

Extremniederschläge in Deutschland Zufall oder Zeichen?

J. Grieser, C. Beck

Einleitung

Im Lauf des letzten Jahrzehnts waren in verschiedenen Flusseinzugsgebieten Deutschlands mehrere Hochwasserereignisse zu beobachten, die das Prädikat Jahrhunderthochwasser erhielten (z. B. Rhein: 1993, 1995; Oder: 1997; Donau: 1999, 2002; Elbe: 2002). Maßgeblich verursachend für diese waren Extremniederschläge (Bendix 1997, Rudolf und Rapp 2002).

In dieser Arbeit soll der Frage nachgegangen werden, ob es sich dabei um zufällige Ereignisse handelt, die von Zeit zu Zeit vorkommen, oder ob sie die Folge von Veränderungen der statistischen Eigenschaften von Starkniederschlägen in Deutschland sind.

Hochwasser und klassische Extremwertstatistik

Zur Untersuchung von extremen Niederschlägen, wie allgemein zur Untersuchung von Extremen, wird im allgemeinen die Extremwertstatistik verwendet (siehe z.B. Märtlitz und Ertel, 2001). Diese ist eine klassische und gut ausgebaute statistische Theorie. Sie basiert allerdings auf der Annahme der Stationarität. Was bedeutet das? Beobachtet man eine Variable über einen gewissen Zeitraum, so kann man zählen, wie oft ein bestimmter Schwellwert von ihr überschritten wurde. Die Häufigkeit der Überschreitungen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Beobachtungen (also die relative Häufigkeit) kann dann als Maß (Schätzwert) für die Überschreitungswahrscheinlichkeit dieser Schwelle angesehen werden. Der Kehrwert davon ist die Wiederkehrzeit. Somit ist ein Jahrhundertereignis, ein Ereignis, bei dem die untersuchte Variable eine Schwelle überschreitet, die so groß ist, dass sie im vieljährigen Mittel nur einmal pro Jahrhundert überschritten wird.

Diese Herangehensweise ist sinnvoll, wenn die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten eines Schwellwertes zeitlich konstant, also stationär, ist. Ein kleines Rechenbeispiel soll zeigen, dass diese Annahme im Fall der Hochwässer jedoch nicht sehr realistisch erscheint.

Zwei der einleitend genannten Jahrhunderthochwässer fanden am Rhein statt. Stellen wir nun die Frage, wie wahrscheinlich es ist, dass $k=2$ Ereignisse mit der Eintrittswahrscheinlichkeit $p=0.01$ pro Jahr (Jahrhundertereignisse) in einem Zeitraum von $n=10$ Jahren auftreten. Um diese Wahrscheinlichkeit P berechnen zu können, gehen wir zusätzlich davon aus, dass die Hochwässer unabhängige Ereignisse sind, d.h. dass das Eintreten eines Hochwassers nicht davon abhängt, ob eines der anderen Hochwässer eingetreten ist. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit P , dass 2 Jahrhunderthochwässer in 10 Jahren auftreten, binomial-verteilt und es folgt

$$P(k=2, n=10, p=.01) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} = 4.15 \cdot 10^{-3}$$

Dies zeigt für das spezielle Beispiel der Häufung der Rheinhochwässer, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass diese durch Zufall (unter Annahme einer stationären Eintrittswahrscheinlichkeit) aufgetreten ist.

Dieses Ergebnis ist eine Herausforderung, näher zu untersuchen, wie sich das Starkniederschlagsverhalten im Laufe der letzten Dekaden verändert hat.

Analyse von Starkniederschlagstagen in Deutschland

Daten

Zur Analyse von langzeitlichen Veränderungen in Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen sind möglichst lange und vollständige Zeitreihen von Tagesniederschlägen notwendig. Dem Deutschen Wetterdienst liegen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland 11 Zeitreihen für den Zeitraum 1901 bis 2000 vor, 54 Zeitreihen decken den Zeitraum von 1941 bis 2000 ab (die Lage der Stationen ist in Abb. 1 wiedergegeben). Somit werden die Analysen dieser Arbeit einerseits mit wenigen, aber langen, andererseits mit zahlreicheren, aber kürzeren Zeitreihen durchgeführt.



