearbeitung |
|     | Autorinnen und Autoren<br>Bearbeitung des thematischen Inhaltes der Tafeln                                                                   |
|     | Bundesamt für Landestopographie<br>Reproduktion und Druck<br>Vertrieb und Abonnementsverwaltung                                              |

Abbildung 5-3: Organigramm des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" (Stand 1999) Figure 5-3: Project organisation of the "Hydrological Atlas of Switzerland"

Die Ausarbeitung des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" begann 1989. Die erste Lieferung mit siebzehn Kartenblättern erschien 1992 (s. Tabelle 5-1). Die Publikation der zweiten Lieferung mit sechs Kartenblättern und zwei Auflegefolien erfolgte 1995. Die Lieferungen der Jahre 1997 und 1999 umfassen sechs bzw. sieben neue Tafeln, so dass das Gesamtwerk mittlerweile auf 36 Tafeln angewachsen ist. Die Atlas-Kommission hat im Jahr 1998 einer Fortsetzung des Projektes in der bisherigen Form bis Ende 2004 zugestimmt. Bis zu diesem Zeitpunkt sollen weitere zwanzig bis dreissig Tafeln realisiert werden. Ab 2005 wird das Bearbeitungsmodell "Werterhaltung" zum Tragen kommen. Es umfasst einerseits die Neubearbeitung "veralteter" Tafeln und andererseits die Produktion einiger weniger neuer Tafeln (1 bis 2 Tafeln pro Jahr).

Parallel zum analogen Atlas wird seit 1999 ein digitaler HADES erstellt, um die im Atlas dargestellten Daten und Informationen auch digital im Internet verfügbar zu machen. Stettler (1995) hat dazu im Rahmen eines Pilotprojektes die theoretischen und programmtechnischen Grundlagen erarbeitet. Allerdings stand damals eine Version, die auf Compact Disc (CD) ausgeliefert werden soll, im Vordergrund. In der Zwischenzeit hat das Internet stark an Bedeutung gewonnen, weshalb eine gewisse konzeptionelle Neuorlentierung erforderlich war.

Das Produkt "Hydrologischer Atlas" wird also nicht nur weiterwachsen, sondern auch diversifiziert werden. Der Atlas wird sich in Zukunft als duales Produkt mit einem analogen und einem – den analogen Teil ergänzenden (aber nicht konkurrenzierenden) – digitalen Teil präsentieren. Zur Diversifikation gehören auch die von einem Lehrerteam erstellten "Arbeitsblätter für die Sekundarschulstufe II", mit denen hydrologische Aspekte der Schweiz, wie sie im Atlas zum Tragen kommen, in die Schule eingebracht werden (Milan et al. 2000). In den sechs Arbeitsblättern werden folgende Themenbereiche behandelt: Wasserhaushalt, Hochwasser, Wasserkraftnutzung, Gewässerschutz sowie Schnee und Gletscher.

Tafel Titel Massatab Autorinnen und Autoren Jahr 1 Grundlagen 1.1 Übersichtskarte der Schwelz und Einleitung zum Allas 1:500'000 1992 Roll Weingartner, Manfred Spreafico 1.2 Kenngrössen kleiner Einzugsgebiete 1:500'000 Rolf Breinlinger, Patrik Gamma, Rolf 1992 Weingartner 1.3 Verzeichnis der Fliessgewässer und Seen nach dem Gewässer-1:500'000 Armin Petrascheck, Ulrich von Blücher 1995 informationssystem der Schweiz (GEWISS) Auflegefollen 1:500'000 1995 2 Niederschlag Niederschlagsmessnetze 1:500'000 Rolf Weingartner 1992 2.1 2.2 Mittlere Jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980 1:500'000 Walter Kirchhofer, Borls Sevruk 1992 2.3 Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlags-1:500'000 Boris Sevruk, Walter Kirchhofer 1992 hõhen 1951–1980 2.4 Extreme Punktregen unterschledlicher Dauer und Wiederkehr-Heinz Geiger, Gerhard Röthlisberger, 1:1.1 Mio. 1992 perioden 1901-1970 Albert Stehli, Jürg Zeller 2.42 Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehr-1:1.1 Mio. Holger Jensen, Herbert Lang, Jost Rinder-1997 perioden 1901-1970 [Neuauflage] knecht 2.5 Extreme Gebletsniederschläge unterschiedlicher Dauer und 1:1.1 Mio. Dielmar Grebner, Thomas Roesch, 1999 Wiederkehrperioden 1981-1993 1:4 Mio. Manfed Schwarb **3 Schnee und Gleischer** 3.1 Schneedecken- und Gletschermessnetze 1:800'000 Jaroslav Martinec, Roland Meister, 1992 Markus Aellen 3.2 Schneehöhen und Wasseräquivalente der Schneedecke; Neu-1:1.4 Mio. Jaroslav Martinec, Herbert Lang, Mario 1992 schneehöhen extremer Schneefall-Ereignisse 1:2.2 Mio. Rohrer 3.3 Wasseräquivalent der Schneedecke 1:1.1 MIo. 1992 Mario Rohrer, Herbert Lang 3.4 Räumlich-zeitliche Variationen des Wasseräquivalentes der 1:1.1 Mio. Mario Rohrer, Urs Steineoger, Andres 1995 Schneedecke Fischer, Holger Jensen, Herbert Lang 3.5 1:1.1 Mio. **Roland Meister** 1995 Extremer Schneedeckenzuwachs 3.6 Variationen der Schneegrenze 1:1.1 Mio. Gabriela Apll, Martin Barben, Michael 1997 Baumgartner, Thorbjörn Holzer, Rolf Weingartner 3.7 Längen- und Massenänderungen der Gletscher seit dem letzten 1:1.1 Mio. Markus Aellen, Martin Funk 1999 Höchststand um 1850 3.8 Nachelszeitliche Gletscherschwankungen 1:1.1 Mio. Hanspeter Holzhauser, Heinz J. Zumbühl 1999 3.9 Permafrost - Verbreilung und ausgewählte Aspekte 1:500'000 Daniel Vonder Mühll, Koordinations-1999 gruppe Permatrost 4 Verdunstung Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973-1992 1:500'000 1999 4.1 Lucas Menzel, Herbert Lang, Martin Rohmann

Tabelle 5-1: Übersicht über die ersten vier Lieferungen des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" Table 5-1: Overview of the first four publications of the "Hydrological Atlas of Switzerland"

#### Tabelle 5-1 (Fortsetzung)

| 5 Flies | sgewässer und Seen                                                                                                |            |                                                                               |      |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.1     | Hydrometrische Netze                                                                                              | 1:500'000  | Bruno Schädler, Rolf Bigler                                                   | 1992 |
| 5.2     | Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten<br>des Abflusses                                    | 1:500'000  | Rolf Weingartner, Hugo Aschwanden                                             | 1992 |
| 5.3     | Beelnflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW)<br>und Seeregulierungen                              | 1:500:000  | André Margot, Rudolf Sigg, Bruno<br>Schädler, Rolf Weingartner                | 1992 |
| 5,4     | Natürliche Abflüsse 1961–1980                                                                                     | 1:500'000  | Bruno Schädler, Rolf Weingartner                                              | 1992 |
| 5.5     | Entwicklung der Korrektionen an Fliessgewässem und Seen                                                           | 1:1.1 MIo. | Rudolf Koblet                                                                 | 1995 |
| 5,6     | Hochwasserabflüsse – Analyse langer Messreihen                                                                    | 1:500'000  | Hugo Aschwanden, Manfred Spreafico                                            | 1995 |
| 5.7     | Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugs-<br>gebieten auf Starkregen                           | div.       | Felix Naef, Símon Scherrer, Christian<br>Zurbrügg                             | 1999 |
| 5.8     | Niedrigwasser – Grundlagen zur Bestimmung der Abflussmenge<br>Q <sub>347</sub>                                    | 1:500'000  | Hugo Aschwanden, Caroline Kan                                                 | 1999 |
| 6 Wass  | erhaushalt                                                                                                        |            |                                                                               |      |
| 6.1     | Wasserhaushalt grosser Einzugsgeblete                                                                             | 1:2.2 Mlo. | Bruno Schädler, Rolf Bigler                                                   | 1992 |
| 7 Stoff | naushall                                                                                                          |            |                                                                               |      |
| 7.1     | Messnetze zur Bestimmung chemischer und physikalischer<br>Parameter der Oberflächengewässer und des Niederschlags | 1:500'000  | Adrian Jakob, Andrea Geissei                                                  | 1992 |
| 7.2     | Mittlere Konzentrationen ausgewählter chemischer Parameter in<br>Oberflächengewässem                              | 1:500'000  | Paul Llechti, Adrian Jakob                                                    | 1992 |
| 7.3     | Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern und Seen                                                                | 1:500'000  | François de Montmollin, Adrian Jakob                                          | 1995 |
| 7.4     | Schwebstoffkonzentrationen und -frachten in Fliessgewässern                                                       | 1:500'000  | Adrian Jakob, Manfred Spreafico                                               | 1997 |
| 8 Bode  | n- und Grundwasser                                                                                                |            |                                                                               |      |
| 8.1     | Geologische, hydrogeologische und bodenkundliche Grund-<br>lagenkarten und Typprofile                             | 1:1.1 Mio. | Paul Buttet, Hermann Fischer, Jean-Pierre<br>Tripet, Karl Peyer               | 1992 |
| 8.2     | Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 1: Geologie                                                        | 1:500'000  | Adrian Pfiffner, Andreas Kühni, Laurent<br>Jemelin                            | 1997 |
| 8.3     | Geologische und hydrogeologische Profile, Tell 2: Hydrogeologie                                                   | 1:500'000  | Mahmoud Bouzelboudjen, László Király,<br>Francesco Kimmeier, François Zwahlen | 1997 |
| 8.4     | Haupttypen der Grundwasserleiter                                                                                  | 1: 3 Mio.  | Antonio Demattels, Stefan Hesske, Aurèle<br>Parriaux, Laurent Tacher          | 1997 |

Jahr: Erscheinungsjahr (1992: erste Lieferung, 1995: zweite Lieferung, 1997: dritte Lieferung, 1999: vierte Lieferung)

# 5.3 Der HADES als Kartenwerk

# 5.3.1 Bedeutung der Karten

Karten können als Modelle der realen Umwelt bezeichnet werden. Sie erlauben eine genaue, eindeutige und effiziente Umsetzung von Ergebnissen raumbezogener Forschungsarbeiten und ermöglichen es damit – an der erwähnten Schnittstelle zwischen Forschung und Praxis – wesentliche Forschungsinhalte einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen. In unserer stark auf das Visuelle ausgerichteten Welt sind sie auch im Zeitalter der Computer ein wichtiges Instrument einer modernen Raumwissenschaft, das durch seine Präzision in der wissenschaftlichen Aussage, seine graphische Eleganz und seine Langlebigkeit zu überzeugen vermag. Während für die wissenschaftliche Bearbeitung eines regionalhydrologischen Themas Monate bis Jahre, für die Umsetzung der Forschungsergebnisse in eine gedruckte Karte Wochen benötigt werden, kann die wissenschaftliche Aussage einer Karte innerhalb weniger Sekunden erfasst werden. Darin liegt die eigentliche Faszination der Karte!

