

HYBEST GmbH
HYdrologische BERatungen und STudien
Dr. sc. techn. F.Naef
Stöckenstr. 30
8903 Birmensdorf

Untersuchung über die Auswirkungen der Zunahme der Hochwasserhäufigkeiten in neuerer Zeit und in Zukunft.

**durchgeführt im Auftrag
der Abteilung Hydrologie des BAFU
im Rahmen des Projektes CCHydro**

Juni 2011

Impressum

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Auftragnehmer:** HYBEST GmbH Birmensdorf
- Autor:** Felix Naef
- Begleitung BAFU:** David Volken, Bruno Schädler, Hugo Aschwanden, Dominique Bérod, Gian Reto Bezzola, Willy Geiger, Roland Hohmann, Adrian Jakob, Ronald Kozel, Petra Schmocker-Fackel
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

INHALT

1. Einleitung	2
2. Vorstellung einiger Einzugsgebiete mit typischem Abflussverhalten	4
2.1 Beispiel Reppisch	4
2.2 Beispiel Schüss.....	4
2.3 Beispiel Schächen:.....	5
2.4 Beispiel Dorfbach Schwarzenburg	5
2.5 Was zeigen diese Beispiele?	6
3. Überblick über die untersuchten Einzugsgebiete.....	7
4. Auswertungen der Studien bezüglich Hochwasserverhalten	8
4.1 Vorgehen	8
4.2 Spezifische Abflüsse gegen Einzugsgebietsflächen.....	8
4.3 Verlauf der Abflusskoeffizienten in einzelnen Gebieten bei Starkregen	9
4.4 Einfluss des Anteils rasch reagierender Flächenanteile auf spezifische Hochwasserabflüsse	11
4.4.1 Reaktion von Gebieten bis 20 km ²	11
4.4.2 Reaktion von Gebieten bis 80 km ²	15
4.4.3 Reaktion von Gebieten mit Flächen über 80 km ²	18
4.5 Das Hochwasserverhalten der Lütschine.....	18
4.5.1 Einleitung	18
4.5.2 Vorgehen	19
4.5.3 Ablauf der grossen Hochwasser	22
4.5.3.1 Niederschläge, Nullgradgrenze, Schnee- und Gletscherschmelze	22
4.5.3.2 Das Verhalten des Einzugsgebietes	22
4.5.3.3 Extrapolation Abflüsse Lütschine.....	25
5. Bei welchen Einzugsgebieten ist eine verschärfte Reaktion auf erhöhte Niederschläge zu erwarten?	26
5.2 Einleitung.....	26
5.3 Kleine Gebiete	26
5.4 Mittlere Gebiete	27
5.5 Grosse Gebiete.....	27
6. Ausblick und Empfehlungen	28
7. Literatur:.....	29
8. Anhang:	30

1. Einleitung

Im Jahre 2005 wurden in der Schweiz zahlreiche Einzugsgebiete von den grössten Hochwassern der letzten 100 Jahren heimgesucht. Aber nicht nur 2005 war hochwasserreich, die Häufigkeit von Hochwassern hat in den letzten Jahrzehnten generell zugenommen (Schmocker-Fackel und Naef, 2010). Ob dies eine Auswirkung der erwarteten Klimaänderung ist oder langjährigen Fluktuationen der Hochwasserhäufigkeiten zugeordnet werden muss, lässt sich zum heutigen Zeitpunkt nicht entscheiden. Historische Studien zeigen jedoch, dass die in den letzten Jahren beobachtete Häufung den historischen Rahmen nicht sprengen.

Neben dem Volumen und der Intensität des Starkregens wird die Grösse der extremen Hochwasser auch von der Reaktion des betroffenen Einzugsgebietes auf diesen Niederschlag bestimmt. Mit zunehmender Sättigung der Böden und des Untergrundes fliesst ein immer grösserer Teil des gefallenen Niederschlages ab, d.h. die Hochwasserspitze wächst überproportional. Enthält ein Gebiet grosse Flächen mit speicherfähigen Böden oder Untergrund, reagiert es während längerer Zeit verhalten auf Niederschläge. Werden diese Flächen gesättigt, fliesst plötzlich ein wesentlich grösserer Anteil des Niederschlages ab. Wenn also ein extremer Niederschlag diesen Schwellenwert überschreitet, reagiert das Gebiet wesentlich stärker. Dieses Schwellenwertverhalten lässt sich weder mit einer Frequenzanalyse erkennen noch mit Niederschlag-Abfluss-Modellen, die mit gemessenen Niederschlags- und Abflussdaten geeicht worden sind. Während der letzten 15 Jahre wurde am Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU) eine Methode entwickelt, um das Abflussverhalten von Flächen bei Starkregen einzuschätzen (Naef et al., 2007). Damit lassen sich Abflussprozesskarten (APK) zeichnen, die das Abflussverhalten von Einzugsgebieten differenziert darstellen. Solche Karten erlauben einen Einblick in die Abflussbildung bei Starkregen und ermöglichen Aussagen über das Verhalten bei Niederschlagsereignissen, die grösser sind als die bisher Gemessenen.

Diese Methodik wurde vom IfU und vom Büro Scherrer AG bisher in über 150 Einzugsgebieten im Zusammenhang mit Hochwasserstudien angewendet. Die auf den APK's basierenden Simulationsrechnungen wurden mit Frequenzanalysen und historischen Hochwassern ergänzt. Bei den meisten Studien wurde auch die Hydraulik der Pegel untersucht und die Abflussmessungen, wenn nötig, anhand von Nachrechnungen oder hydraulischen Modellversuchen korrigiert. Diese Arbeiten stellen ein einmaliges Datenmaterial dar, das erlaubt, die Reaktion unterschiedlichster Einzugsgebiete auf Starkniederschläge miteinander zu vergleichen.

Im Rahmen des Projektes CCHydro wurde nun dieses Datenmaterial für rund 80 Untersuchungen detailliert analysiert, um Einzugsgebiete zu identifizieren, die anfällig sind für ein Schwellenwertverhalten.

In diesen Bericht fliessen auch die Ergebnisse von verschiedenen parallel laufenden Untersuchungen ein, die ähnliche Fragestellungen behandeln. Dabei handelt es sich um:

- Analyse hydrologischer Extremereignisse 2005 (BAFU, 2008)
- Gefahrenabklärung Lütchine, Teilbereich Hydrologie (Naef et al., 2011)
- Susceptibility of mountainous catchment flood runoff to changes in meteorological boundary conditions (SAC-Flood, IfU, NFP61 Projekt)
- Automatische Abflussprozesskartierung (Auftrag Kt. ZH)

In Kapitel 2 dieses Berichtes werden einzelne, charakteristisch reagierende Gebiete vorgestellt, während Kapitel 3 einen Überblick über die untersuchten Einzugsgebiete gibt.

Aufbauend auf diesen Auswertungen werden im Kapitel 4 die Arbeiten zur Extraktion und Vereinheitlichung der Ergebnisse aus den zahlreichen Berichten vorgestellt und versucht, die Einzugsgebiete bezüglich ihres Verhaltens zu typisieren und das Verhalten der Frequenzanalyse und das Auftreten von Ausreissern zu beschreiben.

Danach werden Auswertungen bezüglich Abflussreaktionskurven, Zusammenhang zwischen Hochwasserabflüssen und Abflussprozessflächen sowie das Zusammenspiel von Einzugsgebietsgrösse, konvektiven Niederschlägen und Prozessflächen vorgestellt und diskutiert.

Mit der Lütschine wird ein verhalten reagierendes Einzugsgebiet vorgestellt. Die Lütschine ist ein gutes Beispiel dafür, wie die Verhaltensweise eines komplexen Einzugsgebietes bei zunehmenden Niederschlagsmengen ermittelt werden kann.

Im Kapitel 5 werden die Erkenntnisse zusammengefasst und Möglichkeiten aufgezeigt, wie in Einzugsgebieten unterschiedlicher Grösse Schwellenwerte für Reaktionsänderungen erkannt werden können. Gleichzeitig werden Wissenslücken aufgezeigt und Vorschläge für weitere Untersuchungen formuliert.

2. Vorstellung einiger Einzugsgebiete mit typischem Abflussverhalten

In Tabelle 1 im Anhang sind die Einzugsgebiete aufgeführt, für die detailliertere hydrologische Studien vorliegen. Diese Gebiete decken einen weiten Bereich von möglichen Verhaltensweisen bei extremen Niederschlägen ab. In diesem Kapitel werden einige Einzugsgebiete mit unterschiedlichen Verhaltensweisen vorgestellt und das mögliche Verhalten im Extrapolationsbereich diskutiert.

Für jedes Einzugsgebiet wurde ein Kennblatt erstellt, in dem die Informationen des Berichtes zusammenfasst werden (Anhang 2). Die Kennblätter für die nachfolgend besprochenen Einzugsgebiete sind in Anhang 3 bis 6 dargestellt

2.1 Beispiel Reppisch

Charakterisierung: „gutmütige“ Abflussreaktion im überblickbaren Bereich des bisherigen Hochwassergeschehens.

Die Reppisch im Kanton Zürich weist eine Einzugsgebietsfläche von 68 km² auf. Die Datengrundlage ist gut, da die Messreihen der beiden Pegel mit 63 und 80 Jahren relativ lang sind und sich die grössten Hochwasser der letzten 160 Jahre aufgrund von historischen Erhebungen ermitteln liessen (Anhang 3) (Scherrer AG, 2006a).

Nach der Kartierung der Abflussprozesse gehören 17% der Flächen zu den Abflusstypen 1 und 2, die rasch auf Niederschläge reagieren, während 41% mit Abflusstyp 4 und 5 stark verzögert reagieren. 42% der Flächen, die zu Abflusstyp 3 gehören, beginnen erst nach ergebnissen Niederschlägen zum Abfluss beizutragen. Extreme Gewitter können das langgestreckte Gebiet nicht gesamthaft überdecken. Da die rasch beitragenden Flächen über das ganze Gebiet verteilt sind, können sie also nicht gesamthaft getroffen werden. Extreme Hochwasser beim Pegel Dietikon, die den bisherigen Rahmen sprengen und durch Gewitter, die das ganze Gebiet überdecken, verursacht werden, sind daher nicht zu erwarten.

Beim grössten Hochwasser der Messreihe vom 23.8.2005 lag der spezifische Abfluss mit $1.4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im durchschnittlichen Bereich, in der Frequenzanalyse lassen sich die Jahreshochwasser der Reppisch bis zu den seltenen Ereignissen gut durch eine Gerade annähern.

Aufgrund dieser Gebietsausstattung, den Auswertungen der hydrologischen Daten und der historischen Hochwasser gehört die Reppisch bis zu einer Jährlichkeit von 150 Jahren zu den "gutmütig" reagierenden Einzugsgebieten, die nicht anfällig sind für überraschend verstärkte Abflussreaktionen.

2.2 Beispiel Schüss

Charakterisierung: Plateau im Frequenzdiagramm vom 20- bis zum 100jährigen Hochwasser, verursacht durch das Zusammenspiel der Faktoren Niederschlag, Karstspeicher, Schneeschmelze und gefrorener Boden. Stabilität des Plateaus für seltenere Hochwasser nicht bekannt.

Die Schüss, die in Biel in den Bielersee mündet, besitzt eine Einzugsgebietsfläche von 231 km². Die Messungen beim Pegel Sonceboz begannen im Jahr 1961 und umfassen somit 50 Jahre, historische Hochwasser lassen sich bis Mitte des 19. Jh. rekonstruieren. Auffällig ist, dass die gemessenen oder rekonstruierten Abflüsse der 20- bis 100jährigen Hochwasser alle bei etwa 100 m³/s liegen. Im Bereich dieser Jährlichkeiten bilden die gemessenen Hochwasser in der Frequenzanalyse ein Plateau, das von der Ausgleichsgerade nicht erfasst wird (Anhang 4) (VAW, 1994).

Das Einzugsgebiet der Schüss besteht aus einem langgestreckten Tal, dessen Flanken verkarstet und deshalb sehr durchlässig sind. Die Böden im Talgrund sind toniger und, wie auch zwei Beregnungsversuche zeigten, weniger durchlässig (Scherrer, 1997). Das grösste bekannte Niederschlagsereignis mit einem Gebietsmittel von über 150 mm in 2 Tagen wurde am 25/26.9.1987 registriert, das resultierende Hochwasser war aber unbedeutend. Auf der anderen Seite wurde das grösste Hochwasser der Messperiode im Dezember 1991 von weniger als 100 mm Niederschlag erzeugt. Niederschlag ist also nicht der einzige Faktor bei der Hochwasserauslösung; die umfangreichen, in dem Bericht beschriebenen Simulationsrechnungen zeigen, dass dafür das Zusammenspiel der Faktoren Niederschlag, Verhalten der Karstspeicher, Schneeschmelze und gefrorener Boden massgebend ist. Diese Faktoren kompensieren sich zum Teil, d.h. wenn es so kalt ist, dass der Boden gefriert, sind die Niederschlagsmengen geringer, etc. Um das Verhalten der Schüss im Extrapolationsbereich zu ermitteln, muss dieses Zusammenspiel mit zusätzlichen Untersuchungen detaillierter ausgewertet werden.

2.3 Beispiel Schächen:

Charakterisierung: Knick in der Frequenzgerade, weiterer Forschungsbedarf.

Das gebirgige Einzugsgebiet des Schächens mit einer Fläche von 108 km² umfasst grosse Höhenunterschiede (Anhang 5). Trotz seiner Steilheit gehören 57% der Fläche zu den stark verzögert reagierenden Abflusstypen 4 und 5.

Der Abfluss wird mit verschiedenen Pegeln seit 1912 gemessen, Informationen über historische Hochwasser reichen zurück bis ins 12. Jh. Die Frequenzanalyse zeigt ab 10jährigen Hochwassern eine deutliche Zunahme der Abflüsse (Anhang 4) (Scherrer AG, 2006b).

Im Rahmen einer ausführlichen Studie nach dem Hochwasser 2005 wurden mit dem Modell QArea detaillierte Simulationen durchgeführt. Obwohl die verzögert reagierenden Flächen bei der Aufsetzung des Modells berücksichtigt worden sind, wurde vorerst das Verhalten des Schächens nur mangelhaft wiedergegeben. Das Modell überschätzte bis zu einem Niederschlag von 100 mm den resultierenden Abfluss, danach wurde der Abfluss unterschätzt. Zusätzliche Abklärungen zeigten, dass das kurzfristige Speichervermögen von steilen Gebietsflächen nicht richtig erfasst wurde. Bei lang dauernden, ergiebigen Niederschlägen, die im Schächen die grossen Hochwasser erzeugen, beginnen diese Flächen nach einiger Zeit zu entwässern und tragen dann wesentlich zum Hochwasser bei. Dies dürfte auch der Grund für den beobachteten Knick im Frequenzdiagramm beim 10jährigen Hochwasser sein. Über die Wirkungsweise der kurzfristigen Speicherung und Drainage an steilen Hängen ist noch wenig bekannt. Da die beschriebenen Mechanismen in vielen gebirgigen Einzugsgebieten wirksam sind, wird diese Problematik im Projekt SAC-FLOOD im Rahmen des NFP61 näher untersucht.

2.4 Beispiel Dorfbach Schwarzenburg

Charakterisierung: Gewitter mit Wiederkehrperiode von mehreren 100 Jahren führt zu einem Prozesswechsel bei der Abflussbildung und einem extremen Ausreisser in der Hochwasserstatistik.

Das Einzugsgebiet des Dorfbachs in Schwarzenburg umfasst bis zum Dorf 11 km². Rund 75% des Gebiets besteht aus Sandstein, Kalknagelfluh und Schotter, die sich bei Verwitterung in der Regel zu sehr durchlässigen Böden umwandeln und zu speicherfähigen Abflusstypen 4 und 5 führen. Diese speicherfähigen Böden erklären die üblicherweise im Dorfbach beobachteten geringen Hochwasserabflüsse von 0.5 m³s⁻¹/km² (Anhang 6) (Scherrer AG und IHW, 2004).

Bei dem extremen Gewitter am 4.7.1985 mit Intensitäten von über 200 mm/h wurde dieser spezifische Abfluss um den Faktor 10 überschritten. Da sich das Gewitter auf den südöstlichen Teil des Gebietes beschränkte, waren im betroffenen Teil des Gebietes die spezifischen Abflüsse noch wesentlich grösser. Nach historischen Studien fand ein ähnliches Ereignis vor 300 Jahren, im Jahre 1697 statt, Hinweise auf weitere Ereignisse wurden nicht gefunden. Von der Niederschlagsintensität her war das Gewitter ein mehrhundertjährliches Ereignis. Statistisch lässt es sich jedoch nicht sinnvoll einordnen, da die Datenreihen dazu nicht ausreichend lang sind.

Der Dorfbach wirft verschiedene grundsätzliche Fragen auf bei Ereignissen mit Wiederkehrperioden von mehreren 100 Jahren. Die Grundlage für die Kartierung der Abflussprozesse bilden Berechnungsversuche mit Niederschlagsintensitäten von 100 mm/h über mehrere Stunden (Naef et al., 1999). Bei wesentlich höheren Intensitäten treten Prozesse auf, die noch wenig erforscht sind. Es wurde schon beobachtet, dass sich dann in den obersten Zentimetern kurzfristig eine gesättigte Schicht ausbilden kann, die die Infiltration verhindert (Kienzler und Naef, 2008).

2.5 Was zeigen diese Beispiele?

Die vier Beispiele zeigen mögliche Reaktionsweisen auf extreme Starkregen. Die Kenntnis dieser Reaktionsweisen ist wichtig, um das Verhalten der Einzugsgebiete bei einer Zunahme der Häufigkeit extremer Niederschlagsereignisse abzuschätzen. Aufgrund der Abflussbildung in den einzelnen Gebieten reagiert die Reppisch im überschaubaren Bereich bis zu 150jährigen Ereignissen linear auf zunehmende Niederschläge, die Schüss reagiert jedoch kaum und der Schächen überproportional. In diesem Bereich ist auch beim Dorfbach in Schwarzenburg eine proportionale Zunahme zu erwarten, bei einem mehrhundertjährlichen Gewitter stellt sich jedoch ein völlig anderes Abflussverhalten ein.

3. Überblick über die untersuchten Einzugsgebiete

Im vorangehenden Kapitel wurde anhand von vier Beispielen aufgezeigt, wie unterschiedlich Einzugsgebiete auf extreme Niederschläge reagieren. In diesem Kapitel wird nun ein Überblick über das vorhandene Datenmaterial gegeben, auf das sich die weiteren Untersuchungen abstützen. Abbildung 1 zeigt die Lage der Einzugsgebiete der 94 ausgewerteten Hochwasserstudien. Nicht alle Studien weisen den gleichen Detaillierungsgrad auf, deshalb gestalteten sich die Auswertungen recht aufwendig. In Tabellen 2 bis 4 im Anhang sind die Ergebnisse zusammengefasst.

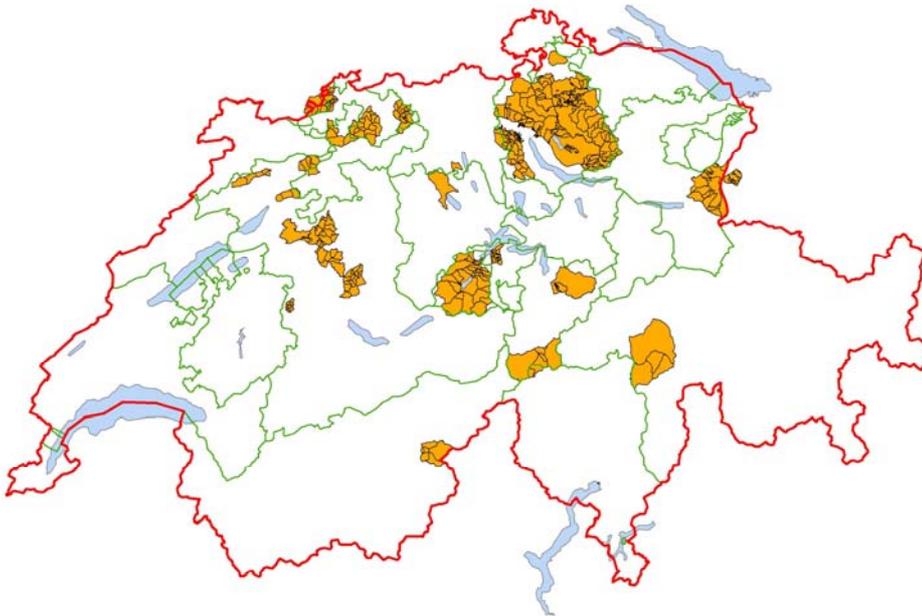


Abb. 1: Überblick über die 94 ausgewerteten Einzugsgebiete.

In Tabelle 2 sind die Grösse der Gebiete, das grösste Hochwasser und der dabei beobachtete spezifische Abfluss aufgeführt, ebenso der Beginn der Abflussmessung und die Zeitperiode, die sich mit historischen Hochwassern überblicken lässt.

Tabelle 3 zeigt die Flächenanteile der einzelnen Abflusstypen in den Einzugsgebieten, die sich aus der individuellen Kartierung jedes Einzugsgebietes ergibt. Dabei sind Abflusstyp 1 und 2 zusammengefasst unter rasch - leicht verzögert, Abflusstyp 3 unter verzögert und Abflusstyp 4 und 5 unter stark bis sehr stark verzögert. Farblich unterlegt sind diejenigen Abflusstypen, die aufgrund ihrer Flächenanteile das Abflussverhalten eines Gebietes dominieren. Nicht ersichtlich ist jedoch, ob die rasch reagierenden Flächen zusammenhängend oder über das Gebiet verteilt sind.