Abb. 1 Räumliche Verteilung der untersuchten Niederschlagszeitreihen.

Untersuchungsvariablen

Um eine zeitliche Änderung in der Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität von Starkniederschlägen auf täglicher Basis analysieren zu können, müssen diese zunächst definiert werden. Hierzu existieren verschiedene Ansätze, die absolute oder auf der Grundlage stationsspezifischer Häufigkeitsverteilungen ermittelte Schwellenwerte zur Bestimmung von Starkniederschlagstagen heranziehen (siehe z. B. Frich et al. 2002). In dieser Arbeit werden solche Tage als Starkniederschlagstage bezeichnet, an denen die Niederschlagsmenge Werte erreicht, die im vieljährigen Mittel (von 1941 bis 2000) an dieser Station nur einmal in 100 Tagen überschritten werden (also Überschreitungen des 99%-Perzentils). Somit sollten im Schnitt in jedem Jahr 3.65 solcher Tage eintreten. Durch diese Wahl stehen noch genügend Daten zur Verfügung (bei hundertjährigen Reihen 365, bei sechzigjährigen Reihen 219 Werte), um statistische Untersuchungen durchführen zu können. Die Verwendung von stationsspezifischen Schwellenwerten ist notwendig, damit das Ergebnis nicht überproportional von sehr niederschlagsreichen Stationen bestimmt wird.

Auf der Grundlage obiger Definition von Starkniederschlagstagen werden für die weiteren Untersuchungen Zeitreihen von Jahreswerten der folgenden Variablen (V1 bis V5) abgeleitet:

V1: Anzahl der Starkniederschlagstage

Diese Variable gibt Auskunft darüber, wie sich die Häufigkeit von Starkniederschlagstagen im Untersuchungszeitraum verändert hat.

V2: Summe der Niederschläge an Starkniederschlagstagen

Mit dieser Variable können Aussagen darüber gewonnen werden, wie sich die Niederschlagsmenge, die an Starkniederschlagstagen fällt, verändert hat.

V3: Mittlerer Tagesniederschlag an Starkniederschlagstagen

Mit Hilfe dieser Variable kann direkt erkannt werden, ob die Niederschlagsintensität von Starkniederschlagstagen zugenommen hat.

V4: Summe aller Tagesniederschläge

Um bewerten zu können, ob Änderungen in der Menge der Starkniederschläge im Einklang mit Änderungen der gesamten Niederschlagsmenge stehen oder aber davon unabhängig sind, wird diese Variable miteinbezogen.

V5: Anteil des Jahresniederschlags, der an Starkniederschlagstagen gefallen ist.

Änderungen in dieser Variable sind die direkte Folge unterschiedlicher Veränderungen im allgemeinen und extremen Niederschlag.

Die Untersuchung dieser fünf Variablen erlaubt es, ein breites Spektrum von Aussagen treffen zu können. Bei der Analyse wird berücksichtigt, dass nicht in jedem Jahr für jeden Tag Messwerte vorliegen. Grundsätzlich wurden nur Jahre mit in die Analysen einbezogen, für die an mindestens 360 Tagen Beobachtungen verfügbar sind.

Alle Analysen werden zum einen für das Gesamtjahr und zum anderen für die hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahre getrennt durchgeführt, da diese einerseits

deutlich unterschiedliche Niederschlagssummen aufweisen und andererseits langzeitliche Änderungen in verschiedenen Halbjahren sehr unterschiedlich ausfallen können. Das Winterhalbjahr umfasst die Monate November bis April, das Sommerhalbjahr den Zeitraum von Mai bis Oktober. Die Schwellenwerte werden jahreszeit-spezifisch ermittelt.

