

Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation

KATRIN STURM
RÜDIGER GLASER
JUCUNDUS JACOBET
MATHIAS DEUTSCH
RUDOLF BRÁZDIL
CHRISTIAN PFISTER
JÜRIG LUTERBACHER
HEINZ WANNER

6 Figuren im Text

Floods in Central Europe since AD 1500 and their Relation to the Atmospheric Circulation

Abstract: In the course of an international research project on "Extreme hydrological events in Central Europe since 1500" for the first time data on flood events of several Central European river systems have been compiled comprising the last five centuries, classified by their intensity and related to the large-scale atmospheric circulation. As a first step significant phases of increased or reduced flood frequency could be identified and compared for the various drainage areas for the time since AD 1500. There are similar patterns primarily for the winters, but less so for the other seasons, as is also the case for the latest period. Methodological problems arose from the lack of a generally accepted definition of floods, as well as from linking present flood gauge data to historical information. As a second step atmospheric circulation analyses were made for deriving plausible pressure patterns favouring floods as well as characteristic circulation changes in contrast to the patterns of flood-free periods.

Keywords: Historical Climatology, floods, Central Europe, circulation analysis

Zusammenfassung: Im Rahmen eines internationalen Forschungsvorhabens über „Extreme hydrologische Ereignisse in Mitteleuropa seit 1500“ sind erstmals Hochwasserereignisse aus mehreren Flusssystemen Mitteleuropas für die letzten fünf Jahrhunderte systematisch zusammengestellt, nach ihrer Auftrittshäufigkeit und Stärke klassifiziert und mit dem witterungsklimatologischen Verlauf in Zusammenhang gebracht worden. Zunächst konnten in der langfristigen Entwicklung markante Phasen verstärkten und verminderten Auftretens von Hochwassern in den verschiedenen Flusseinzugsbereichen Mitteleuropas ab 1500 bestimmt und miteinander verglichen werden. Grundsätzlich weisen diese vor allem im Winter eine große Ähnlichkeit auf. In den anderen Jahreszeiten sind diese geringer, ebenso in der rezenten Periode. Als methodisch besonders schwierig erwies sich zum einen die unbestimmte Definition von Hochwassern, zum anderen die Verknüpfung rezenter Pegelraten mit historischen Angaben. Darüber hinaus wurden atmosphärische Zirkulationsanalysen durchgeführt, aus denen plausible hochwasserbegünstigende Druckmuster sowie charakteristische Zirkulationsveränderungen gegenüber hochwasserfreien Zeitabschnitten abgeleitet werden konnten.

Schlüsselwörter: Historische Klimatologie, Hochwasser, Mitteleuropa, Zirkulationsanalyse

1. Einführung

In den 1990er Jahren traten in Mitteleuropa zahlreiche schwere Hochwasser auf, beispielsweise am Rhein und an der Mosel im Dezember 1993 und im Januar 1995, an der Morava und Oder im Juli 1997. Diese Ereignisse haben deutlich vor Augen geführt, dass Hochwasser zu den folgenschwersten Umweltkatastrophen in Mitteleuropa zu zählen sind. Derartige Ereignisse entfachen regelmäßig Diskussionen um Häufungen, Trendverhalten und die Entwicklung der Intensitäten (vgl. MENDEL et al. 1997). In den letzten Jahren wurde vermehrt auf die mögliche anthropogene Beeinflussung etwa im Zusammenhang mit Global Warming verwiesen (z.B. BRONSTERT 1996, BENDIX 1997) oder die Frage nach der Veränderung der Einzugsgebiete gestellt. Aufschluss über diese Fragenkreise können Untersuchungen langer Reihen geben.

Die objektivsten Informationen zum Hochwasser liefern instrumentelle Pegel- und Durchflussmessungen, die an einigen Flusssystemen bereits seit Anfang des 19. Jh. erhoben wurden. Vielfach sind derartige Messungen aber nur über sehr viel kürzere Perioden verfügbar. Um die langfristigen Entwicklungen, vor allem außerhalb der vom Menschen nachhaltig veränderten Flusslandschaften und vor der Einflussnahme durch anthropogene Klimamodifikationen zu analysieren, sind länger zurückreichende Zeitreihen erforderlich. Diese lassen sich nur durch historische Aufzeichnungen sowie zusätzliche Informationsquellen wie Hochwassermarken gewinnen. Oft ist dabei nicht nur die Rekonstruktion der Dauer, der Stärke und des Schadensmaßes, sondern auch der witterungsklimatischen Ursachen möglich (vgl. GLASER 1998, BRÁZDIL et al. 1999). Historische Hochwasser sind daher schon seit langem Gegenstand wissenschaftlicher Darstellungen.

Klasse	Bezeichnung	Primäre Indikatoren	Sekundäre Indikatoren
1	Kleines, regionales Hochwasser	Geringer Schaden, z. B. an ufernahen Feldern und Gärten, Wegführen von ufernah gelagerten Holzvorräten etc.	Kurze Überflutung
2	Überdurchschnittliches oder überregionales Hochwasser	Schäden an wasserbezogenen Bauten und Einrichtungen wie Dämmen, Wehren, Stegen und Brücken und ufernah gelegenen Gebäuden wie Mühlen etc., Wasser in Gebäuden	Überflutung mittlerer Dauer, schwerere Schäden an ufernahen Feldern und Gärten, Verlust von Vieh, u. U. Menschenverluste
3	Überdurchschnittliches überregionales Hochwasser katastrophalen Ausmaßes	Schwere Schäden an wasserbezogenen Bauten und Einrichtungen wie Dämmen, Wehren, Stegen und Brücken sowie ufernah gelegenen Gebäuden wie Mühlen etc., z. T. völlige Zerstörung und Hinwegführen von Gebäuden auch in uferfernen Gebieten	Längere, mehrere Tage oder Wochen andauernde Überflutung; schwerere Schäden an ufernahen Feldern und Gärten, große Verluste von Vieh, Menschenverluste; morphodynamische Prozesse wie Aufsandungen verursachen nachhaltige Schäden und Veränderungen der Oberflächenstruktur

Fig. 1 Schema zur Intensitätsklassifizierung der historischen Hochwasser
Intensity classification of historic floods used for this publication

gen, wobei schon recht früh umfassende Kompilationen erstellt wurden (u. a. PÖTZSCH 1784, WEIKINN 1958 bis 1963, ROJECKI et al. 1965, JONES et al. 1984). Darüber hinaus existieren zahlreiche Einzeldarstellungen mit genauen Analysen von Schadensbildern und witterungsklimatischen Ursachen beispielsweise bei LIEBSCHER et al. 1988, GLASER & HAGEDORN 1990, WITTE 1991, KOTYZA et al. 1995, GEES 1997, BRÁZDIL 1998, DEUTSCH & PÖRTGE 1998, 2001; DEUTSCH 2000, BRÁZDIL & BUKÁČEK 2000, GLASER 2001 und TETZLAFF et al. 2001.

