

## Szenarien für die extremen Hochwasser des Rheins bei Basel



*Das Hochwasser am Rhein bei Basel vom 12./13. Mai 1999, Foto: Dominique Hinden*

**Auftraggeber:**  
**Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG)**

Bericht: 03/38

Reinach, September 2004

Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Einleitung und Problemstellung</i></b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b><i>Analyse vergangener Hochwasser</i></b> .....	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Entstehung der Hochwasser von 1978, 1994 und 1999</b> .....	<b>6</b>
2.2.1	Niederschlag.....	6
2.2.2	Verlauf der Hochwasser.....	6
2.2.3	Fliesszeiten.....	6
2.2.4	Beitrag der Teil-Einzugsgebiete an der Hochwasserspitze des Rheins bei Rheinfelden.....	7
2.2.5	Die Rolle der Seen bei grossen Hochwassern am Beispiel von Bodensee und Bielersee.....	7
2.2.6	Wertung der Hochwassersituationen.....	8
<b>3</b>	<b><i>Hochwasserstatistik am Rhein und an den wichtigsten Seitengewässern</i></b> .....	<b>10</b>
<b>4</b>	<b><i>Szenarien</i></b> .....	<b>11</b>
<b>4.1</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>11</b>
<b>4.2</b>	<b>Szenarien</b> .....	<b>12</b>
4.2.1	Ergebnisse der Szenarienrechnungen.....	13
4.2.2	Zusammenfassende Beurteilung.....	14
<b>5</b>	<b><i>Verwendete Unterlagen</i></b> .....	<b>15</b>
<b>6</b>	<b><i>Graphiken</i></b> .....	<b>16</b>

# 1 Einleitung und Problemstellung

Der Rhein bei Basel hat eine Einzugsgebietsfläche von 35'921 km<sup>2</sup>. Die Aare entwässert bei der Mündung in den Rhein ein Gebiet von 17'779 km<sup>2</sup>. Das Einzugsgebiet des Alpenrheins (oberhalb des Bodensees) beträgt 6'119 km<sup>2</sup>. Abbildung 1.1 zeigt die wichtigsten Teil-einzugsgebiete und die für die Untersuchung verwendeten Abflussmessstationen.

Die Hochwasser am Rhein werden durch die Alpenrandseen und Jurarandseen (Bieler-, Murten- und Neuenburgersee) wesentlich gedämpft (Kap. 2.2.5). Vor der ersten Juragewässerkorrektur (JGK I: 1868 - 1887) floss die Aare an den Jurarandseen vorbei. Ihre Hochwasser trafen damals ungedämpft mit denen der übrigen Zubringer des Rheins zusammen. Seit der JGK I Ende des 19. Jahrhunderts gelangt die Aare in den Bielersee<sup>1</sup>. Bei Hochwasser funktioniert das System Bielersee-Neuenburger-Murtensee als grosses Ausgleichsbecken. Am Bielersee, am Zürichsee und am Vierwaldstättersee besteht die Möglichkeit, den Ausfluss zu regulieren und damit den Abfluss zu drosseln. Der Bodensee besitzt nach wie vor keine Regulierungsvorrichtung.

Seit der JGK I hat die Aare ein geändertes Abflussregime, das sich bei den jährlichen Hochwassern am Rhein bei Basel zeigt (Abb. 1.2). Seit der Korrektur treten Hochwasser im Bereich von etwa 4'000 m<sup>3</sup>/s und grösser weniger häufig auf als zuvor.

In den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts ereigneten sich am Rhein bei Basel verschiedene grosse Hochwasser. Die höchsten Abflüsse an der Station Basel/Rheinhalle waren am 19.5.1994 mit 4'640 m<sup>3</sup>/s und am 12.5.1999 mit 5'090 m<sup>3</sup>/s. Diese Hochwasser liegen auf dem 4. und 6. Rang seit Beginn der Abflussmessungen im Jahre 1808. Seit Realisierung der JGK I (1887) rangieren die beiden Hochwasser als grösstes und zweitgrösstes Ereignis.

Die Entstehung des Hochwassers vom Mai 1999 wurde in BWG (2000) dargestellt. Demnach kam es am Abend des 12. Mai beim Zusammenfluss von Aare, Reuss, Limmat und Rhein im Raum Brugg – Koblenz zu einer Überlagerung der Hochwasserwellen der einzelnen Einzugsgebiete. Der Rhein unterhalb des Bodenseeausflusses bei Neuhausen brachte 700 m<sup>3</sup>/s Abfluss. Grosse Zubringer waren die Thur (1'130 m<sup>3</sup>/s) und die Aare (1'240 m<sup>3</sup>/s). In Basel wurde dieses Hochwasser als ein ca. 100jährliches Hochwasser eingeordnet.

Für den Hochwasserschutz in Basel und unterhalb davon stellt sich nun die Frage, ob mit einer ungünstigeren Überlagerung der Ganglinien beobachteter Hochwasser oder durch einen stärkeren Beitrag einzelner Flüsse, Hochwasserereignisse mit wesentlich höheren Abflussspitzen entstehen können. Zu diesem Zweck soll die Entstehungsweise der grössten gemessenen Hochwasser des letzten Jahrhunderts untersucht werden (Kap. 2). Im dritten Kapitel wird auf die Hochwasserstatistik der wichtigsten Seitenflüsse eingegangen, weil sie eine wesentliche Grundlage für die Szenarien bilden. Die Frage stellt sich, ob bei den vergangenen Ereignissen bereits ungünstige Voraussetzungen herrschten und inwiefern in Basel mit wesentlich mehr Abfluss zu rechnen ist (Kap. 4).

Der Rahmen dieser Untersuchung konzentriert sich auf die Auswertung der drei grössten und besten dokumentierten Hochwasser des letzten Jahrhunderts. Die Auswertung weiterer

---

<sup>1</sup> Die JGK II erfolgte in den Jahren 1962 – 72 und ihre wichtigsten Ziele waren: Absenkung der Höchstwasserstände, Hebung der Niedrigstwasserstände, Schaffung der hydraulischen Einheit der drei Seen, Absenkung der Aare-Hochwasserspiegel zwischen Bielersee und Emmemündung (Kühne A. in Minor und Hager, 2004).

Hochwasser und Abflussberechnungen mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell dürften die Aussagen verbessern.

## 2 Analyse vergangener Hochwasser

### 2.1 Einleitung

Die grössten vier Hochwasser des letzten Jahrhunderts traten 1910, 1978, 1994 und 1999 auf. In Basel wird für 1910 eine Abflussspitze von 4'300 m<sup>3</sup>/s, 1978 4'150 m<sup>3</sup>/s, 1994 4'640 m<sup>3</sup>/s und 1999 5'090 m<sup>3</sup>/s angegeben. Für die Untersuchung der Fragestellung lagen für das Hochwasser von 1910 unvollständige Messungen an den Seitenflüssen vor. 1910 wurde noch nicht an allen für die Fragestellung wesentlichen Pegeln Abfluss gemessen. Teilweise wurden nur Wasserstände registriert, da damals noch keine Pegel-Abflussbeziehungen vorlagen. Die Messungen waren auch nicht kontinuierlich (z.B. 6-h Rhythmus). Daher wurde das Hochwasser 1910 nicht näher untersucht.

Der Pegel Rhein bei Basel wurde verschiedene Male versetzt. Dies geschah aufgrund des Rückstaus ausgehend vom Kraftwerk Kembs unterhalb Basels. Beim Hochwasser 1999 wurde die Abflussspitze von den Messungen in Rheinfeldern unter Berücksichtigung des Zuflusses von Birs und Ergolz hergeleitet. Die vorliegenden Untersuchungen basieren daher auf dem Pegel Rheinfeldern.

#### **Einzugsgebietsflächen**

Die Einzugsgebietsflächen sind in der Tabelle 2.1 aufgeführt. In der Abbildung 2.1 sind die Anteile der Teileinzugsflächen dargestellt. Das Flussgebiet bis Rheinfeldern hat eine Fläche von 34'550 km<sup>2</sup>. Abbildung 2.1a zeigt, dass davon 51% das Einzugsgebiet der Aare ausmacht und 46% das Einzugsgebiet des Rheins oberhalb der Aaremündung.

Knapp die Hälfte des Aare-Einzugsgebiets entwässert in den Bielersee; die Einzugsgebiete von Reuss und Limmat machen zusammen 1/3 des gesamten Aare-Einzugsgebiets aus (Abb. 2.1b).

Vom Einzugsgebiet des Rheins oberhalb der Aaremündung (15'907 km<sup>2</sup>) entwässert 74% in den Bodensee. Der Anteil des Thureinzugsgebiets am Rheineinzugsgebiet oberhalb Aaremündung beträgt 11% (Abb. 2.1c). Vom gesamten Einzugsgebiet des Rheins bei Basel macht die Thur nur 5% und die Wutach 3.2% aus.

Tabelle 2.1: Einzugsgebietsflächen gemäss Abb. 1.1

Einzugsgebiet	EZG-Fläche FN [km <sup>2</sup> ]	Angaben in Prozent
<b>Rhein bei Basel St. Johann (Grenze)*</b>	<b>36'035</b>	
<b>Rhein-Basel Rheinhalle*</b>	<b>35'921</b>	
<b>Rhein-Rheinfelden*</b>	<b>34'550</b>	<b>100</b>
Rhein, Neuhausen (unterhalb Bodensee)*	11'887	
Rhein bis Aaremündung	15'907	46
Aare bis Mündung in den Rhein	17'779	51
Koblenz-Rheinfelden Zwischeneinzugsgebiet		3
<b>Rhein, Rheinfelden*</b>	<b>34'550</b>	<b>100</b>
Rhein bis Aaremündung	15'907	46
Aare bis Mündung in Rhein	17'779	51.4
Koblenz-Rheinfelden Zwischen-EZG	864	2.6
<b>Aare, Untersiggenthal</b>	<b>17'625</b>	<b>100</b>
Reuss, Mellingen*	3'382	19
Limmat, Baden*	2'415	14
Aare, Brugg (Ausfluss Bielersee)*	8'317	47
Emme, Wiler	940	5
Wigger, Zofingen	368	2
übriges Gebiet	2'357	13
<b>Rhein bis Aare-Mündung</b>	<b>15'907</b>	<b>100</b>
Rhein, Neuhausen (unterhalb Bodensee)*	11'887	74
Thur, Andelfingen*	1'696	11
Töss, Neftenbach*	342	2
Glatt, Rheinsfelden*	416	3
Wutach	1'137	7
übriges Gebiet	429	3
Durch Messstationen abgedecktes Gebiet	34'991	
Restgebiet	1'044	
<b>Weitere Einzugsgebiete</b>		
Wiese, Basel	437	
Birs, Münchenstein	911	
Ergolz, Liestal	261	
Limmat, Zürich (Seeausfluss)	2'176	
Reuss, Luzern (Seeausfluss)	2'251	

\* Werte Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz (Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK)

## 2.2 Entstehung der Hochwasser von 1978, 1994 und 1999

### 2.2.1 Niederschlag

Die Niederschlags-situationen grosser Hochwasser sind von Aebischer (1997) dargestellt worden. Zum Hochwasser 1999 gibt BWG (2000) detailliert Auskunft. Die Niederschlagskarten (Abb. 2.2 – 2.4) stammen von diesen beiden Quellen. Folgende Niederschläge wurden festgestellt:

*Tabelle 2.1: Die räumliche Verteilung der auslösenden Niederschläge bei den Hochwassern am Rhein von 1978, 1994 und 1999 (Aebischer, 1997; BWG 2000).*

HW 8.8.1978	Jura, Berner Mittelland, Zentral- und Ostschweiz: 80 – 140 mm/2d
HW 18.5.1994	Bern, Zentralschweiz: 60 – 100 mm/1d
HW 12.-15.5.1999	Bern, Zentralschweiz, Ostschweiz: 80 – 180 mm/3d + entsprechende Vorbedingungen (Schneesmelze)

Beim Hochwasser 1978 (HW1978) wurden zwar nicht die grössten Niederschlagsmengen verzeichnet, hingegen wurde das Einzugsgebiet des Rheines flächig überregnet, wobei unterhalb der massgebenden Seen grosse Niederschlagsmengen fielen.

Beim HW1994 war die Ostschweiz weniger stark betroffen als beim HW1978 und beim HW1999.

Abbildungen 2.2 – 2.4 zeigen, dass ausgedehnte Niederschlagsfelder mit ergiebigen Niederschlägen notwendig sind, um grosse Hochwasser am Rhein zu erzeugen. Beim HW1999 verschärften hohe Seespiegel aufgrund des schneereichen Winters vor dem Ereignis die Hochwassersituation.

### 2.2.2 Verlauf der Hochwasser

In den Abbildungen 2.5 – 2.7 sind die Ganglinien der HW1978, HW1994 und HW1999 dargestellt. Daran lassen sich folgende Verhaltensweisen des Rheins zeigen:

Die **Anstiegszeiten** des Rheins bei Rheinfelden lagen bei allen drei Ereignissen zwischen 14h (HW1978, HW1994) und 20h (HW1999) (Abb. 2.5a, 2.6a, 2.7a). Auch die Anstiegszeiten der Seitenflüsse waren relativ lang (Abb. 2.5b, 2.6b, 2.7b; z. B. Thur > 9h).

Beim HW1999 blieb nach der Spitze der Abfluss in Rheinfelden lange (ca. 40h) auf über 3'500 m<sup>3</sup>/s, was auf die hohen Seewasserspiegel zurückzuführen ist. Bei den anderen grossen Hochwassern gingen die Abflüsse rasch zurück.

Der Abfluss aus dem Bodensee verhielt sich bei allen drei Ereignissen ähnlich. Der Basisabfluss aus der Aare war hingegen beim HW1999 fast doppelt so hoch wie beim HW1994 und beim HW1978. Auch die Abflussspitzen der Seitengewässer verharrten einige Stunden im Spitzenbereich, sodass eine Überlagerung aller Abflussspitzen zwangsläufig eintrat (Abb. 2.5b, 2.6b, 2.7b).

### 2.2.3 Fliesszeiten

Von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW, 1990 und 1992) wurden hydrodynamische Berechnungen zur Bestimmung der Fliessgeschwindigkeiten an Rhein und Aare durchgeführt. Die ermittelten Fliessgeschwindigkeiten

bei einer Abflussmenge am Rhein von 4'000 m<sup>3</sup>/s liegen zwischen 2 und 3 m/s (stationäre Bedingungen).

Abbildung 2.8a zeigt die Distanzen zwischen den untersuchten Pegeln und dem Pegel Rhein-Rheinhalle. Die Distanzunterschiede zwischen Thur-Andelfingen bis Basel und Aare-Untersiggenthal bis Basel betragen ca. 20 km. Diese groben Überlegungen zeigen, dass bei Fliessgeschwindigkeiten von 3 m/s das Wasser der Aare etwa 4 h früher in Basel eintrifft als das der Thur (Abb. 2.8b). Bei den untersuchten Hochwassern, wo die Seitenflüsse über mehrere Stunden höchste Abflüsse führten, kam es daher zwangsläufig zu einer Überlagerung der Abflussspitzen der Seitengewässer.

#### 2.2.4 Beitrag der Teil-Einzugsgebiete an der Hochwasserspitze des Rheins bei Rheinfelden

Um den Beitrag der einzelnen Seitenflüsse an der Abflussspitze des Rheins in Rheinfelden grob aufzuzeigen, wurden die Abflussspitzen der Seitenflüsse in Beziehung zu der in Rheinfelden gesetzt (Abb. 2.9). Bei allen drei untersuchten Hochwassern machte die Aare mindestens 50% der Abflussspitze des Rheins bei Rheinfelden aus. Beim HW1994, als das Berner Mittelland stark vom Niederschlag getroffen wurde, lag der Anteil der Aare sogar bei 60%.

Die Thur mit einem Flächenanteil von nur 5% am Rheineinzugsgebiet lieferte beim HW1978 und HW1999 einen bedeutenden Beitrag zum Abfluss in Rheinfelden. Das Einzugsgebiet der Thur trägt rund 25% zur Abflussspitze in Rheinfelden bei, der Rhein unterhalb des Bodensees bis zur Aaremündung etwa 15%.

Die Aare spielt eine wichtige Rolle bei der Hochwasserentstehung des Rheins bei Basel. Interessant ist jedoch, dass ohne den Beitrag von Thur und Bodenseeausfluss grosse Hochwasser am Rhein nicht entstanden wären.

Der Beitrag der deutschen Flüsse Wutach, Wehra und Alb an der Abflussspitze in Rheinfelden war marginal (2-4%).

Teilt man den Anteil der Aare auf, so stellt man fest: Limmat und Reuss, die zusammen ca. 1/3 des Aare-Einzugsgebiets ausmachen, tragen den grössten Teil (53-58%) zum Aareabfluss bei. Kleinere Flussgebiete wie Emme und Wigger spielen in den drei Fällen eine untergeordnete Rolle. Der regulierte Bielerseeabfluss trug jeweils etwa 25-30% zur Abflussspitze in Rheinfelden bei.