Analysen

Zeitliche Änderungen

Für alle 5 angegebenen Variablen werden - einer Anregung von Fricke und Kronier (2001) folgend - lineare Trends an den 11 bzw. 54 verfügbaren Stationen berechnet. Dabei wird zusätzlich zwischen dem Gesamtjahr und den zwei hydrologischen Halbjahren unterschieden. Um darüber hinaus auch Aussagen über die zeitliche Stabilität bzw. Entwicklung der Trends treffen zu können, werden insgesamt 4 unterschiedlich lange Zeiträume betrachtet (s. Tab. 1).

All dies führt zu einer Vielzahl von Detailergebnissen, die hier nicht diskutiert werden sollen. Stattdessen werden die Trends aller Stationen zu einem mittleren variablen-spezifischen Trend zusammengefasst, der natürlich nicht repräsentativ für Einzelregionen ist, aber einen ersten Eindruck der über ganz Deutschland integrierten Änderungstendenzen gibt. Um diesen wiederum für unterschiedliche Zeiträume vergleichen zu können, wird er jeweils auf eine Dekade bezogen. Daraus folgt der mittlere Trend der Variable pro Dekade (T^{10}) im angegebenen Zeitraum (s. Tab.1). Zwar erlaubt diese Variable eine gute Vergleichbarkeit der Trendwerte in verschiedenen Zeiträumen. Will man aber den auftretenden Trend bewerten, so ist es sinnvoll, ihn in Bezug auf den Anfangswert des jeweiligen Untersuchungszeitraumes zu setzen. Daher wird in Tabelle 1 auch die mittlere prozentuale Änderung d im Untersuchungszeitraum bezogen auf den Anfangswert angegeben. Betrachten wir nun die Ergebnisse für die einzelnen Variablen separat:

- **Zunahme der Starkniederschlagstage**
Sowohl auf das gesamte Jahr bezogen als auch für die beiden Halbjahre und für alle Untersuchungszeiträume wird eine Zunahme der Starkniederschlagstage deutlich, mit einem Maximum von 46% innerhalb des Zeitraums 1901 bis 2000 im Winter. Die Trends fallen im Winter deutlich höher aus als für den Sommer. Für beide untersuchte Jahreszeiten zeigt sich eine progressive Zunahme im dekaden-bezogenen Trendwert T^{10} .
- **Zunahme der Starkniederschlagsmenge**
Auch die Starkniederschlagsmenge zeigt ausschließlich positive Trends. Diese sind wiederum für den Winter ausgeprägter als im Sommer. Auffällig ist auch, dass die prozentuale Zunahme der Starkniederschlagsmenge im allgemeinen größer ausfällt als die Zunahme der Starkniederschlagstage.
- **Zunahme der Starkniederschlagsintensität**
Da die Starkniederschlagsmenge stärker zugenommen hat als die Anzahl der Starkniederschlagstage, folgt eine Zunahme der Niederschlagsintensität an Starknie-

derschlagstagen für alle Untersuchungszeiträume und Jahreszeiten. Sie liegt zwischen 2 und 43% und fällt im Winter im allgemeinen stärker aus als im Sommer. Nur in Bezug auf die letzten 40 Jahre sieht man im Sommer einen stärkeren positiven Trend als im Winter.

- **Zunahme der Gesamtniederschlagsmenge**
Auch die Gesamtniederschlagsmenge weist einen überwiegend positiven Trend auf (dieses Ergebnis steht im Einklang mit früheren umfangreicheren Studien; s. Grieser et al., 2000). Dieser ist für das Sommerhalbjahr deutlich geringer als für das Winterhalbjahr. In einem Fall (Sommerhalbjahr, 1921 bis 2000) ist ein negativer Trend zu verzeichnen.
- **Starkniederschlagsanteil**
Der Anteil der Niederschläge, der an Tagen mit Starkniederschlag gefallen ist, hat um 5 bis 31% zugenommen. Abgesehen von den letzten vier Jahrzehnten fallen diese Zunahmen im Winterhalbjahr stärker aus als im Sommerhalbjahr.