Ziel der jüngsten Untersuchungen war die Ableitung von langen und kontinuierlichen Hochwasser-Zeitreihen sowie das Auffinden möglicher Zusammenhänge zum atmosphärischen Zirkulationsgeschehen. Insbesondere sollte der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich die schweren Hochwasserereignisse in ihrem räumlichen und zeitlichen Auftreten verändert haben.

niken sowie Hochwassermarken abgeleitet und nach einer quellenkritischen Überprüfung regional differenziert übernommen. Der überwiegende Teil der Daten stammt aus der Historische Klimadatenbank HISKLID (vgl. GLASER 2001). Die gesammelten Ereignisse wurden verschiedenen Flussbereichen zugeordnet, so dass für die Einzugsgebiete Main (mit Unterteilung in Ober-, Mittel- und Untermain), Mittelrhein, Mittelelbe, mittlerer Bereich der Donau, Saale, Weser und Oder langjährige Beobachtungsreihen von Hochwasserereignissen im historischen Zeitraum vorlagen. Die Zuordnung der Einzugsgebiete erfolgte in Anlehnung an den Hydrologischen Atlas von KELLER (1978). Ergänzt wurde dieser Datenbestand durch entsprechende Angaben zu den Flussabschnitten der Moldau, der Oberelbe und der Eger (BRÁZDIL 1998) sowie durch eine Reihe von Daten zum Oberrhein (Basel; PFISTER 1999).

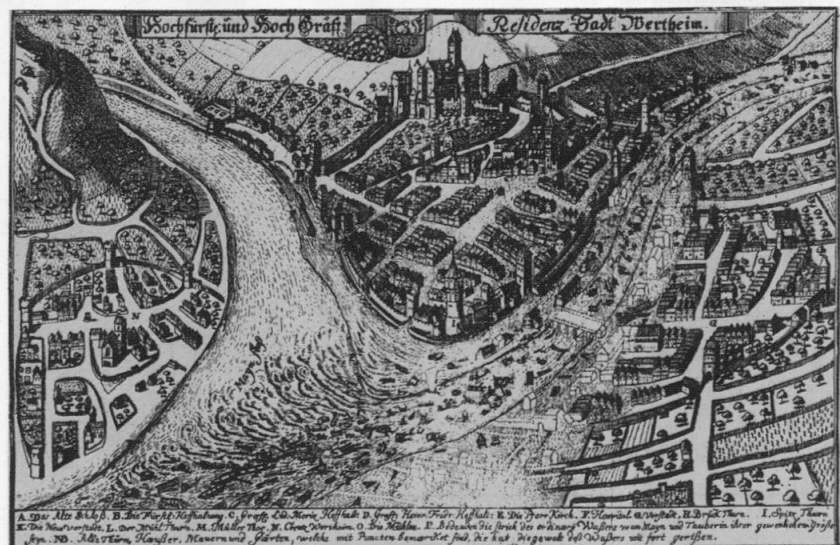
2. Die Daten und ihre Auswertung

Als Grundlage der Analysen dienten historische Aufzeichnungen, rezente Pegelmessdaten verschiedener Stationen in Mitteleuropa für das 19. und 20. Jh. sowie rekonstruierte monatliche (seit 1659) bzw. jahreszeitliche (seit 1500) Gitterfelder des Bodenluftdrucks, der Temperatur und des Niederschlags (LUTERBACHER et al. 2001).

2.1. Die historischen Daten

Die historischen Daten wurden aus verschiedenen Quellen wie Städtetechniken und Hochwasserchro-

Fig. 2 Hochwasser von 1732 Tauber/Main (HEUSSON 1733, vgl. GLASER 2001)
The Tauber/Main River flood of 1732 (HEUSSON 1733, cf. GLASER 2001)



Insgesamt standen somit 14 regionale Hochwasserreihen für eine weiter reichende Analyse zur Verfügung, wobei die historischen Daten zwischen 1500 und 1800 Aussagen zum Zeitpunkt, zum Ablauf und zum Schadensausmaß zulassen. In der weiteren Bearbeitung wurden der Eintritt des Ereignisses und die Intensität näher analysiert, wobei die Intensität aus den Schadensbeschreibungen in drei Klassen differenziert werden konnte (Fig. 1).

In Fig 2 ist eines der schweren Hochwasser an der Tauber, das als *Diluvium Franconium Magnum* bezeichnet wurde, wiedergegeben. In der zeitgenössischen Darstellung ist die zerstörte Häuserzeile in Wertheim sehr gut erkennbar. Auch in den benachbarten Flussgebieten trat ein Hochwasser auf.

Somit wurde jedes Hochwasserereignis nach einer zeitlichen Komponente (Tag, Monat, Jahreszeit, Jahr), seiner regionalen Zuordnung und Intensitätsklasse bestimmt.

2.2. Die rezenten Pegelraten

Für die Zeit nach 1800 wurden amtliche Pegelraten (Durchflüsse und Wasserstände) in den entsprechenden Flussabschnitten herangezogen. Verwendet wurden die monatlichen Maxima und Minima der Stationen Würzburg/Main (1823–1999), Dresden/Elbe (1850 bis 1998), Köln/Rhein (1816–1997) und Hannoversch Münden/Weser (1831–1994).

Bei der Bearbeitung der rezenten Pegelraten wird man mit dem Problem konfrontiert, dass bis heute keine amtliche oder naturwissenschaftlich objektivierbare Definition von Hochwasser existiert, die wesentlich über die sehr allgemeine Umschreibung des „Ausufers des Flusses“ hinausgeht. Erst recht lassen sich keine allgemein verbindlichen Durchflussklassengren-

zen für die in Fig 1 definierten Intensitätsstufen angeben.

Demzufolge galt es nach Wegen zu suchen, um die älteren, auf der Beschreibung von Hochwasserschäden beruhenden Daten mit den auf Pegelmessungen beruhenden Abflussdaten zu einer vergleichbaren Reihe zusammenzufügen. Dazu wurden aus den täglich aufgelösten Pegelraten nach 1800 zunächst die monatlichen Durchflussmaxima ausgegliedert.

Anschließend wurden diese Werte anhand ihrer Abweichungen vom durchschnittlichen Maximum des Referenzzeitraumes 1901 bis 1990 klassifiziert. Als Kriterium für die Klassenbildung wurde die Abweichung vom Mittelwert um die ein-, zwei- bzw. dreifache Standardabweichung herangezogen, d.h. der höchsten Intensitätsstufe wurden diejenigen monatlichen Maxima zugeordnet, die um mehr als die dreifache Standardabweichung über dem durchschnittlichen Maximum liegen. Dabei ist gewährleistet, dass als extrem bekannte Ereignisse, wie zum Beispiel die Winterhochwasser 1882, 1909 und 1995 am Main, auch der Klasse 3 zugeordnet werden.

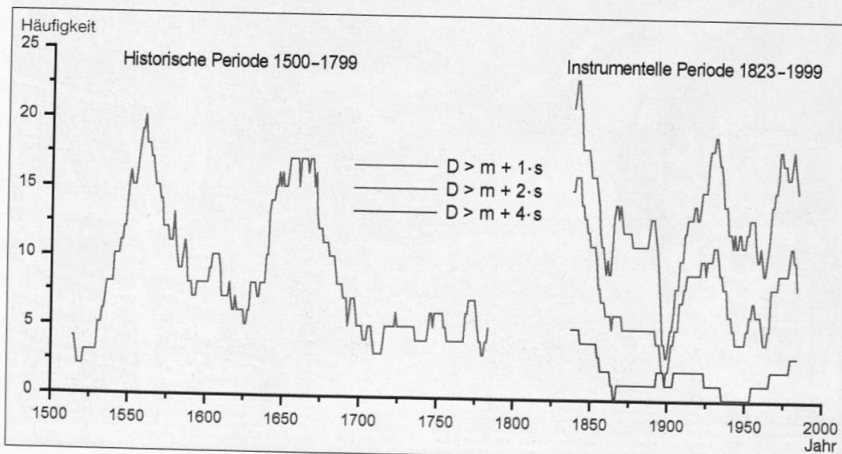
Weitere Versuche mit Klassenbildungen auf der Basis von Abweichungen vom Mittelwert um die zwei-, vier- und sechsfache bzw. um die halbe, einfache und einhalbfache Standardabweichung wurden verworfen, weil die gleitenden Häufigkeiten überdurchschnittlicher Maxima zu sehr vom Schwankungsbereich der historischen Häufigkeitsreihe intensiver Hochwasserereignisse abwichen (Fig. 3).

