

Zusammenhang zwischen extremen Hochwassern und ihren Einflussgrößen

Stefan Uhlenbrook, Andreas Steinbrich, Dörthe Tetzlaff, Christian Leibundgut
Universität Freiburg

Zusammenfassung

Extreme Hochwasser (innerhalb dieser Studie definiert durch die Jährlichkeit größer zehn Jahre, bezogen auf den Hochwasserscheitel) können als Produkt aus klimatischen Inputgrößen und verschiedenen Einzugsgebietseigenschaften angesehen werden, die beide zeitlich und räumlich variabel sein können. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die wichtigsten Einflussgrößen für die Entstehung extremer Hochwasser in 29 mesoskaligen Einzugsgebieten Baden-Württembergs aufzuzeigen. Dabei gilt es, allgemein gültige Aussagen über die Bildung von Extremereignissen abzuleiten.

Zuerst wurde eine umfassende Datenbank für die Untersuchungsgebiete und die zu untersuchenden Hochwasserereignisse erstellt. Danach wurden unterschiedliche statistische Verfahren und Visualisierungstechniken angewendet, um die Bedeutung verschiedener Einflussgrößen auf die Extremhochwasserbildung zu bestimmen. Dabei wurde zwischen gebiets- und ereignisspezifischen Parametern unterschieden. Bei den gebietsspezifischen Parametern zeigten insbesondere die Gebietsniederschläge verschiedener Jährlichkeit einen großen Einfluss. Bei den ereignisspezifischen Parameter konnte neben der Bedeutung des Niederschlags auch die der Vorfeuchte, der verschiedenen Niederschlagsdauern und der Jahreszeit ausgewiesen werden.

Im weiteren wurde der Einfluss verschiedener Wetterlagen demonstriert sowie die räumliche und zeitliche Verteilung der Extremhochwasser analysiert. Letzteres führte zu einer Raumgliederung des Untersuchungsraumes, in der Einzugsgebiete mit ähnlicher zeitlicher Hochwasserreaktion zusammengefasst sind. Im weiteren konnte die Saisonalität der extremen Niederschlags- und Abflussereignisse visualisiert werden. Sie zeigt charakteristische räumliche Verteilungsmuster.

Die erzielten Resultate zeigen kausale Zusammenhänge bei der Bildung von extremen Hochwasserereignissen auf. Es wird jedoch auch die Beschränkung von allgemein ableitbaren Aussagen deutlich, da jedes Hochwasser in einem bestimmten Einzugsgebiet ein Unikat ist, bei dem eine spezifische Kombination von Einflussfaktoren des Niederschlags, der Vorfeuchte und der Einzugsgebietseigenschaften vorherrscht. Jedoch bieten die Ergebnisse eine gute Grundlage für die Verbesserung der Hochwasservorhersage und die Abschätzung von Konsequenzen der Klimaentwicklung für extreme Hochwasserereignisse.

1. Einleitung und Zielsetzung

Die Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie der Deutsche Wetterdienst (DWD) haben für die Untersuchung von „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA)“ eine Rahmenvereinbarung abgeschlossen. Darin sind verschiedene Einzelprojekte definiert. In dem vorliegenden Beitrag werden einige Ergebnisse des Projektes „Analyse der Entstehung extremer Hochwasser“ dargestellt.

Die durchgeführten Abflussprozessstudien der letzten Jahrzehnte haben dazu geführt, dass die wesentlichen Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration konzeptionell gut bekannt sind. Es konnten die verschiedenen Abflussbildungsmechanismen qualitativ beschrieben werden und für gut untersuchte Forschungsgebiete quantifiziert werden. Zusammenfassende Darstellungen zu den Abflussprozessen finden sich u.a. in Uhlenbrook & Leibundgut (1997), Bonell (1998), Naef et al. (1998) und Mendel (2000).



Für die Bildung von extremen Hochwassern (innerhalb dieser Studie definiert durch die Jährlichkeit größer zehn Jahre, bezogen auf den Hochwasserscheitel) gilt generell die Vorstellung, dass sie hauptsächlich durch extrem hohe Niederschläge verursacht werden. Ferner ist davon auszugehen, dass die physiographischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet sowie der Zustand des Einzugsgebiets zu Beginn des Ereignisses von großer Bedeutung sind. Wie stark einzelne Faktoren im komplexen Wirkungsgeflecht bei der Bildung von extremen Hochwassern wirken, ist im allgemeinen unbekannt. Dies kann mit einer verallgemeinernden und vergleichenden Auswertung von beobachteten extremen Abflüssen in verschiedenen Gebieten untersucht werden (DVWK 1999).