Tab. 1 Lineare Trendwerte der 5 Variablen für 4 Zeiträume bis zum Jahr 2000. Die jeweils erste Spalte gibt den über die Stationen gemittelten linearen Trend (T_{10}) bezogen auf eine Dekade innerhalb des gegebenen Zeitraums an. Die jeweils zweite Spalte enthält die relative Änderung (d) im Untersuchungszeitraum in Bezug auf den Anfangswert in %. Zur Bedeutung der fünf Untersuchungsvariablen V1 bis V5 siehe Text.

Zeitraum	1901 bis 2000		1921 bis 2000		1941 bis 2000		1961 bis 2000	
Anzahl der Zeitreihen	11		11		54		54	
	T_{10}	d [%]	T_{10}	d [%]	T_{10}	d [%]	T_{10}	d [%]
Gesamtjahr								
V1 [Tage]	.078	25	.096	24	.077	13	.115	13
V2 [mm]	3.9	41	4.5	37	2.5	14	4.5	16
V3 [mm/Tag]	.39	14	.275	7	.117	2	.425	6
V4 [mm]	12.2	15	11.9	11	11.5	8	8.5	4
V5	.002	18	.0025	15	.001	5	.0025	12
Sommerhalbjahr								
V1 [Tage]	.029	17	.028	13	.033	9	.075	19
V2 [mm]	1.5	26	1.34	17	1.15	11	2.9	20
V3 [mm/Tag]	.45	16	.36	10	.37	8	.68	10
V4 [mm]	.64	1.3	-1.8	-2.8	.817	1	2.12	1.8
V5	.002	18	.0025	17	.0017	8	.005	17
Winterhalbjahr								
V1 [Tage]	.064	46	.075	40	.082	31	.1	25
V2 [mm]	2.3	74	2.96	72	1.9	26	3	26
V3 [mm/Tag]	.56	35	.85	43	.53	16	.38	7
V4 [mm]	10.5	31	13.1	30	10.7	17	9	9
V5	.003	31	.003	25	.003	18	.004	16

Die Untersuchungen zeigen damit deutlich, dass sowohl die Anzahl der Tage mit starken Niederschlägen zugenommen hat als auch die Niederschlagsintensität an solchen Tagen. Die Zunahme der Niederschläge an Starkniederschlagstagen übertrifft die generelle Niederschlagszunahme um 5 bis 31%. Da Änderungen im Mittelwert einer Variablen gewöhnlich überproportionale Änderungen in Häufigkeit und Intensität von Extremen nach sich ziehen (s. Grieser, 2001), könnte die generelle Zunahme der Niederschläge auch die Änderungen bei den Extremniederschlägen erklären, was aber nur durch detailliertere Untersuchungen geklärt werden kann.

Obwohl die hier vorgestellten Ergebnisse sehr eindeutig ausfallen, bleiben noch zwei Fragen offen. Erstens stellt sich die Frage nach der Signifikanz der getroffenen Aussagen und zweitens ist durch die Mittelung der Ergebnisse über alle Stationen Information über das Ausmaß der Trends an einzelnen Stationen und die zugehörige räumliche Verteilung verloren gegangen.

Wenden wir uns zunächst der Frage nach der Signifikanz zu. Zwar kann mit Hilfe eines nichtparametrischen Tests (Mann-Kendall) die Frage beantwortet werden, ob eine einzelne Zeitreihe einen Trend aufweist. Für die jeweiligen Trendwerte der Variablen an den Stationen kann jedoch kein einfacher Signifikanztest entworfen werden, da die Zeitreihen nicht als Gauß-verteilt betrachtet werden können. Dennoch sind Signifikanzaussagen für das Stationskollektiv möglich. Dabei soll nicht untersucht werden, ob einzelne Trends signifikant sind oder nicht, sondern ob sich insgesamt eine signifikante Häufung positiver (bzw. negativer) Trends zeigt.