## 5.3.2 Kartenmassstab

Der Kartenmassstab prägt die Aussagekraft einer Karte. Er hängt hauptsächlich vom räumlichen Detaillierungsgrad regionalhydrologischer Modelle, von der Grösse des Untersuchungsraumes und von der gewünschten Generalisierung ab. Der Detaillierungsgrad regionalhydrologischer Modelle wird wiederum wesentlich von der räumlichen Auflösung der hydrologisch relevanten Messnetze beelnflusst. Im Jahr 1989 waren beispielsweise rund 600 Niederschlagsstationen in Betrieb (s. Abbildung 5-6), wovon etwa die Hälfte Messreihen von mehr als dreissig Jahren aufwiesen. Mit einer Station auf 70 km<sup>2</sup> ist die mittlere Dichte der Messstationen sehr hoch. Die regionalen Unterschiede sind jedoch bemerkenswert: Generell ist die Dichte der Niederschlagsstationen im Alpenraum kleiner als im Mittelland und im Jura. Damit ist die grundsätzliche Problematik, die sich in der Schweiz bei der regionalen Übertragung stellt, formuliert: Limitierend für die Anwendung dieser Verfahren sind die Bedingungen im Alpenraum, wo einer hohen räumlichen Variabilität der hydrologischen Kenngrössen eine relativ geringe Messnetzdichte gegenübersteht. Wie die Fallbeispiele in den Kapiteln 3 und 4 allerdings belegen, ist es in der Schweiz trotz dieser Einschränkungen möglich, regionalhydrologische Analysen mit einem relativ hohen räumlichen Detaillierungsgrad durchzuführen. Deshalb wurde beim "Hydrologischen Atlas" der Massstab 1:500'000 als Hauptmassstab gewählt (s. Tabelle 5-1). Weitere wesentliche Aspekte haben diesen Entscheid unterstützt (s. Weingartner 1985):

- Um zu anwendungsorientierten Karten zu gelangen, empfiehlt die WMO (1977) in der bereits erwähnten Publikation "Hydrological Maps", für Nationen mit Flächen zwischen 10<sup>4</sup> und 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup> Kartenmassstäbe im Bereich von 1:500'000 und 1:1.1 Mio, einzusetzen.
- Die Erfahrungen beim Pilotkartenblatt "Abflussregimes" (Weingartner und Aschwanden 1985) haben gezeigt, dass die kleinsten im Massstab 1:500'000 noch kartierbaren Raumeinheiten im Bereich von etwa 10 km<sup>2</sup> liegen. Dies entspricht weitgehend der räumlichen Auflösung mesoskaliger Modelle (vgl. Kapitel 1.3).
- Beim "Atlas der Schweiz" (Imhof und Spiess, ab 1965) hat sich der Massstab 1:500'000 alles in allem als zweckmässig erwiesen. Überall dort, wo die Daten oder das Wissen diesen Hauptmassstab nicht verantworten liessen, wurden aber auch kleinere Massstäbe gewählt.

Im weiteren erfolgte die Wahl des Hauptmassstabs auch unter Berücksichtigung von technischen und gestalterischen Fragen, auf die hier nicht weiter eingetreten werden soll (vgl. Weingartner 1991 und Abbildung 5-5).

Die bei der Ausarbeitung der ersten vier Atlas-Lieferungen gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass die Wahl des Hauptmassstabes richtig war. Die meisten Themen liessen sich in diesem Massstab in einem geeigneten Generalisierungsgrad darstellen, wie folgende Beispiele belegen:

- Bei der Tafel 1.3 "Verzeichnis der Fliessgewässer und Seen nach dem Gewässerinformationssystem der Schweiz (GEWISS)" (Petrascheck, von Blücher 1995) wurden die Möglichkeiten des Massstabs voll ausgenutzt (Abbildung 5-4): In der Karte 1:500'000 ist das verkleinerte Gewässernetz 1:200'000 dargestellt, das in über 6000 numerierte Gewässerabschnitte unterteilt ist. Im weiteren zeigt die Karte, zu welchem Basisgebiet ein Gewässerabschnitt gehört.
- Die Tafel 7.2 "Mittlere Konzentrationen ausgewählter chemischer Parameter in Oberflächengewässern" (Liechti und Jakob 1992) hingegen belegt, dass es beim gewählten Hauptmassstab 1:500'000 durchaus auch möglich ist, Punktdarstellungen zu realisieren, ohne dabel "leere" Karten zu produzieren (Abbildung 5-10).

Die Verwendung eines einheitlichen Massstabs erleichtert den direkten Vergleich unterschiedlicher Themen und bildet daher eine wichtige Voraussetzung für das Erkennen von Zusammenhängen. In einigen Fällen wurden auch kleinere Kartenmassstäbe verwendet. Dadurch sollte vermieden werden, inhaltsarme Karten zu produzieren. Die kleineren, platzsparenden Massstäbe eröffnen aber auch die Möglichkeit, den Karteninhalt mit Diagrammen und Tabellen zu ergänzen, so dass insgesamt wiederum eine hohe Informationsdichte entsteht. Anschauliche Beispiele dazu liefern die Tafeln des Kapitels 3 "Schnee und Gletscher".



Abbildung 5-4: Ausschnitt aus der HADES-Tafel 1.3 "Verzeichnis der Fliessgewässer und Seen nach dem Gewässerinformationssystem der Schweiz (GEWISS)", Massstab 1:500'000 (aus Petrascheck, von Blücher 1995) Figure 5-4: An extract of map 1.3 "Index of Rivers and Lakes in the Swiss Waters Information System (GEWISS)" from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

# 5.3.3 Inhaltlicher und graphischer Aufbau

Eln Atlas bildet eine koordinierte Abfolge von Kartenblättern oder Tafeln. Beim "Hydrologischen Atlas der Schweiz" wurde von der Gliederung der Hydrologie nach den Elementen des Wasserkreislaufes, den sog. Systemelementen, ausgegangen (Tabelle 5-1). Dabei galt es zu berücksichtigen, dass diese Elemente sowohl quantitative Aspekte (z.B. Niederschlagshöhen oder Abflussmengen) als auch qualitative Aspekte (z.B. Konzentrationen chemischer Parameter) beinhalten. Zur Darstellung der qualitativen Aspekte wurde das Kapitel "Stoffhaushalt" geschaffen. Im Vergleich oder im Zusammenwirken mehrerer Systemelemente ergeben sich wasserhaushaltliche Aussagen (Kapitel "Wasserhaushalt"). Im weiteren gibt es Grundinformationen, welche nicht direkt ein Systemelement betreffen, welche jedoch für das Verständnis der im Atlas vorhandenen Darstellungen wichtig sind. Deshalb wird der Atlas mit dem Kapitel "Grundlagen" eingeleitet.

Jedes Kapitel umfasst mehrere Kartenblätter. Die Auswahl dieser Kartenblätter basiert auf einem Vorschlag von Weingartner (1985). Anlässlich von Tagungen und mittels Umfragen unter den schweizerischen Hydrologinnen und Hydrologen wurde der Inhalt konkretisiert, die Autorinnen und Autoren der einzelnen Tafeln bestimmt und der Zeitplan für die wissenschaftliche wie kartographische Ausarbeitung erstellt.

Die Kartenblätter sind in einem Ringordner zusammengestellt, wobei die zu einem Kapitel gehörenden Kartenblätter mit einem identischen Farbbalken gekennzeichnet sind. Der Ringordner garantiert bei der Handhabung grösstmögliche Flexibilität; so lassen sich Kartenblätter späterer Lieferungen problemlos in die entsprechenden Kapitel einfügen.

Die Titel, Legenden, Diagramme und Tabellen sind in deutscher und französischer Sprache ausgearbeitet. Bei der graphischen Gestaltung des Atlasses wurde auf eine hohe Anwenderfreundlichkeit Wert gelegt. Auf einer Tafel sollen alle notwendigen Unterlagen verfügbar sein, die zur Anwendung und praxisgerechten Umsetzung des Karteninhalts benötigt werden. Deshalb umfasst eine Tafel neben der Karte noch weitere Elemente: einen viersprachigen Erläuterungstext (deutsch, französisch, italienisch, englisch), in der Regel eine Graphikseite sowie fakultativ eine Tabellenselte (vgl. Abbildung 5-5). "Der 'Hydrologische Atlas der Schweiz' zeichnet sich dadurch von anderen thematisch orientierten Exemplaren aus, dass er alle Aussagen – Karten, Zahlen und Texte – 'in einem Zuge' solide bringt und sachgerecht geordnet hat" (Hempel 1993).



Abbildung 5-5: Layout des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz"

Figure 5-5: Layout of the "Hydrological Atlas of Switzerland"

# 5.4 Methodische Aspekte des HADES

Die Tabelle 5-2 vermittelt eine Übersicht, welche Methoden bei der wissenschaftlichen Bearbeitung der HADES-Tafeln bisher hauptsächlich eingesetzt wurden:

 Bei rund der Hälfte der Tafeln begnügte man sich mit der Analyse und Darstellung der Ausgangsdaten; In diesen Fällen wurden also keine eigentlichen regionalhydrologischen Analysen durchgeführt. Dabei ist aber auch zu beachten, dass solche Analysen bei einzelnen Themen gar nicht möglich sind oder nicht benötigt werden und die Darstellung der Ausgangsdaten – z.B. Messstellenkarten (wo stehen welche Daten zur Verfügung?) – oder die Kartierung eines bestimmten Zustandes – z.B. Kartierung der an den Fliessgewässern ausgeführten Korrektionen (wo sind die Gewässer wie verbaut?) – das eigentliche Ziel ist. Darstellungen von Ausgangsdaten vermitteln erste interessante Einblicke in die räumlichen Strukturen hydrologischer Kenngrössen und bilden damit den Schlüssel zur Entwicklung regionalhydrologischer Modelle.

Tabelle 5-2: Überblick über die im "Hydrologischen Atlass der Schweiz" angewandten Methoden Table 5-2: Outline of the scientific methods used to prepare the maps of the "Hydrological Atlas of Switzerland"

| Tafel                     |    |     |     |    |     |     |              |    |     |
|---------------------------|----|-----|-----|----|-----|-----|--------------|----|-----|
|                           | .1 | .2  | .3  | .4 | .5  | ,6  | .7           | .8 | .9  |
| 1 Grundlagen              |    |     |     | -  |     |     | -            | -  |     |
| 2 Niederschlag            |    | •   | •   | •  | ۵   | 547 | -            | -  | 522 |
| 3 Schnee und Gletscher    |    | 0,♦ |     | ٠  | □,♦ |     | 0,0          | 0  | ٠   |
| 4 Verdunstung             | ٠  | -   | -   | •  | -   |     | -            | -  | •   |
| 5 Fliessgewässer und Seen |    | ٠   | ٠   | •  |     |     | 0            | •  | _×  |
| 6 Wasserhaushalt          |    | -   | -   | -  |     | -   | ÷.           | -  | -   |
| 7 Stoffhaushalt           |    |     |     |    | -   | 121 | ( <b>2</b> ) | Ψ. | 140 |
| 8 Boden- und Grundwasser  |    |     | ۵,O | 0  | 5   |     | -            | -  |     |

Analyse der Ausgangsdaten, Ergebnisse von Kartierungen im Gelände

O Fallstudien

Regionale Übertragungsfunktionen und/oder regional-taxonomische Verfahren (Definitionen s. Kapitel 1.2.1 und 1.2.2)

- Bei einzelnen Tafeln stehen Fallstudien im Mittelpunkt. Hier war eine umfassende gesamtschweizerische Darstellung aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich.
- Bei den Verfahren der regionalen Übertragung dominieren beim "Hydrologischen Atlas" die regionalen Übertragungsfunktionen, während regional-taxonomische Verfahren meistens nur in Kombination mit regionalen Übertragungsfunktionen angewandt wurden. Eine umfassende Diskussion der methodischen Aspekte regionalhydrologischer Analysen findet sich in Kapitel 1 dieser Arbeit.

Insgesamt wurden die methodischen Möglichkeiten der regionalen Übertragung bei den ersten vier Lleferungen des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" weitgehend ausgeschöpft. Trotzdem ist man an Grenzen gestossen. Dies zeigt sich darin, dass in Einzelfällen Punktdarstellungen und/oder kleinere Kartenmassstäbe gewählt werden mussten. Echte Fortschritte lassen sich aber nicht unbedingt nur durch komplexere regionalhydrologische Modelle erzielen; vielmehr ist auch auf eine Erweiterung der Datengrundlagen hinzuarbeiten. Insbesondere sind die hydrologischen und hydrologisch relevanten Messnetze – vor allem im Alpenraum – zu verdichten und untereinander besser zu koordinieren; auch müssen – wie in Kapitel 2 besprochen – die räumlichen Grundlagendaten thematisch erweitert, inhaltlich vertieft und in ihrem räumlichen Auflösungsvermögen verbessert werden.