Für jedes Einzugsgebiet wurde eine Frequenzanalyse erstellt, in der auch die historischen Hochwasser mit einbezogen wurden. Tabelle 4 zeigt die 30-, 100- und 300jährigen Hochwasser, sowie die entsprechenden spezifischen Abflüsse. Gleichzeitig wird das Verhalten der Frequenzanalyse charakterisiert. Es wird, wenn möglich, angegeben, ob sich die Jahreshochwasser gut einer Ausgleichsgeraden anpassen, ob sich ein Knick, ein Plateau oder ein Ausreisser zeigt.

4. Auswertungen der Studien bezüglich Hochwasserverhalten

4.1 Vorgehen

In jeder der vorliegenden Studien wurde durch Zusammentragen und Interpretation der vorhandenen Daten das hydrologische Verhalten des einzelnen Einzugsgebietes im Hochwasserfall entschlüsselt. Im Folgenden wird nun versucht, in einer Gesamtschau die Eigenschaften zu ermitteln, die für extreme Hochwasser oder sprunghafte Änderungen im Abflussverhalten (Schwellenwertverhalten) verantwortlich sind.

4.2 Spezifische Abflüsse gegen Einzugsgebietsflächen

In Abbildung 2 und 3 sind die spezifischen Maximalabflüsse (hq) in $\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ der grössten beobachteten Hochwasser in Abhängigkeit der Einzugsgebietsflächen dargestellt. Sie zeigen zwei "Welten" von spezifischen Hochwasserabflüssen. In Einzugsgebieten mit Flächen über 200 - 300 km^2 ist die Streuung der hq im Vergleich zu den kleineren Gebieten relativ gering. Je kleiner die Einzugsgebietsflächen sind, desto grösser wird die Streuung. Diese klare Unterscheidung ist darauf zurückzuführen, dass in kleineren Gebieten mit rascher Abflussbildung konvektive Ereignisse mit ihren sehr hohen Niederschlagsintensitäten massgebend sind. Infolge ihrer beschränkten räumlichen Dimension sind diese in grossen Gebieten nicht relevant. Interessant ist aber, dass konvektive Niederschläge in Gebieten bis 200 km^2 durchschlagen können. Dies allerdings nur in Gebieten, bei denen die rasch reagierenden Flächen nicht über das ganze Gebiet verteilt sind, sondern eine kompakte Fläche bilden (siehe Beispiel Allenbach, Kap. 4.4.2).

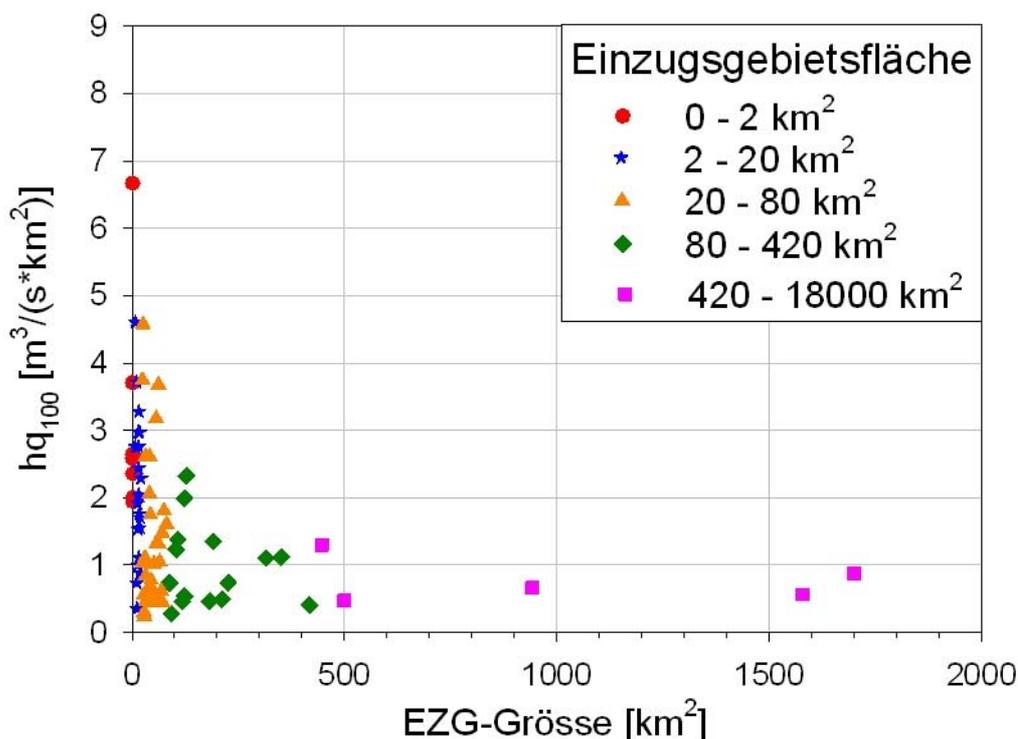


Abb. 2: Spezifische Maximalabflüsse der untersuchten Einzugsgebiete bis zu einer Grösse von 2000 km^2 in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse.

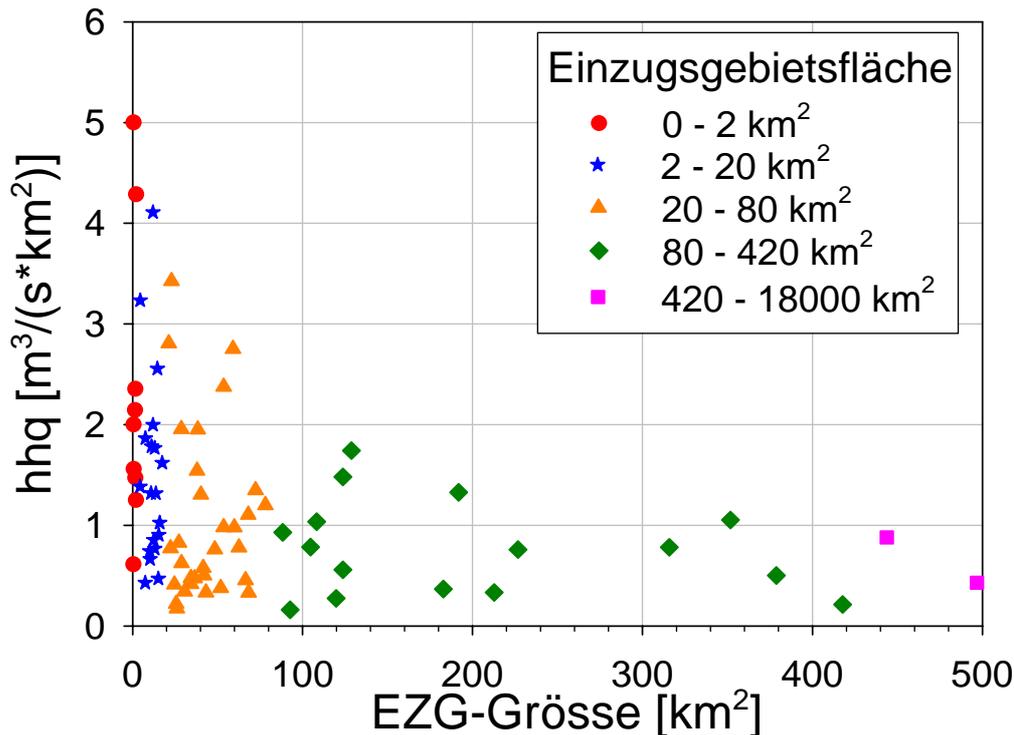


Abb. 3: Spezifische Maximalabflüsse der untersuchten Einzugsgebiete bis zu einer Grösse von 500 km² in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse.

4.3 Verlauf der Abflusskoeffizienten in einzelnen Gebieten bei Starkregen

Das von uns verwendete Niederschlag-Abfluss-Modell QArea basiert auf Abflussprozesskarten und für einzelne Abflusstypen anhand von Beregnungsversuchen hergeleitete Abflussreaktionskurven, um flächendetailliert die Abflussbildung nachzurechnen. In jedem Einzugsgebiet wurde die Plausibilität des Modells anhand gemessener Hochwasserereignisse überprüft. In den Abbildungen 4 und 5 wird nun, für ausgewählte Einzugsgebiete, der daraus hergeleitete Verlauf des Abflusskoeffizienten für das gesamte Gebiet als Funktion der gefallen Niederschlagsmenge dargestellt. Abbildung 4 zeigt den Verlauf bis zu einer Niederschlagsmenge von 250 mm. Die Streuung der Kurven nach diesem Niederschlag zwischen stark und schwach reagierenden Gebieten ist nicht gross, da nach diesen Niederschlagsmengen auch schwach reagierende Flächen zum Abfluss beitragen. Die Kurven der Gürbe (IHW, 1997; Scherrer AG 2008) und der Saltina (VAW, 1994; Scherrer AG, 2007) wurden noch in den 90er Jahren nach etwas anderen Kriterien erstellt. Dies erklärt ihren etwas tieferen Verlauf. 250 mm Niederschlag entspricht für die Alpennordseite einer extremen Niederschlagsmenge. Eine solche Menge fällt über mehrere Tage, bei dieser langen Dauer muss die Modifikation der Kurven durch die Drainage der Böden, die von Gebiet zu Gebiet unterschiedlich ist, berücksichtigt werden.

Die Kurven der Abflusskoeffizienten vom Schächen (Scherrer AG, 2006b) und von Schwarzenburg (Scherrer AG und IHW, 2004) stechen in Abbildung 4 hervor, diese mussten im Verlauf der Untersuchung modifiziert werden. Im Schächen musste die einsetzende Drainage, in Schwarzenburg das geänderte Abflussverhalten bei Niederschlagsintensitäten von 200 mm/h berücksichtigt werden. Eingetragen ist auch die normal verlaufende Kurve in Schwarzenburg für Intensitäten bis 100 mm/h.

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt aus Abbildung 4 bis zu einer Niederschlagssumme von 100 mm. In diesem Bereich von Niederschlägen, der für die Hochwasserentstehung wesentlich ist, ist die Streuung grösser. Einzugsgebiete, deren Kurven im unteren Bereich liegen,

sind, da sie einen überproportionalen Rückhalt besitzen, eher anfällig für Prozesswechsel und plötzliche Änderungen im Hochwasserverhalten.

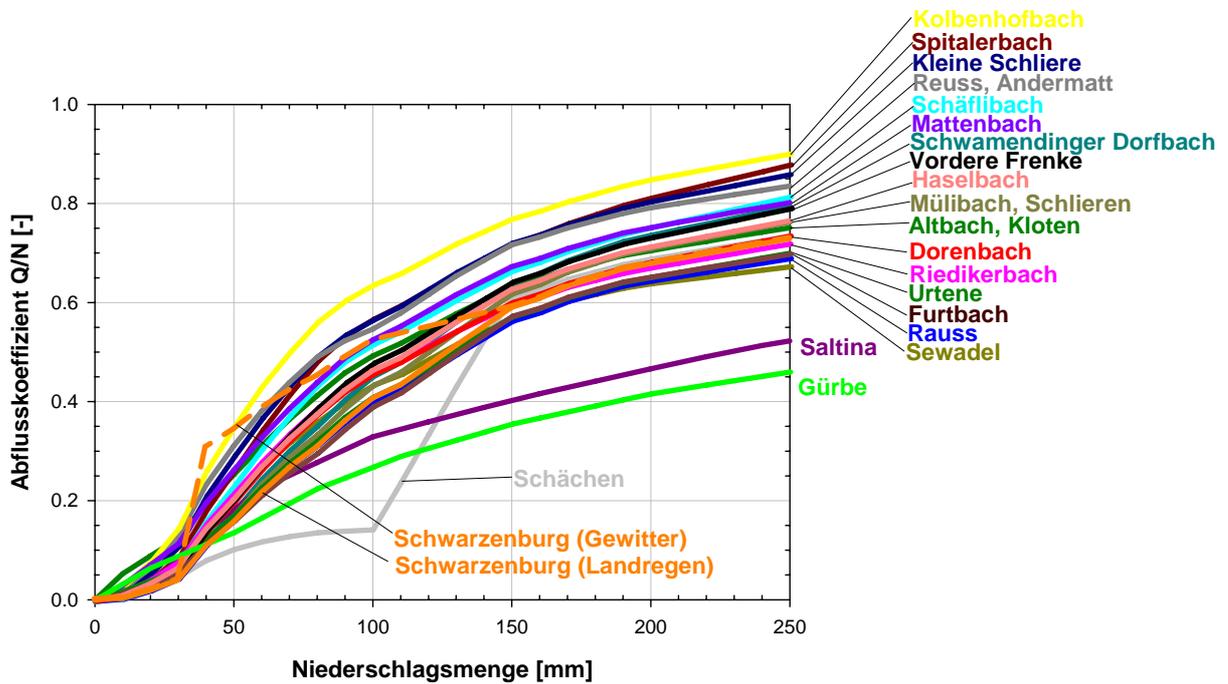


Abb.4: Kumulierte Abflussreaktionskurven der untersuchten Einzugsgebiete bei Niederschlägen bis 250mm.

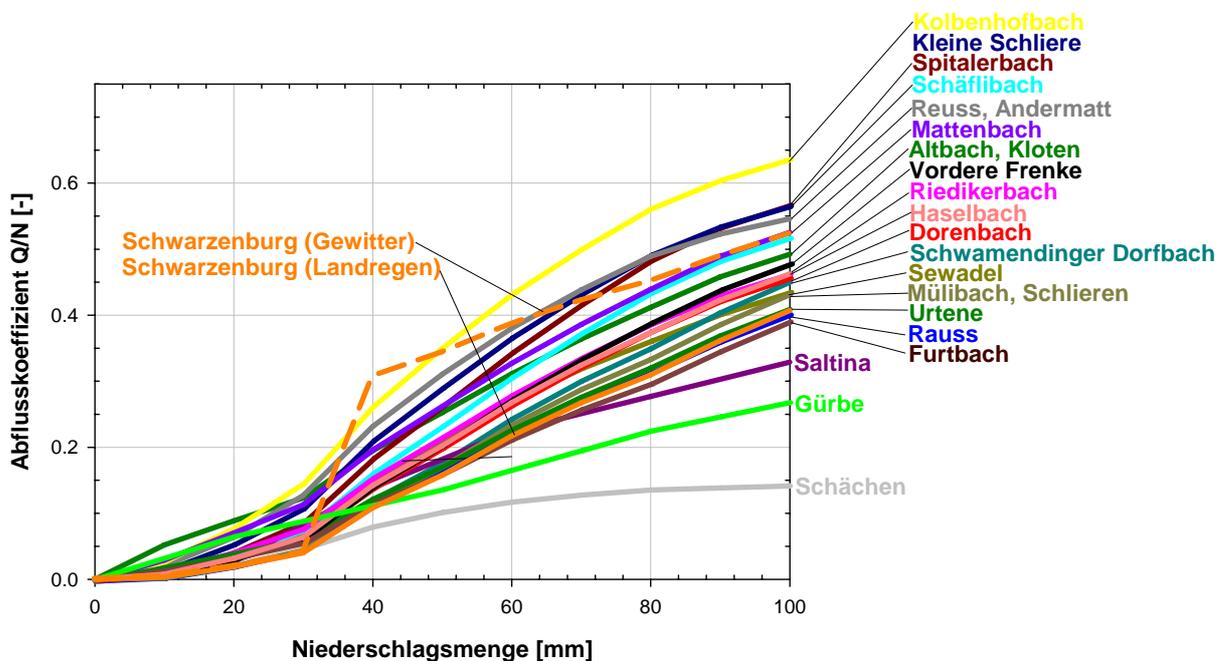


Abb.5: Kumulierte Abflussreaktionskurven der untersuchten Einzugsgebiete bei Niederschlägen bis 250mm.

4.4 Einfluss des Anteils rasch reagierender Flächenanteile auf spezifische Hochwasserabflüsse

Stark reagierende Einzugsgebiete sollten einen grösseren Anteil an rasch reagierenden Flächen aufweisen als schwächer reagierende. Dieser Zusammenhang bestätigt sich in Abbildung 6, allerdings zeigt sich eine so grosse Streuung, dass die Darstellung sich nicht für direkte Vorhersagen eignet. Im Folgenden wird diese Darstellung näher analysiert und Gebiete, die sich speziell verhalten näher untersucht.

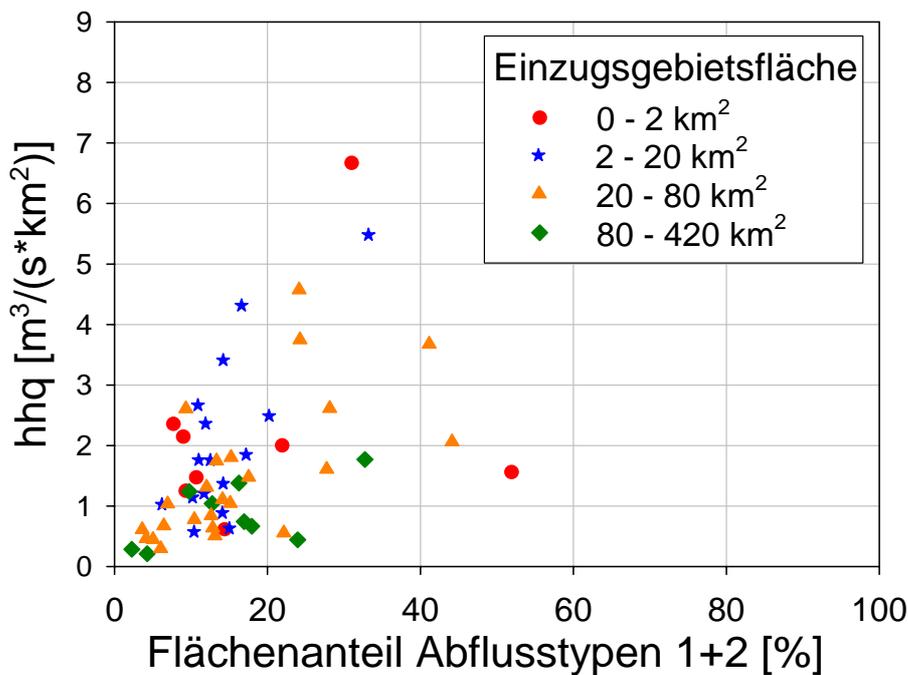


Abb.6: Spezifische Maximalabflüsse der untersuchten Einzugsgebiete in Abhängigkeit des Flächenanteils rasch und leicht verzögert reagierender Abflusstypen 1 und 2.

4.4.1 Reaktion von Gebieten bis 20 km²

Werden, wie in Abbildung 7, nur kleinere (0-2 km²) und mittlere (2- 20 km²) Gebiete betrachtet, zeigt sich ein wesentlich stärkerer Zusammenhang zwischen rasch reagierenden Flächen und dem hhq. Kleine Gebiete können von extremen Gewittern flächendeckend getroffen werden. Die auftretenden hohen Intensitäten sind verantwortlich für die grössten Abflüsse. Die dabei fallenden Niederschlagsmengen von gegen 100 mm reichen jedoch nicht aus, um in den speicherfähigen, verzögert reagierenden Flächen wesentlichen Abfluss zu erzeugen. Das bedeutet, dass der entstehende Abfluss proportional zu den rasch reagierenden Flächen ist. Der Anteil von stark verzögert reagierenden Flächen (Abflusstyp 4 und 5) an der Gesamtfläche hat wenig Einfluss auf das hhq (Abbildung 8).

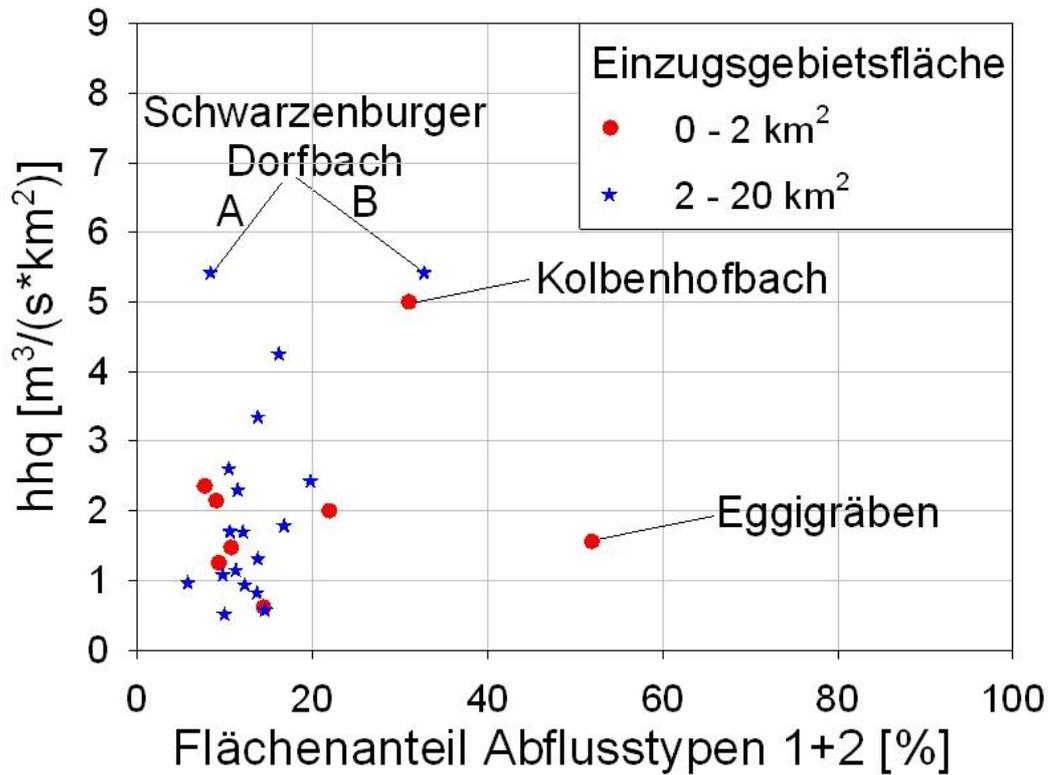


Abb.7: Spezifische Maximalabflüsse der untersuchten Einzugsgebiete < 20 km^2 in Abhängigkeit des Flächenanteils der rasch reagierenden Abflusstypen 1 und 2.

