



© hsvrs – iStockphoto

3.1.5 Veränderungen der Abflüsse

AXEL BRONSTERT & HEINZ ENGEL

Changing of river discharge: This section presents in its first part the development of the river discharge rates of the large German rivers Rhine, Weser, Elbe and Danube. The mean discharges of all these rivers show a positive trend during the past decades, with a particular significant increase for the river Rhine since the 1970ths. An increase of annual maximum discharge values is most significant in case Rhine after 1960, and less significant for the Danube, while the Elbe and Weser show no particular trend. Concerning trends of the low flow values, the Rhine “and to a lesser degree also the other rivers” show a positive trend, which can mainly be attributed to the low flow management in summer by using reservoirs in the mountain parts of the rivers. The second part of this section introduces the effects of land use on the development of river floods. It is shown, that land use influences flood production the strongest (up to 20 % runoff increase), if rainfall intensities are high and antecedent soil moisture is low. This situation can occur for summer convective rainstorms. However, summer rainstorms are local meteorological phenomena which do not trigger widespread floods in large river systems, but only in small catchments. Large river floods are caused by advective, long lasting rainfall, which do hardly cause runoff processes influenced by land use changes.

Der Begriff Abfluss wird in der Hydrologie in unterschiedlicher Bedeutung verwendet. Dieser Tatsache trägt die deutsche hydrologische Begriffsnorm (DIN-4049 1994) Rechnung. Dort wird Abfluss definiert als

- unter dem Einfluß der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche sich bewegendes Wasser
- Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in der Zeiteinheit durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist

Im Sinnzusammenhang dieses Aufsatzes wird der Abfluss gemäß der zweiten Definition verstanden, das heißt, er wird auf Einzugsgebiete bezogen. Änderungen des Abflusses sind permanent zu erwarten; sie entsprechen damit den natürlichen Gegebenheiten (Bodenbedingungen, vorausgegangenen und aktuellen Witterungseinflüssen u.s.f.). Diese Änderungen sollen hier allerdings nicht gemeint sein, da sie lediglich Schwankungen darstellen, die mittel- und langfristige Tendenzen und Trends überprägen. Insoweit ist es erforderlich, die Überprägung statistisch auszublenden, um das mittlere Verhalten erkennbar zu machen.

Entwicklung der Abflüsse der großen deutschen Flüsse

Stellvertretend für die Fließgewässer in Deutschland werden hier die Ströme Rhein, Weser, Elbe und Donau (Abb. 3.1.5-1) für die Darstellung der Verhältnisse ausgewählt und auch diese wiederum nur an wenigen Punkten (Pegeln) untersucht.

Abflussmessungen mit den heutigen Messungen vergleichbarer Genauigkeiten sind seit Entwicklung des Messflügels (seit 1790) möglich. Es hat jedoch bis zum Ende des 19. Jahrhunderts gedauert, bis die Methode allgemein angewendet wurde und regelmäßige Abflussmessungen die Erstellung vertrauenswürdiger Wasserstand-Abfluss-Beziehungen ermöglichten. So ist es zu erklären, dass erst seit etwa 1890 aus den oftmals schon seit Jahrzehnten erhobenen und registrierten Wasserständen verlässliche Abflüsse ableitbar wurden.

Die anthropogene Beeinflussung der Abflüsse beginnt schon im Bereich der Quellen und endet erst, wenn sich die Gewässer ins Meer ergießen. Die gut verstandenen Beeinflussungen betreffen hauptsächlich die Extreme.

In Trockenzeiten sollen Wasserreserven auch dann noch bestehen, wenn die Natur diese nicht mehr bereitstellt. Hochwasser soll ab- oder zurückgehalten werden, wo immer möglich, um Schutz vor Überschwemmungen zu geben. Sieht man von den schwer quantifizierbaren anthropogenen Einflüssen auf das Klima ab, so ist das mittlere Abflussverhalten (zumindest der größeren Gewässer) allerdings naturbedingt.

Abb. 3.1.5-2 zeigt für ausgewählte Pegel die mittleren jährlichen Abflüsse (MQ) der Zeitreihe 1891–2008. An allen untersuchten Gewässern erkennt man Tendenzen zu höheren Abflüssen. Auffällig sind besondere Anstiege in den 1970er Jahren am Rhein, wobei sich diese stromab stärker ausprägen. An den Pegeln des Rheins zeigt sich zwischen 1940 und 1960 eine Periode verminderter Abflüsse, die an der unteren Weser zwischen 1920 und 1950 auftritt, an Elbe und Donau dagegen nicht zu erkennen ist.

Die statistische Analyse des Langzeitverhaltens der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern (KLIWA 2003), ausgeführt unter Verwendung der Daten für 160 Pegel, hat ergeben, dass die überwiegende Anzahl der untersuchten Trends keine Signifikanz auf-

weist. Zudem ist die Höhe der Trends an den meisten Pegeln gering und die Steigungen sind sowohl positiv als auch negativ.

Hochwasser (HQ) im Binnenland sind üblicherweise die Folge besonders intensiver Niederschläge und wie diese mehr oder weniger kurzfristige, in vielen Fällen auch lokale Ereignisse. Anthropogene Einflüsse auf Hochwasser sind vielfältig und seit Jahrhunderten gegeben. Sie bestehen in Eingriffen in die Einzugsgebiete, zielen auf die Böden, die Bodenbedeckung, Siedlungsanlagen und betreffen natürlich auch die Gewässer selbst. Eindeichungen, Begradigungen und Umgestaltung der Gewässerprofile haben den zeitlichen Ablauf der Einzelwellen und das Zusammentreffen der Teilwellen ganzer Flußsysteme verändert. Das Ergebnis sind häufig schnellere, steilere und höhere Wellen als zuvor. Was sich als Hochwasser ereignet, ist schließlich eine schwer zu durchschauende Kombination witterungsbedingter, klimatischer und anthropogener Komponenten, die sich von Ereignis zu Ereignis, je nach örtlicher und zeitlicher Entstehung des Hochwassers, in wechselnder Weise mischen.