# 5.5 Bedeutung und Anwendungsmöglichkeiten des HADES

Das inhaltliche Spektrum des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" lässt sich mit den drei Kartenblatttypen "Messnetz", "Informationen zum Zustand der Gewässer bzw. der Systemelemente des Wasserhaushaltes" und "Bemessungsverfahren" sehr gut erfassen (Tabelle 5-3). Anhand dieser drei Typen soll nun auf die Bedeutung und die Anwendungsmöglichkeiten des Atlasses hingewiesen werden. Damit kann insbesondere auch gezeigt werden, wie der HADES an der Schnittstelle zwischen Forschung und Praxis, zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, aber auch zwischen einzelnen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedliche Aufgaben übernehmen kann.

| Tafel                     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                           | .1 | .2 | .3 | .4 | .5 | .6 | .7 | .8 | .9 |
| 1 Grundlagen              |    | •  | D  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 2 Niederschlag            |    | ٠  | ٠  | ٠  | •  | -  | -  | -  | -  |
| 3 Schnee und Gletscher    |    | ٠  | 0  | ٠  | •  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4 Verdunstung             | •  | -  | -  | •  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 5 Fliessgewässer und Seen |    | •  | 0  | •  | 0  | 0  | 0  | •  |    |
| 6 Wasserhaushalt          | 0  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | 64 | 26 |
| 7 Stoffhaushalt           |    | 0  | •  | 0  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 8 Boden- und Grundwasser  |    | 0  | 0  | 0  | -  | -  | -  | -  |    |

Tabelle 5-3: Übersicht über die Kartentypen des "Hydrologischen Atlasses der Schweiz" Table 5-3: Overview of the map types in the "Hydrological Atlas of Switzerland"

Kartentyp "Messnetz"

O Kartentyp "Informationen zum Zustand der Gewässer bzw., der Systemelemente des Wasserhaushaltes"

Kartentyp "Bemessungsverfahren"

## 5.5.1 Kartenblatt Typ "Messnetz"

Die Schweiz verfügt über die folgenden hydrologischen bzw. hydrologisch relevanten Messnetze:

• Niederschlag und weitere Klimaparameter: Messungen ab 1863 durch die Schweizerische Meteorologische Anstalt, durch Kantone und Private (s. Abbildung 5-6 und Weingartner 1992);



Abbildung 5-6: Entwicklung der Niederschlagsmessnetze der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt Figure 5-6: Development of the precipitation networks maintained by the Swiss Meteorological Institute

- Abfluss: Messungen ab 1863 durch die Landeshydrologie und -geologie, durch Kantone, Hochschulen und Private (s. Schädler und Bigler 1992);
- Schneedecke: Messungen ab den 1930er Jahren durch das Eidg. Institut f
  ür Schnee- und Lawinenforschung, das Geographische Institut der ETH Z
  ürich und durch weitere Institutionen (s. Martinec, Meister und Aellen 1992);
- Gletscher: ab 1870 (Rhonegletscher) auf Initiative der Gletscherkommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften; Erfassung vor allem der Längenänderungen, an einigen Gletschern auch Bestimmung des Massenhaushalts (s. Martinec, Meister und Aellen 1992; Aellen und Funk 1999);
- Chemische und physikalische Parameter der Fliessgewässer und Seen: systematische Messungen ab Ende der 1950er Jahre – mit einem Schwergewicht ab den 1970er Jahren – durch die Landeshydrologie und -geologie, das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, die Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz sowie durch Kantone und Private (s. Jakob und Geissel 1992);
- Grundwasser: Messung der Flurabstände sowie physikalischer und chemischer Parameter durch die Landeshydrologie und -geologie ab 1959, mit einer Verdichtung des Messnetzes ab 1980; weitere Messungen durch Kantone und Private (s. Buttet 1992).

Die Veränderungen innerhalb der Messnetze durch Aufhebungen, Verschiebungen und Neueinrichtungen von Stationen sowie unterschiedliche Datenlieferanten erschweren oftmals den Überblick über die Verfügbarkeit hydrologischer Daten. Es war deshalb für die erste Lieferung des Atlasses vordringlich, Messnetzkarten zu realisieren, die auf einen Blick zeigen, welche Daten für welche Zeitperioden bei welcher Institution verfügbar sind. Soweit dies möglich war, wurde für jedes hydrologische Systemelement eine Messstellenkarte ausgearbeitet (vgl. Tabelle 5-1). Die einzelnen Messstellen wurden nach der Messart, der Messlänge und teilweise nach weiteren Kriterien klassiert und mit einer entsprechenden Signatur kartiert. Die Stationsnummer welst auf den Eintrag auf der Tabellenseite hin, der die Informationen über eine Messstelle erweitert und vertieft (Abbildung 5-7). Mit den Messstellenkarten des "Hydrologischen Atlasses" verfügt man über die notwendigen Entscheidungsgrundlagen für eine gezielte, problembezogene Beschaffung hydrologischer Daten.



Abbildung 5-7: Ausschnitt aus der Karten- und Tabellenseite der HADES-Tafel 2.1 "Niederschlagsmessnetze" (aus Weingartner 1992)

Figure 5-7: An extract of chart and table of map 2.1 "Precipitation Networks" from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

## 5.5.2 Kartenblatt-Typ "Informationen zum Zustand der Gewässer bzw. der Systemelemente des Wasserhaushaltes"

"Informationen zum Zustand der Gewässer bzw. der Systemelemente des Wasserhaushaltes" sind von allgemeinem Interesse. Sie leisten unter anderem einen wertvollen Beitrag zur Entscheidungsfindung in Gewässerschutzfragen; sie können aber auch in der Lehre gewinnbringend eingesetzt werden. Im folgenden werden zwei für diesen Typ charakteristische Kartenblätter vorgestellt:

### a) Tafel 5.3 "Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke und Seeregulierungen"

In der Schweiz nutzen rund 470 Kraftwerke mit installierten Leistungen von jeweils 300 kW und mehr sowie rund 1100 Kleinstkraftwerke die Wasserkräfte zur Stromproduktion und beeinflussen damit die Wasserführung der Fliessgewässer. Die Wasserkraftnutzung stellt somit einen bedeutenden Eingriff in den Wasserhaushalt dar. Es erstaunt daher nicht, dass Informationen über die anthropogene Beeinflussung des Abflussregimes sehr gefragt sind, können sie doch wesentlich zu einer Objektivierung der teilweise hitzigen Diskussion rund um die Wasserkraftnutzung beitragen.

Auf der Atlas-Tafel 5.3 "Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke und Seen" von Margot, Schädler, Sigg und Weingartner (1992) sind im Massstab 1:500'000 alle grossen Stauseen und Ausgleichsbecken sowie schematisch die Wasserfassungen und Wasserleitungssysteme der Kraftwerke und – als Kernaussage der Karte – die in den Restwasserstrecken verbleibende Wassermenge als Prozentsatz des mittleren natürlichen Jahresabflusses kartiert (Abbildung 5-8). Zur Berechnung dieses Prozentsatzes müssen einerseits der mittlere natürliche Jahresabfluss, andererseits die abgeleiteten Wassermengen bekannt sein:

- Der mittlere natürliche Jahresabfluss wurde mit Hilfe von regionalen Übertragungsfunktionen geschätzt.
- Die an den einzelnen Wasserfassungen entnommenen Wassermengen wurden rechnerisch ermittelt. Die Summe dieser Wasserentnahmen entspricht jeweils der in einem Kraftwerk turbinierten Wassermenge. Diese Wassermenge konnte mit Hilfe der in der Statistik der Wasserkraftanlagen (BWW 1973, 1990) zusammengestellten Angaben über die Stromproduktionswerte (mittlere Produktionserwartung in kWh) und das mittlere Nettogefälle (Höhendifferenz zwischen Stausee bzw. Wasserfassung und Zentrale unter Abzug der Reibungsverluste) berechnet werden.

| 159 |  |
|-----|--|
|-----|--|

#### Beeinflusste Fliessgewässer Cours d'eau influencés Verbleibender Anteil des mittleren natürlichen Jahresabflusses Partie restante du débit moyen annuel naturel $\leq 20\%$ ..... 21-40% 41-60% 61-80% > 80% 80% und Erhöhung des natürlichen Abflusses im > Winterhalbjahr um mindestens 20% 80% ct augmentation du débit naturel de 20% au > moins en hiver Durch Schwellbetrieb stark beeinflusste Fliessstrecke Tronçon de cours d'eau influencé par une exploitation en éclusees

Abbildung 5-8; Ausschnitt aus der HADES-Tafel 5.3 "Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW) und Seeregulierungen" (aus Margot, Schädler, Sigg und Weingartner 1992)

Figure 5-8: An extract of map 5.3 "Influence on Rivers by Water Power Stations (≥ 300 kW) and Lake Control" from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

Bei der Kartierung wurden sechs Beeinflussungsgrade unterschieden (Abbildung 5-8): Blau bedeutet eine schwache Beeinflussung der Wasserführung; in diesen Flussabschnitten erreicht der verbleibende Abfluss mehr als 80% des natürlichen Jahresabflusses. Das Farbenspektrum der Signaturen läuft weiter über Grün, Gelb und Orange zu Rot. Rot bedeutet eine sehr grosse Beeinflussung des Abflussregimes; der Jahresabfluss erreicht hier weniger als 20% der natürlichen Abflussmenge.

Von der Wasserkraftnutzung sind vor allem die alpinen Gewässer betroffen. Die Tabelle 5-4 gibt eine generelle Übersicht über das Ausmass dieser Beeinflussungen. Beispielsweise ist die Wasserführung im Gebiet der Rhône (bis zum Genfer See) In ca. 38%, in jenem des Ticino (bis Bellinzona) In ca. 32% der Gewässerstrecken beeinflusst; im Gebiet der Aare (bis Bern) sind noch ca. 12% der Gewässerstrecken betroffen. Die Prozentwerte in Tabelle 5-4 wurden auf der Basis des Gewässernetzes 1:200'000 erhoben. Bei diesem Massstab sind die kleineren Fliessgewässer, welche in der Regel unbeelnflusst sind, nicht berücksichtigt (vgl. Zeller 1993). Deshalb ist der Anteil unbeeinflusster Gewässerabschnitte in der Realität etwas höher, jener der beeinflussten Abschnitte etwas kleiner als er in Tabelle 5-4 ausgewiesen ist.

Im Mittelland und im Jura beschränkt sich der Einfluss der einzelnen Laufkraftwerke jeweils auf einige hundert Meter bis wenige Kilometer Flussstrecke (Rückstau, Ausleitungsstrecke).

Gesamtschweizerisch beträgt die Länge der Fliessgewässer, deren Wasserführung durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst ist, rund 4000 bis 5000 km; das Abflussregime ist also bei rund einem Zehntel der schweizerischen Fliessgewässer durch die Wasserkraftnutzung beeinträchtigt. Die Wassernutzung zur Stromproduktion stellt allerdings nur eine Beeinflussungsart dar; weitere wie Trinkund Brauchwassernutzung, Hochwasserschutz, Meliorationen und alle qualitativen Aspekte sind in diesen Zahlen nicht berücksichtigt. Tabelle 5-4: Prozentsatz alpiner Fliessgewässer, deren Wasserführung durch die Wasserkraftnutzung beeinträchtigt ist (Massstab des Gewässernetzes 1:200'000)

| Flussgebiet         | Beeinflussung der Wasserführung |       |        |                     |       |                    |           |  |
|---------------------|---------------------------------|-------|--------|---------------------|-------|--------------------|-----------|--|
|                     | sehr gross                      | gross | mittel | mittel bis<br>klein | klein | unbeein-<br>tlusst | L<br>[km] |  |
| Rhein-Felsberg      | 12.4%                           | 5.8%  | 1.0%   | 1.0%                | 2.8%  | 77.0%              | 1730.7    |  |
| Aare-Bern           | 4.3%                            | 2.4%  | 1.4%   | 0.6%                | 3.5%  | 87.8%              | 1387.8    |  |
| Reuss-Luzern        | 3.8%                            | 3.6%  | 1.4%   | 1.5%                | 7.3%  | 82.4%              | 1857.5    |  |
| Ummat-Zürich        | 4.2%                            | 4.3%  | 4.4%   | 2.1%                | 4.7%  | 80.3%              | 1308.8    |  |
| Rhône-Porte du Scex | 16.4%                           | 8.1%  | 3.3%   | 2.0%                | 8.0%  | 62.2%              | 2128.3    |  |
| Ticino-Bellinzona   | 15.1%                           | 6.5%  | 1.5%   | 2.2%                | 6.9%  | 67.8%              | 888.1     |  |
| Inn-Martina         | 5.5%                            | 5.0%  | 0%     | 0%                  | 0.1%  | 89.4%              | 869.7     |  |

Table 5-4: Percentage of alpine rivers for which discharge is affected by hydro-electric power production

Grad der Beeinflussung der Wasserführung:

| sehr gross<br>gross<br>mittel<br>mittel bis klein | $\begin{split} MQ_b &\leq 0.2 \cdot MQ_{nal} \\ 0.2 \cdot MQ_{nal} &< MQ_b \leq 0.4 \cdot MQ_{nal} \\ 0.4 \cdot MQ_{nal} &< MQ_b \leq 0.6 \cdot MQ_{nal} \\ 0.6 \cdot MQ_{-n} &< MQ_b \leq 0.8 \cdot MQ_{-1} \end{split}$ |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| klein                                             | $MQ_b > 0.8 \cdot MQ_{out}$                                                                                                                                                                                               |
| MQ <sub>nd</sub><br>MQ <sub>b</sub><br>L          | mittlerer natürlicher Jahresabfluss<br>mittlerer Jahresabfluss in beeinflusster Fliessstrecke<br>Länge der Fliessgewässer, erhoben im Massstab 1:200'000                                                                  |

Beispiel: Im Einzugsgebiet des Rheins-Felsberg ist in 12.4 % der Gewässerstrecken eine sehr grosse Beelntlussung der Wasserführung festzusteilen



Abbildung 5-9: Veränderungen des Abflussregimes durch die Wasserkraftnutzung; Ausschnitt aus der Graphikseite der HADES-Tafel 5.3 (aus Margot, Schädler, Sigg, Weingartner 1992)

Figure 5-9: Changes in flow regimes caused by hydro-electric power production; an extract of map 5.3 from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

Durch die Wasserkraftnutzung werden die grossen Gewässer in drei weitgehend unabhängige Abschnitte unterteilt:

- · Oberlauf oberhalb einer Wasserfassung oder eines Stausees mit natürlichem Abflussregime,
- stark beeinflusster Mittellauf,
- Unterlauf unterhalb der Wasserr
  ückgabe, oftmals mit Schwallbetrieb.