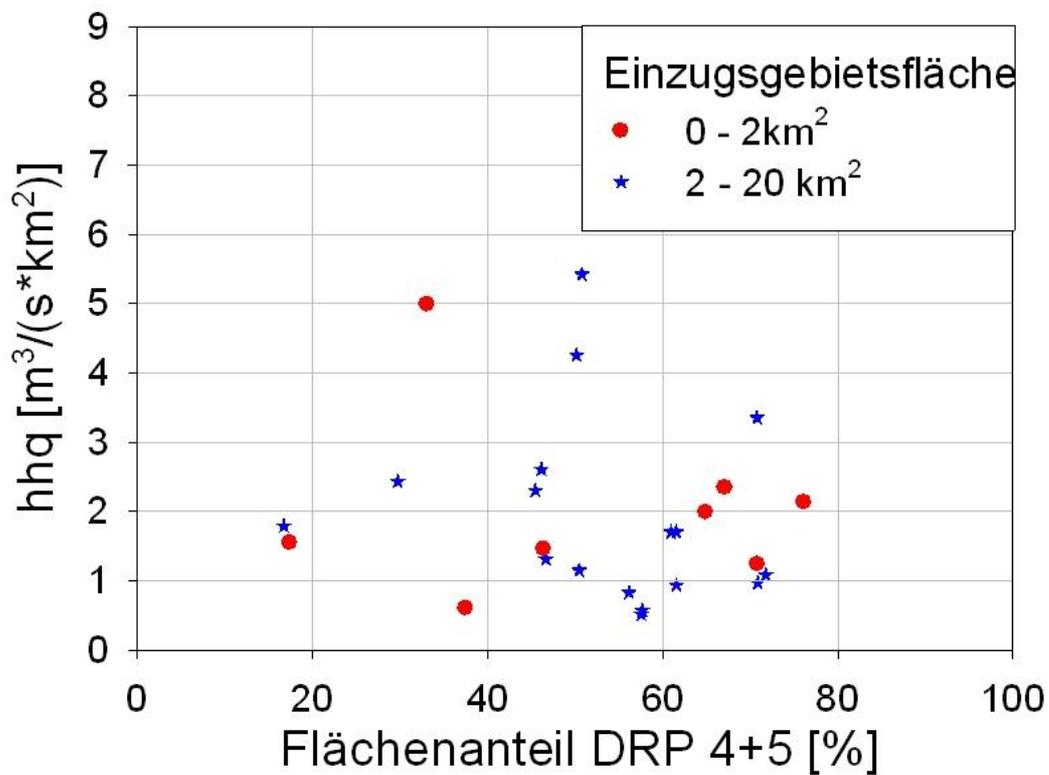


Abb.8: Spezifische Maximalabflüsse der untersuchten Einzugsgebiete < 20 km^2 in Abhängigkeit des Flächenanteils der stark verzögerten Abflusstypen 4 und 5.

Bemerkenswerte Abweichungen in Abbildung 7 zeigen die Gebiete Kolbenhofbach (Scherrer AG, 2006), Eggigräben (IHW, 1999) und Schwarzenburger Dorfbach (Scherrer AG und IHW, 2004). Kolbenhofbach und Eggigräben sind vergleichbar gross und entwässern eine Bergflanke, der Kolbenhofbach an der Westseite des Üetlibergs, die Eggigräben an der Ostseite des Männlichen Richtung Wengen. Beide haben grössere Flächen mit Abflusstyp 1 und 2 (Abbildung 9). Die Unsicherheit des beim Kolbenhofbach abgeschätzten Maximalabflusses ist allerdings relativ gross, sie wird aufgrund der kleinen Fläche bei der Umrechnung auf spezifische Abflüsse noch verstärkt.

Überraschend ist der geringe Wert für die enorm steilen Eggigräben, die wenig speicherfähiges Material aufweisen. Der Wert ist jedoch gut belegt, da die Kapazität des Gerinnes durch Wengen sehr gering ist und keine schwerwiegenden Überflutungen bekannt sind. Es muss angenommen werden, dass sich in dem durch umliegende Berge abgeschirmten Einzugsgebiet keine Gewitter mit hohen Intensitäten entwickeln können. Der Einfluss der Topographie auf die Entwicklung von Gewittern zu erforschen, ist eine lohnende Aufgabe der Zukunft.

Das EZG des Dorfbachs bei Schwarzenburg weist überdurchschnittlich speicherfähige Böden auf (Anhang 6) und wenig rasch reagierende Flächen auf (Punkt A in Abb. 7). Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, wurde der beobachtete extreme Abfluss 1985 durch ein Gewitter mit Intensitäten um 200 mm/h erzeugt. Bei diesen Intensitäten tritt auf gewissen Flächen ein Prozesswechsel auf, der sich in einer Vergrösserung der rasch reagierenden Flächen äussert (Punkt B in Abb. 7). Extreme Gewitter wurden auch in benachbarten Gebieten beobachtet, wie in den am Gantrisch entspringenden Flüssen Gürbe und Sense. In dieser Gegend scheinen aufgrund der Lage und Topographie, im Gegensatz zu den Eggigräben, überdurchschnittlich starke Gewitter aufzutreten.

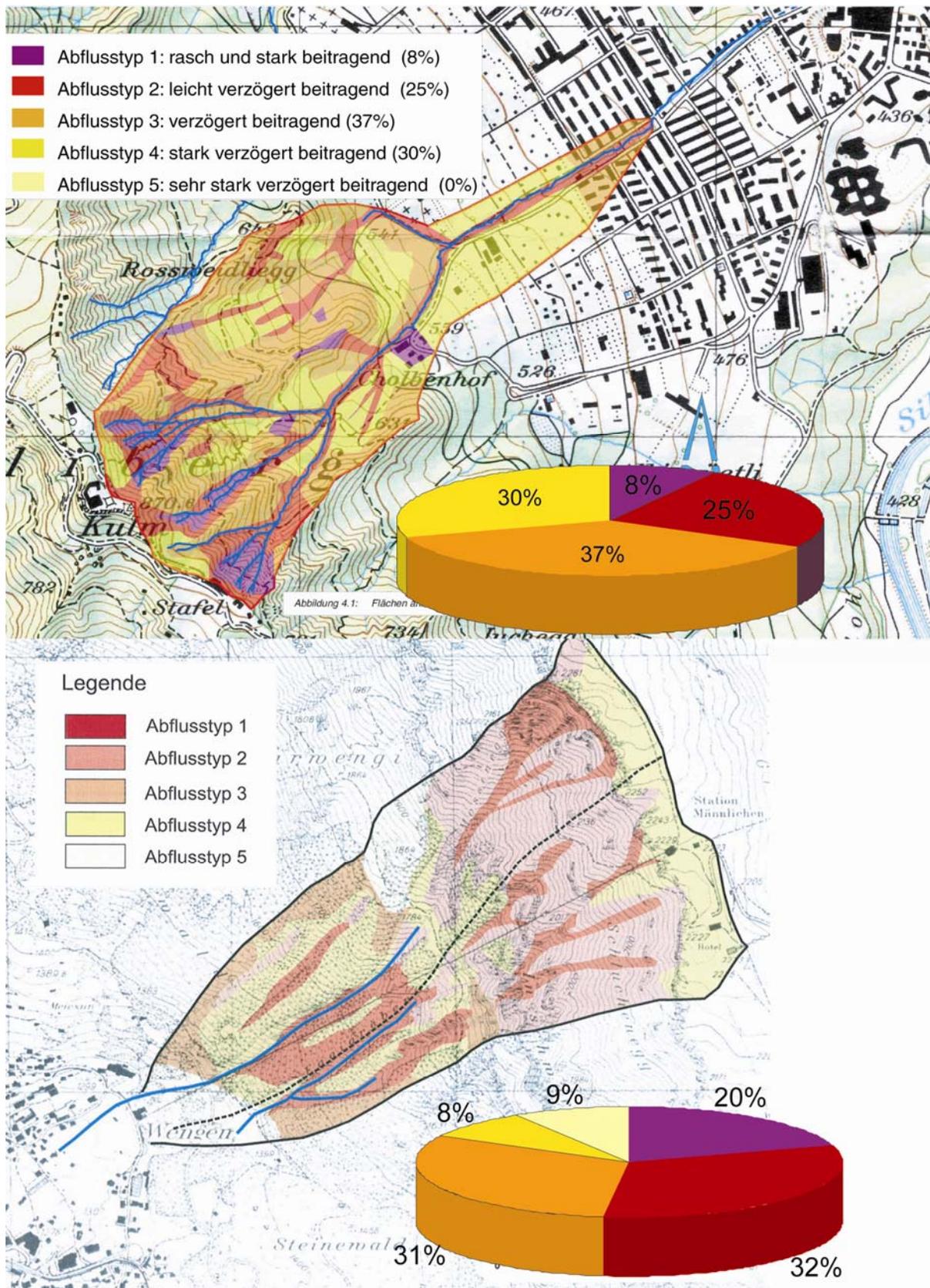


Abb. 9: Flächen verschiedener Abflusstypen und ihre prozentuale Verteilung in den Einzugsgebieten des Kolbenhofbachs (oben, Scherrer AG, 2006c) und der Egggräben (unten, IHW, 1999).

4.4.2 Reaktion von Gebieten bis 80 km²

In Abbildung 10 ist das hhq als Funktion des Flächenanteils von Abflusstyp 1 und 2 für Einzugsgebietsflächen bis 80 km² und bis 420 km² dargestellt.

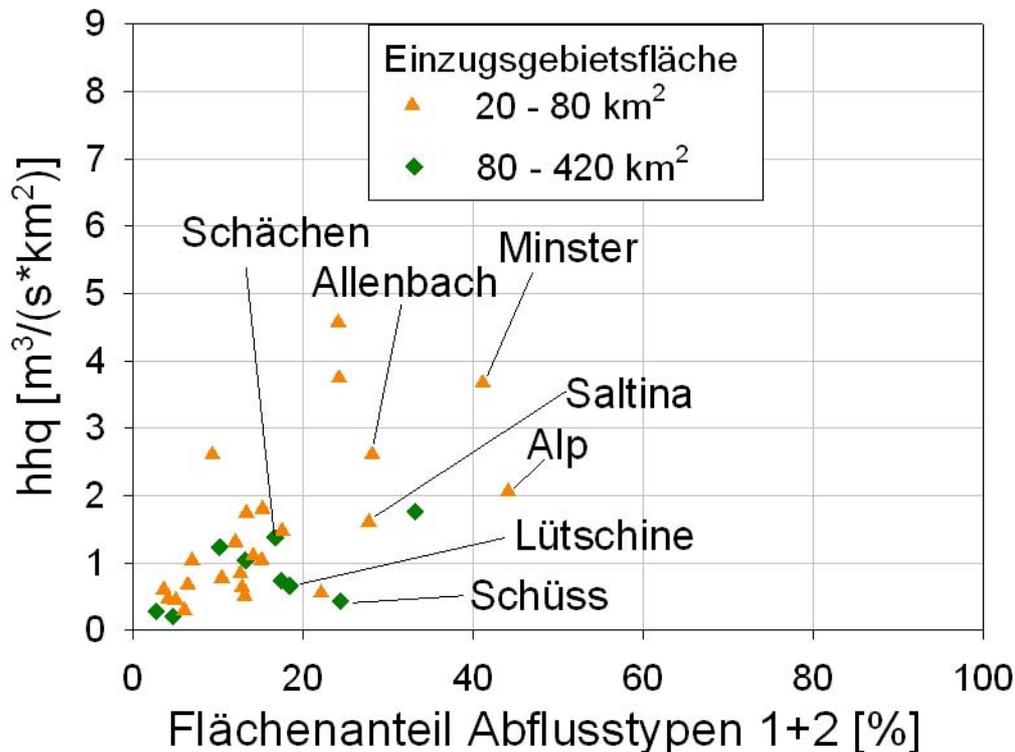


Abb. 10: Spezifische Maximalabflüsse der untersuchten Einzugsgebiete > 20 km² in Abhängigkeit des Flächenanteils der rasch reagierenden Abflusstypen 1 und 2.

Minster und Saltina liegen in Bezug auf Fläche (60 km² und 78 km²) und dem Anteil rasch reagierender Flächen (41% und 28%) nicht allzu weit auseinander, unterscheiden sich aber im hhq wesentlich (3.7 m³s⁻¹km⁻² und 1.6 m³/s⁻¹km⁻²). Woher kommt dieser Unterschied? Die grössten Hochwasser der Saltina werden nicht von Gewittern verursacht, sondern von lang andauernden Niederschlägen, die zwar ergebnisreich sind, aber geringere Intensitäten aufweisen und deshalb kleinere spezifische Abflüsse verursachen. Die Hochwasser der Minster werden dagegen von konvektiven, kurzen Niederschlägen verursacht. Eine Erklärung für dieses unterschiedliche Ansprechen ergibt sich aus dem Vergleich der Abflusstypenkarten der beiden Einzugsgebiete (Abbildung 11). Bei der Minster sind die rasch reagierenden Flächen im nordwestlichen Teil des Gebietes konzentriert. Ein extremes Gewitter, das sich nur über wenige Kilometer ausdehnt, kann diese Flächen voll treffen. In der Saltina sind die rasch reagierenden Flächen jedoch über das ganze Gebiet verteilt, so dass ein Gewitter immer nur einen Teil von ihnen überdecken kann (Naef et al., 1999). Zusätzlich sind die Intensitäten im von umliegenden Bergen abgeschirmten Wallis geringer.

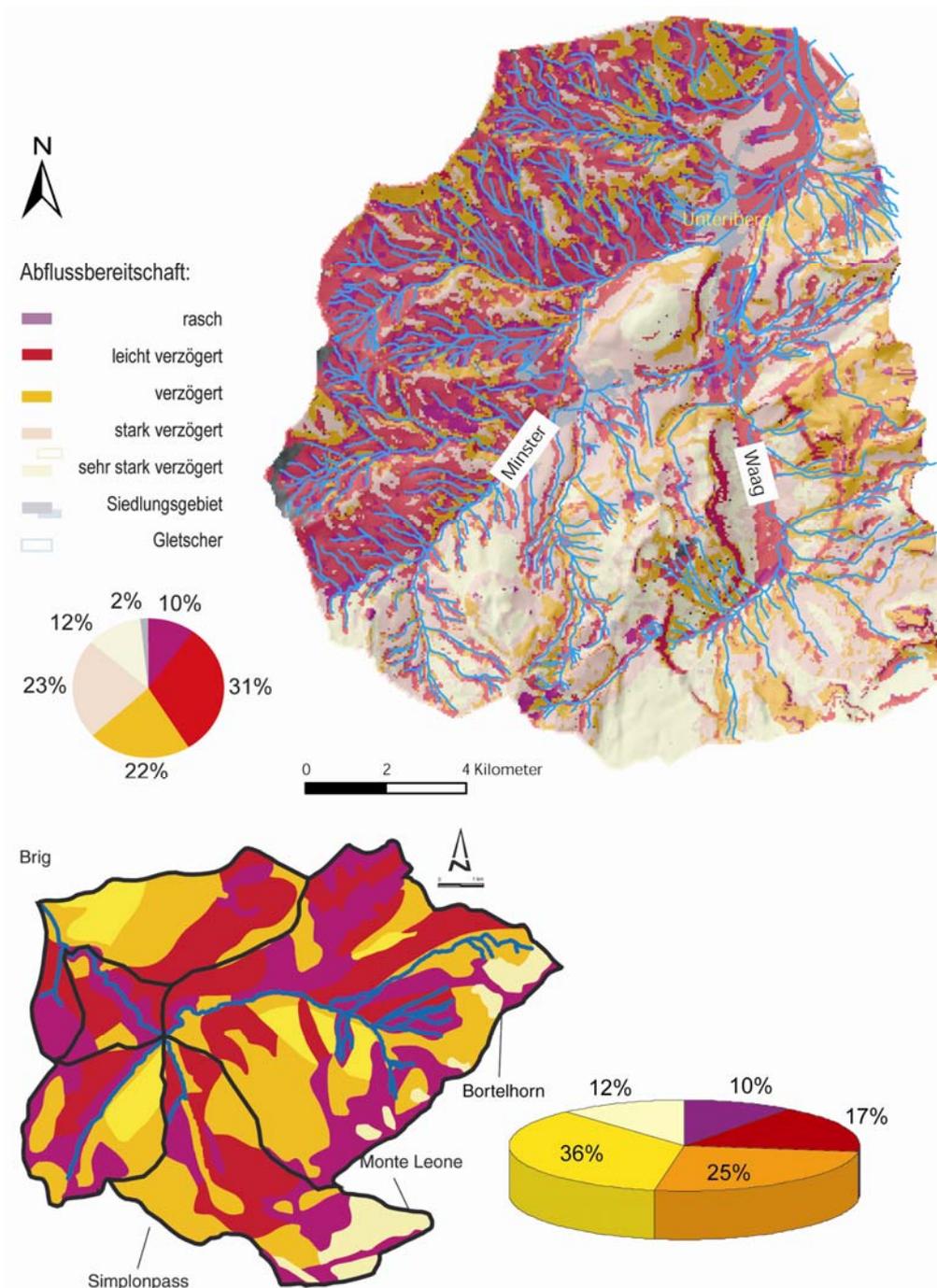


Abb. 11: Flächen verschiedener Abflusstypen und ihre prozentuale Verteilung in den Einzugsgebieten der Minster (oben, BAFU, 2008) und der Saltina (unten, VAW, 1994; Scherrer AG, 2007).

Die Alp bei Einsiedeln (38 km^2) hat grosse Anteile von Abflusstyp 1 und 2, im Allenbach bei Adelboden (29 km^2) sind diese Anteile geringer. Trotzdem liegen die hhq in der Alp leicht tiefer ($2.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ gegen $2.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Abflussmessungen der Alp korrigiert aufgrund hydraulischer Modellrechnungen und umgerechnet auf Bahnhofbrücke Einsiedeln). Auch hier liegt der Grund darin, dass im Allenbach die rasch reagierenden Flächen konzentriert im nördlichen Teil liegen und von einem Gewitter voll getroffen werden können (Abbildung 12).

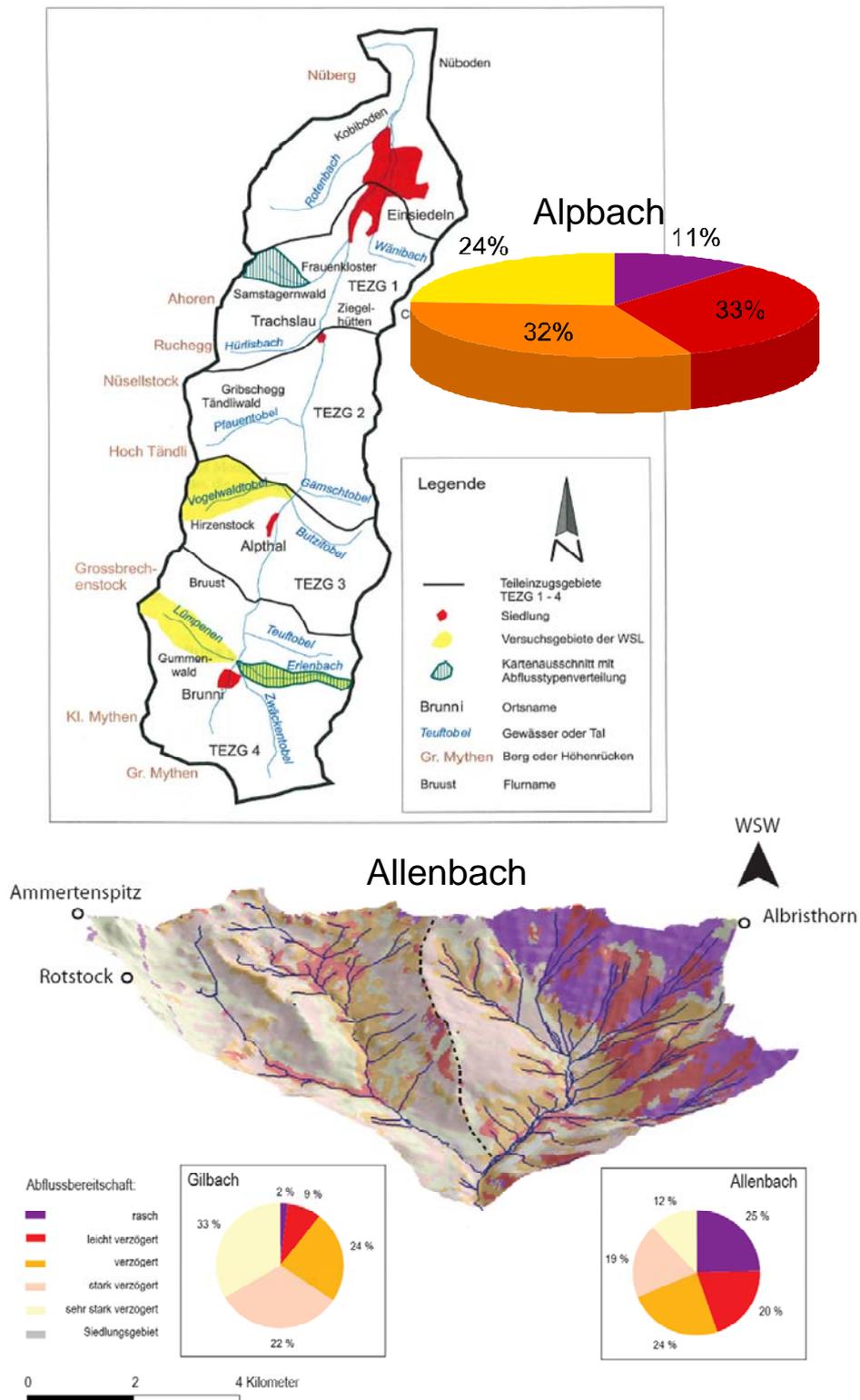


Abb. 12: Flächen verschiedener Abflusstypen und ihre prozentuale Verteilung in den Einzugsgebieten des Alpbachs (IHW, 1998) und den Teileinzugsgebieten Gilbach (links) und Allenbach (rechts) des Alenbachs (BAFU, 2008).