Stellen wir uns zunächst auf den Standpunkt, dass alle beobachteten Trends zufällig sind und berechnen die Wahrscheinlichkeit dafür, dass diese Hypothese verworfen werden muss. Wären alle Trends zufällig, so würde man erwarten, dass die eine Hälfte negativ und die andere Hälfte positiv wäre. Es handelte sich dann also um ein Bernoulli-Experiment (Münzwürfe) mit binomial-verteilten Wahrscheinlichkeiten. In Tabelle 2 sind für jede der untersuchten Variablen die Anzahl der Stationen mit positiven Trends eingetragen und die Wahrscheinlichkeit dafür, dass durch die Häufung positiver Trends die Hypothese, dass sie zufällig sind, abgelehnt werden muss. Dabei sind Wahrscheinlichkeiten unter 90% nicht angegeben.

Aus Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass die überwiegende Anzahl an Häufungen positiver Trends für das Winterhalbjahr signifikant ist. Weiter ist zu sehen, dass insbesondere für die letzten 40 Jahre eine signifikante Häufung von positiven Trends vorliegt.

Tab. 2 Trendstatistik: Anzahl A der Zeitreihen mit positivem Trend und Signifikanz S der Häufung positiver Trends.

Zeitraum	1901 bis 2000		1921 bis 2000		1941 bis 2000		1961 bis 2000	
Anzahl der Zeitreihen	11		11		54		54	
	A	S [%]	A	S [%]	A	S [%]	A	S [%]
Jahr								
V1 [Tage]	9	93	6		32		35	97.3
V2 [mm]	9	93	7		31		37	99.1
V3 [mm/Tag]	7		5		31		34	92.4
V4 [mm]	10	98.8	10	98.8	42	>99.99	37	99.1
V5	8		6		28		37	99.1
Sommerhalbjahr								
V1 [Tage]	8		7		30		34	92.4
V2 [mm]	7		7		29		33	
V3 [mm/Tag]	9	93.5	7		35	96	33	
V4 [mm]	6		4		25		34	92.4
V5	8		6		31		34	92.4
Winterhalbjahr								
V1 [Tage]	10	98.8	9	93.5	39	99.9	37	99.1
V2 [mm]	10	98.8	9	93.5	37	99.1	37	99.1
V3 [mm/Tag]	8		9	93.5	39	99.8	36	98
V4 [mm]	10	98.8	11	99.9	48	>99.99	41	99.99
V5	10	98.8	9	93.5	33		32	

Räumliche Differenzierung

Aus der räumlichen Verteilung der stationsspezifischen dekadischen Trendwerte ergeben sich zunächst keine Hinweise auf eine Abhängigkeit der langzeitlichen Variabilität der Starkniederschläge von der räumlichen Stationsverteilung. Exemplarisch illustrieren dies die relativen Änderungen d des Anteils der Starkniederschläge am Jahresniederschlag (V_5), die in Abbildung 2 für die letzte Untersuchungsperiode (1961-2000) dargestellt sind.

Ergänzend zu dieser Darstellung der räumlichen Verteilung der Trendwerte bzw. der relativen Änderungen wurden lineare Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen den Lageparametern geographische Länge, geographische Breite sowie Höhe über NN und den stationsbezogenen Trendwerten der fünf untersuchten Variablen berechnet. Aufgrund der Verfügbarkeit von lediglich 11 Stationen für die beiden Zeitabschnitte 1901-2000 und 1921-2000 wurden diese Analysen nur für die beiden jüngeren Untersuchungszeiträume (1941-2000, 1961-2000) durchgeführt, für die ein umfangreicheres Datenkollektiv (54 Stationen) zur Verfügung steht.

Bezüglich geographischer Länge und Breite ergeben sich keinerlei signifikante Korrelationen (95%-Signifikanzniveau) mit der Trendentwicklung der verschiedenen Untersuchungsvariablen.

Signifikante Korrelationen positiven Vorzeichens ergeben sich für die Stationshöhe über NN und einige der untersuchten Variablen, sowohl für das Gesamtjahr als auch für die beiden Halbjahre. Bis auf eine Ausnahme treten signifikant positive Korrelationskoeffizienten aber ausschließlich im Zeitraum 1941-2000 auf. Für den Zeitabschnitt 1961-2000 überwiegen hingegen insignifikante negative Korrelationskoeffizienten.