#### 2.2.5 Die Rolle der Seen bei grossen Hochwassern am Beispiel von Bodensee und Bielersee

Fliesst ein Fluss durch einen See, werden die Abflüsse gedämpft. Brienzersee und Thunersee dämpfen die Abflüsse der Aare wesentlich. Zusätzlich zu dieser dämpfenden Wirkung, lässt sich der Ausfluss des Bielersees mit dem Wehr in Port regulieren<sup>2</sup>. Die Ausflüsse des Zürichsees und des Vierwaldstättersees sind ebenfalls reguliert. Beim Bodensee fehlt hingegen ein solches Regulierorgan. Bielersee, Neuenburgersee und Murtensee bilden ein 280 km<sup>2</sup> grosses Rückhaltesystem, das seit der JGK II im Hochwasserfall kommunizierend wirkt.

---

<sup>2</sup> 1972 wurde vom Bundesrat ein Reglement verabschiedet, das die Regulierung des Wehrs in Port dem Wasserwirtschaftsamt des Kantons Bern überträgt und die Regulierung festlegt. In Murgenthal soll ein maximaler Abflusswert von 850 m<sup>3</sup>/s nicht überschritten werden. Die Abflussdaten von Emme und Langete dienen dabei als Grundlage für die Festlegung des jeweiligen Ausflusses aus dem Bielersee (Aebischer, 1997).

Dennoch ist das Rückhaltevolumen des Bodensees aufgrund seiner grossen Ausdehnung (541 km<sup>2</sup>) wesentlich grösser als das System Bieler-, Murten-, Neuenburgersee.

Am Beispiel der Hochwasser 1994 und 1999 wird die Dämpfung durch den Bodensee und den Bielersee aufgezeigt (Abb. 2.10).

Abbildung 2.10a und 2.10c zeigen, wie der Ausfluss des Bielersees gedrosselt wurde. Die Abflussspitze der Aare wurde beim Hochwasser 1994 durch die Jurarandseen von 900 m<sup>3</sup>/s auf knapp 600 m<sup>3</sup>/s gedämpft. Die Abflussspitze des Hochwassers 1999 wurde von 970 auf 760 m<sup>3</sup>/s gedrosselt. Die Ganglinien in Brugg zeigen eindrücklich, wann das Wehr weiter geöffnet resp. der Ausfluss vermindert wurde.

Abbildung 2.10b und d zeigen die Zu- und Ausflüsse des Bodensees. 1994 wurde das Einzugsgebiet des Alpenrheins nur schwach getroffen (Zufluss 600 m<sup>3</sup>/s, Ausfluss 550 m<sup>3</sup>/s). Die erste Abflussspitze des Hochwassers 1999 (12./13.5.) wurde gedrosselt und floss verzögert ab. Die zweite Hochwasserwelle am 22.5.1999 (Diepoldsau 1'888 m<sup>3</sup>/s) wurde um 700 m<sup>3</sup>/s auf 1'170 m<sup>3</sup>/s gedämpft und erfuhr auch noch eine wesentliche Verzögerung.

Die Abfluss dämpfende Wirkung der Seen zeigt sich auch eindrücklich am Beispiel der Thur (ca. 1'700 km<sup>2</sup>; ungedämpft) und der Limmat (2'400 km<sup>2</sup>, gedämpft). Ein HQ2 beträgt an der Thur ca. 600 m<sup>3</sup>/s, während an der Limmat ein HQ2 im Bereich von ca. 350 m<sup>3</sup>/s liegt (Kap. 3, Abb. 3.4 und 3.2c).

Die Dämpfung des Abflusses von Aare und Rhein war 1999 trotz hoher Seestände (Bodensee, Jurarandseen) beachtlich. Eine vergleichbare Wirkung haben die übrigen grossen Schweizer Seen. Diese Dämpfung wirkt sich auch auf die Hochwasserstatistik der unterhalb der Seen liegenden Messstationen aus (Kap. 3).

## 2.2.6 Wertung der Hochwassersituationen

### **Hochwasser 1978**

Der Basisabfluss des Rheins bei Rheinfelden war vor dem Hochwasser mit ca. 1'300 m<sup>3</sup>/s wesentlich tiefer als 1999 (1'800 m<sup>3</sup>/s). Die Niederschlagskarte zeigt hingegen, dass in einem Grossteil des Rheineinzugsgebiets mehr als 90 mm Niederschlag an einem Tag fiel, also wesentlich mehr als 1994.

### **Hochwasser 1994**

Der Niederschlag war kurz (18 h) und konzentrierte sich im zentralen Mittelland. Der Basisabfluss in Rheinfelden war vergleichbar mit 1978. Die verhältnismässig starke Reaktion mit einer Abflussspitze von über 4'500 m<sup>3</sup>/s in Basel lässt sich dadurch erklären, dass vor allem die Gebiete unterhalb der Seen vom Niederschlag getroffen wurden.

### **Hochwasser 1999**

Mit den hohen Seeausflüssen von Bodensee und Bielersee lag beim HW1999 schon eine extreme Ausgangssituation aufgrund des schneereichen Winters vor. Der Niederschlag war 1999 nicht ausserordentlich gross, hingegen war die Situation hinsichtlich Seeausflüsse und Überlagerung der Ganglinien der Seitenflüsse kritisch.

Die Frequenzanalysen an den Seitenflüssen und am Rhein zeigten, dass etliche Seitenflüsse im Jahre 1999 die grössten Abflüsse seit Beginn der Messungen hatten (Kap. 3). An der Thur war das HW1910 noch grösser als das HW1999. Kleinere Einzugsgebiete wie Wigger, Emme und Birs zeigen hingegen ein anderes Hochwasserregime mit grossen Hochwassern nach

räumlich begrenzten Niederschlagsereignissen. Daher fallen die grossen Hochwasser dieser beiden Flüsse selten mit denen des Rheins zusammen.

### 3 Hochwasserstatistik am Rhein und an den wichtigsten Seitengewässern

Abbildung 3.1 bis 3.5 zeigen die Frequenzdiagramme der jährlichen Abflussmaxima an den verschiedenen betrachteten Abflussmessstationen. Daraus lassen sich die Jährlichkeiten entnehmen, welche für die Szenarienbildung von Belang sind (Kap. 4).

Abbildung 3.1a-d zeigt die Stationen entlang des Rheins. In Abbildung 3.1a ist zusätzlich das Hochwasser 1876 eingetragen, dem eine Abflussspitze von rund  $5'600 \text{ m}^3/\text{s}$  zugeordnet wurde (Ghezzi, 1915). Nicht eingetragen ist das Hochwasser von 1881 ( $5'280 \text{ m}^3/\text{s}$ ), das ebenfalls grösser als das von 1999 war. Beide Hochwasser ereigneten sich jedoch vor Abschluss der I. Juragewässerkorrektur. Das HQ100 liegt in Basel bei ca.  $5'000 \text{ m}^3/\text{s}$ , in Rekingen bei ca.  $2'250 \text{ m}^3/\text{s}$  und bei Neuhausen bei knapp ca.  $1'200 \text{ m}^3/\text{s}$ . In Rhein-Rekingen war das HW1910 aufgrund des extremen Zuflusses der Thur das grösste Hochwasser der Messperiode (Abb. 3.1c). Bei den übrigen Rheinstationen dominiert das HW1999.

An der Aare (3.2a, b) waren das HW1999 und das HW1994 die beiden grössten Ereignisse der Messperiode, ebenfalls an der Reuss (Abb. 3.2d). An der Reuss würde eine Ausgleichsgerade aufgrund der Seedämpfung verhältnismässig flach verlaufen. An der Limmat ist das HW1910 das grösste der Messperiode und der Verlauf einer Ausgleichsgerade wäre trotz Seeinflusses steiler. Der steilere Verlauf dürfte u. a. auf die unterhalb des Zürichsees einmündende Sihl zurückzuführen sein. An der Limmat in Baden liegt das HQ100 bei ca.  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ , an der Reuss in Mellingen bei ca.  $750 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das HQ100 liegt an der Aare bei Brugg bei etwa  $1'250 \text{ m}^3/\text{s}$ , bei Untersiggenthal bei ca.  $2'500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Abbildungen 3.3a, b zeigen Glatt und Töss. Das HQ100 wurde in der Untersuchung Scherrer AG / IHW ETH Zürich (2002) für die Glatt in Rheinsfelden auf  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  abgeschätzt. An der Töss in Neftenbach dürfte das HQ100 zwischen ca.  $270 - 300 \text{ m}^3/\text{s}$  liegen.

Die Thur (Abb. 3.4) hat einen wesentlichen Einfluss auf die Hochwasserabflüsse des Rheins, brachte sie doch 1999 über  $1'150 \text{ m}^3/\text{s}$ . Frühere Hochwasser (z.B. 1978, 1977, 1965, 1910) wurden durch grossflächige Überflutungen gedämpft, heute ist der Fluss ausgebaut, so dass ein grösserer Zufluss zum Rhein möglich wird<sup>3</sup>. An der Thur in Andelfingen wurde in der Untersuchung Horat & Scherrer AG (2000) das HQ100 auf  $1'450 \text{ m}^3/\text{s}$  abgeschätzt.

Abbildung 3.5a-c zeigt die Seitenflüsse Wigger, Emme und Birs. Die Messperiode von der Wigger ist kurz und das HW1999 nimmt eine untergeordnete Stellung ein. Ebenfalls an Emme und Birs fallen die grössten Hochwasser nicht mit denen des Rheins zusammen. Sie entstanden durch kürzere, intensivere, regionale Starkniederschläge. An der Emme ergibt sich aufgrund des Frequenzdiagramms ein HQ100 von ca.  $550 \text{ m}^3/\text{s}$ , an der Birs ein Wert von ca.  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ .

---

<sup>3</sup> Graphik 3.4 (Thur) stammt aus Untersuchungen der Horat & Scherrer AG (2000). Die Abflüsse wurden korrigiert. Heute kann aufgrund der verfügbaren Abflusskapazität des Gerinnes  $1'650 - 1'750 \text{ m}^3/\text{s}$  abfliessen.

## 4 Szenarien

### 4.1 Grundlagen

Wie in Kapitel 2.2.5 dargestellt spielen die Seen eine zentrale Rolle, wobei besonders der Bodensee wegen seines grossen Rückhaltevermögens hervorzuheben ist. 1999 erreichte der Ausfluss (Neuhausen) am 23. Mai 1999 mit 1'180 m<sup>3</sup>/s sein Maximum. Der Abfluss von 1'100 m<sup>3</sup>/s war während 24 Tagen und der Abfluss von 1'000 m<sup>3</sup>/s während 34 Tagen überschritten. Entscheidend ist weniger der tatsächlich erreichte Spitzenwert – dies ist meist am Ende des Niederschlagsereignisses - sondern die Dauer der hohen Abflüsse. 90% des Spitzenwertes wird während rund einem Monat überschritten. Für den Vierwaldstättersee und die Jurarandseen ist dieser Zeitraum etwas kürzer, erreicht aber auch etwa 20 Tage in denen 90% des jeweiligen Spitzenabflusses überschritten werden kann.

Diese Zeiträume sind so lang, dass eine zweite Niederschlagswelle das Einzugsgebiet bei hohen Seeständen treffen kann. So waren 1999 am 10. Mai – also vor der ersten Niederschlagswelle - die Seeausflüsse im Vergleich zur zweiten Welle am 19. Mai vergleichsweise tief.

Tabelle 4.1: Die Seeausflüsse von Bielersee, Bodensee, Vierwaldstättersee und Zürichsee am 10. und am 19. Mai 1999 und der Zeitpunkt der maximalen Ausflüsse.

Messstelle	Abfluss am 10. Mai [m <sup>3</sup> /s]	Abflüsse am 19. Mai [m <sup>3</sup> /s]	Max. Abfluss [m <sup>3</sup> /s]
Aare, Brügg (Jurarandseen)	559	733	761 (20.5.1999)
Rhein, Neuhausen (Bodensee)	557	923	1'180 (11.6.1999)
Reuss, Luzern (Vierwaldstättersee)	238	373	430 (23.5.1999)
Limmat, Zürich (Zürichsee)	201	338	590 (22.5.1999) (davon Sihl 250)
Summe Seeausflüsse	1'555	2'367	

Die Summe der Seeausflüsse war also am 19. Mai um ca. 800 m<sup>3</sup>/s höher als vor dem ersten Niederschlagsereignis (10. Mai 1999). Die Ausgangslage war bei den Hochwassern 1994 und 1978 gleich oder günstiger als am 10. Mai 1999.

Die lange Dauer der hohen Abflüsse, lässt es durchaus als möglich erscheinen, dass auf eine erste Niederschlagswelle eine zweite folgt. 1999 wurde die erste Welle um den 15. Mai von einem grösseren Niederschlag ausgelöst als jene vom 19. Mai (Im Gegensatz dazu erzeugte in Bayern erst der zweite Niederschlag die extremen Überschwemmungen). Diese aus der Sicht des Hochwasserschutzes günstige Abfolge lässt sich keineswegs garantieren. In diesem Sinne ist in den Szenarien ein hoher Basisabfluss in den Alpenrandseen und Jurarandseen anzunehmen (Vorreifen und/oder Schneeschmelze). Extreme Abflüsse entstehen, wenn bei dieser Ausgangslage ein Starkregenereignis eintritt. Hier stehen zwei Möglichkeiten im Vordergrund, einerseits ein vorwiegend in der Ostschweiz zentriertes Ereignis wie im Mai

1999 oder im August 1978 und andererseits ein über dem Mittelland zentriertes Ereignis wie im Mai 1994.

Abfluss begrenzende Faktoren:

- Eine Steigerung der Seeabflüsse über die 1999 beobachteten Werte ist zwar möglich, aber wegen der grossen Retentionswirkung der Seen wird diese vergleichsweise zu möglichen Abflusssteigerungen durch Starkniederschläge bescheiden ausfallen.
- Limmat und Aare begannen beim HW1999 auszufern. Wesentlich höhere Zuflüsse der Seitengewässer werden daher zu grossflächigen Überschwemmungen und daher zu einem nur langsam Anstieg der Spitzenabflüsse in Baden, Brugg oder Untersiggenthal führen.
- Die Reuss war beim HW1999 an den Kapazitätsgrenzen. Höhere Abflussmengen würden zu Deichbrüchen führen, so dass Abflussmengen über 800 m<sup>3</sup>/s kaum die Aare erreichen dürften.

Eine besondere Stellung nimmt die Thur ein. 1978 begrenzten zahlreiche Deichbrüche den Abfluss auf 1'060 m<sup>3</sup>/s. Ohne diese Deichbrüche hätte damals der Abfluss den am 13.5.99 beobachteten Wert von 1'130 m<sup>3</sup>/s übertroffen. Die seither durchgeführten Korrektionsmassnahmen lassen einen künftigen Spitzenwert in der Grösse von 1'500 m<sup>3</sup>/s als möglich erscheinen. Von allen Zubringern besteht also an der Thur das grösste Steigerungspotenzial.

## 4.2 Szenarien

Die Grundsatzfrage „Sind grössere Abflüsse als 5'000 m<sup>3</sup>/s - wie sie am 13.5.99 für Basel Rheinhalle festgestellt wurden - möglich?“ kann einfach bejaht werden, da bereits eine Umkehrung der zeitlichen Abfolge der Niederschlagsereignisse vom 13. und 21. Mai 1999 zu höheren Abflüssen geführt hätte.

Zur Beurteilung der Frage „um wie viel“ wurden ausgehend von der Hochwassersituation 1999 unter Einbezug der unter 4.1 dargestellten Überlegungen verschiedene ungünstige Kombinationen betrachtet.

Tabelle 4.2: Die Szenarien für die Abschätzungen grosser Abflüsse in Rheinfeldern resp. Basel.

Szenario	Bedingungen
Szenario 1	Maximierung der Abflüsse des Rheins bei Rheinfeldern durch zeitliche Verschiebung der Abflussganglinien der Hochwasser 1978 (a), 1994 und 1999 (b). Das Hochwasser 1994 ist auf diese Weise nicht zu vergrössern.
Szenario 2	Hohe Seestände wie Anfang 1999 und eine Niederschlagsituation wie im Mai 1994  Ein auf 900 m <sup>3</sup> /s erhöhten Abfluss aus dem Bodensee und um je 100 m <sup>3</sup> /s auf das Niveau von 1999 gesteigerten Abflüssen aus Zürich-, Vierwaldstätter- und Bielersee
Szenario 3	Hohe Seestände wie am 19. Mai 1999 und verstärkter Niederschlag in der Ostschweiz mit einer Steigerung der Thur auf 1'500 m <sup>3</sup> /s, Töss, Glatt hoch; Aare Untersiggenthal auf 2'000 m <sup>3</sup> /s
Szenario 4:	Vertauschen der zeitlichen Abfolge der beiden Niederschlagsereignisse vom Mai 1999  Aare, Brugg 1'230 statt 830 m <sup>3</sup> /s; Thur 1'130 statt 920 m <sup>3</sup> /s; Töss 250 statt 100 m <sup>3</sup> /s; Reuss, Mellingen 750 m <sup>3</sup> /s statt 600 m <sup>3</sup> /s bzw. Aare, Untersiggenthal 2'600 statt 2'000 m <sup>3</sup> /s

#### 4.2.1 Ergebnisse der Szenarienrechnungen

Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen die Ergebnisse der Szenarienrechnungen 1a, b bis 4. In der Tabelle 4.3 sind die Werte aufgeführt.