Bei der Frage nach den Ursachen eines Hochwasserereignisses ist zwischen der Disposition, den Voraussetzungen, die vor dem Eintritt des Ereignisses bestehen, und der unmittelbaren Auslösung zu unterscheiden (BAW 1991). Bei den Ursachen kann man zwischen Niederschlagsanomalien (großflächigen Dauerregen oder Starkregen), Warmlufteinbrüchen mit

Schmelzung großer Schneemengen und Eisstau unterscheiden. Als Folge von Dauerregen treten Überschwemmungen dann auf, wenn die Böden im Einzugsgebiet mehrheitlich gesättigt sind. Bei der Schneeschmelze sind die Höhe und der Wassergehalt der Schneedecke von Bedeutung, ferner die Geschwindigkeit des Schmelzprozesses und die Menge der Niederschläge sowie der Zustand des Untergrundes. Eisstau ist auf die Wirkung von Treibeis zurückzuführen, das an Hindernissen wie Brückenpfeilern hängen bleibt und den Fluss staut. Letztlich ist jedes Hochwasser das Ergebnis eines Geschehens, das in seinem Verlauf zwar einmaligen Charakter trägt, aber in der Konstellation seiner Ursachen doch gewisse Regelmäßigkeiten zeigt.

Fig. 3 31-jährige gleitende Häufigkeiten der historischen Winterhochwasser am Main (Intensitätsklassen 2 und 3) und der überdurchschnittlichen Durchflussmaxima am Pegel Würzburg (D = Durchflussmaximum, m = Mittelwert, s = Standardabweichung der Durchflussmaxima)

31-year running frequency of historical winter floods of the Main River and above-average discharge rate maxima at the Würzburg gauge (D = through-flow maximum, m = mean, s = standard deviation)



2.3. Die rekonstruierten Druckfelder

Basierend auf frühen instrumentellen Messreihen sowie aus historischem Quellenmaterial abgeleiteten Witterungsindizes, sind an der Universität Bern mittels multivariater statistischer Methoden nordatlantisch-europäische Bodenluftdruckfelder rekonstruiert worden, die bis ins Jahr 1500 zurückreichen bei anfänglich saisonaler, ab dem Jahr 1659 sogar monatlicher Auflösung (LUTERBACHER et al. 2000, 2001). Diese Druckfelder sind vor allem im Winter seit Mitte des 17. Jh. durch hohe Rekonstruktionsgüte gekennzeichnet und versetzen uns in die Lage, erste Untersuchungen über Beziehungen des historischen Hochwassergeschehens zu den atmosphärischen Zirkulationsverhältnissen in Angriff zu nehmen. Dabei kann aufgrund der maximal monatlichen Auflösung der rekonstruierten Druckfelder natürlich keine Analyse synoptischer Störungssysteme erfolgen, die zur unmittelbaren Auslösung von Hochwasserereignissen geführt haben. Auch detaillierte Einzelstudien, wie sie von TETZLAFF et al. (2001) bezüglich des Jahrtausendereignisses von 1342 angestellt werden, liegen außerhalb der hier verfolgten Intentionen. Zielrichtung ist vielmehr die Analyse atmosphärischer Zirkulationsregime, die die Entwicklung Hochwasser auslösender Störungssysteme begünstigen bzw. restringieren. Zirkulationsregime sind durch die Häufung bestimmter atmosphärischer Zustandsformen gekennzeichnet und drücken sich damit u. a. in charakteristischen Zirkulationsmustern aus (etwa typische Westlagen als Ausdruck eines zonalen Zirkulationsregimes).

Als Methode zur Bestimmung atmosphärischer Zirkulationsmuster wurden t-modale Hauptkomponentenanalysen durchgeführt, getrennt für die Zeiträume mit nur saisonaler Auflösung der rekonstruierten Druckfelder (1500–1658) und nachfolgend monatlicher Auflösung, hierbei nochmals gesondert für den verbleibenden historischen Zeitraum dokumentarischer Datenbelegung (1659 bis 1799) und den rezenten Pegelmesszeitraum seit dem 19. Jh. Die Analysen erfolgen zum einen für die Kollektive derjenigen Monate bzw. Jahreszeiten, in denen zumindest ein Hochwasserereignis aufgetreten ist, zum anderen für die verbleibenden hochwasserfreien Zeitabschnitte. Damit gewinnt man Aufschluss sowohl über die vorherrschenden Luft-

druckkonstellationen in hochwasserbetroffenen Zeitintervallen als auch über Unterschiede zu den Zirkulationsverhältnissen in hochwasserfreien Perioden.

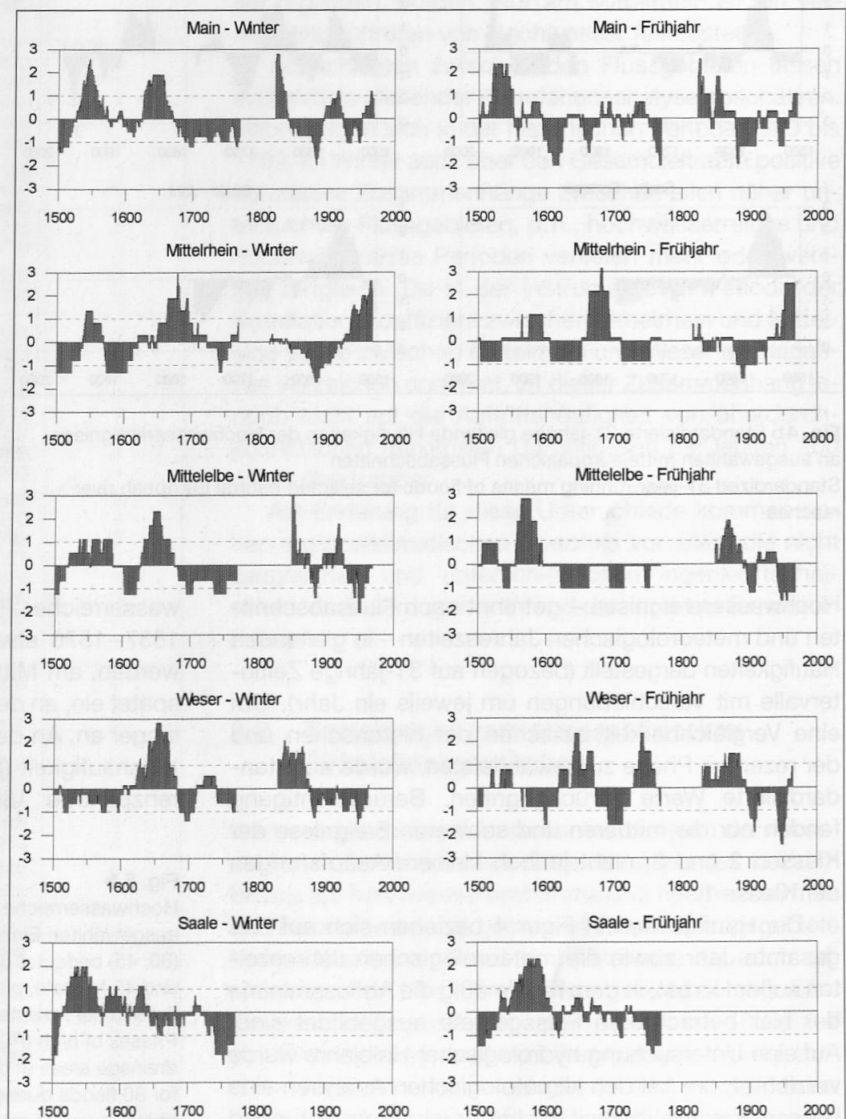
3. Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse beziehen sich auf die langfristige Entwicklung der Hochwasserhäufigkeit in Mitteleuropa und auf erste zirkulationsdynamische Zusammenhänge.