Die jährlichen Hochwasserscheitel seit 1891

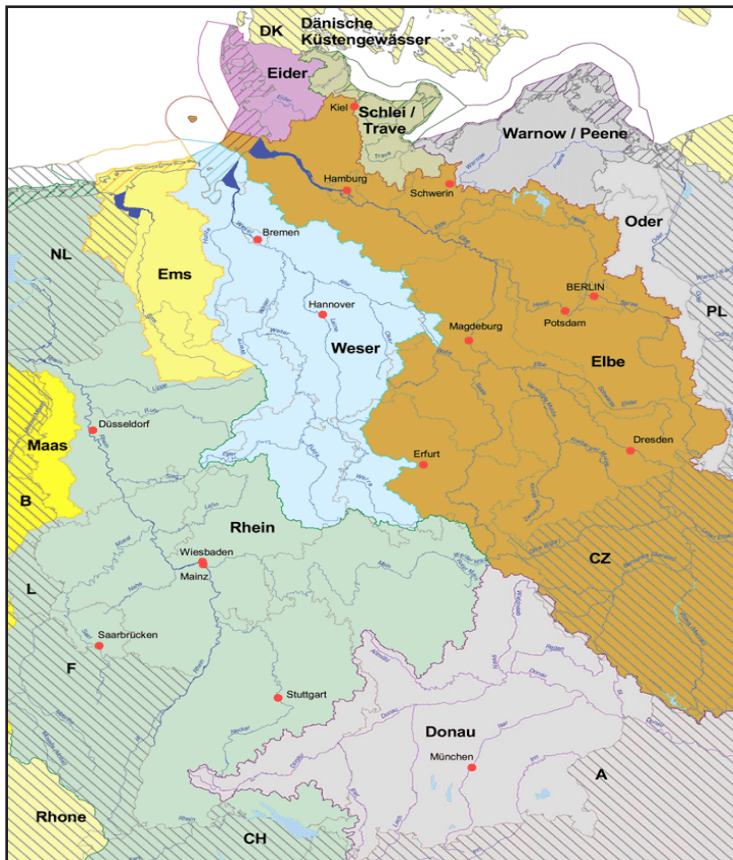


Abb. 3.1.5-1: Flußgebietseinheiten Deutschlands.
Quelle: Umweltbundesamt 2004

(Abb. 3.1.5-3) zeigen am deutschen Rhein insgesamt signifikant steigende Trends, wobei einzelne Zeitabschnitte an diesen Trends weniger beteiligt sind bzw. die Entwicklung dort gegenteilig verläuft. Besonders Anstiege liegen in den 35 Jahren zwischen 1891 und 1925 und in der Zeit seit ca. 1960 bis heute. Geringere Anstiegstendenzen gibt es an der Donau. Die Hochwasserabflüsse der Weser wie der oberen Elbe sind in der Beobachtungszeitpanne gesunken. Die Hochwasserabflüsse der Elbe sind offenbar trendfrei. In einer detaillierten Analyse für die Periode 1952–2002 zeigen PETROW & MERZ (2009), dass die Zunahme der mittleren jährlichen Hochwasserscheitel am Rhein für diesen Zeitraum an Pegeln des Mittel- und Niederrheins zwischen 30–45% liegt, was etwa für den Pegel Köln einen Anstieg von 5.200 m³/s auf 7.000 m³/s bedeutet. Auch an der Donau wurde für diesen Zeitraum eine deutliche

Zunahme der Jahreshochwasserwerte identifiziert, etwa für den Pegel Donauwörth von 480 m³/s auf 650 m³/s. Auch für Pegel an der oberen Weser wurden positive Trends erkannt, für die untersuchten Elbepegel dagegen kaum. Für die extremen, d.h. sehr seltenen Hochwasserereignisse sind entsprechende Trends an allen großen deutschen Flüssen aber wesentlich weniger deutlich erkennbar, bzw. nicht statistisch signifikant.

Die oben erwähnte Analyse des Langzeitverhaltens der mittleren Abflüsse (MQ) an 160 Pegeln in Baden-Württemberg und Bayern (KLIWA 2003) hat zwar für die meisten Messstellen keine Signifikanz der untersuchten MQ-Trends ergeben, hinsichtlich beobachteter und erwarteter Klimaänderungen und deren Auswirkungen auf Hochwasser gibt es allerdings bemerkenswerte Unterschiede zwischen makro- und mikroskaligen Phänomenen. In Berücksichtigung wei-

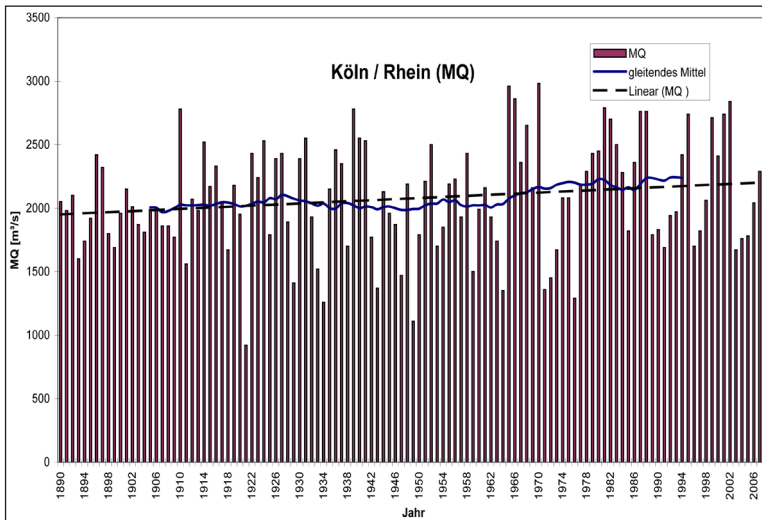
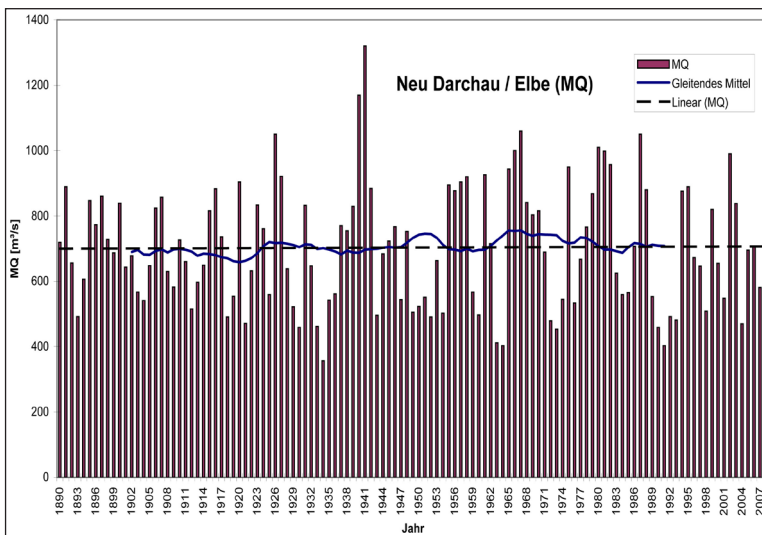


Abb. 3.1.5-2: Mittlere Abflüsse (MQ) mit Trendlinien und 30-jährig gleitenden Mittelwerten an ausgewählten Pegeln deutscher Ströme, Jahresreihe 1891–2008.



terer Erkenntnisse der KLIWA-Untersuchungen haben die Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg einen »Klimaänderungsfaktor« in ihre Richtlinien für hydraulische Berechnungen eingeführt. Bayern hat die Bemessungshochwasser (BHQ) für neue Projektentwürfe generell um 15% erhöht und Baden-Württemberg empfiehlt Erhöhungen der BHQ auf der Basis regionaler Untersuchungen zwischen 0 und 25%.