Die natürliche Durchgängigkeit vieler alpiner Gewässer ist deshalb - mit allen ökologischen Konsequenzen - unterbrochen. Charakteristische Beispiele für die anthropogene Beeinflussung des Abflussregimes finden sich auf der Graphikseite der Atlas-Tafel 5.3 (Abbildung 5-9).

### b) Tafel 7.2 "Mittlere Konzentrationen chemischer Parameter in Oberflächengewässern"

Eln weiteres Belspiel für den Kartenblatt-Typ "Informationen zum Zustand der schweizerischen Gewässer" stellt die Tafel 7.2 "Mittlere Konzentrationen ausgewählter chemischer Parameter in Oberflächengewässern" (Liechti und Jakob 1992) dar (Abbildung 5-10). Auf dieser Tafel werden die schweizerischen Fliessgewässer über die mittleren Konzentrationen von Orthophosphat, Ammonium, Nitrat und gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC), die Seen über die mittlere Konzentration des Gesamtphosphors beurteilt. Dieses Kartenblatt bildet einen wichtigen Bestandteil einer umfassenden Gewässerschutzpolitik, die unter anderem auch folgende, miteinander verbundene Elemente beinhalten sollte:

- Problemerfassung durch Messung,
- Kartierung der Messergebnisse,
- Anordnen von Massnahmen unter anderem auf der Grundlage des kartierten Zustandes,
- Erfolgskontrolle durch Messung und Kartierung,
- Anordnen von Korrekturmassnahmen usw.

Das Instrument der Kartierung wurde in der Schweiz in den letzten drei Jahrzehnten bereits mehrmals eingesetzt, um sich ein räumlich breit abgestütztes Bild über den qualitativen Zustand der Oberflächengewässer zu verschaffen und um die Öffentlichkeit für dle Notwendigkeit des Gewässerschutzes zu sensibilisieren. In diesem Zusammenhang sind folgende Veröffentlichungen zu nennen: "Generelle Gewässergütekarte der Schweiz" (Maerki 1966), "Zustand der schweizerlschen Fliessgewässer in den Jahren 1974/75" – Projekt MAPOS (<u>Maps of S</u>witzerland; BUS, EAWAG 1977), "Der Zustand der schweizerischen Fliessgewässer 1978–1982" (BUS 1984).



Abbildung 5-10: Ausschnitt aus der HADES-Tafel 7.2 "Mittlere Konzentrationen ausgewählter chemischer Parameter in Oberflächengewässern" (aus Liechti und Jakob 1992)

Figure 5-10: An extract of map 7.2 "Average Concentration of Selected Chemical Parameters in Surface Waters" from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

Die HADES-Tafel 7.2 lässt sich also in eine Serie von Kartenblättern einordnen, bei denen der Informationsaspekt im Vordergrund steht. Neben einer Darstellung der mittleren Konzentrationen der ausgewählten chemischen Parameter im Zeitraum 1987 bis 1989 zeigt die Tafel 7.2 auch exemplarisch die Veränderung der Konzentrationen dieser Parameter in der Periode 1977 bis 1989 (Abbildung 5-11). Die Phosphorgehalte haben in dieser 13jährigen Periode abgenommen (⇔ Aufund Ausbau der Abwasserreinigungsanlagen seit den 1960er Jahren, Phosphatverbot in Textilwaschmitteln im Jahr 1986). Die Nitrat-Werte scheinen eher zu steigen (⇔ Intensivierung der Landwirtschaft), während beim DOC keine allgemeinen Tendenzen erkennbar sind. Lokal und regional können sich aber markante Abweichungen von diesen generellen Aussagen ergeben. Dies gilt insbesondere für mittelländische Einzugsgebiete mit ihren teilweise massiven Phosphor-Überschüssen der landwirtschaftlichen Nutzflächen (vgl. z.B. Gächter und Müller 1999).



Abbildung 5-11: Veränderung des Gewässerzustandes zwischen 1977 und 1989 in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten; Ausschnitt aus der Graphikseite der HADES-Tafel 7.2 (aus Liechti und Jakob 1992) Figure 5-11: Change in water quality between 1977 and 1989 for selected Swiss basins; an extract of map 7.2 from the "Hydrological Atlas of Switzerland"

## 5.5.3 Kartenblatt-Typ "Bemessungsverfahren"

Der "Hydrologische Atlas der Schweiz" kann die Praxis bei der Abschätzung hydrologischer Grössen in ungemessenen Elnzugsgebieten wesentlich unterstützen, und zwar dank seines Prinzips, alle zur Ermittlung einer hydrologischen Grösse benötigten Unterlagen zur Verfügung zu stellen. Die Tabelle 5-5 zeigt, welche hydrologischen Kennwerte mit Hilfe des Atlasses bestimmbar sind.

Bei den Darstellungen der Niederschlagsparameter wird dem systematischen Messfehler eine grosse Bedeutung beigemessen, indem sowohl ein Verfahren zur Abschätzung dieses Messfehlers vorgestellt (Tafel 2.3) als auch eine Karte des Jahresniederschlags (Tafel 2.2) veröffentlicht wird, bei welcher die Niederschläge nach dem systematischen Messfehler korrigiert sind.

Die praxisorientierten Schneekarten beziehen sich mehrheitlich auf Extremwerte, welche für die Verhältnisse im Alpenraum massgebend sind: Angaben zu den 100jährlichen Schneehöhen, wie sie in Tafel 3.2 vermittelt werden, sind wichtig für die Berechnung von Dachtasten, während die Informationen der Tafel 3.5 zur Neuschneesumme und zum Schneedeckenzuwachs vor allem dem langfristigen Lawinenschutz dienen.

Tabelle 5-5: Im "Hydrologischen Atlas der Schweiz" bisher ausgewiesene Bemessungsverfahren, welche eine Abschätzung hydrologischer Grössen bzw. hydrologisch relevanter Grössen in ungemessenen Einzugsgebieten bzw. für beliebige Raumpunkte erlauben

| Tafel                 | Zielgrösse                                      | Bemerkungen                                                                                                      |  |  |  |  |
|-----------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|
| 1.2                   | Einzugsgebleiskenngrössen                       | Eingangsgrössen für regionalhydrologische Modelle                                                                |  |  |  |  |
| 2.2                   | Mittlerer Jahresnlederschlag                    | nach dem systematischen Messfehler korrigiert                                                                    |  |  |  |  |
| 2.3                   | Systematischer Fehler der Niederschlagsmessung  | Korrekturen in Funktion der Abschirmung, der Lage und des Gerätetyps                                             |  |  |  |  |
| 2.4, 2.4 <sup>2</sup> | Extreme Punktregen                              | Starkniederschläge beliebiger Dauer und Wiederkehrperloden an Punkten                                            |  |  |  |  |
| 2.5                   | Extreme Gebietsniederschläge                    | Abminderungskurven; vom Punktregen (vgl. 2.4) zum Gebietsniederschlag<br>beliebiger Dauer und Wiederkehrperioden |  |  |  |  |
| 3.2                   | 100jāhrliche Schneehöhen                        |                                                                                                                  |  |  |  |  |
| 3.2                   | Maximales Wasseräquivalent der Schneedecke      |                                                                                                                  |  |  |  |  |
| 3.4                   | Mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke      | am 1. Januar, 1. Mārz, 1. April und 1. Mai                                                                       |  |  |  |  |
| 3.5                   | 100jährliche Neuschneesumme in drei Tagen       |                                                                                                                  |  |  |  |  |
| 3.5                   | 100jährlicher Schneedeckenzuwachs in drei Tagen |                                                                                                                  |  |  |  |  |
| 4.1                   | Mittlere aktuelle Jahresverdunstung             |                                                                                                                  |  |  |  |  |
| 5.2/5.4               | Mittlerer Jahresabíluss                         |                                                                                                                  |  |  |  |  |
| 5.2                   | Mittlerer Monatsabfluss                         |                                                                                                                  |  |  |  |  |
| 5.6                   | Hochwasserparameter                             | u.a. HHQ, HQ, a HQ, o; bezogen auf die Abflussmessstalionen                                                      |  |  |  |  |
| 5.8                   | Abflussmenge Q <sub>347</sub>                   | Grundlage für die Restwasserbestimmung nach dem "Bundesgesetz über<br>den Schutz der Gewässer" (1991), Art. 31ff |  |  |  |  |
| 7.3                   | Mittiere Wassertemperaturen der Fliessgewässer  | Abschätzung für beliebige Kalendertage                                                                           |  |  |  |  |

Table 5-5: Maps in the "Hydrological Atlas of Switzerland" which can be used to estimate hydrological parameters in ungauged catchments

Bei den Fliessgewässern ist der Mittelwasserbereich mit Verfahren zur Abschätzung von mittleren Monats- und Jahresabflüssen sehr gut abgedeckt. Die Tafel 5.6 liefert Informationen zum Hochwasserbereich; sie fasst die Ergebnisse der Untersuchungen von Spreafico und Stadler (1986) und Spreafico und Aschwanden (1991) auf das Wesentliche beschränkt in übersichtlicher Form zusammen. Die Tafel 5.8 deckt einen sowohl aus der Sicht der Messtechnik wie der Modellierung delikaten Bereich ab. Bereits der Titel der Tafel "Niedrigwasser – Grundlagen zur Bestimmung der Abflussmenge Q<sub>347</sub>" lässt den engen Bezug zur Praxis erkennen. Die Tafel 5.8 wird bei der Bestimmung von Restwassermengen, bei der nach Art. 31 des schweizerischen Gewässerschutzgesetzes von der Abflussmenge Q<sub>347</sub> auszugehen Ist, in den kommenden Jahren sicherlich eine wichtige Rolle spielen.

Mit der von Geiger, Röthlisberger, Stehli und Zeller (1992) realisierten Tafel 2.4 "Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden" soll nun beispielhaft ein solches Bernessungsverfahren vorgestellt werden. Eine häufige Fragestellung der Praxis lautet: "Wie gross ist die

*t*-stündige Intensität eines Regens mit einer mittleren Wiederkehrperiode von *T* Jahren?" Der "Hydrologische Atlas" hilft, diese Frage auch für Orte zu beantworten, an denen keine direkten Messungen zur Verfügung stehen.