Tabelle 4.3: Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen.

<b>Szenario 1a :</b>	[m <sup>3</sup> /s]	gerundet [m <sup>3</sup> /s]
Zeitliche Verschiebung der Abflussspitzen des Hochwassers 1978		
Rheinfelden	4'146	
Beitrag Wiese, Ergolz	237	
Beitrag übriges EZG 1'044 km <sup>2</sup> à 0.111 m <sup>3</sup> /s*km <sup>2</sup>	120	
<b>Abflussspitze Basel Grenze</b>	<b>4'503</b>	<b>4'500</b>
<b>Szenario 1b:</b>	[m <sup>3</sup> /s]	gerundet [m <sup>3</sup> /s]
Zeitliche Verschiebung der Abflussspitzen des Hochwassers 1999		
Rheinfelden	4'944	
Wiese, Ergolz	237	
übriges EZG 1'044 km <sup>2</sup> à 0.14 m <sup>3</sup> /s*km <sup>2</sup>	150	
<b>Abflussspitze Basel Grenze</b>	<b>5'331</b>	<b>5'300</b>
<b>Szenario 2:</b>	[m <sup>3</sup> /s]	gerundet [m <sup>3</sup> /s]
HW1994 kombiniert mit Seeausfluss von Bieler-, Vierwaldstätter-, Zürich- und Bodensee 1999		
Rheinfelden	4'690	
Wiese, Ergolz	237	
übriges EZG 1'044 km <sup>2</sup> à 0.14 m <sup>3</sup> /s*km <sup>2</sup>	150	
<b>Abflussspitze Basel Grenze</b>	<b>5'077</b>	<b>5'100</b>
<b>Szenario 3:</b>	[m <sup>3</sup> /s]	gerundet [m <sup>3</sup> /s]
Hohe Seestände (19. Mai 1999), verstärkter Niederschlag in der Ostschweiz Steigerung Thur auf 1'500 m <sup>3</sup> /s; Töss und Glatt hoch wie 1999; Aare, Untersiggenthal auf 2000 m <sup>3</sup> /s		
Rheinfelden	4'833	
Wiese, Ergolz	237	
übriges EZG 1'044 km <sup>2</sup> à 0.14 m <sup>3</sup> /s*km <sup>2</sup>	150	
<b>Abflussspitze Basel Grenze</b>	<b>5'220</b>	<b>5'200</b>
<b>Szenario 4:</b>	[m <sup>3</sup> /s]	gerundet [m <sup>3</sup> /s]
Vertauschen der zeitlichen Abfolge der Niederschlagsereignisse vom Mai 1999 Aare, Brugg: 1'230 statt 830 m <sup>3</sup> /s; Thur 1'130 statt 920 m <sup>3</sup> /s; Töss 250 statt 100 m <sup>3</sup> /s; Glatt, Rheinfelden 130 statt 60 m <sup>3</sup> /s; Aare, Untersiggenthal 2'600 statt 2000 m <sup>3</sup> /s		
Rheinfelden	5'220	
Wiese, Ergolz	237	
übriges EZG 1'044 km <sup>2</sup> à 0.14 m <sup>3</sup> /s*km <sup>2</sup>	150	
<b>Abflussspitze Basel Grenze</b>	<b>5'607</b>	<b>5'600</b>

Die Szenarien wurden für Rheinfeldern bestimmt. Der Abfluss in Basel wurde durch einen Zuschlag bestehend aus den Abflüssen von Ergolz, Wiese und dem Resteinzugsgebiet (1'044 km<sup>2</sup>) ermittelt.

Szenario 1a zeigt das Hochwasser 1978, wenn die Ganglinien der Seitenflüsse so überlagert werden, dass die Abflussspitze in Rheinfeldern maximal werden. Anstelle der gemessenen 3'800 m<sup>3</sup>/s werden so 4'150 m<sup>3</sup>/s erreicht (Steigerung 350 m<sup>3</sup>/s). Allerdings müssen die Ganglinien teilweise auf wenig realistische Weise zeitlich verschoben werden. Der Zufluss von Ergolz, Wiese und der nicht berücksichtigten Gebiete gibt einen Zuschlag ca. 400 m<sup>3</sup>/s, wodurch eine Abflussspitze von 4'500 m<sup>3</sup>/s Basel generiert wird

Das Hochwasser 1994 war auf diese Weise nicht zu maximieren.

Szenario 1b zeigt das Hochwasser 1999. Eine ungünstige Überlagerung der Ganglinien bringt in Basel eine Abflussspitze von ca. 5'300 m<sup>3</sup>/s statt der gemessenen 5'050 m<sup>3</sup>/s.

Szenario 2 kombiniert die hohen Seestände von 1999 mit der Niederschlagsituation von 1994. Es entsteht eine Abflussspitze von ca. 5'100 m<sup>3</sup>/s.

Szenario 3 geht von den hohen Seeständen 1999 aus und kombiniert diese mit einer stärkeren Abflussreaktion aus der Ostschweiz mit der Thur auf 1'500m<sup>3</sup>/s. Dies ergibt in Basel ca. 5'200 m<sup>3</sup>/s.

Szenario 4 vertauscht die Reihenfolge der beiden Hochwasser 1999. Dies ergibt eine Abflussspitze von 5'600 m<sup>3</sup>/s also knapp 600 m<sup>3</sup>/s mehr als 1999 tatsächlich als höchster Wert gemessen wurde.

#### 4.2.2 Zusammenfassende Beurteilung

Abflüsse zwischen 5'000 und 6'000 m<sup>3</sup>/s sind in Basel durch eine ungünstige Kombination von beobachteten Abflüssen bzw. Niederschlagsereignissen möglich. Um die 6'000 m<sup>3</sup>/s zu überschreiten, wären sehr ungünstige Kombinationen nötig: Ergiebiger Abfluss durch Vorregen und/oder Schneeschmelze, starke Niederschläge im gesamten Einzugsgebiet, ungünstige Überlagerungen der Ganglinien der Seitenflüsse, etc.

Bei derart grossen Abflüssen der Seitengewässer beginnen die Flüsse zu überfluten. Solche begrenzenden Faktoren flossen ansatzweise in die Szenarien ein, der Einfluss von Retentionseffekten aufgrund grossräumiger Überflutungen wurde aber nicht untersucht.

Eine Wahrscheinlichkeitszuordnung für Abflussspitzen des Rheins bei Basel im Bereich von 6'000 m<sup>3</sup>/s ist spekulativ. Einem Abfluss von 5'000 m<sup>3</sup>/s in Basel kann eine Wiederkehrperiode zwischen 100 und 300 Jahren zugeordnet werden. Für grössere Abflüsse sind entsprechend kleinere Wahrscheinlichkeiten anzunehmen.

## 5 Verwendete Unterlagen

Aebischer, H. (1997): Räumlich-zeitliche Analyse der Rhein-Hochwasser. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Bern.

Bundesamt für Wasser und Geologie BWG (2000): Hochwasser 1999, Analyse der Ereignisse, Studienbericht Nr. 10.

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

Ghezzi, C. (1915): Die Abflussverhältnisse des Rheins bei Basel. Schweiz. Dep. des Innern, Mitteilungen der Abt. für Wasserwirtschaft. Hrsg. L.W. Collet.

Horat & Scherrer AG (2000): Hochwasserschutz und Auenlandschaft Thurmündung: Hydrologische Grundlagen. Auftraggeber Amt für Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich.

Minor H.E., W.H. Hager (2004): Flussbau in der Schweiz. Publikation der Gesellschaft für Ingenieurkunst, Bd. 6.

Scherrer AG / Institut für Hydromechanik (IHW) der ETH Zürich (2002): Der Einfluss der Siedlungsentwicklung auf die extremen Hochwasser der Glatt (ZH). Auftraggeber Amt für Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich.

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1990: Fliesszeiten im Rhein – Berechnung der mittleren Abflussgeschwindigkeiten und Fliesszeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Im Auftrag der Landeshydrologie und –geologie und des Bundesamtes für Wasserwirtschaft.

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1992: Fliesszeiten in der Aare – Berechnung der mittleren Abflussgeschwindigkeiten und Fliesszeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Im Auftrag der Landeshydrologie und –geologie.

Scherrer AG

Hydrologie und Hochwasserschutz

Dr. S. Scherrer

Sachbearbeitung: Dr. S. Scherrer, Dipl. Geograph Universität Basel

Dr. R. Burkard, Dipl. Geograph Universität Bern

Reinach, 10. September 2004

## 6 Graphiken

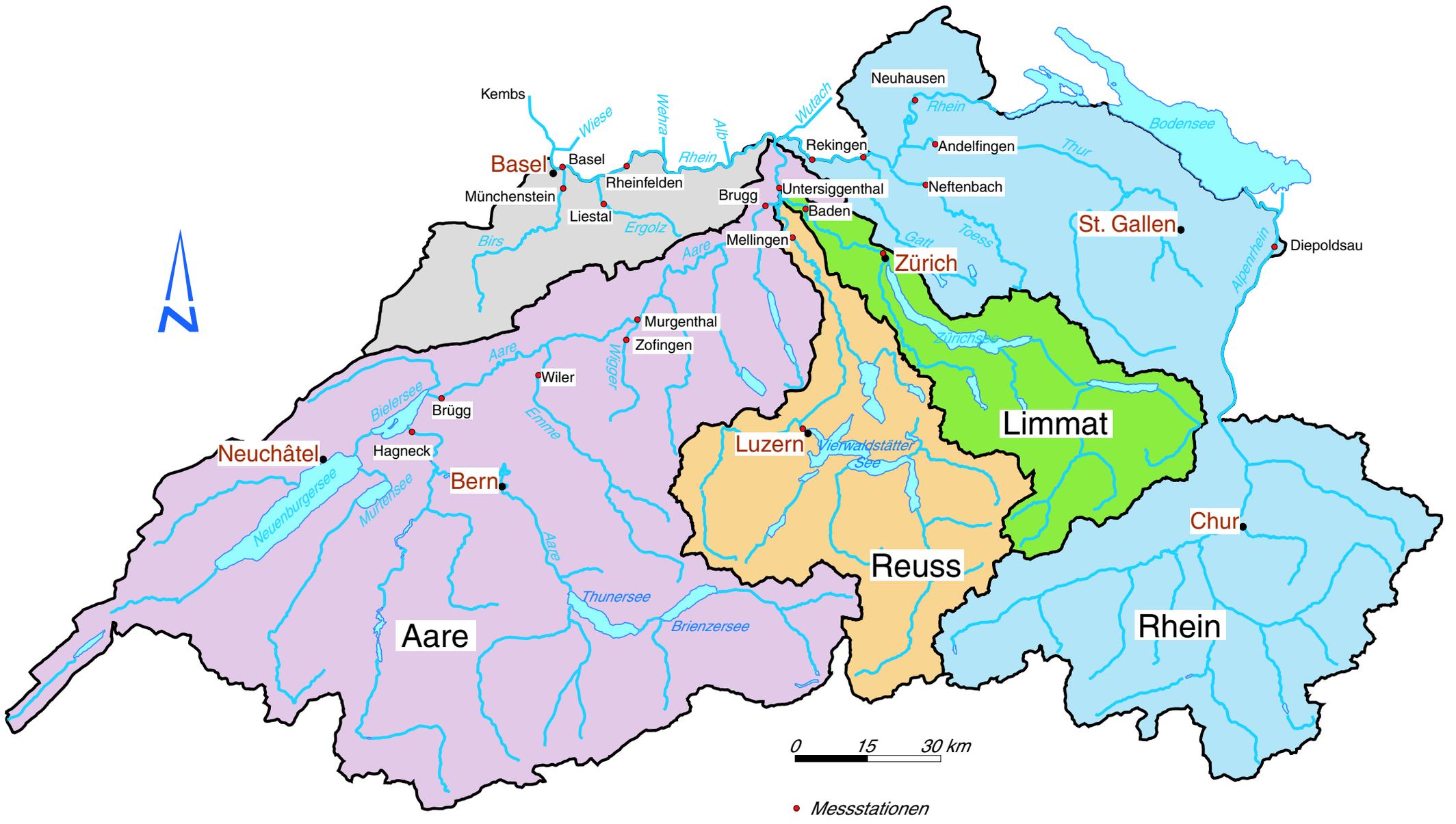


Abbildung 1.1: Das Einzugsgebiet des Rheins bei Basel auf Schweizerischer Seite mit den Seitengewässern und den verwendeten Abflussmessstationen.

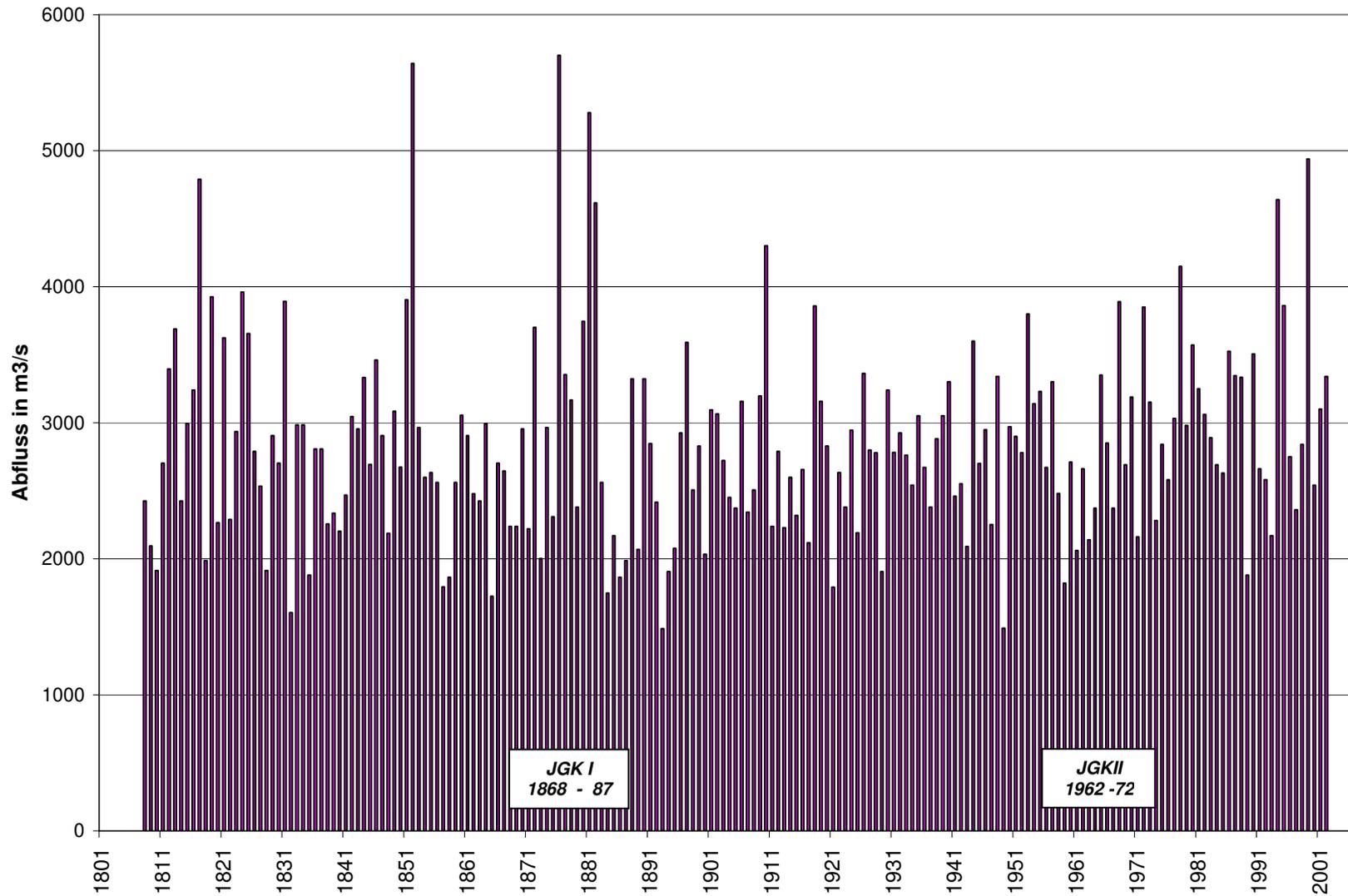
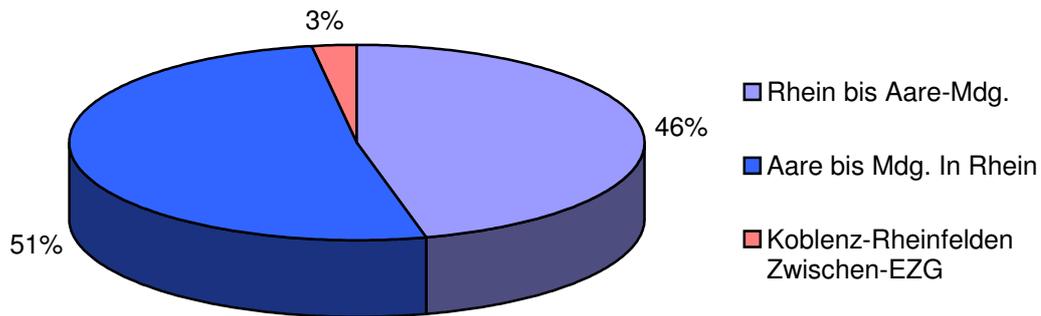
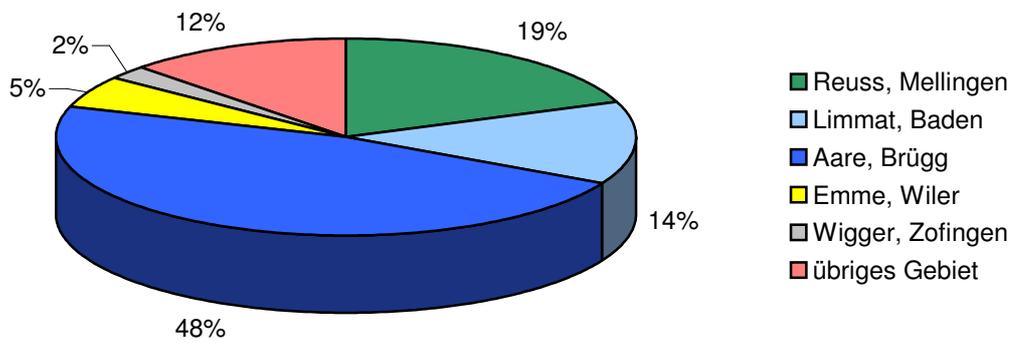


Abbildung 1.2: Jährliche Hochwasserspitzen im Rhein bei Basel 1808 – 2002. Eingetragen ist der Zeitpunkt der beiden Juragewässerkorrekturen (JGKI und JGKII).