Niedrigwasser (NQ) sind im Gegensatz zu Hochwasser keine kurzfristigen Ereignisse, sondern das Ergebnis zumeist mehrmonatiger Entwicklungen. Anthropogene Einflüsse ergeben sich aus Wassernutzungen längs der Gewässer (Trink- und Brauchwasserentnahmen) und aus mittelfristigen Rückhaltungen in Speichern in den Einzugsgebieten und in den Stauhaltungen der Gewässer selbst. Die Folge sind abflussmindernde Verluste einerseits und den Abfluss stützende Speicherezuschüsse andererseits. Massive Speicherabgaben können die natürlich bestehende Tendenz zur Minderung der Niedrigwasserabflüsse in ihr Gegenteil verkehren.

Die Jahresreihen der niedrigsten Abflüsse (Abb. 3.1.5-4) zeigen im Rhein insgesamt Anstiege (wie MQ

und HQ) mit den schon bei den anderen Hauptwerten beobachteten besonderen Gradienten in den Zeitabschnitten 1891 bis 1935 und 1960 bis heute. Im mittleren Zeitintervall 1935 bis 1960 sind die NQ tendenziell leicht gefallen. In der Weser ist das Abflussverhalten stetiger, mit insgesamt steigender Tendenz, wobei sich im unteren Stromabschnitt seit ca. 35 Jahren eine NQ-Minderung abzeichnet. Für die Elbe ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Weser. Die Donau zwischen Regensburg und Passau zeigt schwache Anstiege bei insgesamt sehr gleichmäßigem Verlauf. Die Donau unterhalb der Inn-Mündung dagegen hat sich ähnlich dem Rhein entwickelt. Hier dürfte der Einfluß der Alpen deutlich werden, der auf den Rhein und die Donau ähnliche Wirkungen ausübt. So wirken die Hochspeicher ausgleichend auf NQ. – In einer schweizerischen Untersuchung (BIRSAN et al. 2004) wird festgestellt, »dass sich das natürliche Abflussregime in der Schweiz seit 1961 merklich verändert hat« durch » ... Anstieg des Jahresabflusses, ... insbesondere der winterlichen Maximalabflüsse (an ca. 60–70% der untersuchten Messstationen) und der mäßigen bis niedrigen Abflüs-

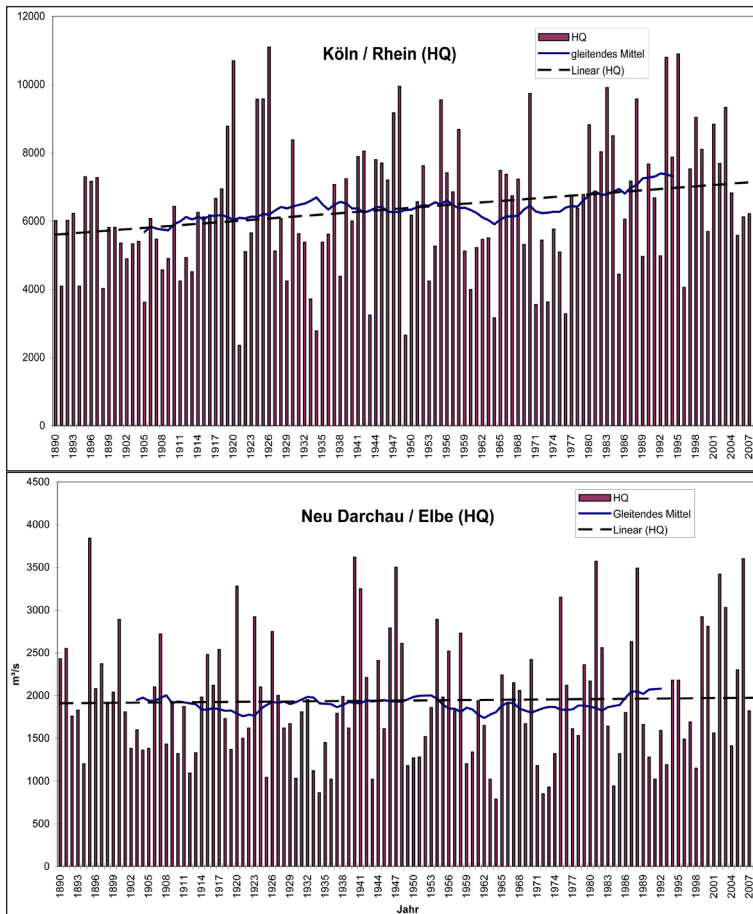


Abb. 3.1.5-3: Höchste Abflüsse (HQ) mit Trendlinien und 30-jährig gleitenden Mittelwerten an ausgewählten Pegeln deutscher Ströme, Jahresreihe 1891–2008.

se im Frühling«. Besonders hingewiesen wird auf einen »deutlichen Anstieg der ... Tage, welche eine Minimaltemperatur oberhalb der 0 °C-Grenze aufweisen«. Es scheint der Schluss begründet, »dass in Bezug auf Veränderungen des Abflussregimes alpine Einzugsgebiete am sensibelsten reagieren«.

Immer wieder wird über den Schmelzwasseranteil am sommerlichen Abfluss in den alpinen Einzugsgebieten spekuliert und behauptet, er sei durchaus erheblich. Das führt zu der Schlussfolgerung, dass der Rückgang der Vergletscherung und letztlich das partielle Verschwinden der Gletscher die Sommerabflüsse in hochgebirgsbeeinflussten Gewässern dramatisch verringern werde. Was die Alpen betrifft, so muß man sich klar machen, dass auch in den kleinen, sehr hoch gelegenen Einzugsgebieten die vergletscherten Flächenanteile ausgesprochen gering sind (so betragen diese, bezogen auf den Pegel Ilanz am Vorderrhein gerade einmal 2,7% des 776 km² großen Einzugsgebiets). Entsprechend klein sind die Anteile des Schmelzwassers am Gesamtabfluss (am Pegel Ilanz sind ca. 1% des Abflusses schmelzwasserbürtig [BWG 2005]). Dies trifft insbe-

Tab. 3.1.5-1: Trendanalyse der Niedrigwasserabflüsse NM7Q und NM21Q (Periode 1944–2003) aufgrund des Mann-Kendall- und des t-Tests ($\alpha = 5\%$) (NM7Q bzw. NM21Q = das niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses an 7 bzw. 21 aufeinanderfolgenden Jahren).