Zur Bestimmung von Niederschlagsintensitäten unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden werden sogenannte Niederschlag-Intensitäts-Diagramme benötigt. Solche Diagramme wurden von den erwähnten Autoren für über 500 schweizerische Niederschlagsstationen erstellt. Bei diesen Diagrammen auf doppelt-logarithmischem Papier lassen sich die Eckwerte A (Regenintensität *r* bei t=1 h und T=100 a) und B (r(24 h, 100 a)) sowie C (r(1 h, 2.33 a)) und D (r(24 h, 2.33 a)) in der Regel durch Linien verbinden (Abbildung 5-12). Sind diese Eckwerte bekannt, können Niederschlagsintensitäten von 2.33- bis 100jährlichen Ereignissen mit Dauern zwischen etwa 10 Minuten und 48 Stunden durch Inter- oder Extrapolation gewonnen werden. Deshalb wurden diese vier an den Niederschlagsstationen bestimmten Parameter A, B, C und D mit dem Kriging-Verfahren räumlich interpoliert und im Atlas als Isolinienkarten 1:1.1 Mio. dargestellt.

In der praktischen Anwendung werden für den interessierenden Ort

- die vier Eckwerte A, B, C und D aus den Karten herausgelesen,
- in ein Niederschlag-Intensitäts-Diagramm eingetragen und schliesslich
- aus dem Diagramm durch Inter- oder Extrapolation der gesuchte Punktregen bestimmter Dauer und Wiederkehrperiode ermittelt.



Abbildung 5-12: Grundsätzliches Vorgehen bei der Bemessung extremer Punktregen an Orten ohne Niederschlagsmessungen

Figure 5-12: Basic procedure to estimate high intensity rainfall at sites without measurements

Bei diesem Verfahren werden also nur Punktregen ermittelt. Zur Bestimmung extremer Gebietsniederschlagshöhen sind zusätzlich sogenannte Abminderungskurven zu berücksichtigen, mit denen die Punktregen in Funktion der Gebietsgrösse, der Region und der Niederschlagsdauer reduziert werden (Grebner, Roesch und Schwarb 1999). Die HADES-Tafel 2.5 liefert die dazu notwendigen Unterlagen.

Für die dritte Lieferung des "Hydrologischen Atlasses" wurde die Tafel der extremen Punktregen aus methodischen Überlegungen neu bearbeitet und als Tafel 2.4<sup>2</sup> publiziert. Für beide Tafeln wurde das gleiche Grundlagenmaterial (Niederschlagsmesswerte) verwendet; sie unterscheiden sich ausschliesslich in der Interpolationsmethode. Die Tafel 2.4 weist insgesamt eine unruhigere "Niederschlagstopographie" auf als die Tafel 2.4<sup>2</sup>, bei der die Datenunsicherheiten (z.B. unterschiedliche Länge der Messreihen) im Interpolationsverfahren mitberücksichtigt wurden. Für die Praxis stellt sich nun aber die Frage, welche der beiden Tafeln für die Abschätzung zu wählen ist. Forster und Baumgartner (1999) geben dazu erste Hinweise.

------

# Literaturverzeichnis

Acreman, M.C., Sinclair, C.D. (1986): Classification of Drainage Basins According to their Physical Characteristics; an Application for Flood Frequency Analysis in Scotland. In: Journal of Hydrology 84:365–380, Amsterdam.

Acreman, M.C., Wiltshire, S. (1989): The Regions are Dead; Long Live the Regions. Methods of Identifying and Dispensing with Regions for Flood Frequency Analysis. In: IAHS-Publication No. 187:175– 188, Wallingford.

Aellen, M., Funk, M. (1999): Längen- und Massenänderungen der Gletscher seit dem letzten Höchststand um 1850. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.7, Bern.

Andrews, D.F. (1972): Plots of High-Dimensional Data. In: Biometrics 28:125-136, Chapel Hill N.C.

Apfl, G., Barben, M., Baumgartner, M., Holzer, T., Weingartner, R. (1997): Variationen der Schneegrenze. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.6, Bern.

Aschwanden, H. (1985): Zur Abschätzung der Abflüsse in ungemessenen schweizerischen Einzugsgebieten. Publikation Gewässerkunde Nr. 66, Bern.

Aschwanden, H., Weingartner, R. (1985): Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde Nr. 65, Bern.

Aschwanden, H., Weingartner, R. (1986): Abschätzungen im Mittelwasserbereich. Schlussbericht zum Nationalfonds-Projekt "Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung". In: Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie Nr. 33:101–139, Bern.

Aschwanden, H., Spreafico, M. (1989): Übertragungsfunktionen Niederschlag-Abfluss in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 11, Bern.

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

Aschwanden, H., Kan, C. (1999): Niedrigwasserabflüsse - Grundlagen zur Bestimmung der Abflussmenge Q<sub>347</sub>. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.8, Bern.

ASF (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau) (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern.

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R. (1994): Multivariate Analysemethoden. Berlin.

Barben, M. (1995): Dynamische Bilanzierung eines Wildbacheinzugsgebietes mit Hilfe des BROOK-Modells. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 160, Bern.

Barben, M. (2000): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in mesoskaligen schweizerischen Einzugsgebieten. Geographisches Institut der Universität Bern (in Vorbereitung).

Barben, M., Weingartner, R. (1995): Hochwasserereignisse in Wildbächen – Analyse grösserer Ereignisse Im Rotenbach (Schwarzsee). In: Schweizer Ingenieur und Architekt 113. Jahrgang, Nr. 21:499– 502, Zürich.

Bárdossy, A. (1995): Geostatistische Methoden. Stuttgart.

Bardsley, W.E. (1994): Against Objective Statistical Analysis of Hydrological Extremes. In: Journal of Hydrology 162:429-431, Amsterdam.

Baumgartner, A., Reichel, E., Weber, G. (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen. München.

Baumgartner, A., Liebscher, H.-J. (1988): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie, Band 1, Berlin und Stuttgart.

Becker, A. (1986): Neue Anforderungen und Lösungen bei der grossflächigen hydrologischen Modellierung. In: Wasserwirtschaft – Wassertechnik 36. Jahrgang, Heft 7:150–152, Berlin.

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

Becker, A., Nemec, J. (1987): Macroscale Hydrologic Models in Support to Climatic Research. In: IAHS-Publication No. 168:431–445, Wallingford.

Beniston, M., Rebetez, M., Giorgi, F., Marinucci, M.R. (1994): An Analysis of Regional Climate Change in Switzerland. In: Theoretical and Applied Climatology 49:135–159, Wien.

Beran, M. (1985): Regionalization – the Safe Way to Estimate Floods. In: Advances in Water Engineering: 21–31, London.

Beran, M. (1990): New Challenges for the Regional Approach. Wallingford.

Beven, K.J., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J. (1995): TOPMODEL and GRIDTAB: A User's Guide to the Distribution Versions. CRES Technical Report TR110 (2<sup>rd</sup> edition), Lancaster.

BFS (Bundesamt für Statistik) (1972): Arealstatistik der Schweiz 1972. In: GEOSTAT, H.1.1-H.1.11, Bern.

BFS (Bundesamt für Statistik) (1999): Basis-, Bilanzierungs- und Flussgebiete der Schweiz. In: GEO-STAT, E 3.1-E 3.11, Bern.

Billwiller, R. (1883): Bericht über die Tätigkeit der meteorologischen Centralanstalt und die ihr unterstellten meteorologischen Stationen im Jahre 1883. In: Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt 1883:V–VII, Zürich.

Binggeli, V. (1974): Hydrologische Studien im zentralen schweizerischen Alpenvorland, insbesondere im Gebiet der Langete. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 22, Bern.

Bouzelboudjen, M., Király, L., Kimmeier, F., Zwahlen, F. (1997): Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 2: Hydrogeologie. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 8.3, Bern.

Bracken, I., Webster, C. (1990): Information Technology in Geography and Planning – Including Principles of GIS. London.

Breinlinger, R. (1990): Hydrologische Gliederung der Schwelz. In: Berner Hydrograph Nr. 5:4-6, Bern.

Breinlinger, R. (1995): Hydrogeographische Raumgliederung der Schweiz und ihre Bedeutung für die Hydrologie. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.

Breinlinger, R., Gamma, P., Weingartner, R. (1992): Kenngrössen kleiner Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.2, Bern.

Brückner, E. (1905): Die Bilanz des Kreislaufes des Wassers auf der Erde. In: Geographische Zeltschrift 11. Jahrgang:436-445, Wiesbaden.

Brünisholz, M. (1999): Analyse der zeitlich-räumlichen Dynamik des Hochwasserabflusses - Anwendung des TOPMODEL im Testgebiet Leissigen. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Bern.

Bruschin, J., North, M. (1977): Projekthochwasser für Einzugsgebiete ohne Abflussbeobachtungen. In: Schweizerische Bauzeitung 95. Jahrgang, Heft 25:407–412, Zürich.

BUS (Bundesamt für Umweltschutz) (1984): Der Zustand der schweizerischen Fliessgewässer 1978– 1982, Bern.

BUS, EAWAG (Bundesamt für Umweltschutz, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz) (1977): Zustand der schweizerischen Fliessgewässer in den Jahren 1974/75. Bern.

Buttet, P. (1992): Das Grundwasser-Beobachtungsnetz der Landeshydrologie und -geologie (LHG). In: BUWAL-Bulletin 3/92:22–30, Bern.
Buttet, P., Fischer, H., Tripet, J.-P., Peyer, K. (1992): Geologische, hydrogeologische und bodenkundliche Grundlagenkarten und Typprofile. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 8.1, Bern.

BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1973, 1990): Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz. Bern.

BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1990): Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz – nach der Karte 1:200'000 der Schweizerischen Geotechnischen Kommission aus den Jahren 1963– 67. In: GEOSTAT: C.1.1–C.1.20, Bern.

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

Caspary, H.J., Bárdossy, A. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? In: Wasser und Boden 47. Jahrgang, Heft 3:18–24, Hamburg.

Chaix, O. (1993): Calcul de la crue maximale probable. In: Wasser – Energie – Luft 85. Jahrgang, Heft 5/6:114–118, Baden.

Chernoff, H. (1973): The Use of Faces to Represent Points in k-Dimensional Space Graphically. In: Journal of the American Statistical Association Vol. 68, No. 342:361–368, New York.

Chow, V.T. (1953): Frequency Analysis of Hydrologic Data with Special Application to Rainfall Intensities. University of Illinois, Bulletin No. 414, Chicago.

Chow, V.T. (1964): Handbook of Applied Hydrology. New York.

Chow, V.T., Maidment, D., Mays, L. (1988): Applied Hydrology. New York.

*de Coursey, D.G. (1972):* Objective Regionalization of Peak Flow Rates. In: Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium in Hydrology: 395–405, Fort Collins.

Dalrymple, T. (1960): Flood-Frequency Analysis. Geological Survey – Water Supply Paper No.1543– A, Washington.

Dematteis, A., Hesske, S., Parriaux, A., Tacher, L. (1997): Haupttypen der Grundwasserleiter. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 8.4, Bern.

Düster, H. (1994): Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Dissertation in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Geographica Bernensia G44, Bern.

Düster, H., Weingartner, R. (1993): Prozessorientierte Gewinnung von Gebietskenngrössen zur hydrologischen Charakterisierung von Einzugsgebieten. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 37. Jahrgang, Heft 5/6:122–126, Koblenz.

DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau)(1976): Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 101, Hamburg.

Eastman, R. (1989): Pushbroom Algorithms for Calculating Distances in Raster Grids. In: Proceedings Autocarto 9:288-297.

EDI (Eidg. Departement des Innern) (1896–1924): Die Flächeninhalte der Einzugsgebiete. 8 Bände, Bern.

*EJPD (Eidg. Justiz- und Polizeidepartement) (1980):* Bodeneignungskarte der Schweiz, Massstab 1:200'000 – Grundlagen für die 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, Publikation Gewässerkunde Nr. 177, Bern.

Falkman, M., Chapman, T. (1989): Comparative Hydrology. UNESCO, Paris.

Federer, A., Lash, D. (1978): BROOK: A Hydrologic Simulation Model for Eastern Forests. Water Resources Research Center, Report No. 19, New Hampshire.

*Fienberg, S. (1979):* Graphical Methods in Statistics. In: The American Statistican Vol. 33, Nr. 4:165–178, Washington D.C.

Flury, B., Riedwyl, H. (1981): Graphical Representation of Multivariate Data by Means of Asymmetrical Faces. In: Journal of the American Statistical Association Vol. 76, No. 376:757–765, New York.

Forster, F., Baumgartner, W. (1999): Bestimmung seltener Starkniederschläge kurzer Dauer – Fallbeispiele im Vergleich mit den schweizerischen Starkniederschlagskarten. In: Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 150. Jahrgang, Heft 6:209-218, Zürich.