Im langgestreckten, schmalen Gebiet der Alp kann dagegen nur ein kleinerer Teil überdeckt werden; in einzelnen Teilgebieten sind jedoch schon verschiedentlich sehr hohe Abflüsse beobachtet worden. Extreme Abflüsse in Einsiedeln entstünden dann, wenn Gewitter mit der Fliessgeschwindigkeit der Alp in Gebietsrichtung nach Norden ziehen würden, ein Szenario, das noch nie aufgetreten ist und meteorologisch gesehen unwahrscheinlich ist.

Zusammengefasst heisst das, dass auch in Einzugsgebieten bis ca. 100 km² die Grösse des hhq von ihrer Reaktion auf konvektive Niederschläge bestimmt wird. Sind die rasch reagierenden Flächen konzentriert und ausgedehnt genug, sind Gewitter massgebend, langgestreckte Gebiete oder Gebiete, deren rasch reagierende Flächen verteilt liegen, reagieren weniger empfindlich.

4.4.3 Reaktion von Gebieten mit Flächen über 80 km²

In Abbildung 10 ist auch das Verhalten von Gebieten mit Flächen über 80 km² dargestellt. Grössere Gebiete werden nicht mehr von Gewittern dominiert, das hhq hängt von einer zunehmend komplexeren Kombination von Faktoren ab. So liegt das hhq des Schächens (108 km²) mit 1.4 m³s⁻¹km⁻² für Gebiete dieser Grösse recht hoch. Wie in Kapitel 2 erläutert, wurde beim Schächens 2005 ein durch Drainage der unterirdischen Speichersysteme verursachter Prozesswechsel beobachtet, mit dem das hhq vergrössert wurde.

Im Gegensatz dazu liegt das hhq der Schüss bei Biel (213 km²) mit 0.4 m³s⁻¹km⁻² sehr tief, zudem besteht zwischen dem 20 und dem 100jährigen Hochwasser kaum ein Unterschied. Dies sind starke Indikatoren für einen zu erwartenden Prozesswechsel. Unter welchen Umständen ein Prozesswechsel eintritt, lässt sich nur mit besseren Kenntnissen des Zusammenspiels der massgebenden Faktoren (Karst, Bodenfrost, Schneefallgrenze, Überregnung) (Kapitel 2.2) klären. Auch die Lutschine (379 km²) ist ein komplexes Einzugsgebiet. Hier traten in den letzten 10 Jahren fünf extreme Hochwasser auf.

Im Vergleich zu anderen Gebieten liegt das hhq allerdings eher im unteren Bereich und die Frequenzgerade (siehe: www.bafu.admin.ch) verläuft relativ flach. Diese beiden Eigenschaften können auf eine Anfälligkeit für Prozesswechsel hinweisen. Im folgenden Kapitel werden deshalb Untersuchungen über die Abflussbildung der Lutschine vorgestellt. Solche Untersuchungen können aufzeigen, wie gross die Wahrscheinlichkeit ist, dass das beobachtete gedämpfte Verhalten bei höheren Niederschlägen wegfällt und dann wesentlich höhere Abflüsse resultieren.

4.5 *Das Hochwasserverhalten der Lutschine*

4.5.1 Einleitung

Die hier vorgestellte Untersuchung wurde parallel zum Projekt CCHydro im Auftrag des OIK 1, TBA Kt. Bern erarbeitet (Naef et al., 2011). Die Resultate dieser ausführlichen Studie zeigen, wie in komplexen Gebieten extreme Abflüsse durch das Zusammenspiel verschiedener Prozesse, die sich teilweise kompensieren, zustande kommen. Ohne dieses Zusammenspiel zu berücksichtigen, ist eine Extrapolation auf extremere Abflüsse sehr unsicher.

Die Lütschine ist einer der Flüsse, in dem Hochwasser nicht gleichmässig über die Zeit verteilt sind. Das grösste bekannte Hochwasser der letzten 200 Jahren ereignete sich 2005. Zusätzlich traten jedoch in den Jahren 2000, 2002 und 2007 Ereignisse auf, die nach den Abflussdaten von 1920 bis 1998 als 100jährige Hochwasser bezeichnet würden. Die absoluten Abflüsse bei diesen Hochwassern waren jedoch mit einer Zunahme von 20 % bis 25 % gegenüber der Hochwasser der vorangehenden Jahrzehnte nicht sehr viel grösser. Bei der Beurteilung des Verhaltens der Lütschine als Grundlage für eine Extrapolation müssen also zwei Fragen beantwortet werden:

- wie sind die Häufung der Hochwasser in den letzten 10 Jahren und die weitere Entwicklung zu beurteilen?
- wie ist das relativ gedämpfte Verhalten der Lütschine zu beurteilen und wie gross ist die Wahrscheinlichkeit für wesentlich grössere Abflüsse?

4.5.2 Vorgehen

Im Rahmen der Ereignisanalyse wurde für das Einzugsgebiet der Lütschine eine Abflussprozesskarte (APK) erstellt (BAfU, 2008). Dafür wurde ein Programmcode verwendet, der anhand detaillierter Bodenkarten und dem hochaufgelösten Geländemodell für die automatische Erstellung einer Abflussprozesskarte für den Kanton Zürich entwickelt worden war und anhand der Bodenkarte Grindelwald für gebirgige Verhältnisse erweitert wurde. An diesem Programmcode wurden umfangreiche Verbesserungen vorgenommen und damit eine neue Prozesskarte gerechnet. Diese Karte zeigt, dass im Einzugsgebiet der Lütschine ausgedehnte Flächen mit grossem Speichervermögen existieren, die für das relativ verzögerte Verhalten der Lütschine verantwortlich sind (Abb. 13).

Am IfU wurde das Modell Qarea entwickelt, das die Speicherfähigkeit und die Abflussbildung bei Starkregen anhand dieser Karten räumlich differenziert berücksichtigen kann. Mit diesem Modell wurden die grossen Hochwasser Oktober 2000, Juli 2002, August 2002, August 2005 und August 2007 nachgerechnet. Berücksichtigt wurde dabei auch Höhe der Nullgradgrenze, Schnee- und Gletscherschmelze und Niederschlagsverteilung. Die Simulationen zeigen allerdings, dass das vorhandene Messnetz nicht ausreicht, um das hydrometeorologische Geschehen mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen. So differieren die Messungen an den acht Niederschlagsmessern stark und die mit Kriging ermittelten Niederschlagsverteilungen muten willkürlich an und spiegeln die topographischen Begebenheiten nicht wider (Abb. 14, nächste Seite). Bei der Anwendung des Modells besteht demzufolge bei allen meteorologischen Eingangsgrössen ein substanzieller Ermessensspielraum. Mit zahlreichen Simulationen wurde für jedes Ereignis versucht, befriedigende Parametersets zu finden.

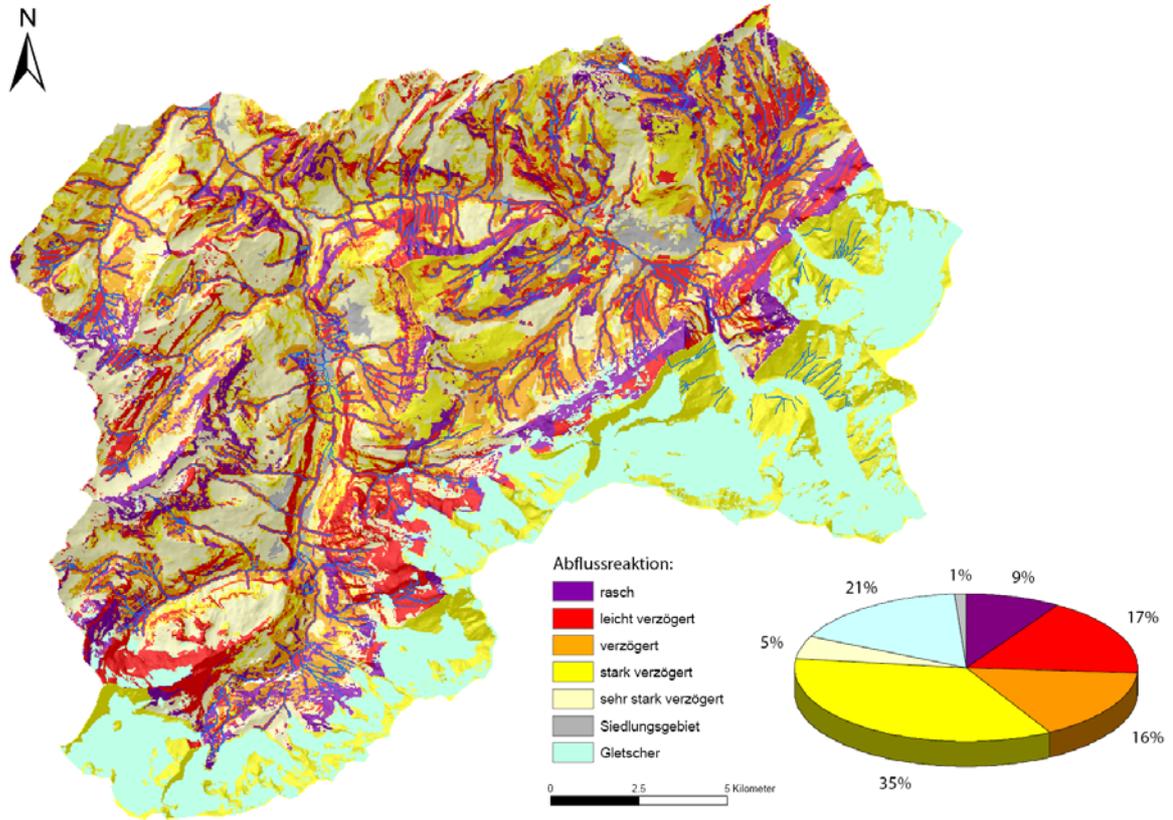


Abb. 13: Mit dem verbesserten Programmcode automatisch ermittelte Flächen unterschiedlicher Abflusstypen und ihre prozentuale Verteilung im Einzugsgebiet der Vereinigten Lütschine.

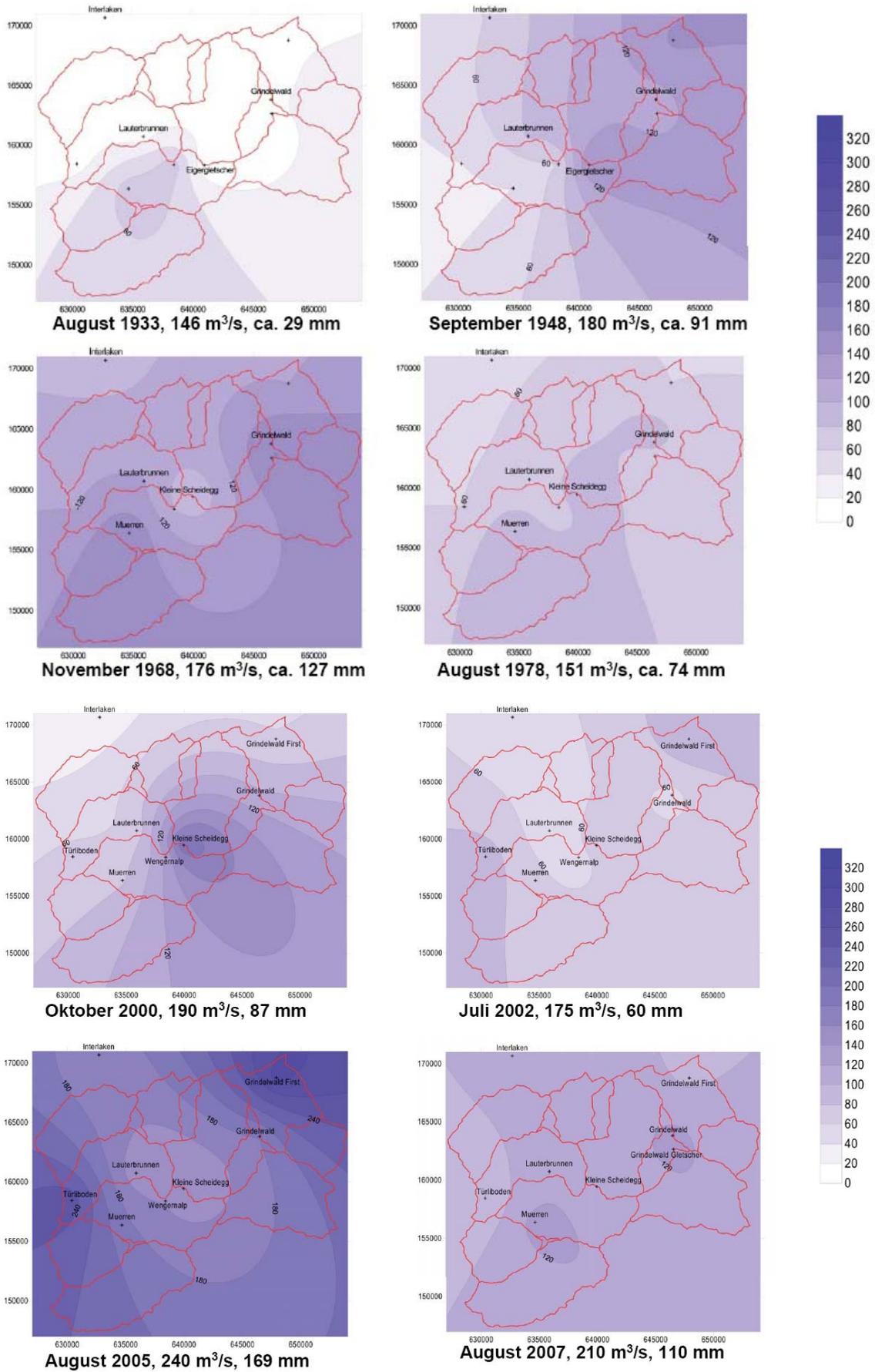


Abb. 14b: Die Niederschlagsverteilung bei grossen Hochwassern der Vereinigten Lütchine in den Jahren 2000, 2002, 2005 und 2007, ermittelt anhand der vorhandenen Niederschlagsmesser mit Kriging.

4.5.3 Ablauf der grossen Hochwasser

4.5.3.1 Niederschläge, Nullgradgrenze, Schnee- und Gletscherschmelze

In Abbildungen 14 sind die Niederschlagsverteilungen bei den grossen Ereignissen der letzten 80 Jahre dargestellt. Eindrücklich zeigt sich, wie unterschiedliche Niederschlagsverteilungen Hochwasser in der Lütschine auslösen. Auffällig ist das Ereignis im August 1933. Der damals an den vorhandenen Stationen gemessene Niederschlag war zu gering um ein Hochwasser auszulösen. Anhand der Hochwasserspuren lässt sich jedoch erkennen, dass im oberen Teil der weissen Lütschine ein starkes, lokales Gewitter niederging. Aufgrund der vorangehenden Wärmeperiode war der Abfluss der Lütschine zu Beginn des Ereignisses mit $70 \text{ m}^3/\text{s}$ recht hoch. Auf diesen setzt sich dann die kurze Abflussspitze aus dem lokalen Gewitter auf und führte zu einem grösseren Ereignis. Ergiebige Niederschläge, wie 2005, fallen dagegen über einen längeren Zeitraum. Durch die fehlende Sonneneinstrahlung ist dabei der Schmelzwasserabfluss reduziert. Der Abfluss aus dem Niederschlag kann sich deshalb nicht auf einen hohen Basisabfluss aufsetzen. Lange, ergiebige Niederschläge starten also mit einem tieferen Abfluss. Dies ist ein Effekt, der zu gedämpften Verhalten der Lütschine beiträgt. Das Hochwasser vom August 2007 führte zum zweithöchsten Abfluss in der Messreihe der Lütschine, obwohl das Gebietsmittel wesentlich unter demjenigen von 2005 lag. Grosse, aber nicht extreme Ereignisse können entstehen, wenn nur ein Teilgebiet, entweder die weisse oder die schwarze Lütschine überregnet wird. Eine solche Teilüberregnung ist für die Lütschine der häufigere Fall, typisch sind dafür die Ereignisse 2000, Juli 2002.

Aufgrund historischer Studien ist das Niederschlagsereignis 2005 als aussergewöhnlich einzustufen. z.B. Im Gebiet Brienersee können Niederschläge höhere Werte erreichen. Diese Werte lassen sich zur Extrapolation auf extremere Ereignisse nicht einfach transferieren lassen ohne die räumlichen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Diese Zusammenhänge sollen in einem gemeinsamen Projekt "Extreme Niederschlagsereignisse und Hochwasser" mit dem IAC untersucht werden.

Grossräumige Niederschläge mit Gebietsmitteln über 90 mm traten in den letzten 10 Jahren gehäuft auf (Abb. 14). So wurde

- zwischen 1920 und 1960 ein Ereignis beobachtet (1948),
- zwischen 1960 und 1999 auch ein Ereignis (1968),
- zwischen 2000 und 2010 vier Ereignisse (2000, 2002, 2005, 2007).

Diese Häufung ist auffällig. Ob sie den Bereich der langjährigen Schwankungen übersteigt, lässt sich mit den vorhandenen Daten nicht entscheiden.

4.5.3.2 Das Verhalten des Einzugsgebietes

Da das Modell Qarea die Abflussbildung räumlich detailliert berücksichtigt, lässt sich der Beitrag der einzelnen Flächen zum Hochwasser ermitteln. In Abb. 15 sind die Ergebnisse für das Hochwasser 2007 dargestellt. Dargestellt sind die Beiträge der unterschiedlich rasch reagierenden Flächen, wobei Abflusstyp 1 (AP1) für die am raschesten reagierenden Flächen steht und AP5 für die langsamsten.

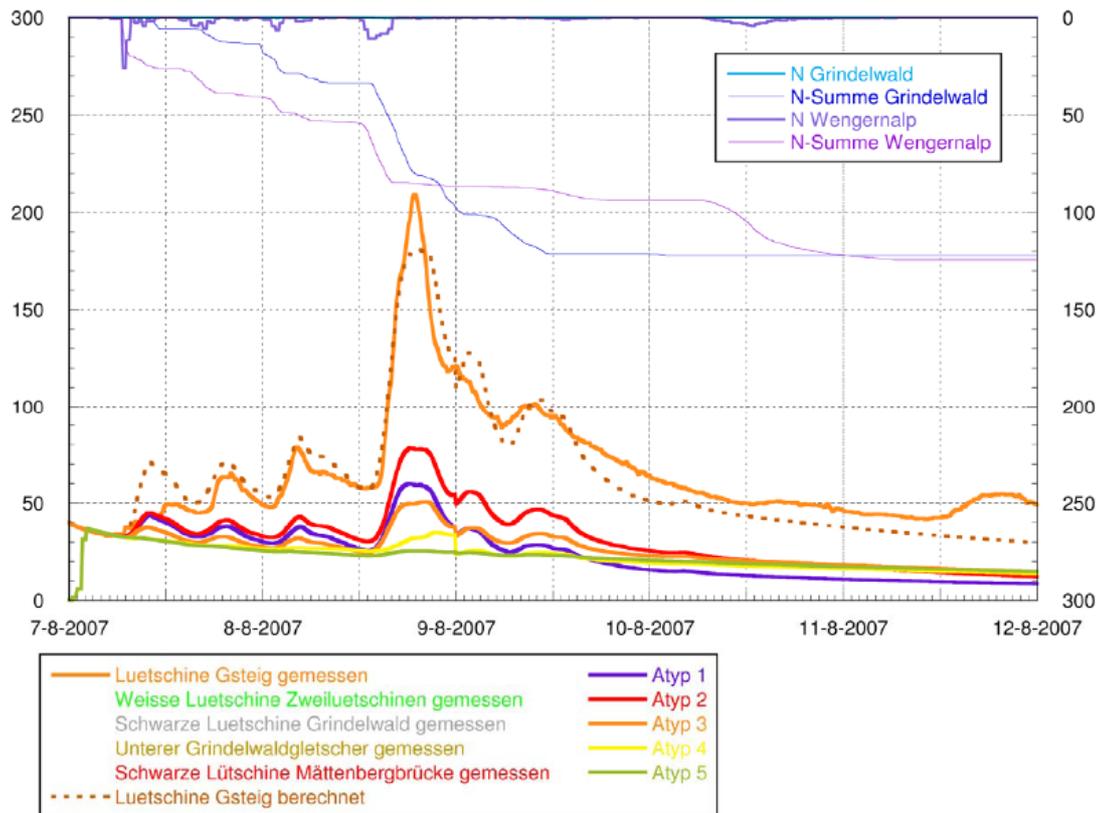


Abb. 15: Nachrechnung des Hochwassers vom August 2007 mit dem Modell Qarea. Eingetragen sind auch die Beiträge aus den schnell (Atyp 1) bis stark verzögerte (Atyp 5) beitragenden Flächen.