Station	Kenngrösse	Tendenz steigend + fallend –	Signifikanz Mann-Kendall	t-Test
Hofkirchen (Donau)	NM7Q	+	nein	ja
Maxau (Rhein)	NM21Q	+	ja	ja
Köln (Rhein)	NM7Q	+	nein	ja
Dresden (Elbe)	NM21Q	+	ja	ja
Neu Darchau (Elbe)	NM7Q	+	nein	nein
Hohensaaten-Finow (Oder)	NM21Q	+	nein	nein
Intschede (Weser)	NM7Q	+	nein	nein
	NM21Q	+	nein	nein

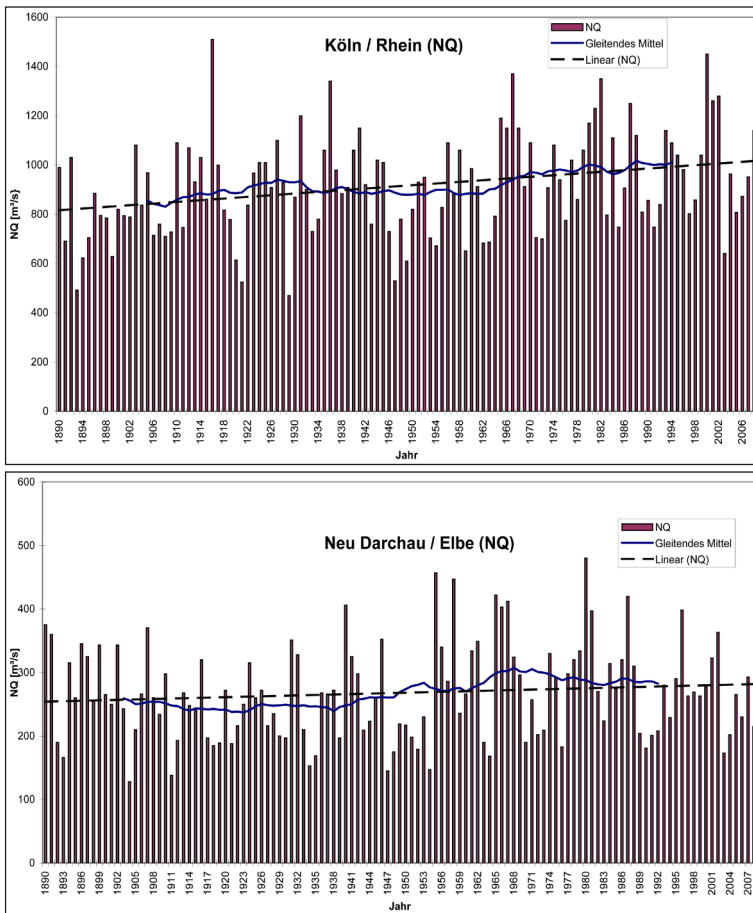


Abb. 3.1.5-4: Niedrigste Abflüsse (NQ) mit Trendlinien und 30-jährig gleitenden Mittelwerten an ausgewählten Pegeln deutscher Ströme, Jahresreihe 1891–2008.

sondere auch zu auf die hochgebirgsfernen Bereiche von Rhein oder Donau. 2003, in einem Jahr extremen Niedrigwassers, betrug der mittlere September-Abfluss am Rheinpegel Köln (Einzugsgebiet [A]: 145.000 km²) 791 m³/s. Der kumulierte Abfluss der gletscherdominierten alpinen Nebenflüsse des Rheins lag bei 23 m³/s, das heißt bei 2,9% des aktuellen Monats-MQ in Köln, entstanden in Untereinzugsgebieten mit einer Gesamtfläche von 968 km² (entsprechend 0,7% des Rheineinzugsgebiets bis zum Pegel Köln). Der Gletscheranteil, der in den Untereinzugsgebieten noch fast 3% der Gesamtfläche ausmacht, sinkt hinsichtlich des A am Pegel Köln auf kaum 0,02%. Dementsprechend ist der Einfluß der Gletscher auf die hydrologischen Bedingungen des Niederrheins wie auf die der Donau unterhalb der Alpenzuflüsse vernachlässigbar, auch in extremen Trockenjahren.

Die in den mitteleuropäischen Gewässern eingetretenen außergewöhnlichen Abflussereignisse der 1990er

Jahre und 2002 haben den Eindruck entstehen lassen, dass sie die Folge trendbehafteter Entwicklungen sind. Das gilt auch für das schon erwähnte Trockenjahr 2003. Eine Untersuchung der Niedrigwasserentwicklung in Deutschland (BELZ et al. 2004) zeigt für die Zeitreihe 1944 bis 2003 durchweg Anstiege der NQ. Das heißt, auch bei Berücksichtigung des Trockenjahres 2003 ist eine Minderung des Niedrigwasser-Risikos zu belegen – und dies zum Teil als gesicherter Trend (Tab. 3.1.5-1).

Die festgestellten Entwicklungen sind, soweit sie die mittleren Abflüsse betreffen, offenbar mit dem Klima verknüpft. Trends der Erhöhung mittlerer Wintertemperaturen und der Jahresniederschläge lassen Anstiege der mittleren Abflüsse auch für die Zukunft erwarten. Entwicklungen der Extreme sind weniger eindeutig, nicht einheitlich vorhanden und schwierig zuzuordnen. In der Vergangenheit erfolgte anthropogene Eingriffe in die Einzugsgebiete und Gewässer, mit der Folge von Beschleunigungen des Wellenablaufs, werden in Mit-