**a) Das Rheineinzugsgebiet bei Rheinfelden**



**b) Das Aareinzugsgebiet bei Untersiggenthal**



**c) Das Rheineinzugsgebiet oberhalb der Aaremündung**

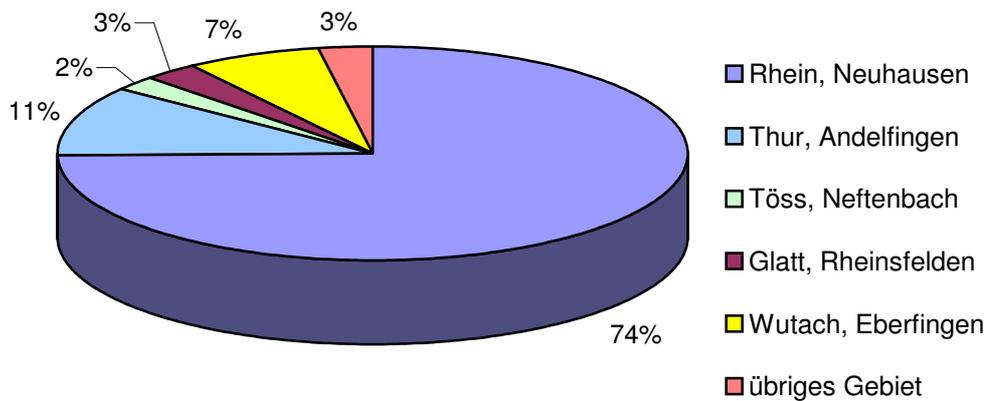
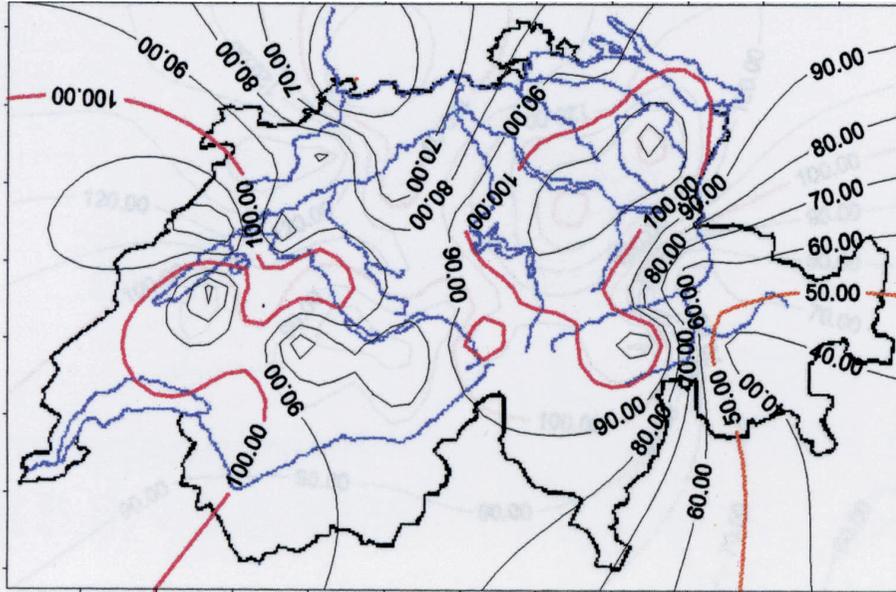


Abbildung 2.1:

Die Anteile der Teil-Einzugsgebietsflächen in Prozenten  
(Die Flächen in km<sup>2</sup> sind der Tabelle 2.1 zu entnehmen).

Räumliche Verteilung der Niederschlagstagesumme vom 7.8.1978



Räumliche Verteilung der Niederschlagstagesummen vom 6. und 7.8.1978.

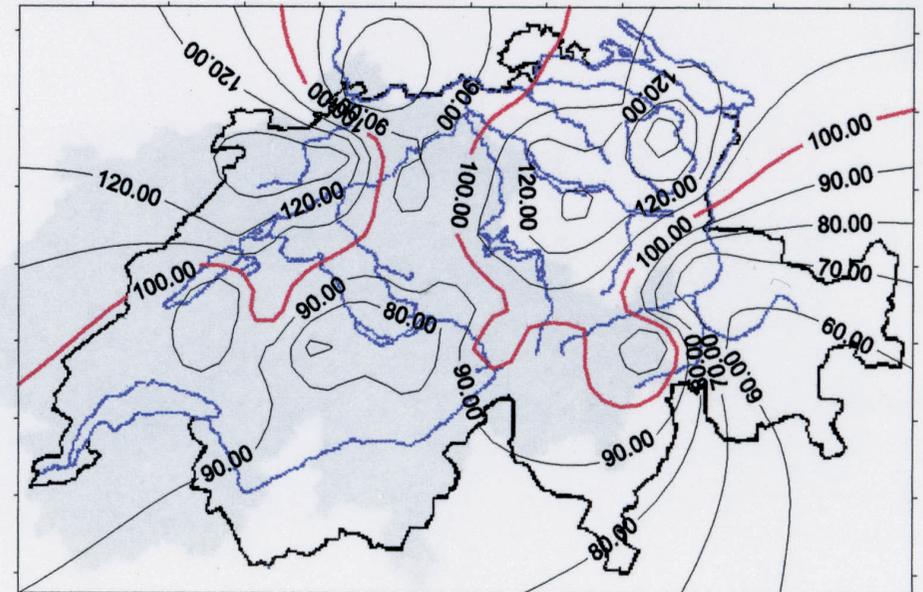


Abbildung 2.2: Die räumliche Verteilung der Niederschlagstagesummen beim Hochwasser vom 6./7.8.1978. [Aus Aebischer (1997), leicht verändert].

Räumliche Verteilung der Niederschlagstagesummen vom 18.5.1994

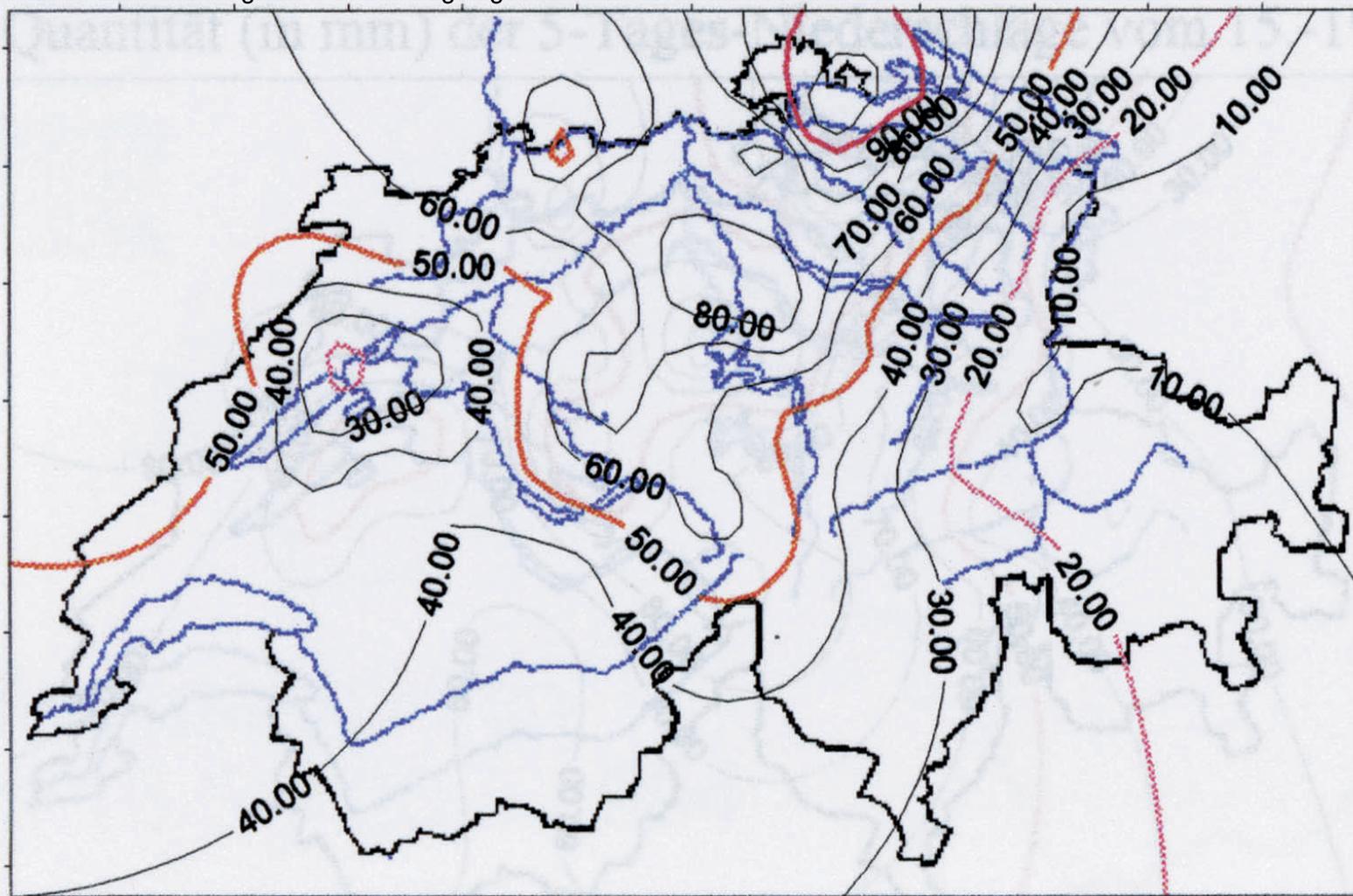


Abbildung 2.3:

Die räumliche Verteilung der Niederschlagstagesumme beim Hochwasser vom 18.5.1994.  
[Aus Aebischer (1997), leicht verändert].

Max. 72h-Summe Niederschlag 1999051417 (Intervall 11.–15. Mai)

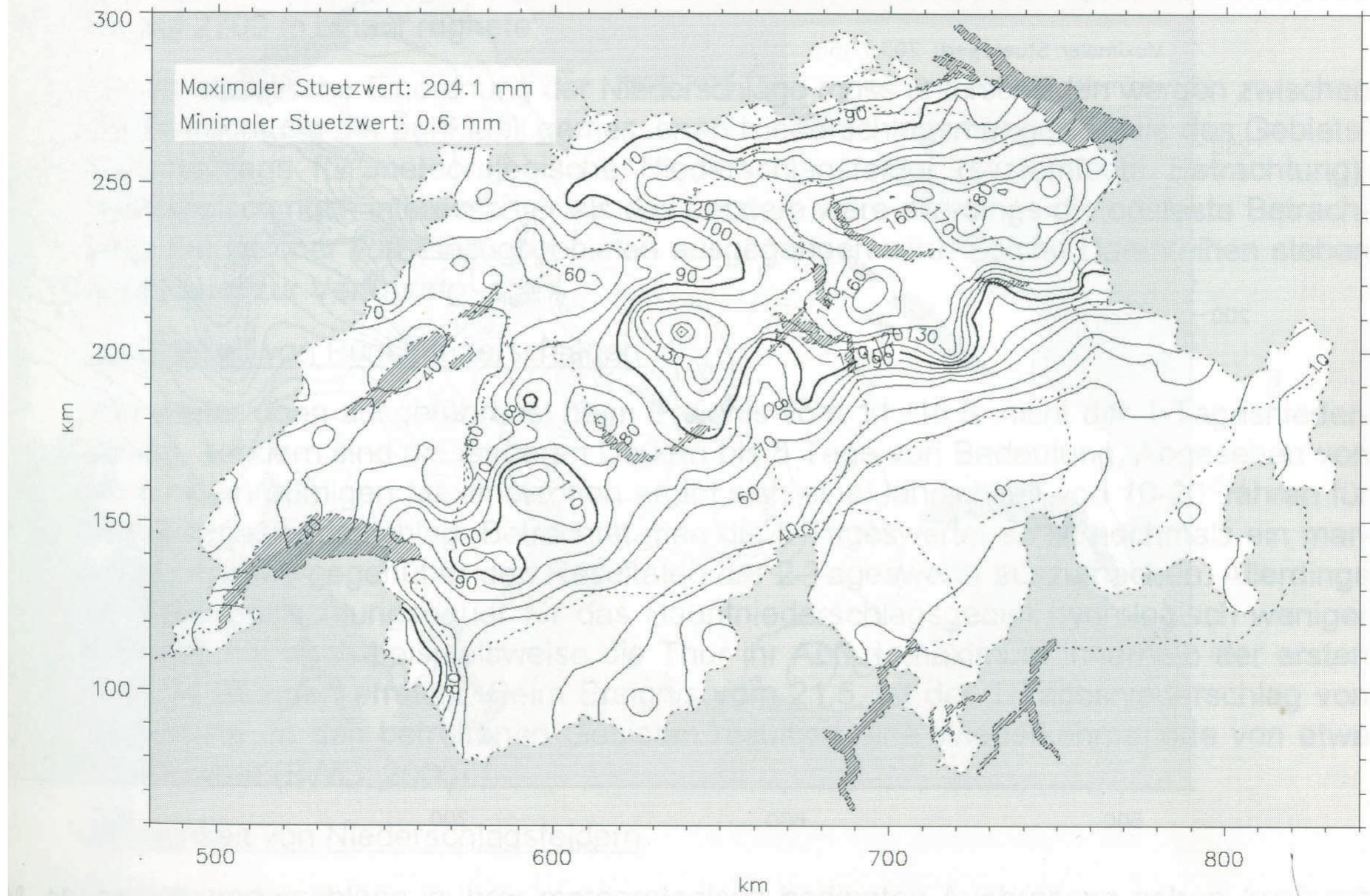


Abbildung 2.4:

Die räumliche Verteilung der Niederschlagstagesummen beim Hochwasser 12./13.5.1999. Dargestellt ist die maximale 72h-Summe. [Aus BWG 2000, leicht verändert].