3.1. Zur langfristigen Entwicklung des Hochwassergeschehens in Mitteleuropa

Um einen Überblick über den zeitlichen Verlauf des Hochwassergeschehens zu gewinnen, wurden die

Fig. 4a Standardisierte 31-jährige gleitende Häufigkeiten der Hochwasserereignisse an ausgewählten mitteleuropäischen Flussabschnitten
Standardized 31-year running means of floods for selected central European river reaches



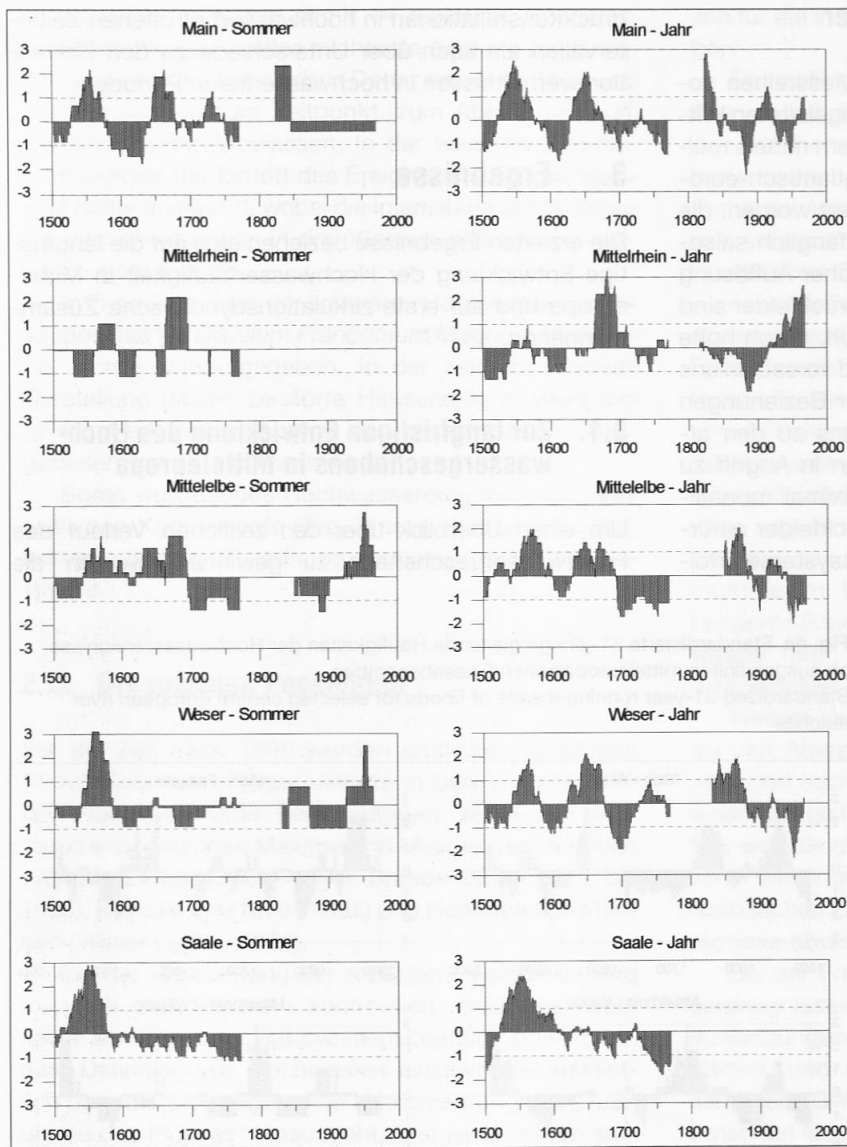


Fig. 4b Standardisierte 31-jährige gleitende Häufigkeiten der Hochwasserereignisse an ausgewählten mitteleuropäischen Flussabschnitten
Standardized 31-year running means of floods for selected central European river reaches

Hochwasserereignisse – getrennt nach Flussabschnitten und meteorologischen Jahreszeiten – in gleitenden Häufigkeiten dargestellt (bezogen auf 31-jährige Zeitintervalle mit Verschiebungen um jeweils ein Jahr). Um eine Vergleichbarkeit zwischen der historischen und der rezenten Phase zu gewährleisten, wurde auf standardisierte Werte zurückgegriffen. Berücksichtigung fanden nur die mittleren und schweren Ereignisse der Klassen 2 und 3, nicht jedoch kleinere Ausuferungen der Klasse 1.

Die Häufigkeiten in Figur 4 beziehen sich auf das gesamte Jahr sowie die meteorologischen Jahreszeiten außer Herbst, in dem regelmäßig die Abflussminima der hier betrachteten Flussgebiete ausgebildet sind. Auf eine Untersuchung hydrologischer Halbjahre wurde verzichtet, um bei den klimatologischen Analysen eine bessere Vergleichbarkeit mit Luftdruck, Temperatur und

Niederschlag zu gewährleisten. Die resultierenden saisonalen Zeitreihen lassen eine klare zeitliche Gliederung in Phasen vermehrter bzw. verminderter Häufigkeit von Hochwassern erkennen (Fig. 4a u. 4b).

Anhand ausgewählter repräsentativer Beispiele sollen einige der herausragenden hochwasserreichen und hochwasserarmen Phasen vorgestellt werden.

Als hochwasserreich sind Perioden definiert, bei denen die standardisierten 31-jährigen gleitenden Hochwasserhäufigkeiten über der Standardabweichung, d.h. über 1, liegen. Entsprechend bedeutet eine hochwasserarme Phase eine standardisierte Häufigkeit unter -1. Als Beginn bzw. Ende derartiger Perioden wurden das Jahr des ersten und das des letzten Hochwassers bzw. das Jahr nach dem letzten und das vor dem nachfolgend ersten Hochwasser bestimmt. Figur 5 zeigt dies exemplarisch für Winter, Frühjahr und Sommer der oben dargestellten Flussgebiete.

Am Main gliedern sich die Winterhochwasser seit 1500 in 4 hochwasserarme und 5 hochwasserreiche Phasen mit dazwischen liegenden Perioden durchschnittlicher Auftrittshäufigkeit. Die ausgegliederten Phasen unterschiedlicher hydrologischer Prägung verlaufen an den anderen Flüssen zum Teil zeitgleich, teilweise sind sie zeitlich verschoben oder dauern manchmal länger bzw. kürzer an. In einigen Fällen treten sogar inverse Vorzeichen auf.

