Extreme Hochwasser des Rheins bei Basel : Herleitung von Szenarien

Autor(en): **Scherrer, Simon / Petrascheck, Armin / Hodel, Hanspeter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **98 (2006)**

Heft 1

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-939325

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Extreme Hochwasser des Rheins bei Basel – Herleitung von Szenarien

■ Simon Scherrer, Armin Petrascheck, Hanspeter Hodel

Wasserbau Hochwasserschutz

Zusammenfassung

Im Rhein bei Basel ging man Anfang der 90er-Jahre von einem 100jährlichen Hochwasser von 4500 m³/s aus. 1994 und 1999 wurde diese Marke übertroffen. Um zu beurteilen, wie viel Abfluss in Basel künftig zu erwarten ist, wurde eine Vorgehensweise gewählt, welche verschiedene Methoden kombiniert. In die Überlegungen gingen sowohl Erkenntnisse der Entstehungsweise grosser, beobachteter Hochwasser als auch die Beurteilung des Abfluss-Steigerungspotenzials der Seitenflüsse ein. Dies legte verschiedene verschärfende und aber auch dämpfende Faktoren offen. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise konnten Szenarien hergeleitet werden, mit denen sich die Grösse von Abflussspitzen im Rhein bei Basel eingrenzen lässt.

1. Einleitung

Am 18. Mai 1994 und 12. Mai 1999 ereigneten sich zwei grosse Rhein-Hochwasser. Im Mai 1994 wurde in Basel eine Abflussspitze von 4600 m³/s und im Mai 1999 eine von über 5000 m³/s registriert. Zwei weitere grosse Hochwasser wurden 1910 (4300 m³/s) und 1978 (4150 m³/s) beobachtet. *Bild 1* zeigt das Frequenzdiagramm, das aufgrund der Jahreshochwasser (1882 bis 1999) erstellt wurde. Vor dem Hochwasser von 1994 wurde von einem 100jährlichen Abfluss (HQ100) von 4500 m³/s ausgegangen. Heute liegt das statistisch ermittelte 100jährliche Hochwasser (HQ100) am Rhein in Basel bei ca. 5000 m³/s.

In Basel entstehen bei einem Abfluss von 4600 m³/s geringfügige Überschwemmungen. Auch bei einem Abfluss von 5000 m³/s lassen sich grössere Schäden noch mit einfachen Massnahmen verhindern. Flussabwärts von Basel wird mit Flutpoldern versucht, die Abflussspitze des Rheins zu brechen und so den Hochwasserschutz entlang der Rheinstrecke zu verbessern. Um mit solchen Poldern die optimale Wirkung zu erzielen, müssen sie im Hochwasserfall geschickt geflutet werden. In diesem Zusammenhang stellen sich u.a. folgende Fragen:

- Sind aus dem Einzugsgebiet des Rheins bei Basel wesentlich grössere Abflussspitzen als diejenigen von 1994 und 1999 zu erwarten?
- Wie häufig ist in Basel mit Abflüssen von mehr als 5000 m³/s zu rechnen?

Das Einzugsgebiet des Rheins bei Basel hat eine Fläche von 35921 km². Für die Untersuchungen wurden die verlässlicheren Abflussmessungen in Rheinfelden verwendet (Fläche: 34550 km²). *Bild 2* zeigt, dass das Einzugsgebiet mit grossen Höhenunterschieden, vielen Seitenflüssen und vielen Seen komplex aufgebaut ist. Der Anteil des Einzugsgebiets der Aare bei der Mündung in den Rhein (ohne Reuss und Limmat) beträgt 33% des Einzugsgebiets des Rheins in Basel. Ebenfalls ein Drittel beträgt das Einzugsgebiet des Bodensees. Der Anteil der Reuss beträgt ca. 9%, der Limmat ca. 7% und der Thur ca. 5%.

Um die oben aufgeworfenen Fragen zu beantworten, wurde die Entstehungsweise grosser Rhein-Hochwasser untersucht. Dabei interessierte, wie viel Abfluss die einzelnen Seitenflüsse bei den vergangenen Hochwassern zur Abflussspitze beitrugen und wie sich die Hochwasserscheitel der Seitenflüsse überlagerten. Wie dieses Zusammenspiel der verschiedenen Zuflüsse erfolgte, wurde für die gut dokumentierten grossen Hochwasser vom 8. August 1978, 18. Mai 1994 und vom 12. Mai 1999 zusammengestellt (Kap. 2). Darauf basierend wurden Szenarien entwickelt, welche die Steigerungsmöglichkeiten an den Seitenflüssen aufzeigen, und die Grösse extremer Hoch-

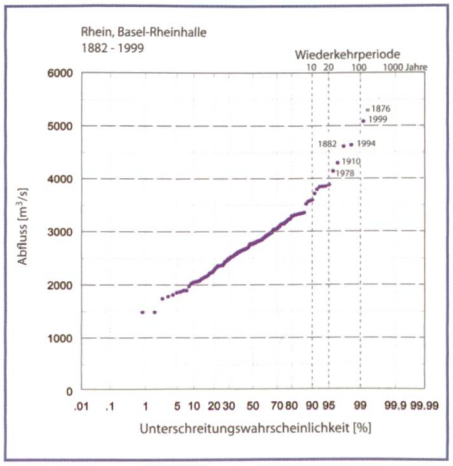

Bild 1. Hochwasserfrequenzdiagramm erstellt mit den Jahreshochwassern des Rheins bei Basel zwischen 1882 und 2002. Ebenfalls eingetragen ist das Hochwasser von 1876.

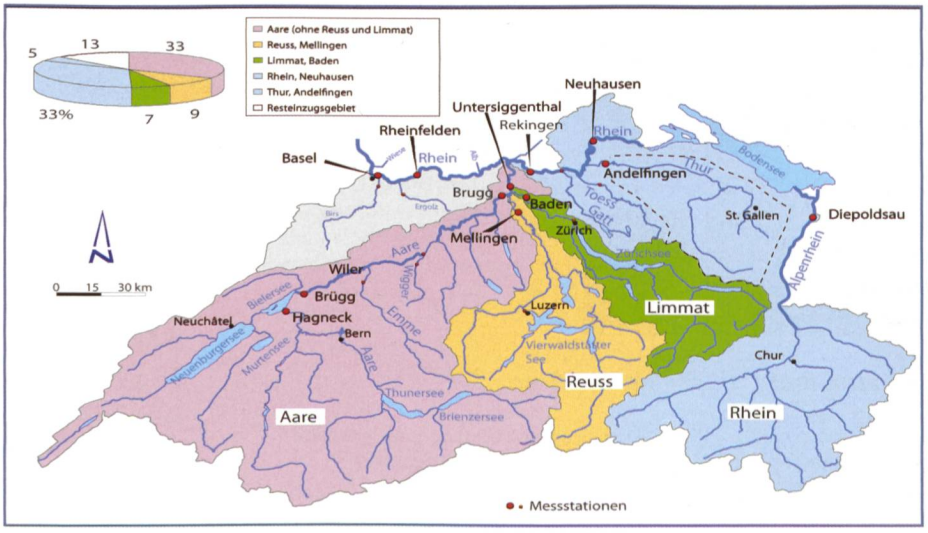

Bild 2. Das Schweizer Einzugsgebiet des Rheins bei Basel mit den verwendeten Abflussmessstationen und den prozentualen Flächenanteilen der wichtigsten Seitenflüsse.