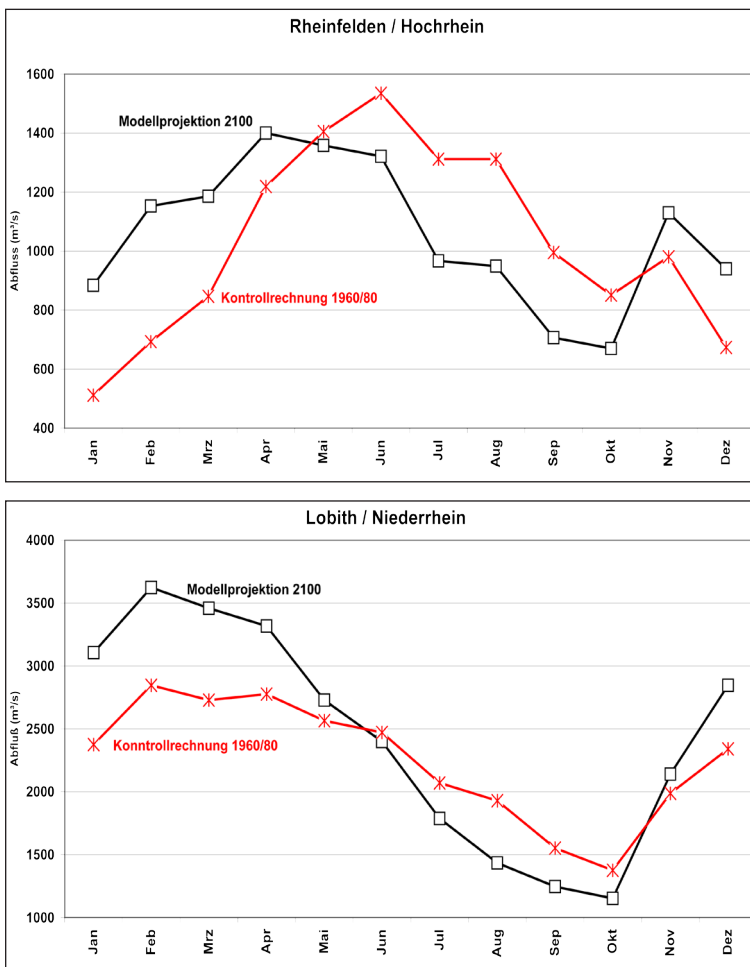


Abb. 3.1.5-5: Mittels Klimamodell auf das Jahr 2100 prognostizierte mittlere monatliche Abflüsse für die Rheinpegel Rheinfelden und Lobith im Vergleich zu den mittleren Abflüssen 1960/80 (Quelle: KHR 1997).

teleuropa zukünftig wohl unterbleiben. Stattdessen eingerichtete Rückhaltungen werden hauptsächlich auf die Entschärfung von Extremen gerichtet sein, aber auch die Wellenverlangsamung zum Ziel haben. Dagegen gerichtete Klimateffekte lassen sich vermutlich nicht vollständig abfangen.

Für das Rheingebiet sind mit Klimamodellen Abflussentwicklungen unterschiedlicher Zielprojektion prognostiziert worden (KHR 1997). Zum Beispiel wurden mittlere Jahresabflussganglinien für Rheinpegel ermittelt (Abb. 3.1.5-5), wie sie bei der Annahme gleichbleibend fortschreitender Klimaentwicklung für das Jahr 2100 zu erwarten wären.

Danach ist für Rheinfeldern (Alpenregime) eine Vorverlegung des mittleren Jahresmaximums von Juni auf April zu erwarten, bei Absinken des Scheitels. In Lobith (Niederrhein) bleibt der Eintreffzeitpunkt des Scheitels erhalten, seine Höhe jedoch steigt um ca. 20%. Gefährlich an dieser Aussage ist besonders deren erster Teil, obwohl er scheinbar moderat klingt. Er bedeutet eine erhebliche Verschlechterung gerade der Hochwassersituation. Der Grund liegt darin, dass die traditionell auf die Sommermonate beschränkten Hochwasser in Alpen- und Hochrhein infolge der Klimaerwärmung zukünftig schon im April und Mai eintreten könnten, wenn die Gefahr einer Überlagerung mit Hochwasser aus den Mittelgebirgen besteht. Diese Konstellation jedoch hat sich gemäß den aus 1000 Jah-

ren überlieferten Berichten zur Abflusssituation (KHR 1995) bisher nicht ereignet. Hochwasser, die schon am Fuß der Alpen als Extreme starten und flußab stetig aufgefüllt werden, könnten am Niederrhein dramatisch höhere Scheitelwerte erreichen als für die Vergangenheit bekannt.

Einfluss der Änderung der Landnutzung im Einzugsgebiet auf Hochwasserabflüsse

Es gibt generell Hinweise, dass die Änderung der Landnutzung in den Einzugsgebieten Auswirkungen auf die Hochwassersituation an Flüssen hat. In der öffentlichen Diskussion werden dann oftmals die extremen Abflüsse oder sogar die hohen Schäden direkt auf diese Aktivitäten des Menschen zurückgeführt. Die »naturbedingte« Bereitschaft einer Landschaft zur Hochwasserentstehung tritt dann oftmals in den Hintergrund. Hochwasserentstehung, Hochwasserablauf und Hochwasserschäden werden teilweise zu wenig differenziert und die Ursache-Wirkung-Beziehungen nur unzureichend erkannt.

Ein grundlegendes Problem bei der Quantifizierung der anthropogenen Auswirkungen ist, dass die ihnen anhaftenden Unsicherheiten noch sehr groß sind. Dies gilt insbesondere für die mit einer Klimaänderung verbundenen möglichen Niederschlagsänderungen und

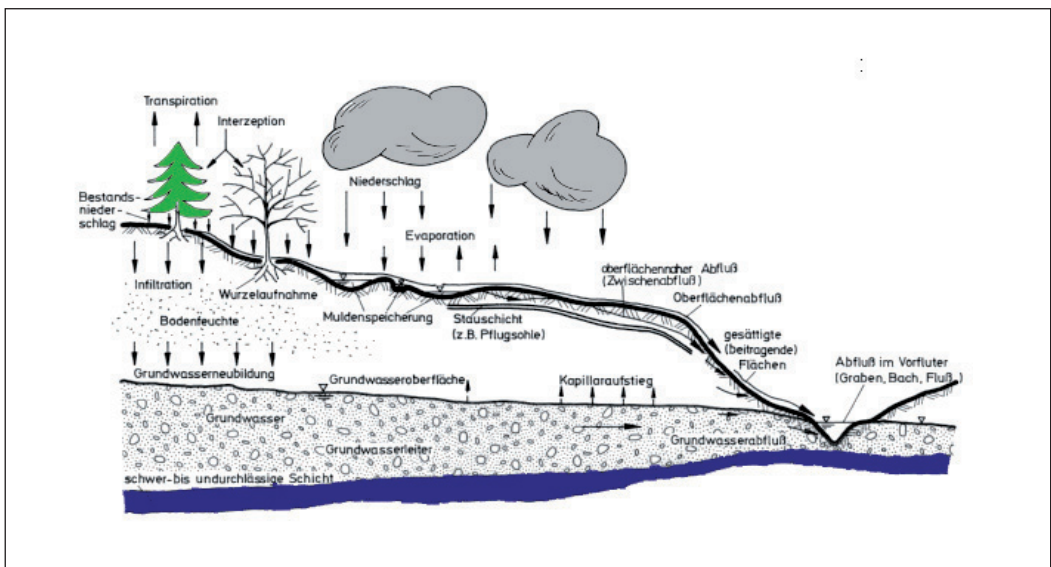


Abb. 3.1.5-6: Vereinfachte Darstellung der Abflussbildung im Hangmaßstab (Quelle: BRONSTERT 1994).