Diese korrelativen Zusammenhänge zwischen der Stationshöhe und den Trendwerten der betrachteten Variablen sind allerdings maßgeblich durch die zeitliche Niederschlagsentwicklung an der einzigen Hochgebirgsstation Zugspitze beeinflusst, die sich vor allem im Zeitraum 1941-2000 durch sehr ausgeprägte positive Trends der Untersuchungsvariablen auszeichnet.

Bei Wiederholung der letztgenannten Korrelationsrechnungen unter Verwendung eines um die Station Zugspitze reduzierten Stationskollektivs ergibt sich dementsprechend ein deutlich andersartiges Bild (siehe auch Abb. 3):

- Für das Gesamtjahr wird bezüglich keiner der ausgewählten Variablen ein signifikanter Korrelationskoeffizient erreicht;
- im Winterhalbjahr ergeben sich ausschließlich negative, nur zum Teil signifikante Korrelationen und
- während des Sommers treten größtenteils insignifikante Korrelationskoeffizienten sowohl negativen als auch positiven Vorzeichens auf.

Auf der Grundlage der aufgeführten Ergebnisse lässt sich damit keine Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung des Starkniederschlagverhaltens von der Stationshöhe oder den geographischen Koordinaten ableiten.

Im Rahmen der bisherigen Arbeiten wurde noch nicht untersucht, ob und inwieweit sich die unterschiedliche Exposition (insbes. Luv- und Lee-Lage) der betrachteten Stationen im jeweiligen langzeitlichen Starkniederschlagsverhalten widerspiegelt.

Diskussion und Ausblick

In den letzten Jahren war in Deutschland eine auffällige Häufung von Hochwasserereignissen zu beobachten, die im Sinne der klassischen Extremwertstatistik als Jahrhunderthochwasser bezeichnet werden konnten. Am Beispiel der herausragenden Rheinhochwasser der 1990er Jahre wurde gezeigt, dass unter der Annahme einer stationären Eintrittswahrscheinlichkeit für sogenannte Jahrhunderthochwässer das zufällige Auftreten zweier solcher Ereignisse innerhalb eines Jahrzehnts äußerst unwahrscheinlich ist.

Die hier vorgestellten Ergebnisse von Untersuchungen zu den zeitlichen Veränderungen der hochwasserrelevanten Einflussgröße Starkniederschlag belegen – besonders ausgeprägt für die letzten 40 Jahre des 20. Jahrhunderts – eine Häufigkeitszunahme und Intensivierung von Starkniederschlägen in Deutschland und liefern damit einen potentiellen Erklärungsansatz für das gehäufte Auftreten extremer Hochwässer im letzten Jahrzehnt.