Das Ziel dieses Beitrags ist es, die ursächlichen Zusammenhänge für die Entstehung extremer Hochwasser in 29 mesoskaligen Einzugsgebieten Baden-Württembergs aufzuzeigen. Dabei sollen so weit wie möglich allgemein gültige Aussagen über die Bildung von Extremereignissen abgeleitet und nicht jedes einzelne der untersuchten Ereignisse unter Verwendung vieler Detaildaten analysiert werden. Dabei wird insbesondere die Bedeutung physiographischer Faktoren in Verbindung mit meteorologischen Faktoren analysiert. Zusätzlich wird die räumliche und zeitliche Verteilung der Hochwasser untersucht. Diese Zusammenhänge sind für die Erklärung der Hochwasserentstehung und die Beurteilung von Hochwasserrisiken und somit auch für und Hochwasser-Prognosen von großer Bedeutung. Im weiteren lassen sich verlässlichere Aussagen über die Auswirkungen von Klimaänderungen erst durch ein besseres Prozessverständnis bezüglich der Hochwasserbildung treffen.

2. Methodik und Datengrundlage

In einem erst Schritt wurde eine umfangreiche Datenbank mit Abflussdaten zu den Hochwasserereignissen, physiographischen Daten zu den 29 Pegel-einzugsgebieten (Abb. 1), Niederschlagsdaten und Daten zu den Großwetterlagen aufgestellt. Die Wahl der Untersuchungsgebiete wurde mit dem Vorhandensein von verlässlichen, langen Abflussreihen begründet. Für alle Pegel liegen Daten seit 1940 vor. Abflussscheitelwerte sind für einige Pegel seit maximal 1882 vorhanden. Die Einzugsgebietgröße liegt zwischen ca. 75 und 4000 km². Die Jährlichkeiten der Abflüsse wurden aus LfU (1999) entnommen.

Bei den Geodaten wurde auf die im RIPS-Pool der LfU Baden-Württemberg vorgehaltenen Daten zurückgegriffen:

- Gewässernetz (1 : 50000)
- Einzugsgebietsgrenzen (1 : 50000)
- Seen in Baden-Württemberg (1 : 50000)
- Landnutzung (30 x 30 m², Landsat-TM-Szene von 1993)
- Topographie (DHM des Landesvermessungsamtes, 50 x 50 m²)

Zusätzlich konnten folgende Geodaten verwendet werden (vgl. GLA 1994, LGRB 1998):

- Bodenübersichtskarte 1: 200000 (BÜK200)
- Nutzbare Feldkapazitäten 1:200000 (BÜK200)
- Gebirgsdurchlässigkeiten 1:350000
- Bodenwasserregime 1:200000 (BÜK200)
- Klimatische Wasserbilanz 1:350000
- k_f -Werte für gesättigte Böden 1:200000 (BÜK200)

Die Raumdaten mussten für verschiedene Gebiete mit bayerischen Daten ergänzt werden. Aus der breiten Geodatenbasis wurde eine Vielzahl von Parametern gewonnen, die für die Analyse der Hochwasserereignisse geeignet scheinen (IHF 2000a).

Die Niederschlagsdaten wurden vom DWD (1999) für 1931–1997 als für Rasterzellen regionalisierte Gebietsniederschläge zur Verfügung gestellt. Die Größe der Rasterzellen beträgt

ca. 7000 x 7000 m². Aus den Niederschlagswerten für die Rasterzellen wurden jeweils Einzugsgebietsniederschläge für die Pegel berechnet. Die Daten lagen in täglicher Auflösung vor. Zusätzlich wurden die Niederschläge der Dauerstufen 48 und 72 Stunden berechnet. Die Jährlichkeiten für 10, 20, 50 und 100 Jahre wurden mit Hilfe der Gumbel-1-Verteilung ermittelt. Weiterhin sind die unterschiedlichen Jährlichkeiten für das hydrologische Sommer- und Winterhalbjahr bestimmt worden. Es wurden hierbei zum Teil beträchtlich unterschiedliche Niederschlagsmengen für das Sommer- und Winterhalbjahr bei gleicher Jährlichkeit festgestellt. Es gibt Regionen höherer Winterniederschläge, Regionen höherer Sommerniederschläge und Regionen ohne große Unterschiede (Abb. 2).

Aus Gerstengarbe et al. (1999) konnten die Europäischen Großwetterlagen, klassifiziert nach der Methode von Hess & Brezowsky (1977), für alle Ereignisperioden mit extremen Hochwassern ermittelt werden. Es werden dabei 29 Großwetterlagen (GWL) und ein Übergangstyp unterschieden, bei denen eine charakteristische Strömungsanordnung über mehrere Tage (i.a. eine Mindestdauer von drei Tagen) erhalten bleibt. Die GWL lassen sich in zehn Großwettertypen (GWT) zusammenfassen.

In einem nächsten Schritt wurden die aufbereiteten Daten verschiedenen statistischen Analysen unterzogen, um die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Bildung der ausgewählten Extremereignisse herauszuarbeiten. Dabei wurden Korrelations- und Regressionsanalysen, Clusteranalysen, zirkuläre Statistik sowie Visualisierungstechniken angewandt.

