GEOGRAPHICA
BERNENSIA

G 71

Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten

Martin Barben

source: https://doi.org/10.48350/173443 | downloaded: 16.4.2024

Geographisches Institut der Universität Bern

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Herausgeber:
Dozentinnen und Dozenten des Geographischen Instituts der Universität Bern

Reihen:

Reihe A	African Studies
Reihe B	Berichte über Exkursionen, Studienlager und Seminarveranstaltungen
Reihe E	Berichte zu Entwicklung und Umwelt
Reihe G	**Grundlagenforschung**
Reihe P	Geographie für die Praxis
Reihe S	Geographie für die Schule
Reihe U	Skripten für den Unterricht

G 71

Arbeitsgemeinschaft GEOGRAPHICA BERNENSIA
In Zusammenarbeit mit der Geographischen Gesellschaft Bern
Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern

Verlag des Geographischen Instituts der Universität Bern

Die vorliegende Datei enthält den Originaltext einer Inauguraldissertation. Das Bundesamt für Wasser und Geologie und die Nationale Plattform Naturgefahren haben die Arbeit mit massgeblichen finanziellen Beiträgen unterstützt.

© 2003 GEOGRAPHICA BERNENSIA, Universität Bern
ISBN 3-906151-68-9

Vorwort

Die Hochwasserhydrologie blickt in der Schweiz auf eine reiche Vergangenheit zurück. Die Aktivitäten haben ihre Wurzeln im 19. Jahrhundert. So publizierte Lauterburg bereits 1887 ein Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserspitzen an Stellen ohne Direktmessungen des Abflusses. Im Laufe der Zeit wurden weitere Verfahren entwickelt. Dazu haben in den letzten zehn Jahren auch einige Arbeiten der Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern beigetragen. Heute verfügen wir in der Schweiz über eine grosse Zahl empirischer und statistischer Verfahren zur Hochwasserabschätzung.

In der praktischen Anwendung stellt sich immer wieder die Frage, welches bzw. welche der verschiedenen Abschätzverfahren anzuwenden sei. Auch möchten die Anwender wissen, mit welchen Schätzfehlern zu rechnen ist. Bei diesen zwei Punkten setzt die nun vor-liegende Dissertation von Martin Barben ein. Sie gibt Antworten auf beide Fragestellungen, indem sie sich mit den wichtigsten Abschätzverfahren intensiv auseinandersetzt. Entstanden ist aber auch ein EDV--Werkzeug, HQx_meso_CH, das für die Hochwasserabschätzung in der Praxis neue Möglichkeiten eröffnet.

Die Dissertation von Martin Barben wurde bereits vor über zwei Jahren fertig gestellt. Sie wird aber erst jetzt veröffentlicht; dies hängt vor allem damit zusammen, dass diese Arbeit unmittelbar weitere Aktivitäten auslöste, die auch zu zusätzlichen Publikationen führten:

Barben, M., Hodel, H.-P., Kleeberg, H.-B., Spreafico, M., Weingartner, R. (2002): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. KHR-Bericht Nr. 1-19, Lelystad.

Spreafico, M., Weingartner, R., Barben, M., Ryser, A. (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4, Bern.

Das Software-Paket „HQx_meso_CH" ist ein Bestandteil der zweiten erwähnten Publikation. Um ein vollständiges Bild über den aktuellen Stand der Hochwasserabschätzung in der Schweiz zu erhalten, lohnt es sich, alle drei Publikationen zu konsultieren.

Bern, März 2003 Rolf Weingartner

Zusammenfassung

In der Praxis herrscht nach wie vor eine grosse Verunsicherung bei der Hochwasserabschätzung in ungemessenen Einzugsgebieten. Ein grosser Zeit- und Kostendruck führt dazu, dass in vielen Fällen nicht die optimalen, oftmals aufwendigen Abschätzverfahren eingesetzt werden. Einfache Methoden führen zwar rasch zu Ergebnissen; sie ergeben aber Schätzungen mit unbekanntem Fehler.

Diese Situation ist unbefriedigend. Das Interesse bei Anwenderinnen, Anwendern, Ämtern und Versicherungen ist deshalb sehr gross, dass diese Unsicherheiten (welches Verfahren ist wann einzusetzen, wie gut sind die Resultate?) durch gezielte Untersuchungen beseitigt oder zumindest stark verkleinert werden. Die vorliegende Arbeit soll einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen dieses Ziels leisten.

Die gebräuchlichsten Hochwasser-Abschätzmodelle werden miteinander verglichen und auf ihre Tauglichkeit geprüft (Abbildung Z.1).

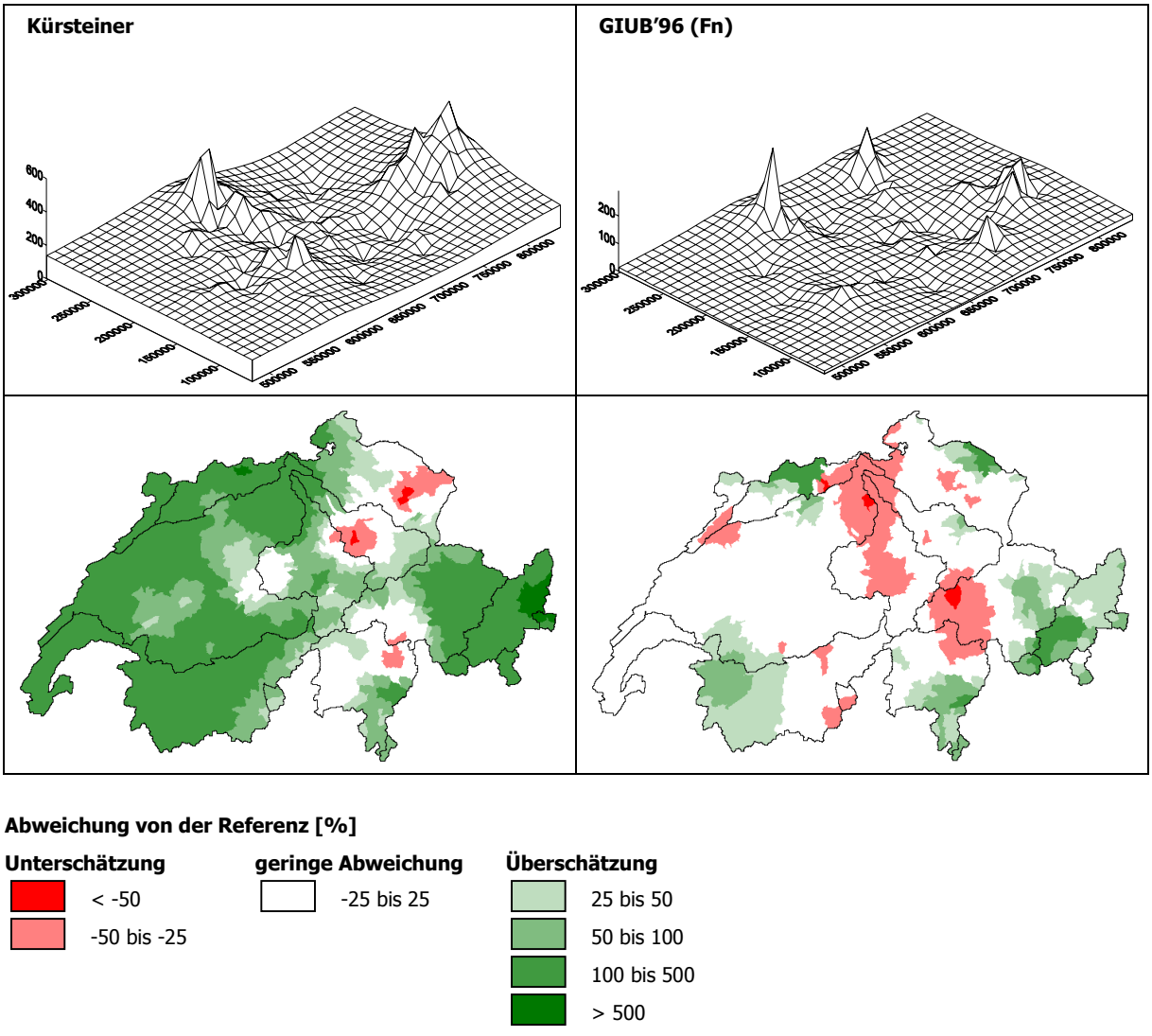


Abbildung Z.1: Nicht alle Hochwasser-Abschätzmodelle liefern gleich gute Resultate.
Aber welche sind die besten?
Relative Abweichungen von den Referenzwerten [%].

Zur Anwendung dieser Modelle wird das EDV-Werkzeug **HQx_meso_CH** entwickelt, das es erlaubt, die Verfahren in beliebigen und insbesondere auch in ungemessenen schweizerischen Einzugsgebieten effizient und praxisfreundlich einzusetzen (Abbildung Z.2). Im weiteren werden Angaben zur Genauigkeit geliefert, mit denen beurteilt werden kann, wie vertrauenswürdig die Schätzungen sind.

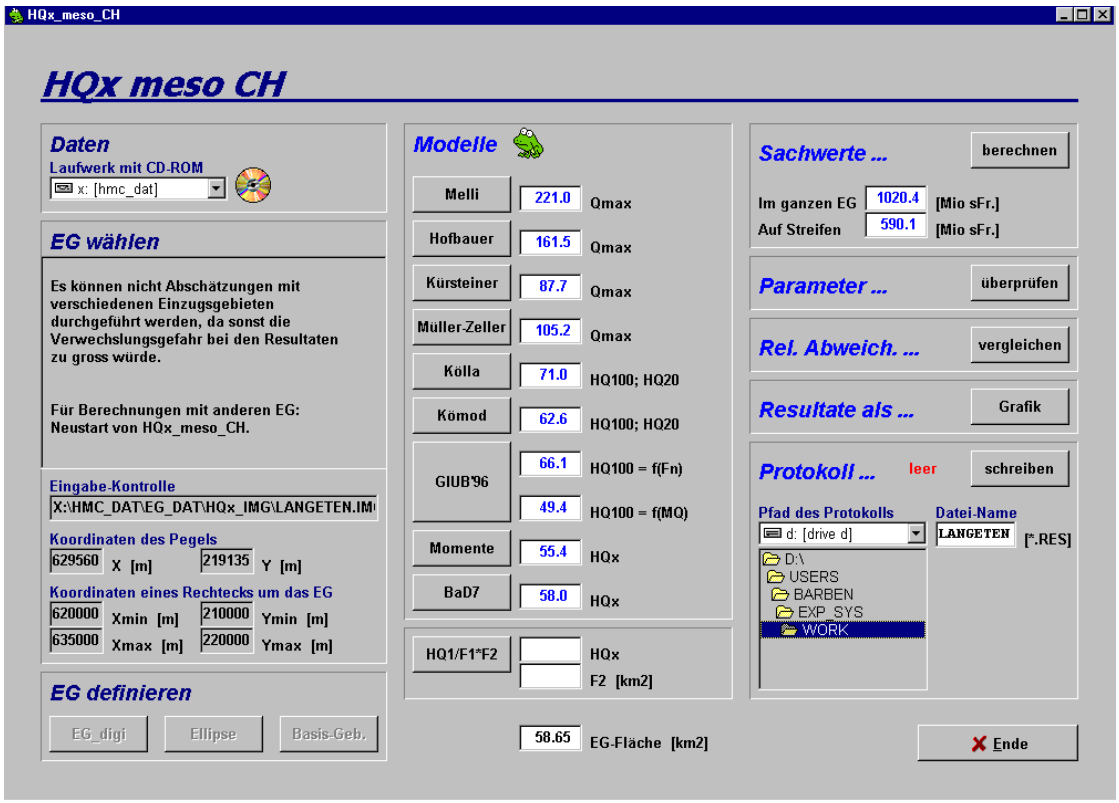


Abbildung Z.2: Hauptformular von HQx_meso_CH.

Mit HQx_meso_CH eröffnen sich für die Hochwasserabschätzung neue Möglichkeiten. Man gelangt nun mühelos und sehr rasch zu Ergebnissen, und es bleibt mehr Zeit, sich mit den Eigenheiten der Modelle und des Einzugsgebietes auseinanderzusetzen. Dadurch werden Abschätzungen insgesamt vertrauenswürdiger und qualitativ besser.

Ist die N-A-Modellierung für die Hochwasserabschätzung eine sinnvolle Alternative zu den *einfachen* Modellen? Eine Fallstudie zeigt, dass sie es zum jetzigen Zeitpunkt ganz bestimmt nicht ist. Der immense Zeitaufwand für die Eichung der N-A-Modelle und die dafür benötigten Messwerte für die Modellinputparameter und für den Abfluss sind zu hohe Hürden auf diesem Weg. Ausserdem hat man keine Gewähr, dass die Qualität der Resultate wesentlich besser wird. Es gibt aber vielversprechende Perspektiven, wie diese Probleme in Zukunft gelöst werden könnten.

Inhalt

Vorwort iii

Zusammenfassung iv

1 Einleitung 1

1.1 Problemstellung und Zielsetzung 1

1.2 Hochwasserschäden und Hochwasserkosten 5

1.3 Gültigkeit der Bemessungsgrundlagen bei einer Klimaerwärmung 7

1.4 Gliederung der Arbeit 8

2 Referenzwerte für den Modellvergleich 9

2.1 Auswahl der Einzugsgebiete mit langen Messreihen 9

2.2 Berechnung der Referenzwerte mit Extremwertstatistik 13

3 Die Hochwasser-Abschätzmodelle 18

3.1 Hochwasserabschätzung – erste Versuche im 19. Jahrhundert 18

3.2 Modellwahl 22

3.3 Beschreibung der Modelle 26

3.3.1 Melli 28

3.3.2 Hofbauer 31

3.3.3 Kürsteiner 34

3.3.4 Müller-Zeller 37

3.3.5 Kölla 40

3.3.6 Kölla mod. 43

3.3.7 GIUB'96 45

3.3.8 Momente 49

3.3.9 BaD7 52

3.4 Modellvergleich 55

4 Das neue Werkzeug für die Praxis 68

4.1 Einleitung 68

4.2 Die Komponenten von HQx_meso_CH 72

4.2.1 Eingabe/Definition der Einzugsgebiete 72

4.2.2 Anwendung der Modelle 77

4.2.3 Schadenpotential 81

4.2.4 Parameterüberprüfung 83

4.2.5 Ausgabe der Resultate 85

4.3 HQx_meso_CH und Hochwasserrisiko 87

5 N-A-Modellierung – eine Alternative zu den Hochwasser-Abschätzmodellen? 90

5.1 Einleitung 90

5.2 N-A-Modellierung 92

5.2.1 Ereignisbezogene Modellierung 93

5.2.2 Langzeitsimulation 98

6 Ausblick 107

Literatur 111

Anhang 117

A Referenzstationen, Referenzwerte 118

B Modellvergleich 124

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit wurde verfasst, um Leute in der Praxis bei der Abschätzung von Hochwasserspitzenabflüssen und bei der Beurteilung des Hochwasserrisikos in ungemessenen, mesoskaligen ($10 < Fn < ca\ 500\ km^2$) Einzugsgebieten mit besseren Grundlagen und effizienteren, praxisfreundlichen Werkzeugen zu unterstützen.

Das einleitende Kapitel zeigt die Problemstellung auf und skizziert in groben Zügen die Lösungswege, die hier gegangen wurden. Es gibt einen Überblick über Hochwasserschäden und die Kosten beim Hochwasserschutz und diskutiert die Frage, ob die Bemessungsgrundlagen bei einer allfälligen Klimaerwärmung noch gültig wären.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aktuelle Situation

Wer sich in der Schweiz mit Fragen des Hochwasserschutzes beschäftigt, stellt fest, dass in den letzten Jahren die Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Abschätzungen von Hochwasserabflüssen ständig gestiegen sind. Das hat zwei wichtige Ursachen:

1) Mit dem Bevölkerungswachstum und der damit verbundenen Zunahme der besiedelten Flächen wurden und werden zunehmend Räume genutzt, die bezüglich Hochwassergefahr sehr ungünstig liegen. Die Einwohnerzahl hat sich von 3.3 Millionen im Jahr 1900 auf 6.9 Millionen im Jahr 1990 mehr als verdoppelt (BFS 1996). Und in Zukunft lassen die wachsende Wohnbevölkerung, mehr Arbeitskräfte, kleinere Haushalte und grösser werdende Ansprüche den Bedarf an Arbeits-, Wohn- und Verkehrsflächen ansteigen. Damit einher geht ein stetiger Anstieg des Schadenpotentials. Niggli (1999) nennt für den Bereich der Messstation der Gürbe in Belp im Zeitraum 1900 bis 1990 eine Erhöhung des Schadenpotentials um 600 Prozent. Es ist klar, dass bei einer erhöhten Konzentration der Sachwerte auch der Wunsch nach einem zuverlässigen Hochwasserschutz auftaucht und immer genauere Methoden für die Abschätzung von seltenen Hochwassern verlangt werden.
2) Im Anschluss an die Hochwasserereignisse des Jahres 1987 hat ein Umdenken im Hochwasserschutz eingesetzt. Galt früher ein genereller Ausbau für hundertjährliche Hochwasser, spricht man heute gerne von der Differenzierung der Schutzziele (BWW 1995). Das heisst, dass nicht alles und jedes gegen das berühmte und vielzitierte hundertjährliche Hochwasser (HQ_{100}) geschützt werden soll, sondern dass man sich nach den zu schützenden Werten richtet. Geschlossene Siedlungen werden vor einem HQ_{100} geschützt, während bei landwirtschaftlich genutzten Flächen alle 5 bis 20 Jahre Überschwemmungen akzeptiert werden. Es müssen also Abschätzmethoden angewandt werden, die nicht nur ein HQ_{100} oder ein Q_{max} liefern, sondern die auch mit anderen Jährlichkeiten umgehen können. Es wird nun von der Bemessungspraxis viel mehr Flexibilität verlangt. Die oben erwähnte Art des Umgangs mit den Naturgefahren wird nicht nur beim Hochwasser angestrebt. Die PLANAT (Nationale Plattform Naturgefahren) (1998) spricht zwar ganz allge-

mein bei den Naturgefahren von einem Wechsel von der reinen Gefahrenabwehr zur Risikokultur. Dieser Wechsel ist aber bei einem Grossteil der Bevölkerung noch längst nicht vollzogen. Sehr seltene Ereignisse können nicht als etwas Aussergewöhnliches akzeptiert werden und Schäden werden kaum toleriert. Die grossen Überschwemmungen des Frühjahrs 1999 haben das einmal mehr gezeigt. Die Auswertung der Abflussdaten durch das Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) hat für verschiedene Stationen Wiederkehrperioden von weit über 100 Jahren ergeben (BWG 2000). Trotzdem wurde – nicht zuletzt von den Medien – sofort nach Schuldigen gesucht. Weichselgartner (2000) meint, dass Überschwemmungen nicht mehr toleriert werden, auch wenn Sachen und Personen nicht gefährdet sind. Das Verlangen der Öffentlichkeit nach geeigneten Schutzmassnahmen sei wie in anderen öffentlichen Bereichen tendenziell stärker geworden.

Am Anfang jeder Hochwasserschutzmassnahme und vieler ökologischer Fragestellungen steht die hydrologische Beurteilung des Fliessgewässers. Und genau hier macht sich eine grosse Verunsicherung breit. In der Schweiz und vermutlich auch anderswo ist man ziemlich ratlos, wenn es um Fragen der Hochwasserabschätzung geht. Es gibt zwar für die Anwendung in der Praxis eine sehr grosse Anzahl von Modellen, aber niemand weiss, wie gut die Verfahren sind und bei welchen Gelegenheiten sie eingesetzt werden sollen.

Der einfachste Fall – aber auch der ist nicht unumstritten (siehe Kapitel 2.2) – ist derjenige, bei dem in einem Einzugsgebiet aus einer langen Messreihe mit Extremwertstatistik ein Bemessungshochwasser einer beliebigen Wiederkehrperiode bestimmt werden kann (ganz links in Abbildung 1.1). In dieser Untersuchung reden wir aber von jenen Fällen, in denen es überhaupt keine oder nur sehr kurze Abflussmessungen gibt. In dieser Situation schwört jedes Ingenieurbüro und jede Behörde, welche sich mit Hochwasserschutz beschäftigen, auf seine (eigenen) Modelle oder Faustformeln. Es ist deshalb nahezu unmöglich, Resultate zu vergleichen.

Diese problematische Ausgangslage wird durch einen grossen Kosten- und damit Zeitdruck verschärft. Unbegreiflicherweise stehen für hydrologische Abklärungen nur wenige Mittel zur Verfügung. Bei kleineren Projekten hört man immer wieder, eine Hochwasserabschätzung dürfe nicht teurer sein als das Bauwerk. Dem muss entgegengehalten werden, dass nicht der Preis des Geschiebesammlers oder des Entlastungskanals entscheidend ist, sondern der Schaden, der damit vermieden werden kann.

Umfragen bei Ingenieurbüros haben gezeigt, dass für eine Hochwasserabschätzung ein bis maximal zwei Tage zur Verfügung stehen. Wenn für die Anwendung eines deterministischen Modells noch Grundlagendaten (Flugbilder, Boden- und Landkarten, etc.) beschafft und interpretiert werden müssen, sieht man bald, dass die Zeit für eine Feldbegehung (die bei kleinen Einzugsgebieten unerlässlich ist) und für die eigentliche Berechnung der Bemessungsgrössen zu knapp wird.

Unter diesem Druck wird oft zu einfachen Methoden gegriffen, die (zu) rasch zu Ergebnissen führen, aber von denen insbesondere unerfahrene Anwenderinnen und Anwender nicht wissen, wie zuverlässig sie sind. Es bleibt dann das ungute Gefühl, die Hochwasserspitze stark unter- oder stark überschätzt zu haben. Eine Unterschätzung ist gefährlich für Menschen und Sachwerte, eine Überschätzung dagegen ist eine unnötige Verschleuderung von Ressourcen.

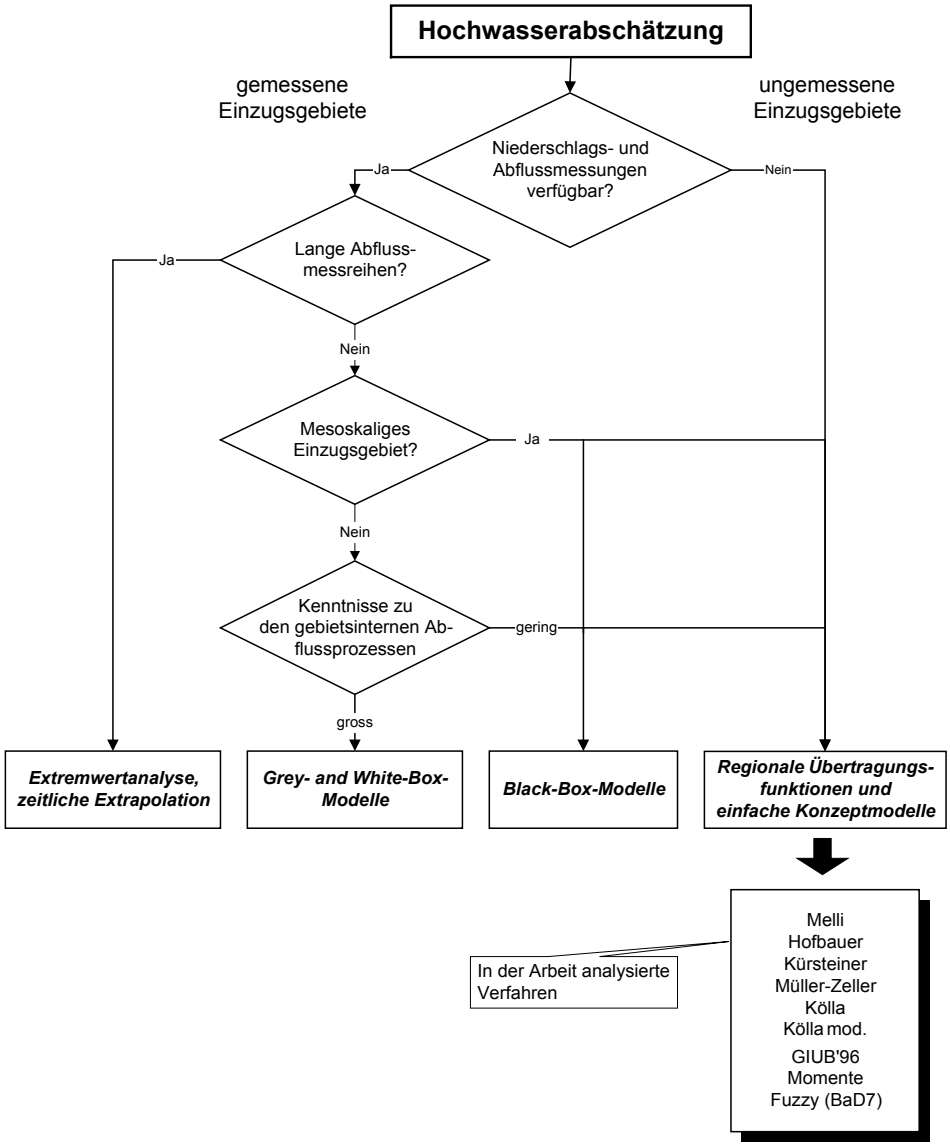


Abbildung 1.1: Einordnung der Hochwasser-Abschätzverfahren (nach Weingartner 1999, leicht verändert).

Lösungsweg(e)

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Lösungen für dieses Problem zu finden. Wenn wir beim für die Praxis realistischen Zeitrahmen für eine Abschätzung von ein bis zwei Tagen bleiben, gibt es zwei ganz unterschiedliche Auswege aus dem Dilemma:

1) In einer umfangreichen Analyse werden die verschiedenen Modelle so gut kennengelernt, dass vor (!) einer konkreten Anwendung schon bekannt ist, in welcher Grössenordnung der Fehler der Abschätzung liegt, welche Datengrundlagen benötigt werden und wie aufwendig die Anwendung ist. Damit würde auch klar, welches das optimale Modell ist.

2) Die Anwendungen der Hochwasser-Abschätzverfahren werden durch die Aufbereitung der Input-Parameter und die Entwicklung von Anwendersoftware so stark beschleunigt, dass der Einsatz von mehreren Modellen in kurzer Zeit möglich ist. Aus den (zahlreichen) Ergebnissen können Rückschlüsse gezogen werden, welche

abgeschätzten Hochwasserwerte plausibel sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass alle Verfahren gewisse Schwachstellen aufweisen, diese aber nicht in den gleichen Gebieten auftreten werden. Durch die Einordnung der Resultate der einzelnen Verfahren können grobe Fehlbeurteilungen nahezu vermieden werden.

Es wurde anfänglich der erste Weg beschritten. In 95 mittelgrossen ($10 < Fn <$ ca. 500 km^2) schweizerischen Einzugsgebieten mit langen Messreihen wurden mit der Extremwertstatistik Referenzwerte berechnet (Abbildung 1.1, links). Anschliessend wurden die Abschätzungen von zehn Modellen (Abbildung 1.1, rechts) mit diesen Referenzwerten verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Vergleiche wertvolle Informationen zur Einsetzbarkeit der Verfahren liefern, dass aber die Qualität der Fehlerabschätzung nicht hoch genug ist, um den Einsatz einer einzigen Methode nur auf diese Analysen abzustützen.

Wegen der grossen Zahl von Einzugsgebieten mussten für die Analyse sehr viele Arbeitsgänge automatisiert werden. Dabei sind mehrere Tausend Zeilen Programmcode in vielen unabhängigen Anwendungen entstanden. Diese günstige Ausgangslage galt es zu nutzen. Die verschiedenen Teillösungen wurden zu einem einzigen, einfach zu bedienenden Softwarepaket zusammengestellt. Damit wird der Einsatz von mehreren Modellen in kurzer Zeit möglich. Rückblickend kann man festhalten, dass beide Lösungswege beschritten worden sind.

Es haben sich auch die anfänglich gesetzten Gewichte der Arbeit verschoben. Da es nun möglich ist, in sehr kurzer Zeit ein Dutzend Hochwasserabschätzungen für einen beliebigen Punkt an einem Fliessgewässer zu erhalten, ist es nicht mehr derart wichtig, das optimale Modell zu kennen.

Das Resultat der Analysen

In zwei bis drei Stunden (im schlechtesten Fall) verfügen wir in einem beliebigen, mesoskaligen, schweizerischen Einzugsgebiet über rund ein Dutzend Hochwasserabschätzungen und wissen von jedem Modell, wie gross in etwa der zu erwartende Fehler der Abschätzung ist. Zusätzlich kann grob bestimmt werden, wie gross das Schadenpotential[1] im Einzugsgebiet oder auf einer vom Anwender oder von der Anwenderin definierten potentiellen Überflutungsfläche ist. Diese Angaben reichen aus, um eine detaillierte Interpretation der Lage vorzunehmen.

Die Streuung der Resultate der Abschätzungen, kombiniert mit den Angaben zum Schadenpotential liefert die Grundlage für das weitere Vorgehen. Im Fall, wo die Ergebnisse sehr widersprüchlich ausfallen und das Schadenpotential grosse Werte annimmt, muss möglicherweise auf aufwendigere Untersuchungen (deterministische Modellierung, hydraulische Modelle, Beregnungsversuche etc., siehe Abbildung 1.1) ausgewichen werden. Im anderen Fall genügen die berechneten Hochwasserdaten in der Regel zur Planung des wasserbaulichen Projektes.

---

1 *Schadenpotential* ist nach BWW (1997) die Grösse des möglichen Schadens und nach BUWAL (1998) die Menge der potentiell durch Naturereignisse beeinträchtigten Objekte in ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung. *Schadenpotential* steht hier für *Summe der Sachwerte*. Das ist eine Vereinfachung, indem keine zeitliche Verteilung beachtet wird und indem nicht berücksichtigt wird, in welchem Grad Objekte geschädigt werden können. Die Summe der Sachwerte ist also vom Betrag her definitionsgemäss immer grösser als das Schadenpotential nach BWW und BUWAL.

1.2 Hochwasserschäden und Hochwasserkosten

Sind Hochwasser in der Schweiz ein Problem? Je nachdem wo, und wann man diese Frage stellt, bekommt man ganz unterschiedliche Antworten zu hören. Im Kanton Basel-Stadt gibt es kaum Hochwasserprobleme; der Kanton Obwalden hingegen hat alle paar Jahre sein *Hundertjährliches*. Wenn die Ereignisse nicht so gross ausfallen wie 1987 und 1999 (Schäden in grossen Teilen der Schweiz) oder so spektakulär sind wie 1993 und 2000 (Hochwasserkatastrophe im Oberwallis mit den Schwerpunkten in Brig und in den Vispertälern), geraten sie sehr schnell wieder in Vergessenheit.

Dieses Kapitel soll mit ein paar wenigen Zahlen zeigen, mit welchen Schadensummen jährlich gerechnet werden muss und wieviel Geld in den Wasserbau investiert wird. Es zeigt auch den Stellenwert der Hochwassergefahr, verglichen mit anderen Naturgefahren.

Unwetterschäden in der Schweiz

Eine Übersicht der Unwetterschäden[2] der Schweiz von Röthlisberger (1998) zeigt eine sehr grosse Variabilität (Abbildung 1.2). Von Jahr zu Jahr schwanken die Schäden sehr stark (10 Mio. Fr. 1989 bis 1230 Mio. Fr. 1987). Die mittleren Schadenkosten der Periode 1972 bis 1998 betragen 178 Mio. Franken. In dieser Zeitspanne kamen 56 Personen bei Unwettern ums Leben (Ursache: 30 Wasser; 11 Rutsch; 15 Murgang).

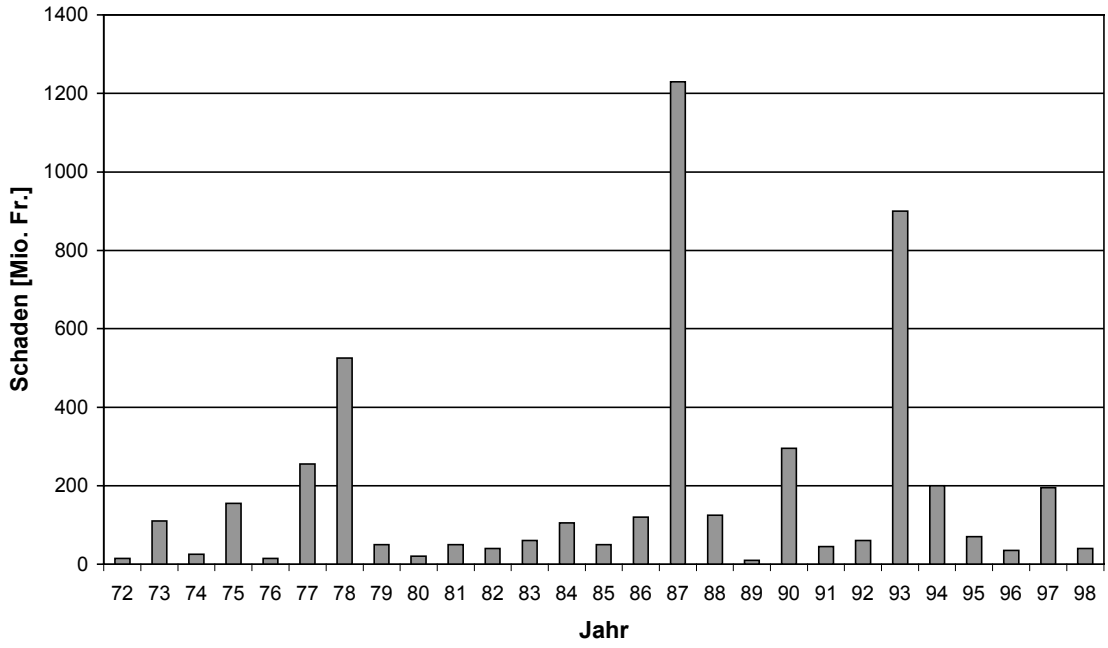


Abbildung 1.2: Geschätzte Schadensumme (nach Röthlisberger 1998, ergänzt).

2 Die geschätzten Kosten enthalten die durch Unwetter, Dauerregen oder Schneeschmelze verursachten Wasser- und Rutschungsschäden.

Kosten des Hochwasserschutzes

Die Summe der Baukosten für die vom Bund in den Jahren 1990 bis 1998 subventionierten Wasserbauten belaufen sich im Mittel auf rund 170 Mio. Fr. pro Jahr (120 Mio. Fr. 1996 bis 235 Mio. Fr. 1994) (Quelle Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel). Dies entspricht knapp dem mittleren Unwetterschaden der Periode 1972 bis 1998 oder 0.05 % des Bruttoinlandprodukts oder 0.5 % der Gesundheitskosten oder einem Viertel der ökologischen Direktzahlungen an die Landwirtschaft (BFS 1999).

Hochwasser im Vergleich mit anderen Naturgefahren

Das Bundesamt für Zivilschutz (BZS) (1995) hat in einer vergleichenden Übersicht die Katastrophen und Notlagen in der Schweiz untersucht. Diese wurden dabei in gesellschaftliche Gefahren (Epidemien, Migration), technische Gefahren (KKW-Störfall, Talsperrenbruch) und Naturgefahren (Erdbeben, Hochwasser, Sturm...) unterteilt (Abbildung 1.3). Die Naturgefahren machen zwei Drittel des gesamten gewichteten Risikos[3] aus. Bei den Naturgefahren steht das Hochwasser nach den Erdbeben an zweiter Stelle.

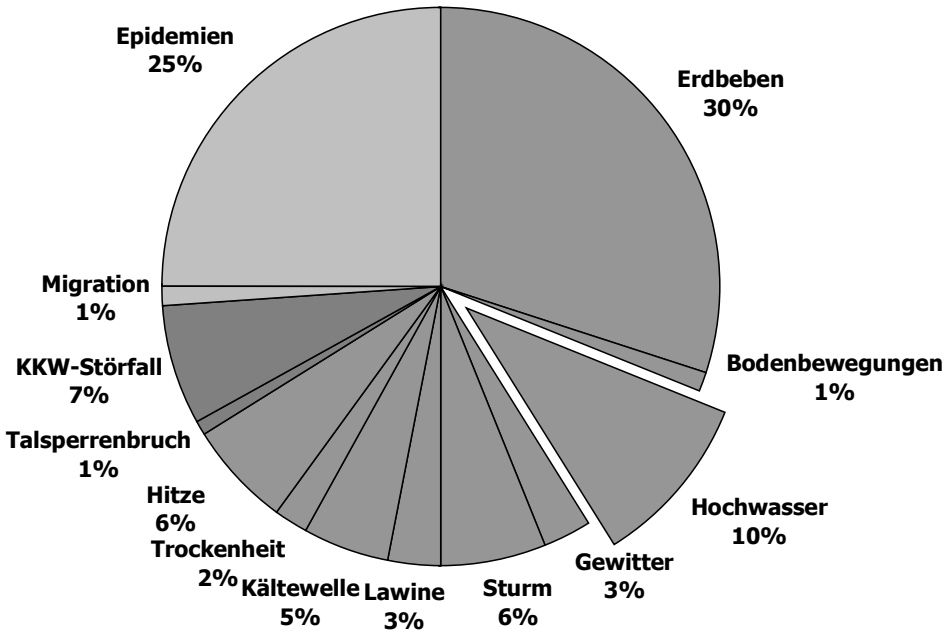


Abbildung 1.3: Vergleichende Übersicht über die Katastrophen und Notlagen, gewichtetes Risiko. BZS (1995).

Die Zahlen zeigen, dass beim Hochwasser eine Prävention nötig ist. Dazu gehört eine umfassende Gefahrenbeurteilung, die auf zuverlässigen Instrumenten zur Hochwasserbemessung basiert. Investitionen, die zu einer Verbesserung der Werkzeuge der Hochwasserabschätzung führen, würden sich bestimmt auszahlen.

3 Das gewichtete Risiko berücksichtigt über den statistischen Schadenerwartungswert hinaus die unterschiedliche Wahrnehmung der Gesellschaft gegenüber Risiken (BZS 1995).

1.3 Gültigkeit der Bemessungsgrundlagen bei einer Klimaerwärmung

Braucht es in einem wärmeren Klima andere Grundlagen für die Bestimmung von Bemessungsgrössen? Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 31 (NFP 31) *Klimaänderungen und Naturkatastrophen* ist diese Frage nur am Rande diskutiert worden. Weil zu den Niederschlagsveränderungen noch keine zuverlässigen Angaben vorliegen, ist es äusserst schwierig, Auswirkungen eines wärmeren Klimas auf die Abflüsse zu quantifizieren.

Gurtz et al. (1997) haben in einem Projekt des NFP 31 die Auswirkungen einer Klimaerwärmung auf den Wasserkreislauf im Thurgebiet untersucht. Die Autoren kommen zum Schluss, dass eine deutliche Veränderung der zeitlichen Verteilung der Abflüsse zu erkennen ist. Während im Winter die mittleren Abflüsse zunehmen, zeigen sie im Sommer eine abnehmende Tendenz. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Schädler (1990), Bultot et al. (1992) und Barben (1995) bei Untersuchungen in anderen schweizerischen Einzugsgebieten.

Bei den Hochwassern wird laut Gurtz et al. (1997) eine Verringerung der Scheitelwerte der Sommerhochwasser durch den Anstieg der Scheitelwerte der Winterhochwasser mehr als ausgeglichen, so dass **keine einschneidenden Massnahmen zur Veränderung der Bemessungsgrundlagen von wasserwirtschaftlichen Anlagen abgeleitet werden können**.

Zur Abrundung der Einleitung werfen wir noch einen Blick in die Vergangenheit. Die Häufigkeit der Hochwasser der letzten 700 Jahre ist laut einem Wissensstandsbericht des OcCC[4] (1998) einer grösseren Schwankung unterworfen, deren Ursachen weitgehend unbekannt sind. Es gab immer wieder Perioden mit grösserer und Perioden mit kleinerer Hochwasseraktivität. Die beobachteten Hochwasser dieses Jahrhunderts haben die natürliche Variabilität nicht überschritten (OcCC 1998). Es gibt keine klaren Zusammenhänge zwischen den Klimaphasen und der Hochwasserhäufung (Röthlisberger 1998). Pfister (1998) erwähnt aber, dass extreme Hochwasser an Übergängen von einem kälteren in ein wärmeres Klima oder umgekehrt gehäuft auftraten.

4 Beratendes Organ für Klimaforschungsfragen des EDI und UVEK.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die Schwerpunkte der Arbeit liegen bei der Beurteilung der Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in Kapitel 3 und beim neuen EDV-Programm HQx_meso_CH zur effizienten Anwendung der vorgestellten Modelle in Kapitel 4. In Kapitel 2 wird erklärt, wie die Referenzwerte für die Beurteilung aus den langen Messreihen bestimmt werden, und Kapitel 5 soll die Frage beantworten, ob es brauchbare Alternativen zu den *einfachen* Hochwasser-Abschätzverfahren gibt. Die Arbeit schliesst mit einem Ausblick in Kapitel 6.

---

2 Referenzwerte
- Auswahl der Einzugsgebiete mit langen Messreihen
- Berechnung der Referenzwerte mit Extremwertstatistik

---

3 Modellbeurteilung
- historischer Rückblick auf die Anfänge der Hochwasserabschätzung
- Auswahl der Modelle für die Untersuchung
- Beschreibung und Beurteilung der Modelle

---

4 HQx_meso_CH
- Vorstellung des neuen EDV-Programms
- Vorschläge für eine sinnvolle Anwendung
- Verwendung von HQx_meso_CH für die Risikobeurteilung

---

5 Alternativen
- Alternativen zu den *einfachen* Abschätzverfahren
- Fallbeispiel: N-A-Modellierung in der Langeten

---

6 Ausblick
- Schlussbetrachtung
- Tendenzen und Visionen für die Hochwasserabschätzung

---

2 Referenzwerte für den Modellvergleich

Für den Modellvergleich stehen auf der einen Seite Hochwasserabschätzungen aus den ausgewählten Abschätzmodellen und auf der anderen Seite Referenzwerte, an denen die Güte der Abschätzungen gemessen werden soll. Dieses Kapitel widmet sich der Auswahl der Einzugsgebiete mit langen Abflussmessreihen und der Bestimmung der Referenzwerte mit den Mitteln der Extremwertstatistik.

Die Einzugsgebiete mit einer ausgezeichneten Datenlage sind nicht sehr zahlreich und ausserdem nicht gleichmässig über die Schweiz verteilt.

Die Bestimmung der Referenzwerte mit der Extremwertstatistik aus den langen Reihen ist nicht unumstritten und kaum objektiv durchführbar.

2.1 Auswahl der Einzugsgebiete mit langen Messreihen

Nicht jede Abflussmessreihe eignet sich für die Ableitung von Referenzwerten im Hinblick auf Hochwasseranalysen. Unter *Referenzwert* wird hier eine Hochwasserspitze [m^3/s] verstanden, die man aus einer langen Abflussmessreihe mit den Mitteln der Extremwertstatistik berechnet (siehe Kapitel 2.2). Wenn nichts anderes vermerkt ist, hat der Referenzwert eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren. Damit zuverlässige Referenzgrössen berechnet werden können, sollten wichtige Bedingungen erfüllt sein:

Stabiles Gerinne: Um eine qualitativ gute Pegel-Abfluss-Beziehung (P/Q-Beziehung) zu erhalten, braucht es in der Umgebung der Abflussmessstelle ein stabiles Gerinne. Wenn sich die hydraulischen Verhältnisse immer wieder verändern, kann keine zuverlässige und langfristig gültige P/Q-Beziehung aufgestellt werden.

Eichmessung bei Hochwasser: Je höher die grösste Eichmessung einer Abflussstation ist, desto zuverlässiger sind die ausgewiesenen Hochwasserabflüsse. Das Verhältnis von grösster Eichmessung zum grössten beobachteten Spitzenabfluss (HHQ) der Referenzstationen ist mit den wichtigsten statistischen Masszahlen in Tabelle 2.1 zusammengefasst (die vollständigen Daten stehen im Anhang A4).

Tabelle 2.1: Verhältnis von grösster Eichmessung zu grösstem Abfluss.
Stat. Masszahlen, ermittelt in 95 mittelgrossen schweizerischen Einzugsgebieten.

	Verhältnis [-]
Minimum	0.028
Maximum	0.664
Mittelwert	0.284
Median	0.291

Ideal wären Werte nahe bei 1. Das hiesse, dass die grossen Hochwasserspitzen gemessen worden wären und nicht mit einer oftmals unsicheren P/Q-Beziehung extrapoliert worden sind. Der Minimalwert 0.028 bedeutet, dass im betreffenden Jahrbuch

ein Hochwasser ausgewiesen wird, das rund 36 mal grösser ist als die höchste Eichmessung. Es muss allerdings erwähnt werden, dass extreme Abflüsse mit den konventionellen Methoden (Flügelmessung) meistens gar nicht mehr bestimmt werden können. Wird von einer Messbrücke aus gemessen, kann sich die Stange, an der der Flügel befestigt ist, wegen der relativ grossen Strömungsgeschwindigkeit oder wegen Schwemmholz verbiegen. Für den Flügel allein wäre eine hohe Fliessgeschwindigkeit kein Problem. Er ist bis etwa 10 m/s geeicht, und laut einer mündlichen Mitteilung von H.-P. Hodel (2000) betragen die grössten, von der Landeshydrologie und -geologie (LHG) gemessenen Punktgeschwindigkeiten (also nicht die mittlere Geschwindigkeit über das ganze Querprofil) nur etwa 5 m/s. Bei Seilflügelanlagen ist es ab einer gewissen Strömungsgeschwindigkeit nicht mehr möglich, das Gewicht mit dem Propeller ins Wasser zu tauchen. Und nicht zu vergessen sind die schnellen Pegelstandsänderungen während eines Hochwasserereignisses. Eine Abflussmessung mit dem Flügel, die normalerweise etwa zwei Stunden, und mit abgekürztem Verfahren eine knappe Stunde dauert, kann keinem Pegelstand zugeordnet werden, wenn sich dieser minütlich ändert. Die grosse Unsicherheit, die durch das Fehlen von hohen Eichmessungen entsteht, wird etwas entschärft, indem nicht nur die Eichmessungen für die P/Q-Beziehungen herangezogen werden. Für bestimmte extreme, mit den Eichmessungen nicht erreichte Pegelwerte, werden mit hydraulischen Berechnungen zusätzliche Stützstellen ermittelt (mündl. Mitteilung mehrerer Verantwortlicher der Abflussmessungen von eidgenössischen, kantonalen und privaten Stellen). Damit wird verhindert, dass eine extrapolierte Kurve eine nicht plausible Richtung einschlägt (vgl. Isch 2000).

Kleiner Beeinflussungsgrad: Die Oberflächengewässer können von verschiedener Seite beeinflusst werden. Zu den mengenmässig bedeutendsten Eingriffen in den Wasserhaushalt der Gewässer zählen nach Margot et al. (1992) die Wasserkraftnutzung, die Trink- und Brauchwassernutzung sowie die Seeregulierung. Je grösser diese Beeinflussung ist, desto unsicherer wird die Bestimmung von Bemessungsgrössen mit der Extremwertstatistik, die homogene Daten voraussetzt. Gesucht werden also naturnahe Einzugsgebiete.

Lange Messreihe: Durch die Länge der Messreihe wird die Sicherheit einer Angabe über die Hochwasserabflüsse einer bestimmten Jährlichkeit direkt beeinflusst. Je länger die Messreihe ist, desto kleiner ist die Unsicherheit. Tabelle 2.2 und Anhang A2 bieten einen Überblick über die Messreihenlängen der Referenzstationen.

Tabelle 2.2: Länge der Abflussmessreihen der Referenzstationen.

Längen-Bereich n [a]	**Anzahl Stationen**
$10 < n \leq 20$	21
$20 < n \leq 30$	26
$30 < n \leq 40$	24
$40 < n \leq 50$	13
$50 < n \leq 60$	2
$60 < n \leq 70$	4
$70 < n \leq 80$	4
$80 < n \leq 90$	1

stat. Masszahlen	
Mittel	**33.4 a**
Minimum	11 a
Maximum	90 a

Geht man, wie die Autoren der Hochwasserabschätz-Software HQ-EX (WASY 1997), davon aus, dass eine Extrapolation bis zum 2- bis 3-fachen der Messreihenlänge noch vertretbar ist, steht die mittlere Messreihenlänge mit 33.4 Jahren recht gut da (Extrapolationen bis zu einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren möglich). Tabelle 2.2 zeigt aber auch, dass mit 47 zu kurzen Messreihen (kürzer als 30 Jahre) Referenzwerte (HQ_{100}) berechnet werden. Diese Tatsache führt dazu, dass nebst Vergleichen mit Referenzwerten für HQ_{100} auch Vergleiche mit Referenzwerten für HQ_{20} gemacht werden.

Eine Station, die über ein stabiles Gerinne verfügt, bei der Eichmessungen im Hochwasserbereich gemacht werden konnten, deren Gewässer kaum anthropogen beeinflusst ist und bei der schon sehr lange gemessen wird, ist die ideale Referenzstation für unsere Untersuchung. Man kann nicht sagen, diese ideale Referenzstation gebe es in der Schweiz nicht. Aber wenn nur ideale Stationen für die Analysen verwendet würden, könnte man wegen einer zu kleinen Stichprobe überhaupt keine Aussagen bezüglich Güte und Gültigkeit machen. Es ist nötig, Kompromisse einzugehen. Spreafico und Stadler (1986 und 1988) und Spreafico und Aschwanden (1991) haben in insgesamt vier Mitteilungen der LHG Resultate aus umfangreichen Untersuchungen zu Messreihen des Bundes, der Kantone und von Hochschulen publiziert. Die Messreihen wurden auf Homogenität hin untersucht und die Messstelle bezüglich Gerinnestabilität beurteilt, so dass man zu den Punkten *stabiles Gerinne* und *Beeinflussungsgrad* gute Vorstellungen hat. Die grössten Kompromisse ergeben sich bei der Länge der Messreihe und den Eichmessungen bei Hochwasser. Damit ist gemeint, dass Referenzwerte aus Messreihen gewonnen werden, die zwar homogen sind und von Stationen mit stabilem Gerinnebett stammen, in vielen Fällen aber nur über Eichmessungen bei Mittelwasser verfügen und kürzer sind, als man sich das für die Abschätzung eines HQ_{100} wünschen würde.

Die hier getroffene Auswahl der Referenzgebiete lehnt sich sehr stark an Düster (1994), der sich am Geografischen Institut der Universität Bern intensiv mit Hochwassermodellierung beschäftigte und die Untersuchungen an 88 schweizerischen Einzugsgebieten durchgeführt hat. Seine Messreihen wurden bis 1996 aktualisiert und mit Daten von Einzugsgebieten mit einer Fläche zwischen 200 und 500 km^2 ergänzt. Tabelle 2.3 zeigt die Verteilung der Flächen und Abbildung 2.1 die Lage der Referenzgebiete.

Tabelle 2.3: Einzugsgebietsfläche der Testgebiete.

Flächen-Bereich Fn [km^2]	**Anzahl EG**
10 < Fn ≤ 20	16
20 < Fn ≤ 50	28
50 < Fn ≤ 100	26
100 < Fn ≤ 150	13
150 < Fn ≤ 200	4
200 < Fn ≤ 500	8

stat. Masszahlen	
Mittel	**86.2 km^2**
Minimum	9.9 km^2
Maximum	478.5 km^2

Die Verteilung der Einzugsgebiete im Raum lässt erahnen, welche Probleme beim Vergleich der Resultate auftreten können. Beim ersten Blick auf die Karte glaubt man, eine recht gleichmässige Verteilung der Gebiete zu erkennen. Doch bei genau-

erer Betrachtung sieht man einerseits ziemlich grosse Lücken (z.B. Wallis) und andererseits Klumpen mit vielen aneinandergrenzenden Einzugsgebieten (z.B. Baselbiet). Die Informationsdichte schwankt also räumlich stark, und es wird schwierig sein, allgemeingültige, flächendeckende Aussagen zur Modellgüte machen zu können. Wieso gibt es diese Lücken? Dafür ist das Auswahlkriterium *kleiner Beeinflussungsgrad* verantwortlich. Eine Karte von Margot et al. (1992) im Hydrologischen Atlas der Schweiz zeigt eindrücklich, wie gross die Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke im Wallis ist. Wegen dieser starken Beeinflussung ist es praktisch unmöglich, dort für die Untersuchung geeignete Einzugsgebiete zu finden. Und wieso gibt es Klumpen? Werden zusätzlich zu den LHG-Stationen noch kantonale und private Stationen in die Untersuchung einbezogen (nicht alle Kantone verfügen über eigene Messnetze), kann es zu regionalen Konzentrationen kommen.

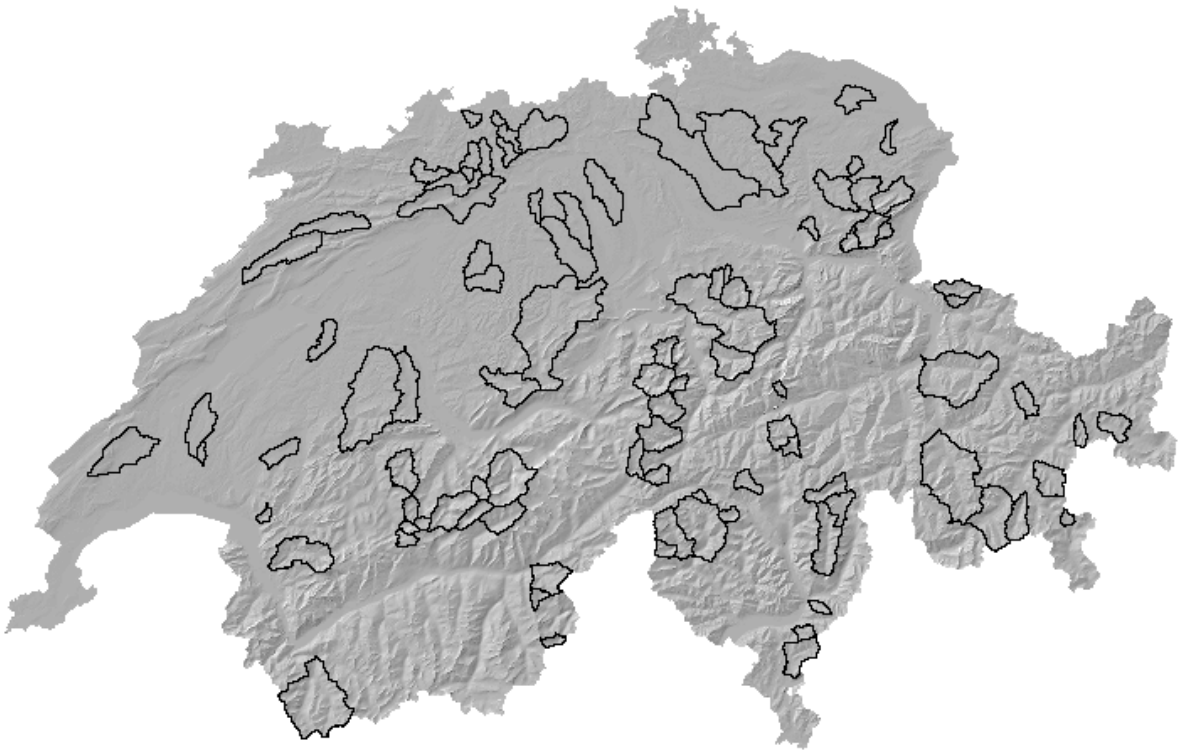


Abbildung 2.1: Lage der Referenzgebiete.

Die grossen Unterschiede bei der räumlichen Informationsdichte können nur ausgeglichen werden, indem in dichteren Zonen gute Stationen weggelassen werden (das würde zu einer zu kleinen Stichprobe führen) oder indem in weniger dichten Zonen unzuverlässigere Stationen in die Analysen aufgenommen werden (das würde zu unsicheren Resultaten führen). Beide Vorgehen scheinen nicht optimal zu sein, und es wird auf das eine wie auf das andere verzichtet. Wo bei dieser Gratwanderung das Optimum liegt, ist eine sehr theoretische Frage, der hier nicht weiter nachgegangen wird.

2.2 Berechnung der Referenzwerte mit Extremwertstatistik

Die Bestimmung von Bemessungsgrössen aus langen Messreihen mit den Mitteln der Extremwertstatistik ist eine umstrittene Angelegenheit (siehe dazu Klemes 2000 oder Kirnbauer 1981). Allein die Tatsache, dass die Empfehlungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (1979), die auch in der Schweiz weit verbreitet sind und häufig angewandt werden, erst vor wenigen Monaten ersetzt und den heutigen Möglichkeiten der Datenverarbeitung angepasst wurden, zeigt den Grad der Verunsicherung bei Expertinnen und Experten. Für Anwenderinnen und Anwender ist es wichtig zu wissen, welche Methoden sie im konkreten Fall einsetzen sollen. Und so wie die offizielle Entwicklung heute läuft, wird diese Forderung aus der Praxis (objektive Entscheidungskriterien bei der Methodenwahl) leider nicht erfüllt.

Für die vorgestellte Arbeit stehen drei Möglichkeiten für die Bestimmung der Referenzwerte im Vordergrund:

a) Bei den DVWK-Empfehlungen des Jahres 1979 ist klar ersichtlich, welche Verteilungsfunktion (VF) gewählt werden soll, um die HQ_x-Werte aus der langen Messreihe zu extrapolieren (Abbildung 2.2).

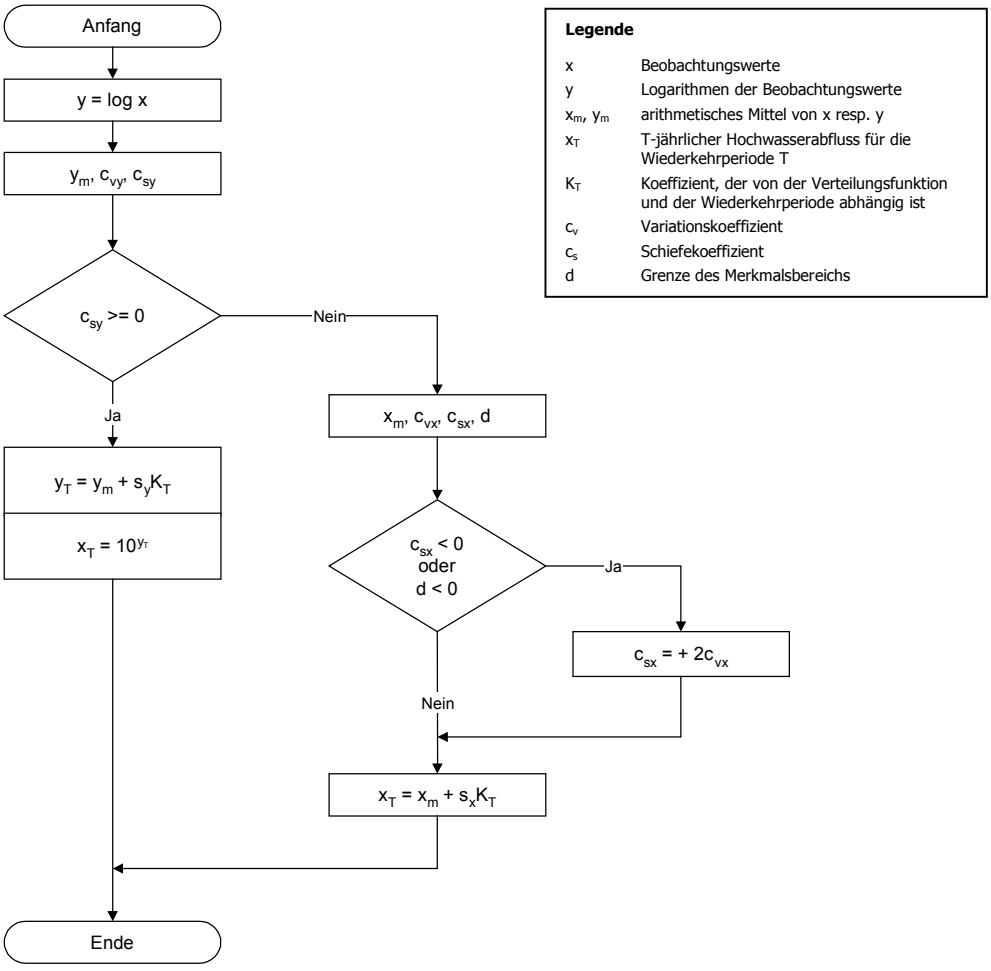


Abbildung 2.2: Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. DVWK (1979).