für die Auswirkungen einer Landnutzungsänderung auf die Entstehung von Hochwasserabfluss. In diesem Abschnitt wird daher der aktuelle Kenntnisstand zusammengefasst und anhand neuer Modellergebnisse die anthropogenen Auswirkungen mit den natürlichen Bedingungen der Abflussbildung verglichen und diskutiert. Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass sowohl die Klimaänderung, als auch die Änderungen von Geometrie und Rauheit der Fließquerschnitte ebenfalls zur Änderung des Hochwasserabflusses beitragen können, solche anthropogenen Aktivitäten hier aber nicht thematisiert werden.

Die Bedeutung der Abflussbildung und der Speicherkapazität der Landschaft bei Starkniederschlägen

Bei der Untersuchung und Modellierung von Abflussbildungsprozessen ist der zu Grunde gelegte räumliche und zeitliche Maßstab von großer Bedeutung. Zur Bezeichnung der unterschiedlichen räumlichen Maßstäbe sei hier die Einteilung von DOOGE (1986) in die lokale Skala, Hang- und Einzugsgebietsskala angewendet. Die wichtigsten Prozesse der Abflussbildung bei Starkniederschlagsperioden sind der Infiltrationsüberschuss, der Sättigungsüberschuss, der schnelle unterirdische Abfluss und der Grundwasserabfluss. Die unterschiedlichen Abflussentstehungsprozesse sind dabei in den genannten Skalen von verschiedener Relevanz.

In der lokalen Skala lässt sich vor allem die Infiltrationsfähigkeit der Bodenoberfläche untersuchen und beobachten. Darunter verstehen wir die Infiltrationskapazität des Oberbodens, welche von der Bodenart, der aktuellen Bodenfeuchte und der Existenz von Grob- bzw. Makroporen bestimmt ist. Falls die Niederschlagsintensität größer als die aktuelle Infiltrationskapazität ist, tritt sogenannter »Infiltrationsüberschuss« auf. Die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche kann durch die Existenz von Makroporen (zumeist Wurzelkanäle, Tiergänge oder Schwundrisse) um Größenordnungen gesteigert werden. Dagegen kann eine Verschlammung oder Verkrustung der Bodenoberfläche, evtl. in Verbindung mit hydrophoben Eigenschaften des Bodens, die Infiltrationskapazität bedeutend herabsetzen und damit die Entstehung von Infiltrationsüberschuss verstärken.

Die Hangskala eignet sich besonders gut zur Beschreibung der lateralen (seitlichen) Prozesse der Abflussentstehung. Dazu gehört unter anderem der schnelle unterirdische Abfluss (»subsurface stormflow«), welcher bei starken Niederschlägen in Kombination mit hohen Infiltrationsraten und anisotropen Leitfähigkeiten in Hängen entstehen kann. Dieser tritt im Mittel nicht häufig auf, ist aber für die Hochwasserentstehung unter gebirgigen Bedingungen von Relevanz, da hier

Tab. 3.1.5-2: Simulierte Abflusserhöhung infolge einer 50%-igen Zunahme der Siedlungsflächen für verschiedene Niederschlagsstypen und verschiedene Einzugsgebiete (Quelle: NIEHOFF 2002).

	Änderung des			
	Abflussmaximums [%]		Abflussvolumens [%]	
	Konvektive Ereignisse	Advektive Ereignisse	Konvektive Ereignisse	Advektive Ereignisse
Lein	20–30	0–6	19–23	< 1
Körsch	30–60	15–25	4–55	< 2
Lenne	–	< 1	–	< 1

die genannten Voraussetzungen (hohe Niederschlagsinfiltration, flache und anisotrope Böden) gegeben sind.

Ein häufig anzutreffender Prozess der Abflussbildung ist der sogenannte »Sättigungsüberschuss«, welcher auf gesättigten Bodenbereichen aufgrund des dort fehlenden Aufnahmespeichers des Bodens entsteht und anschließend schnell den Gewässern zufließen kann. Das Ausmaß des Sättigungsüberschusses hängt von der Ausdehnung gesättigter Oberflächenbereiche im Gebiet und von deren Verbindung mit dem Gewässersystem ab. Verallgemeinernd lässt sich sagen, dass die gesättigten Oberflächenbereiche mit höherer mittlerer Gebietsfeuchte zunehmen. Deren räumliche Ausprägung hängt im wesentlichen von der Topographie und der Morphologie (Mächtigkeit und Porosität der Böden, Grundwasserflurabstände) des Gebietes ab.

Auch das Grundwasser kann zur Entstehung von Hochwasser maßgeblich beitragen, obwohl die Reaktionszeit auf Starkniederschläge länger als bei Oberflächenabfluss ist. Grundwasser exfiltriert meist direkt aus dem Aquifer in das Gewässer. Eine relativ schnelle und damit zur Entstehung von Hochwasser beitragende Exfiltration des Grundwassers wird hervorgerufen durch eine kurzfristige Verstärkung des hydraulischen Gradienten im Grundwasserleiter.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Abflussbildung bei Starkniederschlägen aus mehreren Teilprozessen besteht. Dabei ist die Infiltrationskapazität und damit der Zustand der Bodenoberfläche nur für den Infiltrationsüberschuss von maßgeblicher Bedeutung. Für die Ausprägung der anderen genannten Prozesse (Sättigungsüberschuss, subsurface stormflow, Grundwasserexfiltration) spielen die unterirdischen Fließprozesse und die Grundwasserbedingungen die entscheidende Rolle. Die Niederschlagsdauer und -gesamtmenge sind für das Auftreten aller genannten Prozesse von erheblicher Bedeutung. Die Niederschlagsintensität ist zusätzlich für das Ausmaß des Infiltrationsüberschusses zu betrachten, da hier der Vergleich zwischen Niederschlagsintensität und aktueller Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche über die Stärke dieses Prozesses entscheidet. In Abb. 3.1.5-5

werden die Prozesse der Abflussbildung in der Hangskala zusammenfassend skizziert.