3. Ergebnisse

3.1 Analyse der Großwetterlagen

Ziel und Methodik

Das Ziel innerhalb dieser Studie war es, das Auftreten und die Persistenz von Großwetterlagen (GWL) bzw. Großwettertypen (GWT) in Verbindung mit den betrachteten Hochwasserperioden zu untersuchen. Zusätzlich sollte das Vorkommen bestimmter GWL bei Hochwasserereignissen in verschiedenen Regionen des Untersuchungsraumes analysiert werden.

Ergebnisse

Vor und während der Hochwasser herrschten insgesamt Großwetterlagen mit bedeutender Westkomponente (WZ, WS und NWZ) vor. Extremereignisse sind jedoch bei fast allen möglichen Großwetterlagen beobachtet worden, außer Wetterlagen mit gewöhnlich geringen Niederschlagsmengen (z. B. BM und HM). Meridionale Großwetterlagen führten bevorzugt zu Ereignissen im hydrologischen Sommerhalbjahr. Die Großwetterlage West-zyklonal (WZ) trat in Verbindung mit den untersuchten Ereignisperioden am häufigsten auf. Caspary & Bardonossy (1995) und Caspary (1998) zeigten signifikante Zunahmen der Häufigkeit und Persistenz dieser Großwetterlage in den Wintermonaten in den letzten 25 Jahren. Eine dadurch verursachte Verschärfung des Hochwasserrisikos in den 29 Untersuchungsgebieten konnte in diesem Zusammenhang nicht nochmals untersucht werden.

Die Andauer der Großwetterlagen, die zu Extremhochwassern führten, war bedeutend länger als im langjährigen Mittel. Längere Andauern einer Wetterlage, insbesondere der Großwetterlagen WZ und WS, führten zu extremen Hochwassern in mehreren Gebieten. Die Persistenz war bei Ereignissen im hydrologischen Sommerhalbjahr weniger bedeutend. Jedoch führten nicht alle sehr persistenten Westlagen (Andauern bis zu 33 Tagen) zum Auftreten von Extremereignissen in einem der Untersuchungsgebiete.

Das regionale Auftreten von Extremereignissen in Verbindung mit bestimmten Wetterlagen konnte nicht immer eindeutig zugeordnet werden. Häufig auftretende Großwetterlagen konnten in nahezu allen Untersuchungsgebieten zu Extremereignissen führen. Es wird davon ausgegangen, dass der Untersuchungsraum zu klein ist, um eine deutliche regionalen



Differenzierung der Hochwasserverteilung aufgrund der mittleren Zirkulationsmuster in Europa zu zeigen. Es bleibt abzuwarten, ob eine Erweiterung des Untersuchungsraumes um weiter östlich liegende, bayrische Einzugsgebiete diesbezüglich andere Ergebnisse bringt.

3.2 Bedeutung der gebietsspezifischen Parameter

Ziel und Methodik

Um die Bedeutung von gebietsspezifischen Parametern für die Bildung von Extremereignissen zu bestimmen, wurden Korrelations- und Regressionsanalysen zwischen den gebietsspezifischen Parametern (Raumdaten, Gebietsniederschläge etc.) und Hochwasserkennwerten verschiedener Jährlichkeit ($Hq_{2,5,10,20,50,100}$) durchgeführt. Für einige Raumdaten zeigten sich teilweise geringe Korrelationen. Von einem statistisch signifikanten Zusammenhang wurde bei einem Signifikanzniveau von 95 % ausgegangen, was etwa bei einem Bestimmtheitsmaß (r^2) größer als 0,35 erreicht wurde.

Ergebnisse

Bei der Analyse der Raumdaten konnten gute Korrelationen für folgende Parameter bestimmt werden:

- Einzugsgebietsgröße und –länge
- Hangneigung und damit interkorrelierte Größen
- Landnutzung, wobei der Waldanteil positiv und der Ackeranteil negativ mit den Hochwasserkenngrößen korreliert ist
- Prädiktorvariablen, die in LfU (1999) zur Regionalisierung von Hochwasserkennwerten verwendet wurden

Sehr geringe bzw. keine Korrelationen konnten für folgende Parameter bestimmt werden, obwohl kausal Zusammenhänge zu erwarten gewesen wären:

- weitere Einzugsgebietsformparameter (Horton-Index, Kreisförmigkeitsindex etc.)
- Gewässernetzdichte
- Höhenlage der Einzugsgebiete
- Anteile anderer Landnutzungen, z.B. Siedlungsanteile
- nutzbare Feldkapazität (nFK) der Böden
- Durchlässigkeiten der oberen grundwasserführenden hydrogeologischen Einheiten

Bei den Landnutzungsanteilen (Wald-, Acker- und Siedlungsanteile) ist zu beachten, dass sie stark mit Hangneigungsparametern interkorreliert sind, die erheblich zur Erklärung der Scheitelwerte beitragen (Wald überwiegend an steileren Hanglagen etc.). Somit zeigten sich entgegengesetzte Korrelationen als sie aus Abflussprozessuntersuchungen zu erwarten wären (vgl. abflussdämpfende Wirkung von Wald im Vergleich zu Acker, u.a. Preuschen 1992). Die Auswirkung der Ausprägung der Parameter wird im untersuchten Raum demnach überdeckt von den stärkeren Einflüssen der korrelierten Größe (insbesondere dem Gefälle).