Je nach Schiefe und Lage des Fusspunktes der empirischen Verteilung kommen die VF *Pearson III, log-Pearson III* oder *Gamma* in Frage. Die Vorteile dieses Vorgehens liegen bei den objektiven Kriterien, welche zur Wahl der VF führen, und bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Der Nachteil besteht darin, dass es möglicherweise eine bessere Anpassung an die Daten geben würde und man damit bessere Abschätzungen für die gesuchte Bemessungsgrösse erhalten könnte. Nur: *Die beste VF* gibt es nicht. Die bekannten statistischen Tests sind so unscharf, dass nur selten eine VF als unpassend abgelehnt wird.

b) Bei den neuen Empfehlungen des DVWK (1999) und der darauf basierenden Hochwasserabschätz-Software HQ-EX (WASY 1997) hat man den Weg über die Präsentation von mehreren möglichen VF gewählt. Weil heute die Anpassung einer VF an eine Messreihe keinen Berechnungsaufwand mehr darstellt, wird eine ganze Palette von Lösungen vorgeschlagen (Abbildung 2.3), und die Anwenderin und der Anwender müssen anhand von subjektiven Anpassungsmassen entscheiden, welche sie auswählen. HQ-EX liefert 18 Möglichkeiten (7 VF mit drei Parameter-Schätzmethoden; MM: Momentenmethode, MLM: Maximum-Likelihood, WGM: wahrscheinlichkeitsgewichtete Momente; siehe Abbildung 2.3, Kästchen *Auswahl*).

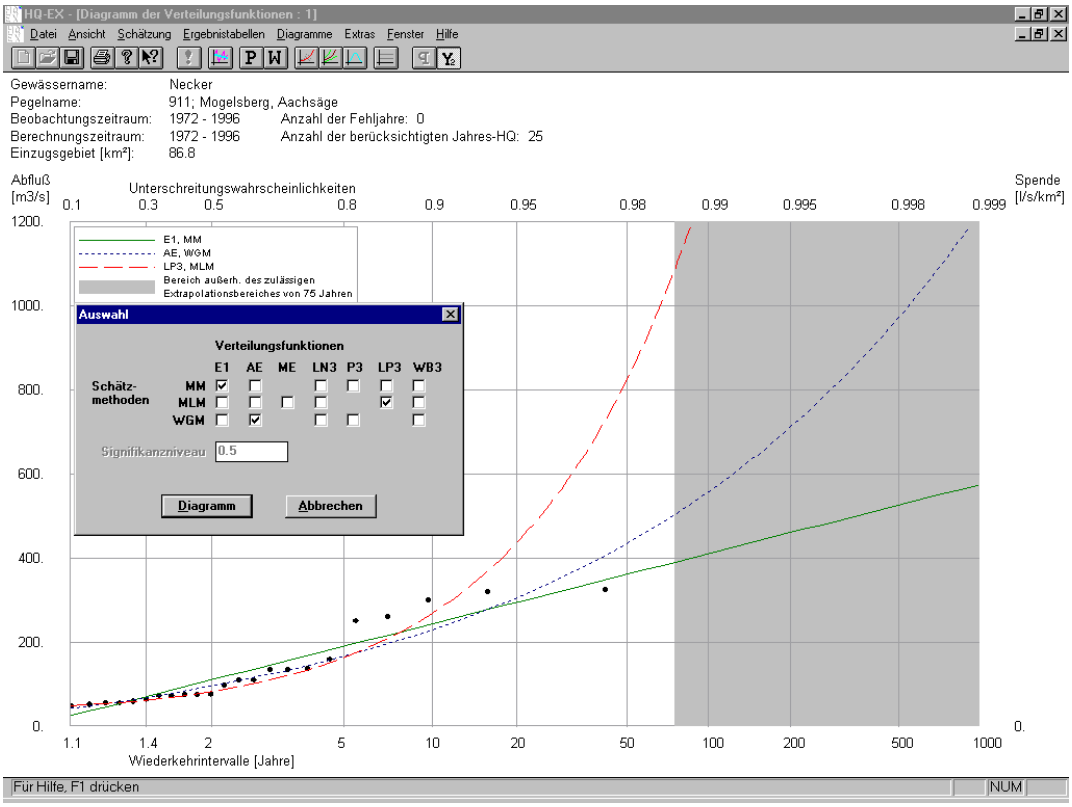


Abbildung 2.3: Auswahl der Verteilungsfunktionen in HQ-EX.

Viele Anwenderinnen und Anwender schätzen zu grosse Freiheiten nicht und lassen sich durch die grosse Auswahl verunsichern. Mit der gleichen Messreihe sind beinahe beliebige Ergebnisse konstruierbar, die Methode erhält damit eine sehr grosse subjektive Komponente. Die Anpassungen lassen sich jedoch rasch visuell überprüfen; das ist ein Vorteil dieser Möglichkeit.

c) Anlässlich eines Kurses mit Prof. Hüsler vom Institut für math. Statistik und Versicherungslehre der Universität Bern wurde ein sehr attraktiver und moderner Lösungsansatz für das geschilderte Problem präsentiert. Nach Hüsler (2000) hat man sich in den letzten zehn Jahren in den internationalen Extremwertstatistikkreisen darauf geeinigt, anstelle der beschriebenen grossen Auswahl von Verteilungsfunktionen nur noch eine einzige, allgemeingültige anzuwenden. Es wird eine VF gewählt, die eine Verallgemeinerung der Extremwertverteilungen Typ I bis III darstellt und beim DVWK unter dem Namen *Allgemeine Extremwertverteilung* (AE) aufgeführt wird. Da die Handhabung von drei verschiedenen Verteilungen nicht praktisch ist, wird eine Parametrisierung verwendet, die alle drei Typen verbindet (Bogner und Mader 1999). Man braucht sich nicht mehr um den Wertebereich der Daten zu kümmern. Es wird nur noch eine Funktion verwendet, die sich an die gegebenen Verhältnisse anpasst.

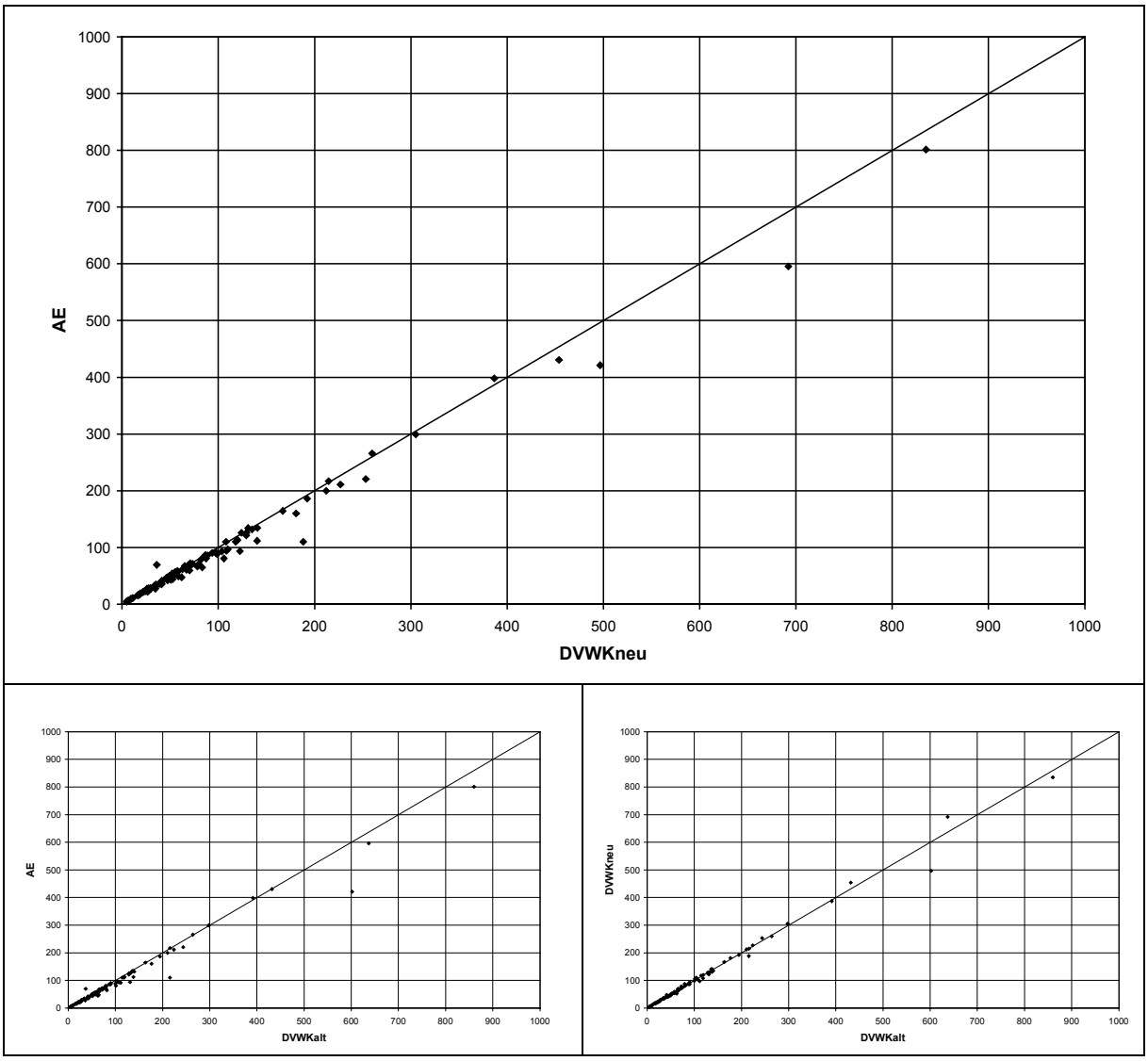


Abbildung 2.4: Gegenüberstellung möglicher Referenzwerte für ein HQ_{100} [m^3/s].
o: DVWKneu gegen AE.
ul: DVWKalt gegen AE. ur: DVWKalt gegen DVWKneu
(DVWKalt = DVWK 1979; DVWKneu = DVWK 1999)

Ein Vergleich der drei beschriebenen Verfahren (DVWK 1979, DVWK 1999 und AE) hat gezeigt, dass die Referenzwerte mit AE berechnet (mit Momenten-Methode) ähnliche Ergebnisse liefern wie ein Mittelwert aus den drei VF mit den so genannt besten Anpassungen der neuen DVWK-Richtlinien. Die Unterschiede zwischen den drei Verfahren sind ziemlich klein (Abbildung 2.4).

Viel entscheidender als die Wahl der VF ist die Methode zur Bestimmung der Parameter der VF, also ob die Momenten-Methode, die Maximum-Likelihood-Methode oder die Methode mit den wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten gewählt wird. In Abbildung 2.5 ist ein Beispiel aufgeführt, bei dem dreimal die AE, aber mit unterschiedlichen Parameter-Schätzmethoden (MM, MLM und WGM) angepasst wird.

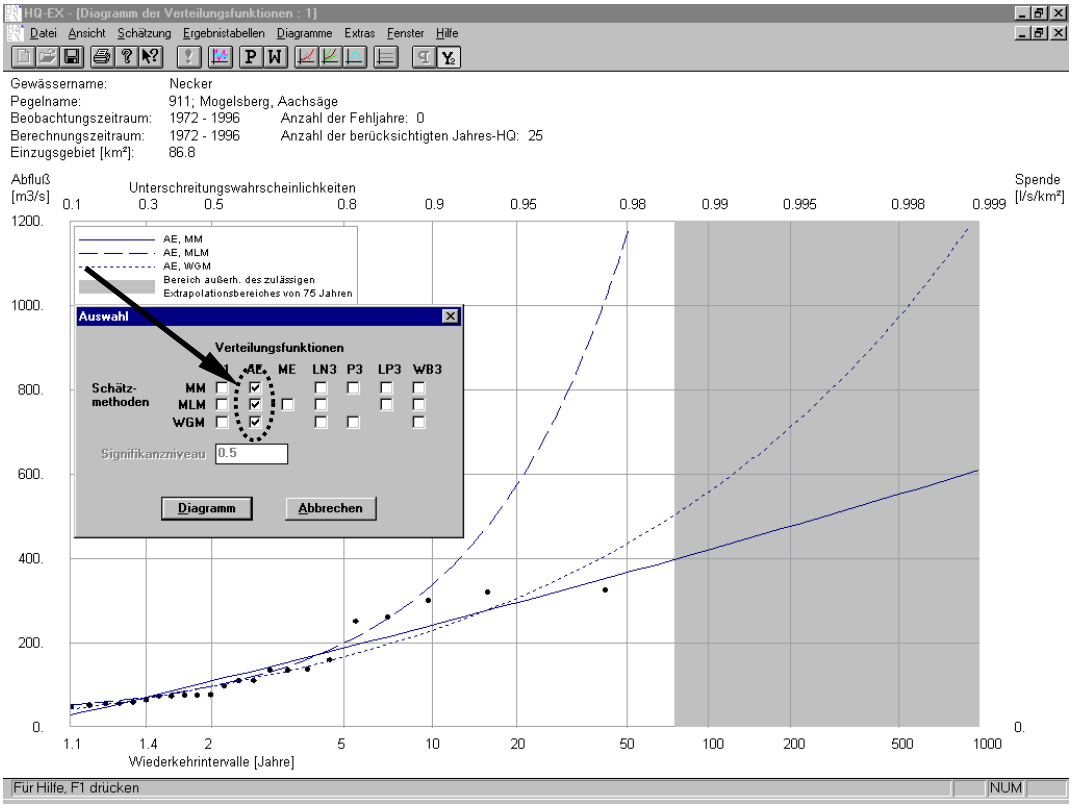


Abbildung 2.5: Einfluss der Parameter-Schätzmethode.

Es handelt sich im Beispiel wiederum um die Station Necker, Mogelsberg (wie in Abbildung 2.3). Ein Vergleich der Abbildungen zeigt, dass bei dieser Station die Wahl der Parameter-Schätzmethode das Resultat ebenso stark beeinflussen kann wie die Wahl der Verteilungsfunktion.

Die Datenreihe, wie sie in Abbildung 2.5 aufgetragen ist, ist typisch für einen Teil der Stationen, bei denen es je nach Parameter-Schätzmethode grosse Unterschiede geben kann (zu diesen Stationen gehört auch die Langeten, das Einzugsgebiet im Fallbeispiel in Kapitel 5.2.2). Es scheint, dass hier zwei unterschiedliche Hochwassertypen (nicht die gleiche Art der Entstehung) im Spiel sind. Mit Maximum-Likelihood gibt es eine perfekte Anpassung an die tieferen Werte, während die grössten Abflüsse (Wiederkehrintervalle > 20 Jahre) massiv überschätzt werden. Die Momenten-Metho-

de führt nicht zu einer besonders guten Anpassung, sie liefert aber plausible Werte im Bereich der grossen Wiederkehrintervalle. Es gibt in diesen Fällen keinen objektiven Grund, nicht MM als Schätzmethode zu verwenden.

Empfohlenes Vorgehen für die Bestimmung von Referenzwerten: • Allgemeine Extremwertverteilung (und Momenten-Methode als Parameter-Schätzmethode) an die Messwerte anpassen. • Das Resultat in einer Grafik darstellen. • Bei grossen Unterschieden zwischen den Messwerten und der angepassten Verteilungsfunktion im Bereich der gewünschten Wiederkehrperiode auch noch die Allgemeine Extremwertverteilung mit den anderen Parameter-Schätzmethoden (MLM und WGM) grafisch darstellen. • Wenn die Anpassung dadurch entscheidend besser wird, soll die entsprechende Kombination gewählt werden.

Fazit aus Kapitel 2

Wo liegt der Vorteil der vorgestellten Strategie? Wenn man nach den neuen Empfehlungen des DVWK (1999) ein HQ_x abschätzt (Abschnitt b), hat man unter vielen Verteilungsfunktionen (und kombiniert mit bis zu drei Parameter-Schätzmethoden) auszuwählen. Bei so vielen Freiheiten werden die Anwender unsicher.

Folgt man der neuen Strategie (Abschnitt c), wählt man grundsätzlich die Allgemeine Extremwertverteilung mit der Momenten-Methode (AE/MM) und weicht nur auf Alternativen (AE mit der Parameter-Schätzmethode MLM oder WGM) aus, wenn die alternative Anpassung entscheidende Verbesserungen bringt. Die Auswahl ist somit nahezu objektiv und sehr leicht durchführbar.

Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise liegt bei der Vergleichbarkeit von Resultaten. Wird immer mit der gleichen Verteilungsfunktion und der gleichen Parameter-Schätzmethode ein HQ_x bestimmt, lassen sich Ergebnisse aus verschiedenen Einzugsgebieten besser miteinander vergleichen.

Dieser Untersuchung liegen Referenzwerte zugrunde, die mit der Allgemeinen Extremwertverteilung und der Momenten-Methode für die Parameterschätzung bestimmt wurden.

3 Die Hochwasser-Abschätzmodelle

In den letzten Jahren hat sich im Umfeld des Hochwasserschutzes einiges getan. Da wären die enormen Fortschritte zu nennen, die sich nicht zuletzt wegen der rasanten Entwicklung der Datenverarbeitung und des Aufkommens der Geografischen Informationssysteme auch bei den Hochwasserabschätzungen niedergeschlagen haben. Es kommen heute flächendeckende Datensätze zum Einsatz, die vor wenigen Jahren noch gar nicht existierten oder die nicht innert nützlicher Frist erhoben werden konnten. Einerseits wurden alte Verfahren mit den neuen methodischen Möglichkeiten in Verbindung gebracht und andererseits sind moderne Modelle mit zeitgemässen Ansätzen entstanden.

Erwähnenswert sind aber auch die Neuerungen, die das neue Wasserbaugesetz gebracht hat, das seit dem 1. Januar 1993 in Kraft ist. Es wird nun eine Differenzierung der Schutzziele angestrebt. Das heisst, dass der Ausbaugrad entsprechend den zu schützenden Werten bestimmt wird. Vom generellen Ausbau auf ein Jahrhunderthochwasser hat man sich verabschiedet. Damit sind auch die Anforderungen an die Hochwasser-Abschätzmodelle gestiegen.

Man könnte annehmen, bei dieser rasanten Entwicklung seien die alten und zum Teil sehr einfachen Modelle von der Bildfläche verschwunden. Das ist aber nicht passiert. Ein historischer Rückblick zeigt die Gründe für das erstaunlich grosse Beharrungsvermögen der alten Verfahren.

Solange die vermeintlich genaueren Verfahren nicht zugleich auch effizient einsetzbar und anwenderfreundlich sind, haben sie in der Praxis keine Überlebenschance.

3.1 Hochwasserabschätzung – erste Versuche im 19. Jahrhundert

Ein Blick in die Vergangenheit auf die ersten Versuche der Hochwasserabschätzung erhöht für die Leserinnen und Leser dieser Arbeit möglicherweise das Verständnis für das Vorgehen bei der Modellwahl (Kapitel 3.2).

Die Anfänge hydrologischer Forschung sind sehr eng mit dem Wasserkreislauf verknüpft. Schon 3100 v. Chr. wurden am Nil Wasserstandsbeobachtungen gemacht (Borchardt 1906), und die ältesten bekannten Niederschlagsmessungen wurden in China bereits seit rund 1000 v. Chr. durchgeführt (Nace 1974). Aber erste, wenn noch sehr beschränkte Vorstellungen zum Wasserkreislauf wurden erst von den griechischen Philosophen skizziert (Lang 1992). Während der Renaissance kam es zu einem markanten Wechsel von reinen philosophischen Konzepten der Hydrologie hin zu beobachtender Wissenschaft (Chow et al. 1988). In diesem Zusammenhang ist Leonardo da Vinci (1452-1519) zu erwähnen, der die ersten systematischen Untersuchungen zu den Strömungsverteilungen in Flüssen unternahm. Im 15. und 16. Jahrhundert gelangten Wissenschaftler über gezielte Messungen der Wasserhaushaltskomponenten zu richtigen Vorstellungen über den Wasserkreislauf. Mit der Weiterentwicklung der Messtechnik ab dem 18./19. Jahrhundert und den mathematischen Formulierungen für die Wasserflüsse in Fliessgewässern[1] und im Grundwasserbereich

1 Einen bedeutenden Beitrag zur Erfassung der Reibungsverluste in Kanälen und Flüssen leisteten Wilhelm Kutter (1818-1888) und Oscar Ganguillet (1818-1894), welche sich beide im Dienste des Bauamtes des Kantons Bern mit dem Projekt der Juragewässerkorrektion befassten (Schnitter 1992).

war die Hydrologie an die Schwelle zu einem eigenen Wissensgebiet gelangt (Lang 1992). Noch bis weit ins 19. Jahrhundert hinein kam man jedoch – selbst an Stellen wo Niederschlag und Abfluss gemessen wurden – nicht auf die Idee, die beiden Komponenten des Wasserkreislaufs in einen quantitativen Zusammenhang zu stellen.

Der Anfang der Hochwasserabschätzung kann nach Dooge (1957) und Biswas (1970) in die Periode 1842 bis 1847 gesetzt werden, als irische Ingenieure um Thomas Mulvaney (1822-1892) erstmals eine Methode zur Abschätzung von Hochwasserspitzen präsentierten. Die Methode gehört zum sogenannten Typ *Rational Formula*, bei dem eine Niederschlagsintensität (die von der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes und der Wiederkehrperiode des zu bestimmenden Abflusses abhängt) mit einem Abflusskoeffizienten und der Einzugsgebietsfläche multipliziert wird.

Die Formel nach Mulvaney (wegen Einheiten nicht übersetzt) lautet:

$$\mathbf{Q = 2.52 \cdot C \cdot I \cdot A}$$

with Q design discharge in cub. ft. per min.
C run-off factor [0.4 for flat ground, 0.6 for steep ground]
I maximum rainfall rate [1.5 to 2 in. per day]
A catchment area in acres

Es ist Mulvaneys Verdienst, das Konzept der Konzentrationszeit, wie es in der Rational Formula angewandt wird, erstmals richtig erfasst und korrekt formuliert zu haben (Mulvaney 1851-1852):

> The first matter of importance to be ascertained in the case of a small or mountainy catchment, is *the time* which a flood requires to attain to its maximum height, during the continuance of a *uniform rate of fall* of rain. This may be assumed to be the time necessary for the rain which falls on the most remote portion of the catchment, to travel to the outlet, for it appears to me that the discharge must be greatest when the supply from every portion of the catchment arrives simultaneously at the point of discharge, supposing, as above promised, the *rate* of supply to continue constant, and this length of time being ascertained, we may assume that the discharge will be the *greatest possible*, under the circumstance of a fall of rain occurring, of the *maximum* uniform rate of fall for that time ... This question of time, as regards any catchment, must depend chiefly on the extent, form, and rate of inclination of its surface; and therefore, one great object for investigation is the relation between these causes and their effect; so that, having ascertained the extent, form and average inclination of any catchment, we may be able to determine, in the first place, the *duration of constant rain* required to produce a maximum discharge, and consequently to fix upon the *maximum rate* of rain-fall applicable to the case.

Unzählige Autoren haben Lösungen präsentiert, wie der Abflusskoeffizient *C* und die Konzentrationszeit, die der Berechnung der Niederschlagsintensität *I* zugrunde liegt, bestimmt werden können. Naef (1993), der vorschlägt, den Abflusskoeffizienten als Zufallszahl mit vorgegebener Verteilung zu behandeln, sowie Rickli und Forster (1997), die *C* aus Standorteigenschaften ableiten, zeigen stellvertretend das weite Spektrum der verwendeten Ansätze. Eine Übersicht über Formeln zur Ermittlung der Konzentrationszeit findet man in Chow et al. (1988).

Ein ganz anderer Ansatz wurde um 1880, rund 30 Jahre nach Mulvaney, präsentiert. Mit sogenannten Hüllkurven um das gesamte Datenkollektiv (oder je nach Gebietscharakteristik um Teile des Datenkollektivs) wird ein Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche und den maximalen Hochwasserspitzen hergestellt (siehe dazu das Beispiel von Heusser (1947) in Abbildung 3.1). Gemäss Byczkowski (1999) gehö-

ren die *Systeme empirischer Formeln* zur Berechnung der charakteristischen Abflüsse in Fliessgewässern von Lauterburg (1876, 1887)[2] und Iszowski (1886) weltweit zu den ersten ihrer Art. Die Aufstellung der Formeln geschah in der Zeit der Gründung von hydrographischen Diensten in vielen europäischen Ländern. Aus diesem Grund umfassten die Beobachtungsreihen noch keine längeren Zeiträume (Byczkowski 1999).

Der Aufbau dieser Formel-Familie sieht folgendermassen aus:

$$\mathbf{Q_{max} = a \cdot F^b}$$

mit a gebietsabhängiger Faktor
F Einzugsgebietsfläche
b Exponent (konstant)

Der Faktor *a* (bei Heusser *c*) ist bei vielen Autoren gebietsabhängig und wird mehr oder weniger kompliziert ermittelt. Bei besonders einfachen Formeln wie bei Melli (1924) ist auch *a* konstant und somit die maximale Hochwasserspitze bloss eine Funktion der Einzugsgebietsfläche.

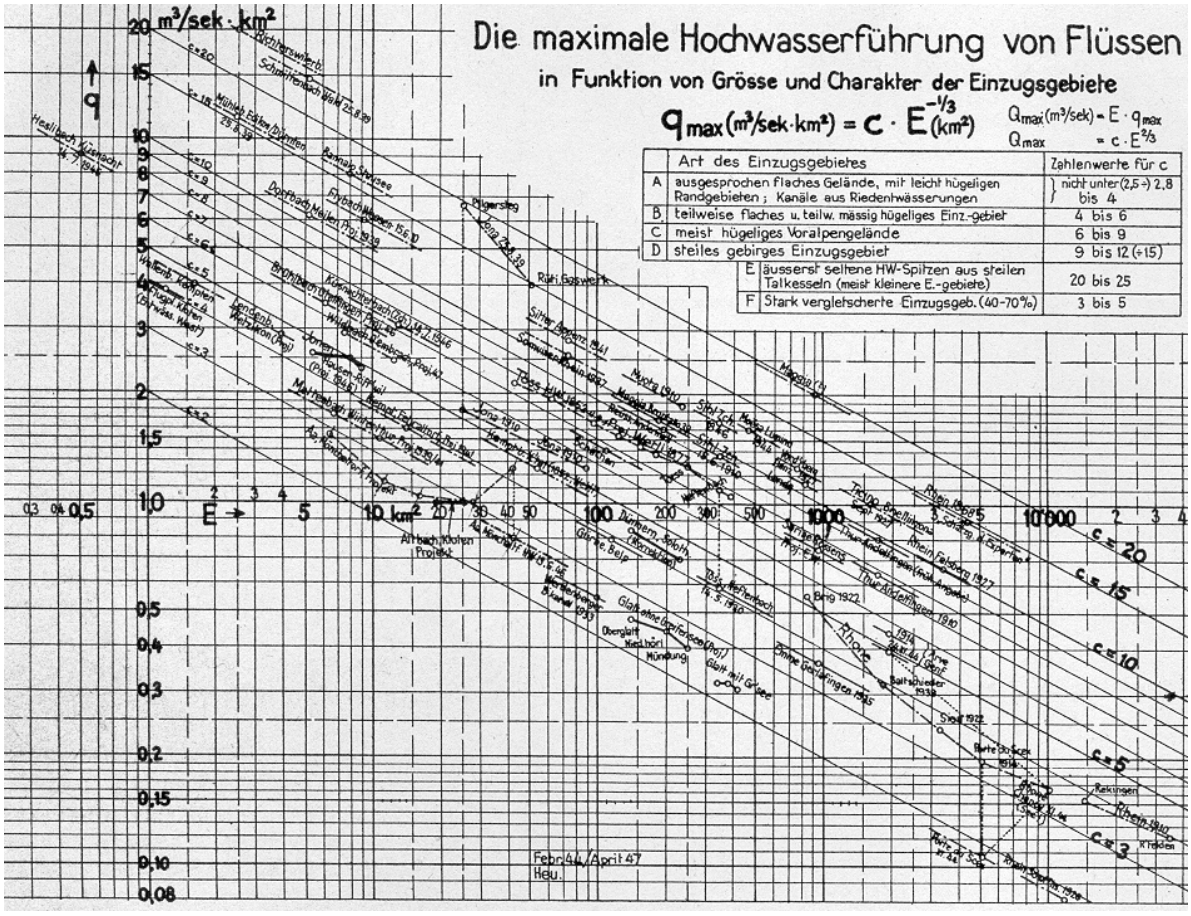


Abbildung 3.1: Hüllkurven und Hochwasser-Formeln nach Heusser (1947) für verschiedene Flussgebiete der Schweiz.

2 Robert Lauterburg war der erste Leiter des Eidgenössischen Hydrometrischen Zentralbüros, das 1866 von der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft geschaffen und 1872 dem Eidgenössischen Oberbauinspektorat unterstellt wurde. Dort legte er den Grundstein zu jenem Dienst, den heute die Landeshydrologie und -geologie leistet (Vischer 1988).

Bei der Lektüre des nächsten Kapitels wird man sich unweigerlich die Frage stellen, wieso derart alte, zum Teil über hundertjährige Methoden zur Hochwasserabschätzung in der Praxis immer noch eine grosse Bedeutung haben können. Das hat viel mit der Rolle der Hydrologie als Wissenschaft zu tun und deshalb soll die Anwort auf die vorweggenommene Frage auch schon hier gegeben werden.

Lang (1992) liefert in seinem Artikel eine einleuchtende Erklärung: „Weil das Wasser ein entscheidendes Grundelement des Lebens ist, musste sich der Mensch rein pragmatisch von Anfang an damit befassen. Dazu brauchte es keine *Wissenschaft,* sondern vor allem technisches und handwerkliches Können, den Praktiker, Baumeister und Ingenieur. (...) In Grundlagenwissenschaften wie Physik, Chemie, Geologie u. a. wird das Fachgebiet weitgehend auf der Basis von mehr oder weniger zweckfreier Grundlagenforschung weiterentwickelt. Die Ergebnisse der Grundlagenforschung bilden dann die Basis zur Anwendung. Ganz anders in der Hydrologie: Hier steht die existentielle Notwendigkeit der Praxis mit ihren täglichen Problemen unübersehbar im Vordergrund. (...) Dadurch kam sogenannten einfachen, rein empirischen Verfahren eine grosse Bedeutung zu. (...) Die andere Seite der Verbreitung vieler praktikabler Methoden kann nicht übersehen werden: Es hatte zur Folge, dass in weiten Kreisen der Praxis dieses Wissensniveau als genügend erachtet wurde. Eingespielte, einfach zu behandelnde Verfahren werden nicht gerne verlassen."

Ein wichtiger Grund für die Beibehaltung alter Methoden ist der Wunsch nach der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Dieses Argument wurde schon in Kapitel 2.2 bei der Wahl einer Verteilungsfunktion aufgeführt.

3.2 Modellwahl

Die Untersuchungen können nicht alle publizierten Modelle und Verfahren seit Lauterburg und Iszowski miteinbeziehen (die wichtigsten sind in Abbildung 3.2 zusammengestellt). Deshalb musste eine Auswahl getroffen werden. Dabei standen Verfahren im Vordergrund, die auf mesoskalige, 10 bis 200 km^2 grosse Einzugsgebiete zugeschnitten sind.

Ganz am Anfang der Untersuchung stand die Modellwahl, unmittelbar bevor der in Kapitel 1 beschriebene *erste Lösungsweg* beschritten wurde. Dass das Kriterium *Arbeitsaufwand* damals überhaupt genannt wurde, ist vor diesem Hintergrund zu sehen (vgl. untenstehenden *Abschnitt Kriterien der Modellwahl*). Mit dem neuen Softwarepaket hat dieser Punkt seine Bedeutung nun verloren.

Kriterien der Modellwahl

Welche Modelle oder Verfahren zur Hochwasserabschätzung sollen in dieser Studie untersucht werden? Es sind Verfahren, die

a) entweder in der Praxis eine grosse Verbreitung gefunden haben oder aber

b) sehr aktuell sind (Entwicklung in den letzten Jahren) und die

c) bei der Anwendung in der Praxis keinen grossen Arbeitsaufwand erfordern (mehr als ein bis zwei Tage, vgl. Abbildung 3.2).

a) Verbreitung in der Praxis: Von den unzähligen Modellen, die in den letzten gut 100 Jahren entwickelt wurden, haben etwa ein Dutzend einen gewissen Bekanntheitsgrad erlangt (Tabelle 3.1). Wie Interviews mit Anwenderinnen und Anwendern aus mehreren Tiefbauämtern und Ingenieurbüros ergeben haben, werden fünf davon heute in der schweizerischen Bemessungspraxis regelmässig eingesetzt (in Tabelle 3.1 grau unterlegt).

Tabelle 3.1: Hochwasser-Abschätzverfahren mit einem gewissen Bekanntheitsgrad und ihr Erscheinungsjahr. Grau unterlegt: die in den Interviews am häufigsten genannten Verfahren; sie werden in Kapitel 3.3 ausführlich beschrieben.

Iszkowski	1886
Lauterburg	1887
Hofbauer	1916
Kürsteiner (Heusser 1947)	1917
Melli	1924
Müller	1943
Kreps	1952
Rational Formula (viele Autoren)	
Widmoser	1974
Bruschin und North	1977
Sydler, Widmoser und Zollinger	1982
VAW 86	1986
Kölla	1986

Diese in der Praxis verbreiteten Modelle müssen bei unseren Analysen mitberücksichtigt werden. Nur so wird man beurteilen können, ob die neuesten, weiter unten vorgestellten Modellentwicklungen wirkliche Verbesserungen erbringen können. Ingenieure sind eher bereit, neue Verfahren zu akzeptieren und anzuwenden, wenn diese mit den eingespielten Modellen verglichen werden können.

Die übrigen Verfahren wurden in den Interviews nur noch vereinzelt erwähnt. Sie sind für die Praxis und damit auch für unsere Analysen von untergeordneter Bedeutung.

b) Aktualität: In den letzten Jahren wurden in der Schweiz mehrere Hochwasser-Abschätzverfahren entwickelt, die nicht nur ein bestimmtes HQ_x als Zielgrösse haben, sondern – im Sinne eines differenzierten Hochwasserschutzes – Bemessungsgrössen beliebiger Jährlichkeit liefern.

Tabelle 3.2: Aktuelle Hochwasser-Abschätzverfahren, Übersicht. In Kapitel 3.3 werden diese Verfahren (ohne Regression) ausführlich beschrieben.

Modell	**Autor / Autorin**
Kölla	Kölla (1986)
Kölla mod.	Manser (1997)
Momente	Düster (1994)
Regression	Düster (1994)
Fuzzy	Düster (1994)
GIUB'96	Weingartner (1998)

Die Anwendung des Modells *Regression* ist mit einem relativ grossen Aufwand verbunden, der sich aus der Bereitstellung prozessorientierter Gebietskenngrössen (vgl. Düster 1994) und dem damit verbundenen GIS-Einsatz ergibt. Dieser Aufwand scheint angesichts der zu erwartenden Güte der Ergebnisse nicht gerechtfertigt zu sein (vgl. Weingartner und Manser 1997).

Das Modell *Kölla* wurde bereits unter dem Aspekt *Verbreitung in der Praxis* aufgeführt. Da es sich um ein neueres Modell handelt, muss es auch hier wieder erwähnt werden. Es fand nicht zuletzt dank Kursen, die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) durchgeführt wurden, eine rasche Verbreitung.

c) Arbeitsaufwand: Der Arbeitsaufwand, der bei der Anwendung eines Modells entsteht, ist nicht immer einfach abzuschätzen. Bei ein paar Modellen hängt er stark von der Routine und der Infrastruktur der Anwenderinnen und Anwender ab; so können beispielsweise beim Verfahren von Kölla (1986) Parameter wie die Gerinnelänge mühsam *von Hand* aus der Karte bestimmt oder sehr rasch mit einem Geografischen Informationssystem (GIS) ermittelt werden.

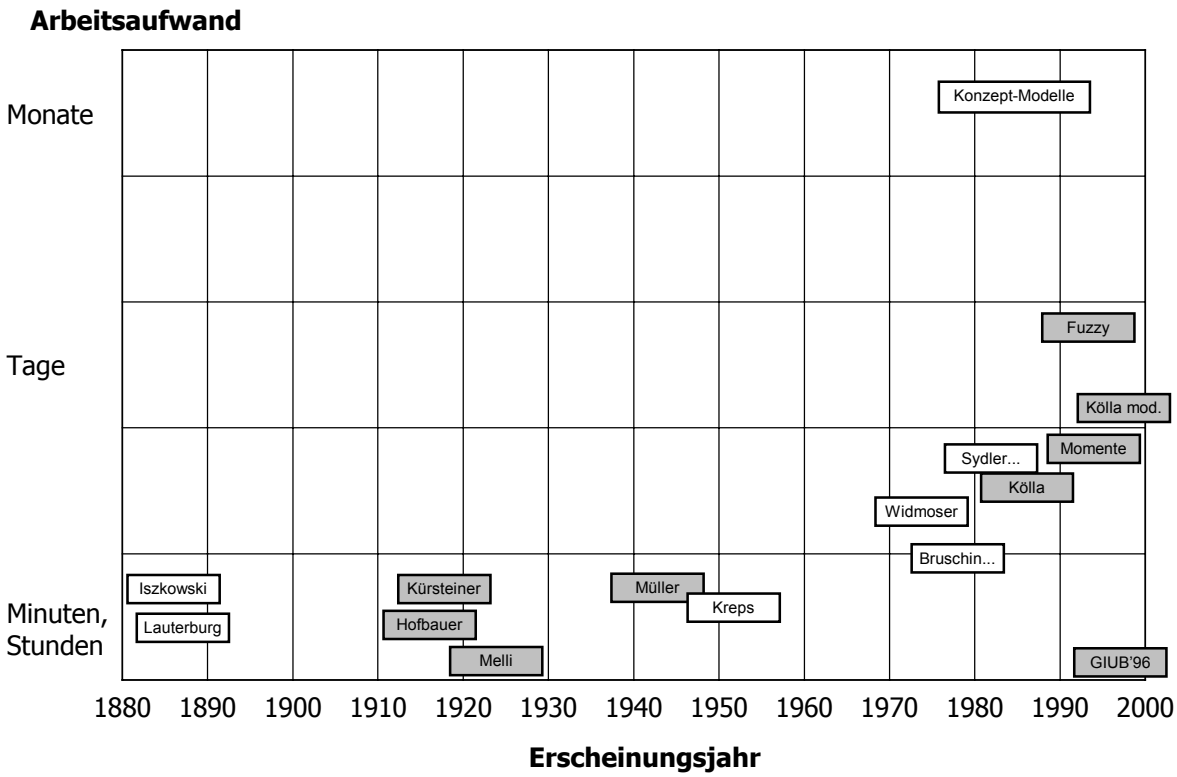


Abbildung 3.2: Erscheinungsjahr und Arbeitsaufwand bei Hochwasser-Abschätzverfahren: Der Arbeitsaufwand bezieht sich auf eine manuelle Berechnung, ohne das später vorgestellte Computer-Programm HQx_meso_CH.

Es besteht aber auch bei den empirischen Modellen ein grosser Unterschied, ob sie traditionell angewendet werden oder ob mit zeitgemässen Mitteln aufbereitete Daten zur Verfügung stehen. So können die Beiwerte (c-Werte) des Verfahrens von Kürsteiner (1917) bzw. Heusser (1947) aus Karten abgeschätzt werden, oder aber sie könnten einmal berechnet und in einer *c-Wert-Karte* dargestellt werden.

In Abbildung 3.2 wird das Erscheinungsjahr dem Arbeitsaufwand, der für die Modellanwendung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet benötigt wird, gegenübergestellt. Nach den eben gemachten Ausführungen ist klar, dass es sich bei der Bezifferung des Arbeitsaufwandes nur um Schätzungen handelt. Die Abbildung zeigt, dass die älteren Verfahren in der Regel eines sehr kleinen Aufwands bedürfen. Dies ist sicherlich ein wesentlicher Grund dafür, dass sie auch heute noch derart verbreitet sind. Gefragt sind nach wie vor einfache, eingespielte Verfahren, die mit geringem Zeitaufwand zu einer Abschätzung hydrologischer Grössen in Einzugsgebieten führen, die über keine oder nur wenige Messdaten verfügen (auf dieses Problem wurde in Kapitel 3.1 schon hingewiesen). Erst in neuerer Zeit wurden die Verfahren etwas komplexer, wie die Abbildung 3.2 anhand des zunehmenden Arbeitsaufwandes bei der Modellanwendung verdeutlicht. Als neues Arbeitsinstrument werden nun auch GIS mit den entsprechenden digitalen Datensätzen eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit der Hochwasserabschätzung besteht in der Simulation des Wasserkreislaufs mit Konzeptmodellen (Grey-Box-Modelle, vgl. Abbildung 1.1). Der Arbeitsaufwand für die Praxis ist aber derart gross (mehrere Wochen für ein einzel-

nes Einzugsgebiet), dass diese Variante hier bei den vergleichenden Analysen nicht zur Diskussion steht. Sie kommt aber in Kapitel 5 ausführlich zur Sprache. Es wird dort untersucht, unter welchen Umständen ein Niederschlag-Abfluss-Modell ein geeignetes Mittel bei der Hochwasserabschätzung sein kann und ob eine wesentliche Verbesserung der Abschätzgenauigkeit erreicht wird. Damit verbunden ist die Frage, ob sich der beträchtliche Mehraufwand in Einzelfällen lohnt.

Fazit aus Kapitel 3.2

Die folgenden Verfahren werden in die Analysen miteinbezogen. Sie sind in Abbildung 3.2 grau unterlegt:

- Modelle, die sich in der Praxis durchgesetzt haben: Kölla, Kürsteiner, Müller, Hofbauer, Melli.
- Modelle, die weniger als 15 Jahre alt sind und keinen allzu grossen Arbeitsaufwand auslösen: Kölla mod., GIUB'96, Fuzzy[3], Momente.

Anhang B3 bietet umfassende Übersichten zu den untersuchten Verfahren. Weiterführende Informationen zur Gliederung von Modellen findet man bei Düster (1994) und zu regionalhydrologischen Verfahren bei Weingartner (1999).

3 Das Modell Fuzzy wird im Bericht nicht mehr auftauchen. Bei der Umsetzung gab es Probleme bei der Parametererhebung. An seine Stelle tritt BaD7, ein neues Modell, das sich stark an Fuzzy orientiert, sich aber wegen entscheidender Vereinfachungen doch deutlich von seinem Vorgänger unterscheidet. Mehr dazu in Kapitel 3.3.9.

3.3 Beschreibung der Modelle

Die für die Untersuchungen ausgewählten Modelle werden in diesem Kapitel einzeln vorgestellt. Ein Vergleich und eine Beurteilung der Modelle folgen anschliessend in Kapitel 3.4. Die Beschreibungen der Modelle orientieren sich an den Originalarbeiten. Wegen der grossen Anzahl von Einzugsgebieten mussten für die Analysen die Modellparameter automatisch erhoben werden. Das ist bei den neueren Modellen unproblematisch, da die Modellentwicklungen auf digitalen Datensätzen basieren. Es kann bei älteren Modellen aber Schwierigkeiten geben, wenn die Modellparameter den heute verfügbaren räumlichen Daten angepasst werden müssen. Ein gutes Beispiel für diesen zweiten Fall ist das Modell Müller-Zeller, das in Kapitel 3.2.4 beschrieben wird.

Zu jedem Modell werden in vier Rubriken Angaben zur Herkunft und zum Aufbau, zu den Anwendungsbereichen und den Erfahrungen, zu den notwendigen Inputdaten und zur Güte der Resultate gemacht.

Beschreibung des Modells: Wer hat das Modell entwickelt? Wie ist es aufgebaut?

Anwendungsbereiche, Erfahrungen: Welches ist die Zielgrösse des Modells (Wiederkehrperiode)? Unter welchen Bedingungen (Einzugsgebietsfläche, naturräumliche Zuordnung) darf das Modell eingesetzt werden? Wenn in dieser Rubrik steht, dass der Autor oder die Autorin keine naturräumlichen Einschränkungen erwähne, heisst das nicht zwingend, dass das Modell überall vernünftige Ergebnisse liefert; es heisst bloss, dass nicht explizit Problemregionen ausgeschieden werden.

Die Zielgrösse muss noch erklärt werden. Die älteren Modelle (Melli, Hofbauer, Kürsteiner und Müller-Zeller), die mit Hüllkurven arbeiten, haben die Zielgrösse Q_{max}. Q_{max} nach Melli entspricht aber nicht Q_{max} nach Hofbauer, Kürsteiner oder Müller-Zeller, denn die Hüllkurven wurden mit unterschiedlichen Datenkollektiven bestimmt. Ein Vergleich von verschiedenen Q_{max}-Werten mit den Referenzwerten (HQ_{100}) ist trotzdem sinnvoll, denn eine zuverlässe Hochwasserabschätzung kann auch mit einem Modell gelingen, das den Referenzwert stark überschätzt, das aber in einem bekannten Verhältnis tut. Wenn ein Modell den Referenzwert um 100 % überschätzt, ist die Information sehr wertvoll, wenn die Streuung um die 100 % sehr klein bleibt.

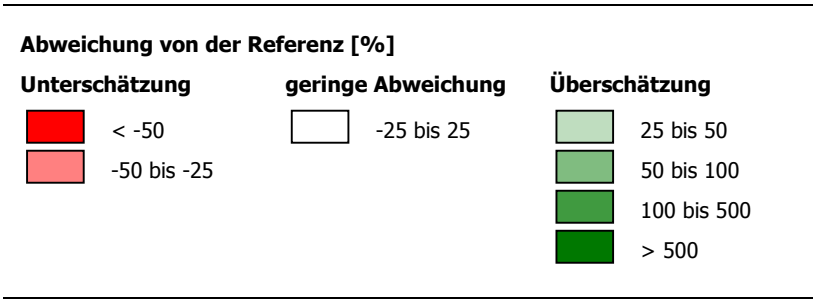
Notwendige Inputdaten: An einem Fallbeispiel, dem Einzugsgebiet der Langeten mit einer Fläche von 58.7 km^2, wird gezeigt, wie das Modell eingesetzt wird.

Güte der Resultate: Wie gut sind die Resultate, die das Modell liefert?

Um die Vergleichbarkeit der Resultate zu erhöhen, werden jeweils im Abschnitt *Güte der Resultate* ähnliche Abbildungen gezeigt. Oben links (ol) werden die Abschätzungen aus den 95 Einzugsgebieten den 95 Referenzwerten (HQ_{100}) gegenübergestellt. Oben rechts (or) stehen die Korrelationskoeffizienten dieser Gegenüberstellung. Unten geht es um die relativen Abweichungen [%] vom Referenzwert. Flächendeckend für die ganze Schweiz sind links (ul) Abweichungen in einer Pseudo-3D-Grafik mit einer Rasterweite von 10 km aufgetragen, und rechts (ur) werden auf der Grundlage der Basisgebiete des Hydrologischen Atlasses der Schweiz (HADES) die relativen Abweichungen in sieben Klassen dargestellt. Die Werte reichen von dunkelrot für Unterschätzung der Referenzwerte über 50 % bis dunkelgrün für Überschätzung der Referenzwerte über 500 % (Tabelle 3.3.). Die Klassen liegen nicht symmetrisch um Null,

da vier Modelle so genannte Hüllkurven beschreiben und systematisch die HQ_{100}-Werte stark überschätzen.

Tabelle 3.3: Legende der Abbildungen im Abschnitt *Güte der Resultate*.



Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurde ein Softwareinstrument entwickelt (es wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben). Sämtliche Modellparameter sind darin flächendeckend für die ganze Schweiz aufbereitet und stehen für die Anwendung zur Verfügung (vgl. Abbildung 4.3). Bei der Diskussion der einzelnen Modelle werden deshalb auch wichtige Aspekte, die für die Programmentwicklung relevant sind, vorgestellt.

Die Ergebnisse einer Hochwasserabschätzung können bei einer traditionellen Ermittlung der Modellparameter stark von der Erfahrung und den Ortskenntnissen der Anwenderinnen und Anwender abhängen. Dieser Punkt kommt in Kapitel 4.3 und in Anhang B3 noch ausführlich zur Sprache.

In dieser Arbeit werden die Resultate präsentiert, die sich ergeben, wenn die Modelle mit objektiv erhobenen Parametern angewandt werden.

3.3.1 Melli

Beschreibung des Modells

Das Modell nach Melli (1924), das im Umfeld der Stadtentwässerung entstanden ist, ist eines der ältesten und zugleich eines der einfachsten, das in der Schweiz noch eingesetzt wird. Q_{max} ist einzig eine Funktion der Einzugsgebietsfläche; das heisst in der bekannten Form von $Q_{max} = a \cdot F^b$ sind *a* und *b* (!) konstant.

Melli unterscheidet zwei Grössenbereiche der Einzugsgebiete:

$$\mathbf{Q_{max} = 7.426 \cdot F^{5/6}} \quad \text{für EG} < 100 \text{ km}^2$$

$$\mathbf{Q_{max} = 15.94 \cdot F^{2/3}} \quad \text{für EG} > 100 \text{ km}^2$$

mit Q_{max} Abflussspitze [m^3/s]
F Einzugsgebietsfläche [km^2]

Da nebst der Fläche keine Parameter erhoben werden müssen, ist diese Methode in der Anwendung sehr simpel.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Melli macht keine Angaben zur Wiederkehrperiode seiner Hochwasserabschätzungen. Der Vergleich der Referenzwerte mit den Abschätzungen nach Melli zeigt, dass sein Q_{max} im Durchschnitt etwa 2.5 mal grösser als ein HQ_{100} ist (Abbildung 3.3).

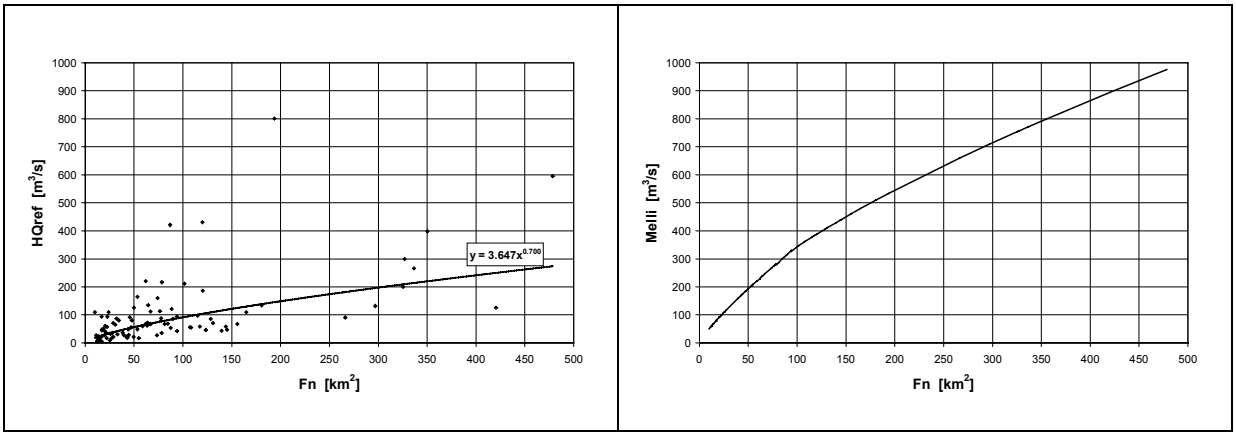


Abbildung 3.3: Vergleich der Referenzwerte mit Q_{max} nach Melli.
links: Referenzwerte (HQ_{100}) in Funktion der Einzugsgebietsfläche mit Trendlinie.
rechts: Q_{max} nach Melli in Funktion der Einzugsgebietsfläche.

Einzugsgebietsfläche

Melli gibt einen Bereich für die Einzugsgebietsfläche von 30 bis 1‘000‘000 ha (0.3 bis 10‘000 km^2) an. Den Bereich bis 100 km^2 hat er mit etwa 20 Hochwasserbeobachtungen verschiedener Bäche überprüft. Der Bereich von 100 km^2 bis 10'000 km^2 wird in seiner Publikation nur *vollständigkeitshalber* erwähnt und die Parameter anhand von etwa 50 Hochwasserbeobachtungen ermittelt. Es ist nicht ersichtlich, welche Einzugsgebiete für die Eichung verwendet wurden.

Naturräumliche Zuordnung

Es werden nirgends naturräumliche Einschränkungen bei der Anwendung erwähnt. Das heisst, die Methode darf in der ganzen Schweiz ohne Einschränkung eingesetzt werden.

Notwendige Inputdaten

Das Modell verwendet als Inputdaten nur die Einzugsgebietsgrösse. Die Fläche wird vom Programm aus dem digitalisierten Einzugsgebiet berechnet.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil F = 58.7 km^2

$$Q_{max} = 7.426 \cdot 58.7^{5/6} = \mathbf{221\ m^3/s}$$

Güte der Resultate

Die Parameter des Modells (nur Einzugsgebietsfläche) können von verschiedenen Anwenderinnen und Anwendern relativ genau bestimmt werden. Das Resultat der Abschätzung ist deshalb unabhängig von Berufserfahrung und Gebietskenntnissen.

Abbildung 3.4 zeigt, dass die zu erwartenden Resultate der Abschätzungen sehr unsicher sind. Das kommt in der Abbildung oben links zum Ausdruck. Wenn die Q_{max} nach Melli den Referenzwerten gegenübergestellt werden, ergibt sich bei den Ergebnissen eine grosse Streuung.

Die Datenpunkte sollten idealerweise auf einer Geraden liegen und wenn Q_{max} einem HQ_{100} entsprechen würde, würden diese gedachte Gerade und die in der Abbildung (ol) eingezeichnete 1:1-Gerade zusammenfallen. Das Q_{max} von Melli ist in grossen Teilen der Schweiz bedeutend grösser als der Referenzwert (vgl. das hohe Niveau der Oberfläche bei der z-Achse in Abbildung 3.4, ul). Alleine die massive Überschätzung der Referenzwerte hat keinen Einfluss auf die Güte der Resultate (vgl. Kapitel 3.4). Wenn die Streuung der Datenpunkte sehr klein wäre, ergäbe sich eine ebene Oberfläche bei den relativen Abweichungen von den Referenzwerten (ul) und die Abschätzungen nach Melli könnten – um ein HQ_{100} zu erhalten – mit einem konstanten Faktor multipliziert werden. Weil die Streuung der Datenpunkte jedoch sehr gross ist, ist dieser direkte Zusammenhang nicht gegeben. Ein Vergleich von Abschätzungen der Zielgrösse Q_{max} mit Referenzwerten HQ_{100} kann also durchaus wertvolle Hinweise zur Güte von Modellen liefern. Die allgemeinen Aussagen dieses Abschnitts gelten auch für die Modelle Hofbauer, Kürsteiner und Müller-Zeller.

Ohne eine räumliche Gliederung nach irgendeinem weiteren Kriterium ist das Modell nach Melli für schweizerische Verhältnisse sehr unzuverlässig und als alleinige Methode zur Hochwasserabschätzung nicht zu empfehlen. Dieses Ergebnis erstaunt keineswegs, wenn man an die grossen Unterschiede bei der Gebietsausstattung der untersuchten Einzugsgebiete denkt. Der Ansatz über die Einzugsgebietsfläche kann nur weiterhelfen, wenn man sich in einer homogenen Region befindet und sich die hochwasserrelevanten Gebietsparameter nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

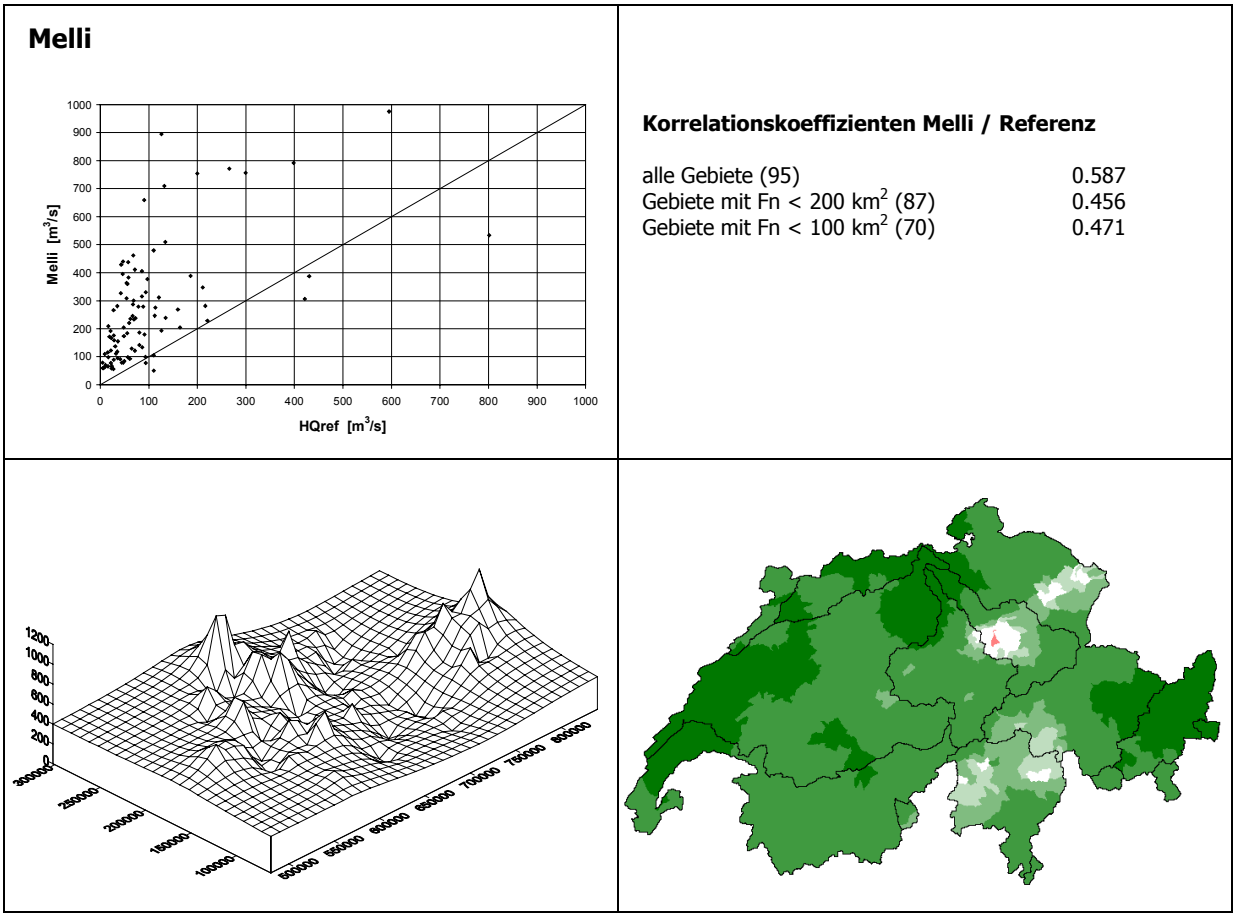


Abbildung 3.4: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Melli.
ol: Abschätzungen nach Melli und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100}).
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

3.3.2 Hofbauer

Beschreibung des Modells

Das Modell nach Hofbauer (1916) ist vom Aufbau her demjenigen von Melli (1924) ähnlich. Zur Ausgangsform $Q_{max} = a \cdot F^b$ wird ein Faktor α eingeführt, der in Funktion der Hangneigung von 0.25 im Flachen bis 0.7 im Steilen variieren kann.

$$\mathbf{Q_{max} = \alpha \cdot 60 \cdot F^{1/2}}$$

mit Q_{max} Abflussspitze [m^3/s]
α Abflussbeiwert [-]
F Einzugsgebietsfläche [km^2]

Obschon sich Hofbauer bewusst war, dass es sich bei seinem Vorschlag um einen einfachen Ansatz handelt, der sich nur für überschlägige Berechnungen und für Spitzenabflüsse eignet, liess er verlauten: „Diese Formel lässt an Einfachheit nichts zu wünschen übrig und liefert innerhalb der Grenzen F = 10 km^2 und F = 20'000 km^2 auch für unsere österreichische Reichshälfte recht zutreffende Werte".