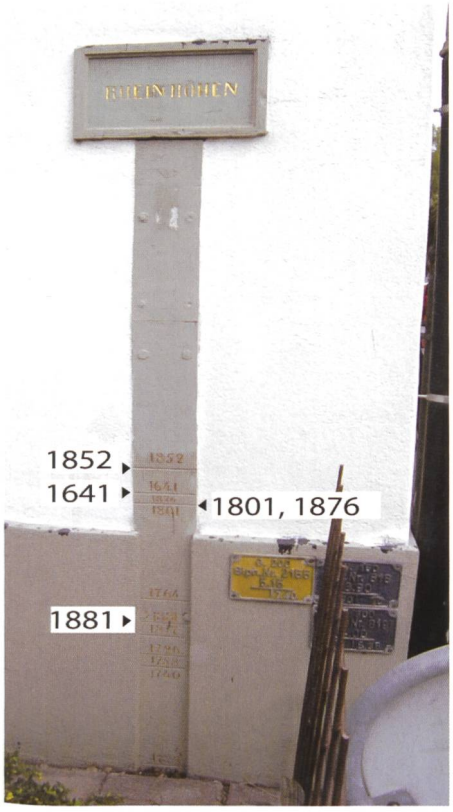

Bild 3. Hochwassermarken am Haus Oberer Rheinweg 93 in Basel.

wasser am Rhein abgeschätzt (Kap. 3).

Für die Wahl dieses Vorgehens waren folgende Überlegungen massgebend: Zwar verfügt der Pegel Rhein bei Basel über eine lange nur begrenzt beeinflusste Messreihe, so dass eine statistische Extrapolation möglich ist. Extrapolationen in den seltenen Bereich sind jedoch sehr unsicher, da diese auf der Annahme beruhen, dass sich die für die Abflussbildung massgebenden Faktoren auch im seltenen Bereich ähnlich verändern wie im bekannten, gemessenen Bereich. Dies ist für den Rhein jedoch nur bedingt der Fall, da zwischen den stark gedämpften Teilen des Einzugsgebietes oberhalb der Alpenrandseen und den ungedämpften Zwischeneinzugsgebieten unterhalb derselben unterschieden werden muss. Im Mittelland sind die Gewässer meist auf ein HQ100 ausgebaut. Wird dieses überschritten, ist mit stärkeren Retentionseffekten zu rechnen, als die Messreihe aufzeigt. So müssen sich statistische und hydrologische Methoden ergänzen, wenn es gilt, Extremwerte zu finden.

2. Hochwassergeschichte

2.1 Überblick

Die Hochwassergeschichte des Rheins bei Basel lässt sich über einen Zeitraum von etwa 400 Jahren zurückverfolgen. An einem Haus am Oberen Rheinweg 93 in Basel sind Hochwassermarken aufgezeichnet. Die älteste und zweithöchste Marke stammt aus dem Jahre 1641 *(Bild 3)*. Ein leicht höherer Wasserstand wurde im Jahre 1852 registriert, dem ein Abfluss von ca. 5600 m^3/s zugeordnet wurde.

Bild 4 zeigt, dass in Basel seit 1808 der Pegelstand des Rheins systematisch erfasst wird. Im 19. Jahrhundert traten zwei Hochwasser mit Abflussspitzen von mehr als 5000 m^3/s auf und zwei mit mehr als 4500 m^3/s. Im 19. Jahrhundert wurden im Rheineinzugsgebiet verschiedene Wasserbauprojekte realisiert, welche ins Abflussverhalten des Rheins und seiner Seitenflüsse eingriffen. Das diesbezüglich wichtigste Projekt war die erste Juragewässerkorrektion (JGK I: 1868–1887). Die Aare wurde damals neu in den Bielersee geleitet, was ihr Abflussverhalten im Unterlauf bei Hochwasser massgeblich beeinflusste. *Bild 4* zeigt, dass im 20. Jahrhundert in Basel Abflüsse von über 5000 m^3/s kaum mehr auftraten und 4000 m^3/s nur noch 1910, 1978, 1994 und 1999 überschritten wurden. Die drei letzteren Ereignisse sind bezüglich Abfluss- und Niederschlagsdaten gut dokumentiert und eignen sich deshalb für weitergehende Auswertungen.

2.2 Hochwasser 1978, 1994 und 1999

2.2.1 Hochwasser vom 8. August 1978

Die räumliche Niederschlagsverteilung *(Bild 5a)* zeigt, dass beim Hochwasser 1978 das Einzugsgebiet des Rheins von einem ausgedehnten Niederschlag von 80 bis 140 mm in zwei Tagen getroffen wurde, bis zu 90 mm fielen während eines Tages (Aebischer, 1997). Wesentlich für den Abfluss des Rheins bei Basel ist, dass das Gebiet unterhalb der Alpenrandseen und das Einzugsgebiet der Thur grosse Niederschlagsmengen erhielten.

Zur Mittagszeit des 8. August 1978 wurde in Rheinfelden die Abflussspitze von 3800 m^3/s (Basel 4150 m^3/s) erreicht. Die Anstiegszeit betrug etwa 14 h, an den Seitenflüssen war die Anstiegszeit ähnlich lang. Die Thur hatte damals eine zweigipflige Abflusskurve und erreichte ihr Maximum erst, nachdem die Pegel der übrigen Flüsse bereits wieder gesunken waren.

2.2.2 Hochwasser vom 18. Mai 1994

Die grössten Niederschlagsmengen *(Bild 6a)* konzentrierten sich am 18. Mai 1994 im Dreieck Basel-Luzern-Bodensee. Während etwa 15 h fielen zwischen 60 und 100 mm Niederschlag. Der Anstieg des Rheins dauerte wiederum etwa 15 h und die Abflussspitze in Rheinfelden betrug 4250 m^3/s (Basel: 4640 m^3/s) *(Bild 6b)*.