Beim Hochwasser 2007 fielen 110 mm Niederschlag in eineinhalb Tagen auf das Einzugsgebiet. Gegen Ende des Ereignisses sank die Schneefallgrenze bis gegen 2000 m ü.M., so dass die höheren Teile des Gebietes nicht mehr zum Abfluss beitragen. Die resultierende Abflussspitze wurde vor allem durch Beiträge der rasch reagierenden Flächen AP1 und AP2 erzeugt, obwohl diese nur 9.2 % resp. 17.5 % des Einzugsgebietes umfassen. Aufgrund ihrer begrenzten Speicherfähigkeit hielten diese Flächen kaum mehr Wasser zurück. Aufgrund ihrer grösseren Fläche produzierten die AP2 Flächen trotz ihrer verhalteneren Reaktion etwas mehr Abfluss als die AP1 Flächen. Die AP4- und AP5-Flächen (55.7 %) produzierten ausser dem Basisabfluss noch kaum Abfluss (Abb. 15).

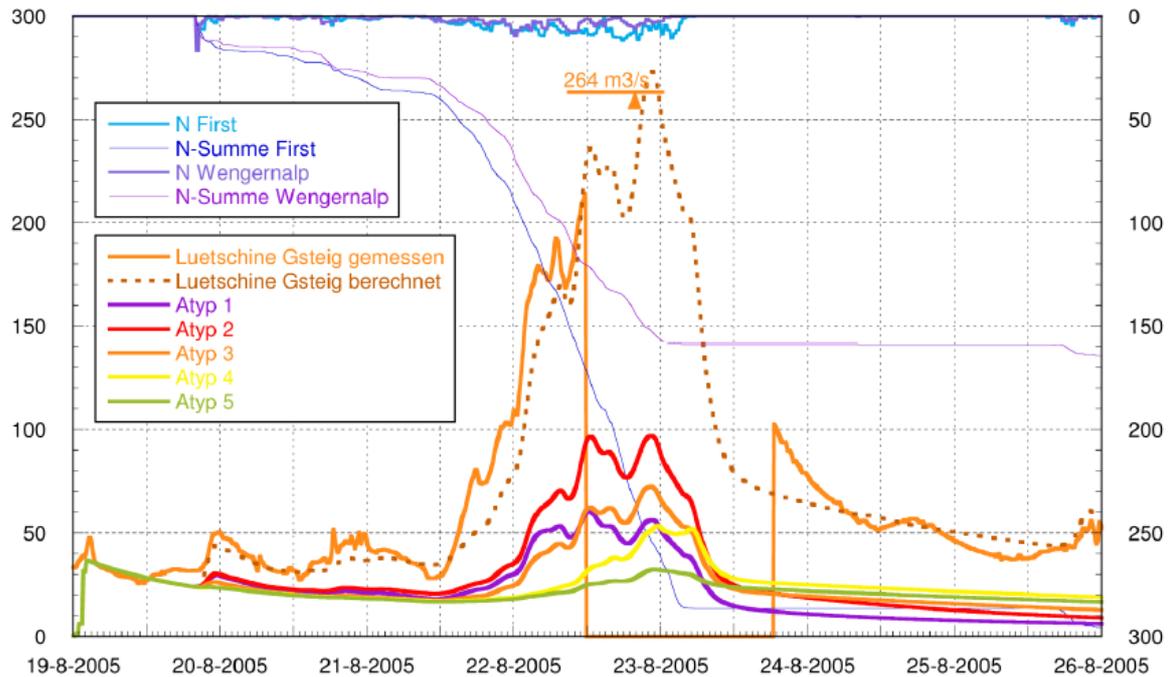


Abb. 16: Nachrechnung des Hochwassers vom August 2005 mit dem Modell Qarea. Eingetragen sind auch die Beiträge aus den schnell (Atyp 1) bis stark verzögerte (Atyp 5) beitragenden Flächen.

Anders sieht die Situation 2005 aus (Abb. 16), als mit 169 mm 50 % mehr Niederschlag fiel als 2007, allerdings während dreieinhalb Tagen mit geringeren mittleren Intensitäten. Die Schneefallgrenze bewegte sich dabei im Bereich um 3000 m ü.M. Wiederum liefern die AP2 Flächen die grössten Beiträge. Mit zunehmenden Niederschlagsmengen steigt jedoch der Abfluss aus den AP3 Flächen (16.1 %) über den AP1 Beitrag. Gegen Ende des Niederschlages erwachen auch die AP4 (35.2 %, inkl. Gletscher) und AP5 Flächen.

Die Hochwasser der Lutschine entstehen durch das Zusammenspiel von verschiedenen Prozessen, die teilweise kompensieren und so das gedämpfte Verhalten der Lutschine erklären. So sind zu erwähnen:

- Lage Null Grad Grenze: eine tiefe Null Grad Grenze schneidet die höheren Teile des Einzugsgebietes von der Abflussproduktion ab. Voraussetzung für grosse Abflüsse ist deshalb eine hohe Lage der Nullgradgrenze und ein Absinken erst gegen Ende des Ereignisses,
- Schnee- und Gletscherschmelze: Die grossen Hochwasser der Lutschine der Vergangenheit entstanden alle in den Sommermonaten (Ausnahme: Hochwasser vom November 1968), wenn Schneeschmelze nur in den höheren Lagen zu erwarten ist. Schmelzwasser aus den Gletschern trägt nur dann relevant zur Abfluss-Spitze bei, wenn die Vorperiode sehr warm ist. Bei langen Niederschlagsereignissen, die notwendig sind um die Böden zu sättigen, tritt aber eine Abkühlung und ein Rückgang der Strahlung ein, die den Schmelzwasserbeitrag reduziert.
- die untersuchten Hochwasser entstanden entweder durch lokale Gewitter, durch Überregnung der Weissen oder der Schwarzen Lutschine oder durch Überregnung des gesamten Gebietes. Eine grossräumige Überregnung findet höchstens in 30 % der Fälle statt.
- Niederschlagsmenge und Intensität: Nur rasch reagierenden Flächen (AP1 und AP2) sprechen bei Niederschlägen bis 100 mm stark an.. Obwohl solche Niederschlagsereignisse höhere Intensitäten aufweisen können, führen sie nicht zu den grössten Abflüssen, da die bei-

tragenden Flächen nur 26.7 % des Einzugsgebietes umfassen. Bei ergiebigen, längerdauernden Niederschlägen, die auch wesentliche Beiträge aus den verzögert reagierenden Flächen bewirken, sind die Niederschlagsintensitäten und damit die resultierenden Abflussspitzen geringer. Die Entstehung der Hochwasser der Lütschine lässt sich aufgrund dieser Erkenntnisse klassieren.

Hochwasser der Lütschine

- bis $160 \text{ m}^3/\text{s}$: können durch unterschiedliches Zusammenspiel der Prozesse entstehen, auch durch lokale Gewitter in Kombination mit starker Schmelze,
- bis $190 \text{ m}^3/\text{s}$: können auch entstehen, wenn das Gebiet unterschiedlich überregnet wird,
- über $200 \text{ m}^3/\text{s}$: setzen grossräumige, ergiebige und länger dauernde Niederschläge voraus, bei denen auch die verzögert reagierenden Flächen ansprechen. Solche Niederschläge weisen nur noch mittlere Intensitäten auf. Durch die längere Dauer ist kein starker Beitrag der Schneeschmelze mehr zu erwarten.

4.5.3.3 Extrapolation Abflüsse Lütschine

Wie ist aufgrund dieser Erkenntnisse das Verhalten der Lütschine bei extremen Ereignissen, einzuschätzen, die die Niederschläge von 2005 wesentlich überschreiten? Ist die Lütschine in der Lage, mit einer nachvollziehbaren Wahrscheinlichkeit wesentlich grössere Abflüsse zu produzieren als die 2005 beobachteten? Aufgrund der verzögert ansprechenden Flächen sind zur Erzeugung höherer Abflüsse bei grössere Niederschlagsmengen als 2005 notwendig, höheren Intensitäten sind weniger kritisch.

Deshalb wurden für die Extrapolation die Niederschläge des Ereignisses 2005 verwendet, die um 50 % erhöht wurden. Dafür wurden die Niederschläge des 23. 8. 2005 am Folgetag noch einmal verregnet. Abb. 17 zeigt die resultierenden Ganglinien.

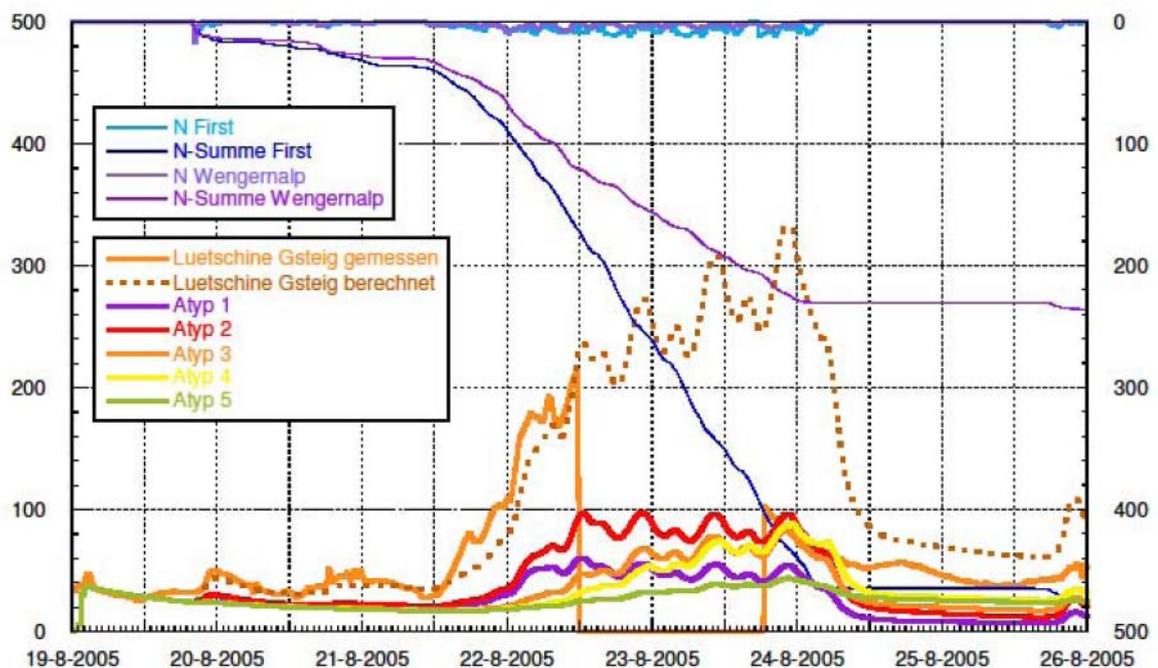


Abb. 17: Simulation eines Hochwassers mit einem gegenüber 2005 um 50 % erhöhten Niederschlag. Eingezeichnet sind auch die Reaktionen der verschiedenen Prozessflächen.

Während die AP1 und AP2 Flächen schon bei Mengen wie 2005 vollständig gesättigt sind und danach nur noch den Niederschlagsverlauf widerspiegeln, ist bei den erhöhten Niederschlägen ein stetiges Ansteigen der Beiträge aus den Flächen der langsameren Prozessen zu beobachten. Trotz der starken Erhöhung der Niederschläge fällt die Zunahme des Abflusses moderat aus. Das bedeutet, dass bei der Lütschine auch bei Niederschlägen, die bis zu 50 % höher sind wie 2005 keine plötzliche, überproportionale Zunahme des Abflusses zu erwarten ist.

Diese Aussage gilt mit folgenden Einschränkungen:

- die Gletscherflächen wurden im Modell Qarea den verzögert reagierenden AP4 Flächen zugeordnet. Vom Hochwasser 2007 liegen Abflussmessungen der Weissen Lütschine unterhalb des Unteren Grindelwaldgletschers vor, die diese Zuordnung bestätigen. Allerdings liegen kaum Erfahrungen vor, wie sich Gletscher bei extremen Niederschlägen verhalten. Ebenfalls nicht berücksichtigt sind die Auswirkungen von ober- und unterirdischen Gletscherseeausbrüchen.
- Wie in Kapitel 4.3 ausgeführt, wurde 2005 beim Schächen anfänglich eine verzögerte Abflussreaktion beobachtet. Nach Einsetzen der Drainage der steilen Hänge erhöhte sich der Abfluss zunehmend. Die Abflüsse werden also durch kurzfristige unterirdische Speicherung stark modifiziert. Solche Effekte wurden allerdings bei der Aufsetzung des Modells für die Lütschine nicht beobachtet und scheinen in der Lütschine eine geringere Rolle zu spielen. Eine bessere Beurteilung wird möglich sein, wenn die Resultate des NFP61 Projektes SAC-FLOOD vorliegen.

5. Bei welchen Einzugsgebieten ist eine verschärfte Reaktion auf erhöhte Niederschläge zu erwarten?

5.2 Einleitung

Lassen sich die hier zusammengetragenen Ergebnisse aus den knapp 100 Einzugsgebietsstudien verwenden, um Einzugsgebiete zu erkennen, die beim Überschreiten eines Schwellenwertes der Niederschlagsmenge wesentlich stärker reagieren?

Die in den Studien verwendete Kombination von Frequenzanalysen, Untersuchung von historischen Hochwassern, räumlich hoch aufgelösten Abflussprozesskarten und darauf basierenden Abflusssimulationen ergeben ein gutes Bild des Verhaltens eines Gebietes bei extremen Ereignissen. Obwohl aufgrund der Vielfältigkeit der Reaktionsweisen jedes Gebiet individuell betrachtet werden muss, lassen sich dennoch verschiedene generelle Erkenntnisse formulieren.

5.3 Kleine Gebiete

In kleineren Gebieten werden die grössten Hochwasser durch Gewitter hervorgerufen. Dabei besteht ein guter Zusammenhang zwischen dem spezifischen Hochwasserabfluss ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) und dem Flächenanteil der rasch reagierenden Abflusstypen 1 und 2. Ungewöhnliche Reaktionen und damit anfällig für Schwellenwerte sind Gebiete, die nur kleine Anteile der Abflusstypen 1 und 2 besitzen.

Zwei Gebiete unserer Untersuchung verdienen eine besondere Erwähnung. Eine extreme Reaktion wurde im oberen Teil des Einzugsgebietes des Dorfbachs bei Schwarzenburg beobachtet. Die Grundlagen zur Kartierung der Abflussprozesse basiert auf Beregnungsversuchen in zahlreichen Einzugsgebieten, die mit Niederschlagsintensitäten bis 100 mm/h

durchgeführt wurden. Die Intensität des auslösenden Gewitters hatte jedoch aufgrund der vorhandenen Daten eine wesentlich höhere Intensität und eine Wiederkehrperiode von mehreren hundert Jahren.

Bei so extremen Intensitäten findet ein Wechsel in den Abflussprozessen statt, der noch wenig erforscht ist. Da der beobachtete Abfluss auch eine Jährlichkeit von wesentlich über 100 Jahren aufweist, ist er als Ausreisser zu taxieren.

Ein gegenteiliger Effekt wurde bei den Eggigräben in Wengen beobachtet. Aufgrund der Verteilung der Abflusstypen wären hier wesentlich grössere Abflüsse zu erwarten. Anscheinend treten in diesem engen Tal keine Gewitter auf wie in einer offeneren Landschaft. Auch darüber ist noch wenig bekannt. Über die räumliche Verteilung, die Ausdehnung, die Häufigkeit und die Intensität von Gewittern besteht deshalb ein dringender Forschungsbedarf.

5.4 Mittlere Gebiete

Auch das Abflussverhalten von Einzugsgebieten mittlerer Grösse wird von konvektiven Niederschlägen dominiert. Dabei ist jedoch nicht nur der Anteil an rasch reagierenden Flächen wichtig, sondern auch, ob diese Flächen konzentriert auftreten oder über das Einzugsgebiet verteilt liegen. Nur bei konzentriert auftretenden Flächen ist ein extremes Gewitter mit seiner begrenzten Ausdehnung in der Lage, diese Flächen gesamthaft zu treffen und so grosse Hochwasser zu erzeugen. In Gebieten mit einem grossen Anteil an verzögert reagierenden Flächen werden dagegen langandauernde Niederschläge massgebend. In diesem Fall sind ähnliche Untersuchungen notwendig, wie sie für die Lüttschine vorgestellt worden sind.

5.5 Grosse Gebiete

Grossen Gebiete können von Gewittern nicht gesamthaft und gleichzeitig überdeckt werden. Vor allem bei grösseren Anteilen von verzögert reagierenden Flächen sind deshalb lang andauernde und ergiebige Niederschläge notwendig, um grosse Hochwasser zu erzeugen. Wenn diese Flächen dann gesättigt werden, ist eine starke Zunahme des Abflusses möglich, vor allen wenn die bei solchen Ereignissen üblichen mittleren Niederschlagsintensitäten durch konvektive Komponenten kurzzeitig vergrössert werden.

An der Lüttschine wurde aufgezeigt, wie sich das Verhalten bei extremen Ereignissen durch Aufschlüsselung des Ineinandergreifens der verschiedenen Prozesse abschätzen lässt. Nach diesen Untersuchungen ist bei der Lüttschine bei um 30 % bis 50 % zunehmenden Niederschlägen nur eine gedämpfte Zunahme des Abflusses zu erwarten, eine sprunghafte Zunahme ist nicht abzusehen.

Andere Gebiete zeigen jedoch ein dynamischeres Verhalten. Eine Verschärfung des Abflusses mit zunehmenden Niederschlägen wurde z.B. bei der Engelberger Aa, der Muota und dem Schächen festgestellt und bei den beiden letzteren auch näher untersucht. Nur teilweise verstanden ist das Verhalten der Schüss. Aufgrund der schwerwiegenden Schäden, die wesentlich grössere Abflüsse als die bisher beobachteten in Biel verursachen würden, sind hier weitere Untersuchungen, die grundsätzliche Frage zu behandeln haben, dringend zu empfehlen.

6. Ausblick und Empfehlungen

In den letzten Jahren wurde in der Schweiz eine Häufung von grossen Hochwassern beobachtet. Nach der in BAFU (2008) vorgestellten Analyse historischer Hochwasser lassen sich solche Häufungen in den letzten 500 Jahren öfters feststellen. Durch die Erhöhung der Treibhausgase in der Atmosphäre sind zusätzlich zu diesen Zyklen eine weitere Häufung und Vergrösserung extremer Niederschläge möglich. Um effizienten Hochwasserschutz gegen zukünftige Ereignisse zu erreichen, ist es wichtig zu erkennen, welche Flüsse verstärkt auf diese Änderungen reagieren werden. Die bisher als verlässlich eingeschätzte Frequenzanalyse der maximalen Jahresabflüsse ist in der heutigen Situation aus den folgenden Gründen durch zusätzliche Untersuchungen zu ergänzen:

- bei der Frequenzanalyse wird vorausgesetzt, dass sich die Hochwasserhäufigkeiten in der Beobachtungs- und Extrapolationsperiode nicht verändern, eine Voraussetzung, die heute nicht mehr erfüllt ist,
- das Abflussverhalten kann sich bei grossen Hochwassern aufgrund von Prozessänderungen wesentlich ändern. Die dabei auftretenden erhöhten Abflüssen, die auf das Gebietsverhalten zurückzuführen sind, wurden bisher als Ausreisser eingeschätzt und erhielten so nicht das ihnen entsprechende Gewicht.

Im vorliegenden Bericht wurden gegen 100 Hochwasserstudien unter Berücksichtigung von Forschungsergebnissen über Abflussprozesse ausgewertet. Neben der Frequenzanalyse bildeten die Analyse historischer Hochwasser und Abflussmodellierungen auf der Basis von Abflussprozesskarten ein wichtiges Werkzeug zum Verständnis des Gebietsverhaltens. Bei kleineren und mittleren Einzugsgebieten lässt sich das Verhalten anhand der hier aufbereiteten Grundlagen abschätzen. Bei grösseren Gebieten sind jedoch aufgrund der komplexen Interaktionen der verschiedenen Prozesse im Einzelfall aufwendigere Analysen notwendig.

Dr. F. Naef

In Zusammenarbeit mit:

Dr. P. Kienzler, Scherrer AG

Dr. S. Scherrer, Scherrer AG

R. Frauchiger, Scherrer AG

M. Margreth, Soilcom GmbH

Zürich im Juni 2011

7. Literatur:

BAFU (2008): Ereignisanalyse der Hochwasser 2005 - Teil 2, Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen in Umwelt, Wissen 0825: 429 S.

IHW (1997): Die Hochwasser der Gürbe (Entstehung, Ablauf, Häufigkeit). Bericht im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern.

IHW (1998): Hochwasserschutz Einsiedeln (Untersuchungen über die Gerinnekapazität und die Grösse extremer Hochwasser der Alp). Bericht im Auftrag der Wuhrkorporation der Alp, Einsiedeln.

IHW (1999): Hydrologie der Eggigräben oberhalb Wengen. Bericht im Auftrag der Schwellenkorporation Lauterbrunnen.