Am besten werden spezifische Hochwasserscheitel bestimmter Jährlichkeit im Untersuchungsgebiet durch die Ausprägung der extremen Gebietsniederschläge erklärt (alle $r^2 > 0,75$). Der 100jährige 24-Stunden-Winterniederschlag ist mit dem 100jährigen spezifischen Scheitelabfluss bei einem r^2 von 0,87 korreliert (Abb. 3). Für die Niederschlagsdaten wurden generell deutlich bessere Korrelationen als für die anderen Raumdaten gefunden. Sie übertreffen auch die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse von Korrelationsanalysen (vgl. Blöschl et al. 1999).

Die digital vorhandenen Daten der Geologie und der Speichereigenschaften der Böden haben offensichtlich kaum Auswirkungen auf die Ausprägung extremer Hochwasser. Jedoch konnten u.a. Naef et al. (1996) die große Bedeutung bestimmter Bodenkennwerte, wie z.B.

Makroporosität, Schichtungen im Bodensubstrat etc., für die Abflussbildung am Hang nachweisen. Diese Werte liegen in der untersuchten Skala allerdings nur punktuell vor.

Entgegen der Erwartung, dass die Auswirkung der physiographischen Ausstattung eines Einzugsgebietes bei extremeren Abflussereignissen eine geringere Rolle spielt als bei weniger extremen Ereignissen (Peschke et al. 1998), nimmt der Erklärungsbeitrag der Parameter (r^2), die diese Ausstattung beschreiben, zu den extremeren Ereignissen hin zu. Dies gilt für alle signifikant mit den Zielgrößen korrelierten Einzugsgebietsparameter, deren Korrelationen nicht auf Interkorrelationen zu anderen Größen beruhen. Dagegen nimmt der Erklärungsanteil aller Niederschlagsparameter zu den extremeren Abflussereignissen hin ab. Einzige Ausnahme sind die Parameter, die die Winterextreme beschreiben. Die Tendenzen sind belegt durch eine kontinuierliche Zunahme der r^2 von den Scheitelabflüssen der Jährlichkeiten 2 über 5, 10, 20, 50 bis 100. Eine Erklärung hierfür wird darin gesehen, dass sich lokale Effekte (Regenwassereinleitungen, Ausbau eines Gewässerabschnitts etc.) bei kleineren Hochwassern stärker auswirken als bei großen. Bei selteneren Extremhochwassern wirken alle Prozesse maximal, somit wird die Abflussträchtigkeit des Gebiets (z.B. durch maximale Füllung und Ausdehnung der Sättigungsflächen etc.) stärker deutlich.

3.3 Bedeutung der ereignisspezifischen Parameter

Ziel und Methodik

Um die Bedeutung von ereignisspezifischen Parametern für die Bildung von Extremereignissen zu bestimmen, wurden Korrelations- und Regressionsanalysen zwischen den ereignisspezifischen Parametern (Vorfeuchteparameter, Ergiebigkeit verschiedener Niederschlagsdauern etc.) und Kenngrößen der aufgetretenen Ereignisse (Abflussscheitel, Direktabflussvolumen und Abflussbeiwert) durchgeführt.

Ergebnisse

Die durchgeführten Analysen ergaben wider Erwarten teilweise nur geringe bis gar keine Korrelationen. Es lassen sich zwar gewisse Aussagen über die Bildung von Abflussscheitelwerten und Direktabflussvolumen treffen, allerdings müssen bei einer Interpretation der Ergebnisse die geringen Korrelationskoeffizienten berücksichtigt werden. Die geringen Korrelationen sind in der hohen Variabilität der Daten begründet. In die Korrelationsanalyse sind Abflussdaten der 179 Extremereignissen aller 29 verschiedenen großen Pegelinzugsgebiete eingegangen. Somit ist die unterschiedliche Ausstattung der Einzugsgebiete wie auch der unterschiedliche saisonale Zustand der Einzugsgebiete in dieser Streuung impliziert.

Die Abflussbeiwerte, definiert als Quotient aus Direktabflussvolumen und Gebietsniederschlag, zeigten kaum Korrelationen mit den ereignisspezifischen Parametern. Sie scheinen demnach als Prognosegröße nicht geeignet.

Der Vorereignisabfluss, definiert als der Abfluss vor dem ansteigenden Ast der Hochwasserganglinie, zeigte keinen erkennbaren Zusammenhang mit dem Scheitelabfluss und dem Direktabflussvolumen. Eine bessere Korrelation ergab sich für den API-7, welcher die Summe des Niederschlags an den sieben Tagen vor dem Abflussereignis darstellt. Dieses Maß scheint daher besser zur Charakterisierung der Vorfeuchte im Einzugsgebiet geeignet zu sein.