So konnte z.B. die erste hochwasserreiche Periode der Wintermonate am Main 1537–1576 etwa zeitgleich an der Saale festgestellt werden, am Mittelrhein trat diese um 1552 etwas verspätet ein, an der Mittelelbe dauerte sie bis 1602 etwas länger an. An der Weser ist eine durchschnittliche Auftrittshäufigkeit (jedoch über dem Mittelwert der Referenzperiode 1500–1799) von Winterhochwasser zu

Fig. 5 ▶ Hochwasserreiche (POS) und hochwasserarme (NEG) Phasen in ausgewählten Einzugsgebieten zu verschiedenen Jahreszeiten. (80; 45) bedeutet 80 Hochwasser in der historischen Periode und 45 Monate mit überdurchschnittlichem maximalen Durchfluss in der rezenten Periode.
Phases of high (POS) and low (NEG) flood frequency of selected drainage areas at different seasons. (80; 45), for instance, stands for 80 floods during the historical period and 45 months with above-average maximum through-flow in the present period.

Einzugsgebiet	Jahreszeit	Phase	Zeitraum	Anzahl der Hochwasser	
Main	Winter (80; 45)	NEG	1503–1536	2	
		POS	1537–1576	22	
		POS	1631–1694	28	
		NEG	1695–1730	3	
		NEG	1764–1795	3	
		POS	1828–1854	16	
		NEG	1883–1914	1	
		POS	1915–1946	12	
		POS	1966–?	11	
		Frühjahr (35; 18)	POS	1533–1570	10
			NEG	1610–1648	0
	NEG		1662–1694	1	
	NEG		1767–1799	0	
	POS		1827–1881	9	
	NEG		1882–1939	1	
	NEG		1943–1980	1	
	Sommer (55; 1)	POS	1981–?	4	
		POS	1546–1585	12	
NEG		1586–1661	3		
POS		1662–1695	14		
Mittelrhein	Winter (24; 54)	NEG	1500–1551	0	
		POS	1552–1573	5	
		NEG	1574–1634	0	
		POS	1670–1721	10	
		NEG	1742–1775	0	
		NEG	1883–1936	4	
		POS	1937–1997	32	
	Frühjahr (9; 19)	NEG	1504–1564	0	
		NEG	1597–1682	1	
		NEG	1712–1783	0	
		NEG	1882–1923	1	
		POS	1956–?	9	
	Saale	Winter (60)	NEG	1505–1532	0
			POS	1533–1579	19
			POS	1595–1614	8
			POS	1635–1658	9
			NEG	1742–1783	2
		Frühjahr (57)	NEG	1500–1550	5
POS			1576–1627	20	
NEG			1628–1650	1	
NEG			1710–1743	3	
NEG			1756–1789	1	
Sommer (80)		POS	1549–1588	29	
		NEG	1746–1788	4	
Weser	Winter (35; 49)	NEG	1516–1551	1	
		NEG	1572–1627	2	
		POS	1628–1694	18	
		NEG	1695–1738	1	
		NEG	1765–1798	1	
		POS	1833–1882	26	
		NEG	1884–1908	3	
		NEG	1949–1983	4	
	Frühjahr (18; 27)	NEG	1599–1632	0	
		POS	1649–1692	6	
		NEG	1693–1743	0	
		POS	1744–1771	5	
		POS	1876–1914	9	
		NEG	1915–1939	0	
		NEG	1944–1983	2	
	Sommer (21; 3)	POS	1565–1600	11	
	Mittelelbe	Winter (19; 28)	NEG	1500–1536	0
			POS	1537–1602	9
NEG			1603–1650	0	
POS			1651–1682	7	
NEG			1695–1783	1	
POS			1851–1882	11	
NEG			1884–1906	2	
POS			1917–1948	9	
NEG			1949–1973	0	
Frühjahr (10; 31)			NEG	1538–1577	0
		POS	1578–1595	4	
		NEG	1623–1783	2	
		POS	1865–1900	14	
		NEG	1901–1939	3	
		NEG	1957–1998	3	
		Sommer (24; 10)	POS	1560–1599	7
POS			1650–1661	4	
POS			1687–1698	6	
NEG			1699–1799	1	
NEG			1887–1925	0	
POS			1954–1981	6	

konstatieren. Was das Temperatur- und Niederschlagsgepräge betrifft, sind die Winter dieses Zeitraumes als überdurchschnittlich feucht und kalt zu bezeichnen. Im Gegensatz dazu ist die Phase unterdurchschnittlicher maximaler Durchflüsse um die Wende vom 19. zum 20. Jh., die an allen vier analysierten Pegelstationen – jedoch mit unterschiedlicher Dauer – registriert wurde, als relativ trocken und mild zu charakterisieren.

Die Periode erhöhter Häufigkeit überdurchschnittlicher maximaler Durchflüsse 1828–1854 am Pegel Würzburg trat auch an den Pegeln Hannoversch Münden und Dresden auf, wobei sie in beiden Fällen länger andauerte, für Dresden aber erst mit Beginn der Pegelreihe ab 1850 statistisch nachgewiesen werden konnte. Am Pegel Köln wurden immerhin Häufigkeiten über dem mittleren Wert erreicht. Jedoch ist diese Phase als relativ trocken und kalt zu bezeichnen. Somit eignen sich die monatlichen Niederschläge in diesem Fall nicht zur Erklärung der überdurchschnittlichen Auftrittshäufigkeit erhöhter maximaler Durchflüsse. Eine ähnliche Diskrepanz besteht in den Wintern 1695–1730, die zwar überdurchschnittlich feucht waren, in denen aber an Main, Weser und Mittelbe kaum Winterhochwasser registriert wurden. Nur am Mittelrhein ist ein vermehrtes Auftreten von Hochwasser festzustellen.

Ähnlichkeiten zwischen den Flussgebieten lassen sich mittels gleitender Korrelationsanalyse abschätzen. Dabei zeigen sich in der historischen Periode 1500 bis 1799, im Winter auch über den Gesamtzeitraum positive korrelative Zusammenhänge zwischen allen näher untersuchten Flussgebieten, d. h., hochwasserreiche und hochwasserarme Perioden verliefen mehr oder weniger zeitgleich. Da in der instrumentellen Periode der Korrelationskoeffizient zwischen Mittelrhein und Mittelbe sowie zwischen Mittelrhein und Weser ein negatives Vorzeichen annimmt, ist dieser Zusammenhang jedoch nicht auf die Auftrittshäufigkeit von überdurchschnittlichen maximalen Durchflüssen der letzten 200 Jahre übertragbar.

Als Erklärung für diese Unterschiede kommen neben regionalklimatischen Spezifika vor allem die nicht zeitgleichen und unterschiedlichen ingenieurtechnischen Veränderungen während der rezenten Periode in Betracht.