2.2.3 Hochwasser vom 12. Mai 1999

In drei Tagen fielen im Raum Bern, Zentralschweiz und Ostschweiz zwischen 80 und 130 mm, in 5 Tagen bis zu 180 mm Niederschlag *(Bild 7a)*. In Rheinfelden wurde die Abflussspitze von 4530 m^3/s (Basel: 5090 m^3/s) nach einem Anstieg von 20 Stunden erreicht. Im Vorfeld hatte die Schmelze der grossen Schneemassen im Alpenraum zu hohen Wasserständen in den Seen geführt, was verhältnismässig hohe Basisabflüsse zur Folge hatte. Dies verstärkte sich noch deutlich nach dem ersten Hochwasser am 12. Mai, so dass

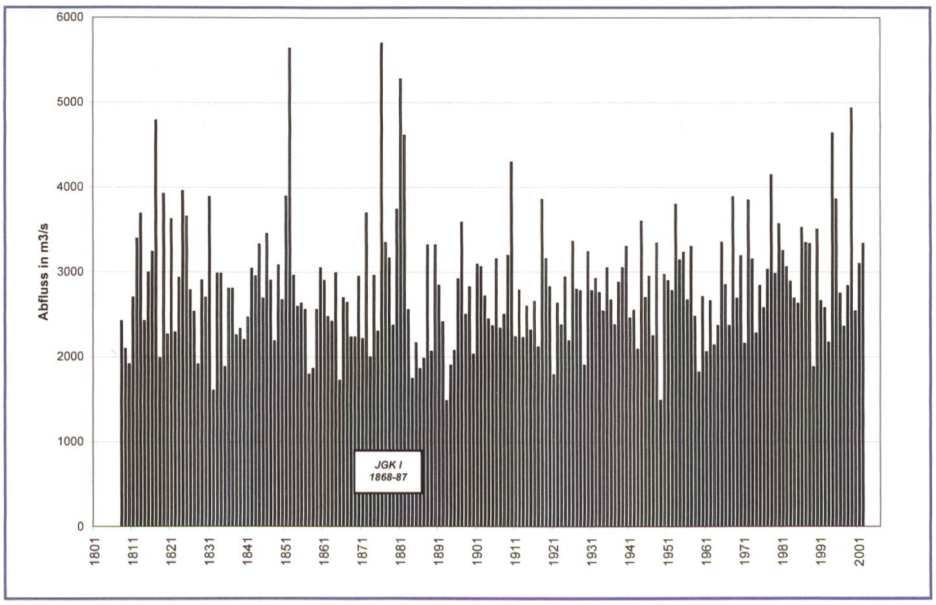

Bild 4. Jahreshochwasser im Rhein bei Basel (1803–2002). Eingetragen ist auch der Zeitpunkt der ersten Juragewässerkorrektion (JGK I) (zur Verfügung gestellt von Bruno Schädler, BWG).

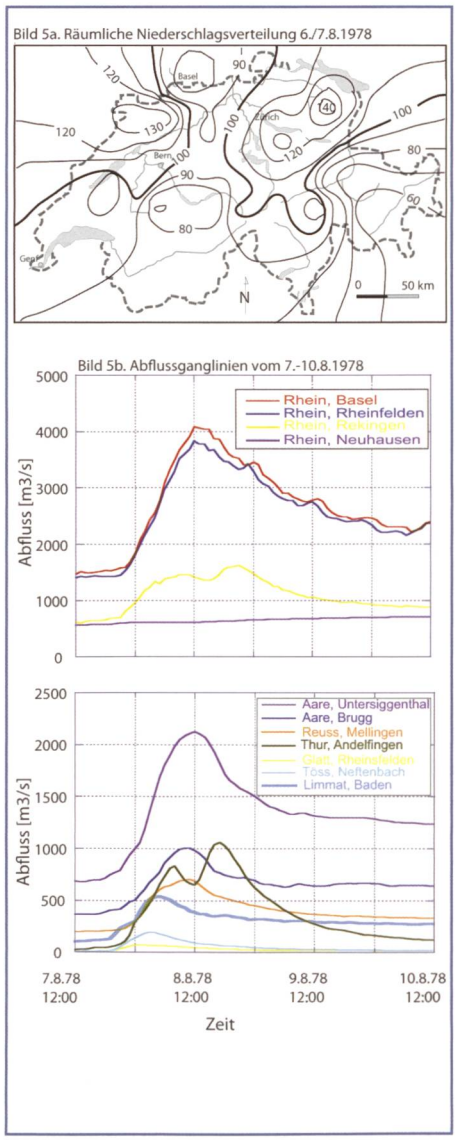

Bild 5a, b. Das Hochwasser vom 8. August 1978 am Rhein. a) Räumliche Niederschlagsverteilung vom 6. und 7. August 1978 nach Aebischer (1977), leicht verändert. b) Die Abflussganglinien entlang des Rheins und an den Seitenflüssen.

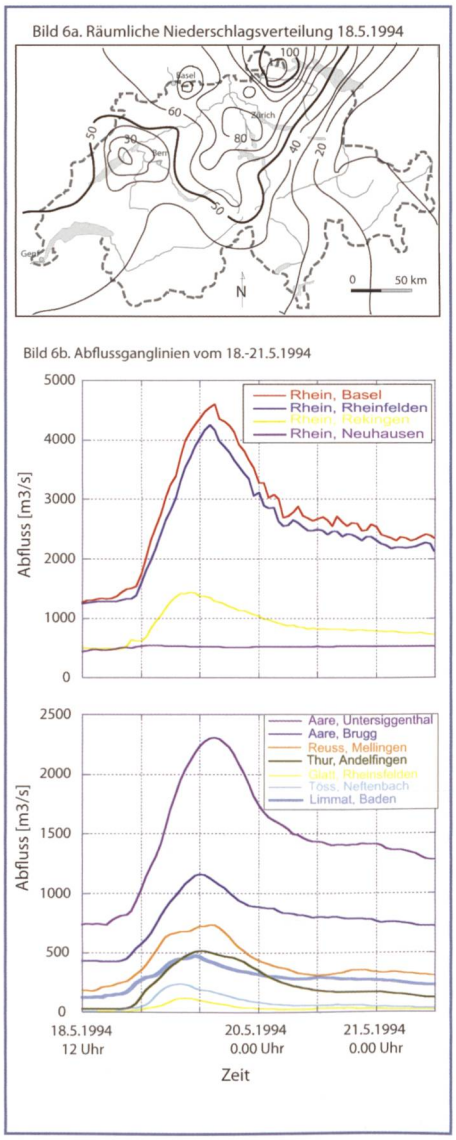

Bild 6a, b. das Hochwasser vom 18./19. Mai 1994 am Rhein. a) Räumliche Niederschlagsverteilung vom 18. Mai 1994 nach Aebischer /1997). b) Die Abflussganglinien entlang des Rheins und an den Seitenflüssen.