Die α-Werte hat er folgendermassen definiert:

Tabelle 3.4: α-Werte nach Hofbauer

	α
Flachland	0.25 bis 0.35
Hügelland und Mittelgebirge	0.35 bis 0.5
Gebirgsland	0.5 bis 0.7

Die Formel wurde von Hofbauer an *einer Anzahl beobachteter Katastrophen in Österreich und Süddeutschland* überprüft.

Um die Hofbauer-Formel flächendeckend und GIS-gestützt anzuwenden (siehe HQx_meso_CH, Kapitel 4.2), wurden die α-Werte der Tabelle 3.4 nach Abbildung 3.5 in Funktion der Hangneigung festgelegt und für ein 100 m-Raster berechnet.

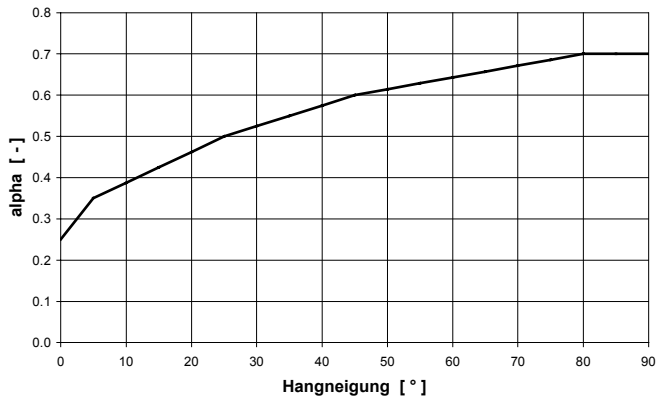


Abbildung 3.5: α-Wert nach HQx_meso_CH.

Aus einem digitalen Höhenmodell wird die Hangneigung abgeleitet und für jeden Gitterpunkt des Rasters berechnet. Die Grenze zwischen Flachland und Hügelland wurde bei einer Hangneigung von 5° und die Grenze zwischen Hügelland und Gebirgsland bei einer Hangneigung von 25° festgelegt.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Hofbauer spricht im Zusammenhang mit seinen Abschätzungen von *maximalen Hochwassermengen* und verzichtet auf die Angabe von Wiederkehrperioden. Der Vergleich der Referenzwerte mit den Abschätzungen nach Hofbauer zeigt, dass das Q_{max} nach Hofbauer durchschnittlich 2.4 mal grösser als ein HQ_{100} ist. Die Streuung der Datenpunkte in Abbildung 3.6, ol ist jedoch so gross, dass in konkreten Fällen keine zuverlässigen Angaben gemacht werden können.

Einzugsgebietsfläche

Hofbauer gibt einen sehr grossen Flächenbereich an: für die *österreichische Reichshälfte* soll die Formel für Flächen von 10 bis 20'000 km^2 *zutreffende Werte* liefern.

Naturräumliche Zuordnung

Der Ansatz darf auf Gebiete mit ähnlichen Rahmenbedingungen (Alpen, Mitteleuropa) ausserhalb der *österreichischen Reichshälfte* übertragen werden. Die Anwendung wird nicht durch irgendwelche Gebietsparameter eingeschränkt. Das heisst, die Methode darf in der ganzen Schweiz ohne Einschränkung eingesetzt werden.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse und den α-Wert. Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil $F = 58.7\ km^2$

α aus HQx_meso_CH = 0.352

$Q_{max} = 0.352 \cdot 60 \cdot 58.7^{1/2} =$ **$162\ m^3/s$**

Güte der Resultate

Bei der Bestimmung der Parameter haben Anwenderinnen und Anwender keinen grossen Spielraum. Berufserfahrung und Gebietskenntnisse beeinflussen das Ergebnis nur in geringem Masse.

Die drei Bilder von Abbildung 3.6 zeigen die im allgemeinen grossen positiven Abweichungen von den Referenzwerten für ein HQ_{100}. Die grosse Streuung (ol) deutet darauf hin, dass es praktisch unmöglich ist, das Verhältnis Hofbauer/HQ_{100} zuverlässig anzugeben. Die Angabe unter *Jährlichkeit des Ereignisses* ist also nur als eine Grös-

senordnung zu verstehen. Hochwasserabschätzungen nach Hofbauer sollten also nie alleine massgebend sein und wegen der grossen Streuung der Resultate nur im Sinne eines Q_{max} verwendet werden.

Die grosse Streuung und die ausgeprägten Problemzonen zeigen deutlich, dass das Modell zu einfach aufgebaut ist. Eine markante Verbesserung der Resultate könnte erreicht werden, wenn das Modell für homogene Regionen geeicht würde. Einfache Ansätze wie dieser können unmöglich der grossen landschaftlichen und klimatischen Vielfalt der ganzen Schweiz gerecht werden.

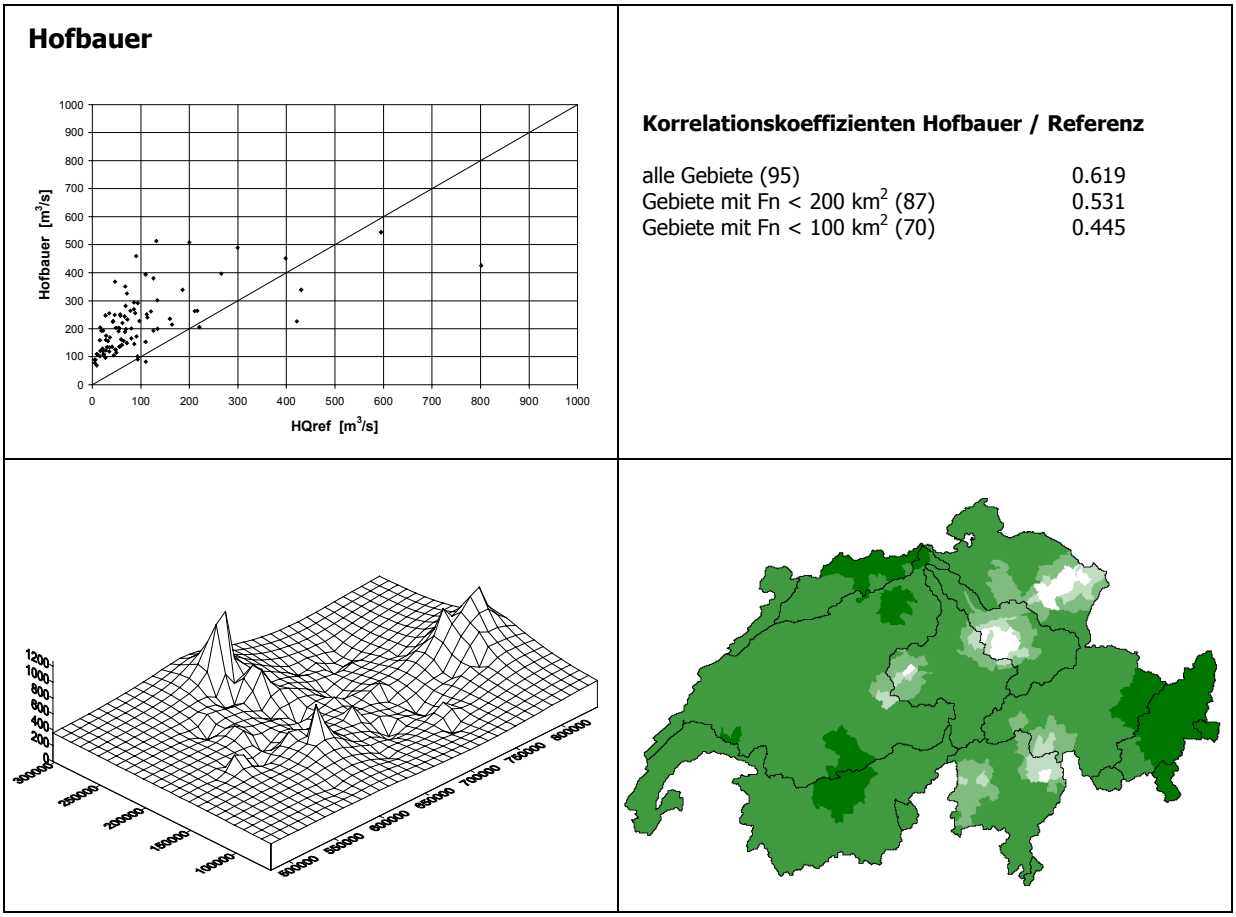


Abbildung 3.6: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Hofbauer.
ol: Abschätzungen nach Hofbauer und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

3.3.3 Kürsteiner

Beschreibung des Modells

Bei Kürsteiner (1917) wird eine Hüllkurve der Form $Q_{max} = a \cdot F^b$ für die Abschätzungen von Spitzenabflüssen verwendet. Der Unterschied zu Melli (1924) besteht darin, dass *a* nicht konstant ist, sondern in Abhängigkeit der Hangneigung gemäss Tabelle 3.5 variiert. Da der Faktor *a* in der Schweiz unter dem Namen *c* bekannt ist, ist im folgenden vom c-Wert nach Kürsteiner die Rede.

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

mit	Q_{max}	Abflussspitze [m^3/s]
	c	Charakter des EG [-]
	F	Einzugsgebietsfläche [km^2]

Tabelle 3.5: c-Werte nach Kürsteiner resp. Heusser[4]

	c
ausgesprochen flaches Gelände, mit leicht hügeligen Randgebieten; Kanäle aus Riedentwässerungen	2.5 bis 4
teilweise flaches und teilweise hügeliges Einzugsgebiet	4 bis 6
meist hügeliges Voralpengelände	6 bis 9
steiles gebirgiges Einzugsgebiet	9 bis 12
vergletscherte Einzugsgebiete	3 bis 5

Für HQx_meso_CH wurde die Tabelle 3.5 in einen flächendeckenden Datensatz umgesetzt. Die Tabelle kann so interpretiert werden, dass der c-Wert nur von der Neigung und vom Vorhandensein eines Gletschers abhängig ist. Abbildung 3.7 zeigt den Zusammenhang zwischen der Hangneigung und dem c-Wert.

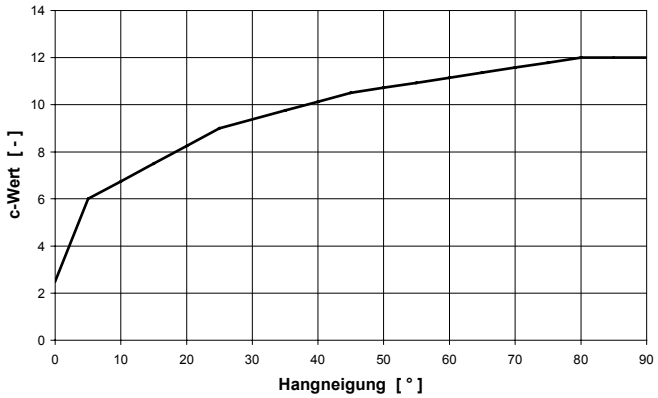


Abbildung 3.7: c-Wert nach HQx_meso_CH, umgesetzt nach Heusser (1947).

4 Eigenartigerweise ist die Abschätzmethode unter dem Namen Kürsteiner bekannt, obschon Heusser (1947) gezeigt hat, wie die c-Werte zu bestimmen sind. Kürsteiner hat sich nur sehr knapp zur Hochwasserabschätzung geäussert: „Die spezifischen Abflussmengen sind nach der empirischen, an einer grossen Zahl von tatsächlich beobachteten Hochwassermengen abgeleiteten Formel q = (9 bis 12) / $F^{1/3}$ berechnet worden, unter Berücksichtigung des höchsten Wertes, der Zahl 12".

Jedem Gitterpunkt eines Rasters kann, abgeleitet aus einem digitalen Höhenmodell, ein Neigungswert zugeordnet werden. Daraus lässt sich nach der Beziehung aus Abbildung 3.7 ein mittlerer c-Wert für ein beliebiges schweizerisches Einzugsgebiet berechnen. Die Grenze zwischen flach und hügelig wurde bei einer Hangneigung von 5° und die Grenze zwischen hügelig und steil bei einer Hangneigung von 25° festgelegt.

Aus der Arealstatistik (BFS 1985) kann die Gletscherfläche bezogen werden, der ein c-Wert von 4 zugewiesen wird. Damit steht einer flächendeckenden Kartierung von *c* nichts mehr im Weg.

Unter dem Namen *Kürsteiner* haben sich in der Schweiz Verfahren etabliert (z.B. Kanton Zürich, siehe AGW 1997), die von Kürsteiner (1917) nur den Exponeten *b* übernommen haben, den Koeffizienten *c* aber an abgelaufenen Ereignissen eichen und nicht mehr aus den Gebietseigenschaften ableiten.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Heusser (1947) erwähnt, dass das Q_{max} ungefähr einem HQ_{100} entspreche. Ein Vergleich der Referenzwerte mit den Abschätzungen nach Kürsteiner zeigt eine mittlere Überschätzung von rund 40 %.

Einzugsgebietsfläche

Kürsteiner (1917) äusserte sich in seinem Aufsatz leider nicht, für welche Einzugsgebietsflächen die Formel gilt und welche Einzugsgebiete er für die Eichung verwendet hatte.

Heusser (1947) wurde konkreter und publizierte eine Abbildung (vgl. Abbildung 3.1), in der die meisten Datenpunkte in einem Flächenbereich von 5 bis 500 km^2 liegen. Die Grenzen sind nicht scharf, aber die Abbildung von Heusser zeigt, dass das Modell ganz bestimmt die mesoskaligen Einzugsgebiete dieser Untersuchung abdeckt.

Naturräumliche Zuordnung

Es werden weder von Kürsteiner noch von Heusser naturräumliche Einschränkungen bei der Anwendung erwähnt. Daraus darf gefolgert werden, dass das Modell in der ganzen Schweiz ohne Einschränkung eingesetzt werden darf.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse und den c-Wert. Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil F = 58.7 km^2

c aus HQx_meso_Ch = 5.81

$Q_{max} = 5.81 \cdot 58.7^{2/3} =$ **88 m^3/s**

Güte der Resultate

Die Gegenüberstellung der Abschätzungen nach Kürsteiner und der Referenzwerte (HQ_{100}) zeigt eine recht grosse Streuung. Der Schwerpunkt der Punktewolke liegt aber nicht mehr so weit über der 1:1-Geraden wie bei Melli und Hofbauer. Die dunkelgrünen Flächen haben stark ab- und die weissen Flächen markant zugenommen. Auch bei Kürsteiner gibt es die beiden ausgeprägten Problemzonen im Bereich Baselbiet und Unterengadin (ul). Dazwischen, in einem breiten Band das von Süden nach Nordosten läuft, scheint das Modell relativ gute Ergebnisse zu liefern.

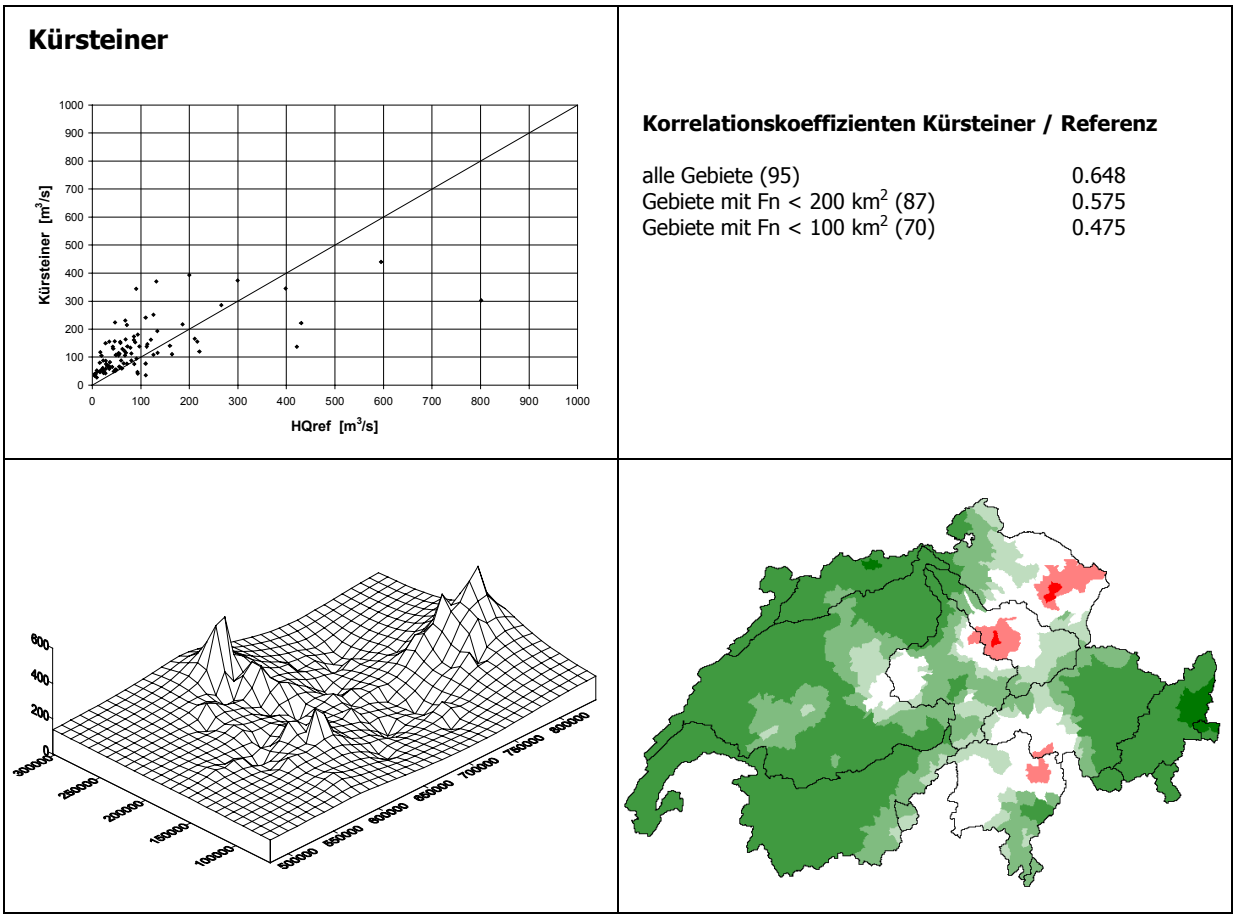


Abbildung 3.8: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kürsteiner.
ol: Abschätzungen nach Kürsteiner und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

Der Ansatz nach Kürsteiner ist für eine generelle, schweizweite Anwendung zu einfach aufgebaut. Verbesserungen könnten durch die Bildung von homogenen Regionen erzielt werden.

Die Ergebnisse, die hier präsentiert werden, gelten selbstverständlich nicht für die erwähnten Varianten (vgl. *Beschreibung des Modells*).

3.2.4 Müller-Zeller

Beschreibung des Modells

Müller (1943) schlägt einen Ansatz vor, der ähnlich aufgebaut ist, wie derjenige von Kürsteiner (1917). Auch er verwendet eine Hüllkurve der Form $Q_{max} = a \cdot F^b$ und der Exponent beträgt ebenfalls 2/3. Der Abflusskoeffizient hängt von der Vegetation und von der Hangneigung ab. Zeller (1975) hat den Ansatz noch verfeinert und mit einer Zonenkarte der Starkniederschläge ergänzt (Abbildung 3.9).

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

mit
- Q_{max} Abflussspitze [m^3/s]
- α Zonenkoeffizient [-]
- ψ Abflusskoeffizient [-]
- F Einzugsgebietsfläche [km^2]

Tabelle 3.6: ψ-Werte nach Müller resp. Zeller (z)

Höhenlage	Charakter	ψ flach	bis	steil
oberhalb Waldgrenze	undurchlässige Weideböden, Fels	0.4	bis	0.8
	Schutthalden (z)	0.05	bis	0.4
Waldgrenzgebiet	Alpweiden mit Sträuchern, einzelne Bäume	0.3	bis	0.7
	lichter Wald ohne Schluss	0.2	bis	0.6
tiefere Lagen	junger Wald, Wies- und Ackerland	0.1	bis	0.5
	vernässte Gebiete, Sumpf (z)	0.3	bis	0.6

Es wurde versucht, für HQx_meso_CH die Landnutzungsklassen der Arealstatistik (BFS 1985) den ψ-Werten aus Tabelle 3.6 zuzuordnen. ψ ist eine Funktion der Hangneigung und der Landnutzung. Die kleinen Werte jedes Landnutzungsbereiches sind bei flachen und die grossen Werte bei steilen Flächen einzusetzen. Für jede Landnutzungsklasse wurde, wie bei Hofbauer und Kürsteiner, eine Funktion bestimmt, die den Verlauf von ψ in Abhängigkeit der Hangneigung definiert. Die Grenze zwischen flach und mittel wurde bei 5°, die Grenze zwischen mittel und steil bei 25° gezogen.

Damit möglichst flächendeckende Landnutzungsinformationen vorliegen, müssen die vielen Klassen der Arealstatistik ziemlich pragmatisch den Klassen von Müller zugeordnet werden. Gletscher (flächenmässig nicht unbedeutend) erhalten generell ein ψ von 0.1, Gewässer ein ψ von 1.0 und Siedlungen ein ψ von 0.5 (unabhängig der Hangneigung). Alter und junger Wald lassen sich nicht unterscheiden.

Bei diesem Ansatz könnten gute Gebietskenntnisse und Erfahrungen von Vorteil sein. Im Programm HQx_meso_CH kann aus diesem Grund der ψ-Wert vom Anwender angepasst werden, wenn man davon überzeugt ist, die automatische Erhebung gebe die Realität zu wenig deutlich wieder.

Zeller (1975) unterscheidet in seiner Karte (Abbildung 3.9) drei verschiedene Zonen mit α-Werten von 20 (hell), 35 (mittel) und 50 (dunkel). Die Karte zeigt indirekt die Starkniederschlagsgebiete der Schweiz.

Abbildung 3.9: Zonenkarte für die α-Werte nach Zeller.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Müller macht keine Angaben zur Jährlichkeit. Ein Vergleich der Referenzwerte der 95 Einzugsgebiete mit den Abschätzungen nach Müller-Zeller ergibt eine mittlere Überschätzung von rund 80 %.

Einzugsgebietsfläche

Müller (1943) nennt für sein ursprüngliches Modell (ohne die Regenzonen) einen Gültigkeitsbereich von 2 bis 1000 km^2. Zeller schränkt die Anwendung seiner Karte der Regencharakteristik auf Einzugsgebietsgrössen von 0.5 bis 100 km^2 ein. Da hier Müller nur in Verbindung mit Zeller verwendet wird, kann der Einsatzbereich auf $2 < F < 100$ km^2 festgelegt werden.

Naturräumliche Zuordnung

Von Müller gibt es für die Anwendung keine naturräumlichen Einschränkungen. Nach der Umsetzung für HQx_meso_CH dürfte es die grössten Probleme in grossen Höhen (ungünstige Angaben zur Landnutzung) und in stark überbauten Gebieten geben. Es wird empfohlen, bei diesen Bedingungen die Parameter besonders gründlich zu überprüfen.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse, den α- und den ψ-Wert. Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil $F = 58.7$ km^2

α aus HQx_meso_Ch = 34.7
ψ aus HQx_meso_CH = 0.20

$Q_{max} = 34.7 \cdot 0.2 \cdot 58.7^{2/3} =$ **105 m^3/s**

Güte der Resultate

Die Korrelationskoeffizienten sind gegenüber den bisher besprochenen Modellen markant angestiegen. Das heisst, dass die Zuverlässigkeit für eine Hochwasserabschätzung zugenommen hat. Es sind zwar immer noch grosse Problemzonen vorhanden; die Regionen mit guten und unbrauchbaren Resultaten beginnen sich aber mehr und mehr zu durchmischen. Der Einbezug eines Niederschlagsparameters und die Bildung differenzierterer Gebietscharakterklassen scheint sich gelohnt zu haben. Die Dominanz der Einzugsgebietsfläche ist zurückgegangen, ist aber immer noch deutlich an der ähnlichen Topografie zu erkennen (ul) (ähnlich wie bei Melli, Hofbauer und Kürsteiner).

Die Einführung der Niederschlagszonen geht in Richtung Bildung von homogeneren Regionen, wie sie bei den bereits vorgestellten Modellen vorgeschlagen wurde.

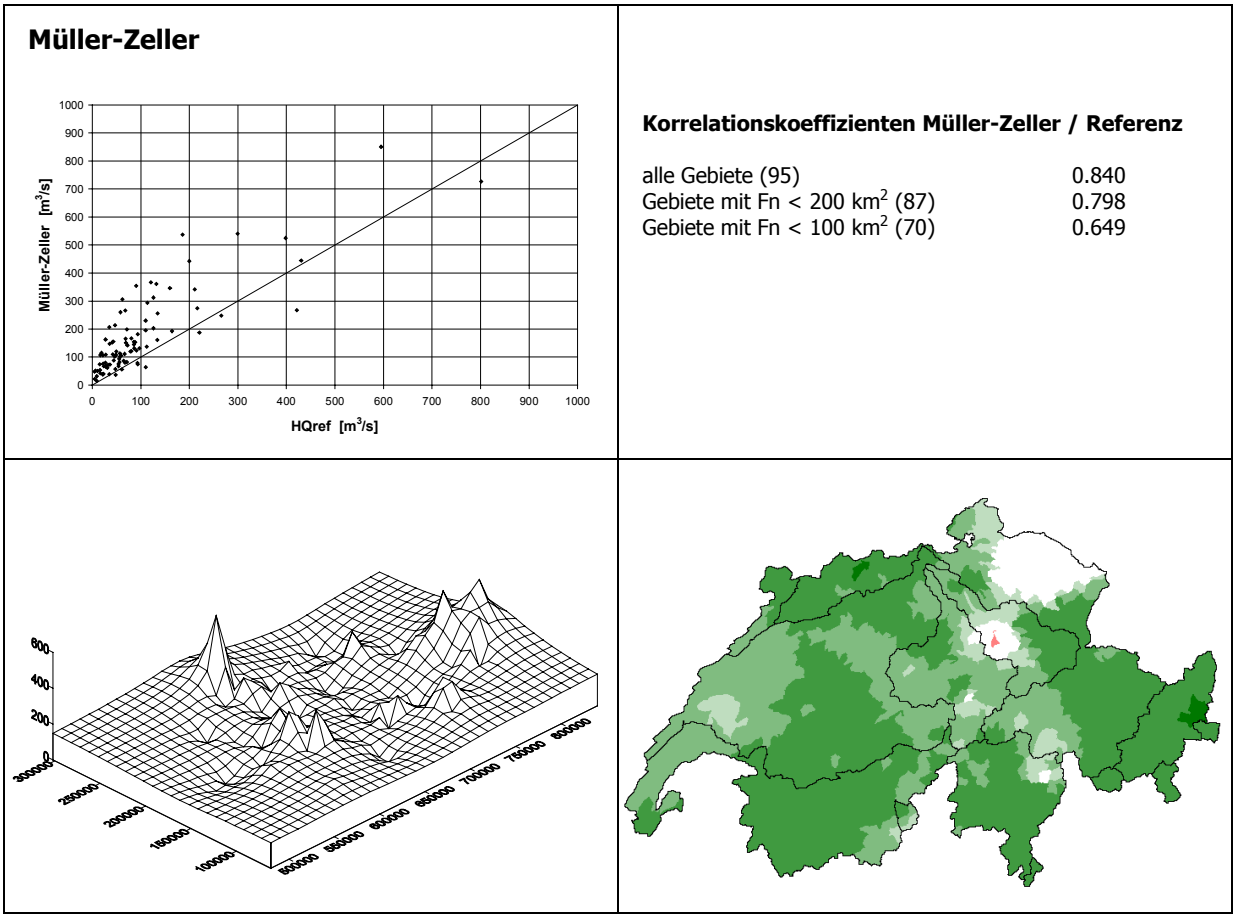


Abbildung 3.10: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Müller-Zeller.
ol: Abschätzungen nach Müller-Zeller und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

3.3.5 Kölla

Beschreibung des Modells

Das Modell Kölla (1986) ist ein Vertreter der Laufzeitverfahren. Bei diesen Verfahren stellt man sich vor, dass ein Hochwasserabfluss dann maximal ist, wenn das gesamte Einzugsgebiet zum Abfluss beiträgt. Die Zeit, die verstreicht bis das soweit ist, nennt man Konzentrationszeit (vgl. Kapitel 3.1).

Die *Rational Formula* ist die einfachste Form der Abschätzung einer Hochwasserspitze mit dem Laufzeitverfahren:

$$\mathbf{HQ_x = r_x(t_c) \cdot \psi_s \cdot Fn}$$

mit	HQ_x	x-jährliche Abflussspitze [m^3/s]
	r_x	x-jährliche Niederschlagsintensität [mm/h]
	t_c	Konzentrationszeit des Einzugsgebietes [h]
	ψ_s	Spitzenabflussbeiwert [-]
	Fn	Einzugsgebietsfläche [km^2]

Das Modell von Kölla ist eine Weiterentwicklung der *Rational Formula*. Beim Vergleich der beiden Formeln erkennt man noch deren ähnliche Struktur. Der Abflussbeiwert fällt bei Kölla weg. An seine Stelle tritt eine beitragende Fläche, die sich in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode ausdehnt.

$$\mathbf{HQ_x = (r_x(t_{c(x)}) + r_s - f_x) \cdot (FL_{eff(x)} + FL_b) \cdot 0.278 + Q_{vgl(x)}}$$

mit	r_x	Niederschlagsintensität [mm/h] eines Blockregens der Dauer t_c
	t_c	Konzentrationszeit [h] mit $t_c = t_1 + t_2$
	t_1	Benetzungszeit [h]
	t_2	Laufzeit im Gerinne [h]
	r_s	Schmelzwasseräquivalent der Schneedecke [mm/h]
	f_x	Verluste [mm/h]
	FL_{eff}	beitragende Flächen [km^2]
	FL_b	befestigte Flächen [km^2]
	Q_{vgl}	Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m^3/s]
	0.278	Umrechnungsfaktor [mm/h] >> [m^3/s]

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

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Modell Kölla liefert Abschätzungen für ein HQ_{20} und ein HQ_{100}.

Einzugsgebietsfläche

Kölla nennt einen Gültigkeitsbereich von 1 bis 100 km^2. In HQx_meso_CH kann Kölla wahlweise mit einer Abminderung des Gebietsniederschlags eingesetzt werden (das ist in der Originalarbeit nicht vorgesehen). Die Empfehlung: Für Flächen unter 100 km^2 soll Kölla ohne und für Flächen über 100 km^2 mit einer Niederschlagsabminderung verwendet werden. Die Untergrenze von 1 km^2 sollte mit HQx_meso_CH nicht ausgereizt werden. Der Bestimmung der Gerinnelänge liegt das digitale Gewässernetz 1:25'000 (L+T 1999) zugrunde. In diesem Datensatz sind alle Gerinne digitalisiert, die auf der Landeskarte blau eingezeichnet sind. Nach Kölla sollten aber auch die Gerinne, die trocken fallen können, für die Bestimmung der Gerinnelänge verwendet werden (schwarze Punktsignatur). Bei kleinen Einzugsgebieten kann es deshalb grosse Unterschiede geben. Empfohlene Untergrenze: 10 km^2.

Naturräumliche Zuordnung

Bei der Umsetzung der Landschaftscharakteristik in ein erforderliches Regenvolumen und in die Verluste spielt die Bodeneignungskarte (BFS 1980) die entscheidende Rolle (in Originalarbeit und HQx_meso_CH). In der Bodeneignungskarte geht es um die Eignung bezüglich einer landwirtschaftlichen Nutzung. Aus diesem Grund sind ab einer Höhe, in der Landwirtschaft nicht mehr betrieben werden kann auch die Daten zu den Böden nicht mehr in der für hydrologische Fragestellungen nötigen Qualität vorhanden. Für die Anwendung in diesen Höhen bekommt deshalb die Erfahrung der Hydrologinnen und Hydrologen eine nicht zu unterschätzende Bedeutung.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet. Die Starkniederschlagsdaten stammen aus dem HADES: Die Niederschlagsintensität r_x wird von HQx_meso_CH iterativ ermittelt.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil F = 58.7 km^2

alle Werte aus HQx_meso_CH

r_x = 13.59 mm/h
t_c = 4.98 h
r_s = 1.66 mm/h
f_x = 4.37 mm/h
FL_{eff} = 22.00 km^2
FL_b = 1.49 km^2
Q_{vgl} = 0 m^3/s

HQ_{100} = **71 m^3/s**

Güte der Resultate

Die Streuung der Resultate ist recht gross (Abbildung 3.11, ol). In der Gegenüberstellung der Abschätzungen nach Kölla mit den Referenzwerten erkennt man, dass die Datenpunkte nicht ganz symmetrisch um die 1:1-Gerade verteilt sind. Man muss im Durchschnitt mit Überschätzungen von rund 25 % durch das Modell Kölla rechnen. Die Regionen mit starken Überschätzungen liegen gleichmässiger über die Schweiz verteilt als bei den stark von der Fläche dominierten Verfahren (Melli, Hofbauer, Kürsteiner).

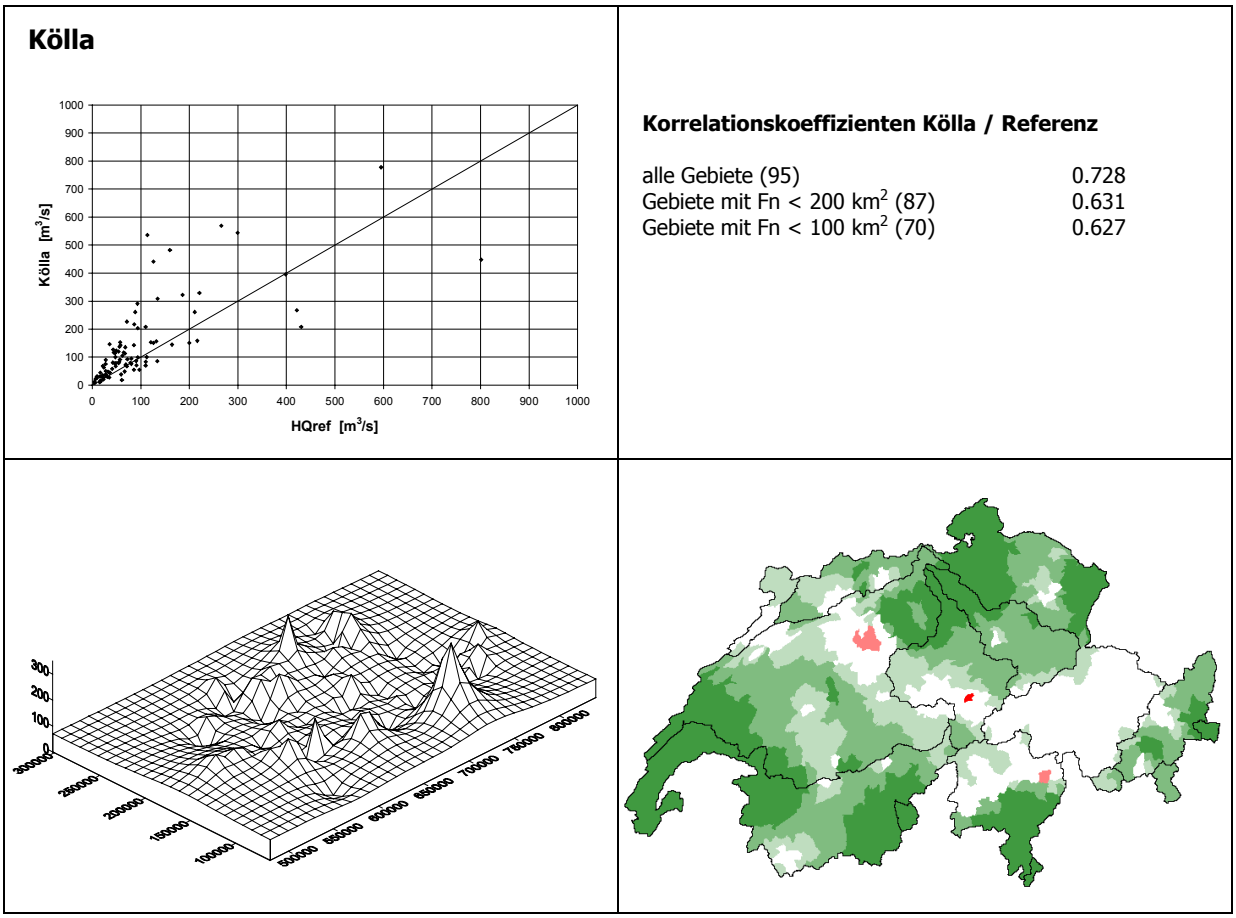


Abbildung 3.11: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kölla.
ol: Abschätzungen nach Kölla und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

Es hat sich bei den Analysen gezeigt, dass das Modell Kölla sehr empfindlich auf den Parameter r_x (Niederschlagsintensität) reagiert. In Regionen mit extremen Niederschlagsgradienten, beispielsweise um die Rigi (siehe Geiger et al. 1992; Tafel 2.4 im HADES), können die Differenzen beträchtlich werden. In solchen Regionen sollten zum Vergleich noch andere Modelle eingesetzt werden.

3.3.6 Kölla mod.

Beschreibung des Modells

Kölla mod. ist gleich aufgebaut wie Kölla (1986). Der Unterschied liegt bei der Bestimmung einzelner Modellparameter. Manser (1996) war nicht zufrieden mit der subjektiven Bestimmung der Landschaftscharakteristik und der damit verbundenen Ermittlung des *erforderlichen Benetzungsvolumens*. Er schlägt deshalb vor, auf die Wahl der Landschaftscharakteristik zu verzichten und den Verlust f_x (siehe gleicher Abschnitt in Kapitel 3.3.5) direkt mit der Bodentiefe aus der Bodeneignungskarte (BFS 1980) zu bestimmen. Die Bodentiefe wird nach dem in Kapitel 3.3.8 vorgestellten prozessorientierten Ansatz ermittelt (Gewichtung mit relativem Flächenbeitrag). Bei Kölla (1986) ist die beitragende Fläche FL_{eff} eine Funktion der Gerinnelänge; bei Manser (1996) wird FL_{eff} mit dem relativen Flächenbeitrag berechnet.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Wie beim Modell Kölla, Kapitel 3.3.5.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet. Die Starkniederschlagsdaten stammen aus dem HADES: Die Niederschlagsintensität r_x wird von HQx_meso_CH iterativ ermittelt.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil F = 58.7 km^2

alle Werte aus HQx_meso_CH

r_x = 12.18 mm/h
t_c = 5.83 h
r_s = 1.66 mm/h
f_x = 4.97 mm/h
FL_{eff} = 23.91 km^2
FL_b = 1.49 km^2
Q_{vgl} = 0 m^3/s

HQ_{100} = **63 m^3/s**

Güte der Resultate

Die Resultate sind mit denjenigen von Kölla vergleichbar. Die Auswirkungen der Modellmodifikationen bei der Bestimmung des erforderlichen Benetzungsvolumens und der beitragenden Fläche sind eher von untergeordneter Bedeutung. Die Streuung der Resultate beim Vergleich von Abschätzungen und Referenzwerten ist hier etwas kleiner. Es muss mit einer durchschnittlichen Überschätzung eines HQ_{100} von rund 40 % gerechnet werden.

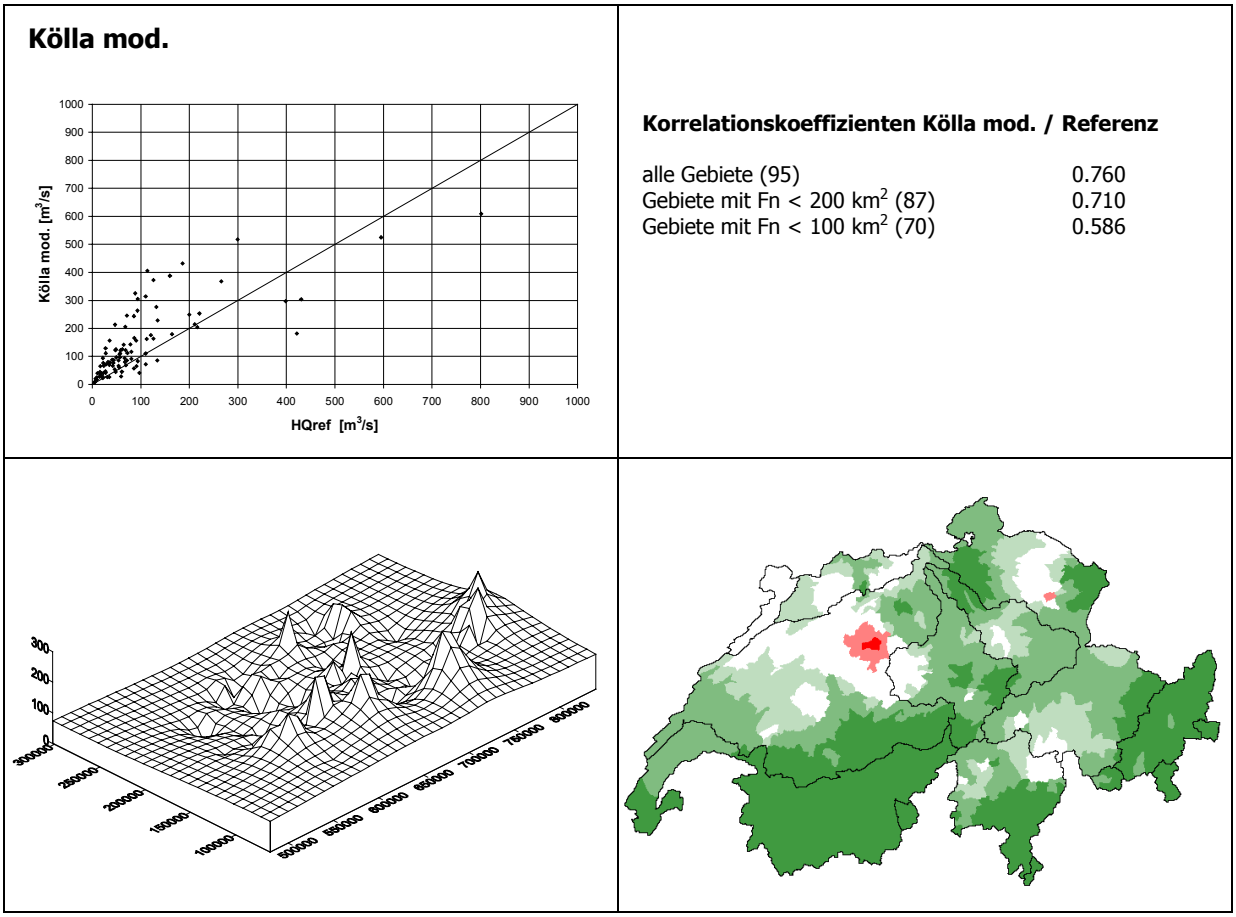


Abbildung 3.12: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kölla mod.
ol: Abschätzungen nach Kölla mod. und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

3.3.7 GIUB'96

Beschreibung des Modells

Kan (1995) und Weingartner (1999) haben für das Modell GIUB'96 maximale Hochwasserspitzen ausgewertet, die vom ehemaligen Amt für Strassen- und Flussbau (ASF 1974) und von der LHG (Spreafico und Stadler 1986 und 1988, Spreafico und Aschwanden 1991) gesammelt wurden. Die über 700 Beobachtungen stammen aus dem Zeitraum 1869 bis 1991.

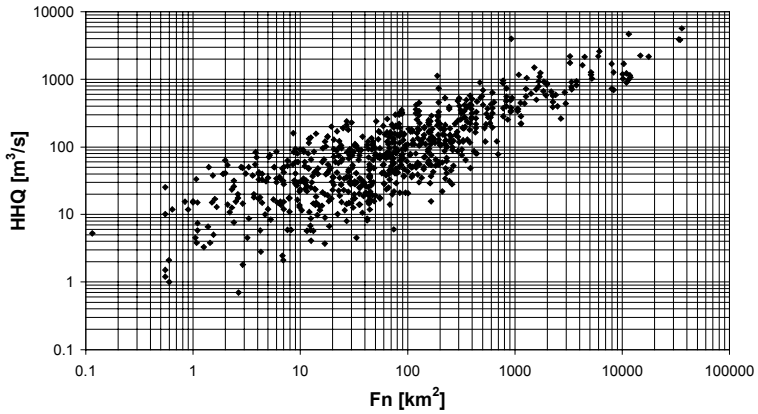


Abbildung 3.13: Datengrundlage für das Modell GIUB'96.

Aus diesem gesamtschweizerischen Datenkollektiv wurden Regionen mit vergleichbarem Hochwasserverhalten abgeleitet (Abbildung 3.14; in Kan (1995) und Weingartner (1999) ist das Vorgehen ausführlich beschrieben).

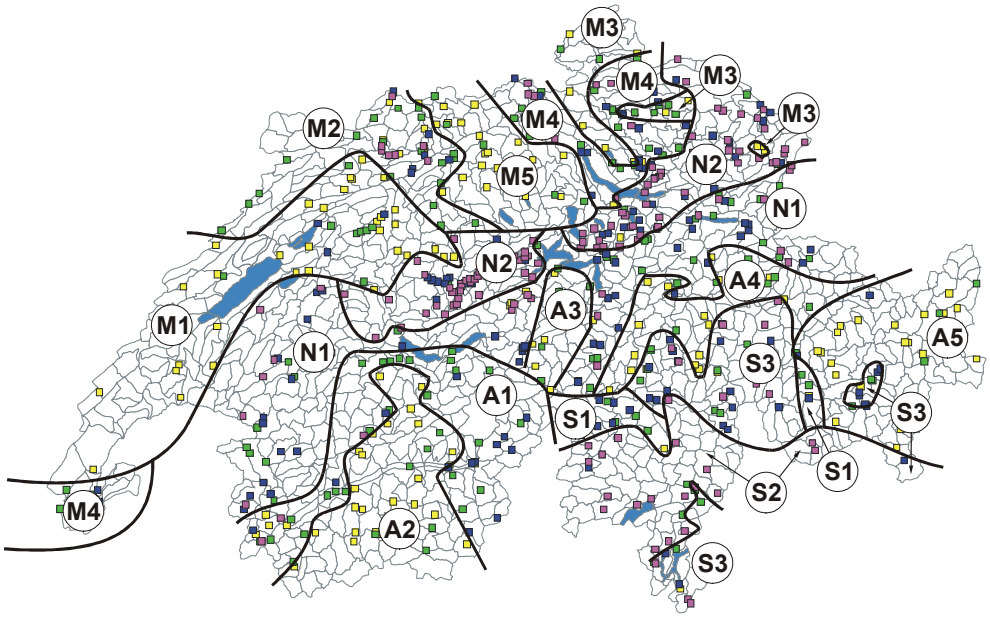


Abbildung 3.14: Hochwasserregionen der Schweiz nach Kan (1995).

Für alle Regionen in Abbildung 3.14 wurden Kennwerte bestimmt, die eine Abschätzung von 100jährlichen Hochwasserspitzen erlauben. Weingartner (1999) präsentiert zwei Ansätze:

$$\mathbf{HQ_{100} = a \cdot Fn^b} \quad \text{und} \quad \mathbf{HQ_{100} = a \cdot MQ^b}$$

mit	HQ_{100}	100-jährliche Abflussspitze [m^3/s]
	a, b	regionenspez. Parameter [-]
	MQ	mittl. Jahresabfluss [m^3/s]
	Fn	Einzugsgebietsfläche [km^2]

Vom Aufbau her gleichen diese Funktionen denjenigen von Melli und Kürsteiner. Bei ihnen wurde aber ein genereller Ansatz für die ganze Schweiz formuliert, während bei GIUB'96 homogenere Regionen gebildet wurden. Zudem ist die Datengrundlage um einiges besser als bei den alten Modellen.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

GIUB'96 eignet sich für die Abschätzung von 100jährlichen Spitzenabflüssen.

Einzugsgebietsfläche

Weingartner (1999) liefert die Grundlagen für eine grafische Beurteilung. Für jede einzelne Region werden in einem Diagramm (ähnlich wie in Abbildung 3.13) die Hochwasserwerte eingetragen, die für die Berechnung der Regressionsgeraden verwendet wurden. Die Punkteverteilung in den Diagrammen ist ein Indiz für den Gültigkeitsbereich. Für mesoskalige Einzugsgebiete, wie sie hier besprochen werden, ist das Modell ohne Einschränkung einsetzbar.

Naturräumliche Zuordnung

Die Hochwasserregionen sind flächendeckend für die Schweiz ausgeschieden. Das heisst, dass es auch hier keine Einschränkungen zu machen gibt. Bei einer Anwendung im Bereich von Regionsgrenzen sollte man besonders vorsichtig sein. Je nach Wahl der Region, können die Ergebnisse beträchtlich variieren.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse oder den mittleren Jahresabfluss (MQ) und die Lage des Ausflusses aus dem Einzugsgebiet (für die Bestimmung der Regionszugehörigkeit). Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet oder ausgewählt. In HQx_meso_CH ist ein Modell von Weingartner und Aschwanden (1992) integriert, welches den MQ schätzt. Der geschätzte Wert kann als Vorschlag betrachtet werden und wird weiterverwendet, wenn keine besseren Angaben zum mittleren Abfluss vorliegen.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil F = 58.7 km^2

alle Werte aus HQx_meso_CH
HQ-Region = M2
MQ = 1.49 m^3/s

$HQ_{100} = a \cdot Fn^b$ a = 5.98 b = 0.59
HQ_{100} = **66.1 m^3/s**

$HQ_{100} = a \cdot MQ^b$ a = 37.27 b = 0.71
HQ_{100} = **49.4 m^3/s**

Güte der Resultate

Schon rein optisch ist klar, dass GIUB'96 (HQ_{100} = f(Fn) und HQ_{100} = f(MQ)) zu den besten Modellen gehören, die in dieser Untersuchung vorgestellt werden.

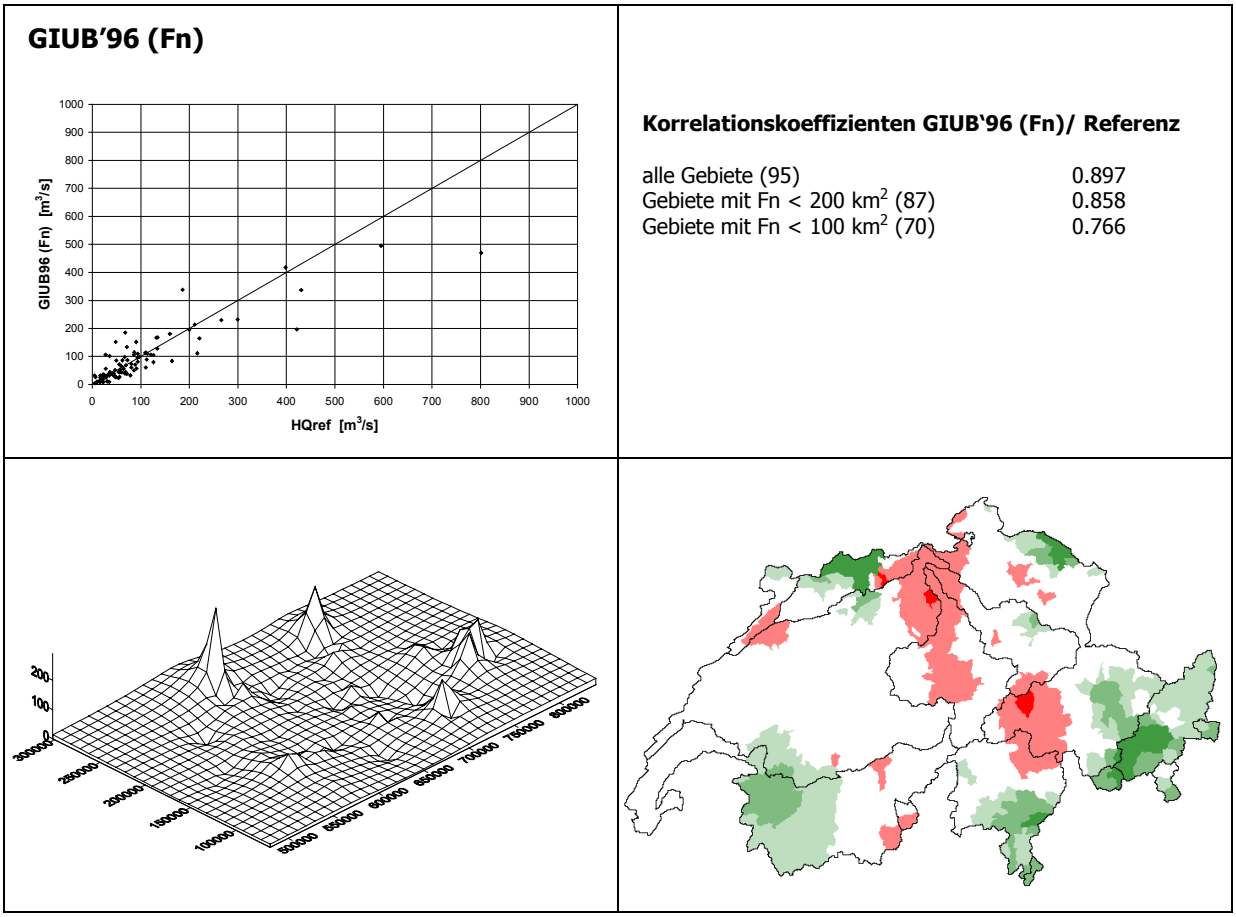


Abbildung 3.15: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (Fn)
ol: Abschätzungen nach GIUB'96 (Fn) und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

Die Streuung ist sehr klein (Abbildung 3.15 und 3.16, ol) und auch das allgemeine Niveau der Pseudo-3D-Grafik liegt in z-Richtung nahe bei Null. Das heisst, dass die abgeschätzten Werte sehr gut 100jährlichen Spitzenabflüssen entsprechen.

Grosse Teile der Schweiz liegen im Bereich symmetrisch um Null (Abbildung 3.15 und 3.16, ur). Es gibt dort weder bedeutende Über- noch bedeutende Unterschätzungen der Referenzwerte.

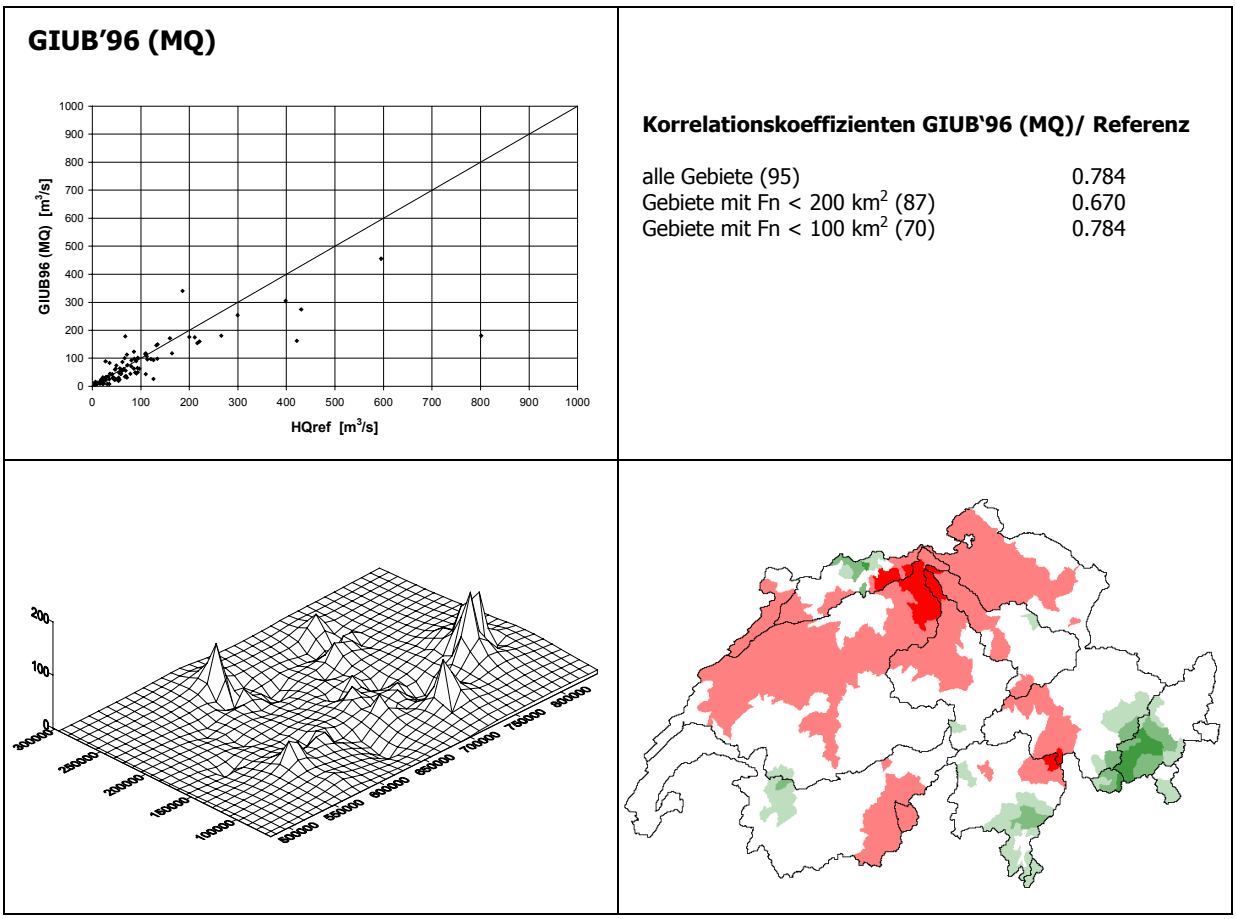


Abbildung 3.16: Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (MQ).
ol: Abschätzungen nach GIUB'96 (MQ) und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

Das Modell GIUB'96 (Fn) ist bezüglich Aufbau genau so einfach wie das Modell nach Melli. Mit der Bildung von Hochwasserregionen ist es aber gelungen, die Genauigkeit der Ergebnisse sehr stark zu erhöhen.

3.3.8 Momente

Beschreibung des Modells

Das Modell Momente von Düster (1994) versucht, die *Parameter mittlere Jahreshochwasserspitze* (mHQ) und *Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen* (s(HQ)) der hydrologischen Grundgleichung mit Gebietsparametern zu schätzen.

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

mit	mHQ	mittl. Jahreshochwasserspitze [m^3/s]
	s(HQ)	St.-abw. der Jahreshochwasserspitzen [m^3/s]
	K_x	f(Jährlichkeit, Verteilungsfunktion[5]) [-]

Der Ansatz stammt ursprünglich von Sydler, Widmoser und Zollinger (1982). Sie verwendeten zur Schätzung der beiden Momente die Parameter Fläche, Umfang, Schwerpunktabstand, Tallänge und die Flussdichte. Düster hat zwölf Jahre später mit verbesserten Datengrundlagen die Momente neu berechnet[6].

$$\mathbf{mHQ = f(Fn,Vgl,N,Im,Oed,WSV)}$$

$$\mathbf{s(HQ) = f(Fn,N,WSV)}$$

mit	Fn	beitragende Fläche [km^2]
	Vgl	Vergletscherungsgrad [%]
	N	Jahresniederschlag [mm]
	Im	mittlere Hangneigung [°], rFb
	Oed	Oedlandanteil [%], rFb
	WSV	mittl. Wasserspeichervermögen [mm], rFb
		rFb: relativer Flächenbeitrag [0..1]

Die Gebietsparameter werden nach dem so genannten relativen Flächenbeitrag gewichtet. Es wird dabei davon ausgegangen, dass alle Teile des Einzugsgebietes zu einem Hochwasserabfluss beitragen, jedoch mit unterschiedlichem Gewicht. Je grösser die Hangneigung und je kleiner die Entfernung vom Gewässernetz ist, desto grösser wird der relative Beitrag zu einem Hochwasserereignis. Dieser relative Beitrag einer Raumeinheit dient als Gewichtungsfaktor zur Berechnung der Gebietskenngrössen.