3.2. Beziehungen zum atmosphärischen Zirkulationsgeschehen

Die t-modalen Hauptkomponentenanalysen der rekonstruierten Bodenluftdruck-Gitterfelder wurden in ihrem Bezug auf hochwasserbetreffene und hochwasserfreie Zeitabschnitte sowohl gesondert für die Einzugsgebiete Main, Mittelrhein, Weser und Mittelbe als auch zusammengefasst für alle vier Flussgebiete durchgeführt (Beginn des Pegelmesszeitraums somit bei 1850). Auf die Einbeziehung weiterer Flussgebiete wurde aufgrund lückiger oder nur eingeschränkt vergleichbarer Datengrundlagen verzichtet. Figur 6 zeigt die resultie-

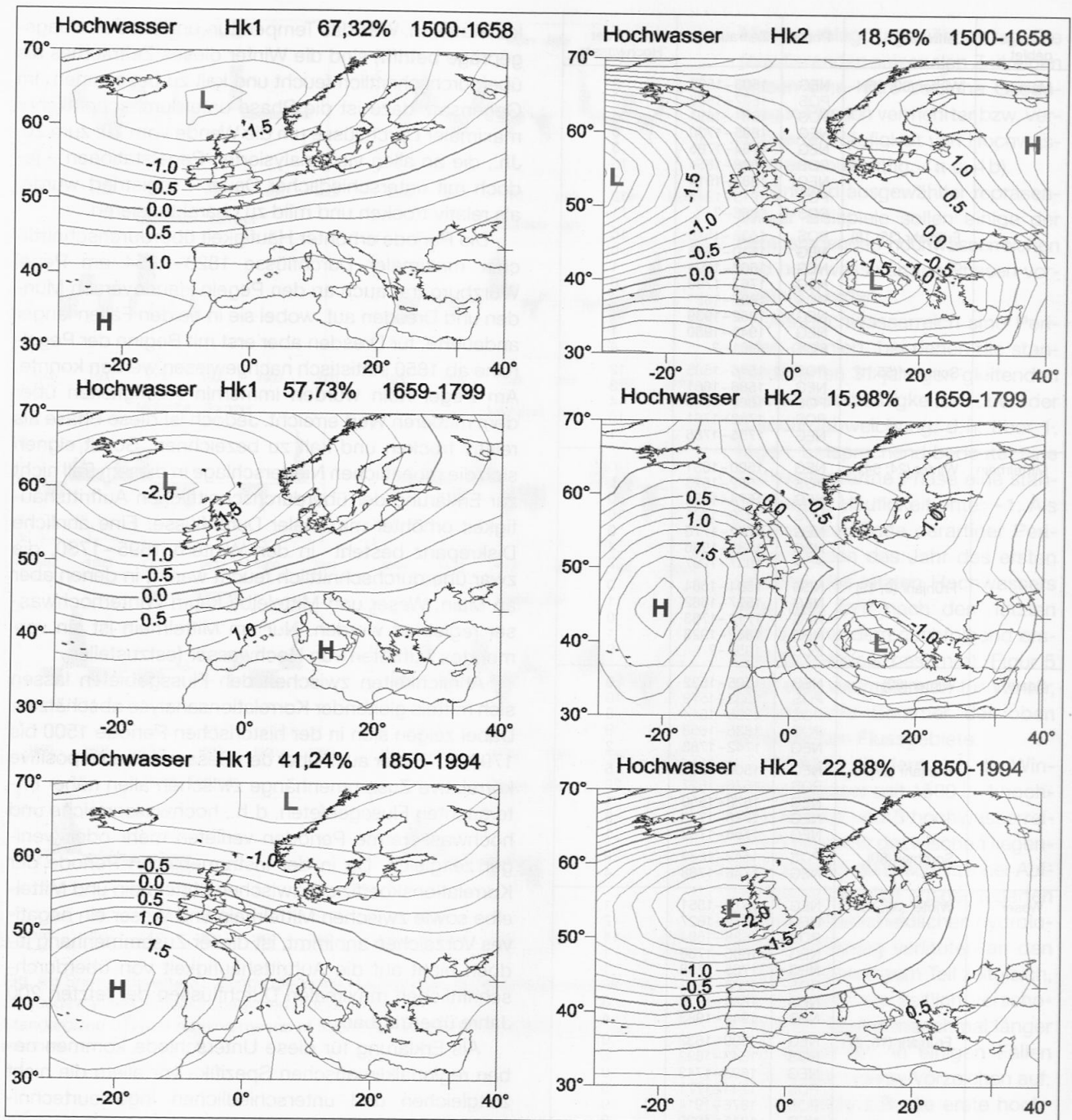


Fig. 6a Zirkulationsmuster der ersten beiden Hauptkomponenten der winterlichen Bodenluftdruckfelder (LUTERBACHER et al. 2001) von Monaten bzw. Jahreszeiten mit Hochwasser in Zentraleuropa, bezogen auf unterschiedliche Zeiträume. Die Prozentwerte geben die jeweiligen Varianzerklärungsanteile an.

Circulation patterns of the first two principal components of winter surface pressure fields (LUTERBACHER et al. 2001) for selected periods of months respectively seasons with floods in central Europe. The percentage values indicate the amount of variance explained in each case.

renden Zirkulationsmuster für die integrativ zentraleuropäische Variante am Beispiel der wichtigsten Hochwassersaison Winter. Es werden jeweils nur die beiden ersten extrahierten Hauptkomponenten wiedergegeben, die bereits das Gros an Originalvarianz erklären.

Bei den hochwasserfreien Zirkulationsmustern (Figur 6b) zeigen sich in allen untersuchten Zeiträumen die bekannten Grundmuster einer westlichen Strömungslage sowie eines Druckfeldes mit atlantischem Tief und

westwärts ausgeweitetem Russland-Hoch. Im Vergleich dazu stellen sich bei den hochwasserbezogenen Zirkulationsmustern (Fig. 6a) folgende Veränderungen ein: Sowohl in der historischen Periode 1500–1658 als auch in der instrumentellen Periode nach 1850 zeigt sich eine Verschiebung der zonalen Westlage nach Süden mit der Konsequenz einer stärker zyklonalen Prägung der Witterung über Mitteleuropa. In den hochwasserbetroffenen Monaten des Zeitraums 1659–1799 fehlt