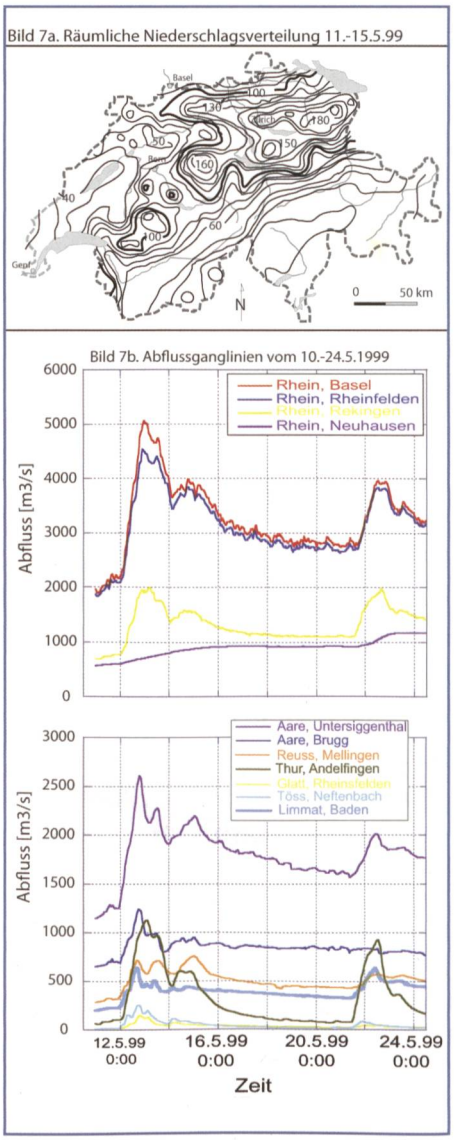

Bild 7a, b. Das Hochwasser vom 12./13. Mai 1999 am Rhein. a) Räumliche Niederschlagsverteilung vom 11. bis 15. Mai 1999 nach Forster et al. 2000, verändert. b) Die Abflussganglinien entlang des Rheins und an den Seitenflüssen vom 11. bis 24. Mai 1999.

der Basisabfluss der Aare bei der zweiten Hochwasserwelle zu Pfingsten fast doppelt so hoch war wie 1978 oder 1994.

2.2.4 Hochwasser vom 22./23. August 2005

Am 23. August 2005 wurde in Basel ein Abfluss von 3400 m^3/s beobachtet. Die ergiebigen Starkniederschläge konzentrierten sich jedoch weitgehend in den Voralpen und Alpen, während unterhalb der Seen die Niederschlagsmengen stark abnahmen.

2.3 Fliesszeiten

Bei der Hochwasserentstehung in Einzugsgebieten mit vielen Seitengewässern stellt sich die Frage, wie sich die Abflussganglinien aus den Teileinzugsgebieten überlagern. Dies hängt einerseits mit der räumlich zeitlichen Niederschlagsverteilung zusammen und andererseits mit der Zeit, welche das Wasser benötigt, um an einen bestimmten Punkt im Hauptgewässer zu gelangen. Diese Fliesszeiten wurden am Rhein untersucht. Die Fliessgeschwindigkeiten im Rhein liegen bei Hochwasser durchschnittlich zwischen 2 und 3 m/s (VAW, 1990 und 1992). Die Distanzen zwischen Basel und dem Pegel Thur-Andelfingen (ca. 115 km) resp. dem Pegel Aare-Untersiggenthal (ca. 75 km) unterscheiden sich um 40 km. Bei Geschwindigkeiten von 2 bis 3 m/s differieren die Fliesszeiten nur um 4 bis 5 h. Da sich an den Seitengewässern die Abflüsse einige Stunden auf hohem Niveau halten, tritt bei so kurzen Fliesszeiten eine Überlagerung der Abflussspitzen ein.

2.4 Beiträge der Seitenflüsse und Seeeinfluss

2.4.1 Beiträge zur Abflussspitze in Rheinfelden

Wie viel die wichtigsten Seitenflüsse zur Abflussspitze des Rheins beitragen, zeigt *Bild 8* für die betrachteten Hochwasser. Die Aare (Aare-Untersiggenthal) machte bei den drei untersuchten Hochwassern mindestens 50% der Abflussspitze des Rheins bei Rheinfelden aus, beim Hochwasser 1994 war es sogar 60%. Die Abflussspitze der Aare setzt sich aus der Limmat (21–25%), der Reuss (29–33%) und dem regulierten Ausfluss des Bielersees (25–30%) zusammen. Die Emme leistete mit 13–17% einen eher untergeordneten Beitrag zur Abflussspitze der Aare.