---

5 Düster verwendete die Gumbel-Verteilung.

6 In der Zwischenzeit stehen neue Datensätze zur Verfügung, die die Parametererhebung so stark verändert haben, dass die Regressionen (mit den gleichen Parametern wie bei Düster 1994) für die Momentenschätzung neu berechnet werden mussten. Die Gewässer werden nun nicht mehr *von Hand* von der Landeskarte digitalisiert, sondern können aus einem digitalen Gewässernetz abgeleitet werden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Modell Momente ist bezüglich Jährlichkeit äusserst flexibel. Bei einer Abschätzung eines HQ_x bleiben die Momente mHQ und s(HQ) konstant. Der Koeffizient K_x ist hingegen abhängig von der Wiederkehrperiode und kann für beliebige x bestimmt werden.

Einzugsgebietsfläche

Das Modell wurde in 95 schweizerischen Einzugsgebieten mit einer Fläche zwischen 10 und 500 km^2 (neu) geeicht. Es wird deshalb empfohlen, das Modell nur unter diesen Bedingungen einzusetzen.

Naturräumliche Zuordnung

Das Modell sollte nicht in Einzugsgebieten eingesetzt werden, die über ganz extreme Parameterkombinationen verfügen (z.B. städtische Einzugsgebiete oder stark vergletscherte Gebiete). Die Verteilung der Gebietsparameter der Eichgebiete bestimmt die Breite des möglichen Spektrums (vgl. Anhang B3).

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil F = 58.7 km^2

alle Werte aus HQx_meso_CH

mHQ = 23.58 m^3/s
s(HQ) = 10.16 m^3/s
K_x = 3.137

HQ_{100} = **55 m^3/s**

Güte der Resultate

Die Abschätzungen zeigen im Vergleich mit den Referenzwerten eine relativ kleine Streuung (Abbildung 3.17, ol). Die Datenpunkte sind scheinbar zufällig um die Gerade verteilt. Das heisst, es gibt keine systematischen Unter- oder Überschätzungen. Das sieht man auch sehr gut am tiefen Niveau in z-Richtung der Pseudo-3D-Grafik in der Abbildung 3.17, ul. Das eben skizzierte Bild zeigen auch die klassierten relativen Abweichungen in Abbildung 3.17, ur. Ein sehr grosser Flächenanteil der Schweiz liegt in der neutralen Klasse (symmetrisch um Null) und es gibt wenige Flächen mit grossen Unter- beziehungsweise Überschätzungen.

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

Weil es in der Schweiz eine beschränkte Zahl von Einzugsgebieten gibt, die sich für hydrologische Studien eignen, mussten bei der Modellbeurteilung Gebiete verwendet werden, die Düster (1994) auch schon für die Eichung des Modells Momente berücksichtigt hat. Auch bei der neuen Eichung der Regressionsgleichungen konnte diesem Problem nicht ausgewichen werden. Die Modellvergleiche bei Momente sind also nicht unabhängig, sondern es handelt sich um eine Insample-Überprüfung.

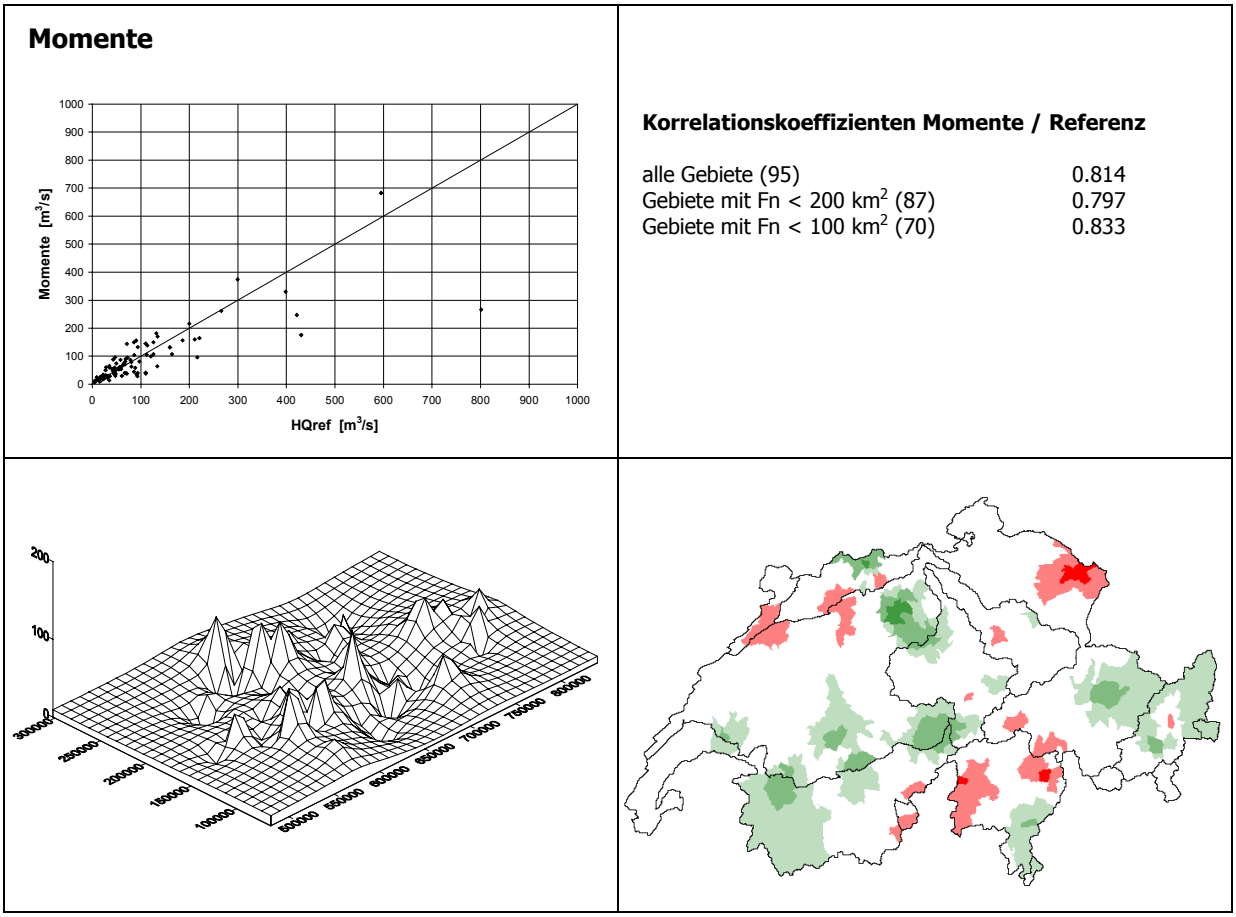


Abbildung 3.17: Resultate der Hochwasserabschätzung nach Momente.
ol: Abschätzungen nach Momente und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

3.3.9 BaD7

Beschreibung des Modells

Während den Untersuchungen zu den Modellvergleichen ist das Modell BaD7 entstanden; es stammt vom Autor (**Ba**rben). Beim gescheiterten Versuch, das Modell Fuzzy von Düster (1994) zu implementieren, wurden bestehende Ansätze mit neuen Ideen kombiniert und zu einem recht erfolgreichen Modell zusammengesetzt.

Die Ausgangslage für BaD7 bildet die Abbildung 3.18 mit den Achsen *spezifische mittl. Jahreshochwasserspitze* und *Standardabweichung der spezifischen Jahreshochwasserspitzen* [$m^3/s \cdot km^{-2}$] und den entsprechenden Daten der 95 Referenzgebiete. Mit der hydrologischen Grundgleichung (siehe Modell Momente im Kapitel 3.3.8) kann damit, zusammen mit einem verteilungsabhängigen Koeffizienten eine spezifische Hochwasserspitze mit beliebiger Wiederkehrperiode berechnet werden.

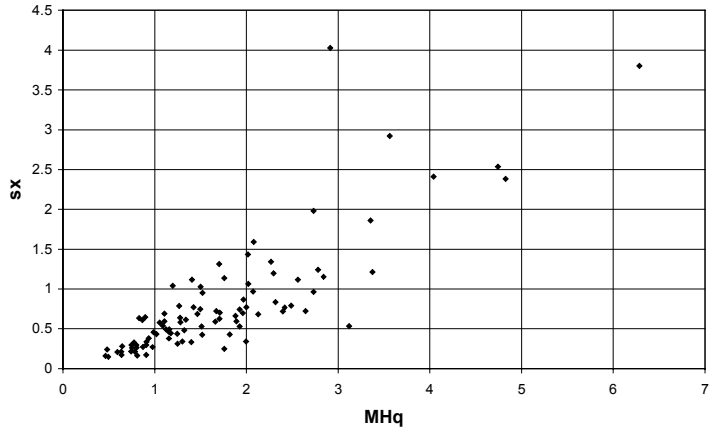


Abbildung 3.18: Die Momente der spezifischen Jahreshochwasserspitzen der 95 Referenzgebiete.

Die beiden Momente eines ungemessenen Gebietes erhält man durch Mittelung der Momente der sechs ähnlichsten Gebiete. Mit den standardisierten Gebietsparametern[7]

Elongationsfaktor	[-]
Gletscheranteil	[%]
Jahresniederschlag	[mm]
Neigung	[°], rFb
Ödlandanteil	[%], rFb
Versiegelungsgrad	[%]
Weideanteil	[%], rFb
	rFb: relativer Flächenbeitrag [0..1]

spannt man einen sieben-dimensionalen Raum auf (daher der zweite Teil des Namens **D7**). Das ungemessene Einzugsgebiet bildet mit seinen Gebietsparametern den Startpunkt in diesem Raum. Vom Startpunkt aus wird zu allen 95 Datenpunkten der Referenzstationen die euklidische Distanz berechnet. Die mHq und sx (siehe Abbil-

7 Es sind die Gebietsparameter, die Düster für das Modell Fuzzy verwendet hat.

dung 3.18) der sechs Gebiete mit den kleinsten euklidischen Distanzen zum gesuchten Gebiet werden anschliessend gemittelt und damit eine spezifische Hochwasserspitze mit beliebiger Wiederkehrperiode berechnet.

Ein grosser Vorteil dieses Modells ist seine äusserst hohe Flexibilität. Die Liste mit den Referenzstationen (sie enthält die beiden Momente und die sieben Gebietsparameter, vgl. Anhang B4) kann immer erweitert werden, ohne dass sich dabei etwas am Modell ändert. Das Modell muss nicht geeicht und kann für beliebige Wiederkehrperioden verwendet werden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Modell BaD7 ist bezüglich Jährlichkeit (wie das Modell Momente) äusserst flexibel. Bei einer Abschätzung eines HQ_x bleiben die Momente mHQ und s(HQ) konstant. Der Koeffizient K_x ist hingegen abhängig von der Wiederkehrperiode und der Verteilungsfunktion und kann für beliebige x bestimmt werden.

Einzugsgebietsfläche

Das Modell wurde mit Daten aus 95 mesoskaligen Einzugsgebieten entwickelt. Es ist deshalb zu empfehlen, diesen Rahmen nicht zu verlassen.

Naturräumliche Zuordnung

Das Modell sucht in einem bestehenden Pool die sechs ähnlichsten Einzugsgebiete. Es liefert also nur dann vernünftige Werte, wenn die Parameterkombination des fraglichen Einzugsgebietes auch im Pool einigermassen vertreten ist. Das heisst, es sollte nicht in Einzugsgebieten eingesetzt werden, die über ganz extreme Parameterkombinationen verfügen.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel: Langeten Huttwil F= 58.7 km^2

alle Werte aus HQx_meso_CH
Elongationsfaktor = 0.0853
Gletscheranteil = 0.0 %
Jahresniederschlag = 1374 mm
Neigung = 6.7 °, rFb
Ödlandanteil = 0.1 %, rFb
Versiegelungsgrad = 2.5 %
Weideanteil = 0.0 %, rFb

HQ_{100} = **58 m^3/s**

Güte der Resultate

Die Streuung der Datenpunkte bei der Gegenüberstellung der Abschätzungen mit den Referenzwerten ist relativ klein und der lineare Zusammenhang ziemlich gross (vgl. Abbildung 3.19, ol resp. or). Die Werte scheinen zufällig um die Gerade verteilt zu sein. Das heisst, dass die Abschätzungen als HQ_{100} bezeichnet werden können.

Die Modellgüte kann verbessert werden, wenn es gelingt, zusätzliche zuverlässige Stationen in die Liste mit den Referenzstationen aufzunehmen (vgl. *Beschreibung des Modells*). Dabei sollte der Pool mit Einzugsgebieten ergänzt werden, die über seltene Parameterkombinationen verfügen. Damit würde das Spektrum breiter und die Zuordnung der sechs ähnlichsten Gebiete besser abgestützt.

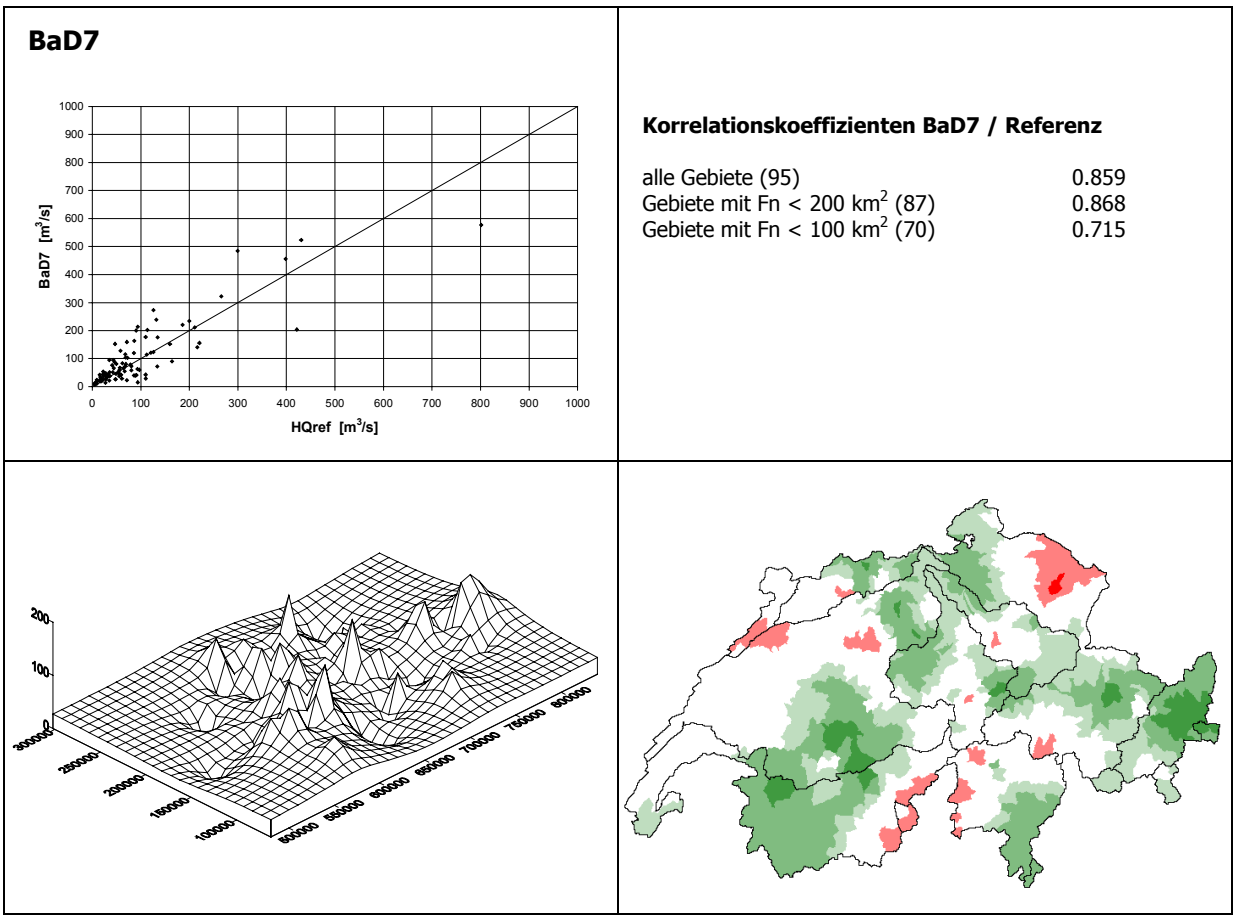


Abbildung 3.19: Resultate der Hochwasserabschätzung nach BaD7.
ol: Abschätzungen nach BaD7 und Referenzwerte (HQ_{100}).
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.
Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
Legende für ur siehe Tabelle 3.3.

3.4 Modellvergleich

Im Kapitel 3.3 werden alle im Rahmen dieser Arbeit analysierten Modelle einzeln vorgestellt. Dabei gibt es kaum Quervergleiche oder vergleichende Interpretationen der Ergebnisse. Kapitel 3.4 und Anhang B sollen diesen Überblick bieten, indem die Einzelergebnisse zu Übersichten zusammengetragen werden. In Abbildung 3.20 findet man die Pseudo-3D-Grafiken wieder, die die relativen Abweichungen in Prozent darstellen. Es muss darauf geachtet werden, dass sich der Massstab der z-Achse (rel. Abweichungen) von Modell zu Modell ändern kann. Abbildung 3.24 zeigt die Übersicht der klassierten relativen Abweichungen, und Tabelle 3.7 ist eine Zusammenstellung verschiedener statistischer Masszahlen, die viel über die Qualität oder die Eignung der Modelle aussagen können. Dabei werden nicht die Verhältnisse direkt an den Referenzstationen betrachtet, sondern die nach der räumlichen Interpolation gebildeten Mittelwerte pro Basisgebiet. Diese werden wie folgt berechnet: aus den relativen Abweichungen zwischen den Abschätzungen und den Referenzwerten bei den 95 Stationen wird mit einer räumlichen Interpolation (Interpol in Idrisi) auf ein 100 m-Raster für jedes Modell (wie in Abbildung 3.20) eine Oberfläche berechnet. Für jedes der 1062 Basisgebiete des HADES (siehe z.B. Abbildung 4.16) und für jedes Modell wird anschliessend der Mittelwert berechnet. Ein Beispiel: der Wert in der ersten Zeile und der ersten Spalte (-31) steht nicht für die grösste Unterschätzung von Melli bei einer Referenzstation, sondern für die grösste mittlere Unterschätzung eines Basisgebietes.

Auf die folgenden Fragen werden Antworten gesucht:

a) Gibt es **qualitative Unterschiede** bei der Anwendung von Hochwasser-Abschätzmodellen in der Schweiz?

b) Gibt es – geografisch gesehen – **Problemregionen**, wo alle Modelle schlechte Abschätzungen liefern?

c) Schneiden einzelne Modelle im Vergleich so schlecht ab, dass man sie generell **nicht empfehlen** kann?

a) Qualitative Unterschiede

Wie würde die ideale Oberfläche in Abbildung 3.20 aussehen? Es wäre eine Ebene auf dem Niveau 0 in z-Richtung. Das würde bedeuten, dass die 95 Abschätzungen eines Modells genau den Referenzwerten entsprächen. Dass dies unmöglich zu realisieren ist, zeigte sich schon bei den verschiedenen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Referenzwerte (vgl. Kapitel 2.2).

Die Frage wird trotzdem gestellt: Welche Modelle kommen der Idealvorstellung am nächsten? Für die Beschreibung der idealen Oberfläche gibt es zwei Kriterien: das **Niveau** und die **Form**. Wenn die Form stimmt, ist das Niveau kein Problem. Denn dann wäre das Verhältnis zwischen Abschätzung und Referenzwert bekannt, und die Abschätzung könnte durch Multiplikation mit einer Konstanten sehr leicht korrigiert werden. Wegen der unterschiedlichen Zielgrössen der Modelle (Q_{max} bei Melli, Hofbauer, Kürsteiner, Müller-Zeller und HQ_{100} resp. HQ_x bei Kölla, Kölla mod., GIUB'96, Momente, BaD7) sind grosse Unterschiede beim Niveau zu erwarten.

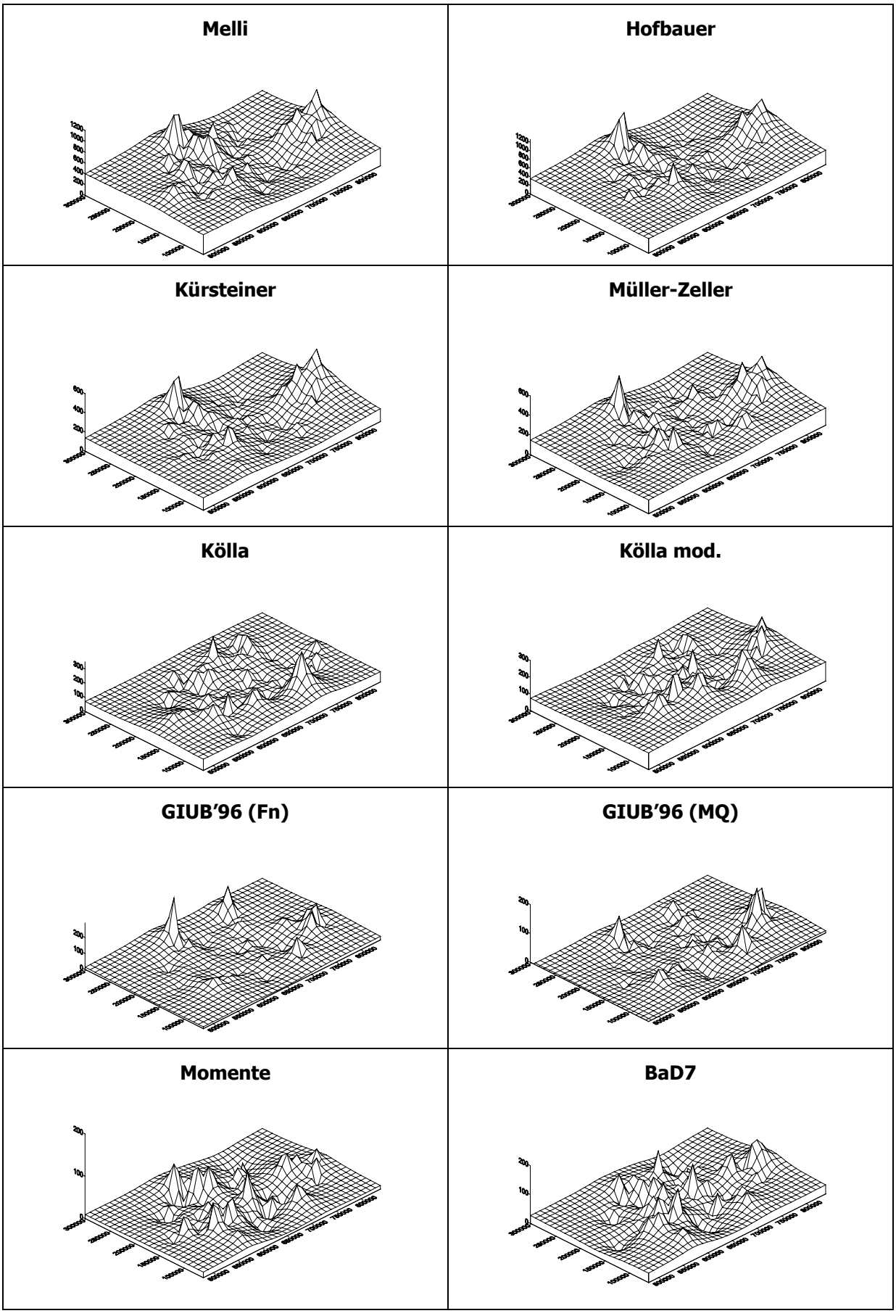


Abbildung 3.20: Relative Abweichungen von den Referenzwerten [%]. Übersicht.

Niveau: Die grössten Abweichungen von den Referenzwerten (HQ_{100}) haben erwartungsgemäss die Vertreter mit der Zielgrösse Q_{max} (Tabelle 3.7). Angeführt wird die Gruppe von Melli mit rund 350 % mittlerer relativer Abweichung. Auf der anderen Seite des Vergleichs liegen die Modelle, deren Abschätzungen sehr gut einem HQ_{100} entsprechen. Es sind dies GIUB'96 (Fn), GIUB'96 (MQ) und das Modell Momente.

Form: Aussagen zur Form können mit der Standardabweichung und mit der maximalen Differenz (Maximum - Minimum) gemacht werden. Modelle mit einer kleinen Standardabweichung sind zuverlässig, Modelle mit einer grossen Standardabweichung unsicher. In diesem Sinn sind GIUB'96 (MQ), Momente und BaD7 die zuverlässigsten, Melli und Hofbauer die unzuverlässgisten Modelle. An der Standardabweichung kann sehr schön abgelesen werden, was die Integration zusätzlicher Parameter in ein Modell bringen kann. Melli verwendet als einzigen Parameter die Einzugsgebietsfläche (Standardabweichung = 220), Hofbauer und Kürsteiner arbeiten zusätzlich mit der Hangneigung (212; 112) und bei Müller-Zeller werden noch die Vegetation und der Starkniederschlag integriert (104).

Tabelle 3.7: Statistische Masszahlen zu den relativen Abweichungen [%] der 1062 Basisgebiete.

	Melli	**Hof-bauer**	**Kür-steiner**	**Müller-Zeller**	**Kölla**	**Kölla mod.**	**GIUB (Fn)**	**GIUB (MQ)**	**Mo-mente**	**BaD7**	**Mittel[1]**
Minimum	-31	-19	-57	-25	-55	-51	-60	-66	-64	-67	-39
25%-Quantil	159	158	43	75	28	40	-15	-27	-6	3	-2
Mittel	351	304	120	141	75	92	9	-8	10	31	20
Median	343	277	105	112	64	77	0	-14	9	28	14
75%-Quantil	496	377	168	173	116	134	26	6	27	58	39
Maximum	1403	1609	662	802	352	325	478	184	145	162	300
Standardabw.	220	212	112	104	62	71	41	29	26	38	32
Max. – Min.	1434	1628	718	826	406	375	538	250	209	229	339

1 Mittel: Mittlere Abschätzung der Modelle GIUB'96 (Fn) und BaD7.

Die qualitativen Unterschiede zeigen sich auch deutlich bei den klassierten relativen Abweichungen in Abbildung 3.24. Modelle mit einem grossen Anteil weisser Flächen, das heisst ohne gravierende Unter- oder Überschätzungen der Referenzwerte, sind zuverlässig, Modelle mit viel farbigen Anteilen unzuverlässig.

b) Problemregionen

Es gibt ganz offensichtlich Regionen, in denen eine vernünftige Abschätzung der Hochwasserspitzen schwierig zu realisieren ist. Die meisten Modelle haben ihre grössten Überschätzungen der Referenzwerte im Engadin und im Baselbiet. Am besten erkennt man die Problemzonen in den Pseudo-3D-Grafiken (Abbildung 3.20). Die in diesen Regionen festgestellten grossen Differenzen zwischen Abschätzungen und Referenzwerten können zwei Gründe haben: 1) Es gelingt nicht, an die empirische Verteilung der Jahreshochwasserspitzen eine theoretische Verteilungsfunktion anzupassen (vgl. Kapitel 2.2) oder 2) das Modell kommt mit den besonderen Verhältnissen im Einzugsgebiet nicht zurecht. Aus der Übersicht der Abschätzungen von Anhang B1 werden fünf *kritische* Einzugsgebiete ausgewählt (378 Inn, St.Moritzbad; 826 Ova dal Fuorn, Zernez Punt la Drossa; 922 Chamuerabach, La Punt; 2309 Vordere Frenke, Waldenburg; 2313 Violenbach, Augst) und bezüglich der beiden Möglichkeiten überprüft.

Bei allen fünf Einzugsgebieten fällt die massive Überschätzung der Referenzwerte auf (Tabelle 3.8). Wurde etwa in diesen Fällen eine unpassende Verteilungsfunktion oder eine ungeeignete Parameterschätzmethode ausgewählt?

Tabelle 3.8: Resultate der Abschätzungen [m^3/s] ausgewählter Einzugsgebiete (Ausschnitt aus der Tabelle in Anhang B1).

EG-Nr	AE/MM[1]	Melli	Hof-bauer	Kürstei-ner	Müller-Zeller	Kölla	Kölla mod.	GIUB (Fn)	GIUB (MQ)	Mo-mente	BaD7
378	**67.8**	461.6	351.2	230.7	265.9	135.3	206.0	184.9	177.8	81.2	115.9
826	**16.7**	209.1	204.9	117.8	106.8	44.8	65.4	25.0	16.0	26.0	34.4
922	**27.4**	266.7	247.4	149.8	162.7	75.5	128.9	106.1	88.7	50.2	40.9
2309	**6.7**	59.3	88.7	39.4	51.7	22.4	20.9	26.0	16.6	12.7	15.1
2313	**4.9**	78.7	89.1	39.6	48.3	13.1	8.6	31.9	12.7	11.4	11.5

1 AE/MM: Referenzwert. Allg. Extremwertverteilung mit Momenten-Methode (Möglichkeit c) in Kapitel 2.2)

Mit HQ-EX, dem Programm, mit dem die extremwertstatistischen Analysen durchgeführt wurden, kann diese Frage beantwortet werden. Mit sämtlichen Kombinationen von Verteilungsfunktionen und Parameterschätzmethoden, die das Programm bietet (knapp 20) wird für jedes der fünf Einzugsgebiete ein HQ_{100} berechnet und mit den Referenzwerten aus Tabelle 3.8 verglichen (Tabelle 3.9).

Tabelle 3.9: Bereich potentieller Referenzwerte.

EG-Nr	AE/MM	Bereich aller Kombinationen	
		Untergrenze	Obergrenze
378	**67.8**	60.2	69.8
826	**16.7**	14.7	18.9
922	**27.4**	26.9	30.4
2309	**6.7**	6.15	6.74
2313	**4.9**	4.86	8.19

Selbst wenn die obere Grenze des Bereichs als Referenzwert eingesetzt würde, gäbe es kaum eine Veränderung der Situation. Bei jeder anderen Kombination von Verteilungsfunktion/Parameterschätzmethode als AE/MM (Allg. Extremwertverteilung mit Momenten-Methode) liegt das HQ_{100} in einer ähnlichen Grössenordnung. Das muss noch nicht heissen, dass die empirische Verteilungsfunktion gut angepasst wurde, es bedeutet aber, dass es keine wesentlich bessere Anpassung gibt als mit AE/MM. Die Ursache der Probleme liegt also nicht bei einer falsch gewählten Verteilungsfunktion.

Es bleibt noch die Möglichkeit, dass die Modelle mit den besonderen Verhältnissen in den Einzugsgebieten nicht zurecht kommen, dass die Einzugsgebiete also über eine extreme Parameterkombination verfügen (vgl. Anhang B3, *naturräumliche Zuordnung*). Was ist aber besonders an diesen fünf Einzugsgebieten? In einem ersten Schritt werden die Modellparameter der Einzugsgebiete (zusammengestellt in den Tabellen 3.10 und 3.11) mit den Masszahlen zu den Modellen Momente und BaD7 in Anhang B3 verglichen.

Tabelle 3.10: Gebietsparameter für das Modell Momente.

EG-Nr	Fn	Gletscher	N_J	Neigung	Ödland	SPK
378	51.5	5.9	1727	21.5	25.8	22.7
826	16.5	0.0	1385	17.7	19.1	23.9
922	23.6	0.0	1777	21.7	24.1	18.7
2309	5.0	0.0	1410	15.2	0.0	45.4
2313	3.6	0.0	1042	5.6	0.0	75.9
Min[1]	**2.4**	**0.0**	**1042**	**1.7**	**0.0**	**11.0**
Max[1]	**243.7**	**48.1**	**3156**	**32.4**	**79.0**	**90.3**

1 Min, Max: Kleinster resp. grösster Parameterwert aller 95 Einzugsgebiete (vgl. Anhang B3).

Tabelle 3.11: Gebietsparameter für das Modell BaD7.

EG-Nr	Elong	Gletscher	N_J	Neigung	Ödland	Versieg	Weide
378	0.059	5.9	1727	21.5	25.8	0.1	49.1
826	0.113	0.0	1385	17.7	19.1	0.0	47.9
922	0.101	0.0	1777	21.7	24.1	0.0	68.4
2309	0.155	0.0	1410	15.2	0.0	0.0	17.4
2313	0.256	0.0	1042	5.6	0.0	1.5	0.0
Min	**0.016**	**0.0**	**1042**	**1.7**	**0.0**	**0.0**	**0.0**
Max	**0.386**	**48.1**	**3156**	**32.4**	**79.0**	**31.9**	**86.6**

Das Einzugsgebiet Inn, St.Moritzbad (378) besitzt keine extremen Inputparameter für die Modelle Momente und BaD7. Mit den Oberengadiner-Seen verfügt es aber über wirkungsvolle Dämpfer, die offenbar von keinem der Modelle angemessen berücksichtigt werden. Hochwasserspitzen werden in diesen natürlichen Retensionsräumen gebrochen und führen so zu einem vergleichsweise kleinen Spitzenabfluss. Modelle, die nicht in der Lage sind, solchen Effekten Rechnung zu tragen, überschätzen den Abfluss.

Die Verteilung der Parameter zeigt im Einzugsgebiet Ova dal Fuorn, Zernez Punt la Drossa (826) für die beiden Modelle nichts Auffälliges. Eine Erklärung könnten besondere, kleinräumige geologische Verhältnisse sein (das Gebiet gehört zu den Sedimenten der Scarl-Decke), die hier nicht weiter untersucht werden können. Ein Hinweis in diese Richtung ist die Tatsache, dass einzig GIUB'96 (MQ) den Hochwasserabfluss richtig einschätzt, ein Modell, das nicht auf eigentlichen Gebietsparametern (wie Hangneigung, Vergletscherungsgrad usw.) beruht, sondern auf dem mittleren jährlichen Abfluss. Der Mittelwasserabfluss ist eine integrale Grösse, die entscheidend von den geologischen Verhältnissen im Gebiet geprägt wird.

Im Einzugsgebiet Chamuerabach, La Punt (922) sieht es bei den Modellparametern ziemlich unverdächtig aus. Einzig der Weideanteil ist relativ gross (der viertgrösste aller 95 Referenzgebiete). Eine Hypothese für das Scheitern der Modelle geht jedoch in eine andere Richtung: Betrachtet man die Jahreshochwasserspitzen in Abbildung 3.21, so fällt auf, dass der grösste Wert zweimal vorkommt. Das könnte ein Zufall sein. Es könnte aber auch sein, dass irgendwo im Einzugsgebiet bei Hochwasser die Gerinnekapazität überschritten wird und oberhalb des Messquerschnitts Überflutungen auftreten. Dadurch wird die Hochwasserspitze bei der Abflussmessstation reduziert. In einem solchen Fall würde man vom Modell eine Überschätzung des gemessenen Wertes erwarten.

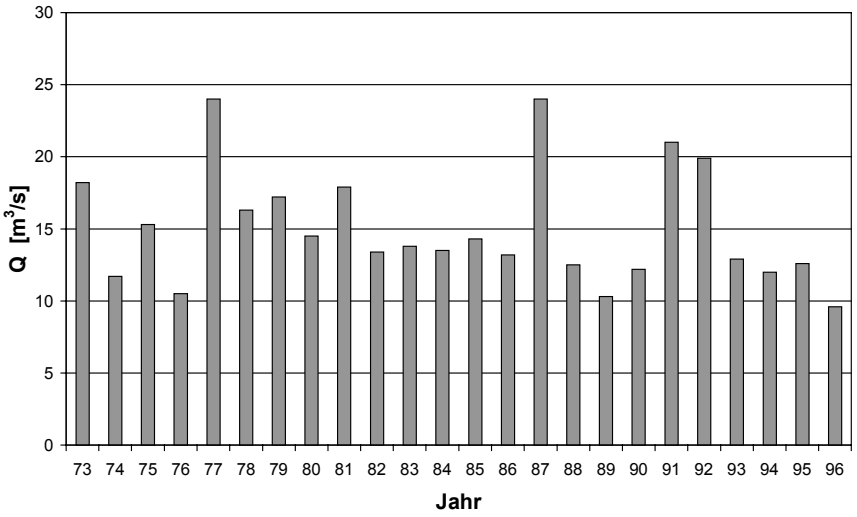


Abbildung 3.21: Jahreshochwasserspitzen des Chamuerabachs in La Punkt. Quelle LHG.

Die Einzugsgebiete Vordere Frenke, Waldenburg (2309) und Violenbach, Augst (2313) gehören einerseits zu den kleinsten Gebieten der Untersuchung und sie verfügen andererseits über relativ kurze Messreihen. Mit dieser Kombination stehen sie bereits etwas exponiert in der Datenlandschaft. Das Einzugsgebiet des Violenbachs verfügt ausserdem über den kleinsten Jahresniederschlag der 95 Referenzgebiete. Das als Hypothese formulierte Phänomen der Überflutung beim Chamuerabach könnte auch beim Violenbach eine Rolle spielen. Die theoretische Verteilungsfunktion in Abbildung 3.22 zeigt ein für Jahreshochwasserspitzen unübliches asymtotisches Verhalten.

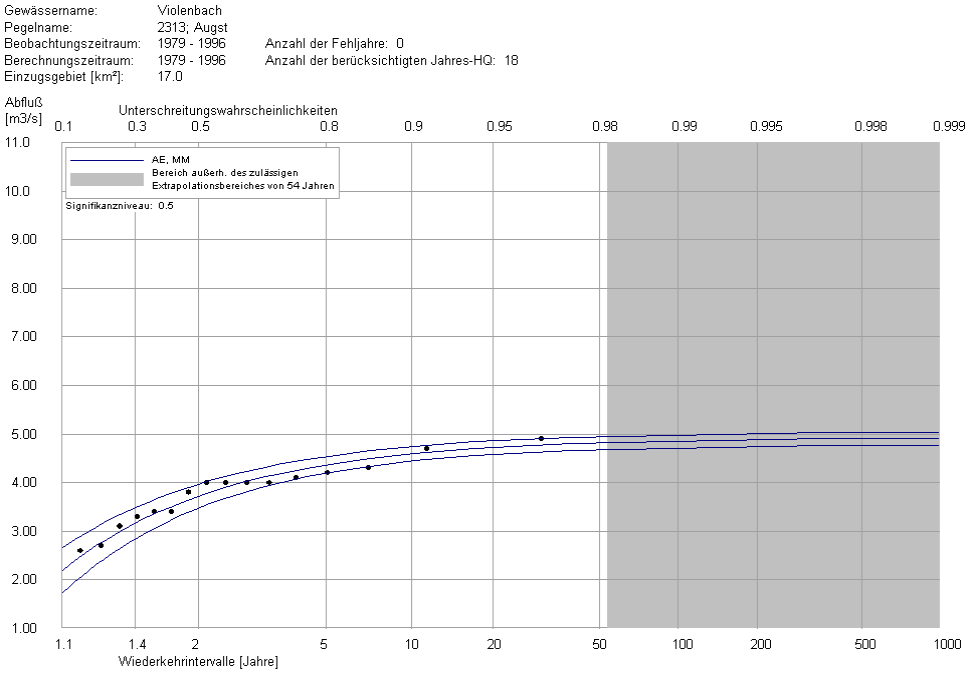


Abbildung 3.22: Jahreshochwasserspitzen mit Allg. Extremwertverteilung (AE/MM) für den Violenbach, Augst. (Print Screen von HQ-EX mit Daten des Tiefbauamtes Basel-Land.)

Eine Rückfrage beim Tiefbauamt des Kantons Basel-Landschaft hat Überraschendes ergeben. Es finden keine Überflutungen in der Art statt, wie sie hier vermutet werden, aber in der Zwischenzeit (nach 1996) ist mit 13.7 m^3/s am 11. Juli 1999 der von den Modellen erwartete, grosse Abfluss eingetreten. Wenn dieser Wert in die Berechnung des Referenzwertes einbezogen wird (Verlängerung der Messreihe um ein Jahr von 18 auf 19), verschwindet der *asymtotische Charakter* der Verteilungsfunktion, und der Referenzwert erhöht sich um mehr als 100 % auf 11.2 m^3/s (Abbildung 3.23)[8]. Damit stimmt er ganz gut mit den Abschätzungen von vier Modellen überein (Tabelle 3.12).

Tabelle 3.12: Resultate der Abschätzungen [m^3/s] im Violenbach mit korrigiertem Referenzwert.

EG-Nr	AE/MM	Melli	Hof-bauer	Kürstei-ner	Müller-Zeller	Kölla	Kölla mod.	GIUB (Fn)	GIUB (MQ)	Mo-mente	BaD7
2313	**11.2**	78.7	89.1	39.6	48.3	13.1	8.6	31.9	12.7	11.4	11.5

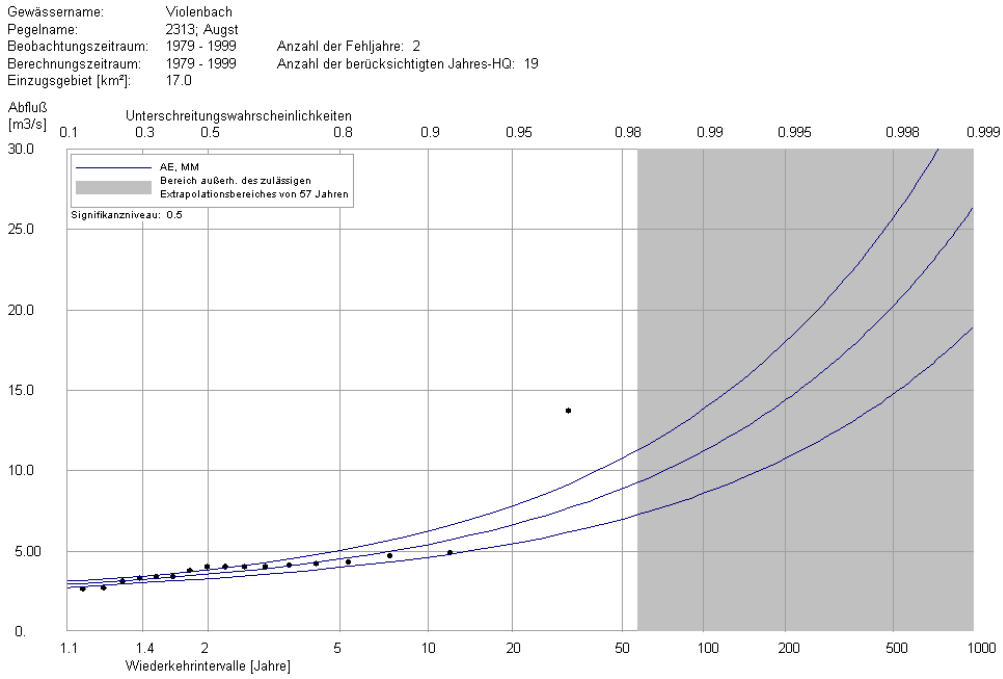


Abbildung 3.23: Jahreshochwasserspitzen mit Allg. Extremwertverteilung (AE/MM). Mit 1999er-Ereignis ergänzte Jahreshochwasserspitzen für den Violenbach, Augst. (Print Screen von HQ-EX mit Daten des Tiefbauamtes Basel-Land.)

Was kann man aus diesem Beispiel lernen? Etwas, was wir ja schon wissen: Die Bestimmung von Hochwasserspitzen mit den Mitteln der Extremwertstatistik ist eine heikle Angelegenheit – insbesondere bei kurzen Messreihen (vgl. Kapitel 2.2). Kurze Messreihen können durch den Einbezug von extremen Werten sehr stark beeinflusst werden. Deshalb ist eine Extrapolation weit über die Messreihenlänge hinaus (in Bereiche grosser Wiederkehrintervalle) wenn immer möglich zu vermeiden. Weil in

8 Die Diskussion, wie sogenannte Ausreisser behandelt werden können, wird an dieser Stelle nicht geführt. Das Problem wird beispielsweise bei Schnatter und Kirnbauer (1983), Chow et al. (1988) oder bei Maniak (1999) diskutiert.

der Schweiz aber ein Mangel an geeigneten Gebieten für hydrologische Untersuchungen herrscht, wird es trotzdem immer wieder getan; auch in dieser Arbeit. In diesen Fällen ist es besonders wichtig, auf Zusatzinfomationen zurückzugreifen. Möglichkeiten zur Verbesserung der Datenlage bieten die Integration historischer Hochwasser (Gees 1996) oder der Einbezug regionaler Informationen (Kirnbauer 1981).

Wie dieses Beispiel zeigt, muss der Fehler einer Unstimmigkeit beim Vergleich Referenzwert/Modell nicht immer auf der Seite der Modelle liegen. In diesem Sinn könnten die Modelle auch eingesetzt werden, um verdächtige Fälle bei der rein statistischen Modellierung zu überprüfen.

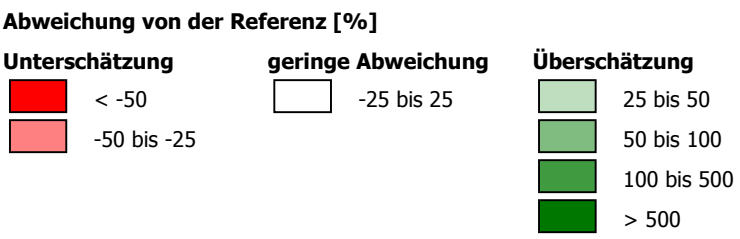
Es ist häufig schwierig, wenn nicht gar unmöglich, die wahren Gründe für die Existenz von Problemregionen zu liefern. Wenn man es könnte, wäre man in der Lage, mit diesem Wissen neue Modelle zu entwickeln, die der unter a) beschriebenen Idealvorstellung sehr nahe kämen: eine Ebene auf dem Niveau 0.

Erwähnenswert sind die ähnlichen Muster der Modelle Melli, Hofbauer, Kürsteiner und Müller-Zeller. Es zeigt sich sehr schön, dass die Dominanz der Fläche als Modellparameter bei den Ansätzen mit $Q_{max} = a \cdot F^b$ das Bild beeinflusst. Die zusätzlichen Parameter (Neigung, Vegetation, Niederschlag) steigern zwar die Qualität der Abschätzungen (vgl. Tabelle 3.7), sie vermögen aber den Charakter nicht entscheidend zu prägen. Das Bild verändert sich erst bei den Modellen Kölla und Kölla mod., indem sich in Abbildung 3.24 die Flächen mit starker Überschätzung etwas verschieben und gleichmässiger über die Schweiz verteilt sind.

Auch bei den Problemregionen (wie schon im Abschnitt *qualitative Unterschiede*) schneiden die Modelle GIUB'96, Momente und BaD7 verhältnismässig gut ab. Die Flächen mit den satten Farben in Abbildung 3.24 (Klassen mit den extremsten Abweichungen) sind klein und, was für eine gemeinsame Anwendung wichtig ist, sie befinden sich oft an anderen Stellen.

Abbildung 3.24 illustriert die Werte aus Tabelle 3.7 sehr schön. Man sieht beispielsweise, wie sich Unterschiede beim Mittelwert farblich niederschlagen. GIUB'96 (MQ) mit einer mittleren relativen Abweichung von -8 % hat in der Karte ziemlich grosse neutrale und rote Flächen, während das Modell GIUB'96 (Fn) mit einer mittleren Abweichung von 9 % bedeutend weniger rote und mehr grüne Flächen besitzt.

Legende zu Abbildung 3.24 (siehe nächste Seite).



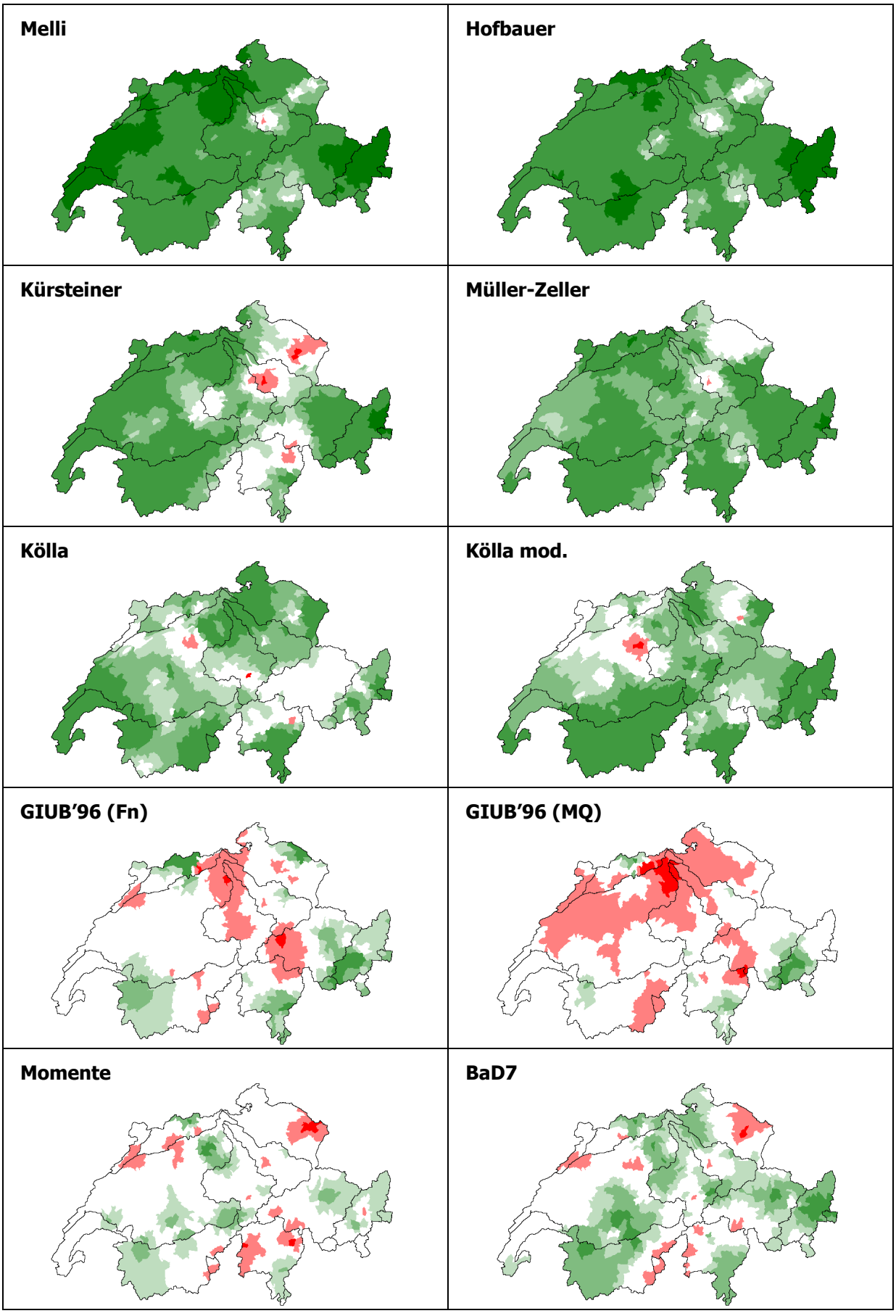


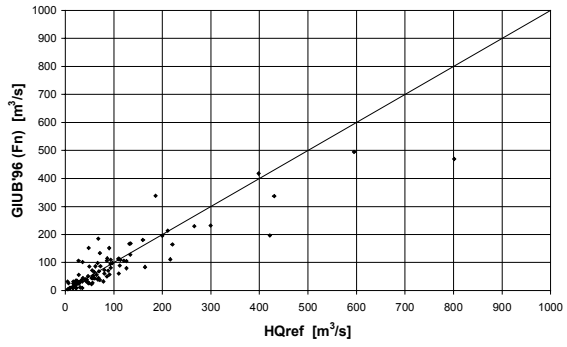
Abbildung 3.24: Klassierte relative Abweichungen von den Referenzwerten [%]. Übersicht.

Alle Modelle haben ihre Eigenheiten, ihre Stärken und Schwächen. Je mehr sie sich im Aufbau unterscheiden, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie nicht am gleichen Ort versagen. Weingartner (1998) hat schon vor der Existenz von HQx_meso_CH empfohlen, Modelle kombiniert anzuwenden (Mittelwert von zwei bis drei verschiedenen Abschätzungen). Jetzt, mit HQx_meso_CH, das mit äusserst geringem Aufwand zehn Resultate liefert, ist diese Forderung mehr als erfüllt. Das Programm bildet aber keine fixen Mittelwerte (das könnte in Einzelfällen zu gefährlichen Ergebnissen führen). Es bietet vielmehr eine Gesamtschau der Resultate, die anschliessend mit dem Einsatz von viel Expertenwissen interpretiert werden muss.

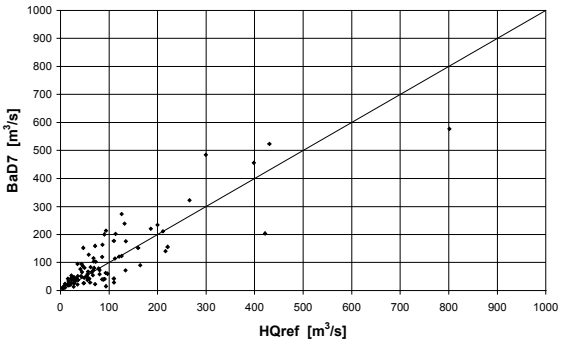
Als Abrundung des Kapitels soll auch hier noch gezeigt werden, was von einer fixen Mittelung der Ergebnisse zweier Modelle erwartet werden kann. Den folgenden Abbildungen und Tabellen liegen die mittleren Abschätzungen der Modelle GIUB'96 (Fn) und BaD7 in den bekannten 95 Referenzgebieten zugrunde. Diese Modellkombination führt unter den gegebenen Möglichkeiten zu den besten Resultaten.

Der Korrelationskoeffizient, der die Stärke des Zusamenhangs zwischen Referenzwert und Abschätzung bestimmt, wird vor allem für die kleineren Einzugsgebiete deutlich erhöht (Abbildung 3.25, ur). Für alle 95 Einzugsgebiete bleibt er praktisch gleich gross wie beim Modell GIUB'96 (Fn). Die Standardabweichung der relativen Abweichungen der 1062 Basisgebiete liegt mit 32 % im Bereich der besten Einzelmodelle (vgl. Tabelle 3.7).

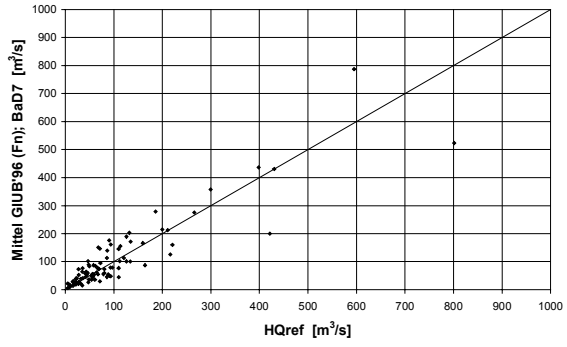
GIUB'96 (Fn)



BaD7



Mittel GIUB'96 (Fn)/BaD7



Korrelationskoeffizienten Modell / Referenz

	GIUB	BaD7	**Mittel**
alle Gebiete (95)	0.897	0.859	**0.901**
Gebiete mit Fn < 200 km^2 (87)	0.858	0.868	**0.895**
Gebiete mit Fn < 100 km^2 (70)	0.766	0.715	**0.794**

Abbildung 3.25: Gegenüberstellung Modelle / Referenzwerte mit den Korrelationskoeffizienten.

Ein Vergleich der Abbildungen mit den klassierten relativen Abweichungen scheint Vorteile für die gemittelten Ergebnisse zu liefern. Abbildung 3.26 kann als das Optimum angesehen werden, das aus diesen Untersuchungen herausgeholt werden kann.

Es muss noch einmal deutlich darauf hingewiesen werden, dass diese Art von Abbildungen wegen der heterogenen Datenlage (Einzugsgebiete mit grossen Unterschieden bezüglich Fläche, Messreihenlänge und Lage der Messreihe) nicht sehr zuverlässig ist und deshalb nicht überinterpretiert werden darf. In einem konkreten Fall kann es sogar vorkommen, dass in weissen Regionen mit dem betreffenden Modell schlechte Resultate erzielt werden.

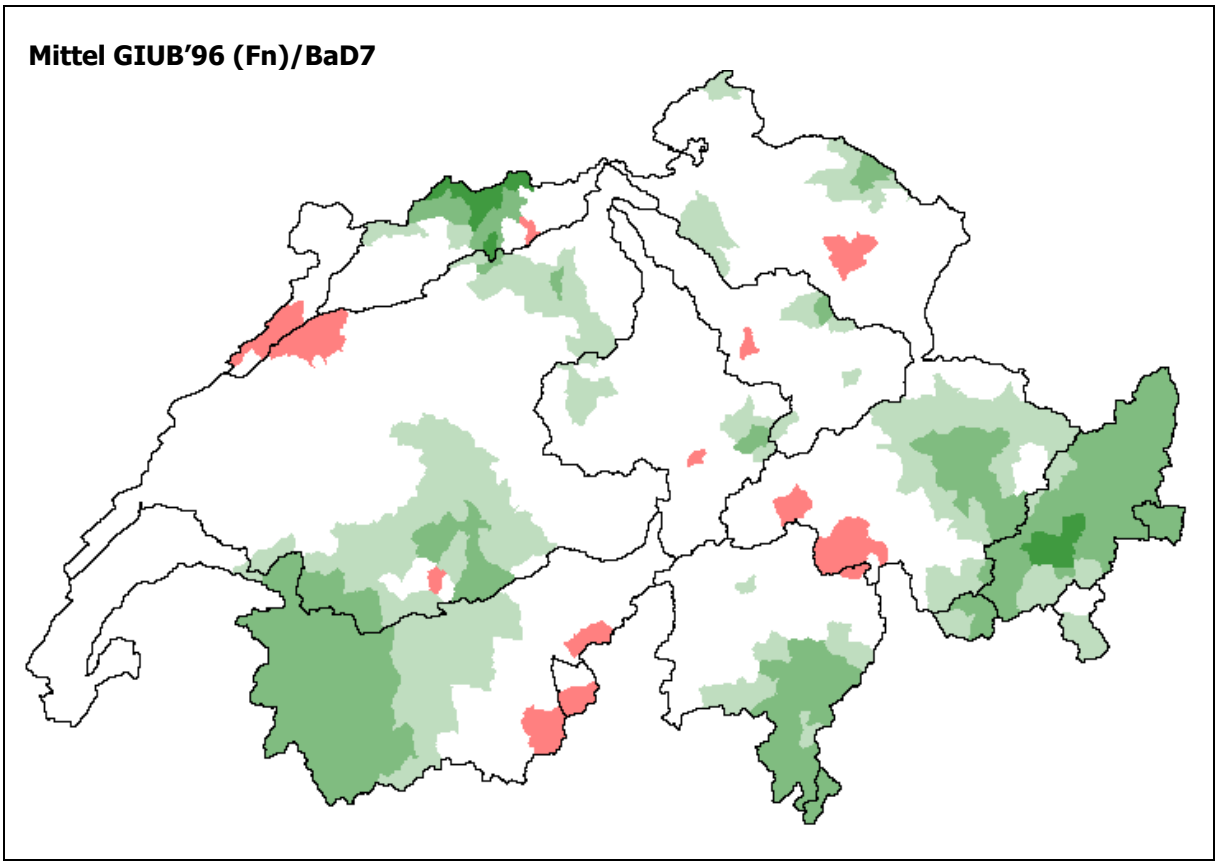


Abbildung 3.26: Klassierte relative Abweichungen von den Referenzwerten [%] aus den mittleren Abschätzungen von GIUB'96 (Fn) und BaD7.

c) Modelle, die (nicht) zu empfehlen sind

Die ähnlichen Muster (vgl. Abbildung 3.20) bei ähnlichen Modellansätzen ($Q_{max} = a \cdot Fn^b$) führen zur Frage, ob man nicht auf einzelne Modelle verzichten könnte. Grundsätzlich sollten möglichst viele Resultate unterschiedlicher Herkunft zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Spricht noch etwas für ein Modell, wenn sich der Ansatz kaum von den andern unterscheidet und die Resultate schlecht sind? Ja, es gibt einen wichtigen Grund, trotzdem nicht auf dieses Modell zu verzichten. Es ist das Kriterium a) bei der Modellwahl in Kapitel 3.2. Die Ingenieurbüros arbeiten noch

mit alten Modellen. Das hat neben der Einfachheit der Ansätze damit zu tun, dass die Abschätzungen älterer mit Abschätzungen neuerer Projekte in verschiedenen Einzugsgebieten des gleichen Flussgebiets verglichen werden können. Man kennt die Modellgüte nicht, aber man kann Vergleiche anstellen.