Kienzler, P. and Naef, F. (2008): Temporal variability of subsurface stormflow formation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 257–265.

Naef, F., Lehmann, C. (2011, in Vorbereitung): Massgebende Hochwasser der Lütchine unter Berücksichtigung der Häufung der Hochwasser in den letzten 10 Jahre. OIK1, TBA Kt. Bern

Naef, F., Margreth, M., Schmocker-Fackel, P., Scherrer, S. (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten - ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Wasser, Energie, Luft.

Naef, F., Scherrer, S., und Zurbrügg, C. (1999): Grosse Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten. *Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES*, Blatt 5.7

Scherrer AG (2006a): Hochwasserabflüsse an der Reppisch. Bericht im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich.

Scherrer AG (2006b): Hydrologische Grundlagen des Schächens für den Hochwasserschutz des Urner Talbodens und das Generelle Projekt Schächen. Bericht im Auftrag des Amtes für Tiefbau des Kantons Uri.

Scherrer AG (2006c): Hochwasserabflüsse am Kolbenhofbach. Bericht im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich.

Scherrer AG (2007): Hydrologische Überprüfung der Alarmwerte im Hinblick auf die Entwicklung eines Frühwarnsystems an der Saltina in Brig-Glis (VS). Bericht im Auftrag des Kantons Wallis; Dept. für Verkehr, Bau und Umwelt; Dienststelle für Strassen- und Flussbau

Scherrer AG (2008): Ergänzung der hydrologischen Grundlagen im oberen Gürbetal. Bericht im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern.

Scherrer AG, IHW (2004): Hochwasserschutz Dorfbach Schwarzenburg: Bereitstellung der hydrologischen Grundlagen und Überprüfung des Beckenkonzepts. Bericht im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern.

Scherrer, S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen. Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, Nr. 147.

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

VAW (1994): Die Grösse extremer Hochwasser der Saltina. Bericht im Auftrag des Krisenstabs Brig-Glis.

VAW (1994): Die massgebenden abflussbildenden Prozesse im Einzugsgebiet der Schüss und ihr Einfluss auf das 100jährige Hochwasser. Bericht im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern.

8. Anhang:

Anhang 1: Tabellen

Tab. 1: Übersicht über die ausgewerteten Einzugsgebiete.

Untersuchte Einzugsgebiete			
Autorenschaft	ETH: VAW, IHW, IfU	Scherrer AG	gemeinsame Projekte
Aach, Arbon (1997)		Lütschine, Gsteig (2011)	
Aare, Brugg (2008)		Lyssbach, Lyss (2003)	
Aare, Untersiggenthal (2008)		Marchbach, Oberwil (1999)	
Alp, Einsiedeln (1998)		Mattenbach, Winterthur (2009)	
Altbach, Bassersdorf (2005)		Melchaa, Sarnen (2006)	
Altbach, Kloten (2007)		Moosbach, Wenslingen (2002)	
Bezauerbach, Bezau (2002)		Mülibach, Schlieren (2009)	
Biltener Dorfbach (1995)		Mülibach, Schötz (2004)	
Birs, Basel (2008)		Muota, Brunnen (2000)	
Birsig, Oberwil, Binnigen (2000 + 2008)		Näfbach, Neftenbach (1993)	
Chatzenbach, Zürich (2004)		Rauss, Moutier (2009)	
Chimlibach, Schwerzenbach (2002)		Reppisch, Dietikon (2006)	
Chise, Kiesen (1999)		Reuss, Andermatt (1989 + 2007)	
Chise – Seitenbäche (2001)		Riedikerbach (2008)	
Chriesbach, Dübendorf (2006)		Ron, Root (1992)	
Dorenbach, Basel (2007)		Saltina, Brig (1994)	
Dorfbach, Zofingen (1994)		Saltina, Brig (2008)	
Eggigräben, Wengen (1999)		Sarner See (2006)	
Eibach, Gelterkinden (2001)		Schächen, Altdorf (2007)	
Ergolz, Ormalingen (2004)		Schäflibach, Urdorf (2006)	
Esche, Benden (2004)		Schüss, Biel (1994)	
Flaacherbach, Flaach (2006)		Schüss, Biel (2009)	
Flühbach, Bättwil (2001)		Schwamendinger Dorfbach (2006)	
Furtbach, Würenlos (2009)		Schwarzenburger Dorfbach (2004)	
Gangbach, Schattdorf (2003)		Seewadel, Gossau (2008)	
Glatt, Rheinsfelden (2002)		Seez, Mels (1990)	
Grebenbach, (2002)		Simmi, Werdenberger Binnenkanal (2004)	
Gürbe, Belp (1997)		Spitalerbach, Zürich (2006)	
Gürbe, Burgistein (1997 + 2008)		Stampach, Wilderswil (1999)	
Haselbach, Knonau (2007)		Steinibach, Giswil (1999)	
Hintere Frenke, Bubendorf (2006)		Thur, Andelfingen (1980)	
Holderbach, Affoltern (2004)		Thur, Andelfingen (2000)	
Hornbach, Horn (2001)		Tobelbach, Werdenberger Binnenkanal (2004)	
Kempt, Winterthur (2005)		Trame, Loveresse (2008)	
Kernmattbach, Kerns (2006)		Urtene, Bätterkinden (2008)	
Kleine Schliere, Alpnach (2009)		Valser Rhein (2000)	
Kolbenhofbach, Zürich (2006)		Vordere Frenke, Liestal (2006)	
Lago Maggiore (2003)		Worble, Ittigen (2006)	
Lauwitalbach, Schattdorf (2003)		Würibach, Birmensdorf (2005)	
Leugene, Lengnau (2009)		Wyna, Suhr (2003 + 2004)	
Limmat, Baden (2008)		Zullwiler Bach (1997)	
Lüssel, Brislach (2004)			

Tab. 2: Kennwerte der Einzugsgebiete, wie Fläche, grösster Hochwasserabfluss (HHQ), Auswertung historischer Hochwasser, Dauer vorhandener Abflussmessungen und zusätzliche Auswertungen (CoA: Abflusskoeffizienten, NAM: Niederschlag-Abfluss-Modellrechnungen vorhanden)

Name	Grösse [km ²]	HHQ [m ³ /s]	hhq [m ³ /s km ²]	HHQ-Jahr	Messung	Studie_ETH-SAG	hist. HW	CoA	NAM
Aach, Arbon	33.5					1997			
Aach-Salmsach, Hungerbühl	48.5	49	1.0	1968	1962 -				
Aare, Brugg	11726	1600	0.1	1852	1866 -	2008	800		
Aare, Untersiggenthal	17601	2800	0.2	1852	1934 -	2008	800		
Allenbach, Adelboden	28.8	75	2.6	1977	1950 -				
Alp, Einsiedeln	38	78	2.1	1993	1991 -	1998	100		
Alpenrhein	6123	3100	0.5	1927	1919 -	1998	800		
Altbach, Bassersdorf	14.4	17	1.2	1968	1977 -	2005	150		
Altbach, Kloten	36.6	23	0.6			2007	100		
Bezauerbach	3.5	15	4.3	1999		2002	100		
Biltener Dorfbach	4.7					1995	450		
Birs	183	90	0.5	1910	1912 -	2008	160		
Birsig	40.3	70	1.7	1968	1986 -	2000 + 2008	700		
Chatzenbach	14.1	8.5	0.6	1968		2004	40		
Chimlibach	12	12	1.0	1953		2002	100		
Chise	66.5	40	0.6	1977	1982 - 1994	1999	150		
Chise - Seitenbäche						2001			
Chriesbach	30.8	14	0.5	1999	1982 -	2006	100		
Dischma	43.3	19.1	0.4	1975	1964 -				
Dorenbach	6.4	3.5	0.5	1896 + 1991		2007	100		
Dorfbach, Zofingen						1994	40		
Eggigräben, Wengen	0.77	1.2	1.6	1981		1999	30		
Eibach	27.3	30	1.1	1917	1975 -	2001	150		
Emme, Eggwil	124	245	2.0	1997	1975 -				
Emme, Emmenmatt	443	510	1.2	1997	1918 -				
Emme, Wiler	939	663	0.7	2007	1922 -				
Engelberger Aa, Buochs	227	230	1.0	2005	1916 -				
Ergolz	28.9	24	0.8	1999	1976 -	2004	150		
Esche	25.7	7.4	0.3	2000	1996 -	2004	60		
Flaacherbach	22.4	23	1.0	1953		2006	165		
Flühbach	9.8	17	1.7	1968		2001	10		
Furtbach	42.1	28	0.7	1968	1977 -	2009	160		
Gangbach, Schattdorf	11.4	12.7	1.1	2002	1986 -	2003	130		
Glatt	418	120	0.3	1999	1976 -	2002	150		
Grebenbach	10.2	24	2.4	1999		2002	100		
Gürbe, Belp	124	92.5	0.7	1990	1922 -	1997 + 2008	400		
Gürbe, Burgistein	54				1981 -	1997 + 2008	400		
Haselbach	9	8.7	1.0	2005 + 1973	1953 -	2007	160		
Hintere Frenke, Bubendorf	38.5	100	2.6	1855	1975 -	2006	400		
Hinterrhein, Fürstenuau	1575	715	0.5	1981	1974 -				
Hinterrhein, Hinterhein	53.7	170	3.2	1987	1945 -				
Holderbach	1.7	2.5	1.5	1968		2004	40		
Hornbach	6.5	16	2.5	1977		2001	60		
Kander, Honrich	496	273	0.6	2005	1903 -				
Kempt, Winterthur	62.7	65	1.0	1999 (<1975)	1968 -	2005	160		
Kernmattbach	12.7	22	1.7	2005		2006	225		
Kleine Schliere, Alpnach	21.4	80	3.7	2005	1979 -	2009	180		
Kolbenhofbach	0.6	3	5.0			2006	45		
Lago Maggiore		200.23		1868	1869 -	2003	800		
Langeten, Huttwil	59.9	78	1.3	2007	1966 -				
Lauwitabach, Schattdorf	1.8			1933		2003	130		
Leugene	26.2	6	0.2	2007		2009	20		
Limmat, Baden	2396	860	0.4	1846	1904 -	2008			
Lüssel	53.7	70	1.3	1973 + 1924	1979 -	2004	175		
Lütschine	379	254	0.7	2005	1920 -				
Lyssbach	52	26	0.5	2001	1991 -	2003	50		
Marchbach, Oberwil	24.7	13.5	0.5	1994	1979 -	1999	80		
Mattenbach, Winterthur	11	29	2.6	1954		2009	160		
Melchaa	72.5	130	1.8	2005		2006	200		
Minster	59.2	217	3.7	2007	1961 -				
Mosbach, Wenslingen	2.1	9	4.3	2000		2002	100		
Mölibach, Schlieren	2	2.5	1.3	1999 + 3		2009	70		
Mölibach, Schötz	7.7			1972		2004	70		
Muota	316	330	1.0	1977	1923 -	2000	400		
Näfbach, Neftenbach	34.5	21.8	0.6	1994	1991 -	1993	80		
Rauss, Moutier	41.7	32	0.8	2007	1996 -	2009	140		
Reppisch	68.1	100	1.5	1972	1947 -	2006	160		
Reuss, Adermatt	192	340	1.8	1987	1910 -	1989 + 2007	500		
Riedikerbach	9.3	8	0.9	1953 + 1999	1976 - 1985	2008	50		
Ron, Root	16.4	35	2.1	1988		1992	80		
Saltina, Brig	78.2	125	1.6	2000	1966 -	1994 + 2008	350		

Tab. 2 (Forts.): Kennwerte der Einzugsgebiete, wie Fläche, grösster Hochwasserabfluss (HHQ), Auswertung historischer Hochwasser, Dauer vorhandener Abflussmessungen und zusätzliche Auswertungen (CoA: Abflusskoeffizienten, NAM: Niederschlag-Abfluss-Modellrechnungen vorhanden)

Name	Grösse [km ²]	HHQ [m ³ /s]	hhq [m ³ /s km ²]	HHQ-Jahr	Messung	Studie ETH-SAG	hist. HW	CoA	NAM
Sarner See	268.9			2005	1902 -	2006	250	j	
Schächen	108.5	150	1.4	1910	1912 -	2007	700	j	j
Schäflibach	12	28	2.3	1948		2006	125	j	j
Schüss, Biel	213	95	0.4		1961 -	1994 + 2009	145	zT	zT
Schwamendinger Dorfbach	1.7	4	2.4	1953 + 1999		2006	50	j	j
Schwarzenburg, Dorfbach	11	60	5.5	1985	1996 -	2004	300	j	j
Seewadel, Gossau	0.62					2008		j	j
Seez, Mels	105	110	1.0	1922	1965 -	1990	100		
Sense, Thörishaus	352	495	1.4	1990	1928 -				
Simmi	23	105	4.6	1918		2004	100	j	j
Spitalerbach, Zürich	0.54	0.33	0.6	1972		2006	80		
Stampach	1.4	3	2.1	1987		1999	80	j	j
Steinibach, Giswil	12					1999	100	j	j
Thur, Andelfingen	1696	1600	0.9	1876	1904 -	1980 + 2000	160		
Tobelbach	13.6	46	3.4	1970		2004	70	j	j
Trame, Loveresse	34.5	19	0.6	2007		2008	30		
Urtene	92.9	20	0.2	1980 + 2007	1985 - 2006	2008	50	j	j
Valsler Rhein	129	300	2.3	1868	1929 - 1980	2000	200		
Vordere Frenke	88.6	110	1.2	1830	1931-64, 1975 -	2006	400	j	j
Worble, Ittigen	68.4	30	0.4	1990	1989 -	2006	35	j	j
Würibach, Birmensdorf	14.9	20	1.3	1999		2005	80	j	j
Wyna	120	44	0.4	1999	1980 -	2003 + 2004	250		
Zulwil	3.3	6	1.8	1982		1997	80	j	j

Tab. 3: Flächenanteile der sich aus der Kartierung ergebenden Prozessflächen.

Name	Abflussreaktion: Flächenanteile [%]		
	rasch - leicht verzögert	verzögert	stark - sehr stark verzögert
Aach, Arbon			
Aach-Salmsach, Hungerbühl			
Aare, Brugg			
Aare, Untersiggenthal			
Allenbach, Adelboden	28	24	43
Alp, Einsiedeln	44	32	24
Alpenrhein			
Altbach, Bassersdorf	11.5	37.8	50.7
Altbach, Kloten	12.7	33.9	53.4
Bezauerbach	16.4	33.1	50.4
Biltener Dorfbach	10	18	72
Birs			
Birsig	13.2	42.1	44.7
Chatzenbach	14.8	27.4	57.9
Chimlibach	6	22.9	71.1
Chise	3.5	15	81.5
Chise - Seitenbäche			
Chriesbach	4	22.7	75.4
Dischma			
Dorenbach	10.2	32	57.8
Dorfbach, Zofingen			
Eggigräben, Wengen	51.9	30.8	17.3
Eibach	14	32.9	53.1
Emme, Eggiwil			
Emme, Emmenmatt			
Emme, Wiler			
Engelberger Aa, Buochs			
Ergolz	12.5	31	51.5
Esche	5.9	14.9	79.3
Flaacherbach	6.8	21.6	71.6
Flühbach	10.8	27.5	61.8
Furtbach	6.3	11.4	82.3
Gangbach, Schattdorf	10	18	72
Glatt	2.3	37.8	59.9
Greibenbach			
Gürbe, Belp	17	17	66
Gürbe, Burgistein			
Haselbach	12.5	25.8	61.8
Hintere Frenke, Bubendorf	9.2	32.8	58.1
Hinterrhein, Fürstenu			
Hinterrhein, Hinterrhein			
Holderbach	10.7	43	46.3
Hornbach	20	50	30
Kander, Honrich			
Kempt, Winterthur	15	35.4	49.6
Kernmattbach	12.3	26.6	61.2
Kleine Schliere, Alpnach	24.1	37.1	35.3
Kolbenhofbach	32	37	36
Lago Maggiore			
Langeten, Huttwil			
Lauwitalbach, Schattdorf	16.2	17.2	66.7

Leugene			
Limmat, Baden			
Lüssel	11.9	34.8	53.3
Lütschine	18	20	62
Lyssbach	13	29	58
Marchbach, Oberwil	22	33	45
Mattenbach, Winterthur	10.7	42.9	46.4
Melchaa	15.1	25.9	59
Minster	41	22	37
Mosbach, Wenslingen			
Mülibach, Schlieren	9.3	20	70.7
Mülibach, Schötz	11.8	27.6	60.6
Muota	12.8	11.1	76.1
Näfbach, Neftenbach			
Rauss, Moutier	10.3	17.2	72.6
Reppisch	17.4	41.3	41.3
Reuss, Andermatt	32.8	28.2	39
Riedikerbach	13.9	29.7	56.4
Ron, Root			
Saltina, Brig	27.6	25.7	46.7
Sarner See	18.8	32.9	32.1
Schächen	16.3	26.2	57.5
Schäflibach	11.7	42.5	45.7
Schüss, Biel	24	36	40
Schwamendinger Dorfbach	7.7	25.3	67
Schwarzenburg, Dorfbach	8.6	16.1	75.3
Seewadel, Gossau	21.9	13.3	64.8
Seez, Mels			
Sense, Thörishaus			
Simmi, Werdenberger Binnenka	24	51	25
Spitalerbach, Zürich	14.4	48.2	37.4
Stampach	9	15	76
Steinibach, Giswil	23	23	54
Thur, Andelfingen			
Tobelbach, Werdenberger Binn	14	15	71
Trame, Loveresse			
Urtene	4.3	19.8	65.8
Valser Rhein			
Vordere Frenke	9.8	33.2	57
Worble, Ittigen	4.9	20.5	74.6
Würibach, Birmensdorf	14	39.2	46.9
Wyna			
Zullwil	17	66	17

Tab. 4: Ergebnisse der statistischen Auswertungen unter Berücksichtigung der historischen Hochwasser in Form des 30, 100 und 300jährigen Hochwassers (HQx), sowie der spezifischen Hochwasser (hqx = HQx / EZG - Fläche)

Name	Charakterisierung Frequenzanalyse	Ergebnisse [m ³ /s]			Ergebnisse [m ³ /s km ²]		
		HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	hq ₃₀	hq ₁₀₀	hq ₃₀₀
Aach, Arbon	linear		50			1.5	
Aach-Salmsach, Hungerbühl	Ausreisser	39	49	59	0.8	1.0	1.2
Aare, Brugg	linear		1450			0.1	
Aare, Untersiggenthal	Knick		2800	3075		0.2	0.2
Allenbach, Adelboden	linear	59	81	105	2.0	2.8	3.6
Alp, Einsiedeln	Knick		130			3.4	
Alpenrhein	linear						
Altbach, Bassersdorf	linear - Knick	15	22	35	1.0	1.5	2.4
Altbach, Kloten	linear	35	49	72	1.0	1.3	2.0
Bezauerbach	Knick	10	16		2.9	4.6	
Biltener Dorfbach			46			9.8	
Birs	linear	65	85	105	0.4	0.5	0.6
Birsig	linear	25	38		0.6	0.9	
Chatzenbach	linear	8	12	16	0.6	0.9	1.1
Chimlibach	linear		13			1.1	
Chise	linear		23			0.3	
Chise - Seitenbäche							
Chriesbach	linear - Knick	16	24	33	0.5	0.8	1.1
Dischma	Plateau	18	20	22	0.4	0.5	0.5
Dorenbach	linear	3.3	4.5	5.8	0.5	0.7	0.9
Dorfbach, Zofingen			11				
Eggigräben, Wengen			6.2			8.1	
Eibach	Treppe		35	47		1.3	1.7
Emme, Eggwil	Ausreisser	195	247	302	1.6	2.0	2.4
Emme, Emmenmatt	linear-Plateau	435	564	701	1.0	1.3	1.6
Emme, Wiler	linear-Knick	512	597	673	0.5	0.6	0.7
Engelberger Aa, Buochs	Ausreisser	136	168	201	0.6	0.7	0.9
Ergolz	linear	10	15	20	0.3	0.5	0.7
Esche	linear	16	20	25	0.6	0.8	1.0
Flaacherbach	linear	20	28	36	0.9	1.3	1.6
Flühbach		8	9.5	14	0.8	1.0	1.4
Furtbach	linear	21	30	47	0.5	0.7	1.1
Gangbach, Schattdorf	Knick	16	23	30	1.4	2.0	2.6
Glatt	Knick	130	170	240	0.3	0.4	0.6
Grebenbach	Knick	21	30		2.1	2.9	
Gürbe, Belp	linear		67			0.5	
Gürbe, Burgstein	Ausreisser		90			1.7	
Haselbach	linear	9	17	26	1.0	1.9	2.9
Hintere Frenke, Bubendorf	Knick	28	39	60	0.7	1.0	1.6
Hinterrhein, Fürstenuau	Plateau	720	843	953	0.5	0.5	0.6
Hinterrhein, Hinterrhein	linear	140	167	191	2.6	3.1	3.6
Holderbach	linear	2.5	4	5.5	1.5	2.4	3.2
Hombach		16	24	32	2.5	3.7	4.9
Kander, Honrich	Ausreisser	192	221	300	0.4	0.4	0.6
Kempt, Winterthur	linear - Knick	65	90	110	1.0	1.4	1.8
Kernmattbach	linear	15	22	28	1.2	1.7	2.2
Kleine Schliere, Alpnach	Knick	60	90	140	2.8	4.2	6.5
Kolbenhofbach	linear	2	4	6	3.3	6.7	10.0
Lago Maggiore	Knick						
Langeten, Huttwil	Knick	51	73	100	0.9	1.2	1.7
Lauwitalbach, Schattdorf	linear	2.5	3.5	4.5	1.4	1.9	2.5
Leugene		9.5	13	18	0.4	0.5	0.7
Limmat, Baden	Knick		735			0.3	
Lüssel	Knick	50	80	128	0.9	1.5	2.4
Lütschine	Ausreisser						
Lyssbach	Knick	27	30		0.5	0.6	
Marchbach, Oberwil	linear		18			0.7	
Mattenbach, Winterthur	linear	16	26.5	40.5	1.5	2.4	3.7