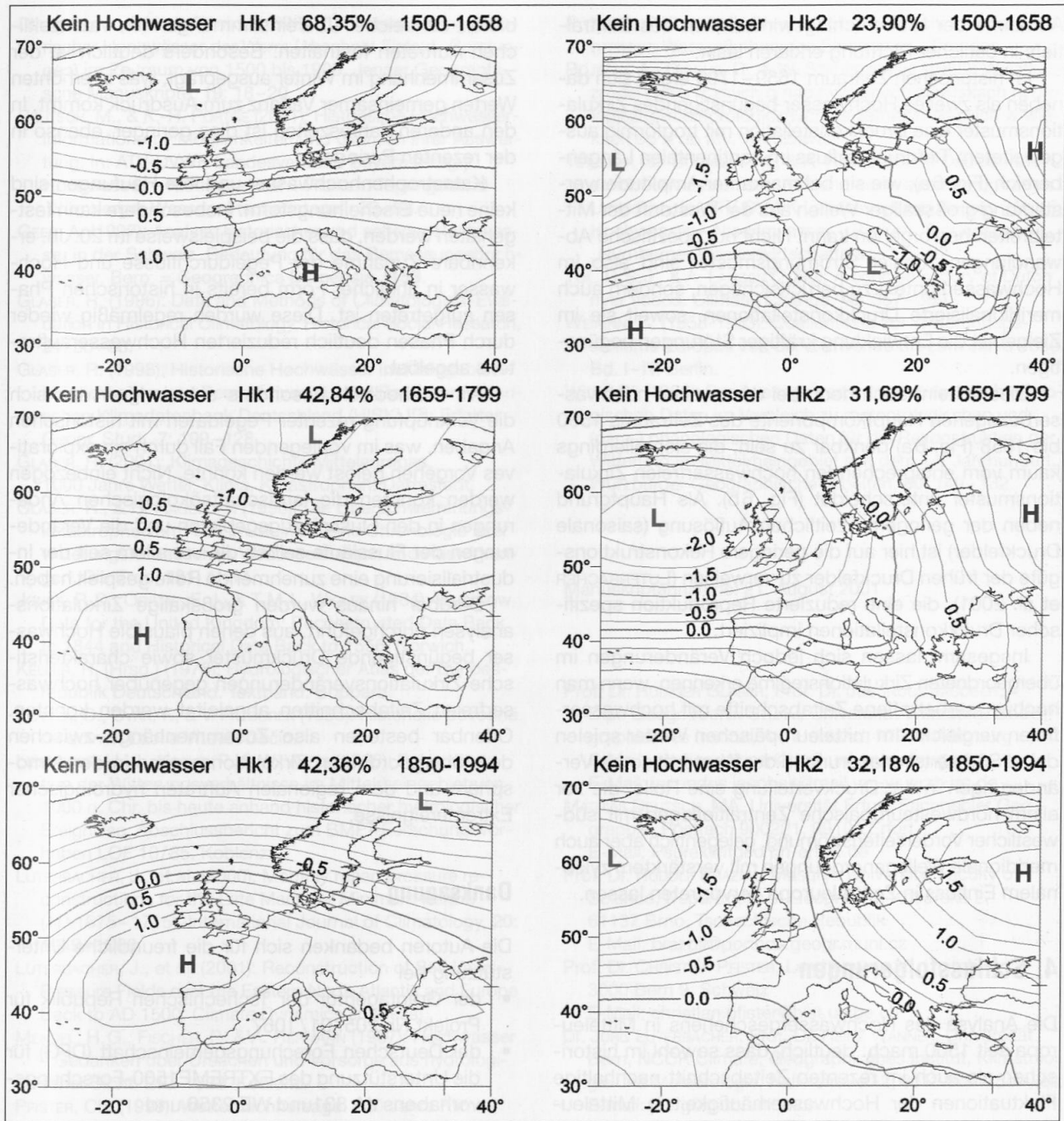


Fig. 6b Zirkulationsmuster der ersten beiden Hauptkomponenten der winterlichen Bodenluftdruckfelder (LUTERBACHER et al. 2001) von Monaten bzw. Jahreszeiten ohne Hochwasser in Zentraleuropa, bezogen auf unterschiedliche Zeiträume. Die Prozentwerte geben die jeweiligen Varianzerklärungsanteile an.

Circulation patterns of the first two principal components of winter surface pressure fields (LUTERBACHER et al. 2001) for selected periods of months respectively seasons without floods in central Europe. The percentage values indicate the amount of variance explained in each case.

diese typische Westlage völlig. Stattdessen entwickelt sich häufig ein bis nach Skandinavien und zum Baltikum ausgedehntes Zentraltief mit Kern zwischen Island und Schottland, das feuchtwarme Luftmassen aus Südwesten nach Mitteleuropa führt (Fig. 6a). Dieser Luftdruckkonstellation kommt bei der Hochwasserentstehung große Bedeutung zu, da sie sowohl mit ergiebigen Niederschlägen verbunden ist als auch Schneeschmelze bis in höhere Lagen einleiten kann. Auch das

zweite Zirkulationsmuster für rezente Monate mit weit überdurchschnittlichen Durchflussmaxima zeigt eine ähnliche Druckkonstellation (Fig. 6a).

Bei genauerer Betrachtung der Hochwassermonate, deren Druckfelder am stärksten mit diesem südwestlichen Zirkulationsmuster korreliert sind, lässt sich räumlich differenzierend feststellen, dass es an Main, Mittelrhein und Weser bedeutsamer für Hochwasserereignisse ist als an der mittleren Elbe, was sich durch eine

Abnahme der Niederschlagswirksamkeit des Zentraltiefs in östlicher Richtung erklären lässt.

Im historischen Zeitraum 1659–1799 ergibt sich daneben als zweites Hochwasser begünstigendes Zirkulationsmuster eine Druckkonstellation mit trogförmig ausgedehntem Tiefdruckeinfluss im kontinentalen Längsbereich (Fig. 6a), wie sie bei markanter Amplitudenverstärkung großskaliger Wellen aus der Westdrift der Mittelbreiten hervorgehen kann. Nicht nur spezifische Abwandlungen zonaler Strömungsmuster sind also im Hochwasserkontext zu berücksichtigen, sondern auch meridionalisierte Druckkonstellationen, soweit sie im Zielgebiet die Entwicklung kräftiger Störungen begünstigen.

Dies scheint auch noch bei der zweiten hochwasserbezogenen Hauptkomponente des Zeitraums 1500 bis 1658 (Fig. 6a) denkbar zu sein, die sich allerdings kaum vom entsprechenden hochwasserfreien Zirkulationsmuster unterscheidet (Fig. 6b). Als Hauptgrund neben der geringeren zeitlichen Auflösung (saisonale Druckfelder) ist hier auf die geringere Rekonstruktionsgüte der frühen Druckfelder zu verweisen (LUTERBACHER et al. 2001), die eine reduzierte Reproduktion spezifischer Druckkonstellationen impliziert.

Insgesamt lassen sich jedoch Veränderungen im übergeordneten Zirkulationsregime erkennen, wenn man hochwasserbetroffene Zeitabschnitte mit hochwasserfreien vergleicht. Im mitteleuropäischen Winter spielen dabei Südverlagerungen der Westdrift sowie Veränderungen in der Druckverteilung eine Rolle, die vor allem nordwesteuropäische Zentraltiefen mit südwestlicher Vorderseitenströmung, gelegentlich aber auch meridionale Wellenanordnungen mit verstärktem zyklonalem Einfluss in Zentraleuropa hervortreten lassen.

4. Schlussfolgerungen

Die Analyse des Hochwassergeschehens in Mitteleuropa seit 1500 macht deutlich, dass sowohl im historischen als auch im rezenten Zeitabschnitt nachhaltige Fluktuationen der Hochwasserhäufigkeit in Mitteleuropa stattgefunden haben. Dabei lassen sich an den 14 untersuchten Flussabschnitten bzw. Flusseinzugsge-

bieten zahlreiche Übereinstimmungen im raumzeitlichen Auftreten festhalten. Besonders deutlich ist der Zusammenhang im Winter ausgeprägt, was in erhöhten Werten gemeinsamer Varianz zum Ausdruck kommt. In den anderen Jahreszeiten ist dies geringer, ebenso in der rezenten Periode.

Katastrophenhochwasser und ihre Häufungen sind keine neue Erscheinungsform. Insbesondere kann festgehalten werden, dass die beispielsweise im 20. Jh. erkennbare Zunahme der Pegeldurchflüsse und Hochwasser in ähnlicher Form bereits in historischen Phasen aufgetreten ist. Diese wurden regelmäßig wieder durch Phasen deutlich reduzierten Hochwasserauftretens abgelöst.

Als methodisch besonders schwierig erwies sich die Verknüpfung rezenter Pegelraten mit historischen Angaben, was im vorliegenden Fall durch ein exploratives Vorgehen gelöst werden konnte. Nicht einbezogen werden konnten die landschaftsökologischen Änderungen in den Flusseinzugsgebieten und die Veränderungen der Flussläufe selbst, die vor allem seit der Industrialisierung eine zunehmende Rolle gespielt haben.

Darüber hinaus wurden großskalige Zirkulationsanalysen durchgeführt, aus denen plausible Hochwasser begünstigende Druckmuster sowie charakteristische Zirkulationsveränderungen gegenüber hochwasserfreien Zeitabschnitten abgeleitet werden konnten. Offenbar bestehen also Zusammenhänge zwischen dem übergeordneten Zirkulationsregime in der Atmosphäre und dem regionalen Auftreten hydrologischer Extremereignisse.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die freundliche Unterstützung bei

- der Grantagentur der Tschechischen Republik für Projekt Nr. 205/01/1067,
- der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung des EXTREME1500-Forschungsvorhabens JA 831 und WE 2356 und
- dem Schweizer Nationalfonds für die Unterstützung des FLOODRISK-Projekts Nr. 11-52786-97.