Mit zunehmender Niederschlagsmenge steigen erwartungsgemäß Scheitelabfluss und Direktabflussvolumen bei allen betrachteten Niederschlagsdauern (24-, 48- und 72-Stunden). Im Sommerhalbjahr sind die 24-Stunden Niederschläge; im Winterhalbjahr die 48- bzw. die 72-Stundenniederschläge von jeweils größter Bedeutung für Scheitelabfluss und Direktabflussvolumen.



Die Extremität der Niederschlagsereignisse ist im mittel positiv mit der Extremität der Abflussereignisse korreliert, es ist jedoch eine große Streuung zu erkennen (Abb. 4). Niederschläge mit geringer Jährlichkeit können vor allem in den Monaten Dezember, Januar, Februar und März noch zu beträchtlichen Hochwassern führen, während vor allem in den Sommermonaten auch Niederschläge mit hohen Jährlichkeiten ohne entsprechendes Hochwasserereignis bleiben können. Dies kann durch die unterschiedlich gefüllten hydrologischen Speicher in den verschiedenen Jahreszeiten erklärt werden. Die starke Streuung der Abflusswerte bei ähnlichen Niederschlagsmengen macht wiederum deutlich, dass auch andere Größen maßgeblich an der Hochwasserentstehung beteiligt sind. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die betrachtete Niederschlagsgröße (Tagessumme des Gebietsniederschlags) keine Information über die kleinskalige zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung enthält und das im Rahmen dieser Untersuchung noch keine Informationen über Schneespeicherung und Schmelzprozesse zur Verfügung standen.

Mit multiplen Regressionsmodellen konnten die Zielgrößen spezifischer Scheitelabfluss und spezifisches Direktabflussvolumen für alle 179 aufgetretenen Extremhochwasserereignisse in allen Untersuchungsgebieten recht gut geschätzt werden ($r^2 = 0,58$ und $0,45$). Als erklärende Variablen dienten neben dem 72-Stunden-Gebietsniederschlag, der Vorfeuchteparameter API-7 und ein Parameter, der die zeitliche Lage im Jahr (Saisonalität) ausdrückt. Dies zeigt die wichtigsten ereignisspezifischen Parameter, welche die Ausbildung von Extremereignissen bestimmen.

3.4 Räumliche und zeitliche Verteilung der Hochwasserereignisse

Ziel und Methodik

Um die räumliche und zeitliche Verteilung der Hochwasserereignisse im gesamten Untersuchungsraum analysieren zu können, wurde in einem ersten Schritt eine Clusteranalyse für die Ereignisperioden durchgeführt. Das Ziel war dabei, Ereignisperioden mit ähnlichen Ereignismustern zu finden, d.h. ähnliche Muster der räumlichen Hochwasserverteilung während verschiedener Hochwasserperioden. In einem zweiten Schritt wurden die zeitliche hydrologische Reaktion der 29 Untersuchungsgebiete mit einer Clusteranalyse untersucht. Hierbei war es das Ziel, Einzugsgebiete mit ähnlicher zeitlicher hydrologischer Reaktion während Hochwasserperioden auszuweisen. Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Clusteranalysen findet sich in IHF (2000b).

Ergebnisse

Mit der zuerst durchgeführten Clusteranalyse konnten sieben Ereignisperioden mit ähnlichen Ereignismustern aggregiert werden. Während dieser Perioden zeigten sich jeweils bestimmte Muster der räumlichen Hochwasserverteilung. Es zeichnete sich jedoch kein klarer Zusammenhang zwischen diesen Ereignismustern und dem Vorkommen von gewissen Wetterlagen bzw. dem Auftreten zu bestimmten Jahreszeiten ab.

Die zweite Clusteranalyse führte zu einer deutlichen regionalen Gliederung des Untersuchungsraumes (Abb. 5). Da benachbarte Gebiete zusammengefasst wurden (ohne dass die geographische Lage in die Untersuchung einging), kann die Raumgliederung als plausibel bezeichnet werden. In (Abb. 6) ist das Dendrogramm des hierarchischen Clusteranalyseverfahrens dargestellt. Es wird jeweils die Distanz zwischen zwei Clustern, die beim jeweiligen Schritt zusammengefasst werden, als horizontale Linie dargestellt. Lange horizontale Linien vor dem Zusammenfassen von zwei Clustern bedeuten, dass sich diese beiden Cluster bezüglich ihres zeitlichen Hochwasserverhaltens deutlich unterscheiden. Aufgrund der im Dendrogramm erkennbaren Gliederung wurden 6 Hauptregionen von Untersuchungsgebieten ausgewiesen, die durch ähnliche zeitliche Verteilung der Hochwasser im Untersuchungszeitraum 1941 bis 1995 charakterisiert werden und sich diesbezüglich von den anderen Regionen deutlich unterscheiden. Interessanterweise entspricht diese Raumgliederung weitgehend der in Abbildung 2 dargestellten Regionen aufgrund der unterschiedlichen Nie-

derschlagsjährlichkeiten im Sommer- und Winterhalbjahr. Die erhaltene Gliederung in Regionen ähnlicher zeitlicher Hochwasserverteilung bietet eine geeignete Grundlage für weitergehende regionale Analysen (vgl. Blöschl et al. 1999), da anzunehmen ist, dass in den jeweiligen Regionen ähnliche meteorologische Randbedingungen zu den Hochwassern geführt haben.