Tab. 4 (Forts.): Ergebnisse der statistischen Auswertungen unter Berücksichtigung der historischen Hochwasser in Form des 30, 100 und 300jährigen Hochwassers (HQx), sowie der spezifischen Hochwasser (hqx = HQx / EZG)

Name	Charakterisierung Frequenzanalyse	Ergebnisse [m ³ /s]			Ergebnisse [m ³ /s km ²]		
		HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	hq ₃₀	hq ₁₀₀	hq ₃₀₀
Melchaa	linear	100	140	170	1.4	1.9	2.3
Minster	linear						
Mosbach, Wenslingen	linear	6	10	13	2.9	4.8	6.2
Mülbach, Schlieren	linear	2.5	4	5.5	1.3	2.0	2.8
Mülbach, Schötz	linear	2.1	2.5	2.8	0.3	0.3	0.4
Muota	linear - Plateau		350	420		1.1	1.3
Näfbach, Neftenbach	linear		35			1.0	
Rauss, Moutier	Knick	27	40	70	0.6	1.0	1.7
Reppisch	linear	85	120	160	1.2	1.8	2.3
Reuss, Andermatt	Knick		260			1.4	
Riedikerbach	Knick	8	14	22	0.9	1.5	2.4
Ron, Root			37			2.3	
Saltina, Brig	Ausreisser		120			1.5	
Sarner See	Ausreisser						
Schächen	Knick	105	150	190	1.0	1.4	1.8
Schäftlibach	linear	14	24	44	1.2	2.0	3.7
Schüss, Biel	Plateau	85	105	130	0.4	0.5	0.6
Schwamendinger Dorfbach	linear	3	4.5	6.5	1.8	2.6	3.8
Schwarzenburger Dorfbach	Ausreisser	15	30	60	1.4	2.7	5.5
Seewadel, Gossau	linear		1.6			2.6	
Seez, Mels	linear		130			1.2	
Sense, Thörishaus	Ausreisser	311	395	482	0.9	1.1	1.4
Simmi	linear	63	85	125	2.7	3.7	5.4
Spitalerbach, Zürich	linear	0.8	2	3	1.5	3.7	5.6
Stampach							
Steinibach, Giswil			39			3.3	
Thur, Andelfingen	Treppe	1200	1450	2000	0.7	0.9	1.2
Tobelbach	linear	27	40	70	2.0	2.9	5.1
Trame, Loveresse		20	25	30	0.6	0.7	0.9
Urtene	Treppe	20	26	31	0.2	0.3	0.3
Valser Rhein	linear		300			2.3	
Vordere Frenke	Knick	43	65	90	0.5	0.7	1.0
Worble, Ittigen	linear - Knick	31	42	62	0.5	0.6	0.9
Würibach, Birmensdorf	linear	17	25	33	1.1	1.7	2.2
Wyna	linear		55			0.5	
Zullwil		6	9		1.8	2.7	

Anhang 2: Informationen auf den Kennblättern für Einzugsgebiete (Muster)

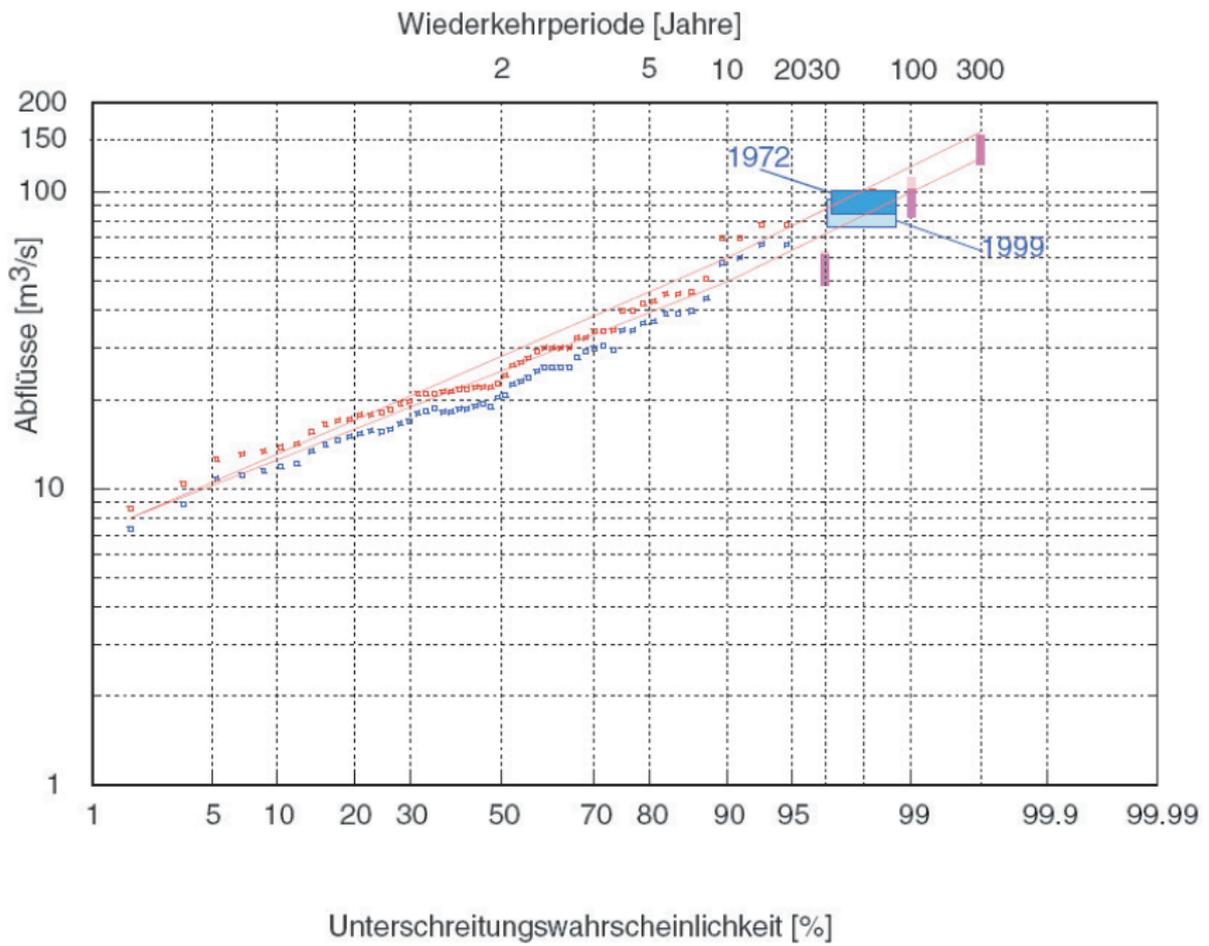
Name des Gewässers, bzw. des Pegels					
Frequenz – Typ	Im Frequenzdiagramm werden Abflusswerte bestimmten Jährlichkeiten zugeordnet. Der Verlauf dieser Kurve wird charakterisiert durch die Einteilung in folgende Frequenztypen: Ausreisser, Knick, Treppe, linear, Plateau				
EZG [km ²]	Fläche des Einzugsgebiets				
Messungen	Name der Pegelstation	Besitzer, Betreuer	Messdauer	EZG - Grösse	Bewertung
HHQ am Pegel	grösster gemessener Abfluss		zweitgrösster gemessener Abfluss		
hhq am Pegel	grösste gemessene Abflussspende		zweitgrösste gemessene Abflussspende		
DRP 1+2 / 3 / 4+5 [%] Dominant Runoff Process natürliche Abflusstypen	Flächenanteil mit rascher – leicht verzögerter Abflussreaktion	Flächenanteil mit verzögerter Abflussreaktion		Flächenanteil mit stark – sehr stark verzögerter Abflussreaktion	
DRP S1 / S2 / S3 [%] Dominant Runoff Process Siedlungs - Abflusstypen	Siedlungs - Flächenanteil mit rascher – leicht verzögerter Abflussreaktion	Siedlungs - Flächenanteil mit verzögerter Abflussreaktion		Siedlungs - Flächenanteil mit stark – sehr stark verzögerter Abflussreaktion	
historische Hochwasser	Zeitraum mit detaillierten (weniger detaillierten) Angaben zu Hochwasserereignissen				
	Bewertung der Erkundung historischer Hochwasser				
	grösster beobachteter Abfluss				
	kritische Niederschlagssituationen, bei denen Hochwasser auftraten				
Studie	Zeitpunkt der Fertigstellung einer Studie durch ETH bzw. Scherrer AG				
Modellrechnungen	Einsatz eines Niederschlag – Abfluss – Modells (NAM), Eichung bzw. Überprüfung mit gemessenen oder abgeschätzten Hochwasserwerten				
HQ ₃₀ / HQ ₁₀₀ / HQ ₃₀₀ [m ³ /s]	Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten als Ergebnis der Synthese aus der Beurteilung der Abflussreaktion, den Ergebnissen der Erkundung von historischen Hochwassern sowie den Modellrechnungen mit unterschiedlichsten Niederschlagsszenarien				
hq ₃₀ / hq ₁₀₀ / hq ₃₀₀ [m ³ /km ² *s]					
Besonderheiten	Bestehende oder geplante Rückhaltebecken (RHB), sonstige Besonderheiten				

Anhang 3: Kennblatt Reppisch.

Reppisch, Dietikon			
Frequenz – Typ	linear		
EZG [km ²]	68.1 km ²		
Messungen, Pegel	Eigentümer	Messdauer	Einzugsgebiet
Reppisch Dietikon	Kanton Zürich	16.8.1947 - 1983	67.9 km ²
	Kanton Zürich	17.10.1985 -	68.1 km ²
Reppisch Birmensdorf	Kanton Zürich	6.10.1929 - 1959	24.2 km ²
	Kanton Zürich	17.12.1957 -	24.2 km ²
Reppisch Türlerse-Abfluss Aeugst	Kanton Zürich	1.1.1983 -	5.9 km ²
HHQ am Pegel Dietikon	86 - 100 m ³ /s, 20.7.1972		78 - 93 m ³ /s, 12.5.1999
hhq am Pegel Dietikon	1.3 – 1.5 m ³ /km ² *s		1.1 – 1.4 m ³ /km ² *s
HHQ am Pegel Birmensdorf	33 m ³ /s, 19.5.1994		21 m ³ /s, 12.5.1999
hhq am Pegel Birmensdorf	1.4 m ³ /km ² *s		0.9 m ³ /km ² *s
DRP 1+2 / 3 / 4+5 [%]	17.4	41.3	41.3
hist. HW	160 Jahre		
	ergiebig		
	HHQ _{hist} = 3.-4.6.1878		
	Dauerregen oder Gewitter im Unterlauf		
Studie	Dezember 2006		
Modellrechnungen	vorhanden, Eichung an drei gemessenen Ereignissen		
HQ ₃₀ / HQ ₁₀₀ / HQ ₃₀₀ [m ³ /s]	70 - 85	100 - 120	130 - 160
hq ₃₀ / hq ₁₀₀ / hq ₃₀₀ [m ³ /km ² *s]	1.0 – 1.3	1.5 – 1.8	1.9 – 2.4

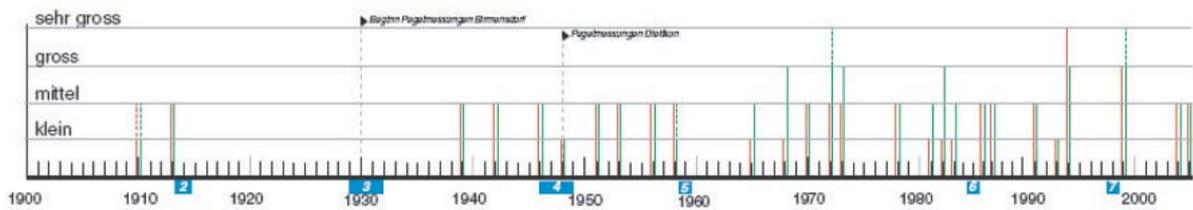
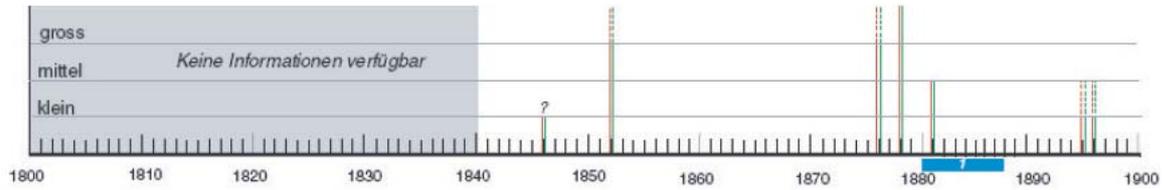
Reppisch

Frequenzdiagramm

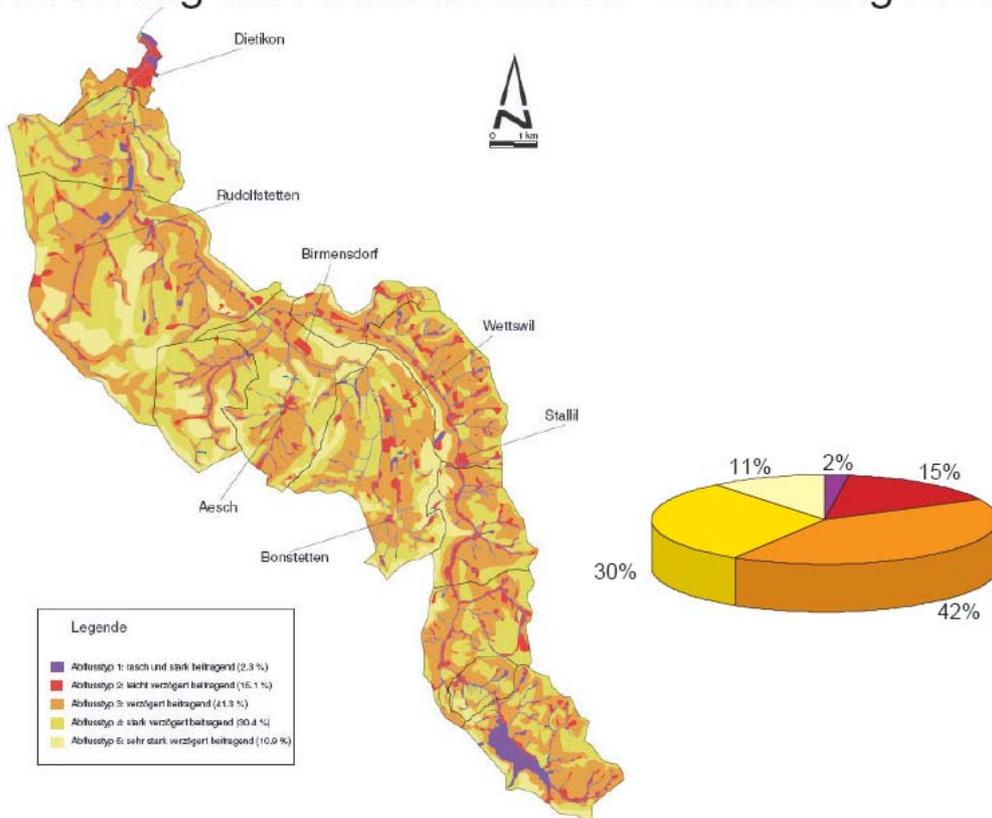


Reppisch

Historische Hochwasserereignisse

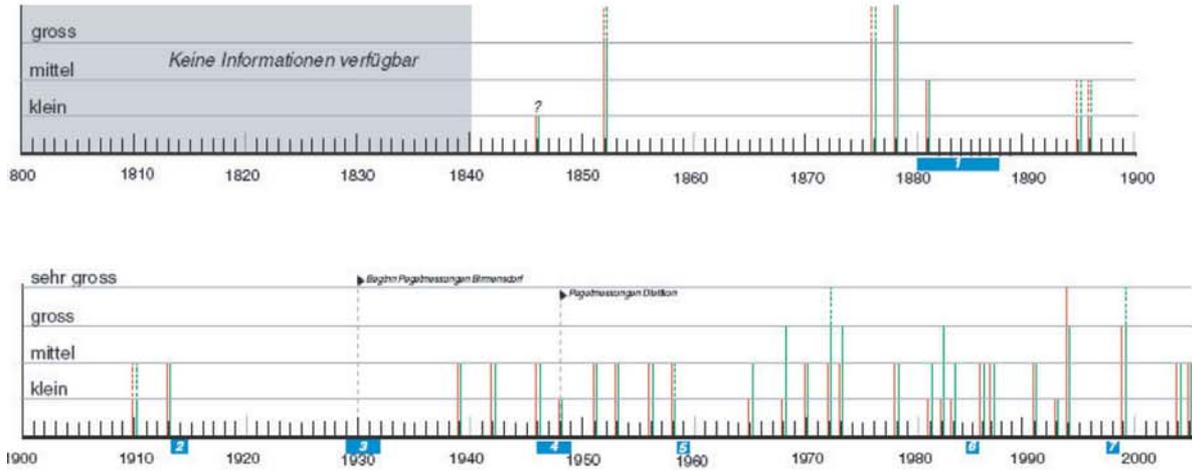


Kartierung der Abflussreaktion / Contributing Areas (CoA)

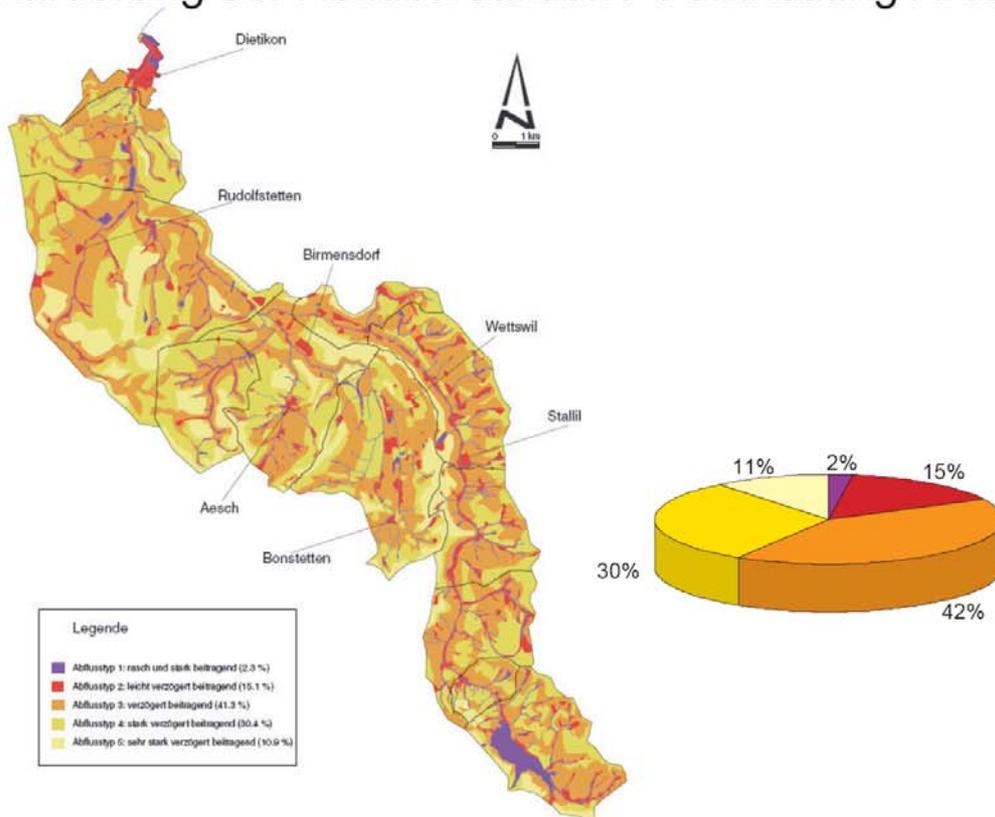


Reppisch

Historische Hochwasserereignisse



Kartierung der Abflussreaktion / Contributing Areas (CoA)

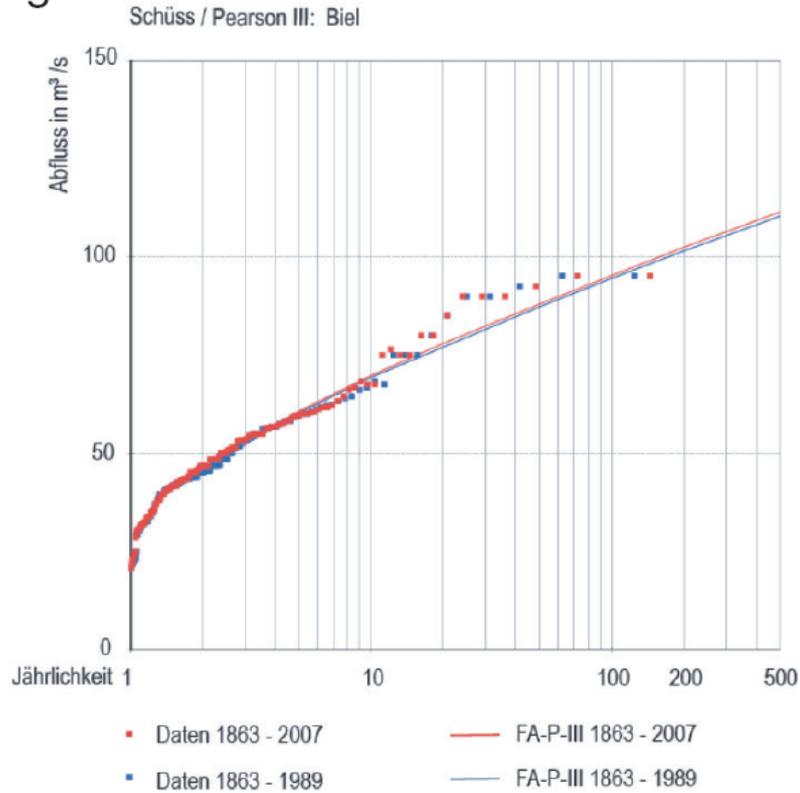


Anhang 4: Kennblatt Schüss, Biel.