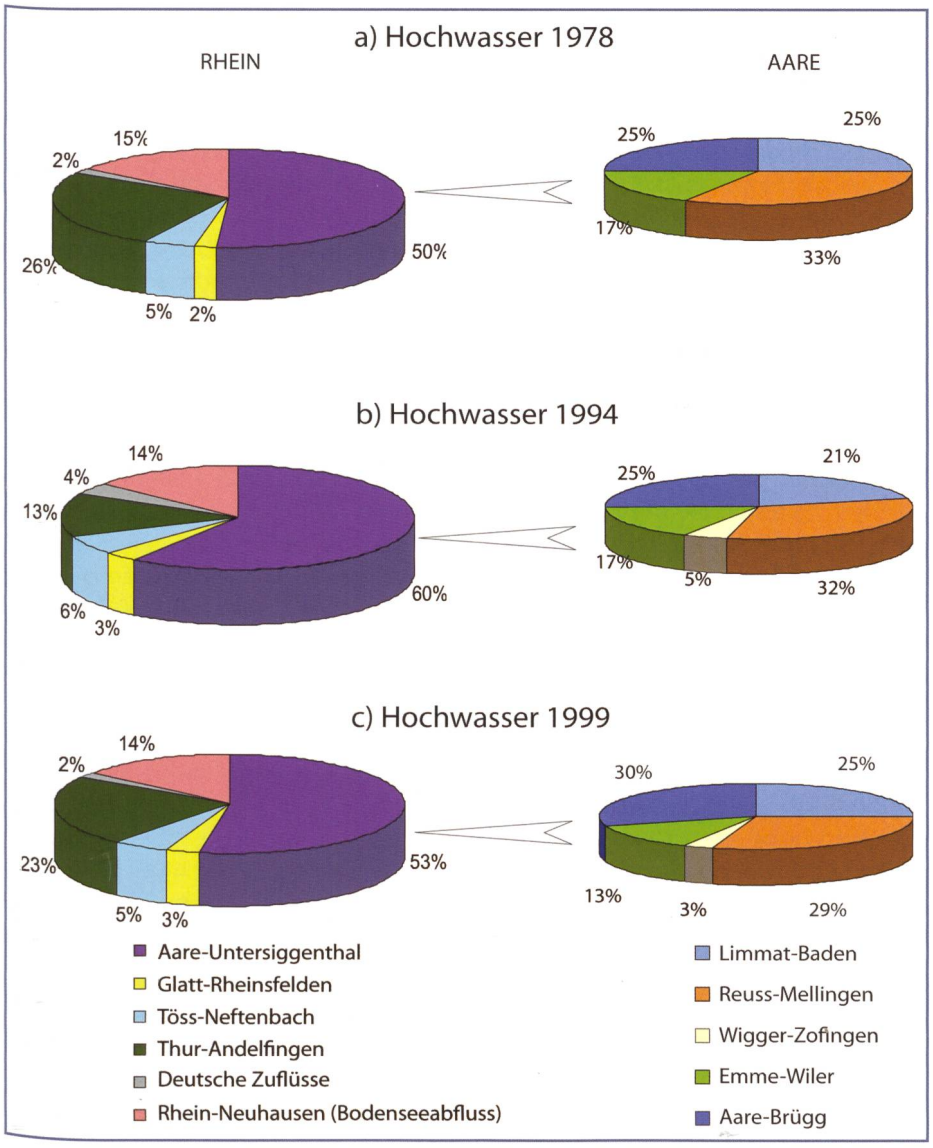

Bild 8. Der Beitrag der Seitenflüsse zur Abflussspitze am Rhein in Rheinfelden. Links sind die Hauptzubringer, rechts die Seitenflüsse der Aare aufgegliedert.

Der Bodenseeausfluss machte jeweils ca. 15% der Abflussspitze des Rheins bei Rheinfelden aus. Die Thur (Flächenanteil am Einzugsgebiet des Rheins bis Rheinfelden: 5%) trug hingegen jeweils zwischen 13 und 26% zur Abflussspitze des Rheins bei, was beachtlich ist.

2.4.2 Einfluss der Seen auf die Hochwasserentstehung

Beim Abflussvorgang des Rheins gibt es verschiedene Dämpfungsmechanismen. Durch Überflutungen können Abflussspitzen gedämpft werden. Bei grossen Flüssen sind allerdings beachtliche Überflutungszonen mit riesigen Rückhaltevolumen notwendig, damit eine wesentliche Brechung der Abflussspitze erfolgt. Eine detaillierte Untersuchung des Einflusses von Überflutungen auf die Grösse der Hochwasser des Rheins bei Basel hätte den Rahmen dieser Untersuchung gesprengt.

Abflussspitzen werden auch gebrochen, wenn Flüsse durch Seen fliessen. *Bild 2* zeigt, dass diese günstige Situation bei vielen Seitenflüssen des Rheins vorliegt. Brienzer-, Thuner- und Bielersee verformen die Abflussspitze der Aare wesentlich. Zusätzlich zu dieser schon dämpfenden Wirkung des Sees kann der Ausfluss mit dem Wehr in Port reguliert werden. Bielersee, Neuenburgersee und Murtensee bilden dabei ein grosses, kommunizierendes Rückhaltesystem mit einer Fläche von 280 km^2. Mit über 540 km^2 Fläche stellt der unregulierte Bodensee noch einen wesentlich grösseren Rückhalteraum dar. Schon ein geringes Ansteigen des Seespiegels von wenigen Dezimetern ergibt riesige Wasservolumen. Am Beispiel des Hochwassers 1994 und 1999 wird die Dämpfung durch diese beiden Systeme aufgezeigt *(Bild 9a, b* und *c)*.

In *Bild 9a* ist das Hochwasser 1994 am Bielersee mit der Abflussganglinie oberhalb des Sees in Hagneck und unterhalb des Sees in Brügg dargestellt. Die Abflussspitze der Aare wurde damals durch die Jurarandseen von ca. 900 m^3/s auf unter 600 m^3/s gedrosselt. Auch zwischen 12. und 14. Mai 1999 *(Bild 9)* wurde viel Wasser in den Jurarandseen zurückgehalten, so dass die Abflusswelle erst verzögert am 15. Mai Richtung Rhein floss. Durch die aktive Regulierung wurde ein Zufluss von knapp 1000 m^3/s zeitweilig auf 400 m^3/s gedrosselt.

Die erste Abflussspitze im Alpenrhein gemessen in Diepoldsau (12./13. Mai 1999) von 1200 m^3/s wurde durch den Bodensee stark gedrosselt und es entstand eine starke Abflussverzögerung. Die zweite Hochwasserwelle in Diepoldsau vom 22. Mai 1999 (ca. 1900 m^3/s) wurde trotz hohem Seestand noch auf 1180 m^3/s gedämpft und wurde ebenfalls wesentlich verzögert abgegeben. Eine kleinere, aber vergleichbare Wirkung hatten die übrigen Schweizer Seen, wie z. B. Zürichsee oder Vierwaldstättersee.

2.4.3 Charakteristik der Seeausflüsse bei grossen Hochwassern

Die Seen brechen zwar die Abflussspitzen, geben aber bei Hochwassersituationen über längere Zeit grosse Abflussmengen ab. Der Bodenseeausfluss erreichte beispielsweise im Jahre 1999 erst am 23. Mai das Maximum von 1180 m^3/s. Ein Abfluss von 1100 m^3/s wurde dann aber während 24 Tagen und 1000 m^3/s sogar während 34 Tagen überschritten. Beim Vierwaldstättersee und den Jurarandseen sind diese Zeitspannen kürzer. Insgesamt sind aber diese Zeiträume so lang, dass ein zweiter Starkniederschlag das Einzugsgebiet bei hohen Seeständen treffen kann. *Tabelle 1* zeigt den Vergleich der Seeausflüsse vor den beiden Hochwasserwellen von 1999. Vor der zweiten Hochwasserwelle (19. Mai 1999) flossen aus den Seen insgesamt 800 m^3/s mehr ab als vor der ersten Hochwasserwelle (10. Mai. 1999). Zu beachten ist, dass der Bodensee seinen Höchststand erst am Ende des Niederschlagsereignisses erreichte, als die Abflüsse in den Zwischeneinzugsgebieten bereits zurückgegangen waren.