Die zeitliche Dynamik und das Ausmaß der Abflussbildung einer Landschaft hängt immer auch von dem Wasserspeichervermögen der Landschaft ab. Wichtige Funktionen dieser Speicher sind im Hinblick auf die Hochwasserentstehung (1) die maximale Speichermenge, (2) die Füllungs- und Entleerungsgeschwindigkeit und (3) der Füllungsgrad zu Beginn des Ereignisses. Das Ausmaß der beteiligten Einflüsse auf die Hochwasserganglinie am Gebietsauslass hängt wesentlich von der Größe des Hochwasserereignisses und der Größe des Einzugsgebietes ab. Im Allgemeinen gilt hierfür folgender Zusammenhang: (1) Mit zunehmender Größe/Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses nimmt der Einfluss der flächenhaften Gebietseigenschaften ab. (2) Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße tritt der Einfluss der flächenhaften Gebietseigenschaften gegenüber den Eigenschaften des Gewässernetzes in den Hintergrund. Grundsätzlich ist klar, dass die Landnutzung (und deren Änderung) nur diejenigen Abflussbildungsprozesse maßgeblich beeinflusst, die von dem Zustand der Bodenoberfläche gesteuert werden. Dies ist vor allem der Infiltrationsüberschuß. Die anderen genannten Prozesse werden durch die unterirdischen Bedingungen geprägt und sind somit kaum von Landnutzungsänderungen betroffen. Die oben genannten flächenhaften Gebietseigenschaften beziehen sich – in Abgrenzung zum Gewässernetz – auf sämtliche physiographischen Faktoren, die die Abflussbildung beeinflussen. Im Folgenden zählen zu diesen Eigenschaften auch die anthropogenen Eingriffe wie Flurbereinigung oder Urbanisierung sowie gezielte Einflussnahmen zur Verminderung und Verzögerung der Abflussbildung bei Hochwasser, auch wenn sie linienhafte Landschaftselemente wie Straßen oder Raine betreffen.

Modellierung von Landnutzungs- auswirkungen in der Mesoskala

Im Folgenden werden Ergebnisse einer Studie vorgestellt, in der die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserentstehung in mesoskaligen Flußgebieten mithilfe geeigneter hydrologischer Modelle untersucht worden sind. Für die prozessorientierte hydrologische Modellierung wurde das deterministische flächendifferenzierte Modell WaSiM-ETH (SCHULLA 1997) ausgewählt. Um den Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung besser als bisher berücksichtigen zu können, wurde das Modell von NIEHOFF (2002) um verschiedene Aspekte der Bildung von Oberflächenabfluss, wie die explizite Berücksichtigung von Makroporenfluss, Verschlämmung,

Versiegelung mit Anschluss an eine Kanalisation und die Wirkung dezentraler Rückhaltungen ergänzt.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurden drei mesoskalige Einzugsgebiete im deutschen Teil des Rheingebiets ausgewählt, die sich markant in ihrer Landnutzung unterscheiden: eines wird intensiv landwirtschaftlich genutzt (Lein, bei Heilbronn, 115 km²), eines ist dicht besiedelt (Körsch, bei Stuttgart, 127 km²) und eines vorwiegend bewaldet (obere Lenne, ein Nebenfluss der Ruhr, 455 km²).

Für alle drei Untersuchungsgebiete wurden von FRITSCH (2002) räumlich explizite Landnutzungsszenarien zur Verstädterung, der Stilllegung landwirtschaftlicher Fläche sowie zur Aufforstung erstellt. Außerdem wurden für das Leingebiet die Auswirkungen verschiedener Szenarien einer veränderten Bewirtschaftung bestehender Landnutzungen ermittelt (z.B. Mulchsaatverfahren auf erosionsgefährdeten landwirtschaftlichen Flächen, oder dezentraler Rückhalt von Oberflächenabfluss von versiegelten Flächen in Siedlungsgebieten).

Die hydrologische Modellierung wurde jeweils getrennt für ungefähr fünf konvektive bzw. fünf advective Starkniederschlagsereignisse (Jährlichkeit zwischen 1 und 8 Jahren) im Zeitraum 1985–2000 durchgeführt. Im Einzugsgebiet der Lenne haben in diesem Zeitraum ausschließlich langanhaltende advective Niederschläge zu Hochwassern geführt.

Die Ergebnisse der gesamten Studie wurden von NIEHOFF (2002) ausführlich dokumentiert. Im Folgenden werden nur exemplarische Ergebnisse der hydrologischen Modellierung für die drei Einzugsgebiete zusammengefasst:

- Eine Zunahme der Siedlungsflächen im Einzugsgebiet der Lein um 50% hätte den Simulationen zufolge je nach meteorologischer Rahmenbedingung sehr unterschiedliche Auswirkungen: Selbst bei gleichem Wiederkehrintervall des Hochwassers von etwa drei Jahren schwankt danach die Zunahme des Hochwassermaximums zwischen 0% für ein langanhaltendes advectives Niederschlagsereignis mit hoher Vorfeuchte und beinahe 30% für einen intensiven, lokalen Gewitterregen bei geringer Vorfeuchte.
- Die berechnete Erhöhung des Abflussvolumens durch ein Extremszenario mit 50% Zunahme an Siedlungsfläche bewegt sich für die unterschiedlichen Gebiete zwischen 4 und 55% für konvektive Niederschläge und unter 2% für advective Ereignisse. Die besonders geringen Effekte im bewaldeten Lennegebiet sind angesichts der dortigen geomorphologischen Verhältnisse und der Eigenschaften der advektiv geprägten Niederschläge, die dort dementsprechend zu Hochwassern führen, auch plausibel. In *Tab. 3.1.5-1* ist eine Übersicht zu den simulierten Veränderungen

der Abflussmaxima und -volumina für alle drei Gebiete infolge einer angenommenen 50%-igen Zunahme der Siedlungsflächen gegeben.