Würde dieser Grund nicht berücksichtigt, könnte man ohne weiteres auf die Modelle Melli und Hofbauer verzichten. Sie haben einen sehr ähnlichen Modellansatz wie Kürsteiner, liefern aber schlechtere Resultate.

In Tabelle 3.13 ist eine grobe Wertung der Modelle zusammengestellt. Diese Empfehlung verliert durch den Einsatz von HQx_meso_CH viel von ihrem ursprünglichen Gewicht. Bei einer klassichen Anwendung der Modelle und dem damit verbundenen Zeitdruck wäre es sehr nützlich, die zwei drei optimalsten Modelle zu kennen (optimal bezüglich Modellgüte, zeitlichem Aufwand und Verfügbarkeit der Datengrundlagen).

Tabelle 3.13: Eignung der untersuchten Modelle.

Modell	**Eignung**
Melli	eher nicht geeignet
Hofbauer	eher nicht geeignet
Kürsteiner	eher nicht geeignet
Müller-Zeller	geeignet
Kölla	geeignet
Kölla mod.	geeignet
GIUB'96 (Fn)	gut geeignet
GIUB'96 (MQ)	gut geeignet
Momente	gut geeignet
BaD7	gut geeignet

Fazit aus Kapitel 3

Die Modellvergleiche zeigen: Es gibt markante qualitative Unterschiede zwischen den untersuchten Modellen. Die Aussagekraft der Resultate ist aber wegen der heterogenen Datenlage (Einzugsgebiete mit grossen Unterschieden bezüglich Fläche, Messreihenlänge und Lage der Messreihe) nicht sehr gross. Für den konkreten Bemessungsfall kann auf der Basis dieser Ergebnisse *das* optimale Modell nicht ausgewählt werden.

Mit einem Überblick über mehrere Abschätzungen im gleichen Gebiet kann in den meisten Fällen eine plausible Bemessungsgrösse ermittelt werden. Damit können methodisch auch ganz anders gelagerte Ansätze überprüft werden. Der aus Messreihen extrapolierte Wert muss nicht immer zuverlässiger sein als Abschätzungen mit einfachen Modellen. Aus diesem Grund kann der Einsatz von Abschätzverfahren auch in gemessenen Gebieten durchaus sinnvoll sein (vgl. Abbildung 6.1).

4 Das neue Werkzeug für die Praxis

Gleichzeitig mit den Untersuchungen zu den Hochwasser-Abschätzmodellen ist ein Computerprogramm mit dem Namen HQx_meso_CH entstanden, das es erlaubt, alle in dieser Arbeit vorgestellten Modelle effizient und praxisfreundlich einzusetzen. Damit erhält man die Möglichkeit, innert kürzester Zeit eine ganze Palette von Abschätzungen miteinander zu vergleichen und mit Angaben zum Schadenpotential zu ergänzen. Innerhalb von maximal drei Stunden verschafft man sich auf einfache Weise einen guten Überblick über die Hochwassersituation in einem beliebigen mesoskaligen Einzugsgebiet und – gekoppelt mit dem Schadenpotential – über das Hochwasserrisiko eines Gewässerabschnitts.

Das Programm HQx_meso_CH entbindet die Bearbeiter aber nicht von der Pflicht, die Ergebnisse mit möglichst umfassendem Fachwissen zu prüfen.

In Kapitel 4 werden die Komponenten von HQx_meso_CH vorgestellt und gezeigt, wie sie zur Abklärung des Hochwasserrisikos eingesetzt werden können.

4.1 Einleitung

Das Programm **HQx_meso_CH** (**HQx**: Hochwasser beliebiger Jährlichkeit; **meso**: mesoskalige Einzugsgebiete; **CH**: Anwendungen für schweizerische Einzugsgebiete) dient in erster Linie der Abschätzung von Hochwasserspitzenabflüssen in mesoskaligen (10 bis ca. 200 km^2), schweizerischen Einzugsgebieten. Es dient aber auch der Bestimmung des Schadenpotentials[1] einer Überflutungsfläche. Damit sind wichtige Grundlagen für wasserbauliche Entscheidungsfindungen und für eine Analyse des Hochwasserrisikos vorhanden. Das Risiko ist das Produkt aus der Höhe des Schadens (aus HQx_meso_CH) und der Eintretenswahrscheinlichkeit (entsprechend dem Schutzziel gegeben).

HQx_meso_CH ist so konzipiert, dass für eine Hochwasserabschätzung keine weiteren Programme benötigt werden. Sämtliche Modell-Inputparameter und das ausführbare Programm befinden sich auf einer CD-ROM. Die Daten (Modell-Inputparameter oder Daten, von denen die Parameter erst abgeleitet werden müssen) sind so organisiert, dass sie flächendeckend über die ganze Schweiz in einem 100 m-Raster aufbereitet sind und dass sie (falls nötig) mit Idrisi, einem sehr preiswerten und leistungsfähigen GIS, bearbeitet werden können.

Das Programm kann grob in drei Module eingeteilt werden (vgl. Abbildung 4.1):

1) Definition der Einzugsgebiete (oder der potentiellen Überflutungsflächen) (linke Spalte)
2) Anwendung der Hochwasser-Abschätzmodelle (mittlere Spalte)
3) Bestimmung der Summe der Sachwerte (rechte Spalte)

1 *Schadenpotential* als Summe der Sachwerte, wie es in Kapitel 1.1 definiert wurde.

Hinzu kommt die Möglichkeit, die wichtigsten Modellparameter *(Parameter überprüfen*) und den erwarteten Fehler der Abschätzung (*Rel. Abweichung vergleichen*) in einer kleinmassstäblichen Karte abzufragen. Zusammen mit einer Grafik, die alle Hochwasserabschätzungen zusammenfasst, verfügt man somit über gute Hilfsmittel für die Interpretation der Ergebnisse. Und schliesslich werden die Resultate der Abschätzung und das berechnete Schadenpotential in eine Textdatei geschrieben, die in einem beliebigen Programm weiterverarbeitet werden kann.

Abbildung 4.1 zeigt das Hauptformular von HQx_meso_CH, das direkt nach dem Programmstart erscheint. In Abbildung 4.2 ist der Ablauf einer Hochwasserberechnung dargestellt. Die Schaltflächen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht betätigt werden sollten, sind nicht aktiviert (Text nur angedeutet). Nach dem Programmstart muss zuerst das Laufwerk, das die Daten-CD enthält, gewählt werden. Ein Zugriff auf Daten oder eine Modellanwendung ist zu diesem Zeitpunkt also noch nicht möglich (Frosch sitzt bei *Daten*, und die Schaltflächen bei *Modelle* sind nicht aktiviert).

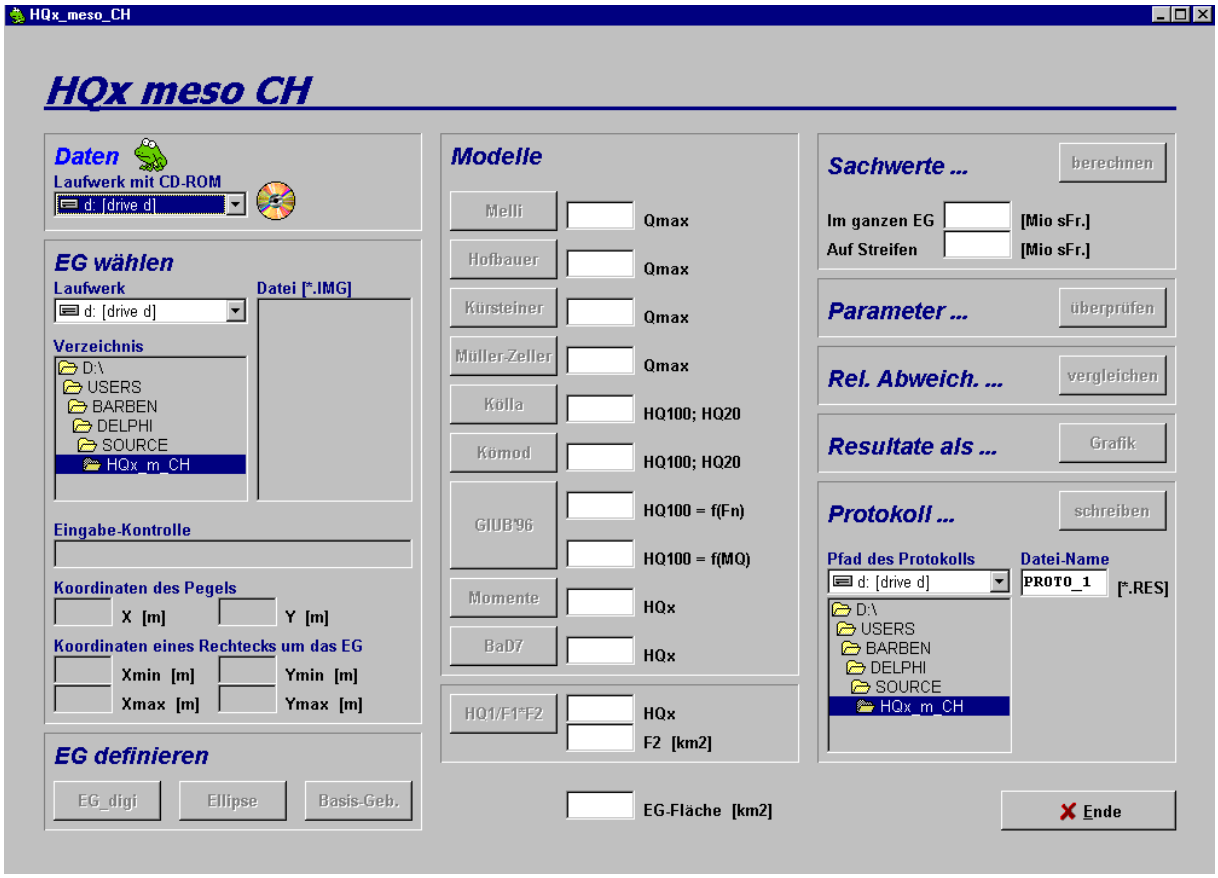


Abbildung 4.1: Hauptformular von HQx_meso_CH.

Beim Zustand in Abbildung 4.1 befindet man sich im Ablaufdiagramm zwischen den ersten beiden Kästchen.

Zu jedem zu bearbeitenden Einzugsgebiet (EG) gehören drei Dateien, die vom Programm automatisch generiert werden:

- Einzugsgebiets-Datei (*.IMG) mit der Geometrie des Einzugsgebietes; diese Datei kann mit dem entsprechenden DOC-File in Idrisi betrachtet und bearbeitet werden.
- Dokumentations-Datei (*.DOC) für den Einsatz in Idrisi.
- Koordinaten-File (*.TXT) mit den Koordinaten der Pegelmessstelle und mit den Eckpunkten eines Rechtecks, das dem Einzugsgebiet möglichst knapp Platz bietet. Damit wird die von HQx_meso_CH zu bearbeitende Fläche eingeschränkt und so die Rechenzeit für die anschliessenden Modellanwendungen massiv verkürzt.

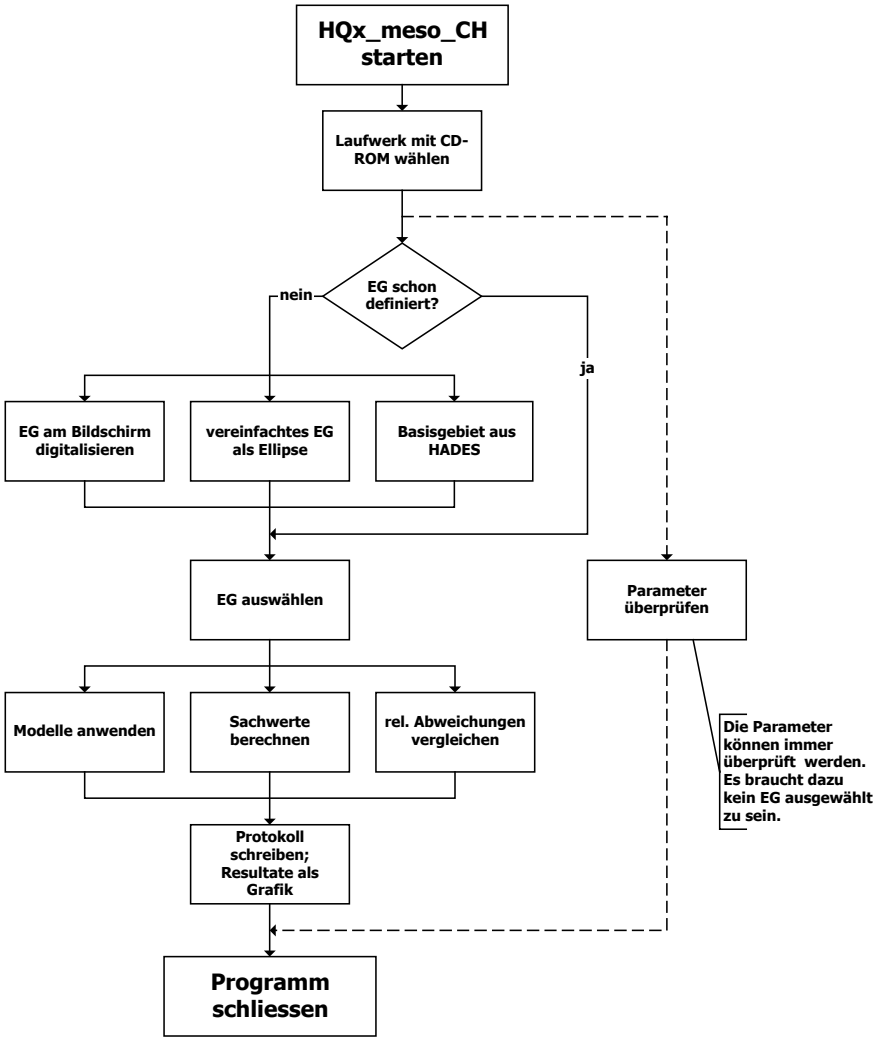


Abbildung 4.2: Schematischer Ablauf einer Hochwasserberechnung in HQx_meso_CH.

HQx_meso_CH wurde in Borland Delphi, Professional, Version 3.0 programmiert und läuft unter Windows 95, 98 und NT.

Anwenderinnen und Anwender werden von einem kleinen Frosch (der Hinweise geben kann), von der entsprechenden Farbgebung und von der Sperrung/Öffnung von Schaltern (vgl. Abbildung 4.1) durch das Programm geführt, so dass auch Erstbenutzer ein HQ_x bestimmen können.

Bei einer Hochwasserabschätzung brauchen sich die Anwender nicht darum zu kümmern, welche Datensätze für welche Modelle benötigt werden. Nach der Auswahl eines Einzugsgebietes (links in Abbildung 4.3 das Einzugsgebiet der Langeten im entsprechenden Koordinatensystem) trägt HQx_meso_CH die Parameter aus den aufbereiteten und auf der CD-ROM gespeicherten Dateien zusammen und führt die Berechnungen automatisch durch.

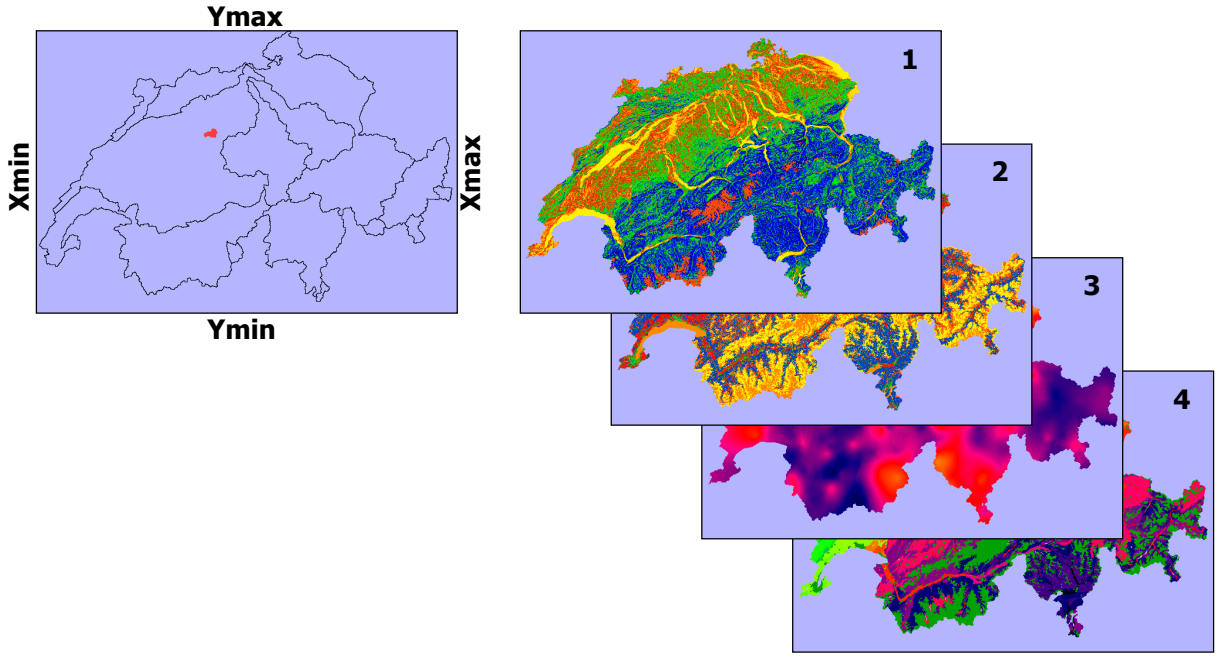


Abbildung 4.3: Datensätze in HQx_meso_CH. Links: Definition des Einzugsgebietes. Rechts: Modellparameter oder Parameter, die noch weiterverarbeitet werden.

Sämtliche Dateien mit räumlichen Daten, die in HQx_meso_CH für die Berechnung von Hochwasserspitzen verwendet werden, haben die gleiche Ausdehnung (Xmin, Xmax, Ymin und Ymax [Landeskoordinaten] sind identisch) und Auflösung (Hektarraster). Damit die Verfahren des Blocks *Modelle* angewandt werden können, muss auch das Einzugsgebiet in diesem System vorliegen (vgl. Kapitel 4.2.1). HQx_meso_CH sucht sich bei jedem Modell die notwendigen Parameterwerte für diejenigen Rasterpunkte, die als Einzugsgebiet ausgewiesen werden. In einem GIS würde man hier von *Überlagerung* oder von *overlay* sprechen.

In Abbildung 4.3 rechts sind beispielhaft vier Datensätze dargestellt, die in einzelnen oder mehreren Abschätzmodellen benötigt werden. Insgesamt werden in HQx_meso_CH knapp 30 Dateien bereitgestellt. Das können abgeleitete Modellparameter sein (c-Wert nach Kürsteiner, Nr. 1), das können Parameter sein, die als Gebietsmittel direkt in Regressionsgleichungen einfliessen (bestimmte Klassen der Arealstatistik, z.B. die Gletscherfläche, Nr. 2), das können aber auch Daten sein, die noch in irgendeiner Form weiterverarbeitet werden (Starkniederschläge nach HADES, Nr. 3; Bodeneignungskarte, Nr. 4).

4.2 Die Komponenten von HQx_meso_CH

4.2.1 Eingabe/Definition der Einzugsgebiete

In HQx_meso_CH gibt es drei Möglichkeiten, Einzugsgebiete zu definieren (vgl. Abbildung 4.4; Block *EG definieren*):

- Die Einzugsgebietsgrenzen werden am Bildschirm digitalisiert und in das Landeskoordinatensystem transformiert.
- Das Einzugsgebiet wird vereinfachend als Ellipse betrachtet (mit dem gleichen Schwerpunkt und der gleichen Fläche).
- Das Einzugsgebiet wird aus den Basisgebieten des Hydrologischen Atlas der Schweiz (Breinlinger et al. 1992) zusammengesetzt.

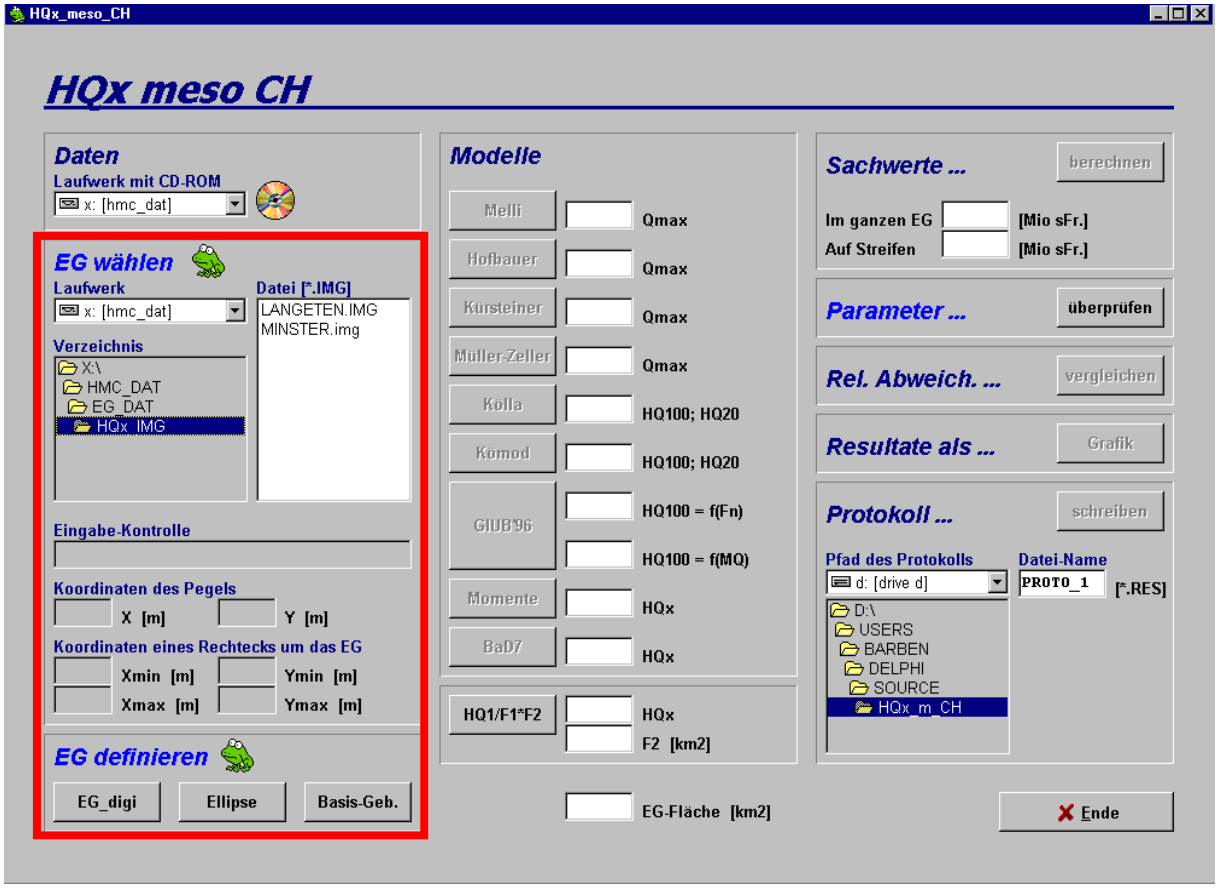


Abbildung 4.4: *Einzugsgebiet wählen/definieren* auf dem Hauptformular von HQx_meso_CH.

a) Einzugsgebiet digitalisieren (EG_digi)

Das Digitalisieren von Linien ist eine typische GIS-Funktion. HQx_meso_CH ist als autonomes Arbeitsinstrument konzipiert worden, das möglichst universell eingesetzt werden kann. Damit es auch unabhängig von einem GIS arbeiten kann, ist ein Programm geschrieben worden, das das Digitalisieren von Einzugsgebietsgrenzen am Bildschirm erlaubt (Abbildung 4.5)[2].

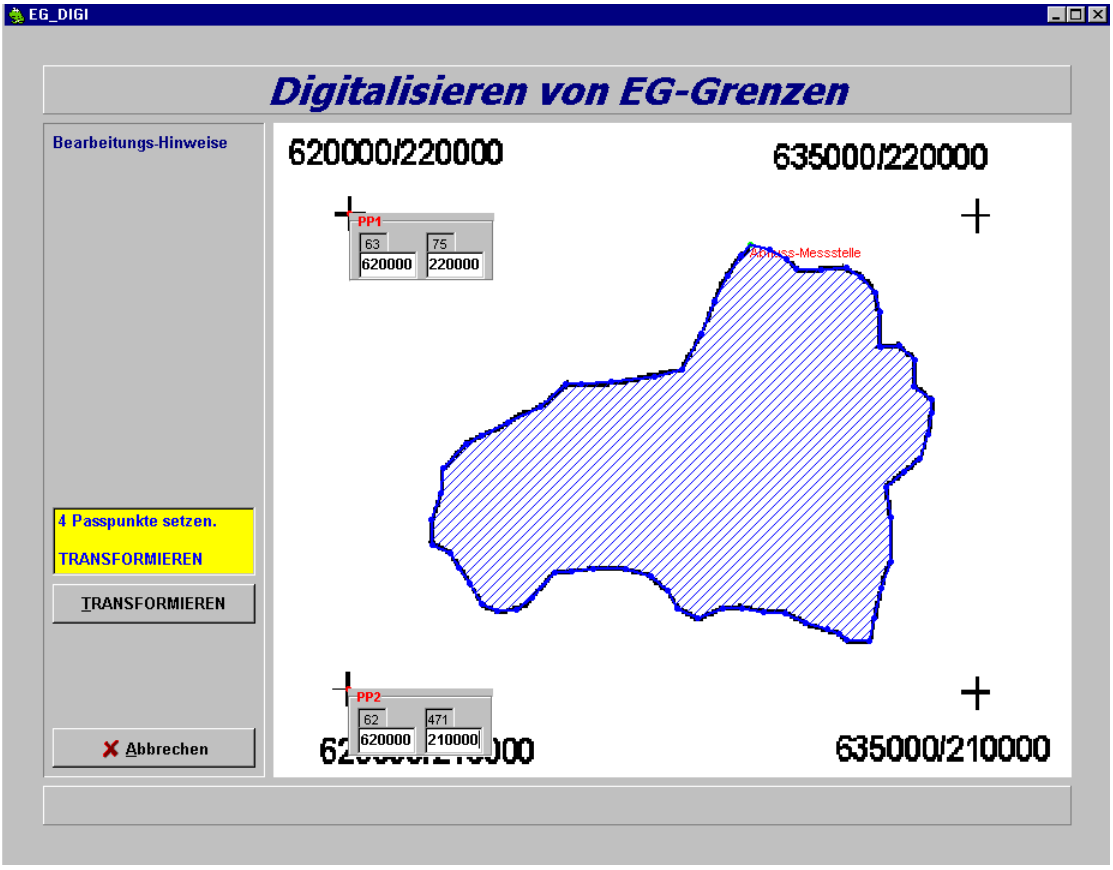


Abbildung 4.5: Einzugsgebietsgrenzen digitalisieren in HQx_meso_CH.

Die Arbeitsschritte:

1) Das Einzugsgebiet auf einer topografischen Landeskarte im passenden Massstab abgrenzen[3].
2) Die Grenzen – zusammen mit vier Passpunkten – auf eine Folie übertragen.
3) Das Bild auf der Folie mit einem Scanner in ein Bitmap (BMP-Datei) umwandeln.
4) Die BMP-Datei wird von HQx_meso_CH gelesen und am Bildschirm dargestellt.

---

2 Es existieren Programme auf dem Markt, die aus einem digitalen Geländemodell Einzugsgebiete ableiten. Solche und ähnliche Instrumente können selbstverständlich genutzt werden, solange sie die Dateien liefern, die HQx_meso_CH für die Anwendung der Hochwasser-Abschätzmodelle benötigt.

3 Wenn die Einzugsgebietsgrenzen schon in einem GIS vorhanden sind, geht es noch einfacher. Dann kann man sich die Grenzen mit den Passpunkten auf ein Blatt drucken und mit dem 3. Schritt weiterfahren.

5) Die Grenzen am Bildschirm digitalisieren.

6) HQx_meso_CH tranformiert mit Hilfe der vier Passpunkte das Einzugsgebiet vom Bildschirmkoordinatensystem in das Landeskoordinatensystem.

Ein bis zwei Stunden sollten ausreichen, um diese Arbeitsschritte auszuführen. Anschliessend kann direkt mit der Berechnung der Hochwasserspitzen begonnen werden.

Das ist die aufwendigste, aber auch flexibelste Art, beliebige Einzugsgebiete für HQx_meso_CH zu definieren.

b) Ellipse als vereinfachtes Einzugsgebiet (Ellipse)

In bestimmten Fällen – beispielsweise für eine Vorabklärung oder wenn kein Scanner zur Verfügung steht – kann es nützlich sein, auf eine abgekürzte Eingabe der Einzugsgebietsgeometrie zurückzugreifen. In einer kleinen Analyse wurde untersucht, wie sich die Vereinfachung der Einzugsgebietsgeometrie auf die Resultate der Hochwasserabschätzungen auswirkt. Dabei wurde anstelle der *genauen* digitalisierten Form ein flächengleicher Kreis mit dem gleichen Schwerpunkt (Lage im Raum) verwendet. Es hat sich gezeigt, dass sich die Resultate bei den einfachen Modellen, deren Parameter keinen Bezug zum Gewässernetz haben, kaum unterscheiden.

HQx_meso_CH unterstützt die Anwender bei der Dimensionierung einer Ellipse (Abbildung 4.6). Mit einer allgemeinen Ellipse lässt sich die Form vieler Einzugsgebiete recht gut anpassen.

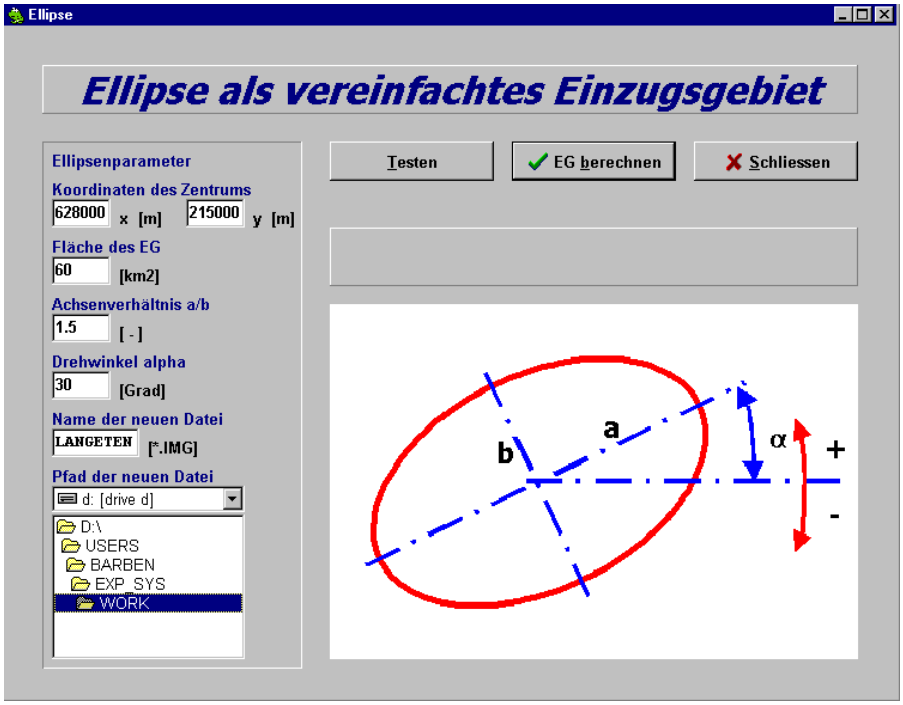


Abbildung 4.6: Ellipse mit gleicher Fläche als vereinfachtes Einzugsgebiet.

Vom Programm werden die Koordinaten des Schwerpunktes (eine Schätzung genügt), die Fläche des Gebietes, das Achsenverhältnis und der Drehwinkel der Hauptachsen zur Horizontalen abgefragt. Um die Ellipse zu überprüfen, kann sie, auf die Basisgebiete des HADES überlagert, betrachtet werden (Abbildung 4.7). Wenn die Ellipse passt, kann eine Datei berechnet werden. Passt sie nicht, werden die Parameter solange verändert, bis man mit der Anpassung zufrieden ist.

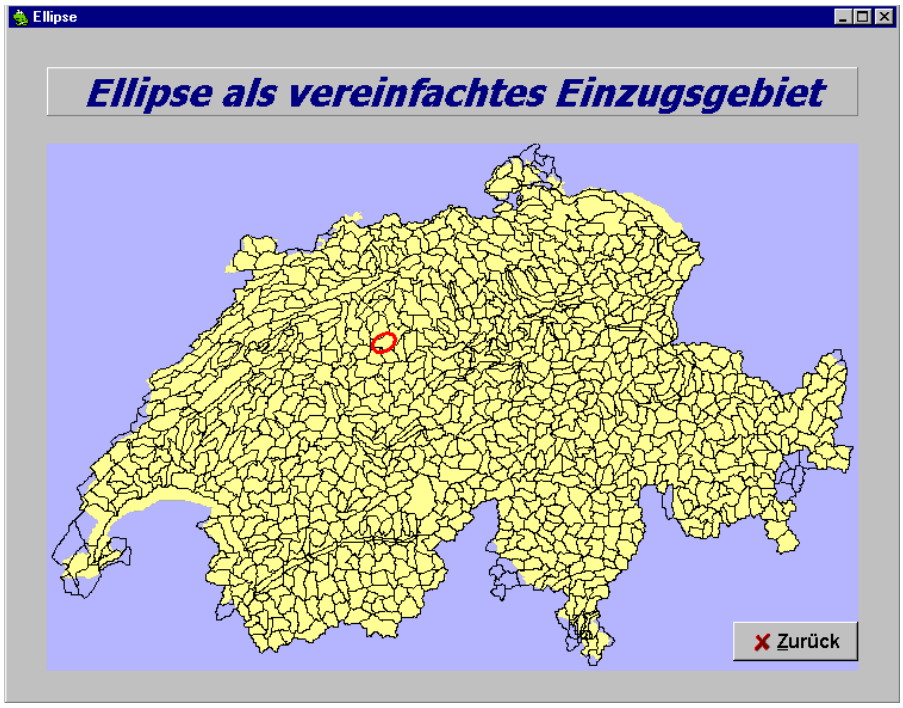


Abbildung 4.7: Lage und Form der Ellipse überprüfen.

Die Dokumentations-Dateien (*.DOC und *.TXT, vgl. Kapitel 4.1) werden automatisch erstellt. Nach der Berechnung der Ellipse kann man sofort mit der Hochwasserabschätzung beginnen.

c) Basis-Gebiet (**Basis-Geb.**)

Man kann sich den Fall durchaus vorstellen, dass das Einzugsgebiet, mit dem man arbeitet, einem oder mehreren Basisgebieten des HADES entspricht. Diesen Umstand gilt es zu nutzen, da die Geometrie der Basisgebiete bekannt und auf der CD-ROM vorhanden ist.

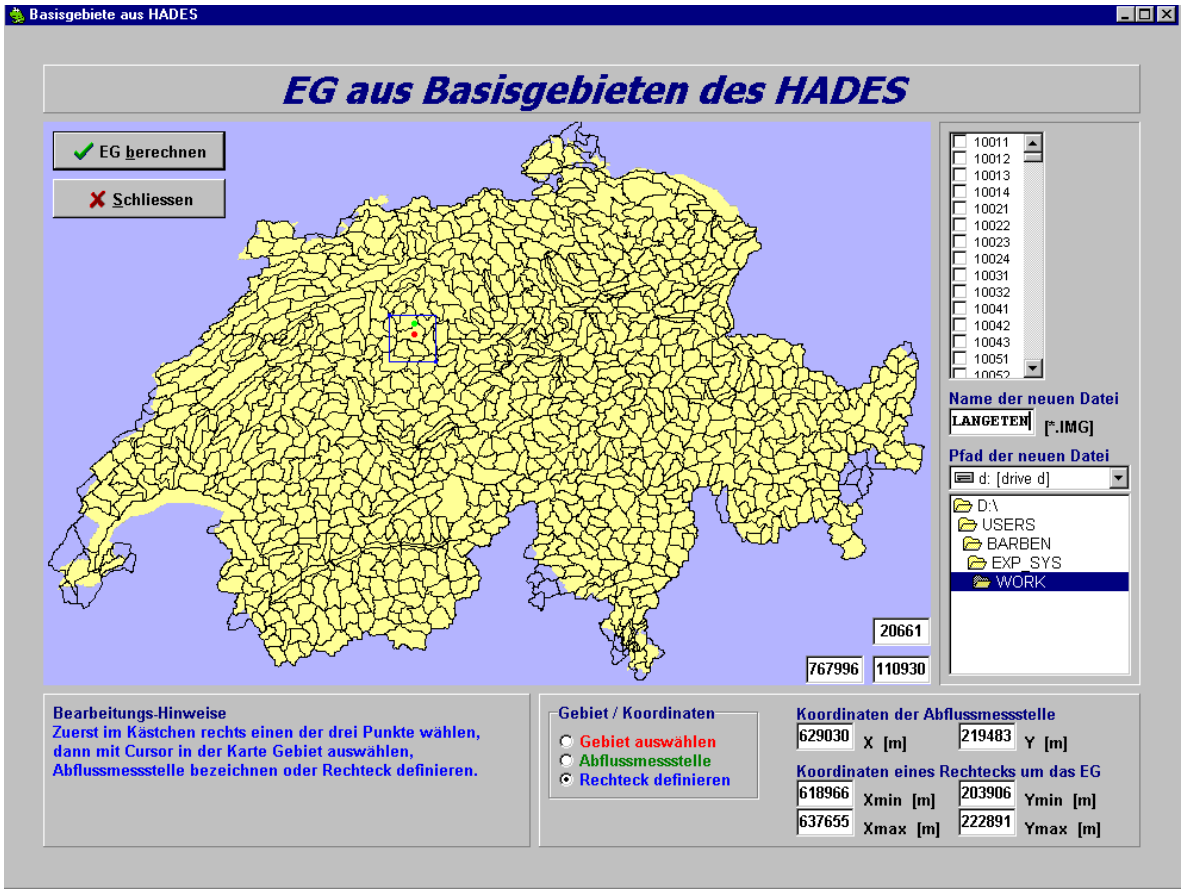


Abbildung 4.8: Auswahl der Basisgebiete.

Die Basisgebiete werden entweder mit dem Cursor in der Karte oder in einer Liste ausgewählt (Abbildung 4.8). Anschliessend wird – wieder mit dem Cursor – der ungefähre Ort der Abflussmessstelle gekennzeichnet und mit zwei gegenüberliegenden Eckpunkten ein Rechteck definiert, in dem das Einzugsgebiet möglichst knapp Platz findet. Damit wird die von HQx_meso_CH zu bearbeitende Fläche eingeschränkt und so die Rechenzeit für die anschliessenden Modellanwendungen massiv verkürzt.

4.2.2 Anwendung der Modelle

Alle benötigten Modellparameter sind aufbereitet und in einem einheitlichen Format auf einer CD-ROM gespeichert. Eine umständliche Datensuche entfällt, wodurch die Abschätzung von Hochwasserabflüssen scheinbar vereinfacht wird. Aber eben nur scheinbar, denn es gibt eine Verschiebung der Arbeit. **Ohne HQx_meso_CH** wird der grösste Teil der zur Verfügung stehenden Zeit für die Suche nach Datengrundlagen und für teilweise aufwendige Berechnungen geopfert. Auf zwei bis drei Resultaten, von denen man nicht abschliessend weiss, wie gut sie sind, beruht schliesslich die Festlegung der Bemessungsgrössen. Für weitergehende Interpretationen bleibt kaum Zeit. **Mit HQx_meso_CH** gelangt man mühelos und sehr rasch zu Ergebnissen, und die Fachleute können nun das tun, was sie eigentlich immer tun sollten: Sich mit den Eigenheiten der Modelle und des Einzugsgebietes auseinandersetzen. Dadurch werden Abschätzungen insgesamt vertrauenswürdiger und qualitativ besser.

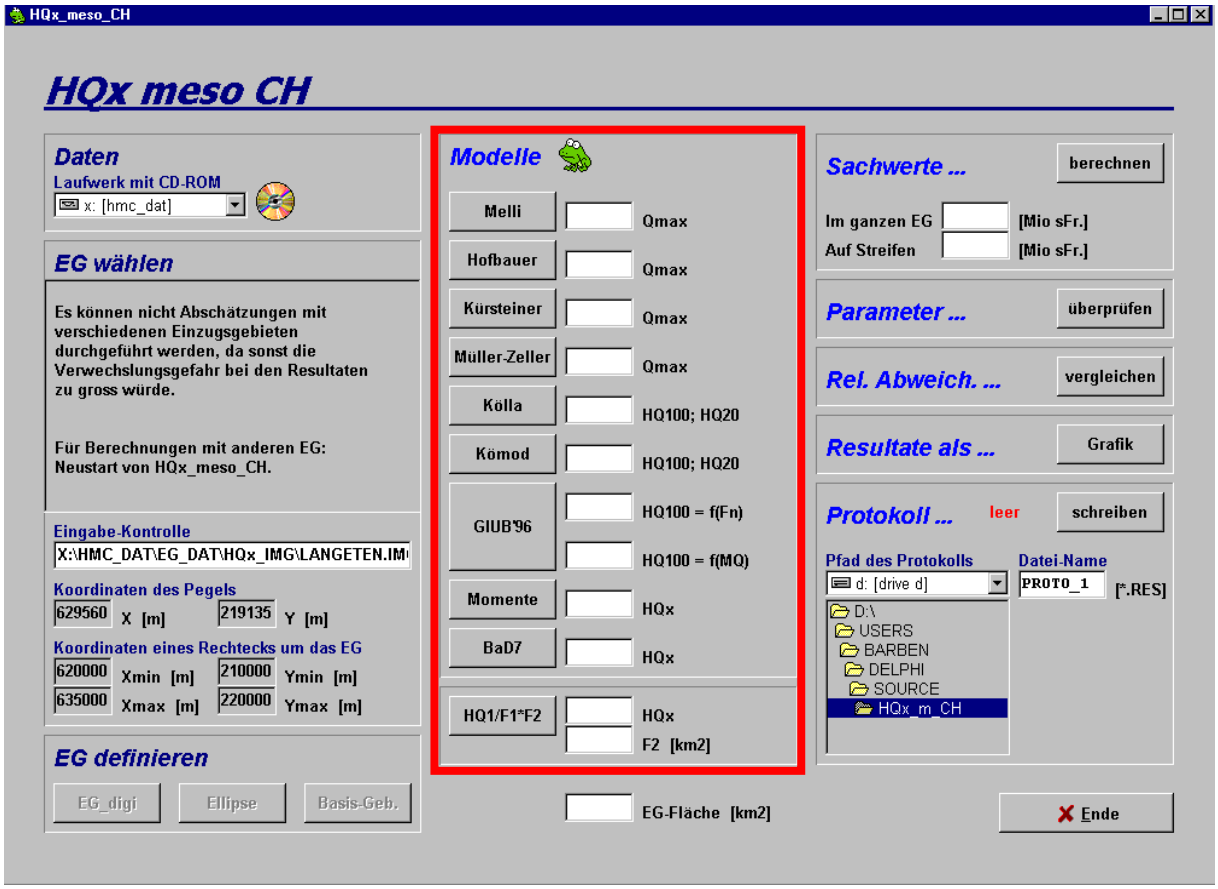


Abbildung 4.9: *Modelle* anwenden auf dem Hauptformular von HQx_meso_CH.

Um eine Hochwasserabschätzung zu erhalten, genügen in den meisten Fällen zwei Mausklicks:

- Im Hauptformular für die Wahl des Modells. Es erscheint ein neues Formular für das ausgewählte Modell (vgl. Abbildung 4.10).
- Im Modellformular für das Starten der Berechnung.

Am Beispiel von GIUB'96 kann die Philosophie von HQx_meso_CH gut gezeigt werden. GIUB'96 kennt zwei Ansätze für die Bestimmung der Hochwasserspitzen (siehe Kapitel 3.2.7). Einerseits den Ansatz mit HQ_{100} = f(Fn) und andererseits den Ansatz mit HQ_{100} = f(MQ). Der erste Ansatz bietet für die Anwender keinerlei Schwierigkeiten. Die Fläche (Fn) wird vom Programm zuverlässig bestimmt und je nach Lage des Einzugsgebietes in die entsprechende regional-differenzierte Funktion eingesetzt. Aufwendiger gestaltet sich die Arbeit mit dem zweiten Ansatz. Von einem Gebiet sollte (MQ) [m^3/s] bekannt sein. In einem ungemessenen Einzugsgebiet ist MQ nicht ohne weiteres verfügbar. In HQx_meso_CH ist ein MQ-Modell von Weingartner und Aschwanden (1992) integriert, das den mittleren Abfluss für beliebige Einzugsgebiete der Schweiz schätzt. Das Modell hat die Eingabeparameter Sommerniederschlag, Verhältnis Sommer- zu Winterniederschlag, mittlere Jahrestemperatur und Vergletscherung. In HQx_meso_CH wird für die Berechnung eines HQ_{100} standardmässig der mittlere Jahresabfluss aus diesem MQ-Modell verwendet. Verfügen die Anwender aber über zuverlässige Quellen, kann ein *eigener* MQ in ein Editierfeld eingegeben und mit diesem Wert weitergerechnet werden.

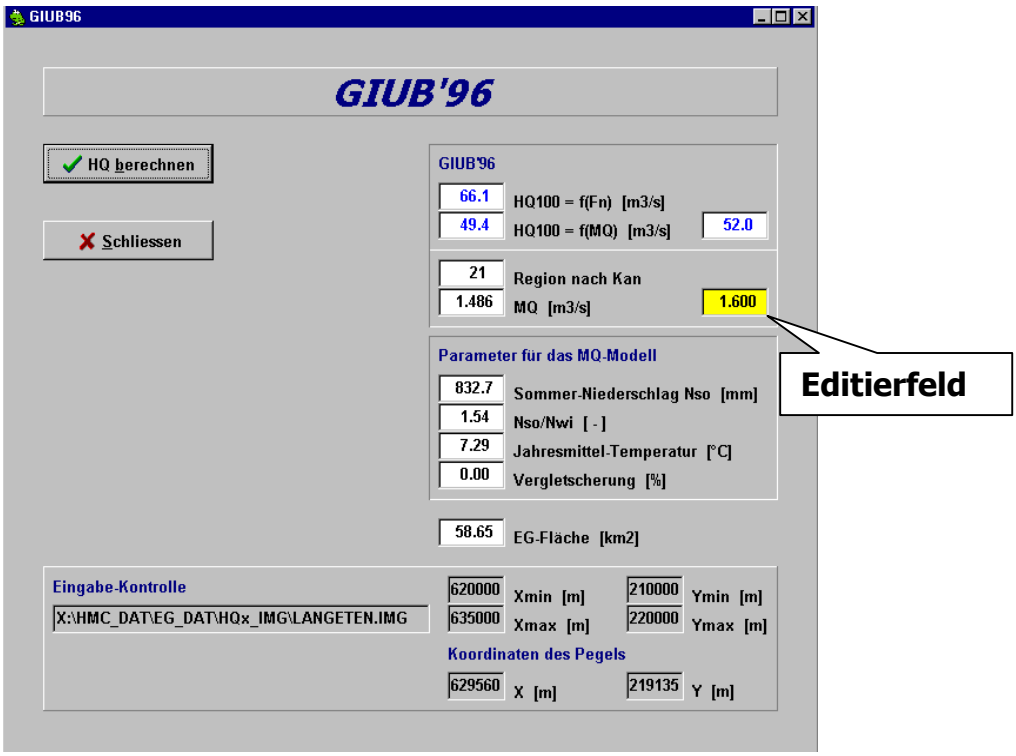


Abbildung 4.10: Das Modell GIUB'96.

Die von HQx_meso_CH automatisch erhobenen Parameter sollten immer als Vorschläge verstanden werden. Es gibt vielleicht Anwenderinnen und Anwender, die sich schon längere Zeit mit einem der hier integrierten Modelle beschäftigen und in einem Einzugsgebiet, das sie besonders gut kennen, andere Werte einsetzen würden. Diese Anwenderinnen und Anwender erzielen im Einzelfall möglicherweise bessere Resultate als das Programm mit den standardisierten Parametern. Das gilt aber nur für die Modelle mit sehr wenigen summarischen Parametern (z.B. bei Kürsteiner) und für Modelle mit physikalisch messbaren Parametern (z.B. Kölla), bei denen die Orts-

kenntnisse den kleinmassstäblichen Karten überlegen sind. Das gilt aber nicht für die neueren Ansätze, die viele Gebietskenngrössen in komplexer Art und Weise miteinander verbinden (z.B. Momente oder BaD7).

Wenn die Resultate aller Modelle im Hauptformular vorliegen, kann mit der Interpretation der Ergebnisse begonnen werden. HQx_meso_CH nimmt den Anwendern die Entscheidung der Wahl des Bemessungshochwassers nicht ab, sondern unterstützt sie mit Hilfsmitteln für die Entscheidungsfindung. Zu diesen Hilfsmitteln gehört auch *Relative Abweichungen vergleichen* (siehe Abbildung 4.9).

In Kapitel 3.2 werden zu jedem Modell im Abschnitt *Güte der Resultate* die relativen Abweichungen von den Referenzwerten dargestellt; einmal als Pseudo-3D-Grafik und einmal in sieben Abweichungs-Klassen auf der Grundlage der Basisgebiete des HADES.

Unter dem Punkt *Relative Abweichungen vergleichen* wird diese Information als Unterstützung bei der Interpretation der Ergebnisse der Abschätzungen angeboten (Abbildung 4.11). Die Information kann in dem Sinn genutzt werden, dass scheinbare Ausreisser in der Zusammenstellung der Resultate als solche erkannt werden, wenn die betreffenden Modelle im betreffenden Basisgebiet grosse relative Abweichungen aufweisen.

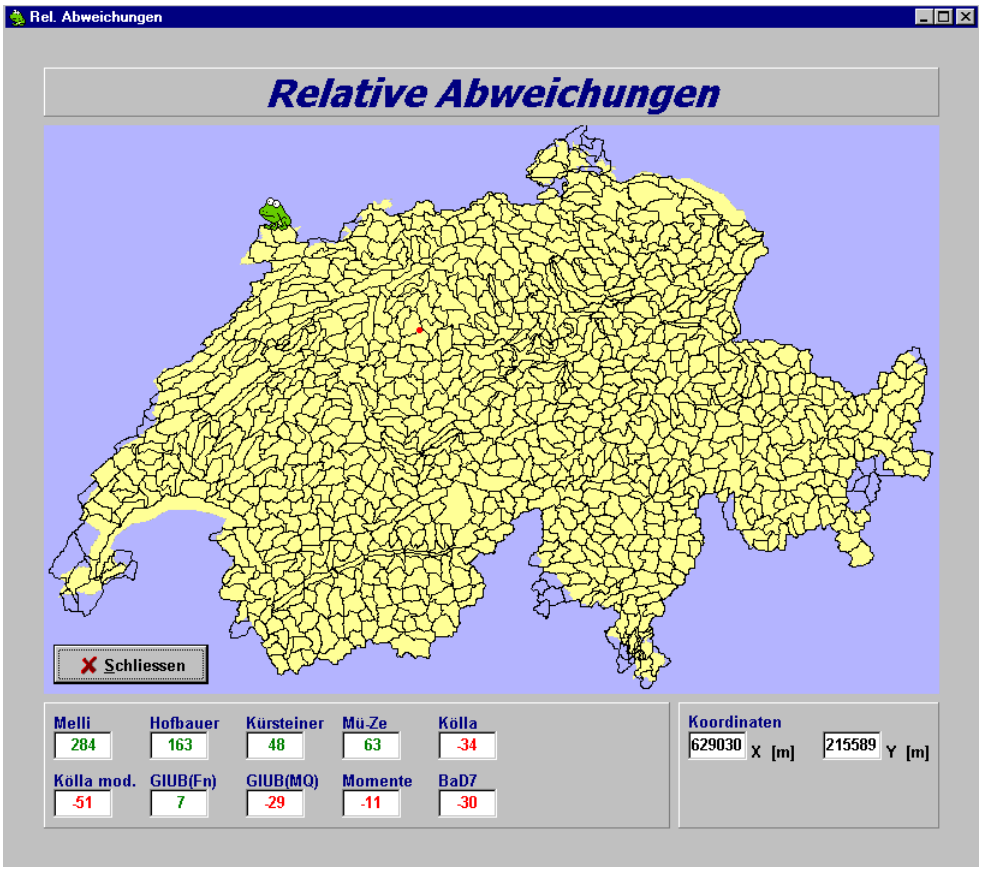


Abbildung 4.11: Relative Abweichungen pro Basisgebiet und Modell.

Mit dem Cursor kann in ein beliebiges Basisgebiet gefahren und durch Drücken der linken Maustaste für alle Modelle die relative Abweichung vom Referenzwert [%] für dieses Basisgebiet abgefragt werden (die zehn Werte erscheinen unten links in den entsprechenden Feldern). Im Unterschied zu Kapitel 3.2 sind es hier nicht klassierte Werte, sondern die Mittelwerte pro Basisgebiet. Diese werden wie folgt berechnet: Aus den relativen Abweichungen der 95 Referenzstationen wird mit einer räumlichen Interpolation (distanzgewichteter Mittelwert der Stützstellen) auf ein 100 m-Raster ein flächendeckender Datensatz dieser Abweichungen erstellt. Für jedes Baisisgebiet und jedes Modell wird anschliessend ein Mittelwert berechnet.

Die Abschätzungen aus dem Hauptformular, zusammen mit den Informationen zu den relativen Abweichungen, liefern eine gute Grundlage für die Festlegung eines Bemessungswertes.

Abbildung 4.12 zeigt das Hauptformular mit den Ergebnissen der Hochwasserabschätzung aller Modelle und mit der Summe der Sachwerte für das Einzugsgebiet der Langeten.

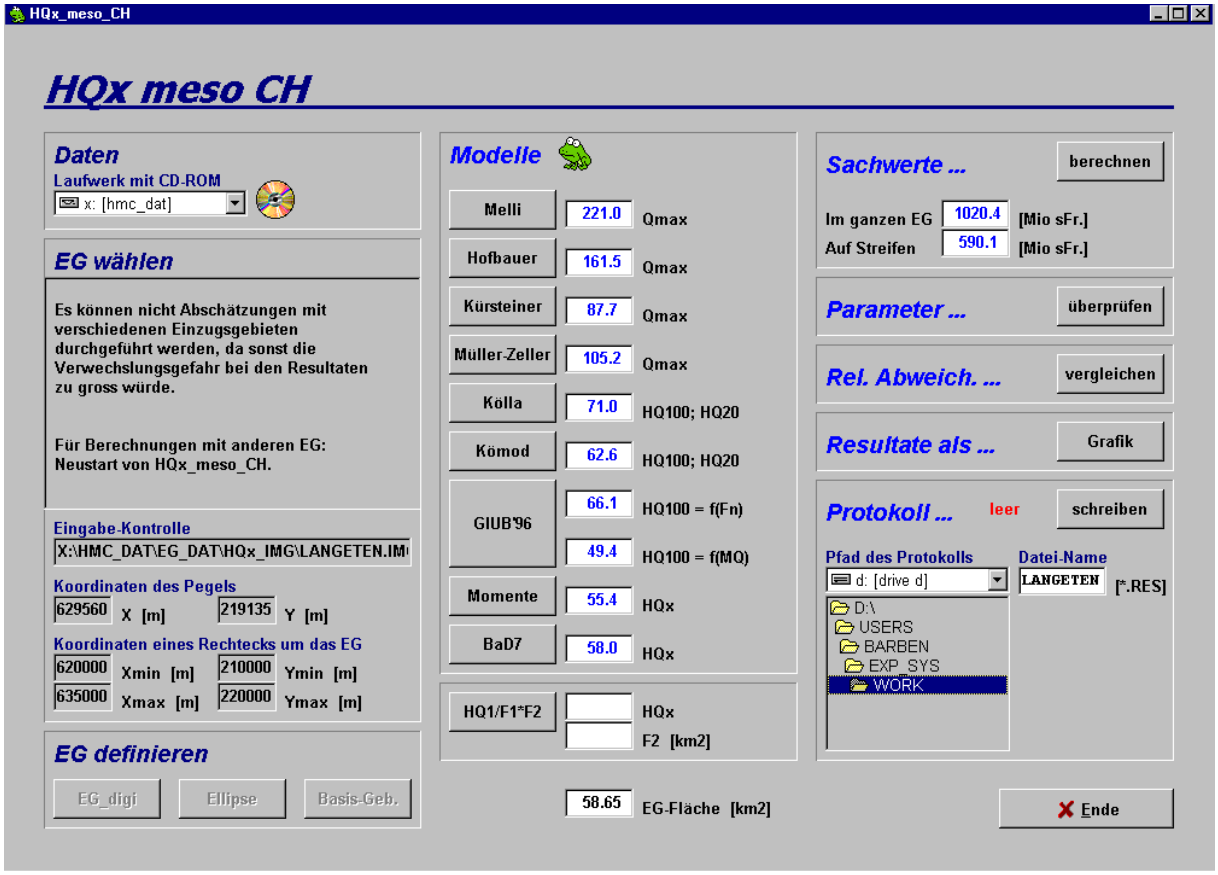


Abbildung 4.12: Hauptformular von HQx_meso_CH mit den Ergebnissen aller Modelle.

4.2.3 Schadenpotential

Das Schadenpotential (oder hier die Summe der Sachwerte) spielt in dieser Arbeit in zweierlei Hinsicht eine wichtige Rolle:

- Die Kenntnis des Schadenpotentials ist entscheidend für die Beurteilung des Hochwasserrisikos. Ein Risiko wird durch die Multiplikation des Schadenpotentials mit der Eintretenswahrscheinlichkeit bestimmt (dazu mehr in Kapitel 4.3).
- Das Schadenpotential kann unter Umständen das weitere Vorgehen nach der Berechnung der Hochwasserabflüsse aus Kapitel 4.2.2 bestimmen. Wenn die Ergebnisse der Abschätzungen stark streuen und sich die widersprüchlichen Resultate nicht plausibel erklären lassen und wenn gleichzeitig das Schadenpotential sehr hoch ist, sind gründlichere, langwierige Abklärungen nötig (was das bedeutet, wird in Kapitel 5 diskutiert).

Mit HQx_meso_CH hat man die Möglichkeit, auf einfache Weise eine Grössenordnung des Schadenpotentials für eine potentielle Überflutungsfläche zu berechnen. Niggli (1999) hat in einer Diplomarbeit am Geografischen Institut der Universität Bern versucht, jeder Hektare der Arealstatisitk (BFS 1985) einen Geldwert zuzuordnen. Wenn man nun in der Lage ist, für eine gegebene Wassermenge mit dem Vergleich der Gerinnekapazität eine Überflutungsfläche abzugrenzen, kann man durch Aufsummieren der Geldwerte ein Schadenpotential berechnen. Genau dies wird in HQx_meso_CH gemacht. Der Karte von Niggli (1999) wird entweder ein ganzes Einzugsgebiet oder eine speziell definierte Überflutungsfläche überlagert (zu digitalisieren wie in 4.2.1 beschrieben). Damit werden die entsprechenden Operationen durchgeführt.