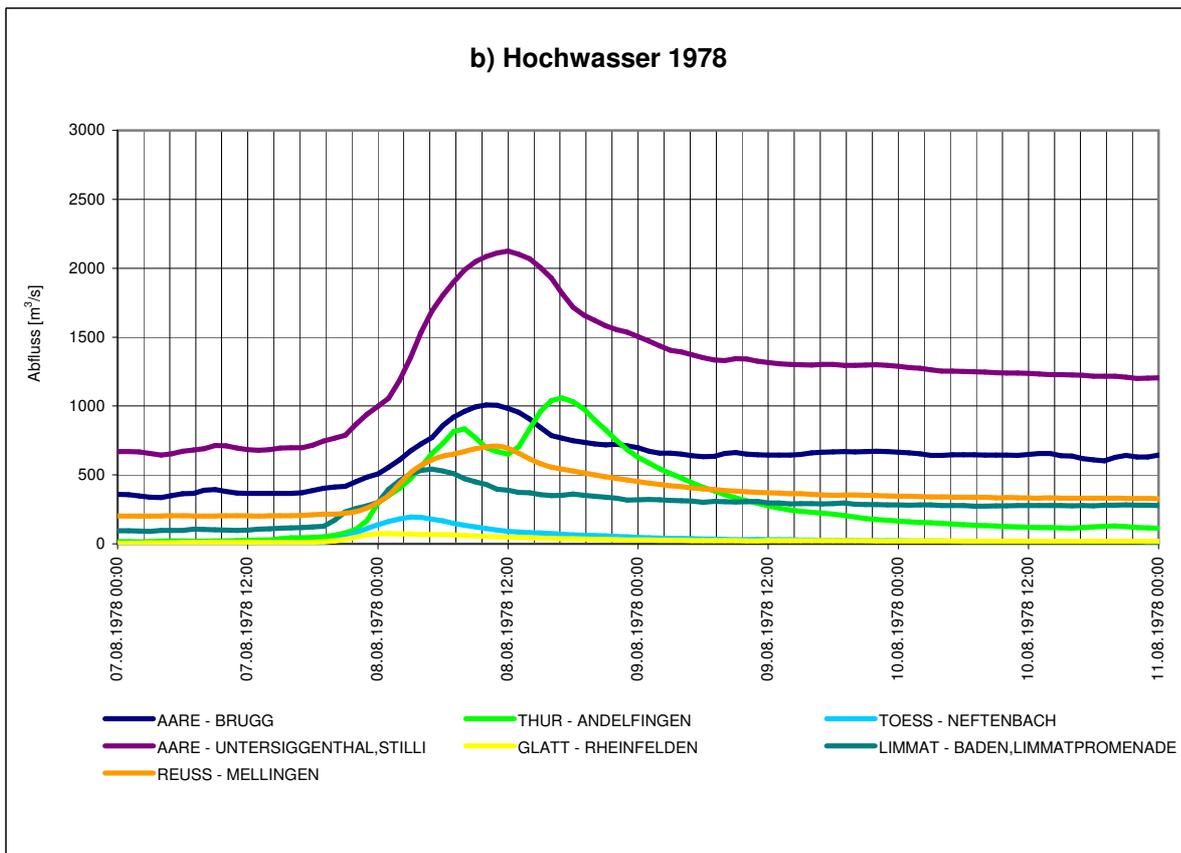
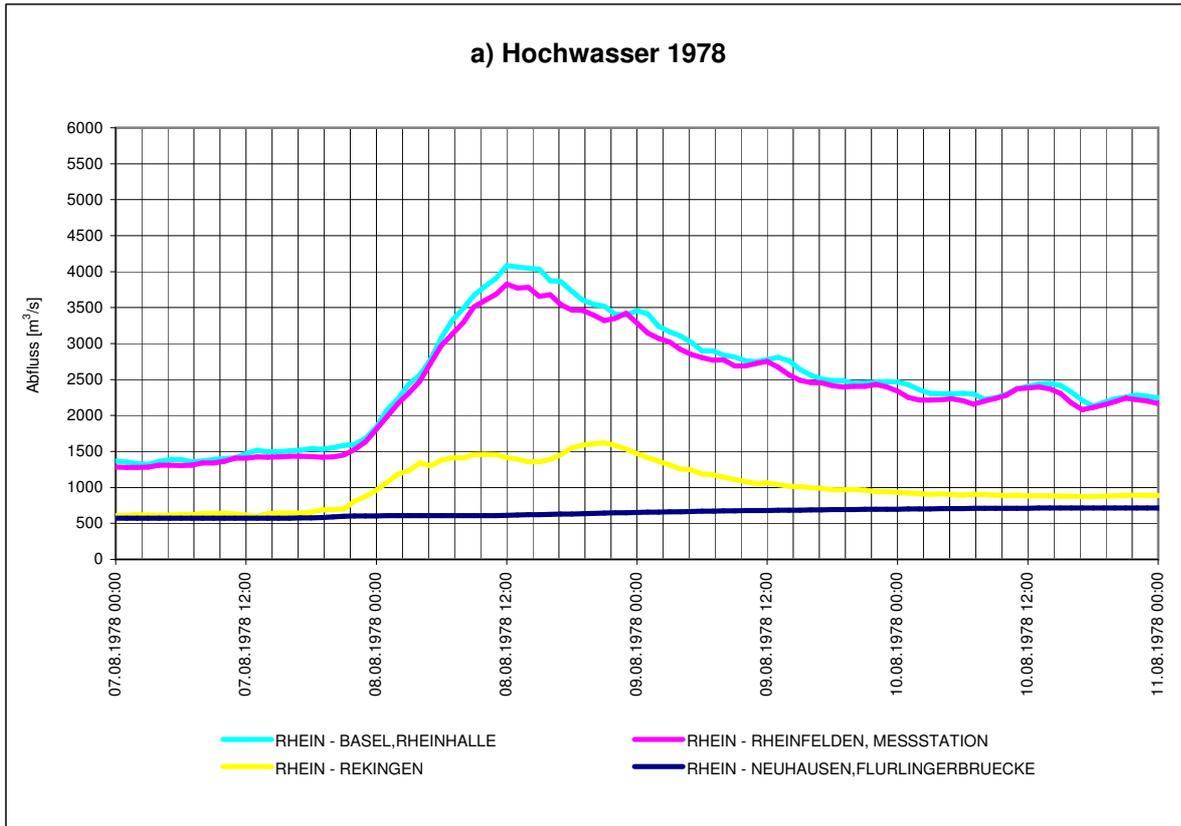


Abb 2.5: Das Hochwasser von 1978:

a) Die Hochwasserganglinien entlang des Rheins.

b) Die Hochwasserganglinien der wichtigsten Seitenflüsse.

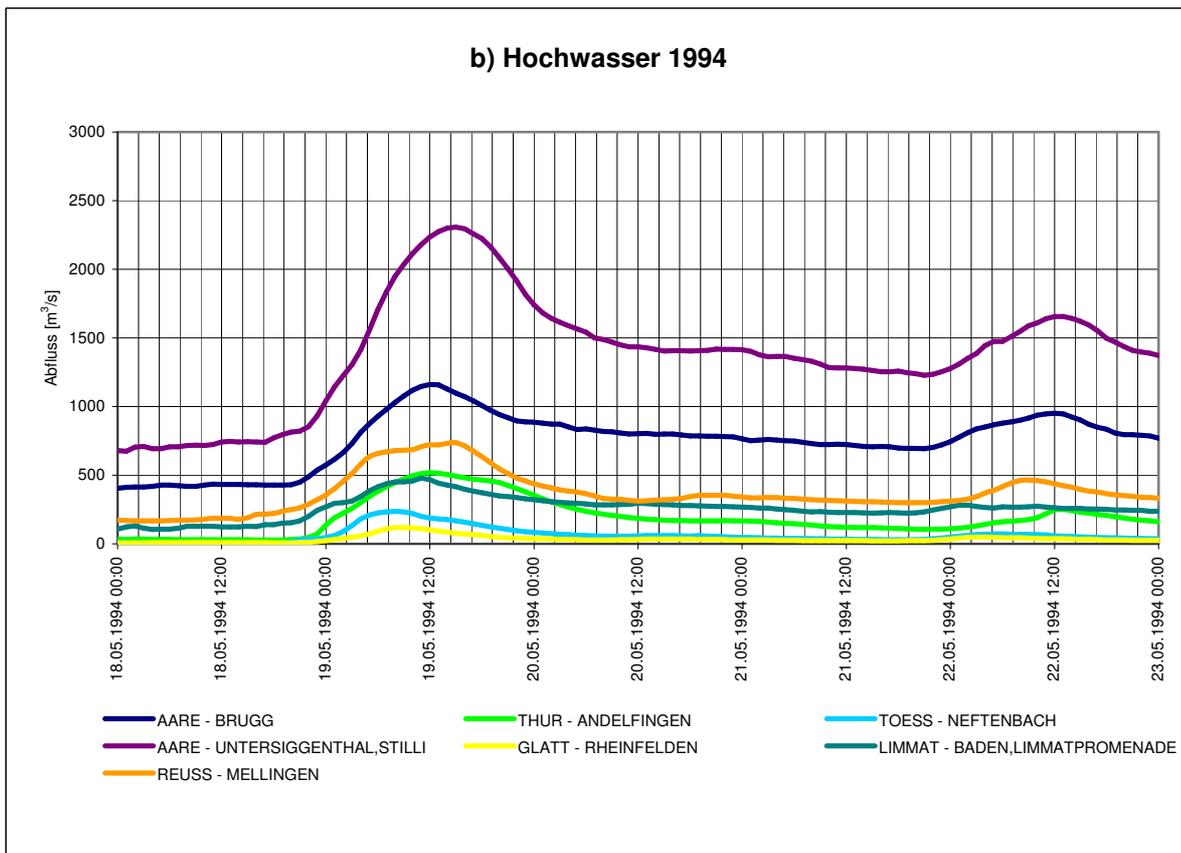
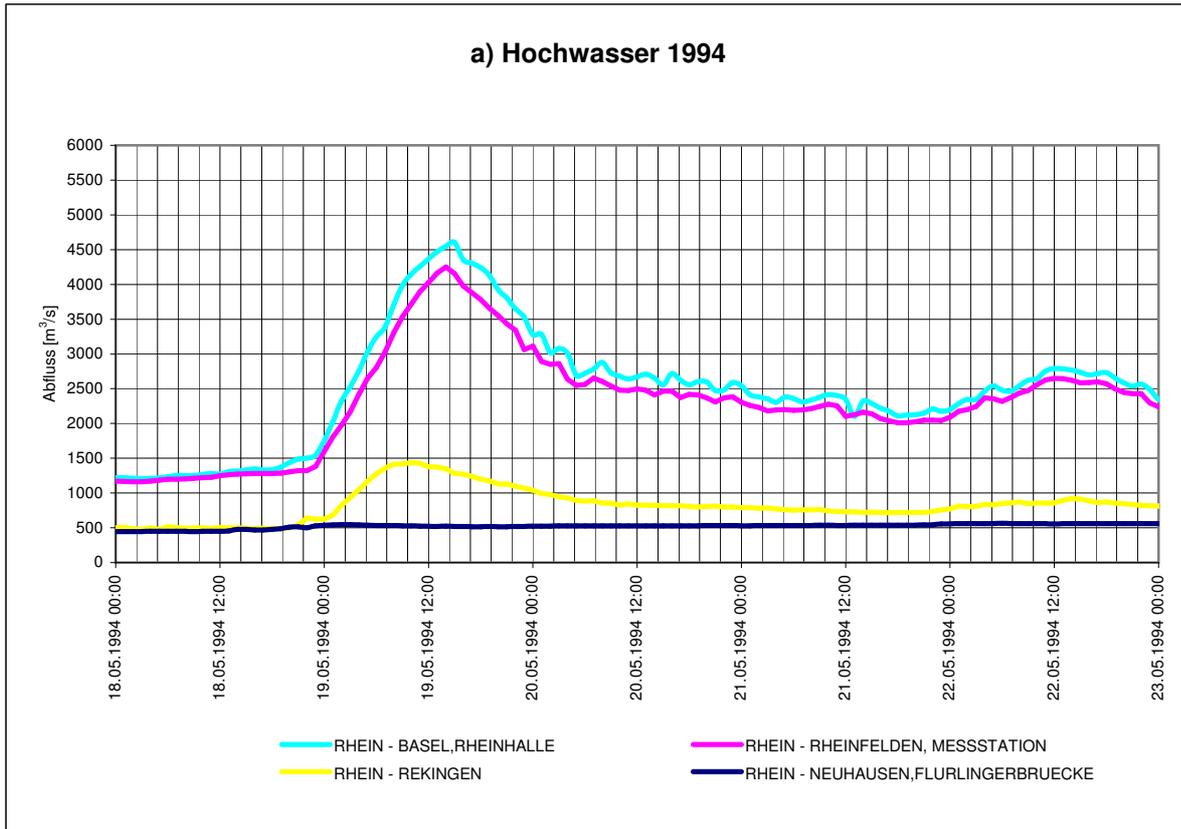


Abb 2.6: Das Hochwasser von 1994:

a) Die Hochwasserganglinien entlang des Rheins.

b) Die Hochwasserganglinien der wichtigsten Seitenflüsse.

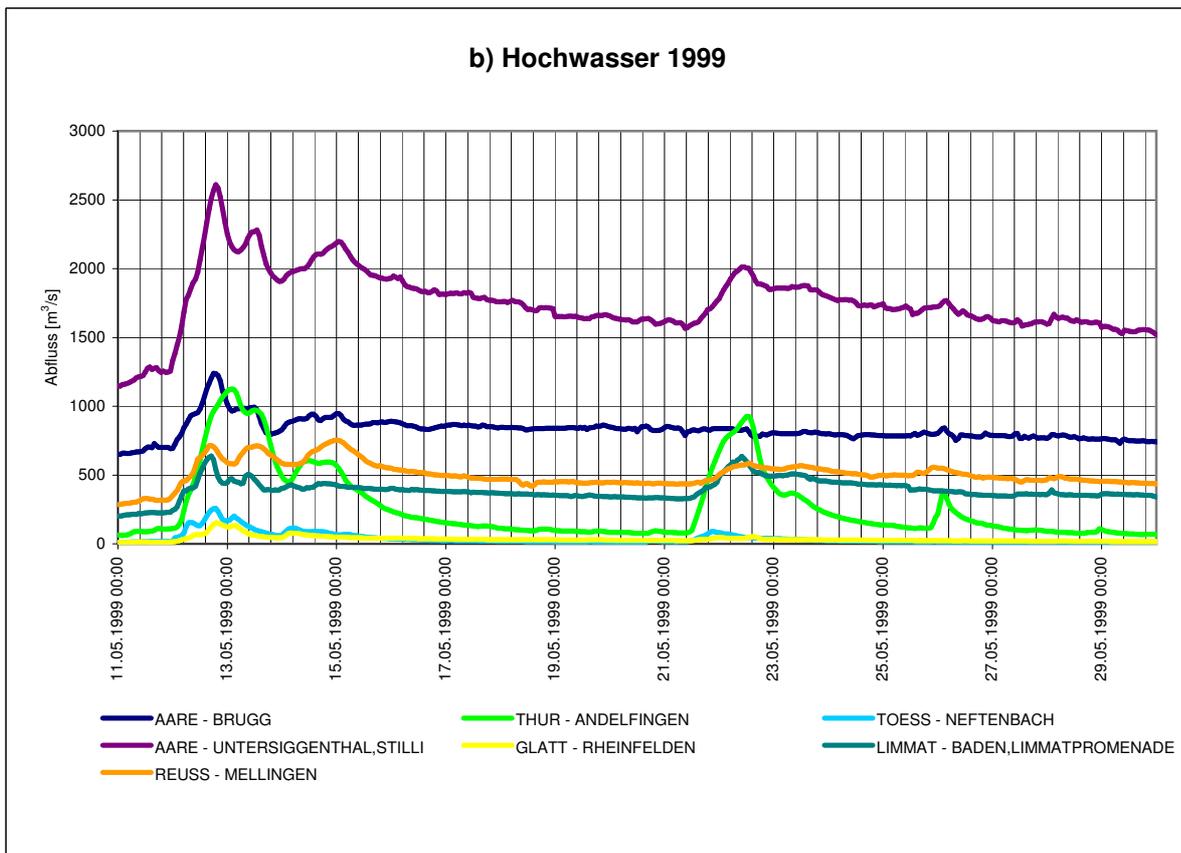
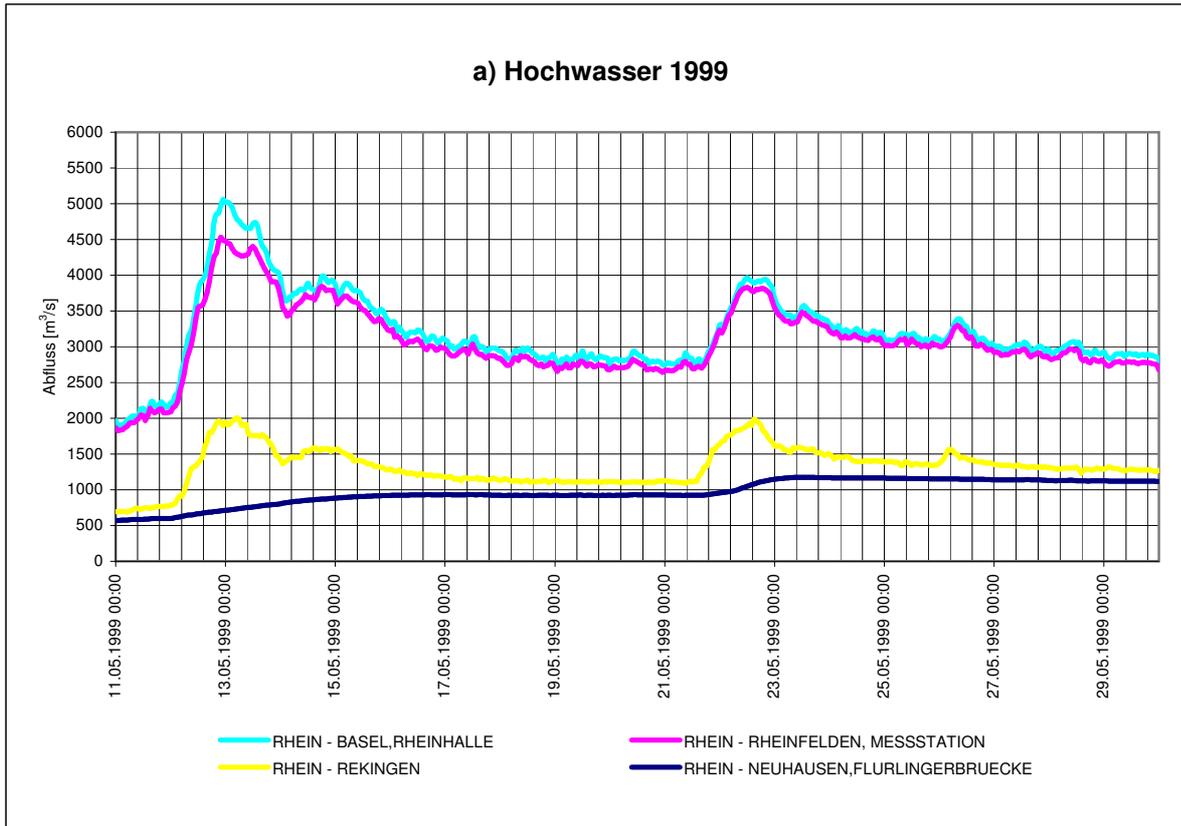
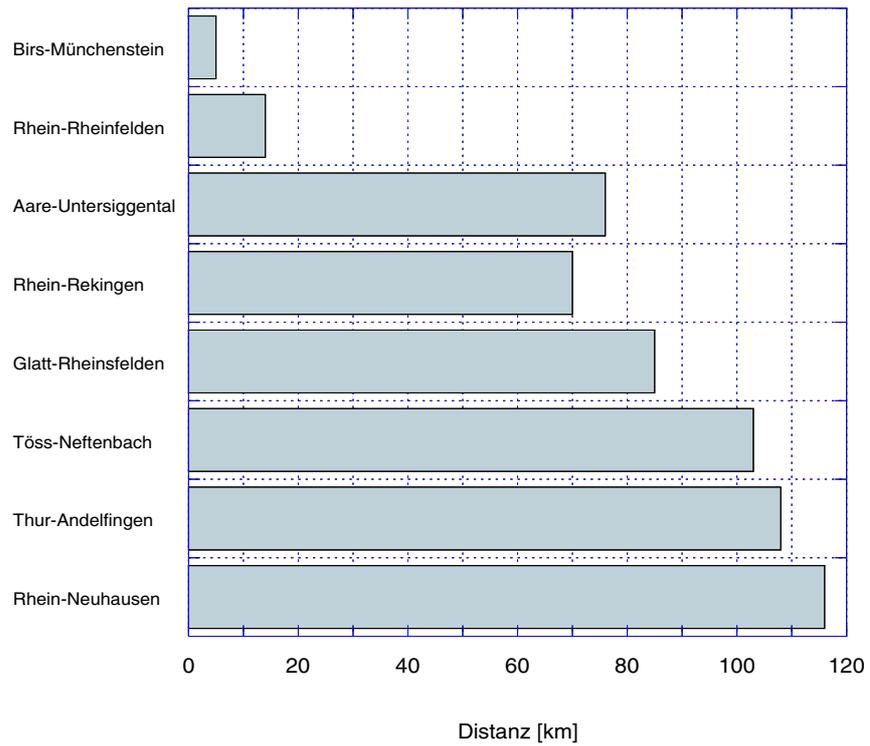