- Die im Leingebiet in den Jahren 1983, 1988 und 1990 in Folge zyklonaler Wetterlagen bzw. advektiver Niederschläge aufgetretenen Hochwasser haben alle auch zu Hochwassern im Rhein beigetragen. Der Einfluss einer Zunahme der Siedlungsflächen um 50%, der für diese Ereignisse simuliert wurde, variiert im Leingebiet zwischen 0% und etwa 4% Erhöhung des Hochwasserscheitels.
- Wie das Beispiel des Lennegebietes illustriert, ist Waldbestand entgegen der oft verbreiteten Meinung kein Indiz für einen per se geringen Beitrag zur Hochwasserentstehung. Richtig ist, dass ein natürlicher Wald höhere Speichereigenschaften der Vegetation (Interzeption, Streuspeicher) aufweist als andere Landnutzungen und dass Waldböden oft gute Infiltrationseigenschaften besitzen. Da aber der Vegetationsspeicher für die Hochwasserentstehung von nur geringer Bedeutung ist und zudem die Wälder in Mittelgebirgen häufig auf geringmächtigen Böden stocken, sind Waldflächen insbesondere in Kombination mit geringdurchlässigem Festgestein prädestiniert für rasche unterirdische Abflussbildung.
- Prinzipiell unterliegen gezielt eingesetzte Versickerungsmaßnahmen für den Abfluss von versiegelten Flächen denselben Einschränkungen, wie sie für die Auswirkungen des Einflusses der Versiegelung selbst formuliert worden sind. Dies haben Simulationen für das Leingebiet gezeigt. Deren Nutzen ist größer bei intensiven, konvektiven Niederschlägen mit geringer Vorfeuchte, deutlich kleiner aber hingegen für langanhaltende advektive Niederschläge mit hoher Vorfeuchte, da dann die Aufnahmefähigkeit sowohl des natürlichen Bodens als auch der Versickerungsanlage zurückgeht.
- Auch die Hochwasser mindernde Wirkung von Mulchung ist für mesoskalige Gebiete zumeist recht gering und wird – basierend auf mikroskaligen Messergebnissen bei hochintensiver Beregnung – in ihrer Wirkung leider oft überschätzt. Näheres dazu wird von BRONSTERT et al., 2003a dargelegt.

Die Modellierungsergebnisse belegen, dass pauschale Aussagen zum Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung nicht sinnvoll sind, da dieser stark von den klimatischen und physiographischen Randbedingungen sowie vom betrachteten räumlichen Maßstab abhängt. Generell ist die Bedeutung der Niederschlagsintensität für die Hochwasserentstehung sehr hoch, wird aber leider oft nicht entsprechend berücksichtigt. Nur hochintensive, also konvektiv bedingte

Niederschlagsereignisse haben einen nennenswerten Einfluss auf die Bildung von Infiltrationsüberschuss und sind dadurch relevant für die Frage der Landnutzungsänderungen. Konvektive Niederschläge sind für die Hochwasserentstehung in den großen Flussgebieten Mitteleuropas aber aufgrund deren lokalen Charakters von vernachlässigbarer Bedeutung. Für advektive Starkniederschläge (geringe Intensitäten, große Überregnungsflächen und -dauern) ist die Landnutzung dagegen von geringer bis sogar vernachlässigbarer Relevanz, da diese Niederschlagstypen fast ausschließlich unterirdisch kontrollierte Abflussprozesse auslösen, die kaum durch die Bedingungen auf der Landoberfläche beeinflusst werden. Da die Hochwasserereignisse an den großen Flüssen Mitteleuropas i.d.R. durch advektive Niederschläge hervorgerufen werden, sind für diese großen Einzugsgebiete demzufolge Landnutzungsänderungen von untergeordneter Bedeutung.

Die anhand der hydrologischen Modellierung gewonnenen Erkenntnisse sind nicht auf die Einzugsgebiete von Lein, Körsch und Lenne beschränkt. Mithilfe von Regionalisierungsansätzen, vereinfachten hydrologischen Modellansätzen für große Flächen und gekoppelten hydraulischen Modellen lässt sich auch das Ausmaß von Landnutzungsänderungen für große Flussgebiete wie das Rheingebiet quantifizieren und ins Verhältnis mit den Auswirkungen anderer anthropogener Maßnahmen setzen, so z.B. Wirkungen des Flussausbaus oder von Polderflutungen. Der interessierte Leser wird dafür auf die Studie der Kommission für die Hydrologie des Rheins (BRONSTERT et al. 2003b) verwiesen.

Literatur

- DIN-409 (1994) : Deutsche Norm, Hydrologie Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Berlin.
- BELZ J.U., H. ENGEL & P. KRAHE (2004) : Das Niedrigwasser 2003 in Deutschlands Stromgebieten, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- BIRSAN M.-V., P. MOLNAR, M. PFANDLER & P. BURLANDO (2004) : Trends in schweizerischen Abflussreihen, Wasser Energie Luft, 96. Jhg., Heft 1/2, Baden/CH, S. 29-38.
- BRONSTERT A., D. NIEHOFF & U. FRITSCH. (2003a): Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserentstehung. Petermanns Geographische Mitteilungen, 147. Jahrgang, Heft 6, 24-33.
- BRONSTERT A., A. BARDOSSY, C. BISMUTH, H. BUITEVELD, N. BUSCH, M. DISSE, H. ENGEL, U. FRITSCH, Y. HUNDECHA, R. LAMMERSEN, D. NIEHOFF & N. RITTER (2003b): Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. Reports of the Commission for Hydrology of the River Rhine (CHR), Series II, No. 18, 85 pp.

- BRONSTERT A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Nr. 46, Universität Karlsruhe, 192 pp. und Anhänge.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie, CH) (2005): Gletscherschwund 1985-2000 im Einzugsgebiet der Abflussmessstation Ilanz (not published report).
- DOOGE J.C.I. (1986): Looking for hydrologic laws. Water Resources Research, 22, 46-58.
- FRITSCH U. (2002): Entwicklung von Landnutzungsszenarien für landschaftsökologische Fragestellungen. Brandenburgische Umweltberichte, Nr. 12, Universität Potsdam, 132 pp.
- KHR (INT. COMMISSION FOR THE HYDROLOGY OF THE RHINE BASIN) (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin, CHR-report I-16, Lelystad (NL).
- KHR (KOMMISSION FÜR DIE HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETS) (1995): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse, Bericht Nr.II-9 der KHR, Lelystad (NL).
- KLIWA (LfU B.-W., Bayer. LfW, DWD) (2003) :Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte, Heft 3, Karlsruhe.
- NIEHOFF D. (2002): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Brandenburgische Umweltberichte, Nr. 11, Universität Potsdam, 165 pp.
- PETROW T. & MERZ B. (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. Journal of Hydrology, 371, 129-141
- SCHULLA J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürcher Geographische Schriften, Heft 69. Zürich.

Prof. Axel Bronstert
Universität Potsdam,
Lehrstuhl Hydrologie und Klimatologie
Institut für Erd- und Umweltwissenschaften,
Karl-Liebknecht-Str.24-25 - 14476 Potsdam-Golm
axel.bronstert@uni-potsdam.de

Dipl. Ing. Heinz Engel
Bundesanstalt für Gewässerkunde
56068 Koblenz
engel.waldesch@gmx.de