*Gächter, R., Müller, B. (1999):* Die bodenbürtige P-Belastung des Sempachersees – Problemanalyse und Lösungsvorschlag. In: Gas – Wasser – Abwasser 79. Jahrgang, Heft 6:460-466, Zürich.

*Gamma, P. (1992):* Beitrag zu einer hydrologischen Gliederung der Schweiz – GIS-basierte Gewinnung von Einzugsgebletsparametern und deren multivariate Klassifikation mit TWINSPAN. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 131, Bern.

Gees, A. (1996): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz – Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Dissertation in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Geographica Bernensia G53, Bern.

Gees, A., Gertsch, J., Schenk, J., Weingartner, R. (1995): Abflussmessung nach dem Verdünnungsverfahren – Verbesserung der Messung. In: Wasser – Energie – Luft 87. Jahrgang, Heft 9:203–206, Baden.

Gees, A., Weingartner, R. (1998): Datenbank der Schadenereignisse in der Schweiz. Datenbank auf Diskette (ACCESS- und ASCII-Dateien). Publikation Gewässerkunde Nr. 211, 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, Bern.

Gottschalk, L. (1985): Hydrological Regionalization of Sweden. In: Hydrological Sciences Journal 30, No. 1:65–83, Wallingford.

Gottschalk, L. (1996): Stochastic Hydrology. Vorlesungsskript, Bern.

Gottschalk, L., Weingartner, R. (1998): Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph. In: Journal of Hydrology 208:148–162, Amsterdam.

GRD (Gruppe für Rüstungsdienste): RIMINI-Höhenmodell. Bern.

Grebner, D., Richter, K.G. (1990): Gebietsniederschlag; Flächen-Mengen-Dauer-Beziehungen für Starkniederschläge. Forschungsprojekt A3 zur "Ursachenanalyse Hochwasser 1987", Geographisches Institut der ETH Zürlch, Zürlch.

Grebner, D., Roesch, Th., Schwarb, M. (1999): Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981–1993. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.5, Bern.

*Grosjean, G. (1985):* Die Schweiz – Der Naturraum in seiner Funktion für Kultur und Wirtschaft. Geographica Bernensia U1, Bern.

Gupta, V.K., Rodriques-Iturbe, I., Wood, E.F. [Hrsg.] (1986): Scale Problems in Hydrology – Runoff Generation and Basin Response. Dordrecht.

Gutknecht, D. (1993): Grundphänomene hydrologischer Prozesse. In: Zürcher Geographische Schriften, Heft 53:25–38, Zürich.

Gutknecht, D. (1994): Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. In: Österreichische Wasserund Abfallwirtschaft 46. Jahrgang, Heft 3/4:50-57, Wien.

de Haar, U. (1974): Beitrag zur wissenschaftssystematischen Einordnung und Gliederung der Wasserforschung. In: Freiburger Beiträge zur Hydrologie, Heft 2:85–150, Freiburg i. Br.

Haider, S. (1994): Der Beitrag von Vorlandüberflutungen zur Verformung von Hochwasserwellen. Mitteilungen der VAW Nr. 128, Zürich.

Hartigan, J.A. (1975): Clustering Algorithms. New York.

Hauenstein, W. (1998): Talsperren und Hochwasserschutz in der Schweiz. In: Wasser - Energie - Luft 90. Jahrgang, Heft 9/10:241-245, Baden.

Hempel, L. (1993): Der Hydrologische Atlas der Schweiz – Besprechung. In: Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I, Heft 5/6:709–711, Berlin/Stuttgart.

Herrmann, R. (1973): Eine multivariate statistische Klimagliederung Nordhessens und angrenzender Gebiete. In: Marburger Geographische Schriften, Heft 60:37-55, Marburg.

Hershfield, M. (1965): Method of Estimating Probable Maximum Rainfall. In: Journal of American Waterworks Association Vol. 57, No. 8:965–972.

Hewlett, J., Nutter, W. (1970): The Varying Source Area of Streamflow from Upland Basin. In: Proceedings of the Symposium of Watershed Management, American Society for Civil Engineers:65–83.

Hill, M.O., Bunce, R.G., Shaw, M.W. (1975): Indicator Species Analysis, a Divisive Polythetic Method of Classification, and its Application to a Survey of Native Pinewoods in Scotland. In: Journal of Ecology 63:597-613, Oxford.

Holzhauser, H., Zumbühl, H.J. (1999): Nacheiszeitliche Gletscherschwankungen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.8, Bern.

Hofbauer, R. (1916): Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. In: Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst:38–40, Wien.

Horton, R.E. (1933): The Role of Infiltration in the Hydrological Cycle. In: Transaction of the American Geophysican Union Vol. 14:446–460, New York.

Hugget, R.J. (1985): Earth Surface Systems. Berlin.

IAHS (International Association of Hydrological Sciences) (1990): Regionalization in Hydrology. Proceedings of the Ljubljana Symposium 1990, IAHS-Publication No. 191, Wallingford.

Imhof, E., Spiess, E. (ab 1965): Atlas der Schweiz. Wabern.

Iszkowski, R. (1886): Beitrag zur Ermittlung der Niedrigst-, Normal- und Höchstwassermenge auf Grund charakteristischer Merkmale der Flussgebiete. In: Zeitschrift des Österreichischen Architekturund Ingenieurvereins:69–98, Wien.

Jakob, A., Gelssel, A. (1992): Messnetze zur Bestimmung chemischer und physikalischer Parameter der Oberflächengewässer und des Niederschlags. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.1, Bern.

Jakob, A., Spreafico, M. (1997): Schwebstoffkonzentrationen und -frachten in Fliessgewässern. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.4, Bern.

Jaton, J.F. (1984): Linéarité et non-linéarité des réponses des bassins versants. Institut du génie rural, EPF de Lausanne, Lausanne.

Jensen, H., Lang, H., Rinderknecht, J. (1997): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4<sup>2</sup>, Bern.

Julian, R.W., Yevjevich, V., Morel-Seytoux, H.J. (1967): Prediction of Water Yield in High Mountain Watersheds Based on Physiography. Hydrology Papers No. 22, Colorado State University, Colorado.

Kaller, J., Riebe, W. (1979): Vertrauensbereiche in hydrologischen Häufigkeitsanalysen. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 23. Jahrgang, Heft 4:86–90, Koblenz.

Kan, C. (1993): Darstellung und Klassifikation hydrologischer Einzugsgebiete als Riedwyl-Flury-Gesichter. Publikation Gewässerkunde Nr. 149, 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.

*Kienholz, H. (1990):* Zur Beurteilung und Kartierung von Naturgefahren in Gebirgsregionen – Teil 1. Vorabdruck, Geographisches Institut der Universität Bern, Bern.

Kienholz, H., Keller, H., Ammann, W., Weingartner, R., Germann, P., Hegg, Ch., Mani, P., Rickenmann, D. (1996): Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Schlussbericht zum NFP-31-Projekt, Bern.

Kirchhofer, W., Sevruk, B. (1992): Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.2, Bern.

*Kirpich, Y.P. (1940):* Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. In: Civil Engineer 10(6):362, New York.

Kleeberg, B. [Hrsg.] (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11, Weinhelm.

Kleeberg, B., Cemus, J. (1992); Regionalisierung hydrologischer Daten – Definitionen. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11:1–15, Weinheim.

Kleiner, B., Hartigan, J.A. (1981): Representing Points in Many Dimensions by Trees and Castles. In: Journal of the American Statistical Association Vol. 76, No. 376:260–276, New York.

Koblet, R. (1995): Entwicklung der Korrektionen an Fliessgewässern und Seen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.5, Bern.

Koehler, G. (1971): Ermittlung massgebender Abflussdaten für kleine Vorfluter mit Hilfe kurzzeitiger Naturmessungen. Mitteilungen aus dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Heft 23, Hannover.

Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der VAW Nr. 87, Zürich.

Kreps, H. (1952): Die näherungsweise Ermittlung grosser Hochwasserabflussspenden im Lichte neuerer Betrachtungen. In: Wasser- und Energiewirtschaft 44. Jahrgang, Heft 1:55-57, Baden.

Kundzewicz, Z., Rosbjerg, D., Simonovic, S.P., Takeuchi, K. (1993): Extreme Hydrological Events in Perspective. In: IAHS-Publication No. 213:1-7, Wallingford.

Kürsteiner, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur an der Plessur bei Lüen. In: Schwelzerische Bauzeitung 1:4-8, Zürich.

L+T (Bundesamt für Landestopographie) (1985): Gewässernetz 1:200'000. In: GEOSTAT: E.2.1-E.2.18, Bern.

Lang, H. (1978): Zum Problem der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Verdunstung in der Schweiz. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 25:53–61, Bern.

Lang, H. (1985): Höhenabhängigkeit der Niederschläge. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 31:149–157, Bern.

Lang, H. (1992): Hydrologie von der Anwendung zur Grundlagenforschung: Rückschau und Perspektive. In: Wasser – Energie – Luft 84. Jahrgang, Heft 11/12:354–357, Baden.

Lauterburg, R. (1887): Anleitung zur Berechnung der (mitteleuropäischen) Quellen- und Stromabflussmengen aus der Regenmenge, Grösse und Beschaffenheit der Quellen- und Flussgebiete. In: Allg. Bauzeitung:9–13, 17–20, 27–30; Wien.

LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz: Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen. Entwurf des LAWA-Arbeitskreises "Hochwasser".

Liechti, P., Jakob, A. (1992): Mittlere Konzentrationen ausgewählter chemischer Parameter in Oberflächengewässern. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.2, Bern. Lutz, W. (1984): Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebletskenngrössen. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Heft 24, Karlsruhe.

Mäder, F. (1985): Niederschlagskarten und Regionalisierung. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 31:57–64, Bern.

Maerki, E. (1966): Generelle Gewässergütekarte der Schweiz. zit. in Spiess (1984).

*Magnín, O. (1990):* Délimitation de bassins versants dans la chaîne du Jura et définition d'indices hydrogéologiques. Rapport interne du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, Neuchâtel.

Manser, S. (1996): Analyse verschiedener regionalhydrologischer Modelle zur Hochwasserabschätzung in Gebieten ohne Direktmessungen. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 183, Bern.

Margot, A., Sigg, R., Schädler, B., Weingartner, R. (1992): Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW) und Seeregulierungen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Bern.

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.

*Martinec, J., Lang, H., Rohrer, M. (1992):* Schneehöhen und Wasseräquivalent der Schneedecke; Neuschneehöhen extremer Schneefall-Ereignisse. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.2, Bern.

Martínec, J., Meister, R., Aellen, M. (1992): Schneedecken- und Gletschermessnetze. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.1, Bern.

*Meister, R. (1995):* Extremer Schneedeckenzuwachs. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.5, Bern.

*Melli, E. (1924):* Die Dimensionierung städtischer Kanäle. In: Schweizerische Bauzeitung 12:137–141, Zürich.

Menzel, L., Lang, H., Rohmann, M. (1999): Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.1, Bern.

Milan, F. et al. (2000): Arbeitsblätter für die Sekundarschulstufe II, Bern (in Vorbereitung).

de Montmollin, F., Jakob, A. (1995): Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern und Seen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.3, Bern.

Moore, I.D., Grayson, R.B., McMahon, T. (1992): Physically Based Hydrologic Modeling – Is the Concept Realistic? In: Water Resources Research Vol. 26, No. 10:2659–2666, Washington D.C.

Mosley, P, (1981): Delimitation of New Zealand Hydrologic Regions. In: Journal of Hydrology 49:173–192, Amsterdam.

*Müller, F., Caflisch, T., Müller, G. (1973):* Firn und Eis der Schweizer Alpen, Gletscherinventar. Publikationen Nr. 57 und 57a des Geographischen Instituts der ETH Zürich, Zürich.

Müller, R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Mitteilungen der VAW Nr. 4, Zürich.

Naef, F. (1983): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. 1. Zwischenbericht zum NF-Projekt "Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung", Zürich.

Naef, F. (1993): Der Abflusskoeffizient: einfach und praktisch? In: Zürcher Geographische Schriften, Heft 53:193–199, Zürich.

Naef, F., Zuidema, P., Kölla, E. (1986): Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 31:195–233, Bern.

Naef, F., Faeh, A. (1992): Hochwasser. Vorstudie zum Nationalen Forschungsprogramm "Klimaänderung und Naturkatastrophen". Bern. Naef, F., Scherrer, S., Faeh, A. (1994): Wie reagiert ein Einzugsgebiet auf extreme Niederschläge? Alte und neue Ideen und Experimente. In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 35:111–119, Bern.