Abb 2.7: Das Hochwasser von 1999:

a) Die Hochwasserganglinien entlang des Rheins.

b) Die Hochwasserganglinien der wichtigsten Seitenflüsse.

**a) Distanzen zwischen Pegelstellen der Seitenflüsse und Rhein/Basel-Rheinhalde**



**b) Fließzeiten**

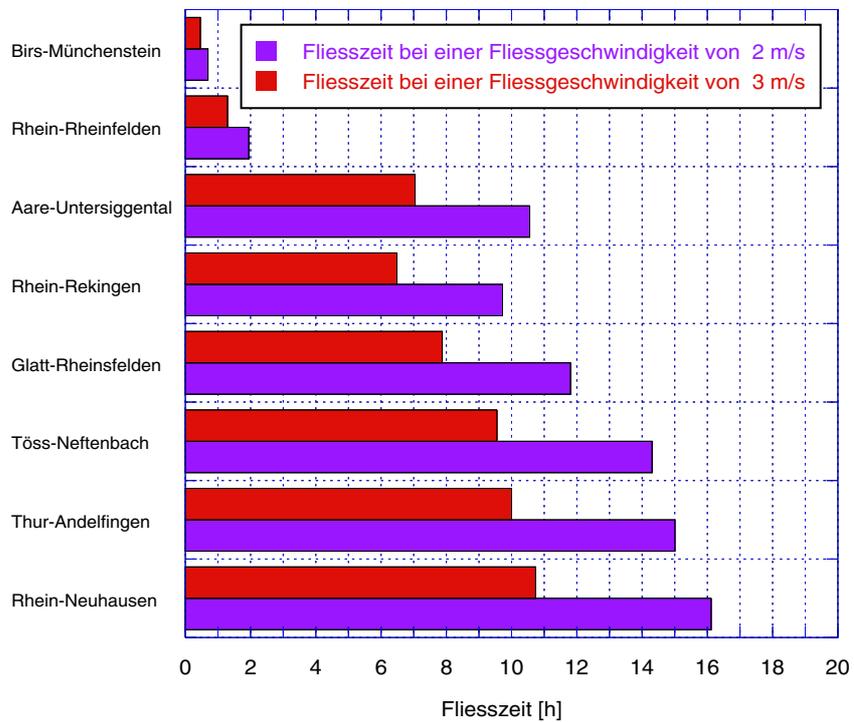
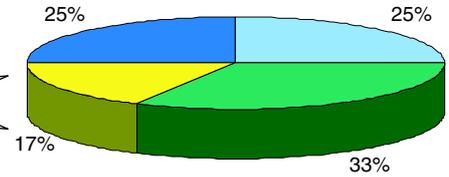
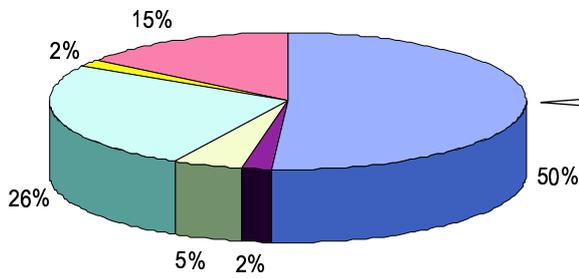


Abbildung 2.8: Die Distanzen zwischen den Pegelstellen der Seitenflüsse und der Station Rhein / Basel-Rheinhalde (a) und die daraus ermittelten Fließzeiten bei Fließgeschwindigkeiten von 2 und 3 m/s (b).

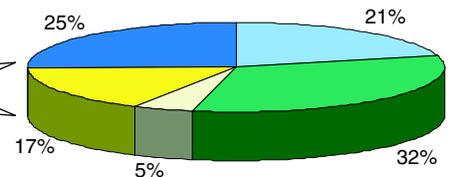
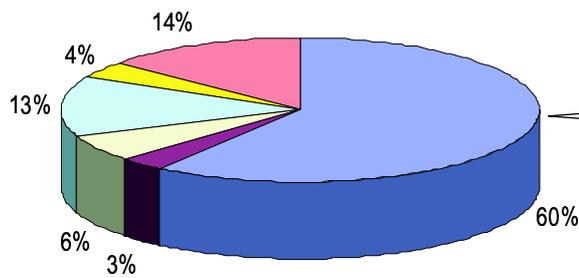
**RHEIN**

**AARE**

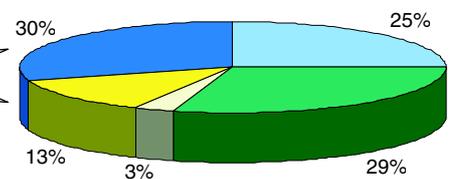
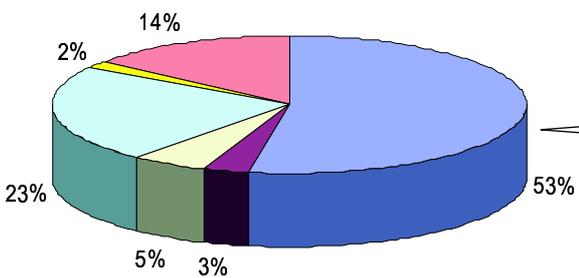
a) Hochwasser 1978



b) Hochwasser 1994



c) Hochwasser 1999



- Aare-Untersiggenthal
- Glatt-Rheinsfelden
- Töss-Feftenbach
- Thur-Andelfingen
- Deutsche Zuflüsse
- Bodenseeabfluss

- Limmat-Baden
- Reuss-Mellingen
- Wigger-Zofingen
- Emme-Wiler
- Aare-Brügg

Abbildung 2.9: Der Beitrag der Seitenflüsse zur Abflussspitze am Rhein in Rheinfelden. Links sind die Hauptzubringer, rechts sind die Seitenflüsse der Aare aufgegliedert.