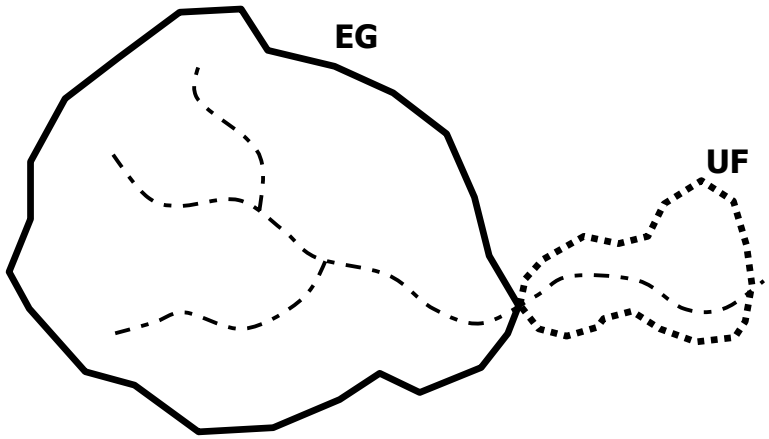


Abbildung 4.13: Einzugsgebiet (EG) und Überflutungsfläche (UF) für eine bestimmte Gewässerstelle.

Für die Situation in Abbildung 4.13 müssen zwei unterschiedlich benannte Dateien hergestellt werden (siehe Kapitel 4.2.1). Mit der Datei mit den Grenzen des Einzugsgebietes (EG) werden die Hochwasserspitzen abgeschätzt, und mit der Datei mit den Grenzen der Überflutungsfläche (UF) wird das Schadenpotential berechnet.

Die Operation *Sachwerte berechnen* lässt sich natürlich auch auf das ganze Einzugsgebiet anwenden. Damit erhält man nicht das Schadenpotential einer Überflutungsfläche, sondern – als Überblick – des ganzen Einzugsgebietes. Das scheint zwar hydrologisch wenig sinnvoll zu sein, hilft aber bei einer ersten Einordnung des Gebietes.

Hydrologisch realistischere Verhältnisse bietet der folgende Ansatz. Mit dem digitalen Gewässernetz der Landeskarte 1:200'000 wurde für HQx_meso_CH eine Distanzkarte berechnet. Jede Rasterzelle der Datei enthält die Distanz [m] zum nächsten Gewässer. Kombiniert man diese Distanzkarte mit der in Geldwerte umgesetzten Arealstatistik kann innerhalb des definierten Gebietes (das kann das ganze Einzugsgebiet oder eine Überflutungsfläche sein) auf einem beliebig breiten Streifen beidseits des Gewässers das Schadenpotential berechnet werden.

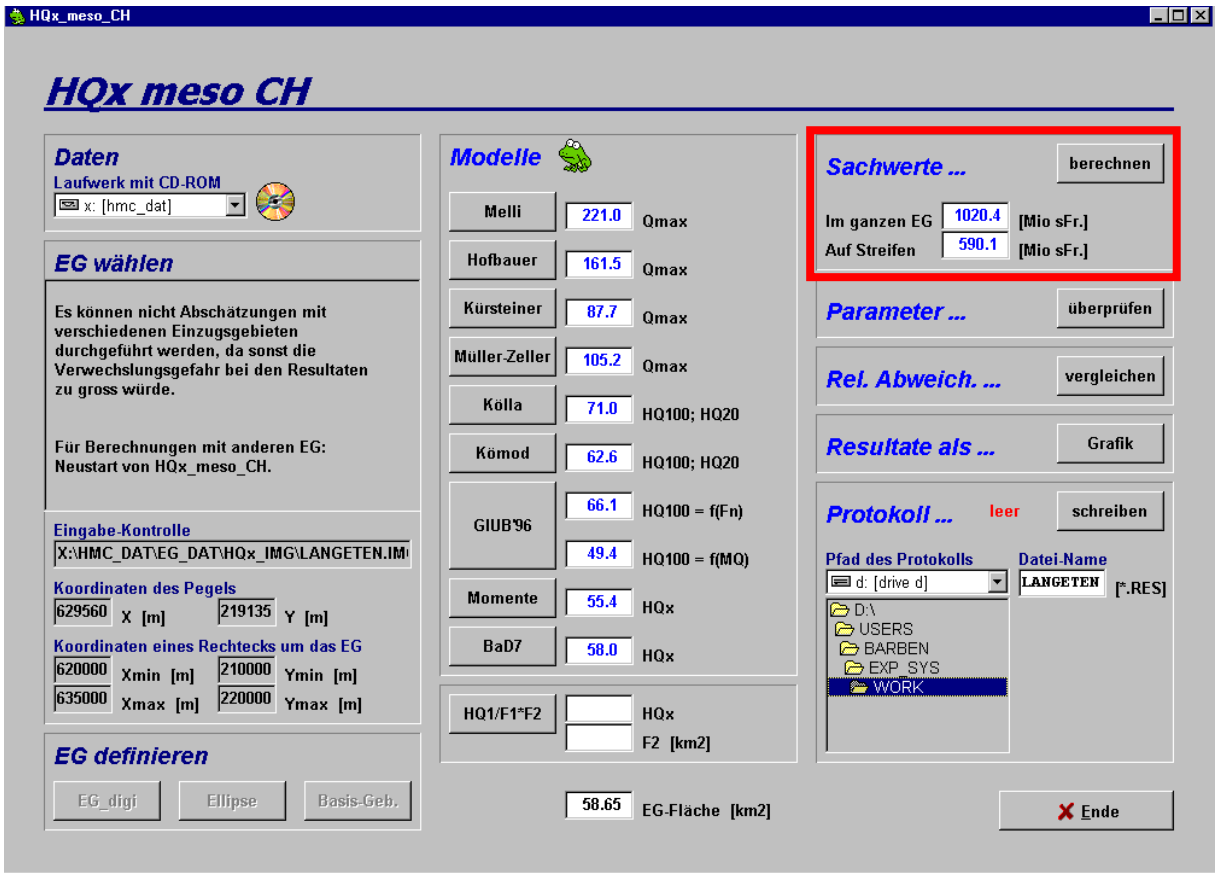


Abbildung 4.14: *Sachwerte berechnen* auf dem Hauptformular von HQx_meso_CH.

Der Block *Sachwerte berechnen* gibt für ein ausgewähltes Gebiet zwei Ergebnisse zurück:

- Das Schadenpotential des ausgewählten Gebietes (EG oder UF).
- Das Schadenpotential auf einem beliebig breiten Streifen beidseits des Gewässers, innerhalb EG oder UF.

4.2.4 Parameterüberprüfung

Die Werte der verschiedenen Modellparameter können auf den entsprechenden Formularen nur einzugsgebietsweise aufgelistet werden. Manchmal wäre es aber praktisch und sinnvoll, einzelne Kenngrössen detaillierter abfragen zu können. Beim Modell GIUB'96 beispielsweise kann der Wechsel der Regionszugehörigkeit das Ergebnis der Hochwasserabschätzung sehr stark beeinflussen. Die Anwenderin und der Anwender haben nun die Möglichkeit zu überprüfen, ob eine Regionsgrenze in der Nähe des Einzugsgebietes verläuft, oder ob es sich um einen unumstritten Fall handelt.

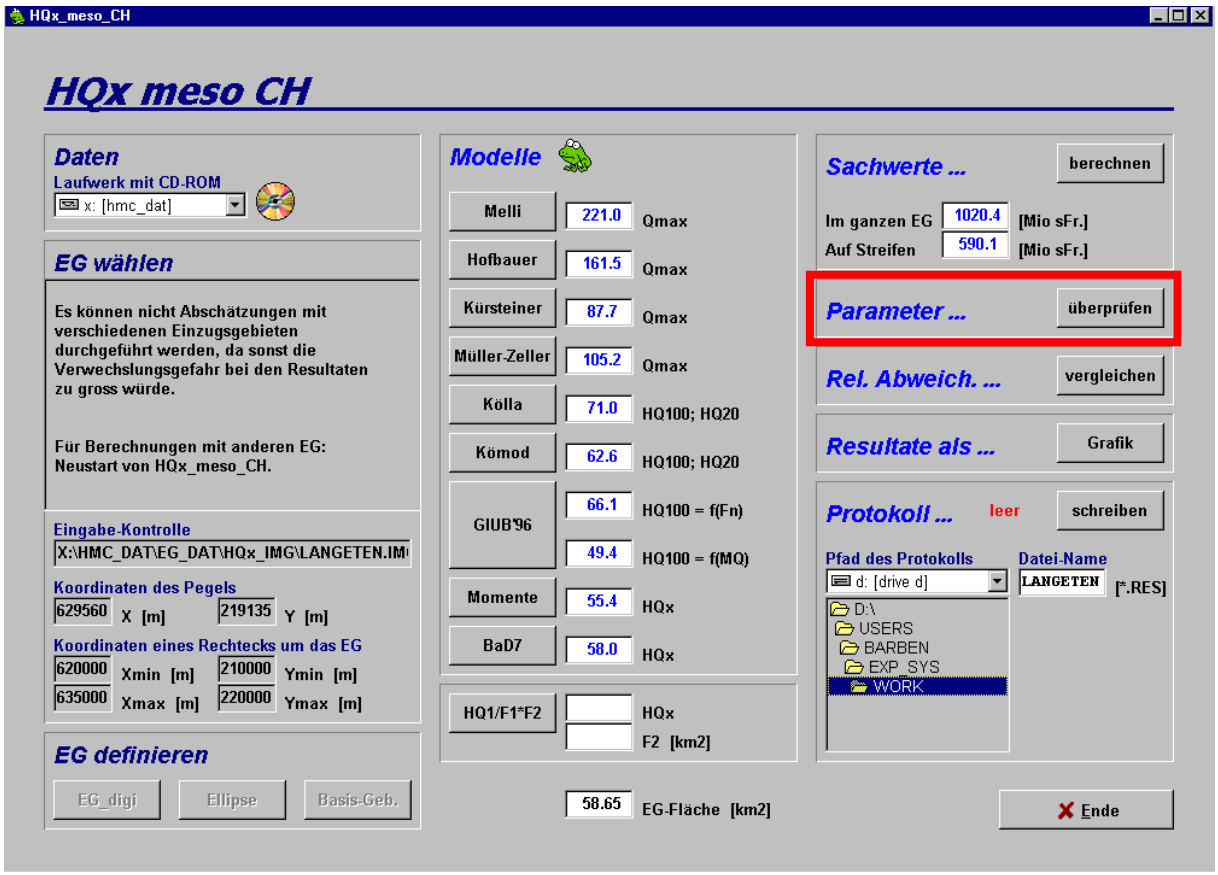


Abbildung 4.15: *Parameter überprüfen* auf dem Hauptformular von HQx_meso_CH.

Ausgewählte Parameter können – nach dem Drücken auf die Schaltfläche *überprüfen* im Block *Parameter* – auf einer kleinmassstäblichen Karte (Abbildung 4.16) überprüft werden. Auf dem Formular der einzelnen Modelle (vgl. Kapitel 4.2.2) werden die wichtigsten Parameter ebenfalls aufgeführt, dort handelt es sich aber um Mittelwerte ganzer Einzugsgebiete. *Parameter überprüfen* ist nicht an ein Einzugsgebiet gebunden und kann deshalb unabhängig durchgeführt werden.

Die Parameter können sehr einfach und schnell überprüft werden. Man fährt mit dem Cursor in die Karte (Abbildung 4.16) und drückt an einer beliebigen Stelle die linke Maustaste. Darauf erscheinen in den Feldern unter der Karte die Parameterwerte für den ausgewählten Punkt.

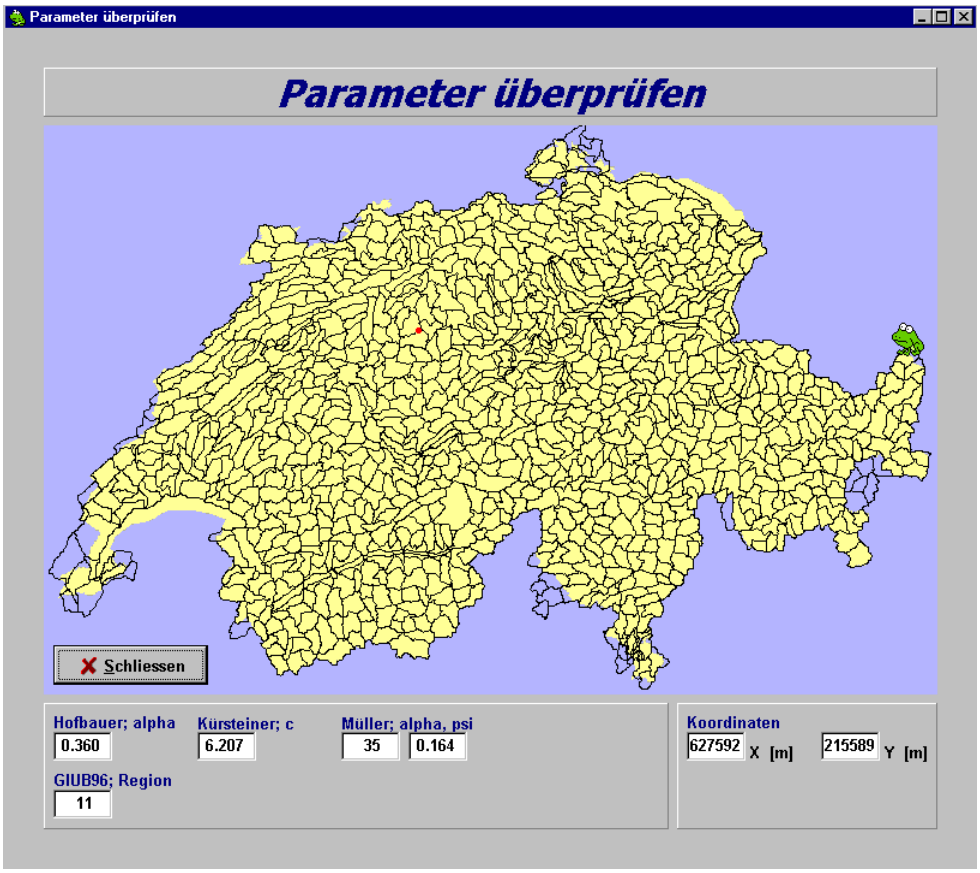


Abbildung 4.16: Das Formular *Parameter überprüfen.*

Eine detailliertere Abfrage der Parameter könnte im GIS Idrisi durchgeführt werden. In Kapitel 4.1 wurde bereits erwähnt, dass die IMG-Dateien auf der CD-ROM in einem Idrisi-Format abgespeichert sind und mit diesem Softwarepaket bearbeitet und betrachtet werden könnten. Der Vorteil dieser Möglichkeit liegt bei der Qualität der Abfrage. Dank Zoomfunktionen, die in HQx_meso_CH fehlen, kann der Wert jeder Hektare abgefragt werden. Reklassifikationen der Werte würden ausserdem weitergehende Analysen ermöglichen.

4.2.5 Ausgabe der Resultate

Die Resultate, die im Block *Modelle* und *Sachwerte berechnen* auf dem Hauptformular erscheinen, werden einerseits in einem Balkendiagramm übersichtlich dargestellt (Abbildung 4.18) und andererseits in eine Textdatei geschrieben. Diese Datei kann ohne weiteres in ein Textverarbeitungs- oder ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert und dort weiterverarbeitet werden.

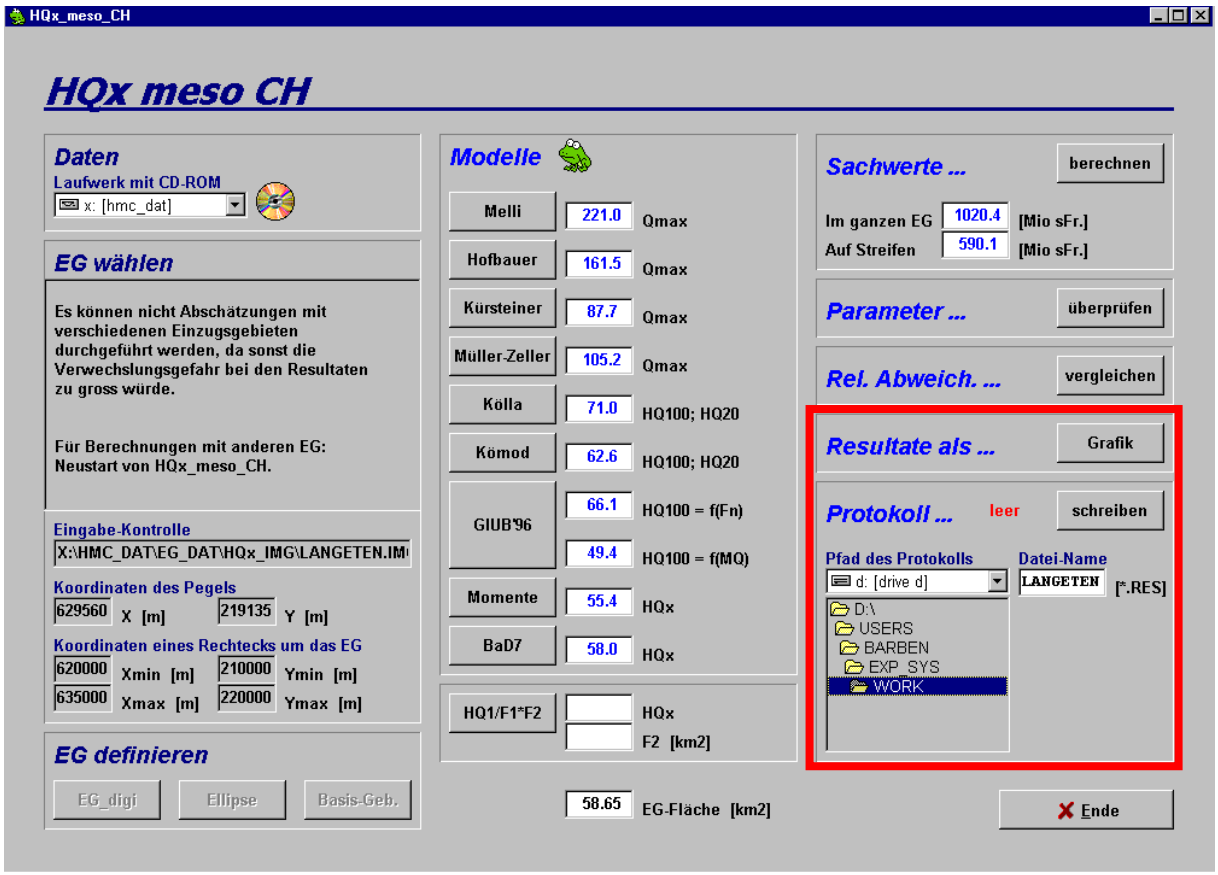


Abbildung 4.17: *Protokoll schreiben* auf dem Hauptformular von HQx_meso_CH.

Name und Zielort des Protokolls können frei gewählt werden. Die Schaltfäche *schreiben* im Block *Protokoll* kann mehrmals gedrückt werden. Ein schon existierendes Protokoll wird überschrieben oder unter einem neuen Namen zusätzlich abgespeichert. Damit hat man die Möglichkeit, Varianten zu berechnen und diese anschliessend zu vergleichen. So kann beispielsweise beim Modell GIUB'96 untersucht werden, wie sich eine Veränderung des mittleren Jahresabflusses (MQ) auf die Hochwasserspitze auswirkt (vgl. Abbildung 4.10).

Wurde die Schaltfläche *schreiben* nie betätigt, wird beim Verlassen von HQx_meso_CH ein Protokoll mit dem Namen PROTO_1.RES in das aktuelle Verzeichnis geschrieben. So wird vermieden, dass die berechneten Resultate durch eine Unachtsamkeit verloren gehen.

Wird im Zustand, wie er in Abbildung 4.17 dargestellt ist, die Schaltfläche *Protokoll schreiben* gedrückt, wird das folgende Protokoll geschrieben:

```
Hochwasser-Abschätzungen für das EG aus der Datei:
Z:\HMC_DAT\EG_DAT\HQx_IMG\LANGETEN.IMG
vom 19.12.00  12:00:00

EG-Flächen                                        [km2]
Abflüsse                                         [m3/s]
Summe der Sachwerte                          [Mio sFr.]

EG-Fläche                                          58.65

Melli              Qmax                            221.0
Hofbauer           Qmax                            161.5
Kürsteiner         Qmax                             87.7
Müller-Zeller      Qmax                            105.2
Kölla              HQx                              71.0
Kölla mod.         HQx                              62.6
GIUB‘96(Fn)        HQ100                            66.1
GIUB‘96(MQ)        HQ100                            49.4
Momente            HQx                              55.4
BaD7               HQx                              58.0

Summe Sachwerte,   ganzes EG                      1020.4
Summe Sachwerte,   Streifen                       590.1

Übertragung auf anderes EG:
                   HQx
                   EG-Fläche
```

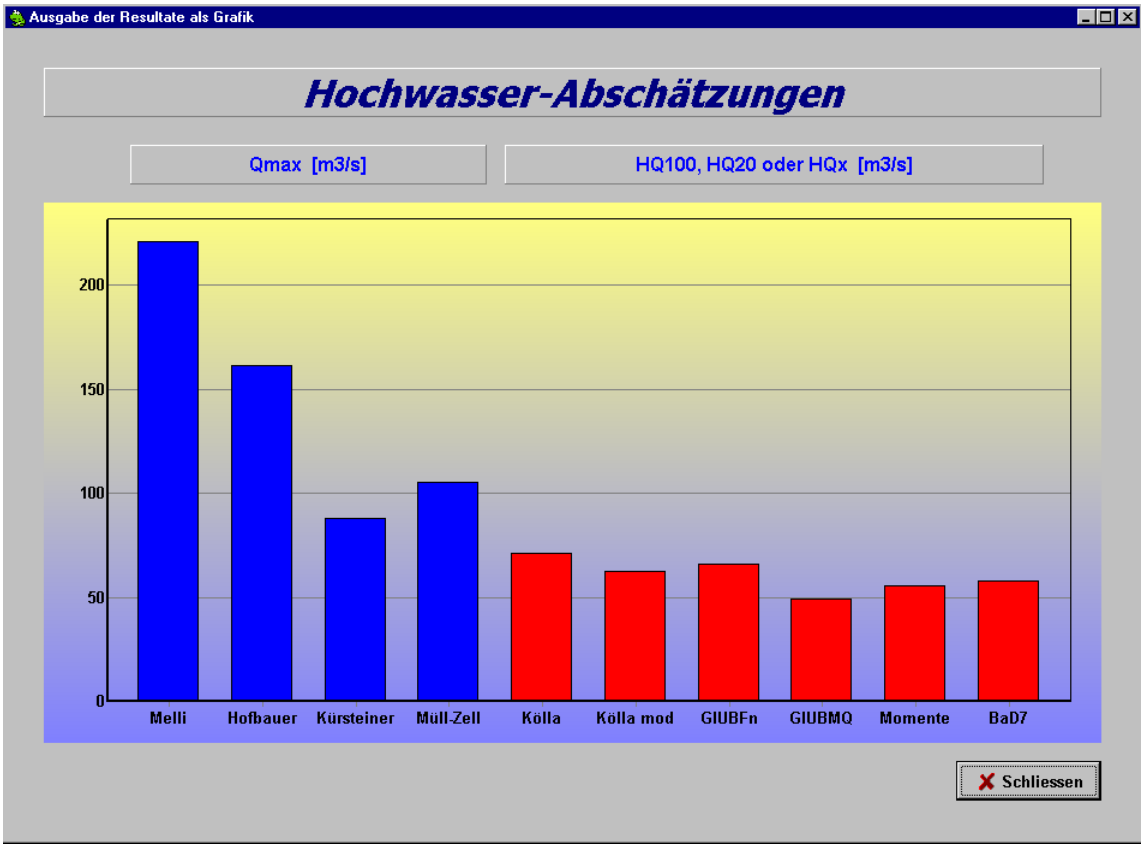


Abbildung 4.18: Das Formular *Resultate als Grafk*, eine Übersicht über alle Hochwasserabschätzungen.

4.3 HQx_meso_CH und Hochwasserrisiko

Der Schwerpunkt bei der Entwicklung von HQx_meso_CH lag ganz klar bei der Bestimmung von Hochwasserabflüssen. Das Schadenpotential (als Grössenordnung) hilft bei der Entscheidung, ob noch weitergehende intensive Analysen nötig sind. Aus den Kapiteln 4.1 und 4.2 geht jedoch hervor, dass HQx_meso_CH auch für die Beurteilung des Hochwasserrisikos eingesetzt werden kann. Einerseits kann das Schadenpotential für eine potentielle Überflutungsfläche berechnet werden, und andererseits liefert es die Hochwasserspitze bei einer gegebenen Eintretenswahrscheinlichkeit. Mit dem neuen Wasserbaugesetz, das seit 1993 in Kraft ist, wird eine Differenzierung der Schutzziele angestrebt. Es braucht in der Bemessungspraxis nun auch Modelle, die Abschätzungen für beliebige Wiederkehrperioden liefern können. Gefragt sind Modelle mit der Zielgrösse HQ_x (mit $20 < x < 100$).

Das Hochwasserrisiko an einer bestimmten Gewässerstelle kann folgendermassen ermittelt werden:

- Entsprechend der zu schützenden Werte wird der Massnahmenkatalog bestimmt (siehe dazu BWW (1995) und BWW (1997)). Eine extensiv bewirtschaftete Landwirtschaftsfläche benötigt nicht den gleichen Schutz wie ein Dorfkern oder eine Industriezone. Der Schutzgrad bestimmt die Wiederkehrperiode eines tolerierbaren Hochwasserereignisses. Eine landwirtschaftlich genutzte Fläche *darf* vielleicht alle zehn Jahre, eine Siedlungszone aber nur alle 100 Jahre überflutet werden.
- Mit HQx_meso_CH kann die Grössenordnung des Bemessungshochwassers berechnet werden (Kapitel 4.2.2).
- Das HQ_x wird mit der Gerinnekapazität (die mit hydraulischen Methoden bestimmt wird) an der fraglichen Gewässerstelle verglichen.
- Ist die Gerinnekapizität grösser als das ermittelte HQ_x, besteht kein Handlungsbedarf. Es kommt seltener zu Überschwemmungen, als man das zulassen würde.
- Wird die Gerinnekapazität überschritten, gibt es eine potentielle Überflutungsfläche, die auf einer Karte abzugrenzen ist (vgl. BWW 1998). Mit HQx_meso_CH kann das Schadenpotential der Überflutungsfläche ermittelt werden (Kapitel 4.2.3). Die Grösse des Schadenpotentials kann Auskunft darüber geben, ob es sinnvoller ist, die einzelnen Objekte zu schützen, oder ob ein Eingriff am Gerinne die bessere Wirkung zeitigt.

Zu den wichtigen Prinzipien einer Gefahrenbeurteilung gehören die sachliche Richtigkeit und eine gute Überprüfbarkeit. Ausserdem muss die Beurteilung mit angemessenem Zeitaufwand erfolgen (BUWAL 1998). Es ist sehr schwierig, objektiv Parameter zu bestimmen, wenn man schon weiss, wie sich ein Einzugsgebiet ungefähr verhält. Man wird bei der Parameterbestimmung unweigerlich den Spielraum in die entsprechende Richtung ausnutzen und sich so von den Modellen die Vorstellung bestätigen lassen, die man vor der Abschätzung bereits hatte. Vorwissen kann also ein Vorteil (Kenntnis von wichtigen Besonderheiten), aber auch ein Nachteil sein (ungerechtfertigte Ausnutzung des Spielraums bei diffusen Parametern; vgl. Anhang B3). Bei der Entwicklung von HQx_meso_CH wurde speziell darauf geachtet, dass den Anwenderinnen und Anwendern bei der Erhebung der Modellparameter viele Entscheidungen abgenommen werden. Oft sind nämlich sogar Experten überfordert,

wenn sie aus einer breiten Palette von Möglichkeiten auswählen müssen und dabei fast beliebige Resultate erzielen können. Das Expertenwissen ist aber vor allem dann gefragt, wenn es um die Interpretation von Ergebnissen geht oder wenn jemand sehr vertraut ist mit einem Modell und/oder einem Einzugsgebiet.

Dass auch Experten Mühe haben, objektiv zu bleiben, zeigt ein Experiment aus Tversky und Kahneman (1981). In der Psychologie ist unter dem Stichwort *Ankereffekt* ein Phänomen bekannt, das beschreibt, wie sich Personen durch irgendwelche Vorgaben bei einer Beurteilung stark beeinflussen lassen.

Das Experiment:

> Versuchspersonen in zwei Gruppen müssen schätzen, wieviele afrikanische Staaten Mitglied in der UNO sind.
>
> Es gibt zwei unterschiedliche Formulierungen der Fragestellung:
>
> 1) Ist die Anzahl der afrikanischen Staaten in den Vereinten Nationen grösser oder kleiner als **65**? Wieviele sind in der UNO?
>
> 2) Ist die Anzahl der afrikanischen Staaten in den Vereinten Nationen grösser oder kleiner als **10**? Wieviele sind in der UNO?
>
> Das Ergebnis der Untersuchung (durchschnittliche Schätzung):
>
> Gruppe 1: **45**
> Gruppe 2: **25**
>
> Interpretation:
>
> Die in der Frage vorgegebene Information dient als *Anker*. Das Urteil wird an den Anker angepasst.

Das Verblüffende und für die Hochwasserabschätzung Entscheidende: Der Ankereffekt verschwindet auch nicht...

- bei Bezahlung[4]
- bei Verwendung absurder Anker
- bei **Experten.**

Dieser dritte Punkt wurde im Programm HQx_meso_CH berücksichtigt. Man kommt ohne einen subjektiven Eingriff zu zehn Hochwasserabschätzungen. Die vorgeschlagenen Parameter und Zwischenresultate sollten nur verändert werden, wenn aus zuverlässiger Quelle bessere Werte vorliegen. Der Ankereffekt wird sich aber bei der Beurteilung der zehn Hochwasserabschätzungen bemerkbar machen (vgl. Abbildung 4.18). Wenn beispielsweise erwartet wird, dass es sich um ein sensitives Gebiet handelt, werden vermutlich die höchsten Werte ein grösseres Gewicht erhalten.

4 Mit Bezahlung ist nicht Bestechung gemeint. Die Tatsache, dass der Ankereffekt bei Bezahlung nicht verschwindet, widerlegt den möglichen Einwand, die Versuchspersonen wären uninteressiert und daher vielleicht in ihrem Urteil schlampig. Wenn sie für das korrekte Urteil belohnt werden, sind sie natürlich motiviert, möglichst gut und richtig zu urteilen.

Fazit aus Kapitel 4

Mit HQx_meso_CH verfügt man über ein sehr effizientes, praxisfreundliches Instrument für die Bestimmung von Bemessungsabflüssen und für die Analyse des Hochwasserrisikos in mesoskaligen, schweizerischen Einzugsgebieten.

Durch die Anwendung des neuen Werkzeugs kommt es zu einer massiven Verschiebung der Arbeit. **Ohne HQx_meso_CH** (Abbildung 4.19, oben) wird der grösste Teil der zur Verfügung stehenden Zeit für die Suche nach Datengrundlagen und für teilweise sehr aufwendige Berechnungen geopfert. Auf zwei bis drei Resultaten, von denen man nicht weiss, wie gut sie sind, beruht schliesslich die Festlegung der Bemessungsgrössen. Für weiter gehende Interpretationen bleibt kaum Zeit. **Mit HQx_meso_CH** (Abbildung 4.19, unten) gelangt man mühelos und sehr rasch zu Ergebnissen, und es bleibt mehr Zeit, sich mit den Eigenheiten der Modelle und des Einzugsgebietes auseinanderzusetzen. Dadurch werden Abschätzungen insgesamt vertrauenswürdiger und qualitativ besser.

Abbildung 4.19:

Arbeitsplatz ohne und mit HQx_meso_CH.

5 N-A-Modellierung – eine Alternative zu den Hochwasser-Abschätzmodellen?

Was ist zu tun, wenn die sogenannt *einfachen* Hochwasser-Abschätzmodelle versagen oder wenn sie widersprüchliche Ergebnisse liefern, die nicht zu interpretieren sind? Man hört immer wieder, die N-A-Modellierung sei eine Alternative. Sie sei zwar aufwendig, liefere aber qualitativ bessere Resultate.

In diesem Kapitel wird an einem Fallbeispiel gezeigt, unter welchen Umständen diese Behauptung stimmt und eine N-A-Modellierung auch in ungemessenen Einzugsgebieten sinnvoll sein kann.

5.1 Einleitung

Die Niederschlag-Abfluss-Modellierung (N-A-Modellierung) wird immer wieder als Wundermittel erwähnt, wenn einfache Verfahren, wie die in dieser Arbeit untersuchten, zu versagen drohen. Woher rührt diese Zuversicht? Es hängt bestimmt damit zusammen, dass nur wenige Leute, die sich mit der Hochwasserabschätzung beschäftigen, jemals N-A-Modelle eingesetzt haben. Die Nichtanwender können sich nicht vorstellen, dass auch N-A-Modelle grosse Schwierigkeiten bereiten können. Nur weil die Anwendung komplexer und zeitaufwendiger ist als bei den empirischen Methoden, leiten sie daraus ab, die Ergebnisse müssten zuverlässiger sein. Dieses Bild muss differenziert werden. Insbesondere in ungemessenen Einzugsgebieten – und um die geht es hier – ist die N-A-Modellierung heikel und nur unter ganz bestimmten Umständen sinnvoll und überhaupt möglich. Naef (1981) vermutet, dass Modelle mit wenigen und solche mit zahlreichen Parametern (die aufwendig geeicht werden müssen) oft zu Resultaten führen, die gar nicht sehr verschieden sind. Naef (1991) geht sogar soweit, einfache, übersichtliche Modelle zu empfehlen, da aufwendigere Modelle schwer zu durchschauen seien und es ausserdem noch nicht bewiesen sei, dass sie auch wirklich bessere Resultate lieferten. Dieser Beweis liegt in der Tat auch heute noch nicht vor.

Aus dem bisher Gelesenen gewinnt man vielleicht den Eindruck, dass es *die* N-A-Modellierung oder *das* N-A-Modell gebe. Ein solcher Eindruck wäre falsch. Unter N-A-Modellierung können alle Ansätze zusammengefasst werden, die einen Niederschlag rechnerisch in einen Abfluss transformieren. Dabei sind der Komplexität der Modelle keine Grenzen gesetzt. Das reicht von einfachen empirischen Beziehungen ($Q = a \cdot N$) über Konzeptmodelle (vgl. Kapitel 5.2.2) bis hin zu den äusserst aufwendigen Modellen mit unzähligen Inputparametern und detaillierten, mathematischen Beschreibungen der einzelnen Prozesse. Dazu der DVWK (1999): „Hydrologische Niederschlag-Abfluss-Modelle beschreiben die kausalen Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss mathematisch und dienen zur Ermittlung der Abflüsse aus einem Einzugsgebiet. Das Ziel der Modellanwendung ist vor allem, aus vorgegebenen Niederschlagsereignissen die resultierenden Hochwasserganglinien zu berechnen." Ohne

auf die vielfältigen Modelltypen einzugehen[1], wird aus diesem Zitat klar, dass gerade in ungemessenen Einzugsgebieten *die Beschreibung des kausalen Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Abfluss* eine schier unüberwindbare Hürde darstellt. N-A-Modelle benötigen für die Eichung stets Messwerte der Input-Parameter und sie sind deshalb in ungemessenen Einzugsgebieten keine Alternative zum Einsatz der hier untersuchten Modelle.

Die N-A-Modellierung kann aber unter ganz bestimmten Umständen interessante Möglichkeiten bieten. Wie diese Möglichkeiten aussehen und in welchen Fällen man zuverlässige Resultate erwarten darf, wird in den beiden nächsten Kapiteln diskutiert.

1 Übersichten und Klassifizierungen von N-A-Modellen findet man beispielsweise bei Nemec (1993) oder Maniak (1999).

5.2 N-A-Modellierung

Die N-A-Modellierung zur Bestimmung von Bemessungsgrössen kennt zwei ganz unterschiedliche Vorgehensweisen.

a) Bei der **ereignisbezogenen Modellierung** berechnet man einzelne Hochwasserereignisse, indem ein Bemessungsniederschlag auf ein Einzugsgebiet appliziert wird. Die Wahl der Randbedingungen (Bodenfeuchte, Niederschlags-Intensitätsverlauf) kann die Ergebnisse entscheidend beeinflussen.

b) Die **Langzeitsimulation** verwendet lange Reihen der Modellinputparameter (Niederschlag, Temperatur, Strahlung etc., je nach Komplexität des verwendeten Modells) und simuliert eine durchgehende, lange Abflussreihe, die anschliessend extremwertstatistisch ausgewertet werden kann.

Für die Bemessungspraxis ist die Langzeitsimulation sinnvoller, denn bei der ereignisbezogenen Modellierung ist es wegen der grossen Unsicherheiten bei der Festlegung der Randbedingungen unmöglich, mit der Wiederkehrperiode umzugehen. Feuchte Einzugsgebiete transformieren einen hundertjährlichen Niederschlag ganz anders in einen Abfluss als trockene Einzugsgebiete mit grossem Sättigungsdefizit. Die Wiederkehrperiode ist jedoch eine Grösse, die beim Hochwasserschutz bei der Differenzierung der Schutzziele eine zentrale Rolle spielt (BWW 1995, DVWK 1989). Die Langzeitsimulation wäre an und für sich ideal, bei der praktischen Umsetzung treten aber nicht zu vernachlässigende Schwierigkeiten auf.

Beide Vorgehensweisen sind, verglichen mit den Abschätzmodellen, sehr zeitintensiv. Für die Anwendung in einem neu zu bearbeitenden Einzugsgebiet muss man zwei bis drei Monate einsetzen. Hinzu kommt, dass die N-A-Modelle nur nach erfolgter Eichung erfolgreich betrieben werden können. Für die Modellinputparameter und für den Abfluss ist man also auf Messwerte angewiesen. Fehlen diese Daten, müssen sie in einer Messkampagne erhoben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einer kurzen Messkampagne ein Hochwasser in der Grössenordnung der zu bestimmenden Bemessungsgrösse vorkommt, ist sehr klein. Man wird bei der Eichung des Modells also meist gar nicht den Bereich abdecken können, der beim Hochwasserschutz interessiert. Damit bleibt selbst bei komplexen Modellen die Unsicherheit bei der Bestimmung von Hochwasserspitzen gross.

Nach einem Kapitel, das sich mit den Problemen der ereignisbezogenen Modellierung beschäftigt, wird an einem Fallbeispiel (Langeten, Huttwil) dargelegt, wie eine Langzeitsimulation ablaufen könnte. Es wäre natürlich ideal, wenn das N-A-Modell in allen 95 Einzugsgebieten eingesetzt würde und die Ergebnisse anschliessend mit den dort erhobenen Referenzwerten verglichen werden könnten. Es entstünde so ein ausserordentlich wertvoller Beitrag zur Diskussion über die Qualität von Hochwasserabschätzungen aus einfachen Hochwasser-Abschätzmodellen und aus der N-A-Modellierung. Dieser Vergleich ist aus naheliegenden Gründen nicht durchführbar (Zeitaufwand pro Gebiet 2-3 Monate), und man muss sich hier bei diesem Fallbeispiel mit der Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen der N-A-Modellierung für die Bestimmung von Bemessungsgrössen zufriedengeben.

5.2.1 Ereignisbezogene Modellierung

Bei der ereignisbezogenen Modellierung werden nicht etwa gemessene Niederschläge in das Modell eingegeben, sondern so genannte Bemessungsniederschläge. Je nach Fragestellung werden die Dauer des Niederschlags (beispielsweise D = Konzentrationszeit des Einzugsgebietes) und die Niederschlagsintensität festgelegt. Gemäss einer weitverbreiteten Konvention nimmt man an, dass die Wiederkehrperiode des Bemessungsniederschlags der Wiederkehrperiode des resultierenden Abflusses entspricht. Das ist natürlich eine kühne Annahme, die in den meisten real ablaufenden Fällen nicht zutreffen wird. Naef et al. (1986) haben festgestellt, dass von 87 schweizerischen Einzugsgebieten nur bei 8 Prozent die Vereinfachung *Jährlichkeit Niederschlag = Jährlichkeit Abfluss* in etwa zutrifft. Aus Mangel an Alternativen wird dieser Ansatz jedoch immer wieder angewendet.

Und wie entwickelt sich die Niederschlagsintensität während der Zeit D? Auch hierzu gibt es Konventionen. In Abbildung 5.1 sind vier mögliche Niederschlagsverläufe dargestellt.

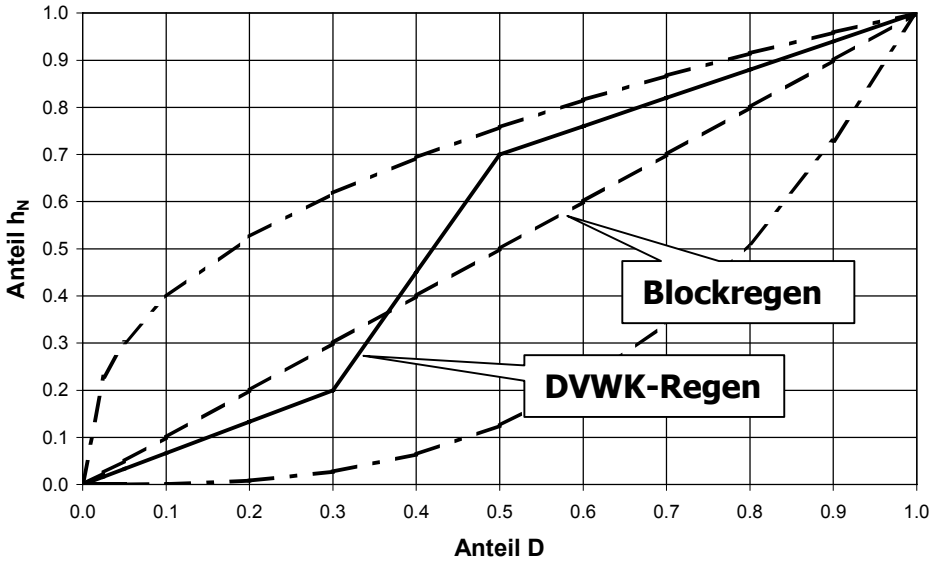


Abbildung 5.1: Summenlinien verschiedener Niederschläge der Gesamtdauer D und der Gesamtniederschlagshöhe h_N (DVWK 1999).

Ein beliebter Bemessungsniederschlag ist der Blockregen. Er hat während der ganzen Dauer D eine konstante Intensität und ist dementsprechend leicht zu handhaben. Der DVWK (1999) schlägt für die ereignisbezogene Modellierung einen Intensitätsverlauf gemäss der durchgezogenen Linie in Abbildung 5.1 vor.

Eine weitere grosse Schwierigkeit betrifft den Zustand des Einzugsgebietes. Es kann entscheidend sein, ob ein hundertjährlicher Niederschlag auf trockenen oder auf gesättigten Boden fällt. Damit wird klar, dass die Gleichsetzung der Wiederkehrperioden von Niederschlag und Abfluss eine unhaltbare Annahme ist. Man muss sich also die Frage stellen, welcher Gebietszustand bei einem T-jährlichen Niederschlag zu einem T-jährlichen Abfluss führt? Da die Antwort niemand kennt, nimmt man einen mittle-

ren Gebietszustand an. Was aber ist ein *mittlerer Gebietszustand?* Diese Frage mag trivial klingen, aber man muss bedenken, dass wir uns mit ungemessenen Einzugsgebieten beschäftigen, und da ist die Bestimmung eines mittleren Gebietszustandes alles andere als eine einfache Angelegenheit. Sie wäre selbst dann nicht einfach, wenn man über Resultate aus Bodenfeuchtemessungen verfügte. Abbildung 5.2 zeigt die enorme Dynamik des Wassergehaltes in der Wurzelzone, wo durch Transpiration der Speicher rasch entleert wird.

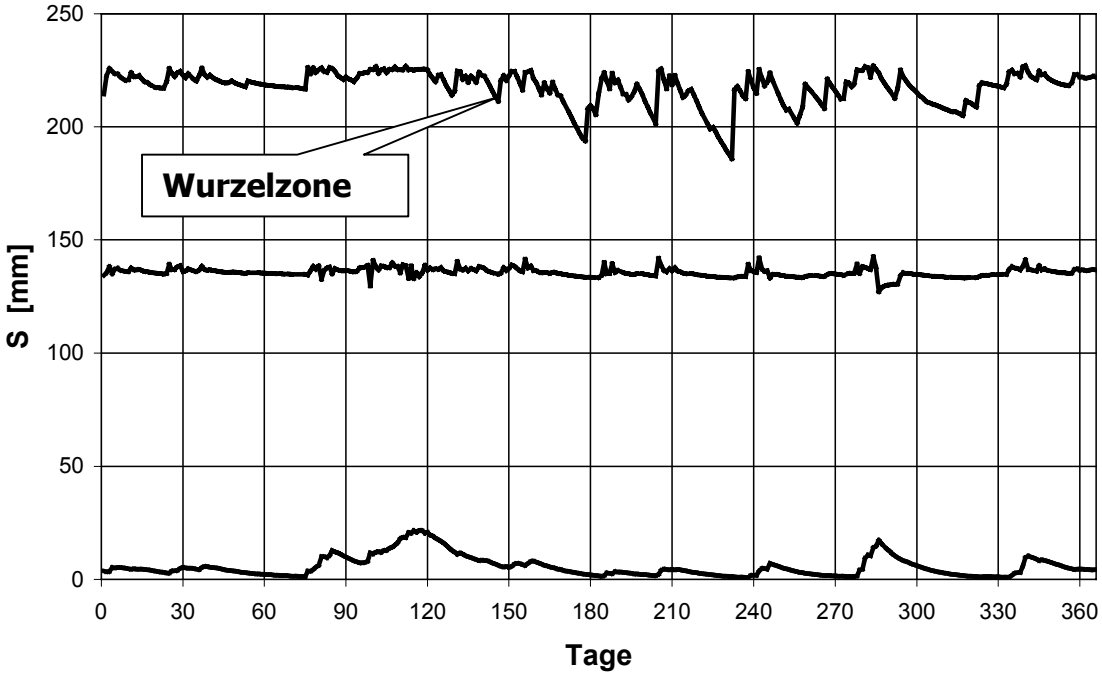


Abbildung 5.2: Simulierter Wassergehalt [mm] in den Bodenwasserspeichern Wurzelzone (oben), ungesättigte Zone (Mitte) und Grundwasser (unten) im Rotenbach 1988 (Barben 1995).

Ist der mittlere Gebietszustand nun der Zustand mitten im Bereich der auftretenden Bodenfeuchten ((min+max)/2) oder der Zustand, der am häufigsten auftritt? Und ist es sinnvoll, das ganze Jahr zu berücksichtigen oder nur die Jahreszeit, in der die seltenen Hochwasser normalerweise auftreten?

Bis jetzt wurde angenommen, der Niederschlag werde in idealer Weise in den Abfluss transformiert. Diese Aufgabe muss vom N-A-Modell übernommen werden. Und damit die Aufgabe zufriedenstellend gelöst werden kann, muss man das Modell eichen können. Genau das ist in einem ungemessenen Einzugsgebiet aber nicht möglich. Das heisst, es müssten mindestens ein paar Ereignisse in einer Messkampagne erfasst werden[2], oder es müssten Parameter aus benachbarten, vergleichbaren, gemessenen Einzugsgebieten übertragen werden. Wenn aber schon übertragen wird,

2 In einer kurzen Messkampagne wären wahrscheinlich keine Ereignisse mit einer grossen Wiederkehrperiode dabei. Die Wahrscheinlichkeit, dass in zwei Jahren ein 20jährliches Hochwasser erreicht oder überschritten wird, beträgt knapp 10 %, bei einem 100jährlichen sogar nur 2 %.

dann könnte man direkt die Bemessungsgrössen übertragen und müsste nicht noch den Umweg über die N-A-Modellierung machen.

Wenn Abflussereignisse und die dazugehörigen Niederschlagsereignisse (oder je nach Modell noch weitere Inputparameter) aus einer Messkampagne vorliegen, kann versucht werden, die Abflussgangline mit dem ausgewählten N-A-Modell zu simulieren.

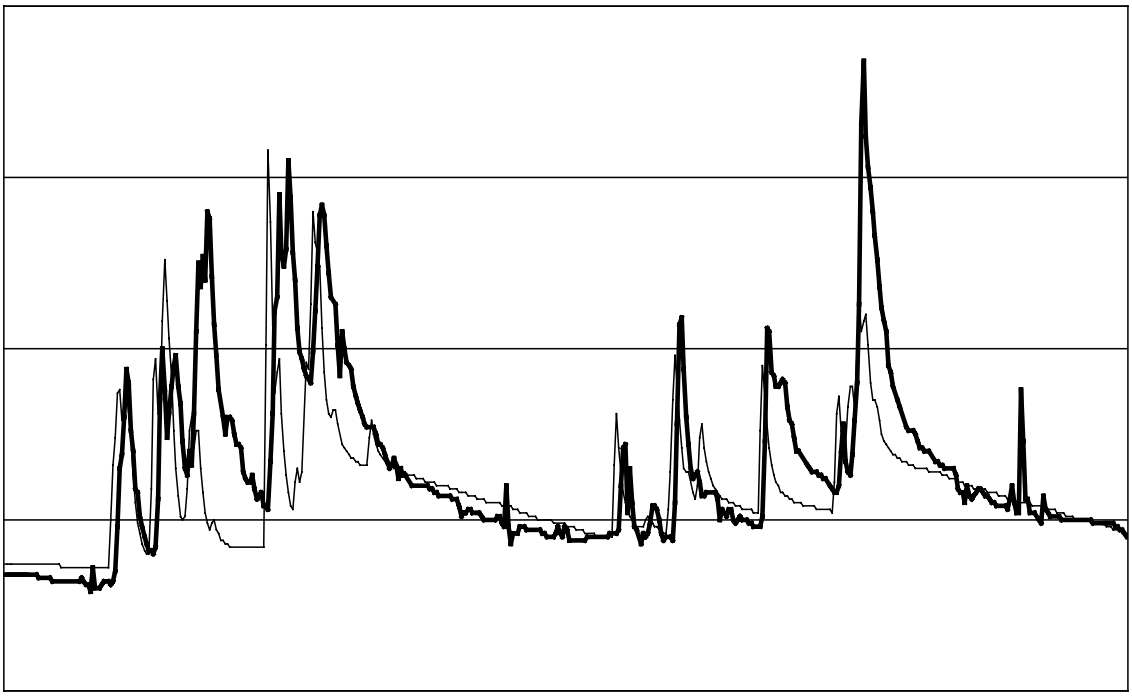


Abbildung 5.3: Gemessener (fett) und simulierter Abfluss (dünn). Mögliches Ergebnis einer N-A-Modellierung.

In vielen Fällen wird sich ein Bild wie in Abbildung 5.3 ergeben, ein Bild mit dem man nicht zufrieden sein wird. Wenn man die Eichung der Modellparameter nicht besser in den Griff bekommt, hat die Berechnung von Szenarien keinen grossen Wert. Denn bei einem Modell, das schon mit der aktuellen Situation Mühe bekundet, wird das Vertrauen in die Aussagen der Szenarienresultate sehr klein sein.

Wo können die Gründe für das Versagen liegen? Es gibt mehrere Möglichkeiten, die aber sehr schwer auseinanderzuhalten sind und die häufig auch kombiniert auftreten.

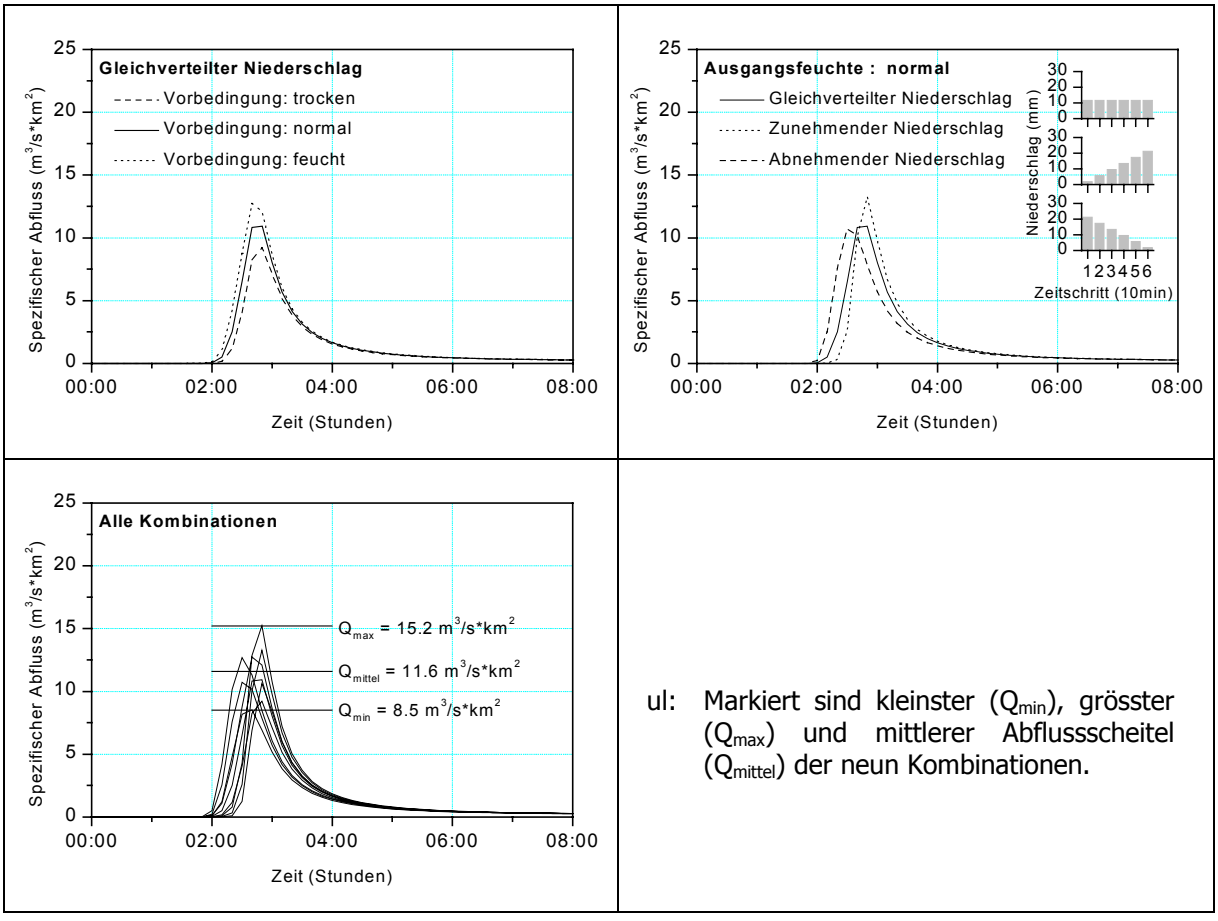
- Die Parameter des Modells sind nicht optimal gewählt. Eine Verbesserung der Resultate wäre möglich, der Anwender oder die Anwenderin sind aber nicht in der Lage, das Optimum zu finden. Es bleibt nichts anderes übrig, als Kontakt mit Fachleuten aufzunehmen, die das Modell und die Eigenheiten des Einzugsgebietes sehr gut kennen.
- Das gewählte Modell ist zu einfach aufgebaut und repräsentiert die entscheidenden Prozesse im Einzugsgebiet nicht richtig, selbst bei optimaler Einstellung nicht. Ein Wechsel zu einem komplexeren Modell ist unausweichlich. Damit wird aber eine bessere Qualität der Resultate nicht garantiert. Ein komplexeres Modell benötigt in der Regel mehr und schwieriger aufzutreibende Inputparameter. Somit

steigt der Grad der Unsicherheit auf der Inputseite, und eine befriedigende Simulation der Abflüsse ist ebenfalls nicht gewährleistet.

- Die Inputparameter (Niederschlag, Temperatur, Strahlung ...) repräsentieren die Verhältnisse im Einzugsgebiet ungenügend. Da die Klimaparameter meistens aus einem fest installierten Messnetz stammen und zusätzliche, qualitativ bessere Daten im allgemeinen nicht verfügbar sind, ist eine Verbesserung der Lage nicht ohne weiteres möglich.

Beispiel

In einem Artikel von Kleindienst und Forster (2000) wird sehr schön gezeigt, wie bei der ereignisbezogenen Modellierung mit den unsicheren Randbedingungen umgegangen wird (Abbildung 5.4). Es werden je drei Varianten für die Bodenfeuchte (trocken, normal, feucht) und den Niederschlags-Intensitätsverlauf (gleichverteilter, zunehmender, abnehmender Niederschlag) definiert und mit den neun (3 mal 3) resultierenden Kombinationen Ereignisse simuliert.



ul: Markiert sind kleinster (Q_{min}), grösster (Q_{max}) und mittlerer Abflussscheitel (Q_{mittel}) der neun Kombinationen.

Abbildung 5.4: Simulationsergebnisse bei Variation der Bodenfeuchte und gleichverteiltem Niederschlag (ol), der Niederschlagsverteilung bei mittlerer Vorfeuchte (or) und alle Kombinationen aus den drei Vorfeuchtebedingungen und den drei Niederschlagsverteilungen (ul) im Rotenbach für ein HQ_{100} (aus Kleindienst und Forster 2000).

Für Modellvergleiche verwenden Kleindienst und Forster den Mittelwert der neun simulierten Hochwasserspitzen. Damit erhalten sie eine moderate Abschätzung, von der man sagen kann, sie sei nicht extrem, von der man aber nicht sagen kann, wie gross die Wiederkehrperiode ist. Man weiss nur, dass das HQ_{100} zwischen Q_{max} und Q_{min} liegt. Da dieser Bereich sehr gross sein kann (im Beispiel ist Q_{min} nur 56 % von Q_{max}) und keine Informationen zu den bedingten Wahrscheinlichkeiten der Feuchte- und Niederschlagsverhältnisse vorliegen (z.B.: Wie wahrscheinlich ist es, dass ein zunehmender Niederschlag auf feuchten Boden trifft?), ist dieser Ansatz für die Bestimmung eines Bemessungswertes nicht zuverlässig genug.

Fazit aus Kapitel 5.2.1

Nach der Aufzählung der vielen massiven Probleme der ereignisbezogenen Modellierung fällt das Urteil eindeutig aus: Diese Art der Modellierung ist in keiner Weise eine Alternative zu den einfachen Modellen für die Hochwasserabschätzung. Ausserdem besteht keine Gewähr, dass nach einer sehr aufwendigen Analyse zuverlässige Resultate vorliegen. Den vielen Nachteilen stehen praktisch keine Vorteile gegenüber.

Diese Aussagen beschränken sich auf die hier besprochene Fragestellung. Es gibt andere Anwendungen, für die sich die ereignisbezogene N-A-Modellierung sehr gut eignet:

- Wenn zusätzlich zur Hochwasserspitze auch eine Ganglinie gefragt ist (z.B. für die Dimensionierung von Rückhaltebecken)[3].
- Zur Bestimmung von Worst-Case-Szenarien, indem ein gemessenes Niederschlag-Abfluss-Ereignis modelliert wird und anschliessend durch eine Veränderung der Inputparameter die Auswirkungen auf den Abfluss studiert werden. Wenn es um die Auslotung der Grenzen geht, spielt die Wiederkehrperiode oft eine untergeordnete Rolle.

3 Diese Fragestellung kann mit den *einfachen* Hochwasser-Abschätzmodellen nur näherungsweise beantwortet werden, indem mit Hilfe der Hochwasserspitze und einer Konzentrationszeit eine einfache Dreiecksganglinie konstruiert wird.