2.5 Die Bedeutung des Hochwassers 1999 in der Hochwassergeschichte der Seitenflüsse

In Basel war das Hochwasser von 1999 das grösste der letzten ca. 120 Jahre *(Bild 4)*. Von Basel Rheinaufwärts war das Hochwasser 1999 das grösste Ereignis der letzten 70 bis 100 Jahre. Nur in Reckingen war das Hochwasser von 1910 noch etwa 200 m^3/s grösser.

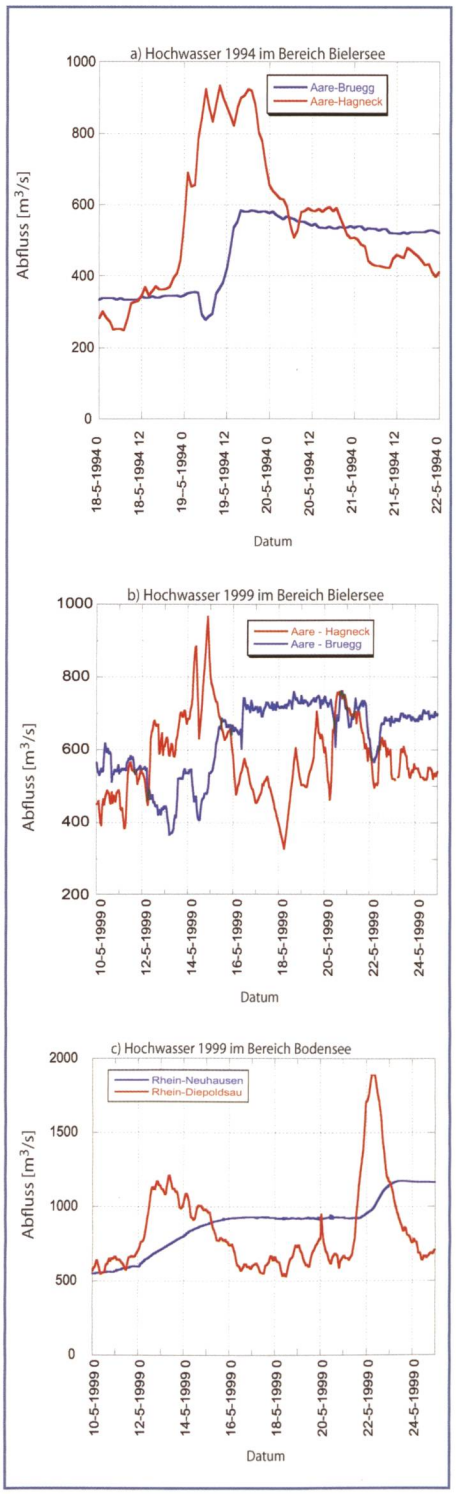

Bild 9. Zu- und Ausflüsse des Bielersees und des Bodensees bei den Hochwassern 1994 und 1999.

An der Aare in Untersiggenthal und der Reuss in Mellingen war 1999 das grösste Hochwasser der letzten ca. 100 Jahre, an der Limmat in Baden war das Hochwasser 1910 grösser als 1999. An der Emme (80-jährige Messperiode) hingegen figuriert das Hochwasser 1999 nicht unter den 10 grössten Ereignissen, das Hochwasser 1994 rangiert an 8. und 1978 an 9. Stelle.

Die Thur zeigte 1999 die grösste Abflussspitze der letzten 100 Jahre. Allerdings fanden bei früheren Hochwassern (1910, 1965, 1977, 1978) im Thur-Unterlauf ausgedehnte Überflutungen statt. Dadurch wurden die Abflussspitzen in Andelfingen massgeblich gedämpft. 1999 war der Gerinneausbau der Thur weitgehend abgeschlossen, so dass keine wesentlichen Überflutungen mehr möglich waren, und ihre Abflussspitze ungedämpft zum Rhein gelangte. Ohne diesen Ausbau würde das Hochwasser 1999 nur etwa an dritter Stelle liegen.

2.6 Folgerungen aus der Hochwassergeschichte

Aus dem Vergleich der drei Hochwasser 1978, 1994 und 1999 am Rhein lassen sich folgende Folgerungen ziehen:

- Es sind ausgedehnte Niederschlagsfelder mit hohen Intensitäten über den Einzugsgebieten unterhalb der Alpenrand- resp. Jurarandseen erforderlich, damit grosse Abflüsse am Rhein bei Basel entstehen können.
- Die Anstiegszeiten der Hochwasserwellen waren mit 14–20 h relativ kurz.
- Aufgrund ähnlich langer Fliesszeiten kommt es im Rhein bei Basel bei Hochwasser meist zu einer Überlagerung der Abflussspitzen der Seitenflüsse.
- Der Beitrag der Aare zur Abflussspitze des Rheins lag zwischen 50 und 60%. Die Thur mit ihrem relativ kleinen Einzugsgebiet machte beachtliche 13 bis 26% der Abflussspitze des Rheins aus.
- Die Situation verschärfte sich 1999 durch die hohen Seestände und die grossen Basisausflüsse aus den Seen. Die Dämpfung der Hochwasser durch die Alpenrandseen und Jurarandseen ist beachtlich, allerdings halten bei hohen Seeständen die hohen Abflüsse über Wochen an, wodurch bei erneuten Starkregen noch grössere Abflussspitzen auftreten können.
- Das Hochwasser 1999 war bis dahin nicht nur am Rhein, sondern an vielen Seitenflüssen das grösste Ereignis der letzten ca. 100 Jahre.

3. Szenarien für extreme Abflüsse des Rheins

3.1 Einleitung

In den Folgerungen wird deutlich, welche Faktoren bei den drei untersuchten Hochwasserereignissen dämpfenden und welche verschärfenden Einfluss auf die Hochwasserspitzen des Rheins bei Basel haben.

3.1.1 Verschärfende Faktoren

Die Seen spielen bei der Hochwasserentstehung für den Rhein bei Basel eine zentrale Rolle. Die lange Dauer der hohen Abflüsse aus den Seen im Anschluss an ein Hochwasser schafft die Voraussetzung, dass ein zweiter Starkniederschlag auf ungünstige Randbedingungen treffen kann. 1999 wurde die erste Hochwasserwelle am 12. Mai von einem grösseren Niederschlag ausgelöst als jene vom 22. Mai. Diese aus der Sicht des Hochwasserschutzes günstige Abfolge hätte auch anders ablaufen können, wenn das zweite Regenereignis vom 22. Mai grösser gewesen wäre als das erste. Für die Szenarien wurde daher als verschärfender Faktor ein hoher Basisabfluss in den Alpenrand- und Jurarandseen angenommen. Ein solch hoher Basisabfluss kann durch Vorregen, Schneeschmelze oder einer Kombination daraus verursacht werden.