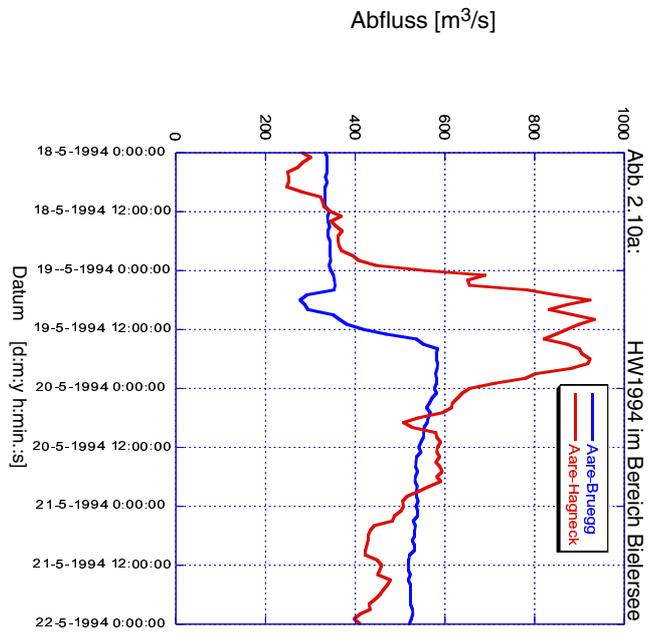


Abb. 2.10a: HW1994 im Bereich Bielersee

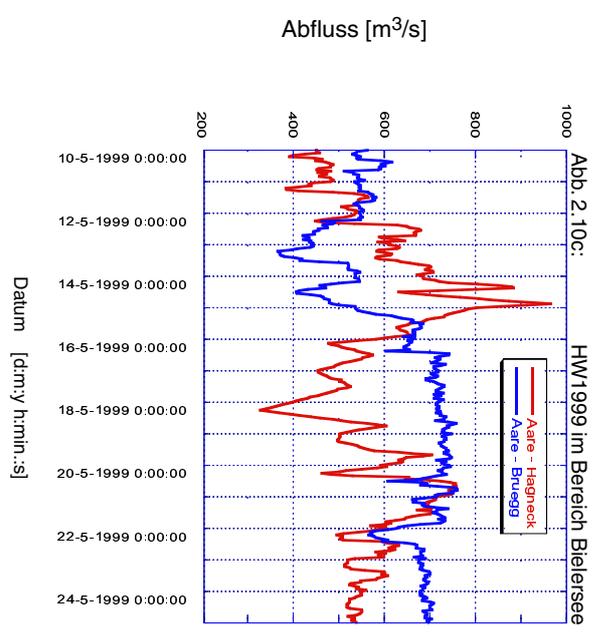


Abb. 2.10c: HW1999 im Bereich Bielersee

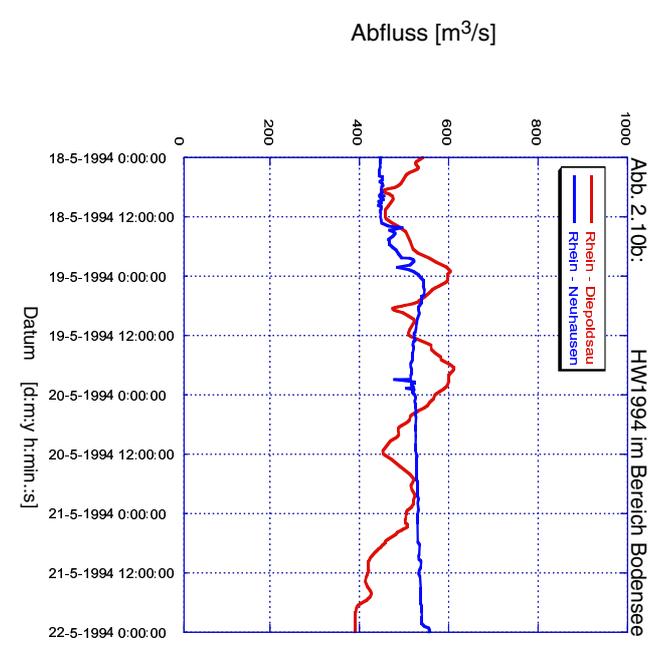


Abb. 2.10b: HW1994 im Bereich Bodensee

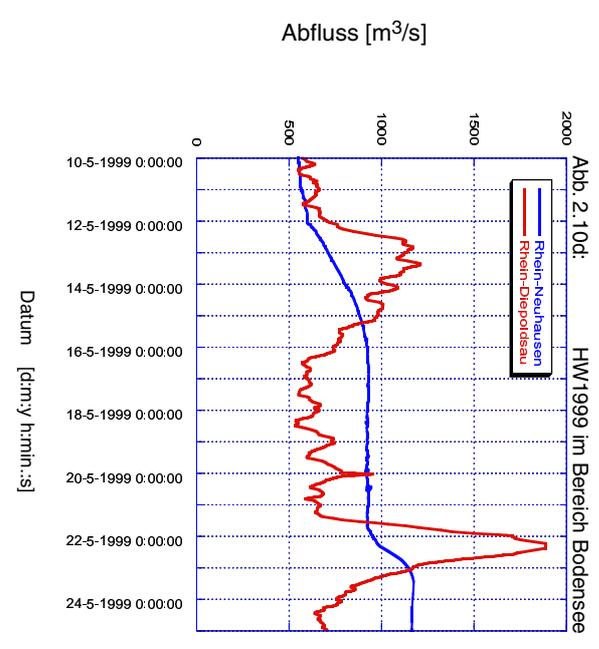
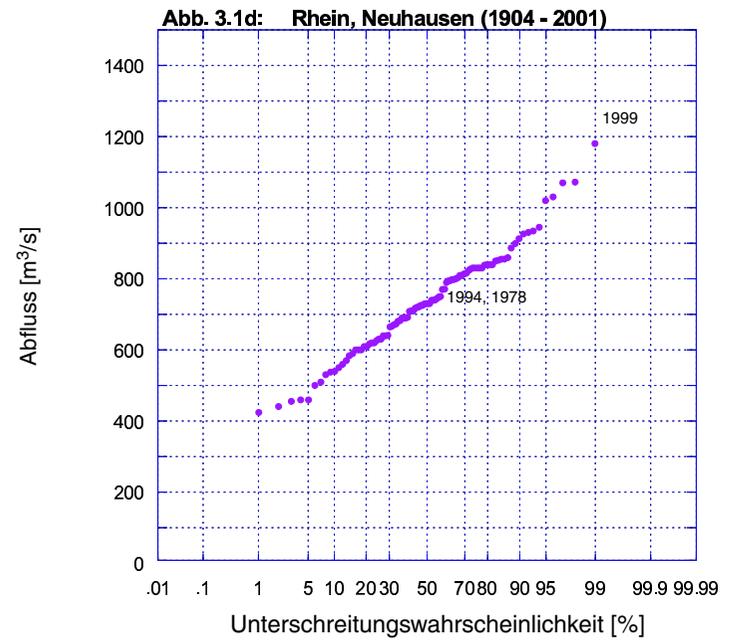
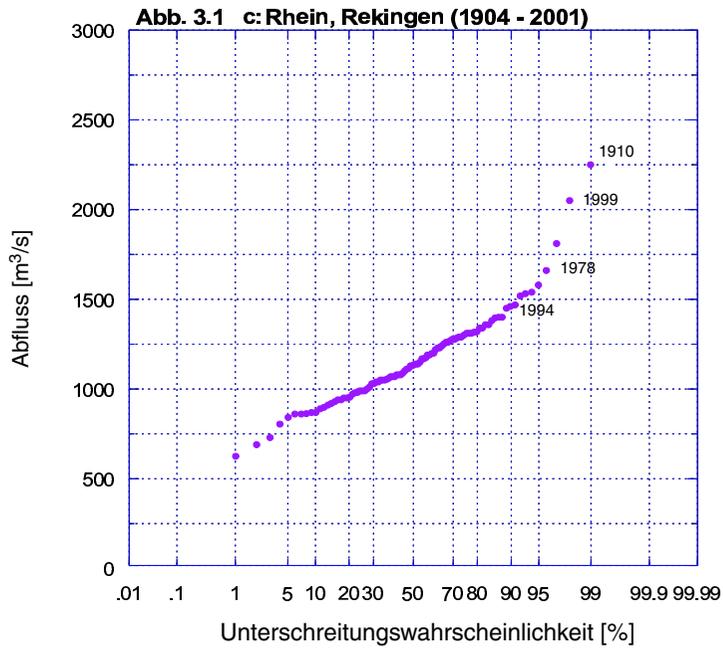
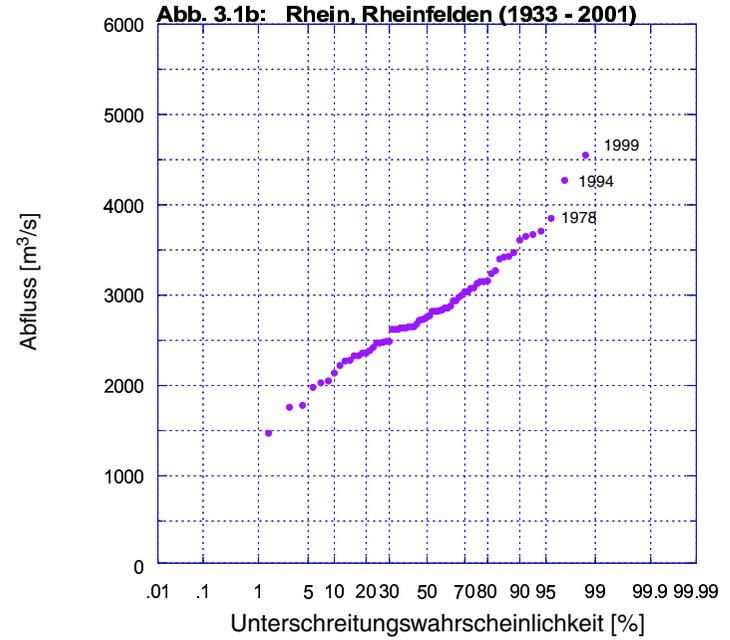
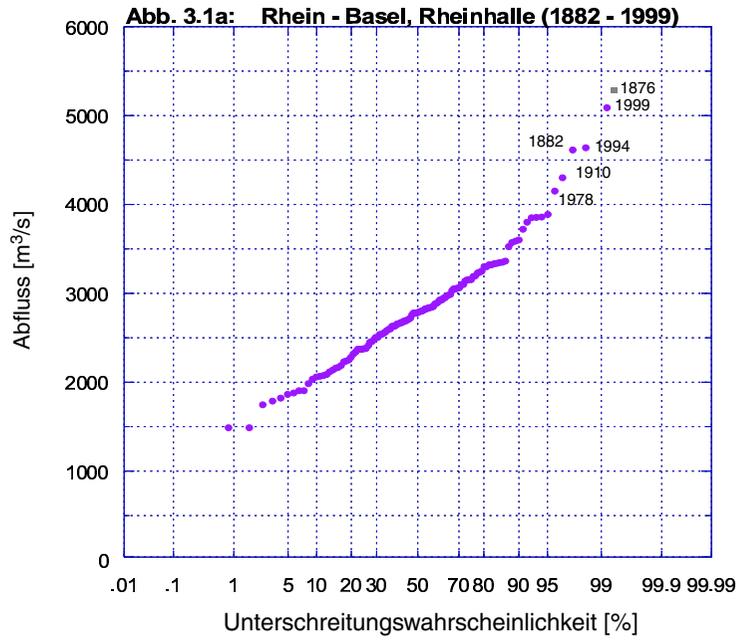
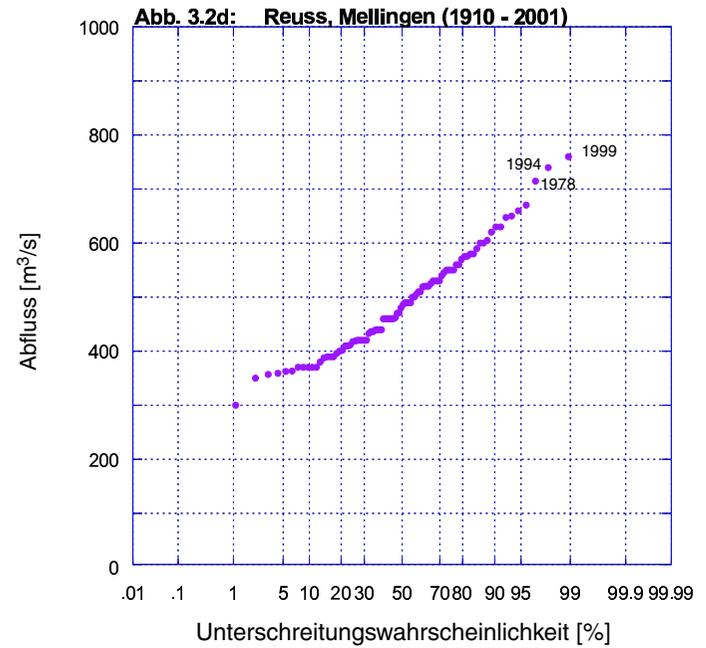
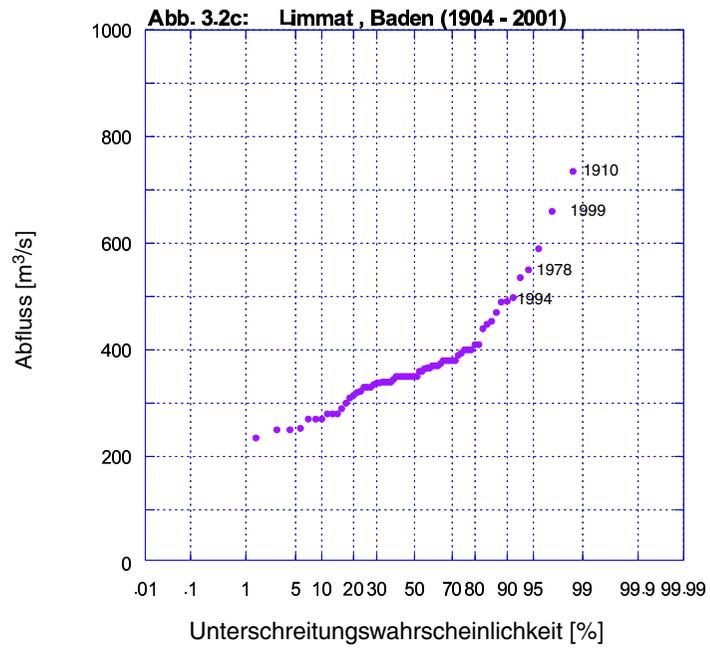
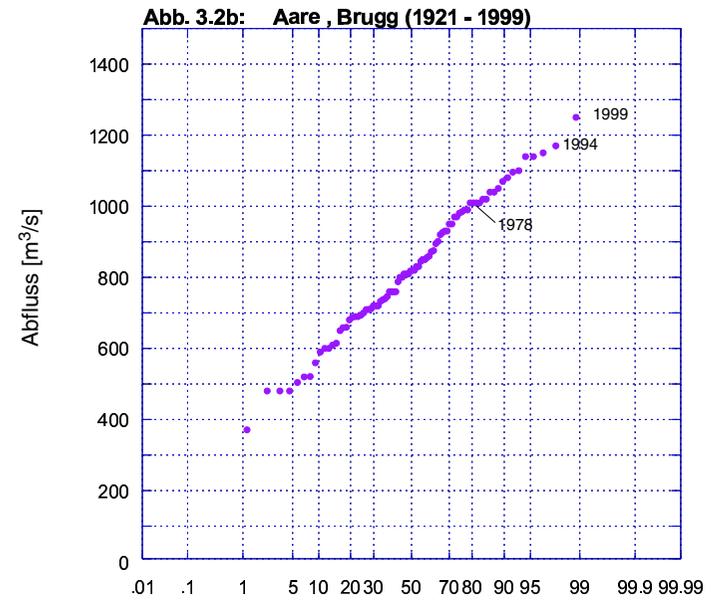
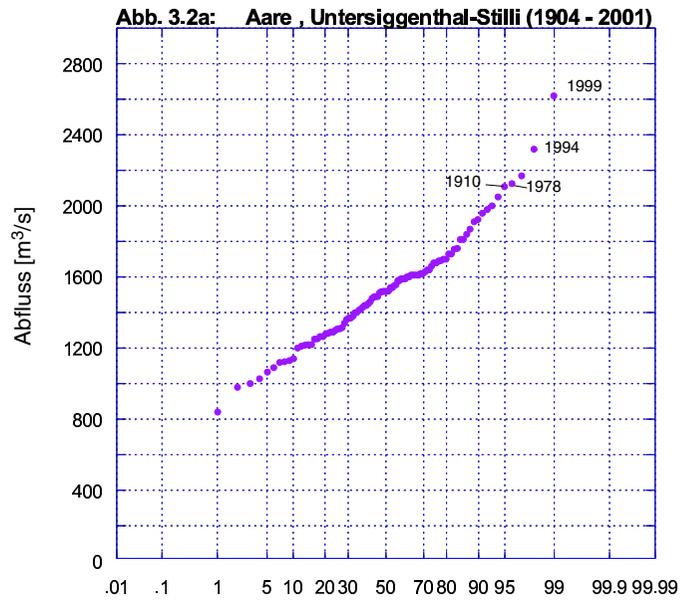


Abb. 2.10d: HW1999 im Bereich Bodensee

Abbildung 2.10: Zu- und Ausflüsse des Bielersees und des Bodensees bei den Hochwassern 1994 und 1999.

Abbildung 3.1: Frequenzdiagramme der jährlichen Abflussmaxima am Rhein.





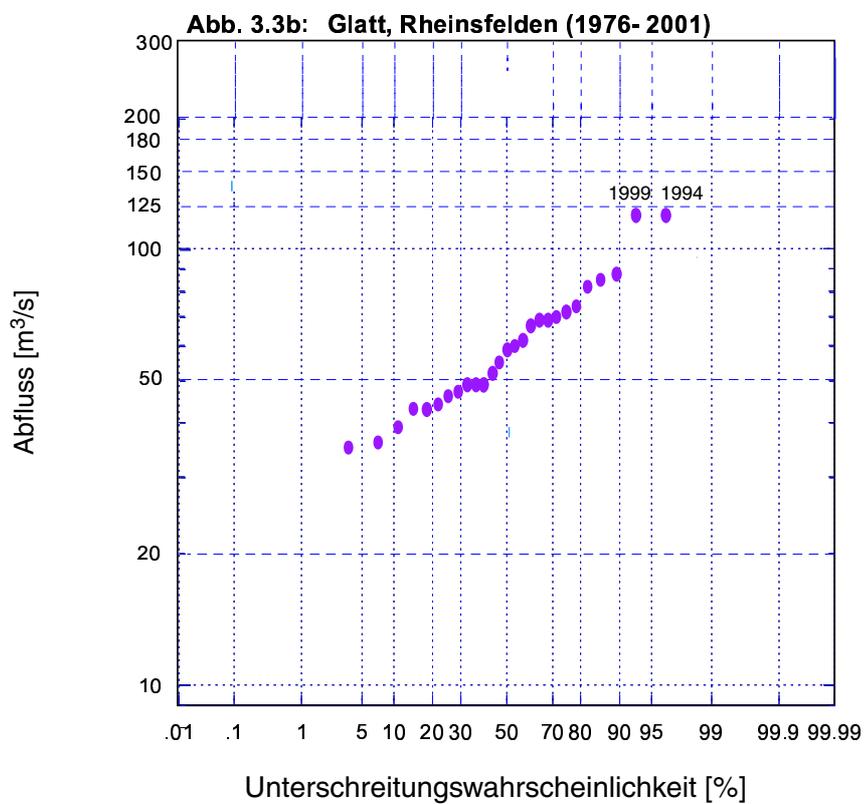
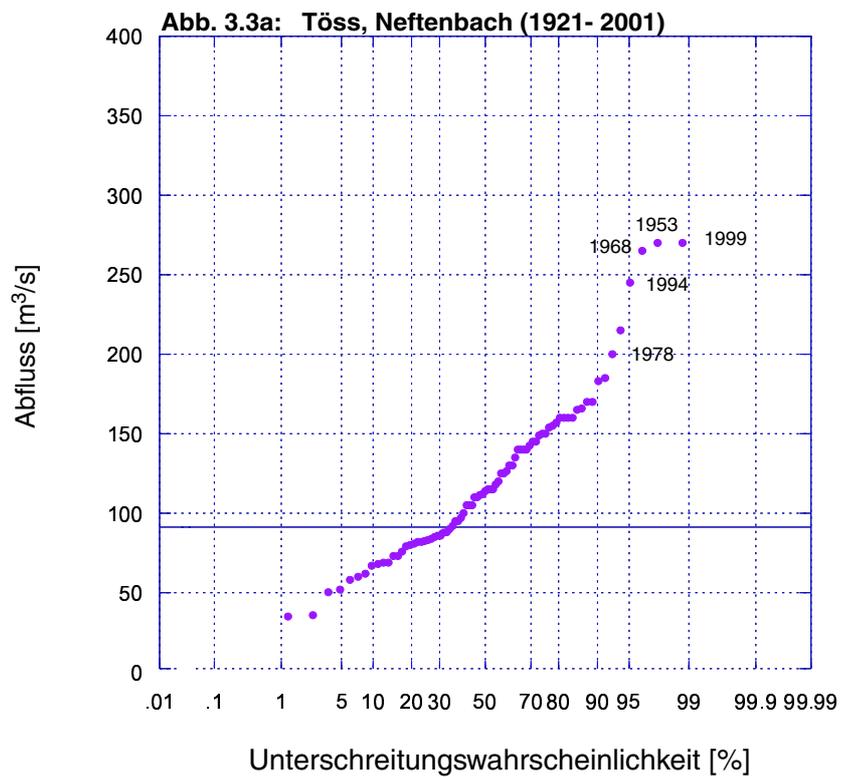


Abbildung 3.3: Frequenzdiagramme der jährlichen Abflussmaxima an Töss und Glatt.