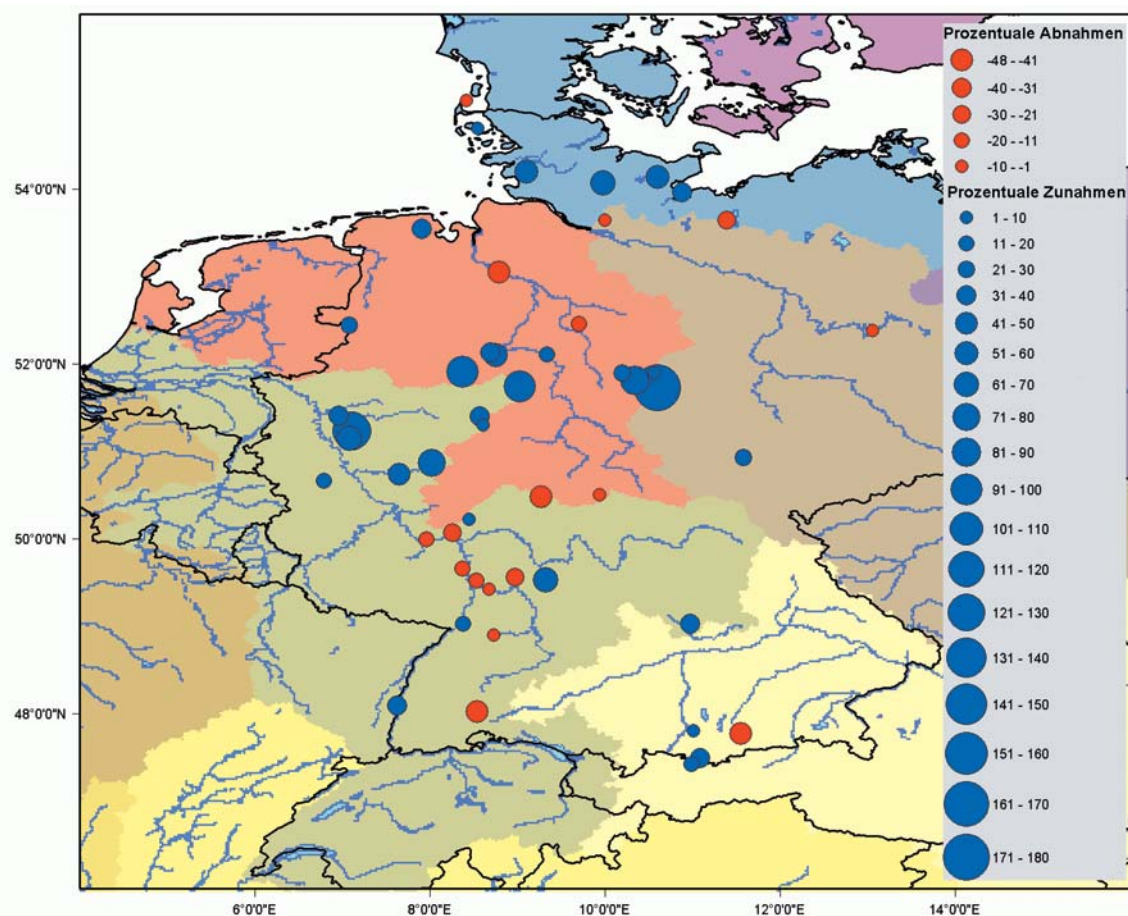


Abb. 2 Räumliche Verteilung der prozentualen Änderungen d des Anteils der Starkniederschläge am Jahresniederschlag (Untersuchungsvariable 5) im Zeitraum 1961-2000 – Gesamtjahr. Hinterlegt sind die großen Flusseinzugsgebiete.

Allein der Befund vermehrt auftretender und intensivierter Starkniederschlagsereignisse erlaubt aber noch nicht den Schluss auf einen kausalen Zusammenhang mit korrespondierenden Häufigkeitssteigerungen exzeptioneller Hochwasserereignisse, da diese nicht allein in Abhängigkeit von der Anzahl, sondern auch von der zeitlichen Abfolge von Starkniederschlagstagen stehen. Für die Entwicklung des Hochwassergeschehens in einzelnen Flusseinzugsgebieten ist darüber hinaus die räumliche Differenzierung der zeitlichen Veränderungen der Starkniederschläge bedeutsam.

Sowohl die räumliche Verteilung der Trends als auch die Korrelationen zwischen den Trendwerten der fünf Variablen einerseits und geographischen Lageparametern andererseits zeigen keine großräumigen Strukturen. In allen großen deutschen Flusseinzugsgebieten sind überwiegend Zunahmen in geringerem Ausmaß aber jeweils auch Abnahmen der Häufigkeit und der Intensität von Starkniederschlagsereignissen an einzelnen Stationen festzustellen (s. Abb. 2).