Extreme Abflüsse entstehen, wenn bei dieser Ausgangslage ein Starkregenereignis eintritt. Hier stehen zwei Möglichkeiten im Vordergrund: Einerseits ein vorwiegend in der Ostschweiz zentriertes Ereignis (Einzugsgebiet unterhalb des Bodensees [v.a. Thur]) wie im Mai 1999 oder im August 1978, andererseits ein über dem Mittelland zentriertes Ereignis (Einzugsgebiete unterhalb der Voralpen und Jurarandseen) wie im Mai 1994.

Eine besondere Stellung nimmt die Thur ein. 1978 begrenzten ausgedehnte Überflutungen den Abfluss auf 1060 m^3/s. Ohne diese Überflutungen hätte damals der Abfluss den am 13. Mai 1999 beobachteten Wert von 1130 m^3/s übertroffen. Die seit 1978 durchgeführten Korrektionsmassnahmen verhindern ein Überfluten bis zu hohen Abflüssen und schalten diesen Dämpfungsmechanismus weitgehend aus. Dies lässt einen künftigen Spitzenwert in der Grösse von 1500 m^3/s als möglich erscheinen. Daher besteht von allen Seitenflüssen an der Thur das grösste Steigerungspotenzial.

3.1.2 Abfluss begrenzende Faktoren

Eine Steigerung der Seeabflüsse über die 1999 beobachteten Werte ist möglich. Sie wird aber aufgrund der Retentionswirkung der Seen im Vergleich zu möglichen Abflusssteigerungen durch Starkniederschläge bescheiden ausfallen. Beim Hochwasser 1999 begannen Limmat und Aare auszuufern, wesentlich höhere Zuflüsse der Seitengewässer hätten daher zu grossflächigen Überschwemmungen geführt. Noch grössere Spitzenabflüsse in Baden, Brugg oder Untersiggenthal

Szenario 1:
Maximierung der Abflüsse des Rheins bei Rheinfelden durch zeitliche Verschiebung der Abflussganglinien der Hochwasser 1978 (a) und 1999 (b).

Szenario 2:
Hohe Seestände wie am 19. Mai 1999 und eine Niederschlagssituation wie im Mai 1994.

Szenario 3:
Hohe Seestände wie am 19. Mai 1999 und verstärkter Niederschlag in der Ostschweiz mit einer Steigerung der Thur auf 1500 m³/s, Töss, Glatt hoch; Aare Untersiggenthal auf 2000 m³/s.

Szenario 4:
Vertauschen der zeitlichen Abfolge der beiden Niederschlagsergebnisse.

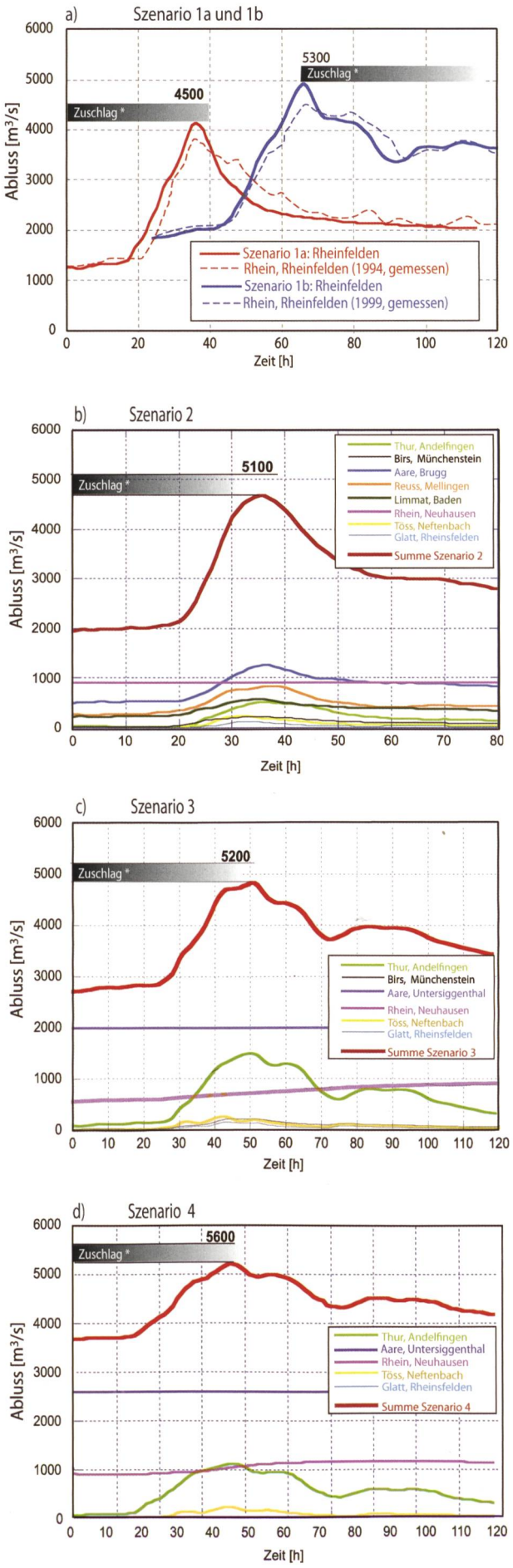

Bild 10a–d. Die Szenarien 1–4: Die Summe entspricht Rheinfelden, der graue Balken markiert den Zuschlag von Ergolz, Wiese und des nicht berücksichtigten Resteinzugsgebiets.

wären daher erst nach einem langsameren Anstieg erreicht worden. Auch der Abfluss in der Reuss war 1999 an den Kapazitätsgrenzen. Höhere Abflüsse würden zu Überflutungen oder gar Deichbrüchen führen, so dass Abflussmengen über ca. 850 m³/s kaum die Aare erreichen dürften. Ausuferungen begrenzen den Spitzenabfluss und verzögern diesen zeitlich. Diese Verzögerung kann auch dazu führen, dass die Abflussspitzen sich nicht mehr überlagern.

3.2 Szenarienbildung

Angesichts der dargestellten begrenzenden und verschärfenden Faktoren stellt sich die Frage, wie viel grösser die Abflüsse in Basel werden können. Ausgehend von der Hochwassersituation im Mai 1999 wurden unter Berücksichtigung der vorangegangenen Überlegungen verschiedene ungünstige Kombinationen betrachtet. Die vier ausgewählten Szenarien beziehen sich auf den Rhein bei Rheinfelden. Um eine Aussage für Basel zu erhalten, wurde für das Resteinzugsgebiet ein konstanter Zuschlag von 400 m³/s angenommen.