5.2.2 Langzeitsimulation

Die Langzeitsimulation verwendet gemessene oder von einem Simulator generierte Reihen der Modellinputparameter und simuliert mit einem N-A-Modell kontinuierliche Abflussreihen, die anschliessend extremwertstatistisch ausgewertet werden können. Mit diesem Vorgehen werden zwei grosse Nachteile der ereignisbezogenen Modellierung ausgeschaltet, ohne dass neue dazukämen:

- Bei der Verwendung gemessener oder generierter Inputparameter braucht man sich nicht um deren zeitliche Verteilung zu kümmern[4]. Die Fragen nach einer Niederschlagsdauer und nach dem Verlauf der Niederschlagsintensität stellen sich beispielsweise nicht.
- Durch die kontinuierliche Simulation ist der Einzugsgebietszustand zu jedem Zeitpunkt bekannt. Das Problem der unbekannten Randbedingungen bei Simulationsbeginn ist gelöst.

Was natürlich bleibt, sind die Anforderungen, die an die Eichung des Modells gestellt werden. Es braucht Messwerte einer Periode, die einige grosse Abflussereignisse enthält.

In diesem Kapitel wird an einem Fallbeispiel gezeigt, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit die Abflüsse einer Langzeitsimulation für extremwertstatistische Auswertungen – und somit für die Bestimmung von Hochwasserspitzen beliebiger Jährlichkeit – verwendet werden können. Für das Fallbeispiel wird das Einzugsgebiet der Langeten bis Huttwil ausgewählt (vgl. Abbildung 5.5). Es entspricht mit knapp 60 km^2 ungefähr der mittleren Einzugsgebietsgrösse der untersuchten Gebiete und verfügt über eine genügend lange Messreihe (31 Jahre), um für den Resultatvergleich vertrauenswürdige Referenzwerte zu bestimmen.

Die Langzeitsimulation wird mit dem hydrologischen Prozessmodell HQsim von Kleindienst (1996) durchgeführt. Es ist eine Weiterentwicklung des BROOK-Modells von Federer und Lash (1978), das mehrfach erfolgreich in schweizerischen Einzugsgebieten eingesetzt wurde (Forster 1992, Barben 1995, Barben und Weingartner 1998).

Das N-A-Modell wurde für die Eichung mit gemessenen Niederschlag- und Temperaturdaten der ANETZ-Station Wynau betrieben, und die Simulationsergebnisse wurden mit gemessenen Abflussdaten der Station Huttwil verglichen. Das Modell wurde mit Ereignissen der Jahre 1996 bis 1998 geeicht.

Die Modellinputdaten (Niederschlag und Temperatur) der eigentlichen Simulation sind generierte Stundenwerte aus dem Wettergenerator, der bei Gyalistras et al. (1997) ausführlich beschrieben wird.

Es ist nicht das Ziel, hier einen Idealfall darzustellen, der in der Praxis nie angetroffen wird. Vielmehr sollen Probleme beschrieben werden, mit denen man bei der N-A-Modellierung konfrontiert sein kann. Die nächsten Seiten bieten einen Überblick über das Langeten-Einzugsgebiet, das N-A-Modell und über die generierten Modellinputdaten. Auf ausführliche Beschreibungen wird verzichtet (das wird in der angegebenen Literatur detailliert getan). Die Aussagen sollen allgemein gültig sein und nicht zu stark von den eingesetzten Methoden abhängen.

---

4 Es wird hier nicht auf die spezifischen Probleme eingegangen, die sich bei der Entwicklung von Wettergeneratoren ergeben. Es wird angenommen, dass der Generator Niederschläge und Temperaturen mit einer realistischen Verteilung liefert.

Das Langeten-Einzugsgebiet

Die Langeten bis Huttwil ist mit 58,7 km^2 ein typischer Vertreter der Einzugsgebiete dieser Untersuchung.

Sie wird von Aschwanden und Spreafico (1989) folgendermassen beschrieben:

Geologische / hydrogeologische Charakterisierung: Nagelfluh des Napf, obere Süsswassermolasse; Durchlässigkeit mittel bis sehr gering. Abflussmessstation auf einem Aufschluss, was die Geschlossenheit des Einzugsgebietes garantiert.

Landschaftscharakter / pedologische Charakterisierung: Höheres Molassehügelland mit starkem Erosionsrelief (Napfbergland), in tieferen Lagen teilweise glazial überformt. Mittel- bis tiefgründige Braunerde (Cambisol) mit gutem bis mässigem Wasserspeichervermögen.

Abfluss:
Regimetyp pluvial inférieur
MQ = 1.3 m^3/s
HHQ = 55 m^3/s

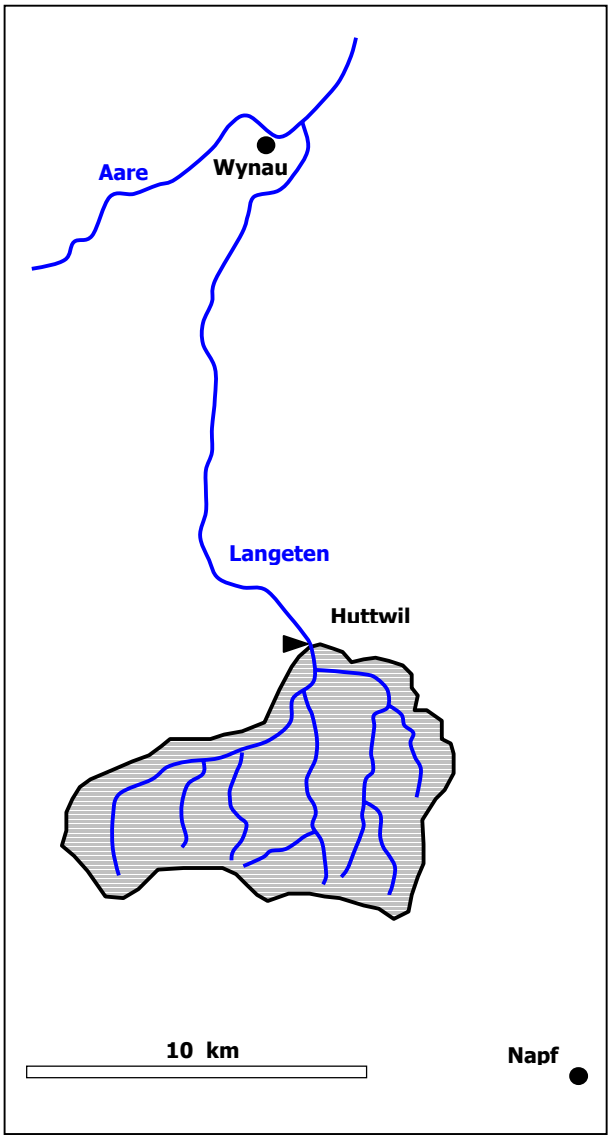


Abbildung 5.5: Einzugsgebiet Langeten, Huttwil mit ANETZ-Stationen Wynau und Napf.

Legende zur Karte:

- ► LHG-Abflussmessstation Huttwil, Häberenbad (seit 1966)
  Koordinaten 629560/219135
  Höhe 766 m ü.M.
- ● ANETZ-Stationen der SMA. Die Niederschlags- und Temperaturdaten für die Modellierung stammen von der ANETZ-Station Wynau. Eine Bestimmung eines Gebietsniederschlags aus Wynau und Napf erschien, wegen zum Teil grosser Datenlücken der Station Napf, nicht sinnvoll.

Literatur zur Langeten:

Binggeli, V. (1974): Hydrologische Studien im zentralen Schweizerischen Alpenvorland, insbesondere im Gebiet der Langete.

Binggeli, V., Bitterli, S., Leibundgut, Ch. (1976): Zur Hydrologie des Langete-Hochwassers vom 30. August 1975, Ausmass, Ursachen und Sanierungsprobleme.

Leibundgut, Ch. (1976): Zum Wasserhaushalt des Oberaargaus und zur hydrologischen Bedeutung des landwirtschaftlichen Wiesenbewässerungssystems im Langetental.

Das N-A-Modell

HQsim, das N-A-Modell, das hier die kausalen Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss beschreiben soll, ist von Kleindienst (1996) auf der Basis des BROOK-Modells (Federer und Lash 1978) entwickelt worden. Es benötigt Niederschlag und Temperatur als Inputparameter. Das Modell kann mit einem variablen Zeitschritt betrieben werden. Die zeitliche Auflösung liegt bei dieser Anwedung bei einer Stunde. Ein Einzugsgebiet kann in mehrere homogene Teilgebiete gegliedert werden, die je mit einem Parametersatz zu beschreiben sind. Es gibt Parameter zur Verdunstung, zur Topografie, zur Vegetation, zu den Böden, zur Abflussbildung und zu den Gerinnen.

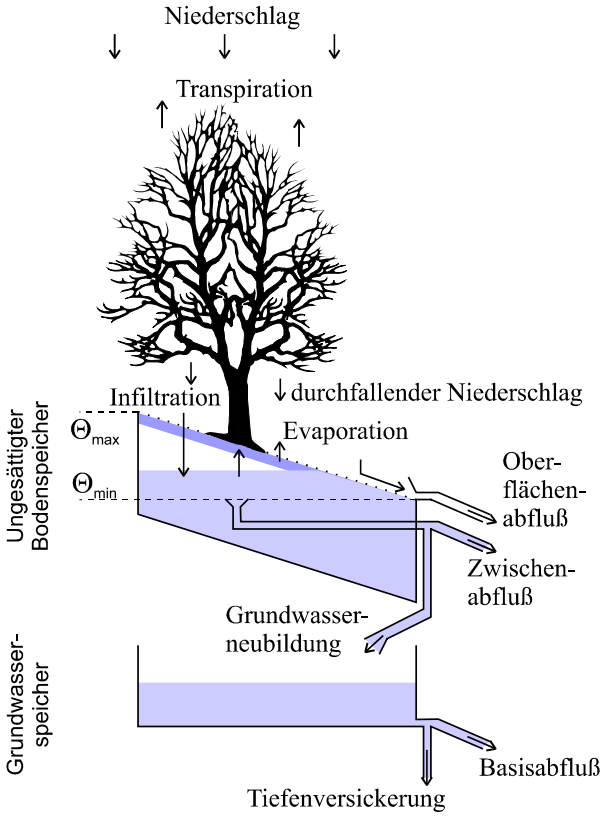


Abbildung 5.6: Anordnung der Wasserspeicher und -flüsse im Modell HQsim (aus Kleindienst und Forster 2000).

Die vielen Parameter des Modells bedingen eine gründliche Eichung an gemessenen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen. Das ist der Hauptgrund, warum die Anwendung von N-A-Modellen so aufwendig ist. Auch wenn die Kenngrössen zur Beschreibung der Einzugsgebiete physikalisch ableitbar sind, heisst das noch nicht, dass damit der zu beschreibende Prozess richtig wiedergegeben wird. Als Beispiel kann hier die Parametrisierung des Bodens erwähnt werden. Das Modell benötigt Angaben zur ungesättigten Leitfähigkeit in Funktion des Wassergehalts. Die passenden Werte können mit etwas Glück in der Literatur gefunden werden. Sie stammen aber meist aus Experimenten an relativ homogenen Bodensäulen und werden den realen Verhältnissen

oft in keiner Weise gerecht (vgl. dazu Beven und Germann 1982). Hier die kritische Bemerkung von Naef (1991): „Bei der Eichung werden die einzelnen Parameter so lange verändert, bis der berechnete Abfluss optimal mit dem gemessenen übereinstimmt. Das bedeutet aber nicht, dass das Modell den Abflussprozess richtig erfasst. Es ist im Gegenteil möglich, dass sich bei der Verwendung des Modells zur Extrapolation auf extreme Ereignisse unmögliche Resultate ergeben. Diese Reaktionsweise ist aber nicht ohne weiteres ersichtlich aus der Grösse der einzelnen Parameter, sie ergibt sich erst aus dem Zusammenwirken derselben im Modell".

Damit wird auch klar, warum die Eichperiode bedeutende Ereignisse enthalten sollte. Wenn das N-A-Modell zur Simulation von Hochwasserspitzen mit Wiederkehrperioden von 20 bis 100 Jahren verwendet wird, sollten möglichst auch Ereignisse dieser Grössenordnung für die Eichung zur Verfügung stehen. Wer sagt uns aber, ob in einer kurzen Messreihe solche Abflüsse schon enthalten sind?

Für die Eichung von HQsim stehen in der Langeten gemessene Niederschlag- und Temperaturdaten der ANETZ-Station Wynau und gemessene Abflussdaten der Station Huttwil, Häberenbad zur Verfügung (vgl. Abbildung 5.5).

Die generierten Niederschlag- und Temperatur-Daten

Die Modellinputparameter Temperatur und Niederschlag für das N-A-Modell sind generierte Stundenwerte des Wettergenerators *WeathGen* (Gyalistras et al. 1997).

WeathGen wird durch **22 monatliche Wettervariablen angetrieben** (monatliche Niederschlagswahrscheinlichkeit und -summe, das Monatsmittel und die innermonatliche Standardabweichung des Tagesmittels der Globalstrahlung, sowie die Monatsmittel und die innermonatlichen Standardabweichungen der Tagesmittel und -extrema der Temperatur, des Dampfdruckes und der Windgeschwindigkeit). Daraus erzeugt WeathGen unter Zuhilfenahme einer Reihe standortspezifischer Parameter in zwei Stufen zuerst **11 tägliche** und daraus schliesslich **5 stündliche Wettervariablen** (Gyalistras et al. 1997). Wettergeneratoren bestehen aus stochastischen Zeitreihen- und/oder Markovketten-Modellen, deren Struktur und Parameter aus Messreihen ermittelt werden. Die stochastischen Modelle können dazu benutzt werden, um mit Hilfe eines Pseudo-Zufallszahlengenerators aus einer beschränkten Anzahl zeitlich aggregierter Parameter (wie z.B. den Erwartungswerten von Wettervariablen oder den Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen verschiedenen Wetterzuständen) eine im Prinzip beliebige Anzahl von Wetterverläufen mit realistischen statistischen Eigenschaften zu generieren (Gyalistras et al. 1997).

Für diese Untersuchung wird WeathGen mit einer 94-jährigen Reihe monatlicher Wettervariablen der Klimastation Bern-Liebefeld angetrieben und liefert eine Zeitreihe der benötigten Stundenwerte für HQsim (Niederschlag und Temperatur). Aus Gründen der Datenverfügbarkeit wird auf Klimadaten der Station Bern-Liebefeld zurückgegriffen, die für ein NFP 31-Projekt von Gyalistras et al. (1997) aufbereitet wurden. Aus den Resultaten dieses Projekts geht hervor, dass Bern-Liebefeld die mittleren klimatischen Verhältnisse der Höhenlagen 300 m bis 800 m sehr gut repräsentiert. Ausserdem deuten statistische Masszahlen auf grosse Ähnlichkeiten der Witterung mit der ANETZ-Station Wynau hin (mit Daten von Wynau wird HQsim geeicht).

Resultate

Die gemessene Abflussreihe in Huttwil, Häberenbad (1966-1996) und die mit HQsim simulierten Abflüsse (1901-1994) können extremwertstatistisch ausgewertet und anschliessend verglichen werden. Die statistische Auswertung folgt den Empfehlungen aus Kapitel 2.2. An die empirische Verteilung der Jahreshochwasserspitzen wird die Allgemeine Extremwertverteilung (mit Momenten-Methode für die Parameterschätzung) angepasst und ein HQ_{100} extrapoliert.

In Abbildung 5.7 ist die Auswertung der **gemessenen Abflussreihe** dargestellt. Die Extrapolation für ein HQ_{100} ergibt ziemlich genau 60 m^3/s. Mit diesem Wert werden anschliessend die Ergebnisse aus den simulierten Reihen verglichen (Abbildung 5.8 und 5.9). Die Anpassung der Verteilungsfunktion an die Daten ist hier relativ schlecht. Die Messreihe scheint zwei unterschiedliche Hochwassertypen zu enthalten (Wechsel des Typs im Wiederkehrintervall-Bereich 5 bis 10 Jahre). Auf dieses Problem wurde schon in Kapitel 2.2 hingewiesen (vgl. Abbildung 2.5).

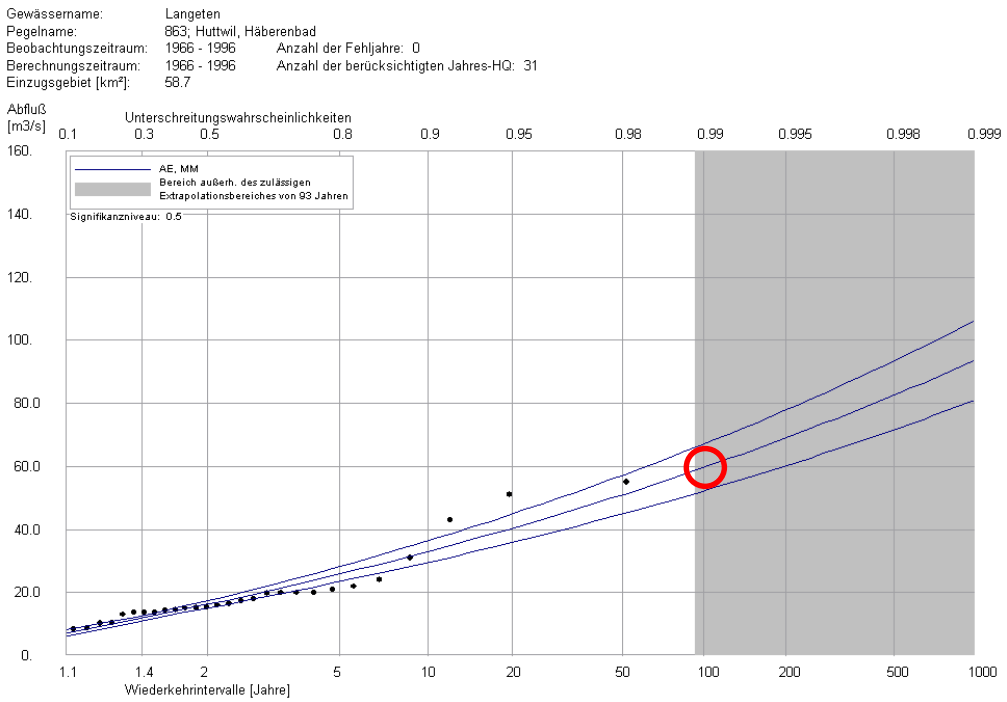


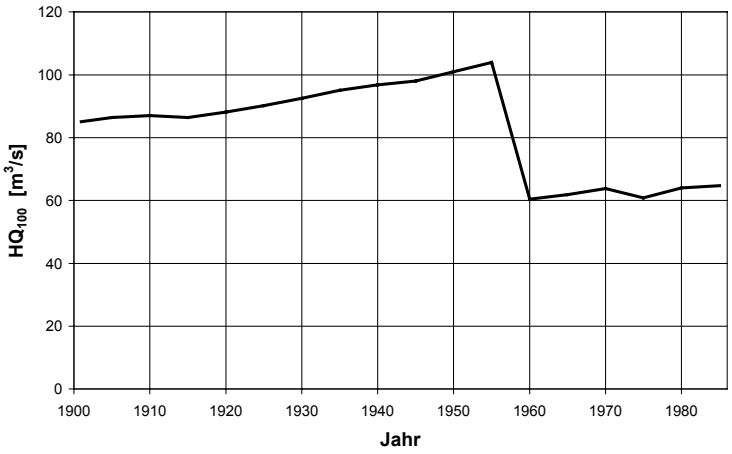
Abbildung 5.7: Jahreshochwasserspitzen mit Allg. Extremwertverteilung (AE/MM), angepasst an die 31-jährige Messreihe der Langeten, Huttwil (1966-1996). Um die Verteilungsfunktion liegt der Konfidenzbereich mit einem Signifikanzniveau von 0.5.
(Print Screen von HQ-EX.)

In Tabelle 5.1 wird dargestellt, wie sich das HQ_{100} mit zunehmender Länge der **simulierten Reihe** entwickelt. Die Reihe wird schrittweise um 5 Jahre in die Vergangenheit (Basis immer 1994) verlängert und jeweils ein neues HQ_{100} ermittelt.

Die Anpassung der theoretischen Verteilungsfunktion an die simulierten Daten wird stark von einem extremen Ereignis im Jahr 1956 beeinflusst. Die Extrapolationen der HQ_{100} mit Reihen ab 1960 (immer bis 1994) liegen im Bereich 60.5 bis 64.7 m^3/s und damit nahe dem Wert aus der gemessenen Reihe (60 m^3/s).

Tabelle 5.1: Entwicklung von HQ_{100} mit der Länge der simulierten Reihe.

simulierte Reihe	HQ_{100} [m^3/s]
1985 - 1994	64.7
1980 - 1994	64.0
1975 - 1994	60.9
1970 - 1994	63.8
1965 - 1994	61.9
1960 - 1994	60.5
1955 - 1994	104
1950 - 1994	101
1945 - 1994	98.0
1940 - 1994	96.8
1935 - 1994	95.1
1930 - 1994	92.5
1925 - 1994	90.2
1920 - 1994	88.1
1915 - 1994	86.4
1910 - 1994	87.0
1905 - 1994	86.4
1901 - 1994	85.1



Auf der Abszisse steht das Anfangsjahr der simulierten Reihe. Das Ende der Reihe ist immer das Jahr 1994. Der erste Wert in der Grafik ist das HQ_{100} für die Periode 1901 - 1994.

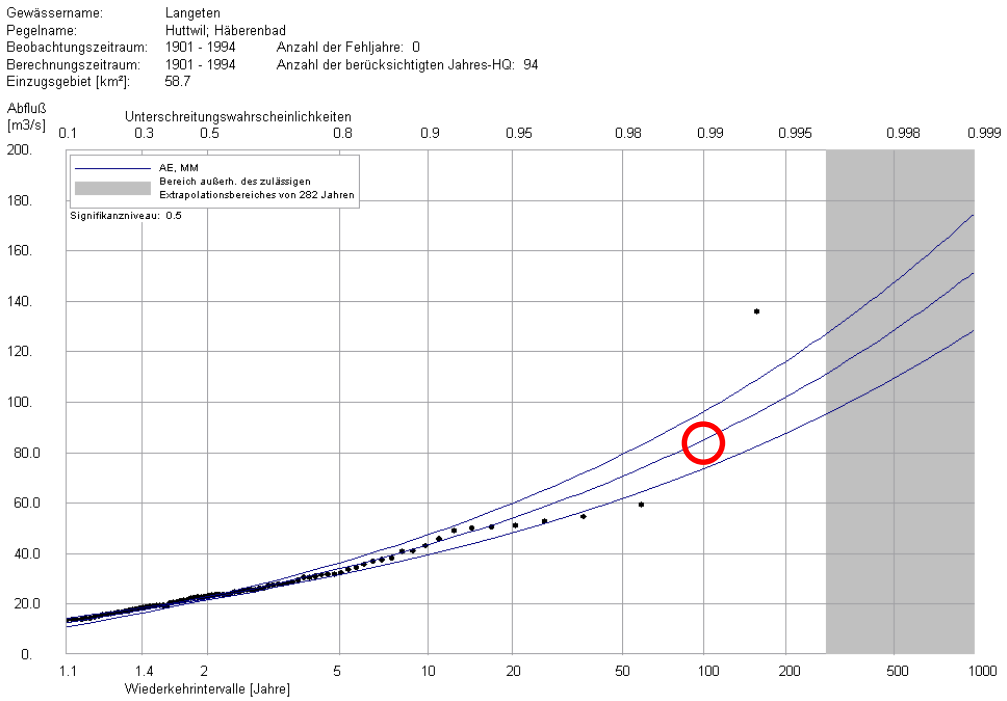


Abbildung 5.8: Jahreshochwasserspitzen mit Allg. Extremwertverteilung (AE/MM), angepasst an die 94-jährige simulierte Reihe der Langeten, Huttwil. (Print Screen von HQ-EX.)

Es stellt sich nun die Frage, ob die gemessene Reihe mit den 31 Jahren schon lang genug ist, um ein HQ_{100} zuverlässig abzuschätzen oder ob die simulierte 94-jährige Reihe allein wegen ihrer Länge vertrauenswürdigere Werte liefern kann.

Wie so oft rund um die Abschätzung von Hochwasserabflüssen kann auch hier keine definitive Antwort gegeben werden. Wie soll man den ausserordentlich hohen Wert des Jahres 1956 behandeln? Soll man ihn als *Ausreisser* betrachten und ohne ihn ein HQ_{100} schätzen? Das HQ_{100} würde dadurch von 85 m^3/s auf rund 60 m^3/s gesenkt (Abbildung 5.9) und entspräche sehr gut der Extrapolation aus der Messreihe.

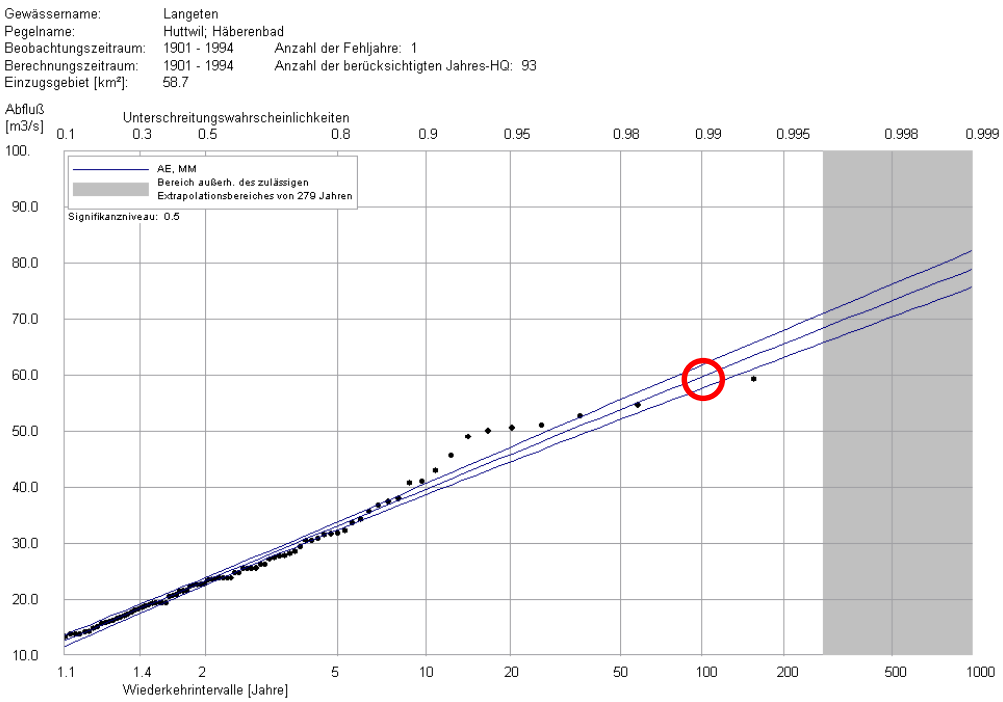


Abbildung 5.9: Jahreshochwasserspitzen mit Allg. Extremwertverteilung (AE/MM), angepasst an eine 93-jährige simulierte Reihe der Langeten, Huttwil. Der grösste Wert aus dem Jahr 1956 wurde weggelassen (vgl. Abbildung 5.8).

Das grösste simulierte Jahreshochwasser ist, verglichen mit dem zweitgrössten, mehr als doppelt so gross (136/59.3 = 2.3). Dieses Verhältnis scheint extrem zu sein und könnte auf eine unvernünftige Simulation von HQsim hinweisen. Bedenkenswert ist aber die Tatsache, dass das Verhältnis von grösstem zu zweitgrösstem *gemessenem* Jahreshochwasser an der Unterliegerstation Lotzwil (110/39 = 2.8) noch deutlich grösser ist. Eine Durchsicht der Niederschlagsdaten der 94 Jahre, die der Wettergenerator als Input liefert, zeigt, dass es sich 1956 um eine ganz aussergewöhnliche Situation handelt (nicht real; vom Generator gemacht). Das Abflussereignis wird durch einen extremen Starkniederschlag ausgelöst: Auf den achtgrössten Stundenniederschlag (25.8 mm) der 94-jährigen Reihe folgt unmittelbar der mit Abstand grösste Stundenniederschlag (43.3 mm). Tafel 2.4 des HADES (Geiger et al. 1992) zeigt, dass im Gebiet der Langeten ein Punktniederschlag mit einer Stunde Dauer und einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren eine Höhe von etwa 35 mm erreicht. Das 56er-Niederschlagsereignis hat also eine Wiederkehrperiode von deutlich über 100 Jahren. Das extreme Simulationsergebnis erweist sich damit als plausibel und eine gänzlich unvernünftige Simulation von HQsim kann ausgeschlossen werden. Beim Weglassen von sogenannten Ausreissern muss man also sehr vorsichtig sein, und es wird an dieser Stelle davon abgeraten, *unangenehme* Werte einfach zu igno-

rieren. Denn was heisst schon *Ausreisser*? Es gibt statistische Tests, die Ausreisser als solche identifizieren (vgl. z.B. Maniak 1997 oder DVWK 1999), aber was ist damit gewonnen? Nichts, denn wenn ein Ausreisser bestätigt wird, heisst das nicht, dass ein Ereignis in der Natur nicht stattfinden kann, sondern es heisst nur, dass die theoretische Verteilungsfunktion nicht an die empirische Verteilung angepasst werden kann. Ein weiterer Hinweis für eine vernünftige Simulation ist die Wiedergabe des eigenartigen Verlaufs der empirischen Verteilung (vgl. Abbildung 5.7). Auch die simulierten Jahreshochwasserspitzen deuten auf die Existenz von zwei unterschiedlichen Hochwassertypen im Einzugsgebiet der Langeten hin (vgl. Abbildungen 5.8 und 5.9).

Wie gross ist nun ein HQ_{100} für die Langeten in Huttwil? Das Fallbeispiel zeigt, dass eine 31-jährige Messreihe nicht zwingend eine solide Grundlage für zuverlässige extremwertstatistische Auswertungen ist. Erst Langzeitsimulationen mit den Modellinputdaten aus Wettergeneratoren liefern die besonderen Verhältnisse, die zu seltenen Abflussereignissen führen können. Aus der Extremwertanalyse mit der simulierten langen Abflussreihe ergibt sich ein HQ_{100} in der Grössenordnung von 85 m^3/s. Dieser Wert müsste mit einem Vertrauensintervall versehen werden, also mit einem Bereich, in dem ein HQ_{100} mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt. Ein Vertrauensintervall könnte mit der N-A-Modellierung konstruiert werden, indem nicht nur *eine* Realisierung von generiertem Modellinput mit dem N-A-Modell in eine Abflussreihe transfomiert wird (so wie im Fallbeispiel), sondern indem beliebig viele Realisierungen von langen Reihen der Modellinputdaten mit dem N-A-Modell zu Abflussreihen verarbeitet werden. Beliebig viele Abflussreihen ergeben beliebig viele Abschätzungen eines HQ_{100} und daraus liesse sich ein Vertrauensintervall berechnen.

Fazit aus Kapitel 5.2.2

Die N-A-Modellierung als Langzeitsimulation mit generierten langen Reihen der Inputparameter wäre eine sehr attraktive Möglichkeit, Hochwasserabflüsse abzuschätzen. Es müssen aber strenge Bedingungen erfüllt sein, damit die Abschätzungen vertrauenswürdige Ergebnisse liefern.

- Es braucht ein Minimum an Abflussmessungen. Zur Eichung des N-A-Modells müssen genügend Messwerte der Modellinputparameter und des Abflusses zur Verfügung stehen. Es sollten Abflussereignisse in der Eichperiode vorkommen, die in der Grössenordnung der Bemessungsgrössen liegen[5].
- Eine Langzeitsimulation sollte mindestens 30 Jahre umfassen (bei Zielgrösse HQ_{100}). Das heisst, es braucht ebenso lange Reihen der Inputparameter. Diese müssen repräsentativ für das Einzugsgebiet sein.
- Es muss ein N-A-Modell zur Verfügung stehen, dass einerseits die Feuchteverhältnisse eines Einzugsgebietes sehr genau simulieren kann und andererseits die extremen Abflussverhältnisse (im Bereich HQ_{10} bis HQ_{100}) zuverlässig wiedergibt. Es wäre also falsch zu glauben, man könne hier mit entschlackten, nur auf Hochwasserabflüsse spezialisierten Modellen arbeiten (z.B. Unit Hydrograph).

5 Es können keine generellen Angaben darüber gemacht werden, wie lange eine Messreihe für eine Eichung sein sollte. Das Beispiel des Violenbachs in Kapitel 3.4 zeigt, dass auch eine 18-jährige Reihe noch zu kurz sein kann. HQx_meso_CH könnte hier mithelfen, die Ereignisse der bestehenden Reihe einzuordnen.

Der erste Punkt zeigt schon, dass die **Langzeitsimulation in ungemessenen Einzugsgebieten** (im strengen Sinn) **nicht anwendbar** ist. In Einzugsgebieten mit zu kurzen Messreihen für eine extremwertstatistische Auswertung kann sie – wenn die zweite und die dritte Bedingung erfüllt sind – eine sinnvolle Alternative zu den Abschätzmodellen sein.

Fazit aus Kapitel 5

Die N-A-Modellierung – ob ereignisbezogen oder zur Langzeitsimulation eingesetzt – schneidet im hier betrachteten Umfeld der Hochwasserabschätzung relativ schlecht ab. Das hat damit zu tun, dass der (sinnvolle) Umgang mit N-A-Modellen an strenge Auflagen geknüpft ist, die in ungemessenen Einzugsgebieten heute nicht vollumfänglich erfüllt werden können (Tabelle 5.2).

Die N-A-Modellierung ist **unter den heutigen Bedingungen** der Datenverfügbarkeit als Alternative zu den Hochwasser-Abschätzmodellen **nicht zu empfehlen**. Bei der Langzeitsimulation gibt es aber interessante Zukunftsperspektiven, die in Kapitel 6 zur Sprache kommen.

Tabelle 5.2: Bedingungen für eine erfolgreiche N-A-Modellierung zur Hochwasserabschätzung.

	soll	**ist**
Eichung	Zur Eichung des N-A-Modells müssen genügend Messwerte der Modellinputparameter und des Abflusses zur Verfügung stehen. Es sollten Abflussereignisse in der Eichperiode vorkommen, die in der Grössenordnung der Bemessungsgrössen liegen.	In ungemessenen EG können N-A-Modelle nicht geeicht werden. In EG mit kurzen Messreihen weiss man nicht, ob die aufgetretenen Abflussereignisse die Bemessungsgrössen repräsentieren (mögliche Einordnung jetzt mit HQx_meso_CH).
Meteodaten für die Simulation	Eine Langzeitsimulation sollte mindestens 30 Jahre umfassen (bei Zielgrösse HQ_{100}). Das heisst, es braucht ebenso lange Reihen der Inputparameter. Diese müssen repräsentativ für das Einzugsgebiet sein.	Die Reihen der ANETZ-Stationen sind mit 20 Jahren (noch) zu kurz. Wettergeneratoren stehen im Prinzip zur Verfügung. Die Generierung von langen Reihen ist jedoch einigen wenigen Fachleuten vorbehalten und kann deshalb ein zeitkritischer Faktor werden.
N-A-Modell	Es muss ein N-A-Modell zur Verfügung stehen, das einerseits die Feuchteverhältnisse eines Einzugsgebietes sehr genau simulieren kann und andererseits die extremen Abflussverhältnisse (im Bereich HQ_{10} bis HQ_{100}) zuverlässig wiedergibt.	In der Schweiz stehen solche Modelle zur Verfügung. Deren Betrieb ist aber zeit- und damit kostenintensiv. Sie können ausserdem nur von ausgewiesenen Fachleuten eingesetzt werden.

6 Ausblick

In fünf Kapiteln wurde dargelegt, wo die Möglichkeiten und Grenzen von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten liegen.

Wie sieht nun die Zukunft von HQx_meso_CH aus, und in welche Richtung könnte die Entwicklung bei der Bestimmung von Bemessungsabflüssen gehen? Im abschliessenden Kapitel wird dazu eine Vision präsentiert.

HQx_meso_CH, das neue Instrument zur Hochwasserabschätzung und zur Beurteilung des Hochwasserrisikos in mesoskaligen, schweizerischen Einzugsgebieten, wird die Bemessungspraxis in der Schweiz hoffentlich positiv beeinflussen können, indem es viele Anwenderinnen und Anwender bei der täglichen Arbeit unterstützt.

Die Programmierarbeit ist in diesem Stadium aber noch nicht abgeschlossen. Fehlerfreie Computerprogramme gibt es bekanntlich nicht. In einer ersten Phase werden zweifellos Mängel auftauchen, die es rasch zu beheben gilt. Es werden aber ganz bestimmt auch Bedürfnisse nach Zusatzfunktionen und Spezialauswertungen entstehen, die je nach Arbeitsfeld der Anwenderinnen und Anwender zu speziell oder aber von allgemeinem Interesse sein können. Es ist auch denkbar, dass HQx_meso_CH noch mit weiteren Modellen erweitert wird, wenn sich deren Aufbau mit der vorgegebenen Datenstruktur verträgt.

Kapitel 5 hat gezeigt, dass sich durch die **N-A-Modellierung** für die Hochwasserabschätzung durchaus vielversprechende Perspektiven ergeben. Wie würden ideale Bedingungen für Einzugsgebiete aussehen, die über Abflussmessungen verfügen, die aber nicht genügen (qualitativ oder quantitativ, vgl. Abbildung 6.1), um extremwertstatistisch ausgewertet zu werden?

Die Vision

In einem beliebigen schweizerischen Einzugsgebiet verfügt man über lange Reihen von Modellinputparametern (Niederschlag, Temperatur, Strahlung)[1], die in einem schnell eichbaren, sehr zuverlässigen N-A-Modell in eine extremwertstatistisch auswertbare Abflussganglinie[2] transformiert werden.

Was bleibt noch zu tun?

Wo muss in Zukunft der Hebel angesetzt werden, damit diese *Vision* realisiert werden kann? Die drei Punkte aus dem Fazit von Kapitel 5 werden hier noch einmal aufgegriffen:

1 In einer an mesoskalige Einzugsgebiete angepassten zeitlichen Auflösung von mindestens 1 Stunde.

2 Die Ergebnisse aus der N-A-Modellierung könnten ausserdem zu ganz unterschiedlichen Zwecken verwendet werden, da das Modell als Nebenprodukte auch die Evapotranspiration und den Bodenwasserhaushalt modelliert.

- N-A-Modelle müssen mit gemessenen Niederschlag-Abfluss-Ereignissen geeicht werden. Je grösser die Vielfalt der gemessenen Ereignisse ist, desto besser wird die Eichung und desto zuverlässiger werden die anschliessend erzeugten Ergebnisse. Das Problem, dass für die Eichung zu wenig Messdaten zur Verfügung stehen, kann fast nicht gelöst werden. Ein Ansatzpunkt wäre die Übernahme von Modelleinstellungen aus hydrologisch ähnlich reagierenden Einzugsgebieten (vgl. Punkt drei dieser Aufstellung).
- Der Generierung langer Niederschlag- und Temperaturreihen scheint nichts im Weg zu stehen. Sie ist allerdings an Standorte gebunden, wo die unter 5.2.2 erwähnten monatlichen Wettervariablen zur Verfügung stehen. Es wäre sehr elegant, wenn die Wettervariablen räumlich interpoliert werden könnten und damit an beliebigen Stellen lange Reihen generierbar wären. Wünschbar wären Werkzeuge, die es auch Nichtklimatologen erlaubten, für beliebige Einzugsgebiete der Schweiz, beliebig lange Reihen des Niederschlags, der Temperatur und der Globalstrahlung zu erzeugen.
- Die Anwendung eines N-A-Modells kann vereinfacht und beschleunigt werden, wenn auf Parametersätze aus hydrologisch ähnlich reagierenden Gebieten zurückgegriffen werden kann und nur noch rund ein halbes Dutzend Schlüsselparameter justiert werden müssen. Damit man diese Möglichkeit systematisch anbieten kann, müsste ein Modell in vielen Repräsentativgebieten[3] mit ausgezeichneter Datenlage angewendet werden. Bei diesem Vorhaben ist nicht die Anwedung des Modells das Problem, sondern die Bestimmung von Repräsentativgebieten und die Abgrenzung hydrologisch ähnlich reagierender Regionen.

Die Anwendung eines N-A-Modells bleibt auch nach den beschriebenen Optimierungen eine zeitaufwendige Angelegenheit. Für die Eichung der Modelle und für die extremwertstatistischen Auswertungen der simulierten Abflüsse braucht es qualifizierte Fachleute. N-A-Modelle können also nur dort eingesetzt werden, wo ausreichend finanzielle Mittel zur Verfügung stehen.

In Abbildung 6.1 ist das Vorgehen bei der Bestimmung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten dargestellt. HQx_meso_CH spielt in ungemessenen Einzugsgebieten eine zentrale Rolle. Das Programm kann aber auch eingesetzt werden, um die Eignung der Abflussmessreihe für die N-A-Modelleichung zu beurteilen. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einer kurzen Messreihe ein Hochwasser in der Grössenordnung der zu bestimmenden Bemessungsgrösse vorkommt, ist sehr klein. Mit HQx_meso_CH ist schnell abgeklärt, ob eine kurze Reihe ein bedeutendes Ereignis enthält. Bei langen Abflussmessreihen (für ein HQ_{100} mindestens 30 Jahre) gelangt die Extremwertstatistik zum Einsatz. Wenn Abflussdaten vorhanden sind, die Messreihe aber zu kurz für eine extremwertstatistische Auswertung ist, wird mit der N-A-Modellierung eine lange Abflussreihe simuliert, die anschliessend mit den Mitteln der Extremwertstatistik analysiert wird.

Wettergeneratoren und N-A-Modelle müssen so zuverlässig sein, dass keine neuen Unsicherheiten entstehen. Die Simulation langer Abflussreihen hat nur dann grosse Vorteile gegenüber der Extremwertstatistik mit zu kurzen Reihen, wenn im Bereich

3 Weingartner und Aschwanden (1992) schlagen bei der Bestimmung von Mittelwasserabflüssen eine Übertragung von Parametern aus Repräsentativgebieten vor.

der Bemessungsgrössen (HQ_{20}, HQ_{50}, HQ_{100} ...) mit den N-A-Modellen realistische Abflüsse simuliert werden können. Aber auch bei der Extremwertstatistik gibt es Schwierigkeiten. Das Fallbeispiel Langeten hat gezeigt, dass auch mit einer 30-jährigen Messreihe nicht zwingend zuverlässige Bemessungsgrössen bestimmt werden. Es gilt abzuwägen, welche Unsicherheiten grösser sind: a) In einer zu kurzen Messreihe kommen keine seltenen Ereignisse vor und der extrapolierte Wert unterschätzt deshalb den *wahren* Bemessungswert. b) Der Wettergenerator liefert kein plausibles Wetter und/oder das N-A-Modell ist nicht in der Lage, den klimatischen Systeminput vernünftig in den Abfluss zu transformieren.

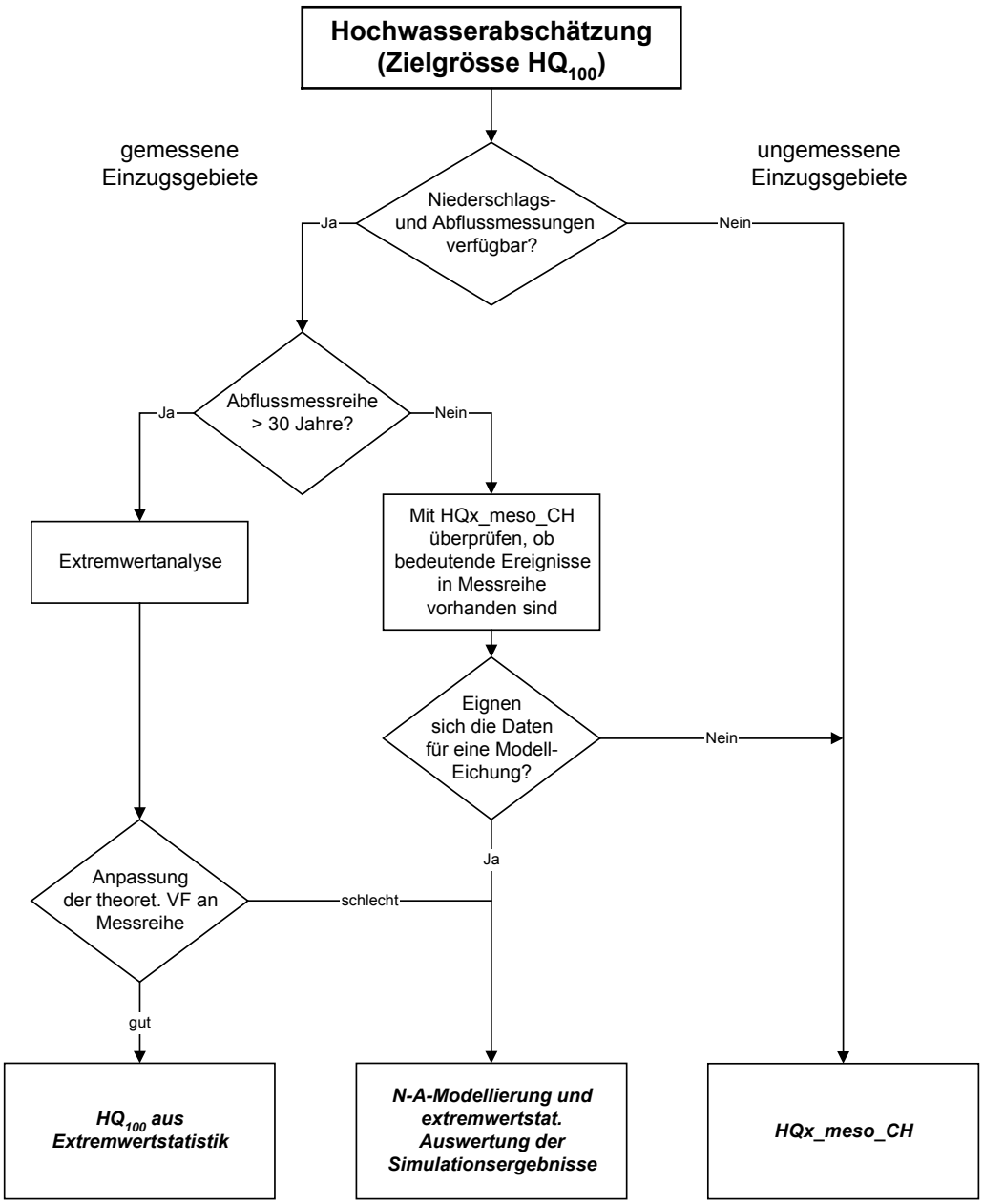


Abbildung 6.1: Bestimmung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Zielgrösse HQ_{100}; bei kürzeren Wiederkehrintervallen wird analog vorgegangen. Der zeitliche und der finanzielle Aspekt wird nicht berücksichtigt. Es stehen genügend finanzielle Mittel zur Verfügung.

Gegenwärtig werden – aus den in Kapitel 5 geschilderten Gründen – für die Bestimmung seltener Hochwasserabflüsse kaum N-A-Modelle eingesetzt. Gelingt es, die Modelle (Wettergeneratoren und N-A-Modelle) so zu gestalten, dass sie anwenderfreundlich und rasch einsetzbar sind, werden sich die Vorteile für die Langzeitsimulation vergrössern. Insbesondere durch die zusätzliche Verfügbarkeit von Ganglinien (im Gegensatz nur zur Hochwasserspitze) wird die Bedeutung der N-A-Modelle weiter ansteigen.

Die entscheidende Frage in Abbildung 6.1 ist diejenige nach der Eignung der Daten für eine Modelleichung. Sie ist bei gegebener Datenlage auch abhängig von der Fragestellung (Wird eine Ganglinie verlangt? Geht es um Szenarien? Ist bei der Hochwasserabschätzung ein Wiederkehrintervall gefragt? ...) und nicht immer leicht zu beantworten. In diesem Sinn sollte zwischen den beiden Ansätzen nicht eine Konkurrenzsituation konstruiert werden, sondern man sollte sich jeweils fragen, wie sie sich sinnvoll ergänzen könnten.

Literatur

AGW (Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich) (1997): Gewässer im GEP – Teil Hochwasser, Leitfaden zur Bearbeitung der Gewässer im Generellen Entwässerungsplan, Zürich.

Aschwanden, H., Spreafico, M. (1989): Übertragungsfunktionen Niederschlag-Abfluss in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 11, Bern.

ASF (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau) (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern.

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., Weingartner, R. (1998): Klimänderung und Wasserhaushaltssimulation (Murg und Ergolz). Publikation Gewässerkunde Nr. 210, Bern.

Beven, K., Germann, P. (1982): Macropores and Water Flow in Soils. Water Resources Research. Vol. 18, No. 5, 1311-1325.

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

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

BFS (Bundesamt für Statistik) (1996): Herausforderung Bevölkerungswandel, Perspektiven für die Schweiz. Bericht des Perspektivstabes der Bundesverwaltung. Bern.

BFS (Bundesamt für Statistik) (1999): Statistisches Jahrbuch der Schweiz 2000. Zürich.

Binggeli, V. (1974): Hydrologische Studien im zentralen Schweizerischen Alpenvorland, insbesondere im Gebiet der Langete. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Hydrologie, Nr. 22, Bern.

Binggeli, V., Bitterli, S., Leibundgut, Ch. (1976): Zur Hydrologie des Langete-Hochwassers vom 30. August 1975, Ausmass, Ursachen und Sanierungsprobleme. In: Wasser, Energie, Luft, Nr. 2/3, Baden.

Biswas, A. (1970): History of Hydrology. North Holland Publishing Company, Amsterdam.

Bogner, K., Mader, H. (1999): Niederschlags- und Abflussmodellierung kleiner alpiner Einzugsgebiete am Beispiel des Globasnitzbaches. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 51. Jahrgang, Heft 3/4, Wien.

Borchardt, L. (1906): Nilmesser und Nilstandsmarken. Abh. der königlichen Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1-55.

Breinlinger, R., Gamma, P., Weingartner, R. (1992): Kenngrössen kleiner Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.2, Bern.

Bruschin, J., North, M. (1977): Projekthochwasser für Einzugsgebiete ohne Abflussbeobachtungen. In: Schweizerische Bauzeitung, 95. Jahrgang, Heft 25, 407-412, Zürich.

Bultot, F., Gellens, D., Spreafico, M., Schädler, B. (1992): Repercussions of a CO_2 doubling on the water balance – a case study in Switzerland. Journal of Hydrology, 137, 199-208.

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umweltmaterialien Nr. 85, Bern.

BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) (2000): Hochwasser 1999. Analyse der Messdaten und statistische Einordnung. Hydrologische Mitteilungen Nr. 28, Bern.

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

BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1997): Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Biel.

BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1998): Ausbildungskurs Gefahrenkarten, Kursunterlagen. Biel.

Byczkowski, A. (1999): Das System der Formeln von Iszkowski im Rückblick auf die Vergangenheit und Modifizierungen. Eine historische Betrachtung. Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 78, 67-76, Wien.

BZS (Bundesamt für Zivilschutz) (1995): Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine vergleichende Übersicht, Bern.

Chow, V. T., Maidment, D., Mays, L. (1988): Applied Hydrology. New York.

Dooge, J. (1957): The rational method for estimating flood peaks. Irish contribution to the technique. Engineering 184, 311-313.

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

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

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

DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt, Nr. 251, Bonn.

DVWK (1999): Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften, Nr. 124, Bonn.

Federer, C., Lash, D. (1978): BROOK: A hydrologic simulation model for eastern forests. Water Resource Research Center, University of New Hampshire.

Forster, F. (1992): Anwendungen und Erfahrungen mit dem Simulationsmodell BROOK. Interner Hydrologie-Bericht B349.1, Birmensdorf.

Gees, A. (1996): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz – Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Geographica Bernensia G53, Bern.

Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4, Bern.

GRD (Gruppe für Rüstungsdienste): RIMINI-Höhenmodell. In: GEOSTAT, Bern.

Grebner, D., Roesch, Th., Schwarb, M. (1999): Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981-1993. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.5, Bern.

Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H., Menzel, L., Schulla, J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.

Gyalistras, D., Fischlin, A., Riedo, M. (1997): Herleitung stündlicher Wetterszenarien unter zukünftigen Klimabedingungen. In: Fuhrer, J. (ed.), Klimaänderung und Grünland – eine Modellstudie über die Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen auf das Dauergrünland in der Schweiz. vdf Hochschulverlag, Zürich.

Heusser, H. (1947): Die Voraussage der maximalen Hochwassermenge. In: Schweizerische Technische Zeitschrift, 31, 524-526.

Hofbauer, R. (1916): Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. In: Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 38-40, Wien.

Hüsler, J. (2000): Extremwert-Statistik. Workshop zur Extremwertanalyse in Hydrologie und Limnologie. Kursunterlagen. Institut für math. Statistik und Versicherungslehre der Universität Bern, Bern.

Isch, E. (2000): Untersuchungen zur Phosphorbelastung an den zwei Zugersee-Zuflüssen Aabach und Rigiaa. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 251, Bern.

Iszkowski, R. (1886): Beitrag zur Ermittlung der Niedrigst-, Normal- und Höchstwassermengen auf Grund charakteristischer Merkmale der Flussgebiete. In: Zeitschrift des Österreichischen Architektur- und Ingenieurvereins, 69-98, Wien.

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.

Kirnbauer, R. (1981): Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau. Wiener Mitteilungen Wasser, Abwasser, Gewässer, Band 42, Wien.

Kleindienst, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität München.

Kleindienst, H., Forster, F. (2000): Bemessungshochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten – Was bringt ein hydrologisches Prozessmodell gegenüber einfachen Schätzformeln. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 44. Jahrgang, Heft 1, Koblenz.

Klemes, V. (2000): Tall Tales about Tails of Hydrological Distributions. In: Journal of Hydrologic Engineering: Vol. 5, No. 3, 227-239, Fulton.

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, 55-57, Baden.

Kürsteiner, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur. In: Schweizerische Bauzeitung, 1, 4-8, Zürich.

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. (1876): Versuch zur Aufstellung einer allgemeinen Übersicht der aus Grösse und Beschaffenheit der Flussgebiete abgeleiteten Schweizerischen Stromabflussmengen, gestützt auf die meteorologischen Beobachtungen der Schweiz, nebst Anleitung zur Behandlung dieser Aufgabe im Allgemeinen. Commissions Verlag Huber, Bern.

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.

Leibundgut, Ch. (1976): Zum Wasserhaushalt des Oberaargaus und zur hydrologischen Bedeutung des landwirtschaftlichen Wiesenbewässerungssystems im Langetental. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Hydrologie, Nr. 23, Bern.

L+T (Landestopographie) (1999): Digitales Gewässernetz 1:25'000. In: GEOSTAT, Bern.

Maniak, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Lehrbuch, Berlin.

Maniak, U. (1999): Flussgebietsmodelle. In: Mathematische Modelle in der Gewässerkunde. Stand und Perspektiven. BfG-Mitteilungen Nr. 19, Koblenz.

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): Beeinflussungen der Fliessgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW) und Seeregulierungen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Bern.

Melli, E. (1924): Die Dimensionierung städtischer Kanäle. In: Schweizerische Bauzeitung 12, 137-141, Zürich.

Müller, R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauung. Mitteilungen der VAW Nr. 4, Zürich.

Mulvaney, T. (1850-1851): On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland.

Nace, R. (1974): Pierre Perrault: The man and his contribution to modern hydrology. Water Resources Bulletin, Vol. 10, No. 4, 633-647.

Naef, F. (1981): Can we model the rainfall-runoff process today? Hydrological Sciences Bulletin, 26,3,9.

Naef, F., Zuidema, P., Kölla, E. (1986): Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 33, Bern.

Naef, F. (1991): Anwendungsbeispiele von hydrologischen Modellen. Workshop „Hydrologische Abflussmodelle im Dienste des Gewässerschutzes". EAWAG, Dübendorf.

Naef, F. (1993): Der Abflusskoeffizient: einfach und praktisch? In: Aktuelle Aspekte in der Hydrologie. Zürcher Geographische Schriften, Heft 53, Zürich.

Nemec, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. KHR-Bericht II-7, Lelystad.

Niggli, M. (1999): Hochwasserrisiko: Schadenpotential von Fliessgewässern. Diplomarbeit am Geografischen Institut der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 236, Bern.

OcCC (Beratendes Organ für Klimaforschungsfragen) (1998): Klimaänderung Schweiz. Auswirkungen von extremen Niederschlagsereignissen. Wissenstandsbericht. OcCC, Bern.

Pfister, Ch. (1998): 500 Jahre Klimanachhersage. Paul Haupt Verlag, Bern.

PLANAT (Nationale Plattform Naturgefahren) (1998): Von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur. Bern.

Rickli, Ch., Forster, F. (1997): Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. In: Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen, 148, 5, 367-385.

Röthlisberger, G. (1998): Unwetterschäden in der Schweiz. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Nr. 346, Birmensdorf.

Schädler, B. (1990): Abfluss. Beitrag zur Internationalen Fachtagung "Schnee, Eis, Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre". Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 108, ETH Zürich.

Schnitter, N. (1992): Die Geschichte des Wasserbaus in der Schweiz. Olynthus Verlag, Oberbözberg.

Spreafico, M., Stadler, K. (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7, Bern.

Spreafico, M., Stadler, K. (1988): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 8, Bern.

Spreafico, M., Aschwanden, H. (1991): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 16 und 17, Bern.

Sydler, P.-A., Widmoser, P., Zollinger, F. (1982): Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik, ETHZ.

Tversky, A., Kahneman, D. (1981): The framing of decisions and the psychology of choice. Science, 211.

Vischer, D. (1988): Robert Lauterburg 1816 - 1893. In: 125 Jahre Hydrometrie in der Schweiz. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 9, Bern.

Weichselgartner, J. (2000): Hochwasser als soziales Ereignis. Gesellschaftliche Faktoren einer Naturgefahr. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 44. Jahrgang, Heft 3, 122-131, 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., Manser, S. (1997): Möglichkeiten und Grenzen der Hochwasserabschätzung in kleineren schweizerischen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen. In: Wasser, Energie, Luft 5/6, 131-138.

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

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

Widmoser, P. (1974): Extremabflüsse aus 40 kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweizerische Bauzeitung 92(32), 757-765.