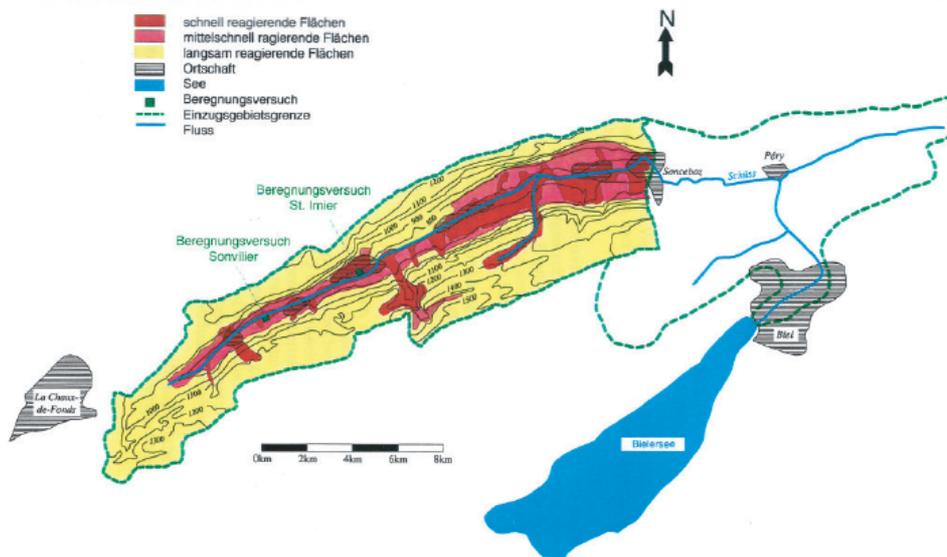
Schüss, Biel					
Frequenz – Typ	Plateau				
EZG [km ²]	213 km ²				
Messungen, Pegel	Sonceboz	BAFU	1961 –	130 km ²	überprüft
	Pery	BAFU	1976 -	176 km ²	überprüft, Rückstau
	Biel	BAFU	1999 -	213 km ²	überprüft
HHQ am Pegel Biel	73.8 m ³ /s, 09.08.2007		57.7 m ³ /s, 26.10.2004		
hhq am Pegel Biel	0.35 m ³ /km ² *s		0.27 m ³ /km ² *s		
DRP bis Sonceboz A / B / C [%]	24.1	37.1	35.3		
historische Hochwasser	145 Jahre				
	ergiebig				
	HHQ _{hist} = 90 - 95 m ³ /s, 1882, 1896, 1899, 1910, 1955, 1990, 1991, 1999, 2007				
	fast ausschliesslich Winterereignisse mit Dauerregen und Schneeschmelze, nie Gewitter				
Studie	Juni 1994, aktualisiert Februar 2009				
Modellrechnungen	vorhanden bis Sonceboz (Studie 1994), aufwändige Eichung an 8 Ereignissen, viele Szenarien (u.a. mit Schneeschmelze und Frost)				
HQ ₃₀ / HQ ₁₀₀ / HQ ₃₀₀ [m ³ /s]	80 - 90	100 - 110	110 - 150		
hq ₃₀ / hq ₁₀₀ / hq ₃₀₀ [m ³ /km ² *s]	0.38 – 0.42	0.47 – 0.52	0.52 – 0.70		
Besonderheiten	HW >> HHQ _{hist} möglich, Einfluss von Karst, Schneeschmelze und Frost				

Schüss, Biel

Frequenzdiagramm



Kartierung der Abflussreaktion / Contributing Areas (CoA)

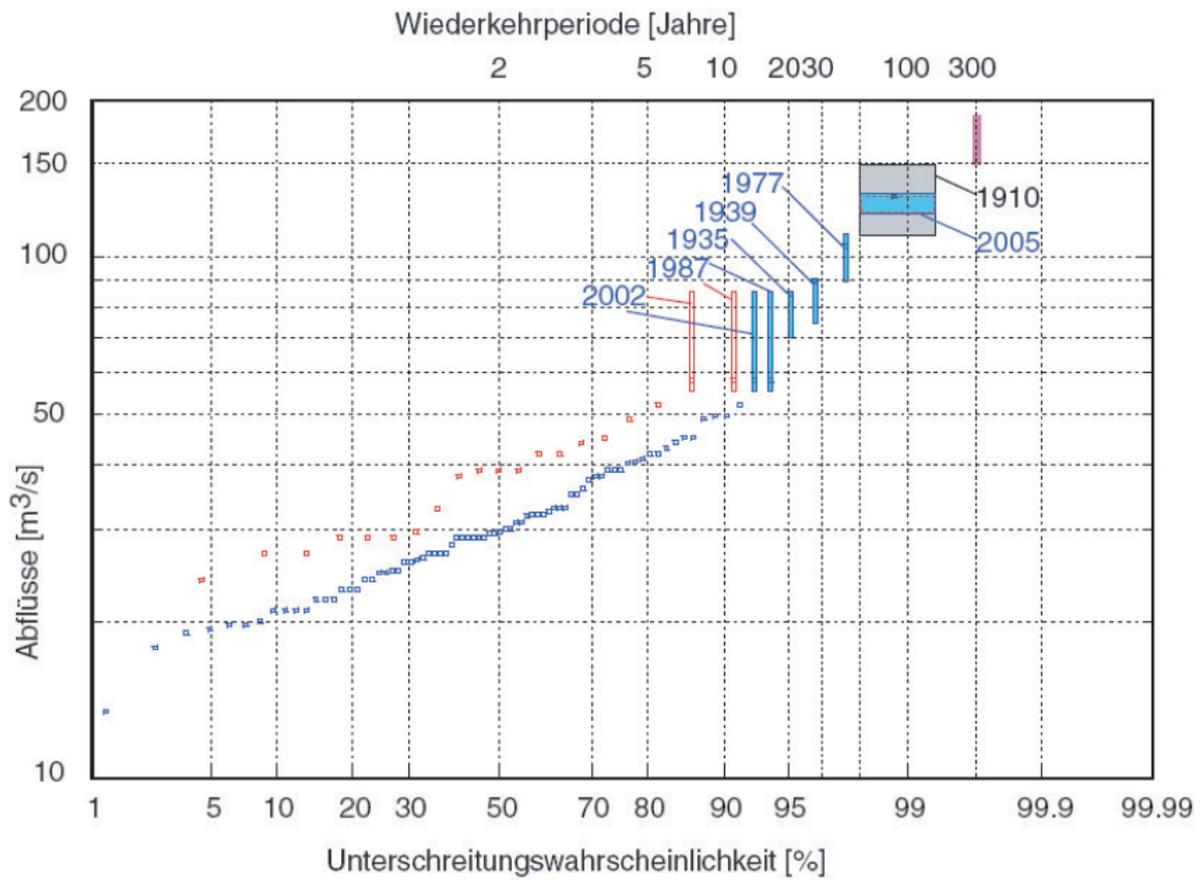


Anhang 5: Kennblatt Schächen.

Schächen			
Frequenz – Typ	Knick		
EZG [km ²]	108.5 km ²		
Messungen, Pegel	Messdauer	Einzugsgebiet	
Schächen, Altdorf, Schächenbrücke	1912 - 1921	108.5 km ²	
Schächen, Altdorf, 65 m unterhalb Schächenbrücke	1926 - 1930	108.5 km ²	
Schächen, Bürglen, oberhalb Brügg, 695'100 / 192'570	1930 - 1984	93.8 km ²	
Schächen, Unterschächen, unterhalb Einmündung Hinter Schächen	1970 - 2003	57.8 km ²	
Schächen, Bürglen, Galgenwäldli, 40 m oberhalb Schächenbrücke	1985 -	108.5 km ²	
Schächen, Bürglen, Schächenbrücke (Radar)	2004 -	108.5 km ²	
HHQ am Pegel Galgenwäldli	120 – 130 m ³ /s, 23.8.2005	90 - 110 m ³ /s, 31.7.1977	
hhq am Pegel Galgenwäldli	1.1 – 1.2 m ³ /km ² *s	0.83 – 1.0 m ³ /km ² *s	
DRP 1+2 / 3 / 4+5 [%]	16.3	26.2	57.5
historische Hochwasser	700 Jahre		
	ergiebig		
	HHQ _{hist} = 110 – 150 m ³ /s, 15.6.1910		
	Dauerregen > 100 mm		
Studie	November 2007		
Modellrechnungen	vorhanden, Eichung an drei gemessenen Ereignissen		
HQ ₃₀ / HQ ₁₀₀ / HQ ₃₀₀ [m ³ /s]	85 - 105	120 - 150	150 - 190
hq ₃₀ / hq ₁₀₀ / hq ₃₀₀ [m ³ /km ² *s]	0.8 – 1.0	1.1 – 1.4	1.4 – 1.8
Besonderheiten	grosse unbekannte Speicher, die im NFP61 – Projekt näher untersucht werden		

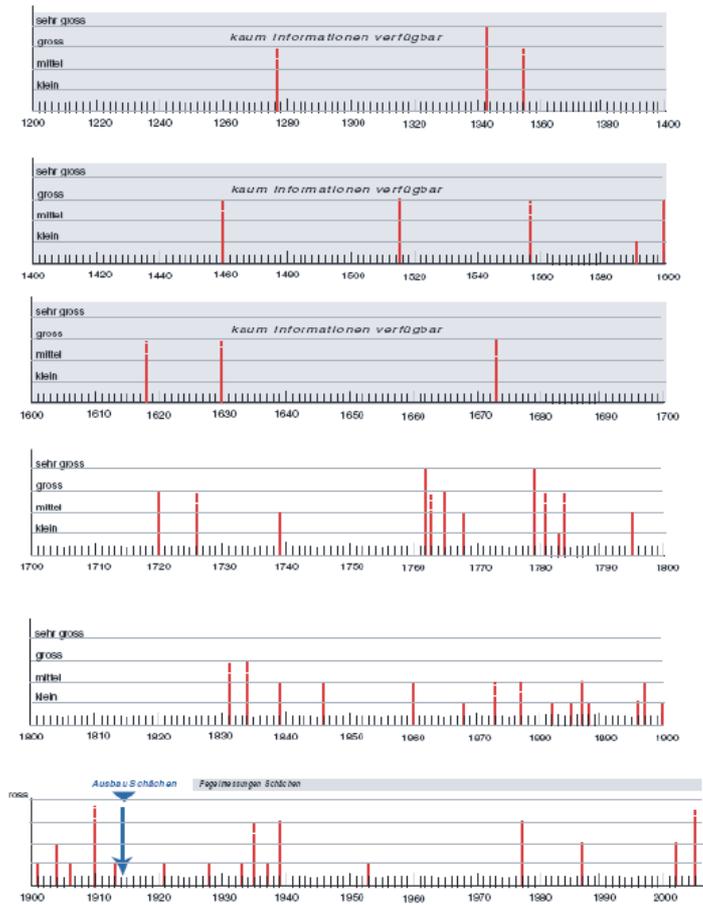
Schächen

Frequenzdiagramm



Schächen

Historische Hochwasserereignisse



Kartierung der Abflussreaktion / Contributing Areas (CoA)

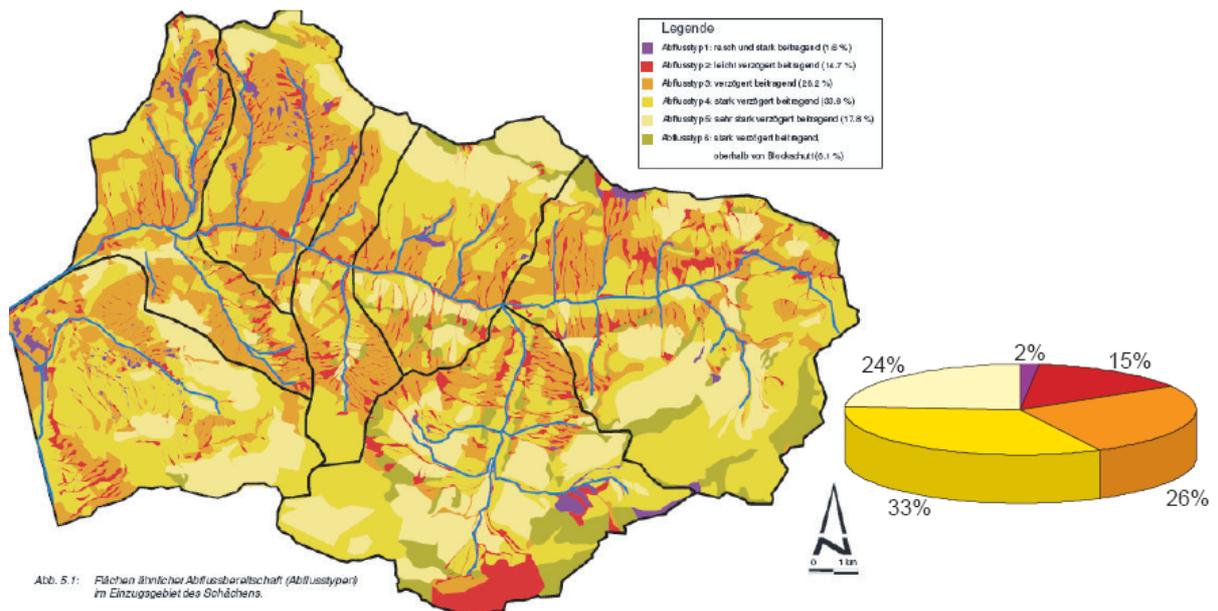


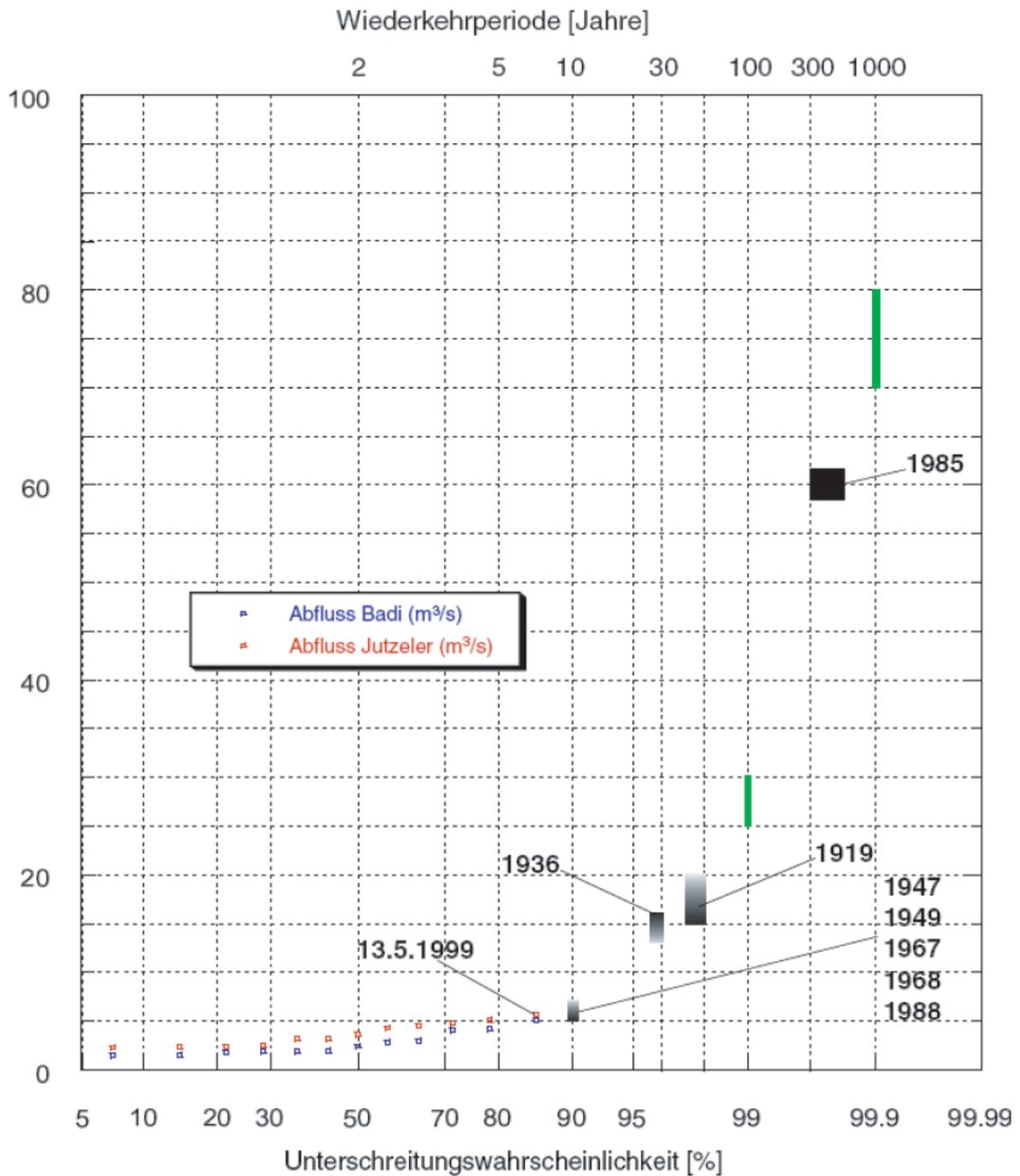
Abb. 5.1: Flächen ähnlicher Abflussreaktion (Abflusstypen) im Einzugsgebiet des Schächens.

Anhang 6: Schwarzenburger Dorfbach.

Schwarzenburger Dorfbach			
Frequenz – Typ	Ausreisser		
EZG [km ²]	11.0 km ²		
Messungen, Pegel	Messdauer	Messintervall	Einzugs- gebietsfläche
Schwarzenburger Dorfbach / Badi	19.12.1996 – 4.5.1999 4.5.1999 – 28.10.2001 25.9.2002 -	0.25h-Werte 0.5h-Werte 0.5h-Werte	11.0 km ²
Schwarzenburger Dorfbach / Jutzeler	12.12.1996 – 8.4.1999 8.4.1999 – 25.9.2002	0.25h-Werte 0.5h-Werte	13.5 km ²
HHQ am Pegel Badi / Jutzeler	5.2 m ³ /s, 13.5.1999	5.7 m ³ /s, 13.5.1999	
hhq am Pegel Badi / Jutzeler	0.47 m ³ /km ² *s	0.42 m ³ /km ² *s	
DRP 1+2 / 3 / 4+5 [%]	8.6	16.1	75.3
hist. HW	300 Jahre		
	ergiebig		
	HHQ _{hist} = 60 m ³ /s, 4.7.1985, 21.6.1697 15 – 20 m ³ /s 8.4.1919 13 – 16 m ³ /s 10.5.1936		
	Gewitter mit hohen Intensitäten		
Studie	Mai 2004		
Modellrechnungen	vorhanden, Eichung an drei abgeschätzten Ereignissen		
HQ ₃₀ / HQ ₁₀₀ / HQ ₃₀₀ [m ³ /s]	12 - 15	25 - 30	55 - 60
hq ₃₀ / hq ₁₀₀ / hq ₃₀₀ [m ³ /km ² *s]	1.1 – 1.4	2.3 – 2.7	5.0 – 5.5
Besonderheiten	Beim Ereignis am 4.7.1985 traten während 20 min. sehr hohe Niederschlagsintensitäten von ca. 200 mm/h auf.		

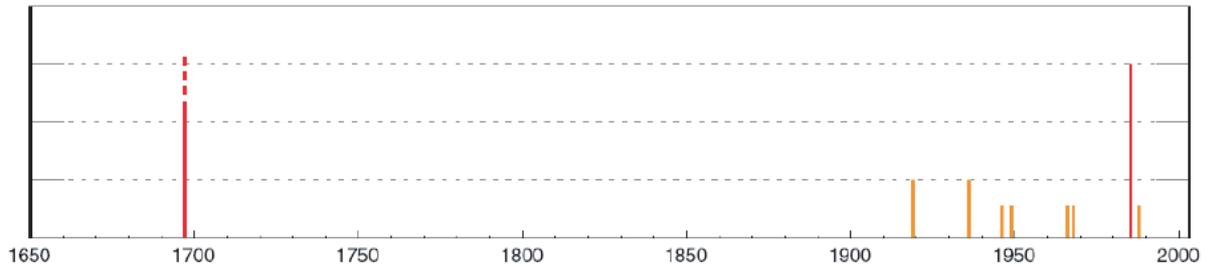
Schwarzenburger Dorfbach

Frequenzdiagramm



Schwarzenburger Dorfbach

Historische Hochwasserereignisse



Kartierung der Abflussreaktion / Contributing Areas (CoA)