Szenario 1a und 1b beschreiben eine ungünstigere zeitliche Abfolge der Hochwasser in den Seitengewässern und damit ein Zusammentreffen der Abflussspitzen im Rhein. Anhand der Hochwasser 1978 und 1999 wurden die Ganglinien der Seitenflüsse zeitlich so verschoben, dass eine vollständige Überlagerung der Abflussspitzen resultierte.

Szenario 2 kombiniert die hohen Seestände wie zum Zeitpunkt vom 19. Mai 1999 mit der Niederschlagssituation von 1994 (Bodenseeausfluss 900 m³/s; Ausflüsse von Zürich-, Vierwaldstätter- und Bielersee wie 1999).

Szenario 3 kombiniert die sehr hohen Seeausflüsse vom 19. Mai 1999 mit einem verstärkten Niederschlag in der Ostschweiz (unterhalb des Bodensees, Abflussspitze Thur: 1500 m³/s).

Szenario 4 vertauscht die beiden Niederschlagsereignisse vom 12. und 22. Mai 1999, indem der grössere Niederschlag vom 12. Mai auf höhere Seestände trifft.

3.3 Resultate

Bild 10 stellt die Resultate dieser vier Szenarien dar. Szenario 1 *(Bild 10a)* zeigt, dass mit einer ungünstigeren Überlagerung beim Hochwasser 1978 (rot) eine Abflusssteigerung von 300 m³/s möglich ist und für Basel ein Abfluss von 4500 m³/s resultiert. Beim Hochwasser 1999 kann so

Messstelle	Abflüsse am 10. Mai [m^3/s]	Abflüsse am 19. Mai [m^3/s]	Max. Abfluss [m^3/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	

Tabelle 1. Die Seeausflüsse von Bielersee, Bodensee, Vierwaldstättersee und Zürichsee vor den beiden Starkniederschlägen im Mai 1999.

eine Steigerung um 300 bis 400 m^3/s erreicht werden, was in Basel einen Abfluss von 5300 m^3/s ergibt. Dies ist ein Wert, der vor der JGK I auch schon überschritten wurde.

Die Kombination von Hochwasser 1999 und 1994 (Szenario 2, *Bild 10b*) ergibt nur eine geringe Steigerung gegenüber der 1999 beobachteten Abflussspitze in Basel. Dies bedeutet, dass die unterschiedliche Niederschlagsverteilung zu ähnlichen Abflüssen aus dem Mittelland geführt hat.

Das Szenario 3 mit den hohen Seeständen von 1999 und einem verstärkten Niederschlag in der Ostschweiz führt in Basel zu einem Abfluss von 5200 m^3/s, also zu einem Abfluss in ähnlicher Grössenordnung wie die Szenarien 1 und 2.

Das Szenario 4, das die hohen Seestände vom 19. Mai mit dem Starkniederschlag vom 12. Mai 1999 kombiniert, ergibt in Basel einen Abfluss von 5600 m^3/s, also 600 m^3/s mehr als 1999 tatsächlich gemessen wurde. Diese deutliche Überschreitung zeigt auf, dass grössere Abflüsse als 5000 m^3/s in Basel auftreten können. Das Niederschlagsereignis vom 12. Mai 1999 war intensiv, aber nicht extrem. Eine vergleichbare Niederschlagsmenge in Kombination mit hohen Seeständen kann daher als selten, aber nicht als unwahrscheinlich eingeordnet werden. Zentral ist dabei die Rolle des Bodensees. Statt eines Basisabflusses von 500 bis 600 m^3/s wie 1978 oder 1994 erreichte sein Abfluss 1999 über 1000 m^3/s und dies über Wochen.

4. Schlussfolgerungen

Abflüsse zwischen 5000 und 6000 m^3/s sind in Basel durch eine ungünstige Kombination von beobachteten Abflüssen bzw. Niederschlagsereignissen möglich. Voraussetzung sind lang andauernde Ereignisse oder eine rasche Folge von Starkniederschlägen, die zuerst einen Teil der Böden im Einzugsgebiet sättigen und hohe Wasserstände in den Alpenrandseen bewirken. Die eigentliche Hochwasserwelle wird dann durch Starkniederschläge im Mittelland ausgelöst, die sich mit den hohen Basisabflüssen aus den Seen überlagert.

Im Rahmen der Vorgeschichte kann auch die Schneeschmelze eine wichtige Rolle spielen, denn sie führt einerseits zu hohen Zuflüssen in allen Alpenrandseen, anderseits führt Schneeschmelze allein, ohne gleichzeitigen Niederschlag zu hohen, aber nicht zu den höchsten Seeständen. Um einen Abfluss von 6000 m^3/s zu überschreiten, wären allerdings sehr ungünstige Kombinationen nötig: Insbesondere muss durch ergiebige Vorregen der Bodensee stark ansteigen, bevor im Mittelland das eigentliche Niederschlagsereignis eine Abflusswelle erzeugt. Weiter muss das gesamte Mittelland überregnet werden und die Ganglinien müssen sich ungünstig überlagern. Mehrtägige Ereignisse erfüllen diese Voraussetzungen eher als eintägige Starkregen. Allerdings beginnen bei derart grossen Abflüssen die Seitengewässer des Rheins im Schweizer Mittelland zu überfluten und die Abflussspitzen steigen langsamer an. Solche begrenzenden Faktoren flossen ansatzweise in die Szenarien ein.

Eine Wahrscheinlichkeitszuordnung für Abflussspitzen des Rheins bei Basel im Bereich von 6000 m^3/s ist spekulativ. Einem Abfluss von 5000 m^3/s in Basel kann eine Wiederkehrperiode zwischen 100 und 300 Jahren zugeordnet werden. Für grössere Abflüsse sind entsprechend kleinere Wahrscheinlichkeiten anzunehmen.

Literatur

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

Forster F., Grebner D., Müller-Lemans H., Roesch T., Schwarb M. (2000): Abflussbildende Faktoren beim Hochwasser im Mai 1999, Niederschlag. In: Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Hochwasser 1999 – Analyse der Ereignisse.

Scherrer AG (2004): Szenarien für die extremen Hochwasser des Rheins bei Basel. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG). www.bwg.admin.ch/themen/wasser/d/pdf/sagberrhbs04.pdf

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, VAW (1990, 1992): 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.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Simon Scherrer,* Scherrer AG Hydrologie und Hochwasserschutz, Reinach, Tel. 061 713 24 80, scherrer@scherrer-hydrol.ch

Dr. *Armin Petrascheck*, Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern, armin.petrascheck@bwg.admin.ch

Dr. *Hanspeter Hodel*, Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern, Tel. 031 324 76 33, hanspeter.hodel@bwg.admin.ch