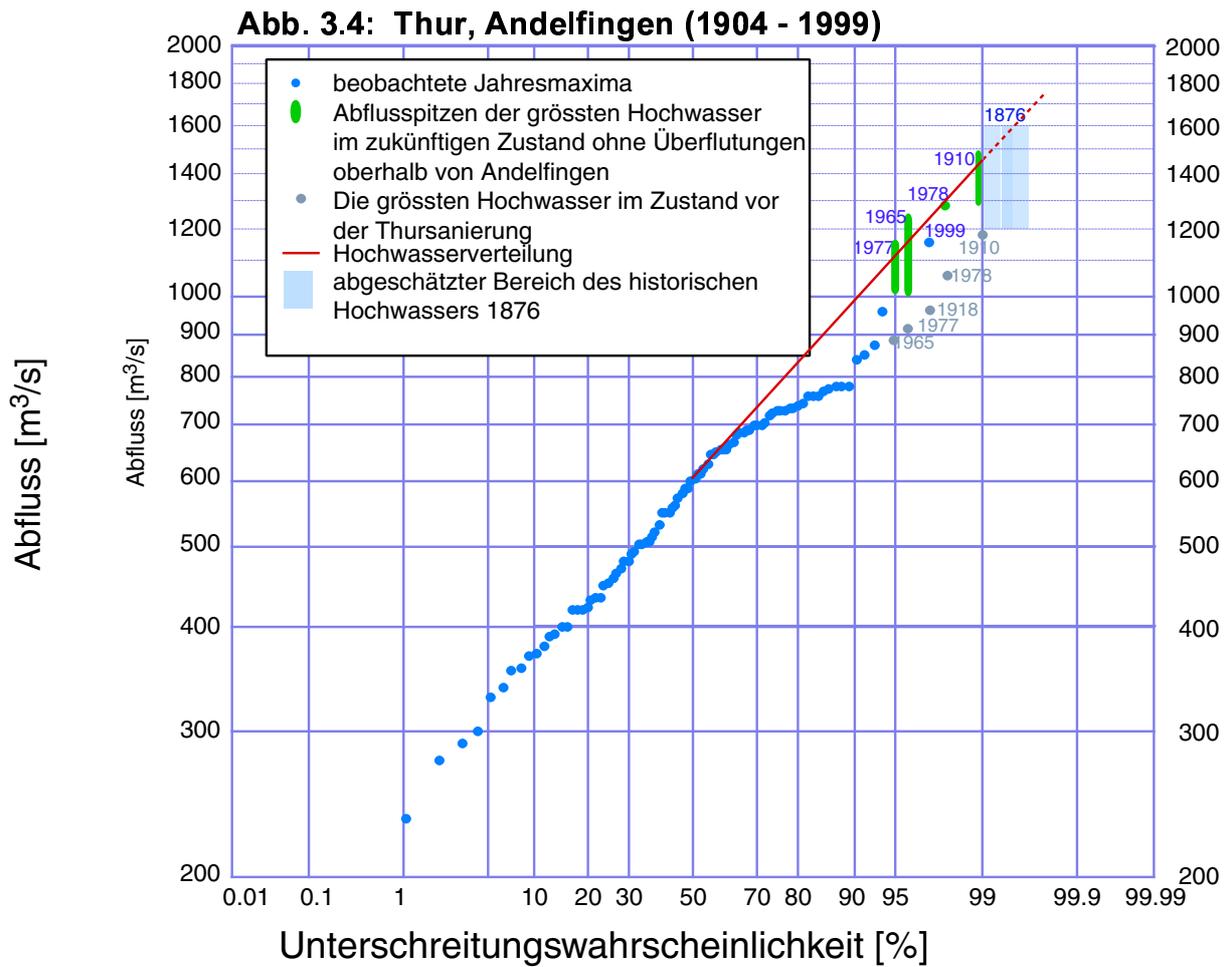
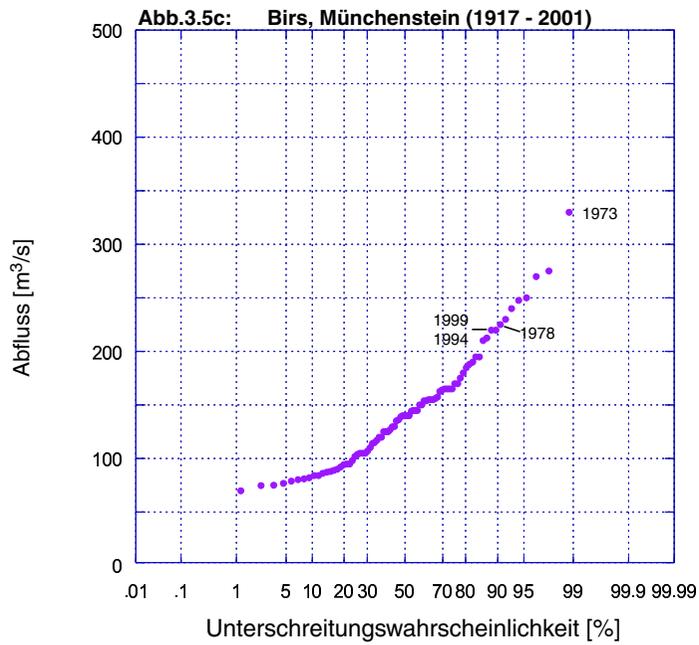
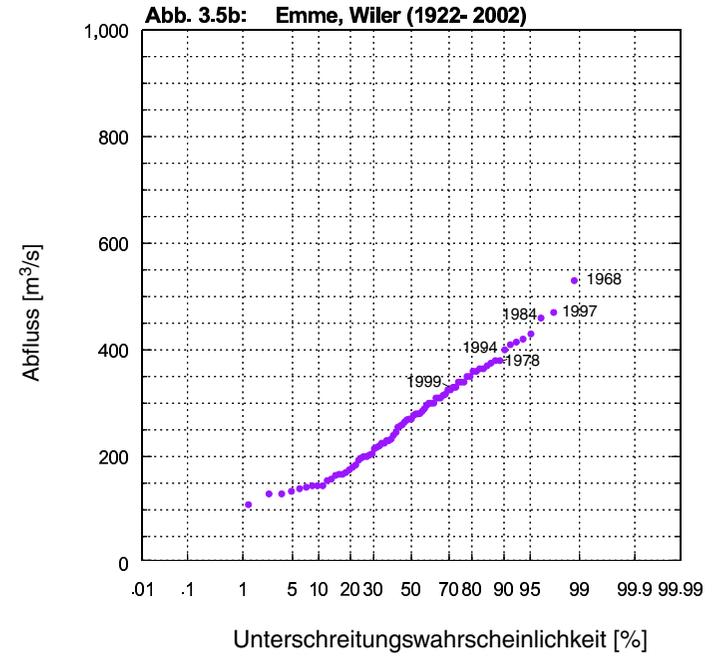
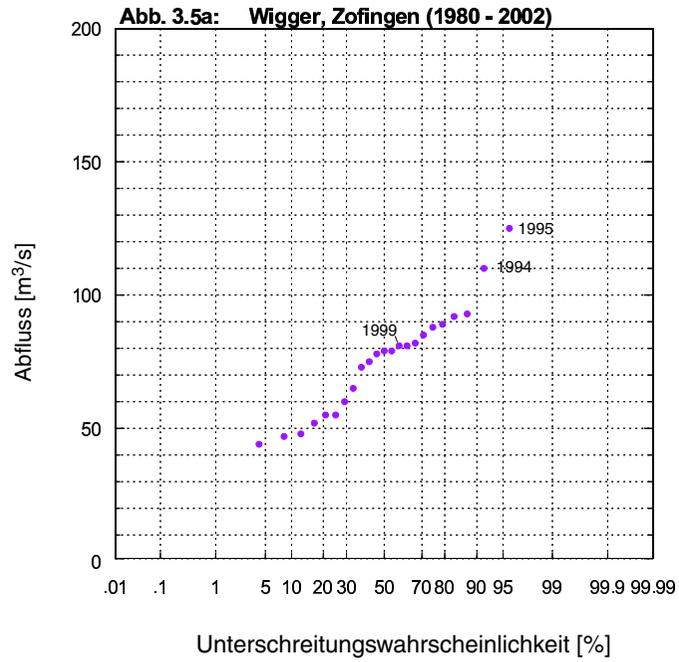


Abbildung 3.4: Frequenzdiagramm der jährlichen Abflussmaxima an der Thur (Horat & Scherrer AG, 2000).

Abbildung 3.5: Frequenzdiagramme der jährlichen Abflussmaxima an der Wigger, Emme und Birs.



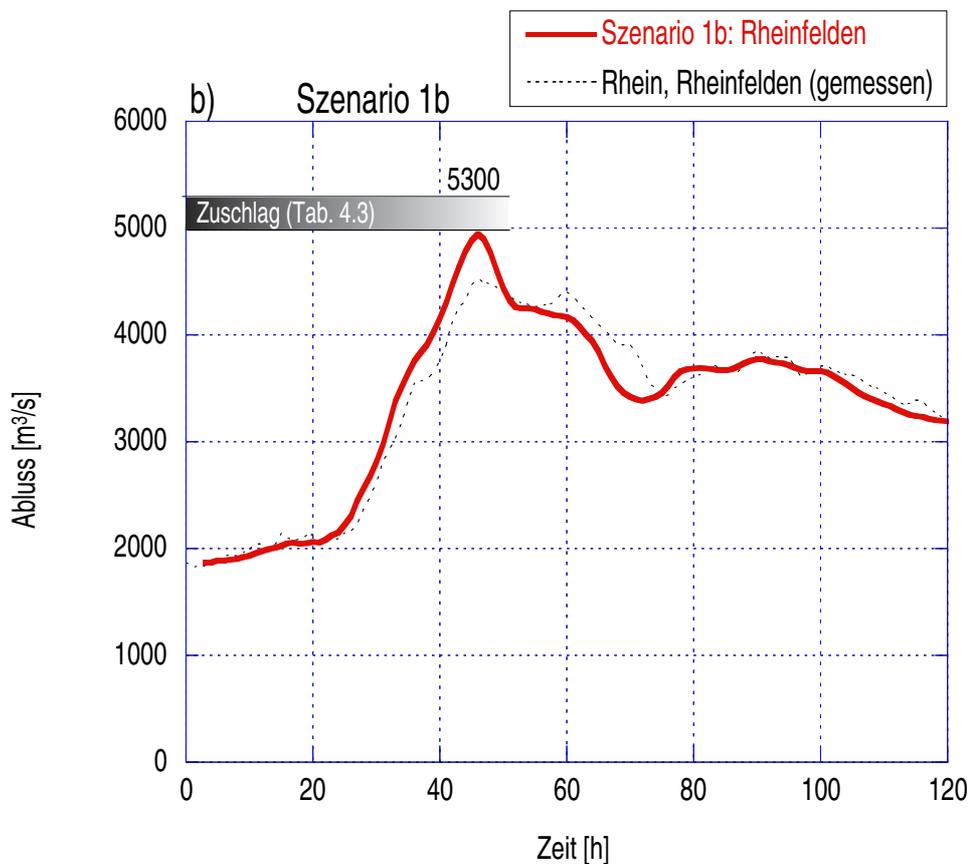
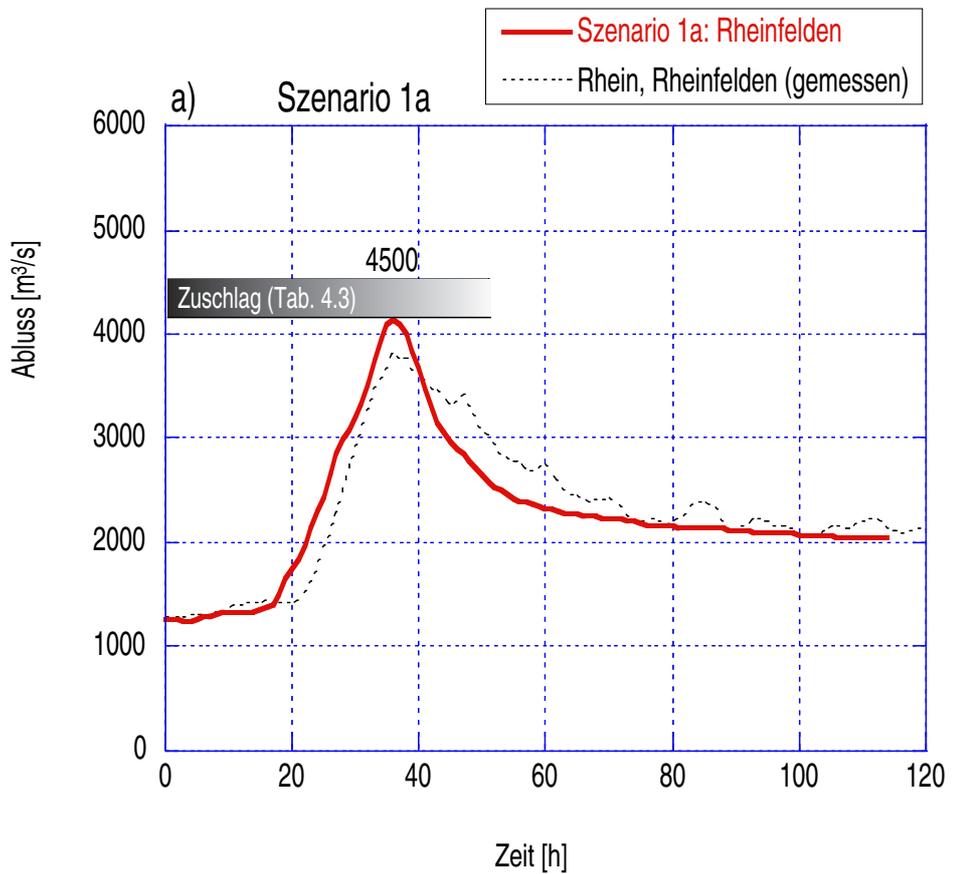


Abbildung 4.1:

Maximierung der Abflüsse des Rheins bei Rheinfelden durch zeitliche Verschiebung der Abflussganglinien der Hochwasser 1978 (Szenario 1a) und 1999 (Szenario 1b). Die Abflüsse in Basel wurden durch Addition der Beiträge von Wiese, Ergolz und von den nicht berücksichtigten Seitenflüssen ermittelt. Der Zuschlag ist als grauer Balken eingetragen (Details siehe Tabelle 4.3).

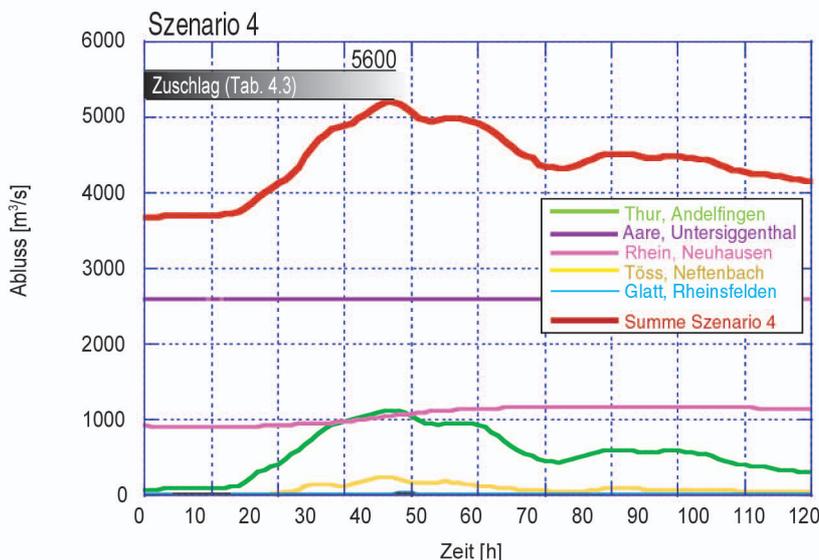
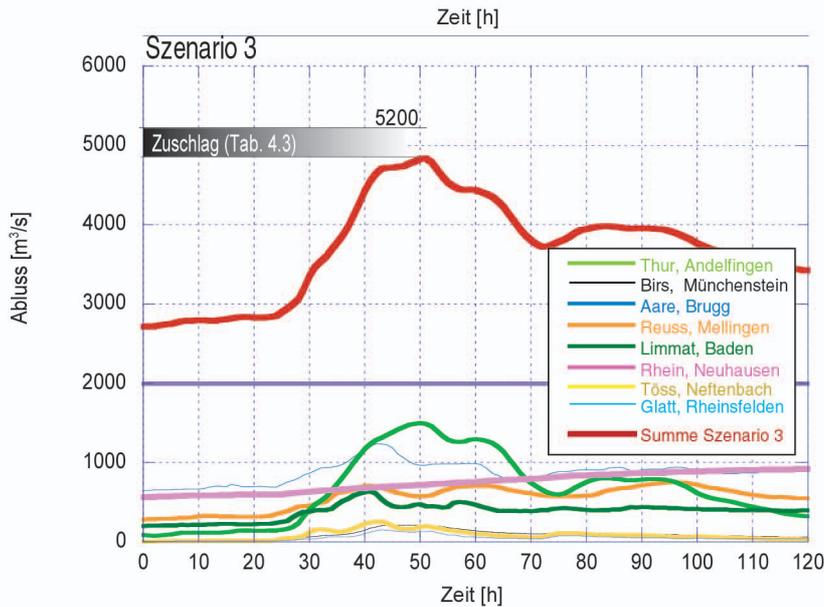
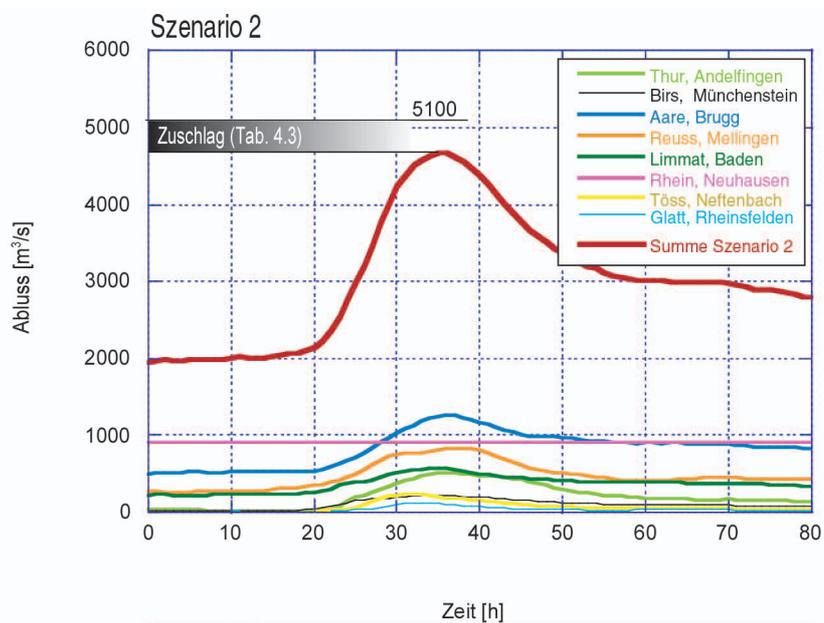


Abbildung 4.2a-c: Die Szenarien 2 - 4: (Details siehe Tabelle 4.3): Die Summe entspricht Rheinfeldern, der graue Balken markiert den Zuschlag von Ergolz, Wiese und des nicht berücksichtigten Rest Einzugsgebiets.

Szenario 2: Hohe Seestände (1999) und Niederschlagsituation wie im Mai 1994. Ein auf  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöhten Abfluss aus dem Bodensee und um je  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  auf das Niveau von 1999 gesteigerten Abflüssen aus Zürich-, Vierwaldstätter- und Bielersee.

Szenario 3: Hohe Seestände (19. Mai 1999), verstärkter Niederschlag in der Ostschweiz: Steigerung Thur auf  $1'500 \text{ m}^3/\text{s}$ , Töss und Glatt hoher Abfluss; Aare Untersiggental auf  $2'000 \text{ m}^3/\text{s}$

Szenario 4: Vertauschen der zeitlichen Abfolge der Niederschlagsereignisse vom Mai 1999:

Aare, Brugg:  $1'230$  statt  $830 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Thur:  $1'130$  statt  $920 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Töss:  $250$  statt  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

Reuss, Aare, Untersiggental:  $2'600$  statt  $2'000 \text{ m}^3/\text{s}$