Zeller, J. (1975): Berechnung der Abflusswassermenge. Beilage zur Vorlesung „Wildbach- und Hangverbau", Abteilung VI, ETH Zürich.

verwendete Software

Borland Delphi, Professional, Version 3.0

HQ-EX, Version 2.0

Idrisi for Windows, Version 4.0

Surfer, Version 6.01

Anhang

A Referenzstationen, Referenzwerte

A1 Nummern und Namen der Referenzstationen

A2 Messperioden der Referenzstationen

A3 Lage und Grösse der Einzugsgebiete

A4 Verhältnis von grösster Eichmessung zu grösstem Abfluss

A5 Referenzwerte HQ_{100}

A1

Nummern und Namen der Referenzstationen

EG-Nr	Gewässer	Station	EG-Nr	Gewässer	Station
284	Muota	Ingenbohl	843	Cassarate	Pregassona
378	Inn	St.Moritzbad	844	Ferrerabach	Trun
433	Drance d'Entrem.	Sembrancher	848	Dischmabach	Davos
448	Thur	Alt St.Johann	852	Thur	Stein
453	Meienreuss	Husen	862	Saltina	Brig
528	Murg	Wängi	863	Langeten	Huttwil
549	Töss	Neftenbach	879	Riale di Calneggia	Cavergno
551	Piumogna	Dalpe	881	Simmi	Gams
598	Julia	Tiefencastel	882	Steinenbach	Kaltbrunn
618	Brenno	Campra	886	Sitter	Appenzell
620	Göschener Reuss	Abfrutt	888	Langeten	Lotzwil
643	Alp	Trachslau	889	Moesa	Mesocco
650	Gürbe	Belp	890	Poschiavino	La Rösa
667	Venoge	Eclepens	898	Mentue	Yvonand
695	Schächen	Bürglen	911	Necker	Mogelsberg
703	Emme	Eggiwil	916	Taschinasbach	Grüsch
712	Somvixer Rhein	Alp Sutglatscher	922	Chamuerabach	La Punt
716	Weisse Lütschine	Zweilütschinen	926	Mentue	Dommartin
720	Grande Eau	Aigle	932	Sionge	Vuippens
722	Somvixer Rhein	Acla Mulin	938	Glatt	Rheinsfelden
735	Simme	Oberried/Lenk	944	Kleine Emme	Littau
740	Hinterrhein	Hinterrhein	946	Dünnern	Olten
749	Maggia	Bignasco	978	Sense	Thörishaus
750	Allenbach	Adelboden	1017	Plessur	Chur
751	Gornernbach	Kiental	1035	Engelberger Aa	Engelberg
753	Kander	Gasterntal	1054	Baye de Montreux	Montreux
755	Engstligenbach	Engstligenalp	1056	Bavona	Bignasco
765	Krummbach	Klusmatten	2008	Sisslen	Eiken
766	Trübbach	Räzliberg	2011	Suhre	Reitnau
767	Zwischbergenbach	Im Fah	2014	Ürke	Holziken
769	Calancasca	Buseno	2018	Wyna	Unterkulm
778	Rosegbach	Pontresina	2026	Bünz	Othmarsingen
789	Biberenkanal	Kerzers	2102	La Birse	Court
792	Rhone	Gletsch	2201	Kander	Kandersteg
793	Lonza	Blatten	2203	Fildrich	Riedli
799	Grosstalbach	Isenthal	2301	Buuserbach	Maisprach
803	Witenwasserenreuss	Realp	2304	Ergolz	Ormalingen
820	Taschinasbach	Seewis	2305	Eibach	Gelterkinden
821	Alpbach	Erstfeld	2307	Diegterbach	Sissach
822	Minster	Euthal	2309	Vordere Frenke	Waldenburg
824	Grossbach	Gross	2310	Vordere Frenke	Bubendorf
826	Ova dal Fuorn	Zernez	2313	Violenbach	Augst
827	Glatt	Herisau	2701	Lüssel	Breitenbach
829	Suze	Sonceboz	2704	Augstbach	Balsthal
831	Steinach	Steinach	2901	Calcaccia	Airolo
833	Aach	Salmsach	2903	Traversagna	Arbedo
834	Urnäsch	Hundwil	2908	Vedeggio	Isone
838	Ova da Cluozza	Zernez			

EG-Nr Einzugsgebietsnummer nach LHG oder HADES

A2

Messperioden der Referenzstationen

EG-Nr	n	Periode	Lücken	EG-Nr	n	Periode	Lücken
284	80	1917 - 1996		843	30	1967 - 1996	
378	90	1907 - 1996		844	27	1963 - 1989	
433	18	1911 - 1928		848	33	1964 - 1996	
448	18	1911 - 1928		852	33	1964 - 1996	
453	33	1911 - 1944	/1929	862	31	1966 - 1996	
528	61	1914 - 1996	/1918 – 21; 1936 - 53	863	31	1966 - 1996	
549	76	1921 - 1996		879	30	1967 - 1996	
551	13	1916 - 1928		881	13	1968 - 1980	
598	30	1919 - 1948		882	29	1968 - 1996	
618	11	1920 - 1930		886	28	1969 - 1996	
620	14	1920 - 1933		888	25	1969 - 1993	
643	26	1925 - 1950		889	21	1970 - 1990	
650	74	1923 - 1996		890	27	1970 - 1996	
667	12	1924 - 1935		898	26	1971 - 1996	
695	55	1930 - 1984		911	25	1972 - 1996	
703	44	1931 - 1974		916	25	1972 - 1996	
712	43	1932 - 1974		922	24	1973 - 1996	
716	64	1933 - 1996		926	16	1975 - 1990	
720	25	1972 - 1996		932	21	1976 - 1996	
722	25	1937 - 1961		938	21	1976 - 1996	
735	48	1949 - 1996		944	19	1978 - 1996	
740	52	1945 - 1996		946	19	1978 - 1996	
749	33	1949 - 1981		978	69	1928 - 1996	
750	47	1950 - 1996		1017	66	1931 - 1996	
751	33	1950 - 1982		1035	36	1955 - 1990	
753	33	1950 - 1982		1054	41	1933 - 1973	
755	16	1950 - 1965		1056	46	1929 - 1953	
765	43	1952 - 1996	/1993 - 94	2008	38	1959 - 1996	
766	44	1952 - 1995		2011	18	1979 - 1996	
767	28	1952 - 1979		2014	18	1979 - 1996	
769	43	1952 - 1996	/1981; 1986	2018	43	1954 - 1996	
778	42	1955 - 1996		2026	40	1957 - 1996	
789	39	1956 - 1994		2102	22	1974 - 1996	/1991
792	41	1956 - 1996		2201	80	1917 - 1996	
793	41	1956 - 1996		2203	43	1954 - 1996	
799	40	1957 - 1996		2301	20	1977 - 1996	
803	30	1957 - 1986		2304	20	1977 - 1996	
820	12	1960 - 1971		2305	21	1976 - 1996	
821	37	1960 - 1996		2307	21	1976 - 1996	
822	36	1961 - 1996		2309	19	1978 - 1996	
824	11	1961 - 1971		2310	21	1976 - 1996	
826	37	1960 - 1996		2313	18	1979 - 1996	
827	35	1961 - 1996		2701	18	1979 - 1996	
829	36	1961 - 1996	/1983	2704	15	1979 - 1995	/1986; 1993
831	35	1962 - 1996		2901	32	1963 - 1996	/1969; 1981
833	35	1962 - 1996		2903	30	1966 - 1996	/1978
834	35	1962 - 1996		2908	35	1961 - 1996	/1973
838	35	1962 - 1996					

n Länge der Messreihe [a]
Periode Messperiode mit Anfangsjahr - Endjahr
Lücken Lücken in der Messperiode (Einzeljahre oder Perioden)

A3

Lage und Grösse der Einzugsgebiete

EG-Nr	X	Y	Fn	EG-Nr	X	Y	Fn
284	699292	204244	326.9	843	721722	103449	76.6
378	779366	144512	155.8	844	715973	182267	11.8
433	578043	89412	296.8	848	788846	179034	43.1
448	742575	229713	63.3	852	740945	228711	88.5
453	681937	176747	66.8	862	647280	126348	77.6
528	716743	256143	80.3	863	628730	214795	58.7
549	704258	253679	336.4	879	681902	134659	24.1
551	700811	144876	20.3	881	746975	229044	17.0
598	766960	156332	325.4	882	725015	230273	18.6
618	706210	154678	34.5	886	749128	239397	74.1
620	679931	168619	89.9	888	627615	217657	115.2
643	697153	213517	32.0	889	733686	147724	49.9
650	604957	182043	117.7	890	801176	143845	13.7
667	520945	163563	143.9	898	543688	170775	108.6
695	701357	190638	95.1	911	732712	241133	86.8
703	636115	183307	101.8	916	768372	211191	64.1
712	719346	165215	22.2	922	795927	155465	73.5
716	634992	155793	164.9	926	544068	163384	12.9
720	573990	133113	130.8	932	567582	163488	47.0
722	717143	168230	78.5	938	690605	251245	420.5
735	605136	139216	38.3	944	648743	201609	478.5
740	730034	152325	53.6	946	619125	238762	180.6
749	692628	141479	193.6	978	594503	179572	350.2
750	606284	146782	28.7	1017	768328	186133	266.2
751	626841	152802	25.8	1035	678738	185220	84.7
753	625116	145296	42.0	1054	562875	144771	14.0
755	609746	142405	14.8	1056	683632	138525	120.2
765	643974	120455	19.8	2008	644885	258770	123.4
766	604793	137797	22.1	2011	653619	223837	139.7
767	648693	107501	17.2	2014	643412	237000	25.4
769	729654	137304	119.9	2018	655202	232553	87.6
778	786618	143429	66.7	2026	663926	241269	107.2
789	580444	196799	49.6	2102	583133	231210	93.9
792	673137	161315	39.4	2201	620415	146066	145.2
793	633486	144414	77.6	2203	603963	158065	78.2
799	681812	193299	44.1	2301	632058	262354	12.2
803	679745	156651	30.8	2304	635619	257190	28.9
820	768474	212073	47.8	2305	634888	252947	27.7
821	685680	183924	20.5	2307	628294	251067	33.0
822	702661	210561	61.2	2309	623273	246398	12.1
824	700198	216413	9.9	2310	624136	249868	44.8
826	815220	171562	54.9	2313	624384	262823	17.0
827	738204	248702	16.8	2701	611206	246623	45.7
829	568902	222515	128.5	2704	620082	243574	62.5
831	748036	256168	22.6	2901	692347	150463	11.3
833	737692	268742	53.6	2903	727657	117508	16.7
834	741177	240657	64.5	2908	723316	110053	21.2
838	805050	169408	26.9				

X X-Koordinate (Landeskoordinaten) des EG-Schwerpunktes [m]
Y Y-Koordinate (Landeskoordinaten) des EG-Schwerpunktes [m]
Fn Einzugsgebietsfläche [km^2]

A4

Verhältnis von grösster Eichmessung zu grösstem Abfluss

EG-Nr	HHQ	Eichung	Eichung / HHQ	EG-Nr	HHQ	Eichung	Eichung / HHQ
284	315.0	139.0	0.441	843	115.0	34.0	0.296
378	85.0	31.9	0.375	844	25.0	3.9	0.156
433	118.0	37.8	0.320	848	19.1	10.9	0.571
448	54.3	10.1	0.186	852	115.0	36.9	0.321
453	96.0	18.0	0.188	862	100.0	14.6	0.146
528	73.4	21.5	0.293	863	55.0	18.1	0.329
549	270.0	107.0	0.396	879	105.0	46.0	0.438
551	36.2	7.9	0.217	881	35.0	7.5	0.213
598	192.0	54.0	0.281	882	48.5	16.1	0.332
618	64.6	7.5	0.115	886	142.5	33.8	0.237
620	77.8	24.4	0.314	888	110.0	15.6	0.142
643	85.0	7.5	0.088	889	110.0	8.2	0.075
650	59.0	26.1	0.442	890	14.9	2.8	0.185
667	50.0	14.6	0.292	898	52.5	16.6	0.316
695	105.0	20.2	0.192	911	325.0	95.7	0.294
703	185.0	98.0	0.530	916	70.5	10.6	0.150
712	57.5	10.8	0.188	922	24.0	11.8	0.492
716	110.0	52.0	0.473	926	8.7	5.8	**0.664**
720	67.5	28.5	0.422	932	50.5	18.0	0.356
722	205.0	19.3	0.094	938	120.0	31.0	0.258
735	34.5	11.6	0.336	944	535.0	181.0	0.338
740	170.0	55.0	0.324	946	115.0	41.4	0.360
749	735.0	290.0	0.395	978	495.0	91.5	0.185
750	75.0	5.5	0.073	1017	90.0	35.3	0.392
751	34.0	8.1	0.238	1035	62.5	33.2	0.531
753	21.0	9.0	0.430	1054	23.5	3.1	0.133
755	9.8	5.8	0.594	1056	160.0	66.9	0.418
765	30.5	6.0	0.198	2008	45.0	15.0	0.333
766	17.2	7.6	0.444	2011	35.0	10.2	0.291
767	39.5	5.9	0.148	2014	9.2	4.5	0.489
769	420.0	81.7	0.195	2018	60.0	14.0	0.233
778	67.5	29.3	0.434	2026	60.0	12.0	0.200
789	19.1	7.4	0.388	2102	36.8	5.3	0.144
792	28.5	16.6	0.582	2201	50.0	22.3	0.446
793	81.0	26.6	0.328	2203	42.0	11.6	0.276
799	46.0	8.1	0.176	2301	4.9	1.8	0.367
803	53.5	16.8	0.314	2304	19.9	7.8	0.392
820	64.5	17.4	0.270	2305	36.0	5.1	0.142
821	71.5	8.4	0.118	2307	26.0	5.4	0.208
822	205.0	24.4	0.119	2309	6.5	2.4	0.369
824	91.0	6.1	0.067	2310	27.0	7.3	0.270
826	17.3	4.9	0.286	2313	4.9	2.0	0.408
827	96.0	12.0	0.125	2701	85.3	5.7	0.067
829	96.0	30.1	0.314	2704	81.2	13.0	0.160
831	96.0	9.8	0.102	2901	23.9	0.7	**0.028**
833	48.5	11.0	0.227	2903	21.2	1.9	0.088
834	120.0	32.8	0.273	2908	35.3	4.0	0.112
838	14.3	4.2	0.292				

HHQ grösste Jahreshochwasserspitze der Messperiode (bis 1996) [m^3/s]
Eichung grösste Eichmessung [m^3/s]
Eichung/HHQ grösste Eichmessung dividiert durch grösste Jahreshochwasserspitze [-]

Quelle LHG

A5

Referenzwerte HQ_{100}

EG-Nr	DVWK alt [m³/s]	DVWK neu [m³/s]	AE/MM [m³/s]	EG-Nr	DVWK alt [m³/s]	DVWK neu [m³/s]	AE/MM [m³/s]
284	297.8	305.2	**299.4**	843	119.1	119.9	**113.4**
378	65.7	68.4	**67.8**	844	25.1	24.8	**23.1**
433	140.4	135.0	**132.1**	848	20.0	18.8	**19.0**
448	65.4	63.0	**61.9**	852	128.9	128.9	**121.1**
453	138.5	140.3	**112.1**	862	100.2	98.6	**88.4**
528	67.1	65.0	**67.7**	863	65.9	70.2	**59.7**
549	264.2	259.8	**265.9**	879	118.4	107.9	**109.9**
551	45.9	41.1	**41.1**	881	63.1	52.5	**44.5**
598	210.5	212.1	**200.0**	882	49.8	49.2	**49.9**
618	79.9	87.3	**80.6**	886	176.4	180.9	**160.1**
620	86.9	86.3	**85.9**	888	104.4	109.9	**97.0**
643	90.1	86.8	**86.7**	889	132.8	129.3	**126.2**
650	60.1	57.4	**58.3**	890	17.7	16.4	**15.9**
667	61.6	58.2	**57.9**	898	57.9	54.5	**54.3**
695	103.4	108.2	**94.0**	911	602.0	496.8	**421.3**
703	224.3	227.0	**211.0**	916	71.6	70.8	**72.4**
712	58.0	55.8	**57.1**	922	28.8	30.1	**27.4**
716	114.7	118.0	**110.1**	926	9.2	9.0	**9.4**
720	74.3	73.1	**71.4**	932	56.6	55.2	**55.4**
722	216.0	214.6	**216.7**	938	129.8	124.1	**126.1**
735	39.6	41.4	**36.5**	944	637.2	692.1	**595.3**
740	163.6	167.0	**164.5**	946	137.5	131.1	**134.2**
749	860.0	835.1	**801.4**	978	391.3	386.8	**398.2**
750	79.8	79.9	**71.3**	1017	90.4	93.6	**90.7**
751	32.6	33.5	**32.4**	1035	71.3	71.3	**68.6**
753	22.9	23.0	**22.3**	1054	26.3	25.4	**23.9**
755	11.1	11.3	**10.9**	1056	194.6	192.4	**186.4**
765	27.6	26.0	**27.7**	2008	50.2	45.8	**46.3**
766	15.7	17.5	**16.8**	2011	52.2	50.8	**43.4**
767	64.7	61.9	**47.6**	2014	10.4	9.5	**9.5**
769	431.7	453.8	**430.5**	2018	54.0	52.1	**54.0**
778	72.4	78.3	**66.8**	2026	58.4	54.8	**56.0**
789	23.7	21.8	**21.4**	2102	41.8	47.3	**42.2**
792	28.5	29.4	**28.6**	2201	48.7	47.3	**47.1**
793	80.6	81.9	**78.7**	2203	34.4	35.3	**35.2**
799	57.9	58.4	**48.7**	2301	5.1	5.0	**5.1**
803	82.1	83.2	**64.7**	2304	21.5	21.7	**21.7**
820	101.5	105.8	**80.6**	2305	43.0	40.9	**35.1**
821	66.0	67.2	**61.0**	2307	34.1	33.9	**30.9**
822	244.0	253.3	**220.8**	2309	6.6	6.5	**6.7**
824	215.8	188.1	**110.2**	2310	27.8	27.5	**28.0**
826	17.5	18.1	**16.7**	2313	6.2	4.9	**4.9**
827	131.1	122.3	**93.8**	2701	111.7	97.3	**91.4**
829	88.6	89.0	**86.1**	2704	37.1	36.1	**69.5**
831	107.4	103.5	**93.2**	2901	36.2	34.5	**27.3**
833	52.3	52.0	**48.5**	2903	26.3	26.7	**22.2**
834	135.9	140.7	**134.7**	2908	40.8	38.9	**35.8**
838	16.7	16.5	**15.6**				

DVWK alt nach DVWK (1979) (Möglichkeit a) in Kapitel 2.2)
DVWK neu mit HQ-Ex berechnet und Mittelwert aus 3 Abschätzungen (Möglichkeit b) in Kapitel 2.2)
AE/MM Allg. Extremwertverteilung mit Momenten-Methode (Möglichkeit c) in Kapitel 2.2)

B Modellvergleich

B1 Resultate der Abschätzungen

B2 Grafische Gegenüberstellung Abschätzung / Referenz; Korrelationskoeffizienten

B3 Übersichten nach verschiedenen Kriterien

B4 Gebietsparameter für das Modell BaD7

B1

Resultate der Abschätzungen

EG-Nr	AE/MM[1]	Melli	Hof-bauer	Kürstei-ner	Müller-Zeller	Kölla[2]	Kölla mod.[3]	GIUB (Fn)	GIUB (MQ)	Mo-mente	BaD7
284	**299.4**	756.5	489.3	373.5	540.2	544.2	517.6	231.6	254.3	374.1	484.3
378	**67.8**	461.6	351.2	230.7	265.9	135.3	206.0	184.9	177.8	81.2	115.9
433	**132.1**	709.4	512.7	370.1	361.2	156.9	276.4	166.7	146.0	181.4	239.1
448	**61.9**	235.5	220.4	129.4	306.7	104.9	125.9	86.4	87.1	66.3	83.3
453	**112.1**	246.3	251.6	137.9	137.4	100.0	162.4	89.4	107.1	105.2	114.4
528	**67.7**	287.1	188.8	105.9	80.7	113.5	80.7	38.8	34.6	70.7	71.7
549	**265.9**	771.1	396.2	285.4	247.9	569.1	368.4	229.6	181.0	261.8	322.0
551	**41.1**	91.3	135.4	65.3	151.9	58.3	88.0	39.2	43.2	55.3	76.6
598	**200.0**	754.2	508.7	392.6	442.8	150.7	249.3	195.7	176.1	216.0	234.2
618	**80.6**	142.0	165.3	87.8	167.4	95.0	116.4	60.6	93.0	63.2	58.7
620	**85.9**	315.4	293.5	160.9	154.2	142.9	243.8	106.7	122.9	150.0	120.3
643	**86.7**	133.4	145.6	75.8	131.0	217.7	165.6	114.7	98.2	103.8	163.8
650	**58.3**	382.9	245.6	150.3	260.1	142.9	121.5	46.7	44.2	87.0	127.9
667	**57.9**	437.8	251.9	154.7	102.7	153.6	110.7	54.2	49.4	56.1	43.4
695	**94.0**	330.6	291.9	180.4	181.3	203.2	305.1	109.6	102.1	133.1	213.5
703	**211.0**	347.6	262.3	165.5	341.8	261.1	214.7	214.0	174.9	159.9	211.3
712	**57.1**	98.3	136.5	64.3	113.1	91.6	96.9	43.8	64.0	61.2	67.8
716	**110.1**	479.4	393.7	241.6	230.3	207.8	314.5	114.4	113.7	145.3	177.1
720	**71.4**	410.8	325.9	214.7	198.8	226.7	245.2	133.7	113.0	144.1	159.4
722	**216.7**	281.7	264.2	155.4	274.6	158.4	204.1	111.3	154.5	96.4	140.1
735	**36.5**	154.9	169.0	82.7	73.1	44.7	79.1	45.0	44.3	29.1	37.4
740	**164.5**	205.0	215.2	110.4	192.6	144.7	179.3	84.0	117.7	107.4	90.6
749	**801.4**	533.5	425.8	302.5	726.4	447.4	608.5	469.6	181.1	266.8	577.6
750	**71.3**	121.8	149.1	76.8	82.6	67.8	85.4	37.4	30.4	38.0	22.8
751	**32.4**	111.5	156.0	71.4	72.3	48.2	79.4	34.9	34.3	29.3	43.2
753	**22.3**	167.3	193.3	88.4	76.9	32.9	76.1	20.7	23.1	34.3	53.8
755	**10.9**	70.1	108.7	47.8	49.9	30.9	39.7	9.5	11.9	16.9	20.8
765	**27.7**	89.4	122.0	58.2	68.3	89.7	111.2	29.4	22.5	26.5	25.3
766	**16.8**	98.0	120.7	51.8	42.2	15.8	34.1	31.6	18.5	18.6	26.8
767	**47.6**	79.5	125.7	55.6	57.7	100.2	122.4	26.9	25.6	30.2	26.0
769	**430.5**	387.6	339.0	221.6	444.5	208.1	303.7	337.4	274.6	175.3	523.2
778	**66.8**	246.0	244.0	121.5	111.4	48.7	93.7	98.7	100.8	39.6	55.2
789	**21.4**	192.2	129.3	60.1	38.6	35.5	28.1	24.9	14.6	24.3	24.5
792	**28.6**	158.6	174.4	75.3	64.9	37.1	72.2	24.6	33.1	60.9	31.2
793	**78.7**	279.0	264.3	133.6	119.6	80.0	143.2	32.5	44.4	86.3	78.4
799	**48.7**	174.2	203.2	107.8	108.1	78.4	125.2	26.9	25.0	50.3	46.0
803	**64.7**	129.2	156.8	78.1	86.5	116.4	141.6	56.1	61.4	74.5	66.6
820	**80.6**	186.3	200.8	113.1	120.8	76.0	91.6	73.1	70.8	78.9	72.6
821	**61.0**	92.0	142.1	60.0	56.2	18.4	45.3	43.9	54.8	30.0	28.3
822	**220.8**	229.0	205.7	119.7	187.5	329.2	253.3	164.2	160.0	164.3	156.0
824	**110.2**	50.2	82.1	35.3	64.0	83.8	72.3	61.0	44.0	37.3	29.1
826	**16.7**	209.1	204.9	117.8	106.8	44.8	65.4	25.0	16.0	26.0	34.4
827	**93.8**	78.0	90.5	41.0	74.0	99.8	83.0	81.1	50.3	40.0	15.5
829	**86.1**	406.0	270.0	173.4	144.8	55.2	57.3	49.9	62.7	45.0	40.4
831	**93.2**	99.8	101.0	46.7	79.3	290.8	263.4	95.1	65.5	28.4	62.8
833	**48.5**	205.0	124.3	51.9	36.3	67.4	44.1	151.7	62.8	38.0	25.9
834	**134.7**	239.2	199.5	116.0	255.6	308.4	228.9	167.5	149.4	170.8	176.2
838	**15.6**	115.4	158.7	79.7	74.4	10.6	27.9	13.8	12.3	9.2	42.5
843	**113.4**	276.0	240.5	146.3	293.3	535.6	405.3	109.3	95.8	138.4	201.7
844	**23.1**	58.1	109.6	43.6	40.6	20.6	41.4	8.9	11.6	23.3	38.4
848	**19.0**	170.9	192.6	105.4	114.9	16.7	40.1	20.5	24.7	27.7	19.6
852	**121.1**	311.3	261.3	162.1	366.6	153.5	175.8	105.8	97.2	99.0	121.0
862	**88.4**	279.0	256.3	152.9	152.8	261.3	325.2	70.7	49.5	58.0	39.4
863	**59.7**	221.1	161.8	87.7	105.2	38.4	28.9	66.1	44.7	53.4	41.7
879	**109.9**	105.3	153.2	77.0	195.2	70.4	110.5	111.6	117.4	41.5	42.8
881	**44.5**	78.7	104.9	49.2	88.5	116.8	87.0	39.2	26.1	38.0	65.8
882	**49.9**	84.9	114.6	55.0	120.4	123.5	96.6	85.7	74.6	73.9	81.2
886	**160.1**	268.5	235.0	140.4	346.6	481.7	388.0	180.6	171.1	131.8	151.8
888	**97.0**	377.5	227.3	138.0	131.2	54.6	41.4	98.4	63.1	81.5	60.1
889	**126.2**	193.1	193.7	108.2	202.9	151.3	163.6	79.6	26.4	106.8	122.9
890	**15.9**	65.8	101.7	46.4	54.1	31.3	44.4	7.9	9.2	17.4	18.5
898	**54.3**	362.9	203.2	114.2	67.1	120.2	85.9	44.1	30.8	54.1	54.3

EG-Nr	AE/MM[1]	Melli	Hof-bauer	Kürstei-ner	Müller-Zeller	Kölla[2]	Kölla mod.[3]	GIUB (Fn)	GIUB (MQ)	Mo-mente	BaD7
911	**421.3**	306.4	225.8	137.6	267.5	267.1	181.4	196.7	162.2	247.3	203.9
916	**72.4**	238.0	233.0	138.0	142.2	92.5	112.2	87.1	75.3	95.0	102.9
922	**27.4**	266.7	247.4	149.8	162.7	75.5	128.9	106.1	88.7	50.2	40.9
926	**9.4**	62.6	69.4	27.3	15.1	25.3	17.6	9.3	8.6	16.0	9.9
932	**55.4**	183.7	135.7	66.5	93.4	82.9	60.3	72.4	48.4	53.5	37.9
938	**126.1**	894.8	380.2	251.1	312.5	441.1	372.5	105.6	93.9	149.5	273.0
944	**595.3**	975.3	544.7	440.5	850.6	777.6	524.9	494.4	455.3	682.7	1080.8
946	**134.2**	509.4	301.6	193.4	161.4	86.2	85.6	128.3	98.3	63.8	72.3
978	**398.2**	792.1	451.4	344.8	525.1	395.5	297.6	417.8	304.6	329.9	455.8
1017	**90.7**	659.7	459.1	343.8	354.3	86.2	156.1	151.4	90.8	155.9	200.5
1035	**68.6**	300.2	281.6	163.3	165.2	72.4	122.0	44.6	55.8	90.4	103.7
1054	**23.9**	67.0	107.1	49.2	67.6	63.1	66.4	35.0	24.0	20.0	47.5
1056	**186.4**	388.3	338.8	217.3	536.8	322.6	432.0	338.0	340.3	157.0	220.4
2008	**46.3**	395.2	249.3	156.9	101.9	77.6	53.8	30.5	22.6	59.7	87.3
2011	**43.4**	429.2	226.9	129.8	155.7	127.1	76.9	33.7	32.0	88.4	94.9
2014	**9.5**	110.0	110.1	52.9	31.5	30.9	24.9	8.8	7.4	24.9	23.8
2018	**54.0**	308.7	190.9	107.0	75.1	79.3	66.1	23.3	19.7	57.5	48.4
2026	**56.0**	359.8	201.3	111.8	82.5	137.2	107.9	27.3	23.6	57.2	59.3
2102	**42.2**	327.1	225.6	136.8	110.0	80.6	66.4	39.7	30.3	48.5	51.9
2201	**47.1**	440.4	368.0	223.9	213.7	115.0	213.2	51.7	59.5	95.8	152.6
2203	**35.2**	280.8	254.7	155.4	207.1	44.8	70.1	32.7	25.7	65.4	94.6
2301	**5.1**	59.7	78.2	33.5	22.0	8.2	7.8	4.9	5.1	7.6	6.6
2304	**21.7**	122.5	121.3	59.9	38.5	27.1	23.4	9.7	8.3	16.7	27.0
2305	**35.1**	118.3	119.1	58.3	39.1	27.9	26.1	9.4	8.4	14.2	21.6
2307	**30.9**	136.8	134.4	68.8	61.7	30.0	26.1	10.8	8.7	22.6	34.5
2309	**6.7**	59.3	88.7	39.4	51.7	22.4	20.9	26.0	16.6	12.7	15.1
2310	**28.0**	176.2	160.5	87.2	108.6	50.2	41.8	56.3	31.5	31.8	48.4
2313	**4.9**	78.7	89.1	39.6	48.3	13.1	8.6	31.9	12.7	11.4	11.5
2701	**91.4**	179.5	172.8	95.1	123.1	70.7	64.8	57.0	46.4	34.8	41.2
2704	**69.5**	233.0	198.3	115.1	150.3	73.8	68.8	68.6	36.7	40.3	80.6
2901	**27.3**	56.0	96.8	43.0	79.7	38.2	46.9	27.9	22.4	25.2	14.0
2903	**22.2**	77.6	123.6	58.5	106.0	68.0	94.3	35.4	31.4	31.5	43.6
2908	**35.8**	94.6	133.4	65.8	147.1	146.3	156.9	102.1	83.5	60.1	51.2

alle Werte [m^3/s]

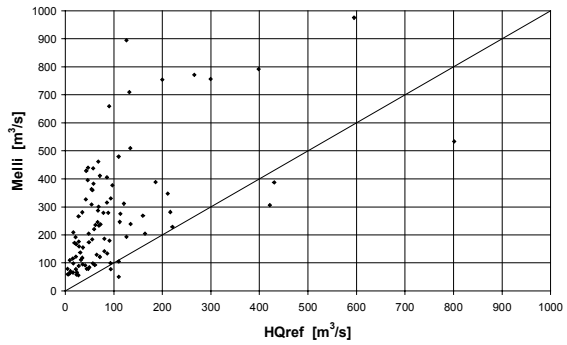
1 AE/MM **Referenz.** Allg. Extremwertverteilung mit Momenten-Methode (Möglichkeit c) in Kapitel 2.2)
2 Kölla mit Abminderung nach Grebner et al. (1999)
3 Kölla mod. mit Abminderung nach Grebner et al. (1999)

B2

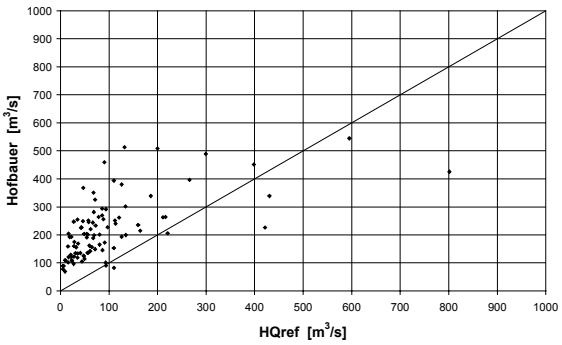
Grafische Gegenüberstellung Abschätzung / Referenz

Darstellung der Referenzwerte HQ_{100} (Abszisse) und der Abschätzungen mit den Modellen (Ordinate).

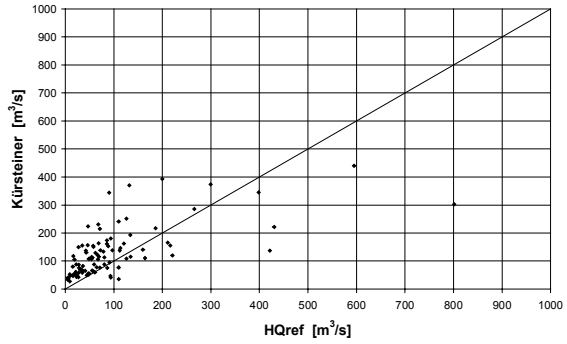
Melli



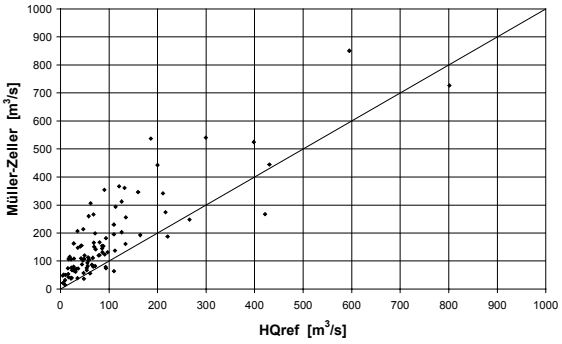
Hofbauer



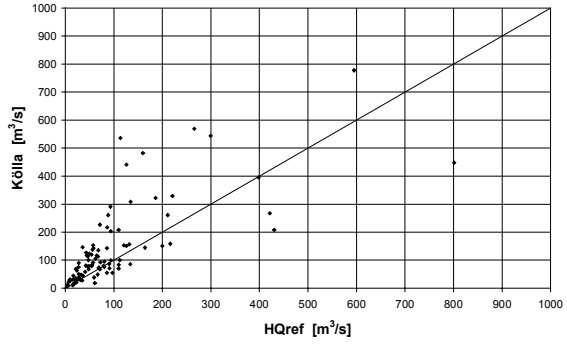
Kürsteiner



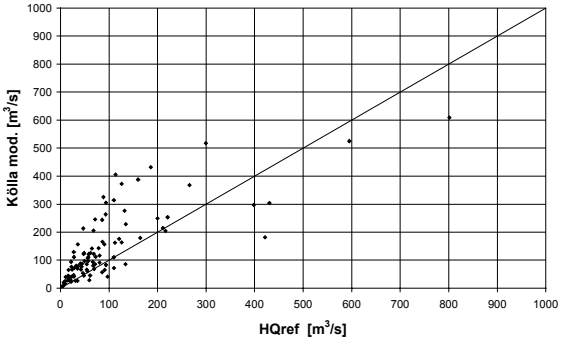
Müller-Zeller



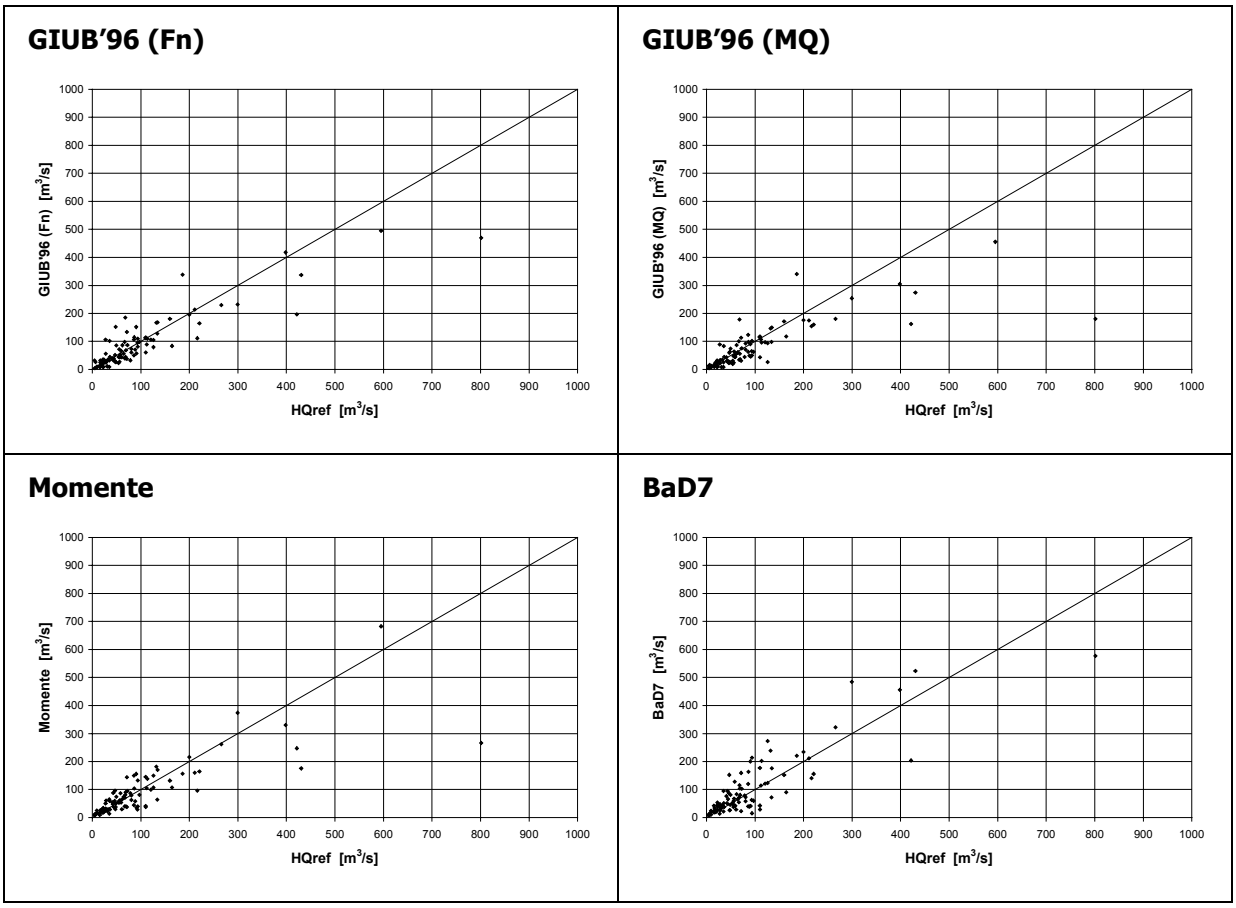
Kölla



Kölla mod.



Fortsetzung auf der nächsten Seite.



Korrelationskoeffizienten

HQ_{100}	Melli	Hof-bauer	Kür-steiner	Müller-Zeller	Kölla	Kölla mod.	GIUB (Fn)	GIUB (MQ)	Mo-mente	BaD7
alle 95 Gebiete	0.587	0.619	0.648	0.840	0.728	0.760	0.897	0.784	0.814	0.859
Fn < 200 km^2	0.456	0.531	0.575	0.798	0.631	0.710	0.858	0.670	0.797	0.868
Fn < 100 km^2	0.471	0.445	0.475	0.649	0.627	0.586	0.766	0.784	0.833	0.715

Grundsätzlich ist bei der Extremwertstatistik eine Extrapolation weit über die Messreihenlänge hinaus nicht zulässig. Bei einigen Referenzstationen war es aber nicht zu vermeiden (vgl. Kapitel 2.2). Die Tabelle unten zeigt, dass sich die Stärke des statistischen Zusammenhangs mit *vertrauenswürdigeren* Referenzwerten nur leicht verbessert (Korrelation mit HQ_{20} und Abschätzungen mit den Zielgrössen wie oben).

HQ_{20}	Melli	Hof-bauer	Kür-steiner	Müller-Zeller	Kölla	Kölla mod.	GIUB (Fn)	GIUB (MQ)	Mo-mente	BaD7
alle 95 Gebiete	0.600	0.635	0.663	0.854	0.737	0.775	0.900	0.788	0.821	0.870
Fn < 200 km^2	0.470	0.548	0.592	0.815	0.635	0.722	0.865	0.674	0.801	0.878
Fn < 100 km^2	0.493	0.473	0.500	0.687	0.642	0.605	0.784	0.817	0.856	0.740

B3

Übersichten nach verschiedenen Kriterien[1]

Modellaufbau

Modell	Modellaufbau
Melli	Hüllkurve um Datenkollektiv.
Hofbauer	Hüllkurve um Datenkollektiv.
Kürsteiner	Hüllkurve um Datenkollektiv.
Müller-Zeller	Hüllkurve um Datenkollektiv.
Kölla	Modifiziertes Laufzeitverfahren.
Kölla mod.	Modifiziertes Laufzeitverfahren.
GIUB'96 (Fn)	Lin. Regression zwischen Fn und Hochwasserspitze in versch. Hochwasserregionen.
GIUB'96 (MQ)	Lin. Regression zwischen MQ und Hochwasserspitze in versch. Hochwasserregionen.
Momente	Stat. Zusammenhang zwischen Gebietsparametern, mHQ und s(HQ).
BaD7	Stat. Zusammenhang zwischen Gebietsparametern, mHQ und s(HQ).

Zielgrösse

Modell	Zielgrösse
Melli	Q_{max}
Hofbauer	Q_{max}
Kürsteiner	Q_{max}
Müller-Zeller	Q_{max}
Kölla	HQ_{20}, HQ_{100}
Kölla mod.	HQ_{20}, HQ_{100}
GIUB'96 (Fn)	HQ_{100}
GIUB'96 (MQ)	HQ_{100}
Momente	HQ_x
BaD7	HQ_x

Bemerkungen:

Q_{max} bei Melli, Hofbauer, Kürsteiner und Müller-Zeller sind nicht identisch. Sie stammen aus Abschätzungen mit sogenannten Hüllkurven. Den verschiedenen Autoren standen für die Eichung ganz unterschiedliche Datenkollektive zur Verfügung (vgl. Kapitel 3.3).

HQ_x bedeutet Hochwasserspitze mit beliebiger Wiederkehrperiode (sinnvoll bis ca. 100 Jahre).

1 Die Angaben beziehen sich auf die Implementierung in HQx_meso_CH. Nach Kölla (1986) könnte beispielsweise ein $HQ_{2.33}$ berechnet werden. Das wurde in HQx_meso_CH aber nicht programmiert. Kölla kennt im Original eine obere Begrenzung der Einzugsgebietsfläche von 100 km^2. In HQx_meso_CH kann beim Modell Kölla der Punktniederschlag abgemindert werden. Damit kann die Grenze von 100 km^2 nach oben verschoben werden.

Gültigkeitsbereich Fn

Modell	Gültigkeitsbereich Fn [km^2]
Melli	0.3 < Fn < 10'000
Hofbauer	10 < Fn < 20'000
Kürsteiner	5 < Fn < 500
Müller-Zeller	2 < Fn < 100
Kölla	10 < Fn < 500
Kölla mod.	10 < Fn < 500
GIUB'96 (Fn)	10 < Fn < 500
GIUB'96 (MQ)	10 < Fn < 500
Momente	10 < Fn < 200
BaD7	10 < Fn < 200

Bemerkungen:

Viele Angaben bezüglich der Grenzen der Einsetzbarkeit stehen auf wackligen Beinen. Es gibt Autoren, die machen überhaupt keine Angaben (Kürsteiner), und andere muten den Modellen zuviel zu (Melli und Hofbauer). Als allgemeine Empfehlung könnte gelten: Abschätzungen in Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 200 km^2 sind generell möglich. Kleinere Einzugsgebiete sollten nicht behandelt werden, grössere nur mit sorgfältiger Überprüfung der Gebietsparameter.

Naturräumliche Zuordnung

Modell	Naturräumliche Zuordnung
Melli	Keine Einschränkung.
Hofbauer	Keine Einschränkung.
Kürsteiner	Keine Einschränkung.
Müller-Zeller	In alpinen und stark überbauten Einzugsgebieten wird die Bestimmung des Abflusskoeffizienten wegen ungünstigen Datengrundlagen (Bodeneignungskarte und Arealstatistik) problematisch.
Kölla	Die Parameterbestimmung orientiert sich sehr stark an der Bodeneignungskarte. In alpinen und stark überbauten Einzugsgebieten müssen die automatisch erhobenen Parameterwerte besonders kritisch überprüft werden. In ganz extremen Situationen auf Einsatz verzichten.
Kölla mod.	Siehe Modell Kölla.
GIUB'96 (Fn)	Keine Einschränkung.
GIUB'96 (MQ)	Keine Einschränkung.
Momente	Das Modell ergibt die besten Resultate, wenn in Einzugsgebieten Abschätzungen gemacht werden, die nicht über extreme Parameterkombinationen verfügen (z.B. stark vergletschert oder grosser Versiegelungsgrad), das heisst, wenn das Einzugsgebiet von den für die Eichung verwendeten Gebieten gut repräsentiert wird (siehe dazu die Tabelle auf der nächsten Seite).
BaD7	Siehe Modell Momente.

Stat. Masszahlen der Gebietsparameter für das Modell Momente.

	Fn	Gletscher	N_J	Neigung	Ödland	SPK
Min	2.4	0.0	1042	1.7	0.0	11.0
25%-Q	7.8	0.0	1387	10.8	0.5	21.0
Mittel	28.5	5.2	1917	17.4	18.9	40.7
Median	17.8	0.0	1999	17.8	8.3	36.1
75%-Q	33.1	4.5	2346	23.6	28.2	60.4
Max	243.7	48.1	3156	32.4	79.0	90.3
Std-Abw	36.1	10.5	519	7.9	22.6	21.8

Stat. Masszahlen der Gebietsparameter für das Modell BaD7.

	Elong	Gletscher	N_J	Neigung	Ödland	Versieg	Weide
Min	0.016	0.0	1042	1.7	0.0	0.0	0.0
25%-Q	0.063	0.0	1387	10.8	0.5	0.0	9.1
Mittel	0.116	5.2	1917	17.4	18.9	1.4	28.6
Median	0.097	0.0	1999	17.8	8.3	0.0	27.2
75%-Q	0.143	4.5	2346	23.6	28.2	1.3	42.2
Max	0.386	48.1	3156	32.4	79.0	31.9	86.6
Std-Abw	0.078	10.5	519	7.9	22.6	4.1	21.7

Fn	Einzugsgebietsfläche [km^2], rFb
Gletscher	Gletscheranteil [%]
N_J	Jahresniederschlag [mm]
Neigung	Neigung [°], rFb
Ödland	Ödlandanteil [%], rFb
SPK	Speicherkapazität [mm], rFb
Elong	Elongationsfaktor [-]
Versieg	Versiegelungsgrad [%]
Weide	Weideanteil [%], rFb
	rFb: relativer Flächenbeitrag

Min	kleinster Parameterwert
25%-Q	25%-Quantil
Mittel	Mittelwert
Median	Median
75%-Q	25%-Quantil
Max	grösster Parameterwert
Std-Abw	Standardabweichung

Problematische Punkte bei der Anwendung

Modell	Problematische Punkte bei der Anwendung
Melli	Keine.
Hofbauer	Keine.
Kürsteiner	Keine.
Müller-Zeller	Siehe Abschnitt *Naturräumliche Zuordnung*.
Kölla	Im Bereich grosser Starkniederschlagsgradienten ist die Bestimmung der *richtigen* Niederschlagsintensität problematisch. Abweichungen können die Abschätzung sehr stark beeinflussen (siehe Abbildung B1). Die Gerinnelänge kann in ganz kleinen Einzugsgebieten und bei sehr dichtem Gewässernetz stark vom klassisch ermittelten Wert abweichen.
Kölla mod.	Siehe Modell Kölla.
GIUB'96 (Fn)	Der Wechsel von einer Hochwasserregion in eine andere kann das Ergebnis sehr stark beeinflussen. Bei jeder Anwendung des Modells sollte abgeklärt werden, ob eine Regionsgrenze in der Nähe des Einzugsgebiets liegt und, wenn ja, wie sich ein Wechsel der Region auf das Resultat auswirkt.
GIUB'96 (MQ)	Siehe Modell GIUB'96 (Fn).
Momente	Siehe Abschnitt *Naturräumliche Zuordnung*.
BaD7	Siehe Abschnitt *Naturräumliche Zuordnung*.

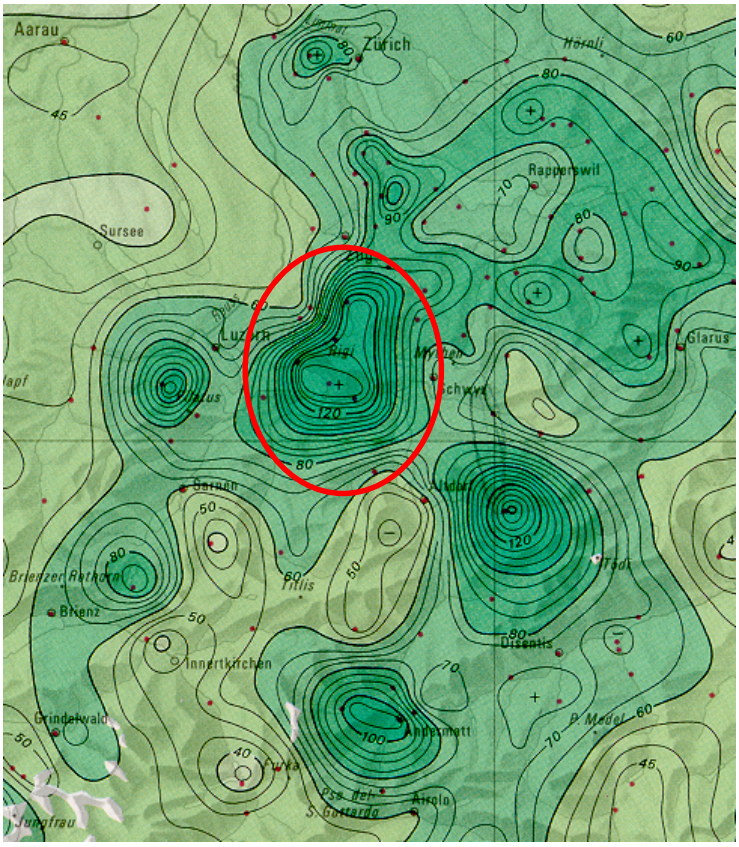


Abbildung B1:

Extreme Punktregen; Ausschnitt aus der Tafel 2.4 des HADES (Geiger et al. 1992).

Östlich von Luzern liegt beispielsweise eine Region mit extremen Gradienten, wo die Bestimmung der massgebenden Niederschlagsintensität problematisch werden könnte.

Einfluss der Erfahrung auf die Ergebnisse

Modell	Einfluss der Erfahrung auf die Ergebnisse
Melli	Kein Einfluss.
Hofbauer	Erfahrung hilft nicht viel; Parametererhebung ist aber nicht objektiv.
Kürsteiner	Erfahrung hilft nicht viel; Parametererhebung ist aber nicht objektiv.
Müller-Zeller	Erfahrung kann helfen, wenn in grossen Höhen die Landnutzungsinformation fehlt.
Kölla	Erfahrung kann sich stark auswirken (positiv, wenn man wichtige Besonderheiten des EG kennt und negativ, wenn der Spielraum bei der Parameterwahl falsch ausgenutzt wird).
Kölla mod.	Siehe Modell Kölla.
GIUB'96 (Fn)	Kein Einfluss.
GIUB'96 (MQ)	Wenig Einfluss (MQ-Bestimmung kann ausserhalb von HQx_meso_CH Probleme geben).
Momente	Die Parameter können nicht *von Hand* erhoben werden (GIS); es fehlt deshalb die subjektive Komponente >> kein Einfluss.
BaD7	Siehe Modell Momente.

B4

Gebietsparameter für das Modell BaD7

EG-Nr	MHq	sx	Elong	Gletscher	N_J	Neigung	Ödland	Versieg	Weide
284	**1.52**	**0.425**	0.036	0.0	2282	18.9	10.0	1.0	35.9
378	**0.59**	**0.209**	0.059	5.9	1727	21.5	25.8	0.1	49.1
433	**0.75**	**0.260**	0.054	9.8	2147	23.5	28.1	0.0	44.4
448	**2.40**	**0.720**	0.144	0.0	2305	16.5	10.4	0.0	35.8
453	**1.52**	**0.953**	0.089	14.8	2574	27.2	53.0	0.0	38.8
528	**1.15**	**0.465**	0.062	0.0	1378	8.0	0.6	2.9	0.4
549	**0.94**	**0.381**	0.025	0.0	1424	9.9	0.6	5.5	0.6
551	**3.37**	**1.211**	0.181	1.8	2672	25.5	49.1	0.0	37.7
598	**0.75**	**0.295**	0.036	0.4	1775	19.9	22.0	0.4	47.3
618	**2.27**	**1.343**	0.111	0.0	2352	18.9	24.5	0.0	63.7
620	**1.92**	**0.531**	0.104	22.8	2758	28.3	76.2	0.0	17.4
643	**2.13**	**0.684**	0.045	0.0	2206	15.6	10.3	0.0	23.6
650	**0.87**	**0.274**	0.057	0.0	1332	12.1	1.9	1.1	12.0
667	**1.51**	**0.531**	0.125	0.0	1413	4.4	5.2	0.8	0.7
695	**1.11**	**0.593**	0.099	3.9	2472	25.1	28.2	0.0	22.7
703	**1.93**	**0.741**	0.034	0.0	1896	14.4	8.0	0.0	44.1
712	**2.32**	**0.833**	0.070	8.7	2329	22.9	64.3	0.0	34.8
716	**1.25**	**0.314**	0.068	19.4	2413	27.2	33.3	0.6	37.5
720	**0.64**	**0.212**	0.043	1.3	1999	21.4	8.1	2.6	32.3
722	**2.84**	**1.152**	0.055	7.2	2034	24.8	51.2	0.0	35.6
735	**1.66**	**0.589**	0.168	27.7	2112	23.0	52.4	0.0	32.9
740	**2.78**	**1.241**	0.065	20.5	2527	25.1	55.8	0.0	35.8
749	**4.74**	**2.537**	0.056	0.1	2591	27.4	28.2	0.1	41.0
750	**1.76**	**1.138**	0.097	0.0	1849	20.8	13.4	0.0	60.9
751	**1.71**	**0.626**	0.159	17.2	2334	25.4	35.0	0.0	60.1
753	**2.00**	**0.340**	0.278	40.4	2476	32.4	64.3	0.0	26.7
755	**1.76**	**0.249**	0.192	6.3	2107	16.9	38.0	0.0	62.0
765	**1.50**	**0.748**	0.142	2.1	2068	17.8	13.2	0.0	86.6
766	**1.88**	**0.664**	0.329	41.2	2247	21.4	75.6	0.0	20.9
767	**1.70**	**1.312**	0.119	12.6	2335	26.2	39.4	0.0	59.5
769	**3.35**	**1.859**	0.061	1.0	2628	28.2	22.4	0.0	31.7
778	**1.67**	**0.722**	0.142	31.4	2021	25.7	49.3	0.0	40.6
789	**1.09**	**0.539**	0.173	0.0	1114	2.8	0.0	1.7	0.0
792	**3.12**	**0.533**	0.303	48.1	3156	23.7	67.7	0.0	31.8
793	**1.89**	**0.593**	0.112	33.9	2607	24.6	54.8	0.0	33.9
799	**1.27**	**0.788**	0.156	8.9	2419	26.3	28.1	0.0	39.0
803	**2.02**	**1.063**	0.092	10.1	2832	21.4	24.7	0.0	73.0
820	**1.42**	**0.771**	0.075	0.0	2182	21.4	10.3	0.0	63.7
821	**4.83**	**2.385**	0.343	28.3	2638	29.1	75.5	0.0	18.9
822	**2.56**	**1.115**	0.036	0.0	2359	16.1	4.3	0.0	44.3
824	**2.91**	**4.028**	0.085	0.0	2162	16.8	6.5	0.0	23.9
826	**0.46**	**0.161**	0.113	0.0	1385	17.7	19.1	0.0	47.9
827	**3.56**	**2.920**	0.107	0.0	1597	8.0	0.0	17.7	0.0
829	**2.07**	**0.969**	0.216	0.0	1588	10.8	2.2	1.2	24.5
831	**4.04**	**2.412**	0.117	0.0	1427	7.7	0.4	31.9	0.0
833	**1.97**	**0.869**	0.115	0.0	1117	1.7	1.1	3.1	0.0
834	**2.00**	**0.770**	0.044	0.0	2003	13.5	1.7	0.0	23.8
838	**1.32**	**0.481**	0.331	3.1	1389	25.6	36.5	0.0	31.2
843	**0.99**	**0.456**	0.036	0.0	2241	20.0	0.5	2.3	21.8
844	**2.02**	**1.434**	0.315	21.8	2591	28.8	79.0	0.0	18.9
848	**0.78**	**0.211**	0.109	2.4	1686	21.7	25.0	0.0	66.7
852	**2.73**	**0.962**	0.105	0.0	2375	17.7	8.9	0.0	37.1
862	**0.90**	**0.644**	0.079	4.5	1856	22.9	20.6	1.3	40.4
863	**1.10**	**0.691**	0.085	0.0	1374	6.8	0.1	2.5	0.0
879	**6.29**	**3.803**	0.234	0.0	2473	29.8	49.9	0.0	42.3
881	**1.40**	**1.116**	0.078	0.0	1944	13.9	4.0	0.0	11.9
882	**2.64**	**0.721**	0.068	0.0	2316	16.7	0.9	0.0	32.3
886	**2.42**	**0.769**	0.045	0.0	2112	17.1	4.9	0.0	39.7
888	**0.83**	**0.635**	0.069	0.0	1322	6.5	0.0	1.5	0.0
889	**2.30**	**1.197**	0.064	1.7	2452	17.9	24.1	0.0	58.3
890	**1.47**	**0.686**	0.198	0.0	2150	16.0	8.3	0.0	73.0
898	**1.15**	**0.379**	0.072	0.0	1120	5.1	0.3	0.0	0.1

EG-Nr	MHq	sx	Elong	Gletscher	N_J	Neigung	Ödland	Versieg	Weide
911	**2.73**	**1.979**	0.035	0.0	1952	12.6	0.6	0.0	6.5
916	**1.24**	**0.439**	0.062	0.0	2078	22.0	8.3	0.0	52.3
922	**0.64**	**0.171**	0.101	0.0	1777	21.7	24.1	0.0	68.4
926	**1.40**	**0.335**	0.158	0.0	1349	3.9	0.3	0.0	0.4
932	**1.96**	**0.697**	0.079	0.0	1500	7.1	0.7	2.5	20.9
938	**0.80**	**0.263**	0.048	0.0	1239	4.2	6.0	13.0	0.1
944	**1.30**	**0.338**	0.016	0.0	1836	14.4	4.6	0.8	19.2
946	**1.71**	**0.701**	0.085	0.0	1288	11.6	0.5	1.7	9.9
978	**1.02**	**0.433**	0.021	0.0	1558	12.7	3.8	0.4	24.3
1017	**0.49**	**0.148**	0.038	0.0	1552	19.9	10.7	1.2	42.1
1035	**1.82**	**0.428**	0.114	10.5	2466	28.7	33.9	0.2	49.1
1054	**1.05**	**0.579**	0.091	0.0	1766	22.5	0.4	0.0	26.0
1056	**2.49**	**0.789**	0.084	4.5	2480	29.1	55.6	0.5	27.2
2008	**0.80**	**0.296**	0.085	0.0	1197	8.7	0.0	2.2	0.1
2011	**0.48**	**0.241**	0.061	0.0	1255	4.8	0.1	1.8	0.0
2014	**0.74**	**0.216**	0.136	0.0	1303	7.6	0.0	0.0	0.0
2018	**1.18**	**0.446**	0.092	0.0	1290	5.7	0.0	10.2	0.0
2026	**1.16**	**0.492**	0.099	0.0	1234	4.7	0.1	6.9	0.0
2102	**1.12**	**0.493**	0.138	0.0	1537	8.8	0.4	1.4	22.9
2201	**0.91**	**0.171**	0.100	20.5	2221	29.3	49.2	0.8	33.4
2203	**0.65**	**0.279**	0.117	0.0	1936	20.0	6.0	0.0	53.7
2301	**0.91**	**0.336**	0.386	0.0	1219	8.3	0.0	0.0	0.8
2304	**1.34**	**0.615**	0.196	0.0	1199	8.9	0.0	1.9	0.4
2305	**1.20**	**1.039**	0.173	0.0	1182	9.4	0.4	0.9	3.5
2307	**1.28**	**0.639**	0.147	0.0	1220	10.7	0.1	1.7	4.9
2309	**0.81**	**0.163**	0.155	0.0	1410	15.2	0.0	0.0	17.4
2310	**0.91**	**0.296**	0.098	0.0	1235	11.8	0.2	0.0	8.3
2313	**0.98**	**0.270**	0.256	0.0	1042	5.6	0.0	1.5	0.0
2701	**1.50**	**1.029**	0.087	0.0	1365	15.2	0.1	3.4	16.4
2704	**0.77**	**0.330**	0.090	0.0	1371	13.3	0.4	2.2	24.8
2901	**2.08**	**1.592**	0.226	0.0	2340	21.1	18.1	0.0	49.4
2903	**0.87**	**0.610**	0.133	0.0	2387	27.5	5.0	0.0	17.0
2908	**1.28**	**0.580**	0.079	0.0	2562	23.4	4.6	0.0	45.4

MHq spez. mittlere Jahreshochwasserspitze [$m^3/s \cdot km^{-2}$]
sx Standardabweichung der spez. Jahreshochwasserspitze [$m^3/s \cdot km^{-2}$]
Elong Elongationsfaktor [-]
Gletscher Gletscheranteil [%]
N_J Jahresniederschlag [mm]
Neigung Neigung [°], rFb
Ödland Ödlandanteil [%], rFb
Versieg Versiegelungsgrad [%]
Weide Weideanteil [%], rFb
rFb: relativer Flächenbeitrag