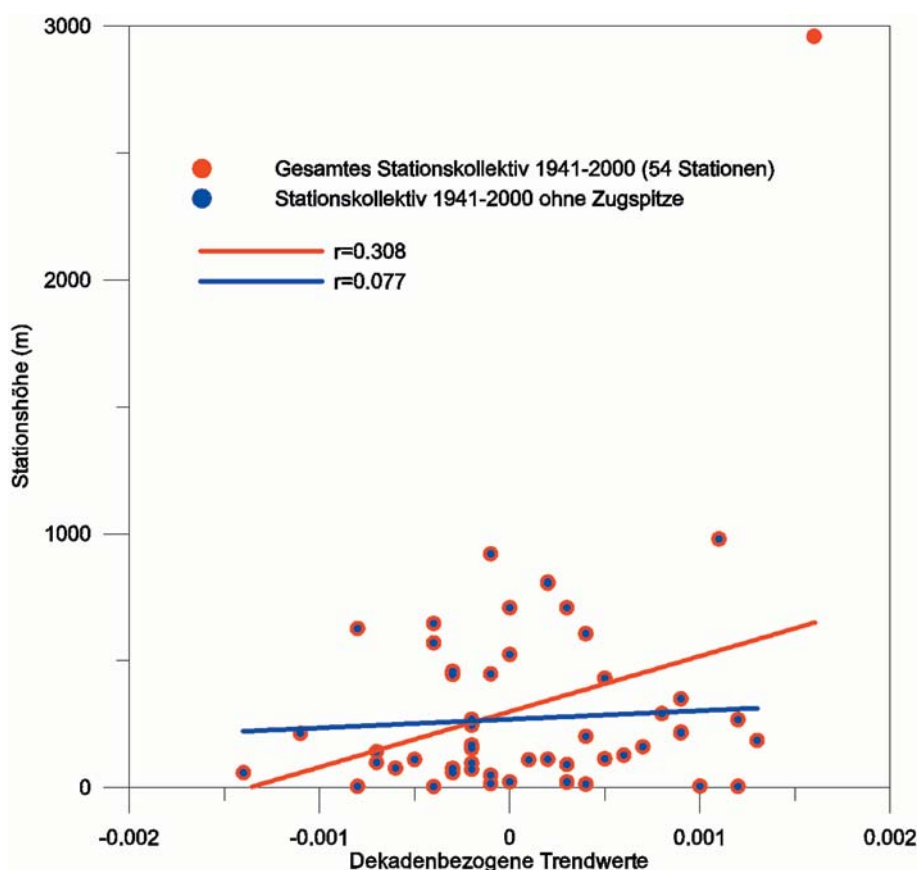


Abb. 3 Streudiagramme und Regressionsgeraden der Variablen Stationshöhe und dekadenzugehöriger Trend des Anteils der Starkniederschläge am Jahresniederschlag (Untersuchungsvariable 5) für den Zeitraum 1941-2000 (Gesamtjahr) unter Zugrundelegung des gesamten bzw. des um die Station Zugspitze reduzierten Stationskollektivs.

Danksagung

Unser besonderer Dank geht an Johannes Behrendt für die Unterstützung bei der Bereitstellung der Daten.

Literatur

- Bendix, J. (1997): Natürliche und anthropogene Einflüsse auf den Hochwasserabfluss des Rheins. *Erdkunde* 51: 292-308.
- Fricke, W. und Kronier, M. (2001): Betrachtungen zum Klimawandel am Hohenpeißenberg. In *Klimastatusbericht 2001*, DWD.
- Frich, P., L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank und T. Peterson (2002): Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19: 193-212.
- Grieser, J., Staeger, T. und Schönwiese, C.-D. (2000): Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes. *Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main*. Eigenverlag des Instituts.
- Grieser, J. (2001): Werden extreme Wettersituationen wahrscheinlicher? *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik* Nr. 27, Wien.
- Malitz, G. und Ertel, H. (2001): Extremwertstatistische Auswertungen von Tageswerten der Niederschlagshöhe. In *Klimastatusbericht 2001*, DWD.
- Rudolf, B. und J. Rapp (2002): Das Jahrhunderthochwasser der Elbe. In *Klimastatusbericht 2002*, DWD.