3.5 Analysen zur Saisonalität

Ziel und Methodik

Es wurde mehrfach auf die Bedeutung der Saisonalität von Hochwassern verwiesen (u.a. Magilligan, F.J. & Graber, B.E. 1996; Black, A.R & Werritty, A. 1997; Merz, B. et al. 1999; Piock-Ellena et al. 2000). Demnach war es das Ziel, die Saisonalität der mittleren monatlichen Hochwasser (MHQ) und der mittleren monatlichen größten Niederschläge (MHN) mit der Saisonalität der Extremereignisse zu vergleichen. Die Darstellung der Saisonalität der Niederschläge (MHN-Regime) und des Abflusses (MHQ-Regime) ist an den Jahresgang des mittleren monatlichen Abflusses (MQ-Regime) von Pardé (1947) angelehnt (vgl. Abb. 6). Die Saisonalität des maximalen jährlichen Hochwassers, des maximalen jährlichen Tagesniederschlags und der Extremhochwasserereignisse (Scheitelabfluss \geq HQ₁₀) wurde mit Hilfe einer vektoriellen Addition (zirkuläre Statistik) nach Burns (1997) bestimmt.

Ergebnisse

Generell zeigte sich, dass die MHQ-Regime ihre Maxima im hydrologischen Winterhalbjahr und die MHN-Regime im Sommerhalbjahr, insbesondere im Juni, aufweisen. Letztere sind wesentlich weniger deutlich ausgeprägt und haben häufig ein Nebenmaxima im Winterhalbjahr. Das Auftreten der MHQ-Maxima im Winterhalbjahr lässt sich durch die im Mittel volleren hydrologischen Speicher und bei einigen Winterereignissen durch die zusätzliche Freisetzung von abflusswirksamen Niederschlag aus der Schneedecke erklären.

Im Untersuchungsgebiet zeichnen sich Tendenzen der zeitlichen Verschiebung der Maxima der MHQ-Regime ausgehend vom Südwesten des Untersuchungsgebietes in östlicher und nördlicher Richtung ab (Abb. 7). Die MHQ-Maxima liegen im Südwesten im Dezember und verschieben sich je weiter östlich oder nördlich ein Einzugsgebiet liegt zum Februar/März. Im Südwesten herrschen mit Ausnahme der Einzugsgebiete von Elz, Dreisam und Leopoldskanal ausgeprägte MHN-Wintermaxima vor, deren Ausprägung im Verhältnis zu den Sommermaxima in östlicher und in nördlicher Richtung abnehmen. Diese MHN-Wintermaxima verschieben sich zeitlich mit zunehmend nördlicher Lage der Einzugsgebiete von November nach Januar. In Gebieten, in denen stark ausgeprägte MHN-Wintermaxima vorherrschen, wird die zeitliche Lage der MHQ-Maxima sehr wahrscheinlich in erster Linie durch diese gesteuert. Genauere Aussagen sind bei der zusätzlichen Berücksichtigung der Schneeschmelze möglich, welche vom DWD innerhalb eines anderen KLIWA-Projektes berechnet wird.

Schwach ausgeprägte MHN-Wintermaxima gehen mit verhältnismäßig stärker ausgeprägten MHN-Maxima im Sommer einher. Diese MHN-Maxima liegen außer im Einzugsgebiet der Pfinz im Juni und verursachen bei den meisten MHQ-Regimen eine sogenannte „Junistufe“ (vgl. Abb. 6), die in den extremsten Fällen Nebenmaxima der MHQ-Regime darstellen (z.B. bei den Pegel der Schussen und Argen). Diese Tatsache kann auch mit der Bezeichnung „Pfungsthochwasser“ in Verbindung gebracht werden.

In Übereinstimmung mit der beobachteten Saisonalität der MHQ, kann in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes eine ausgeprägte Saisonalität der extremen Hochwasser beobachtet werden. Die saisonale Verteilung der Extremhochwasser folgt weitgehend der saisonalen Verteilung der MHQ-Regime (IHF 2000b). Für die im Südosten des Untersuchungsraumes liegenden Einzugsgebiete von Argen und Schussen ist sowohl für die MHQ- und MHN-Regime als auch für das Auftreten von Extremhochwasser keine Saisonalität feststellbar. Auch die Einzugsgebiete von Dreisam, Elz, Leopoldskanal und Pfinz weisen keine ausge-



prägte Saisonalität der extremen Hochwasser auf. In den übrigen Einzugsgebieten ist eine deutlich ausgeprägte Saisonalität erkennbar. Besonders ausgeprägt ist die Saisonalität des Auftretens der extremen Hochwässer in den Teileinzugsgebieten der Donau, dem Einzugsgebieten der Wutach, den Einzugsgebieten des nördlichen Schwarzwaldes und den Einzugsgebieten im Norden Baden-Württembergs.