Naef, F., Scherrer, S., Zurbrügg, Ch. (1999): Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7, Bern.

*Nathan, R.J. (1993):* A Multivariate Graphical Approach to the Transposition of Hydrologic Indices to Ungauged Catchments. Monash University, Melbourne.

Nathan, R.J., McMahon, T.A. (1990): Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalisation. In: Journal of Hydrology 121:217–238, Amsterdam.

Neef, E. (1964): Zur grossmassstäblichen landschaftsökologischen Forschung. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 108:1-7, Gotha.

*Nemec, J. (1993):* Comparison and Selection of Existing Hydrological Models for the Simulation of Dynamic Water Balance Processes in Basins of Different Sizes and of Different Scales. Report of the International Commission for the Hydrology of the Rhine No. II–7, Lelystad.

NERC (National Environment Research Council) (1975): Flood Studies Report. Wallingford.

Newson, M.D. (1978): Drainage Basin Characteristics, their Selection, Derivation and Analysis for a Flood Study of the British Isles. In: Earth Surface Processes and Landforms Vol. 3:277–293, London.

*NFP-31 (Nationales Forschungsprogramm 31 "Klimaänderung und Naturkatastrophen") (1996):* Klimaentwicklung und Naturkatastrophen im Alpengebiet: Signale des Treibhauseffekts? In: Info 8;9–11, Bern.

*Nipper, J. (1981):* Autoregressiv- und Kriging-Modelle. Zwei Ansätze zur Erfassung raumvarianter Strukturen. In: Zürcher Geographische Schriften, Heft 1:31–45, Zürlch.

Pardé, M. (1920): Le régime des cours d'eau suisses. In: Revue de géographie alpine, Tome VIII: 359-457, Grenoble.

Petrascheck, A., von Blücher, U. (1995): Verzeichnis der Fliessgewässer und Seen nach dem Gewässerinformationssystem der Schweiz (GEWISS). In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.3, Bern.

Pfiffner, A., Kühni, A., Jemelin, L. (1997): Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 1: Geologie. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 8.2, Bern.

*Plate, E.J. (1973):* Computerverfahren zur Berechnung der Einheitsganglinie. DVWK-Fortbildungslehrgang, Barsinghausen.

*Plate, E. (1992):* Skalen in der Hydrologie: Zur Definition von Begriffen. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11:33-45, Weinheim.

Potter, W. (1953); Rainfall and Topographic Factors that Effect Runoff. In: Transactions of the American Geophysical Union No. 34:67–73, New York.

Renner, C. (1990): Graphische Darstellung k-dimensionaler Daten in der Hydrologie. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 34. Jahrgang, Heft 3:92–94, Koblenz.

Riedwyl, H. (1974): Einführung in die angewandte Statistik. Bern.

Rodriquez-Iturbe, I. (1993): The Geomorphological Unit Hydrograph. In: Channel Network Hydrology:43-68, Chichester.

Rohrer, M., Lang, H. (1992): Wasseräquivalent der Schneedecke. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.3, Bern.

Rohrer, M., Steinegger, U., Fischer, A., Jensen, H., Lang, H. (1995): Räumlich-zeitliche Variationen des Wasseräquivalentes der Schneedecke. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.4, Bern.

Rosenberg, M. (1978): Notwendige Beobachtungsdauer zur Ermittlung von MQ. In: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Tafeln 45 und 46, Boppard.

Röthlisberger, G. (1991): Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Nr. 330, Birmensdorf.

Röthlisberger, G. (1995): Unwetterschäden in der Schweiz. Auszüge aus der Vortragsreihe "Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz – Wenn der Himmel seine Schleusen öffnet", Birmensdorf.

Sachs, L. (1992): Angewandte Statistik. Berlin.

Schädler, B. (1992): Verfügbarkeit hydrologischer Daten und Erfassung von hydrologischen Grössen. In: Schriftenreihe EAWAG Nr. 4:35–54, Dübendorf.

Schädler, B., Bigler, R. (1992): Hydrometrische Netze. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.1, Bern.

Schädler, B., Bigler, R. (1992): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.1, Bern.

Schädler, B., Weingartner, R. (1992): Natürliche Abflüsse 1961–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.4, Bern.

Schädler, B., Bigler, R. (1995): Wasserhaushalt der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie, Hydrologische Mitteilung Nr. 21, Bern.

Scherrer, S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen - Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilungen der VAW Nr. 147, Zürich.

Schmidt, K.-H. (1988): Einzugsgebietsparameter für die hydrologische Vorhersage. In: Geoökodynamik 9:1-16, Bensheim.

Schmidt, K.-H. (1992): Regionalisierung mit Hilfe morphometrischer Parameter. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11:317–324, Weinheim.

Schneeberger, K. (1991): Dokumentation der hydrologischen Karten der Schweiz – Grundlagen zu einer hydrologischen Kartengeschichte der Schweiz. Seminararbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Bern.

Schnitter, N. (1991): Geschichte des Schutzwasserbaus in der Schweiz. In: Wasser – Energie – Luft 83. Jahrgang, Heft 1/2:27–35, Baden.

Schwentker, F., Streit, U. (1983): Regionale Übertragung hydrologischer Parameter – ein Überblick. Manuskript zum Vortrag anlässlich der Jahresversammlung des Arbeitskreises Hydrologie in Göttingen, Göttingen.

Sevruk, B., Kirchhofer, W. (1992): Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlagshöhen 1951–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.3, Bern.

Sherman, L. (1932): Streamflow from Rainfall by Unit Hydrograph Method. Engineering News Records Vol. 108, Chicago.

Simmers, I. (1985); An Outline and Preliminary Application of a Systematic Problem-Oriented Methodology for Hydrological Data Regionalisation. In: Beiträge zur Hydrologie, Heft 5.1:339–355, Kirchzarten.

SMA (Schweizerische Meteorologische Anstalt) (1900): Annalen der Meteorologischen Zentralanstalt, Jahrbuch 1900, Zürich.

Snyder, F.F. (1938): Synthetic Unit-Graphs. In: Transaction of the American Geophysican Union Vol. 19:447–454, Washington D.C.

Spiess, E. (1984): Kartierung der Wasserqualität. In: Siedlungswasserwirtschaft in der Schweiz:27-42, Zürich.

Spreafico, M. [Redaktion] (1986): Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 33, Bern.

Spreafico, M., Stadler, K. (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7 und 8, Bern.

Spreafico, M., Aschwanden, H. (1991): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 16 und 17, Bern.

Spreafico, M., Weingartner, R. (1992): Hochwasserabflüsse – Zur Problematik der Abschätzung in der Schweiz. In: Schweizer Ingenieur und Architekt 110. Jahrgang, Nr. 10:199–206, Zürich.

Spreafico, M. et al. (2001): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in mesoskaligen Einzugsgebieten des Rheingebietes. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (in Vorbereitung).

Stettler, B. (1995): Hydrologische Datenbank der Schweiz. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 162, Bern.

Streit, U. (1979): Raumvariate Erweiterung von Zeitreihenmodellen. Giessener Geographische Schriften Nr. 46, Glessen.

Streit, U. (1984): Angleich-Verfahren für geschätzte Teilgebietsniederschläge bei bekanntem Gebietsniederschlag. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 28. Jahrgang, Heft 1:11–16, Koblenz.

Streit, U. (1992): Taxonometrische Methoden, neuronale Netze und Regionalisierung. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11:333–344, Weinheim.

Sydler, P., Widmoser, P., Zollinger, F. (1982): Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik der ETH Zürich, Zürich.

Symader, W. (1980): Zur Problematik landschaftsökologischer Raumgliederungen. In: Landschaft und Stadt 12, Heft 2:81-89, Stuttgart.

Toebes, C. (1963): Applied Hydrology. Wellington.

Ulmi, H., Bertschmann, S. (1977): Hochwasserschutz in der Schweiz 1877-1977. Bern.

Uttinger, H. (1949): Mittlere jährliche Niederschlagsmengen der Periode 1901–1940. Zürich.

Uttinger, H. (1967): Klima und Wetter. In: Atlas der Schweiz, Tafel 12, Wabern.

Vischer, D. (1996): Risikoentwicklung infolge von Naturgefahren in der Schweiz. NFP-31-Info Nr. 8:1, Bern.

Vischer, D., Huber, A. (1993): Wasserbau. Berlin.

Vonder Mühll, D. et al. (1999): Permafrost – Verbreitung und ausgewählte Aspekte. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 3.9, Bern.

Vörösmarty, C.J., Gutowski, W.J., Person, M., Chen, T.-C., Case, D. (1993): Linked Atmosphere-Hydrology Models at the Macroscale. In: IAHS-Publication No. 214:3–27, Wallingford.

Wanner, H., Beniston, M. (1995): Approaches to the Establishment of Future Climate Scenarios for the Alpine Region. In: Annex to the IPCC Second Assessment Report, Working Group II-C.

Weingartner, R. (1985): Konzept eines "Hydrologischen Atlas der Schweiz". Publikation Gewässerkunde Nr. 67, Bern.

Weingartner, R. (1989): Application of the Unit Hydrograph Model to Swiss Catchments. In: IAHS-Publication No. 193:669–676, Wallingford.

Weingartner, R. (1989): Das Unit-Hydrograph-Verfahren und seine Anwendung in schweizerischen Einzugsgebieten. Publikation Gewässerkunde Nr. 107, Bern.

Weingartner, R. (1989): Precipitation Maps in the "Hydrological Atlas of Switzerland" - Historical Survey and Actual Significance. In: Proceedings of the International Workshop of Precipitation Measurement: 527–530, St. Moritz.

Weingartner, R. (1991): Hydrological Atlas of Switzerland – Design and Use. In: Proceedings of the 15th World Conference "Mapping the Nations", Vol. 1:354–363, London.

Weingartner, R. (1992): Niederschlagsmessnetze. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.1, Bern.

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

Weingartner, R., Aschwanden, H. (1985): Abflussregimes der Schweiz (Karte 1:500'000). Beilage in: Publikation Gewässerkunde Nr. 65, Bern.

Weingartner, R., Spreafico, M. (1990): Analyse und Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Eine Übersicht über neuere schweizerische Arbeiten. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 34. Jahrgang, Heft 1/2:42–45, Koblenz.

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., Spreafico, M. (1992): Übersichtskarte der Schweiz und Einleitung zum Atlas. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.1, Bern.

Weingartner, R., Spreafico, M. [Hrsg.] (1992, 1995, 1997, 1999): Hydrologischer Atlas der Schweiz. Erste bis vierte Lieferung, Bern.

Weingartner, R., Aschwanden, H. (1994): Quantification des débits des cours d'eau des Alpes suisses et des influences anthropiques qui les affectent. In: Revue de géographie alpine, Tome LXXXII, no. 2:45–57, Grenoble.

Weingartner, R., Gees, A. (1994): Analyse und Quantifizierung seltener Hochwasser in der Schweiz. Zwischenbericht zum Nationalen Forschungsprogramm 31, Bern.

Weingartner, R., Kienholz, H. (1994): Zur Sensitivität von Wildbachsystemen – Konzepte und erste Ergebnisse aus Untersuchungen in den Testgebieten Rotenbach (Schwarzsee) und Spissibach (Leissigen). In: Belträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 35:120–133, Bern.

Weingartner, R., Schwab, S., Barben, M. (1999): Haben Hochwasser Hochkonjunktur? In: Wasser – Energie – Luft 91. Jahrgang, Heft 3/4:60-62, Baden.

Weingartner, R., Schädler, B. (2001): Wasserhaushalt kleiner Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.2, Bern (in Vorbereitung).

Wernli, H.-R., Weingartner, R., Spreafico, M. (1995): Abilussmessungen mit einem Lichtleiterfluorimeter und einem neuen Tracer. In: Berner Hydrograph Nr. 9:11, Bern.

White, E.L. (1975): Factor Analysis of Drainage Basin Properties: Classification of Flood Behavior in Terms of Basin Geomorphology. In: Water Resources Bulletin, 11(4):676–687, Bethesda MD.

Widmoser, P. (1978): Zur Berechnung der Anlaufzeit nach Kirpich. In: Wasser und Boden 1:16–19, Hamburg.

Wilhelm, F. (1987): Hydrogeographie: Grundlagen der Allgemeinen Hydrogeographie. Braunschweig.