Literatur

- BAW [Bundesamt für Wasserwirtschaft] (1991): Ursachen der Hochwasser 1987 – Ergebnisse der Untersuchungen. Bern. = Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, **4**.
- BENDIX, J. (1997): Natürliche und anthropogene Einflüsse auf den Hochwasserabfluss des Rheins. *Erdkunde*, **51**: 292–308.
- BRÁZDIL, R. (1998): The history of floods on the rivers Elbe and Vltava in Bohemia. *Erfurter Geogr. Stud.*, **7**: 93–108.
- BRÁZDIL, R., & M. BUKÁČEK (2000): Chronology of floods in the catchment area of the river Morava (the Czech Republic) since the 16th century. In: MIKAMI, T. [Ed.]: Proceedings of the International Conference on Climate Change and Variability – Past, Present and Future. Tokyo, 139–144.

- BRÁZDIL, R., ANTOINE, J. M., BARRIENDOS, M., CAMUFFO, D., DEUTSCH, M., DOBROVOLNÝ, P., ENZI, S., GLASER, R., GUIDOBONI, E., KOTYZA, O., PFISTER, CH., & F. S. RODRIGO (1999): Flood events in selected rivers in the sixteenth century. In: PFISTER, CH., BRÁZDIL, R., & R. GLASER [Eds.]: Climatic Variability in Sixteenth Century Europe and Its Social Dimension. *Climatic Change, Spec. Vol.*, **43** (1): 239–285.
- BRONSTERT, A. (1996): Änderung von Hochwassercharakteristiken im Zusammenhang mit Klimaänderungen. *PIK Report*, **15**.
- DEUTSCH, M. (2000): Zum Hochwasser der Elbe und Saale Ende Februar/Anfang März 1799. *Erfurter Geogr. Stud.*, **9**: 7–44.

- DEUTSCH, M., & K.-H. PÖRTGE (1998): Zur Untersuchung historischer Hochwässer der Werra (Abschnitt Eisfeld–Gerstungen) im Zeitraum von 1500 bis 1900. Jenaer Geographische Manuskripte, **19**: 18–20.
- DEUTSCH, M., & K.-H. PÖRTGE (2001): Historische Hochwasserinformationen – Möglichkeiten und Grenzen ihrer Auswertung. In: ATV-DVWK Landesverband Bayern [Hrsg.]: Hochwasser – Niedrigwasser – Risiken. Tagungsband „Nürnberger Wasserwirtschaftstage“: 23–38.
- GEES, A. (1997): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz. Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Bern. = Geographica Bernensia, **G53**.
- GLASER, R. (1996): Data and Methods of Climatological Evaluation in Historical Climatology. Historical Social Research, **21**: 56–88.
- GLASER, R. (1998): Historische Hochwässer im Maingebiet – Möglichkeiten und Perspektiven auf der Basis der Historischen Klimadatenbank Deutschland (HISKLID): Erfurter Geogr. Stud., **7**: 109–128.
- GLASER, R. (2001): Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Darmstadt.
- GLASER, R., & H. HAGEDORN (1990): Die Überschwemmungskatastrophe von 1784 im Maintal. Eine Chronologie ihrer witterungsklimatischen Voraussetzungen und Auswirkungen. Die Erde, **121**: 1–14.
- JONES, R. D., OGILVIE, E. J., & T. M. L. WIGLEY (1984): Riverflow Data for the United Kingdom: Reconstructed Data Back to 1844 and Historical Data Back to 1556. Norwich.
- KELLER, R. [Hrsg.] (1978): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. Textband. Boppard.
- KOTYZA, O., CVRČEK, F., & V. PAŽOUREK (1995): Historické povodně na dolním Labi a Vltavě. Děčín.
- LIEBSCHER, H.-J., KRAHE, P., & W. WITTE (1988): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse. Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben LOF 10/85. Koblenz.
- LUTERBACHER, J., et al. (2000): Monthly mean pressure reconstructions for the Late Maunder Minimum Period (AD 1675–1715). International Journal of Climatology, **20**: 1049–1066.
- LUTERBACHER, J., et al. (2001): Reconstruction of Sea Level Pressure Fields over the Eastern North Atlantic and Europe Back to AD 1500. Climate Dynamics [in press].
- MENDEL, H. G., FISCHER, P., & A. HERMANN (1997): Hochwasser – Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. BfG-1022. Koblenz.
- PFISTER, Ch. (1999): Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen. Bern.
- PÖTZSCH, C. G. (1784): Chronologische Geschichte der grossen Wasserfluthen des Elbstroms ... Dresden.
- ROJECKI, A., GIRGUS, R., & W. STRUPCZEWSKI (1965): Wyjtki ze źródeł historycznych o nadzwyczajnych zjawiskach hydrologiczno-meteorologicznych na ziemiach polskich w wiekach od X do XIV. Warszawa.
- TETZLAFF, G., BÖRNGEN, M., & A. RAABE (2001): Das Jahrtausendhochwasser von 1342 und seine meteorologischen Ursachen. In: ATV-DVWK Landesverband Bayern [Hrsg.]: Hochwasser – Niedrigwasser – Risiken. Tagungsband „Nürnberger Wasserwirtschaftstage“: 5–22.
- TOL, R. S. J., & A. LANGEN (2000): A concise history of Dutch river floods. Climatic Change, **46**: 357–369.
- WEIKINN, C. (1958-1963): Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitwende bis zum Jahre 1850. Bd. I–IV. Berlin.
- Witte, W. (1991): Der Aussagewert von historischen hydrologischen Daten im Vergleich zu meteorologischen und (para-) phänologischen Daten für die Rekonstruktion der Witterung im Mittelrheingebiet seit dem 14. Jahrhundert. Würzburger Geographische Arbeiten, **80**: 149–182.

Manuskriptannahme: 21. August 2001

Prof. Dr. RÜDIGER GLASER, Prof. Dr. JUCUNDUS JACOBET, Dipl. Geogr. KATRIN STURM, Universität Würzburg, Geographisches Institut, Am Hubland, 97074 Würzburg
E-Mail: ruediger.glaser@mail.uni-wuerzburg.de
E-Mail: jucundus.jacobeit@mail.uni-wuerzburg.de

MATHIAS DEUTSCH, MA, Universität Erfurt, Fachgebiet Geographie, Postfach 900221, 99105 Erfurt
E-Mail: Psurek@ifgeo.ph-erfurt.de

Prof. Dr. RUDOLF BRÁZDIL, Masaryk University, Faculty of Science, Department of Geography, Kotlářská 2, 61137 Brno, Tschechische Republik
E-Mail: brazdil@porthos.geogr.muni.cz

Prof. Dr. CHRISTIAN PFISTER, Lerchenweg 36, Unitobler, 3000 Bern 9, Schweiz
E-Mail: christian.pfister@hist.unibe.ch

Dr. JÜRGE LUTERBACHER, Prof. Dr. HEINZ WANNER, Universität Bern, NCCR Climate, Geographisches Institut, Klimatologie und Meteorologie, Hallerstraße 12, 3012 Bern, Schweiz
E-mail: juerg@giub.unibe.ch
E-Mail: wanner@giub.unibe.ch