Wilkinson, W.B. [Hrsg.] (1993): Macroscale Modelling of the Hydrosphere. IAHS-Publication No. 214, Wallingford.

WMO (1977): Hydrological Maps – a Contribution to the International Hydrological Decade. Studies and Reports in Hydrology Nr. 20, Paris.

Wolf, R. (1870): Schweizerische Flussgebietskarte mit Niederschlagscurven, beruhend auf Messungen von 1864–69. Zürich.

Zeller, J. (1983): Are Drainage Nets Investigated from Swiss Maps Hydrologically Representative? A Short Note. In: Aquatic Sciences 55/2:153–155, Basel.

Zeller, J., Geiger, H., Röthlisberger, G. (1976-1992): Starkniederschläge des schweizerischen Alpenund Alpenrandgebietes. Bd. 1–7, Birmensdorf. Zuidema, P. (1985): Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. Mitteilungen der VAW Nr. 79, Zürich.

## Beiträge zur Hydrologie der Schweiz

|        | (bis Nummer 34: Beiträge zur Geologie der Schwelz – Hydrologie)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                       |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
|        | Zu beziehen bei: Geographisches Institut ETH, Bibliothek, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 3                                     |
| Nr. 1  | Hug, J.; Beilick, A.,1934: Die Grundwasserverhältnisse des Kantons Zürich, mit Karte der<br>Grundwasserströme des Kantons Zürich. Herausgegeben gemeinsam mit der Baudirektion des<br>Kantons Zürich. XX + 328 Seiten, 146 Figuren und Karte 1:100 000.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5                                     |
| Nr. 2  | Eugster, E., 1938: Schneestudien im Oberwallis und ihre Anwendung auf den Lawinenverbau.<br>Vill + 84 Seiten, 42 Textfiguren und 7 Tafeln.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 6                                     |
| Nr. 3  | BADER, H.; HAEFELI, R.; BUCHER, E.; NEHER, J.; ECKEL, O.; THAMS, Ch. (Einführung von<br>P. NIGGLI) 1939: Der Schnee und seine Metamorphose, Erste Ergebnisse und Anwendungen<br>einer systematischen Untersuchung der alpinen Winterschneedecke, durchgeführt von der<br>Station Welssfluhjoch-Davos der Schweiz. Lawinenforschungskommission. 1934–1938.<br>XXIII + 340 Seiten, 18 Tafeln,154 Figuren, 18 Tabellen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | griffen                               |
| Nr. 4  | <ul> <li>LÜTSCHG-LOETSCHER, O.: Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges.</li> <li>1945: I. Band, 1. Teil, Erste Ableilung, Kapitel 1–3 (Mitarbeiter Rudolf Bohner): Heutiger Stand der Niederschlagsforschung. Heutiger Stand der Ablfussforschung. Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss. Mit Tabellenwerk: Ergebnisse der Niederschlagsforschungen.</li> <li>VI + 60 Selten. 9 Karten, 10 Textfiguren, 17 Tabellen.</li> <li>1944: I. Band, 1. Teil, Zweite Abteilung, Kapitel 4, 5: Vorratsänderungen Im Wasserhaushalt der Gletscher. Verhalten des vorstossenden Obern Grindelwaldgletschers. VII + 34 Selten, 10 Taleln, 21 Figuren und 6 Tabellen.</li> <li>1949: I. Band, 1. Teil, Dritte Abteilung, Kapitel 6–8 (Mitarbeiter Rudolf Bohner), mit einem Beitrag von Hans Burger. Boden und Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges. Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind. Die Bedeutung der Nebel-, Tau- und Reifbildungen.</li> <li>VIII + 68 Seiten, 4 Textfiguren, 4 Fototafeln.</li> <li>1950: I. Band, 2. Teil, Kapitel 9 (Mitarbeiter Rudolf Bohner), mit Beiträgen von H. Huber, P. Huber, F. de Quervain. Zur Hydrologie, Chemie und Geotogie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen. VI + 121 Seiten, 26 Textfiguren, 6 Falztafeln.</li> <li>1954: I. Band, 3. Teil, Kapitel 10 (Mitarbeiter: Theophil Hauck, Rudolf Bohner). Die Eis- und Schneetverhältnisse der Oberengadins. VI + 173 Seiten, 54 Textfiguren, 8 Tafein, 48 Tabellen.</li> <li>1954: I. Band, 3. Teil (mit Beiträgen von Rudolf Bohner und Walter Dietz). Zur Hydrologie der Landschaft Davos. XLIV + 490 Seiten, 2 Karten, 9 Tafeln, 146 Textfiguren, 173 Tabellen.</li> <li>1948: III. Band, Forschungsgebiet Nr. 16, F. GYGAX. Niederschlag und Abfluss Im Einzugsgebiet der Magliasina. 100 Seiten, zahlreiche Textfiguren und Tafeln.</li> </ul> | 12<br>8<br>10<br>14<br>20<br>60<br>14 |
| Nr, 5  | Eugster, H.P., 1952: Beitrag zu einer Gefügeanalyse des Schnees.<br>64 Seiten, 42 Textfiguren, 1 Falztafel, 1 Fototafel.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 12                                    |
| Nr. 6  | BUCHER, E., 1948: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbaus. Herausgegeber<br>gemeinsam mit der Schweizerischen Schnee- und Lawinenforschungskommission.<br>113 Seiten, 67 Textfiguren.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 20 –                                  |
| Nr. 7  | Hofen, F., 1952: Über die Energieverhältnisse des Brienzersees.<br>95 Seiten, 4 Textflguren, 8 Taleln, 3 Kunstdrucktaleln.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 14                                    |
| Nr. 8  | HOECK, E., 1952: Der Einfluss der Strahlung und der Temperatur auf den Schmelzprozess der Schneedecke. 36 Seiten, 22 Tafeln, 22 Tabellen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 14.—                                  |
| Nr. 9  | NYDEGGER, P., 1957: Vergleichende limnologische Untersuchungen an sieben Schweizerseen.<br>80 Seiten, 57 Figuren, 24 Tabellen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 20                                    |
| Nr. 10 | STEINEMANN, S., 1958: Experimentelle Untersuchungen zur Plastizität von Eis.<br>72 Seiten, 91 Textfiguren.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 20                                    |
| Nr. 11 | REIST, M., 1960: Beiträge zur Morphologie und Hydrologie des Bavonatales. 65 Seiten, 44 Figuren.<br>HIRSBRUNNER, G. Beiträge zur Morphologie und Hydrologie der Rovanatäler. 79 Seiten, 18 Figuren,<br>26 Fotografien.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 20                                    |
| Nr. 12 | BINGGELI, V., 1961: Zu <b>r Morphologie und</b> Hydrologie der Valle del Lucomagno.<br>124 Seiten, 30 Tabellen, 64 Figuren, 9 Fototafeln.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 20.–                                  |
| Nr. 13 | ZELLER, G., 1964: Morphologische Untersuchungen in den östlichen Seitentälern des Val Blanio.<br>111 Seiten, 64 Textfiguren, 2 Tafeln.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 20                                    |

-

| Nr. 14 | NikLaus, M., 1967: Geomorphologische und limnologische Untersuchungen am Öschinensee.<br>116 Seiten, 26 Textfiguren, 1 Tafel.                                                                                                                               | 28   |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Nr. 15 | GRÜTTER, E., 1967: Beiträge zur Morphologie und Hydrologie des Val Verzasca.<br>92 Sellen, 9 Karten, 36 Figuren, 27 Abbildungen, 33 Tabellen.                                                                                                               | 28,- |
| Nr. 16 | Nybegger, P., 1967: Untersuchungen über Feinststolftransport in Flüssen und Seen, über<br>Entstehung von Trübungshorizonten und zuflüssbedingten Strömungen im Brienzersee und einigen<br>Vergleichsseen. 92 Seiten, 58 Abbildungen, 6 Tafeln, 29 Tabellen. | 28   |
| Nr. 17 | SCHWEIZER, H.U., 1970: Beiträge zur Hydrologie der Ajoie (Berner Jura). 221 Selten.                                                                                                                                                                         | 28   |
| Nr. 18 | JAGGI, Ch., 1970: Hydrologische Untersuchungen in verschiedenen Tessinertätern. 167 Seiten.                                                                                                                                                                 | 28.– |
| Nr. 19 | Kasser, P.; Schram, Karin; Thams, J.C., 1970: Die Strahlungsverhältnisse im Gebiet der Baye<br>de Montreux. 46 Seiten.                                                                                                                                      | 10   |
| Nr. 20 | FÖHN, P., 1971: Methoden der Massenbilanzmessung bei grossen Schneehöhen, untersucht<br>im Firngebiet des Grossen Aletschgletschers. 111 Seiten.                                                                                                            | 28   |
| Nr. 21 | TRIPET, J.P., 1973: Elude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois).<br>183 pages.                                                                                                                                             | 28   |
| Nr. 22 | Binggell, V., 1974: Hydrologische Studien im zentralen schweizerischen Alpenvorland,<br>Insbesondere im Geblet der Langele 163 Seiten.                                                                                                                      | 30   |
| Nr. 23 | LEIBUNDGUT, Ch., 1976: Zum Wasserhaushalt des Oberaargaus und zur hydrologischen Bedeutung<br>des landwirtschaftlichen Wiesenbewässerungssystems im Langetental. 107 Seiten.                                                                                | 30   |
| Nr. 24 | 1978: Die Rheinwasserstrasse Technische und wirtschaftliche Aspekte, hydrologische Aspekte, Abflussprognosen. 48 Seiten.                                                                                                                                    | 10   |
| Nr. 25 | 1978: Die Verdunstung in der Schweiz. – Stand der Kenntnisse, Methoden, Anregungen zur<br>weiteren Erforschung. 95 Seiten.                                                                                                                                  | 24   |
| Nr. 26 | Ноєни, Е., 1979: Hydrogeologische Untersuchungen im Gebiet westlich von Frick (Aargauer<br>Tafeljura). 67 Seiten.                                                                                                                                           | 30   |
| Nr. 27 | WILDBERGER, A., 1981: Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet. 175 Seiten.                                                                                                                                                                            | 30   |
| Nr. 28 | 1982: Tracermethoden in der Hydrologie. – Tagungsbericht des 4. SUWT – Internationale<br>Fachtagung über die Anwendung von Fracermethoden in der Hydrologie, Bern, 1981<br>Telle I und II. 552 Seiten.                                                      | 65   |
| Nr. 29 | VUATAZ, F.D., 1982: Hydrogéologie, géochimie et géolhermie des eaux thermales de Suisse et<br>des règions alpines limitrophes XIV + 174 pages.                                                                                                              | 38.– |
| Nr. 30 | JAQUET, JM.; RAPIN, F.; DAVAUD, E.; VERNET, JP., 1983: Géochimie des sédiments du Léman.<br>70 pages.                                                                                                                                                       | 20.~ |
| Nr. 31 | 1985: Der Niederschlag in der Schweiz. Bericht der Arbeitsgruppe «Niederschlag» der<br>Hydrologischen Kommission der SNG. 278 Seiten.                                                                                                                       | 40   |
| Nr. 32 | Bosshart, U., 1985: Einfluss der Stickstoffdüngung und der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungs-<br>weise auf die Nitratauswaschung ins Grundwasser (am Beispiel Naturlabor Buechberg SH).<br>107 Seiten.                                                  | 25   |
| Nr. 33 | 1986: Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung. – Bericht<br>zum Teilprojekt C des Nationalen Forschungsprogrammes Nr. 2 «Grundlegende Probleme des<br>schweizerischen Wasserhaushaltes». 233 Seiten                       | 55   |
| Nr. 34 | 1989: Niederwasser: Bestimmung, Nutzung und Erhaltung. Hydrologietagung, ETH Zürich, 13. April 1989, 132 Seiten.                                                                                                                                            | 30   |
| Nr. 35 | 1994: Hydrologie kleiner Einzugsgebiete. Gedenkschrift Hans M. Keller. 211 Seiten.                                                                                                                                                                          | 48   |
| Nr. 36 | 1997: Niederschlag und Wasserhaushalt im Hochgebirge der Glarner Alpen. 63 Seiten.                                                                                                                                                                          | 20   |
| Nr. 37 | WEINGARTNER, R., 1999: Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen.<br>190 Seiten.                                                                                                                                                          | 50.~ |