4. Schlussfolgerungen

Das Ziel der Studie war es, die ursächlichen Zusammenhänge für die Entstehung extremer Hochwasser in 29 mesoskaligen Einzugsgebieten Baden-Württembergs aufzuzeigen. Dabei galt es, allgemein gültige Aussagen über die Bildung von Extremereignissen abzuleiten und nicht jedes einzelne der untersuchten Ereignisse unter Verwendung vieler Detaildaten zu analysieren. Die erzielten Resultate haben einige kausalen Zusammenhänge bei der Bildung von extremen Hochwasserereignissen verdeutlicht. Es wurde jedoch auch die Beschränkung von allgemein ableitbaren Aussagen deutlich, da sich wiederum zeigte:

Jedes Hochwasser ist ein Unikat!

Einzelne Hochwasser in einem bestimmten Einzugsgebiet werden durch eine spezifische Kombination von Einflussfaktoren des Niederschlags, der Vorfeuchte und der Einzugsgebietseigenschaften verursacht.

Bei Korrelationsuntersuchungen der ereignisspezifischen Parameter zeigten sich häufig nur schwache Zusammenhänge für die Raumdaten mit Hochwasserkennwerten. Zum Teil sind diese auf den Skaleneffekt in den unterschiedlich großen Untersuchungsgebieten zurückzuführen, da viele untersuchte Größen mit der Einzugsgebietsgröße systematisch schwanken (IHF 2000b). Es erwiesen sich jedoch verschiedene Gebietsniederschlagsparameter, die Einzugsgebietsgröße, die Einzugsgebietslänge und das Gefälle als geeignete Prädiktorvariablen für die Scheitelabflüsse verschiedener Jährlichkeiten. Insbesondere ergab sich der 100jährige 24-Stunden Wintergebietsniederschlag als gute Prädiktorvariabel für die Scheitelabflüsse verschiedener Jährlichkeiten.

Bei der Untersuchung der ereignisspezifischen Parameter zeigte sich, dass der API-7 (Niederschlagssumme der sieben Tage vor dem Abflussereignis) besser zur Charakterisierung der Vorfeuchte geeignet ist als der Vorereignisabfluss. Weiter zu untersuchen wäre die Aussagekraft des Niederschlags während längerer Zeiträume vor dem Ereignis (z.B. API-14, 28, 45, 60, 90, 130, 180). Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass bei der Niederschlagsdauer für Winterereignisse der 72-Stunden-Niederschlag (mindestens 48-Stunden-Niederschlag) und bei Sommerereignissen der 24-Stunden-Niederschlag von größter Bedeutung für den Scheitelabfluss bzw. das Direktabflussvolumen ist. Diese Dauern, und ggf. auch die Niederschlagsprognosen für diese Dauern, sollten bei der Hochwasservorhersage berücksichtigt werden.

Während der untersuchten Extremhochwasserereignisse herrschten Großwetterlagen mit bedeutender Westkomponente vor. Längere Andauern einer Wetterlage führten zu extremen Hochwassern in mehreren Gebieten. Die Persistenz war bei Ereignissen im hydrologischen Sommerhalbjahr weniger bedeutend. Der Untersuchungsraum wird als zu kleinräumig angesehen, als dass sich deutliche regionale Unterschiede im Auftreten von Extremhochwassern durch bestimmte Großwetterlagen erklären lassen. Zukünftig wäre es sinnvoll die Niederschlagsträchtigkeit bestimmter Wetterlagen sowie bestimmter Abfolgen von Wetterlagen weitergehend zu betrachten. Hierbei wäre auch zu untersuchen, inwiefern Auftretensmuster von Großwetterlagen (zeitliche Abfolgen von bestimmten Großwetterlagen) mit der Bildung von Extremereignissen zusammenhängen.

Es zeigte sich beim Vorkommen von mittleren Niederschlags- und Hochwasserereignissen sowie beim Auftreten von extremen Hochwasserereignissen eine ausgeprägte Saisonalität,

welche regional unterschiedlich ausgeprägt ist. Dies konnte auch für die berechneten Jährlichkeiten des Niederschlages dargestellt werden. Bei der Berechnung von Wiederkehrintervallen bestimmter Ereignisse, bei der Erstellung von Hochwasserprognosen und bei regionalen Hochwasseranalysen sollte dieser Umstand beachtet werden.

Es ist zu erwarten, dass einige Resultate dieser Arbeit weiter konkretisiert werden können (wie z.B. die genaue Bedeutung des fallenden Niederschlages bei Winterereignissen oder die Jährlichkeitsbetrachtungen), wenn die vom DWD geplanten Berechnungen des Niederschlagsdargebot (fallender flüssiger Niederschlag und Schneeschmelze) abgeschlossen sind. Zusätzliche Erkenntnisse werden auch bei der Ausdehnung des Untersuchungsraumes nach Osten durch die Integration bayerischer Gebiete erwartet. Unter anderem wird erwartet, dass die Aussagekraft der Großwetterlagen zunimmt, einerseits wegen der Größe des gesamten Untersuchungsraumes und andererseits wegen der Ost-West-verlaufenden Orographie (Alpen). Letztere lässt eine größere regionale Differenzierung der Auswirkungen verschiedenen Wetterlagen vermuten. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die bisher erzielten Resultate bereits eine gute Grundlage für die Verbesserung der Hochwasservorhersage und die Abschätzung von Konsequenzen der Klimaentwicklung für extreme Hochwasserereignisse bietet.

Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden innerhalb eines Teilprojektes des Kooperationsvorhabens KLIWA erzielt. Die folgenden Dienststellen sind hieran beteiligt: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft sowie der Deutscher Wetterdienst. Herr Dr. Thomas Reich sei für die Bereitstellung der Niederschlagsdaten gedankt.

5. Literatur

- Black, A.R. & Werritty, A.(1997): Seasonality of flooding: a case study of North Britain. In: Journal of Hydrology 195, 1-25.
- Blöschl, G.; Piock-Ellena, U.; Merz, R.; Gutknecht, D. (1999): Prozessorientierte Regionalisierung von Hochwässern. In: Schriftenreihe des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, März 1999.
- Bonell, M. (1998): Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. J. American Wat. Resour. Association, 34, 4, 765-785.
- Burn, D.H. (1997): Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. Journal of Hydrology 202, 212-230.
- Caspary, H.J. & Bardossy (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität der Hochwasserhydrologie Südwestdeutschlands infolge von Klimaänderungen? Wasser und Boden, 47, 3, 18-24.
- Caspary, H.J. (1998): Hochwasserverschärfung infolge von Klimaänderungen. In: Lozán, José L.: Warnsignal Klima: wissenschaftliche Fakten, Berlin, Parey, 1998.
- DVWK (1999a): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, DVWK-Merkblätter 251/1999.
- DVWK (1999b): Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften, 124, 254 Seiten.
- DWD (1999): Bereitstellung von langen Reihen interpolierter Gitterpunkte des Niederschlages (Tageswerte) mit Hilfe des Verfahrens BONIE für Baden-Württemberg. Bericht des KLIWA-Projektes A1.1.1/BW, 12 Seiten.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., Rüge, U. (1999): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1998). 5. verbesserte und ergänzte Auflage, Potsdam, Offenbach.



- GLA (Geologisches Landesamt Baden-Württemberg; heute LGRB, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg) (1994): Bodenübersichtskarte von Baden-Württemberg 1 : 200000.
- Hess, P. & Brezowsky, H. (1977): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1976). 3. erweiterte und ergänzte Auflage. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr.113, Offenbach.
- Institut für Hydrologie (IHF) (2000a): Analyse der Entstehung extremer Hochwasser – Abschlussbericht für die erste Projektphase. Bericht 97 des Instituts für Hydrologie, Universität Freiburg, Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg (unveröffentlichter Bericht).
- Institut für Hydrologie (IHF) (2000b): Analyse der Entstehung extremer Hochwasser – Abschlussbericht für die zweite Projektphase. Bericht 100 des Instituts für Hydrologie, Universität Freiburg, Fahnenbergplatz, 79098 Freiburg (unveröffentlichter Bericht).
- LfU (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) (1999): Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg. Oberirdische Gewässer / Gewässerökologie 54, Karlsruhe.
- LGRB (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg) (1998): Geowissenschaftliche Übersichtskarte von Baden-Württemberg 1:350 000. CD-ROM, Freiburg.
- Magilligan, F.J. & Graber, B.E. (1996): Hydroclimatological and geomorphic controls on the timing and spatial variability of floods in New England, USA. In: Journal of Hydrology 178, 159-180.
- Mendel H.G. (2000): Elemente des Wasserhaushaltes. Eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung.
- Merz, R., Piock-Ellena U., Blöschl, G., Gutknecht, D. (1999): Seasonality of flood processes in Austria. In: IAHS Publ. No. 255, 273-278.
- Naef, F., Scherrer, S., Faeh, A. (1998): Die Auswirkung des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Grösse extremer Hochwasser. vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich.
- Pardé, M. (1947): Fleuves et Rivieres, sec. Edn. Colin, Parris.
- Peschke, G.; Etzenberg, C.; Müller, G. (1998): Experimental analysis of different runoff generation mechanisms. In: Bueck, J. et al. (1998): Proceedings of the ERB-Conference on Catchment Hydrology and Biochemical Processes in Changing Environment, Liblice.
- Piock-Ellena, U., Pfaundler, M., Blöschl, G.; Burlando, P.; Merz, R. (2000): Saisonalitätsanalyse als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. In: Wasser, Energie, Luft. 92.Jahrgang, 2000, Heft1/2, 13-21, Baden, Schweiz.
- Preuschen, G. (1992): Landnutzung und Abfluss aus ganzheitlicher Sicht. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 36, 1992, H.2, 61-67.
- Uhlenbrook, S. & Leibundgut, Ch. (1997): Abflussbildung bei Hochwasser. Wasser und Boden, 9, 13-22.

6. Abbildungen

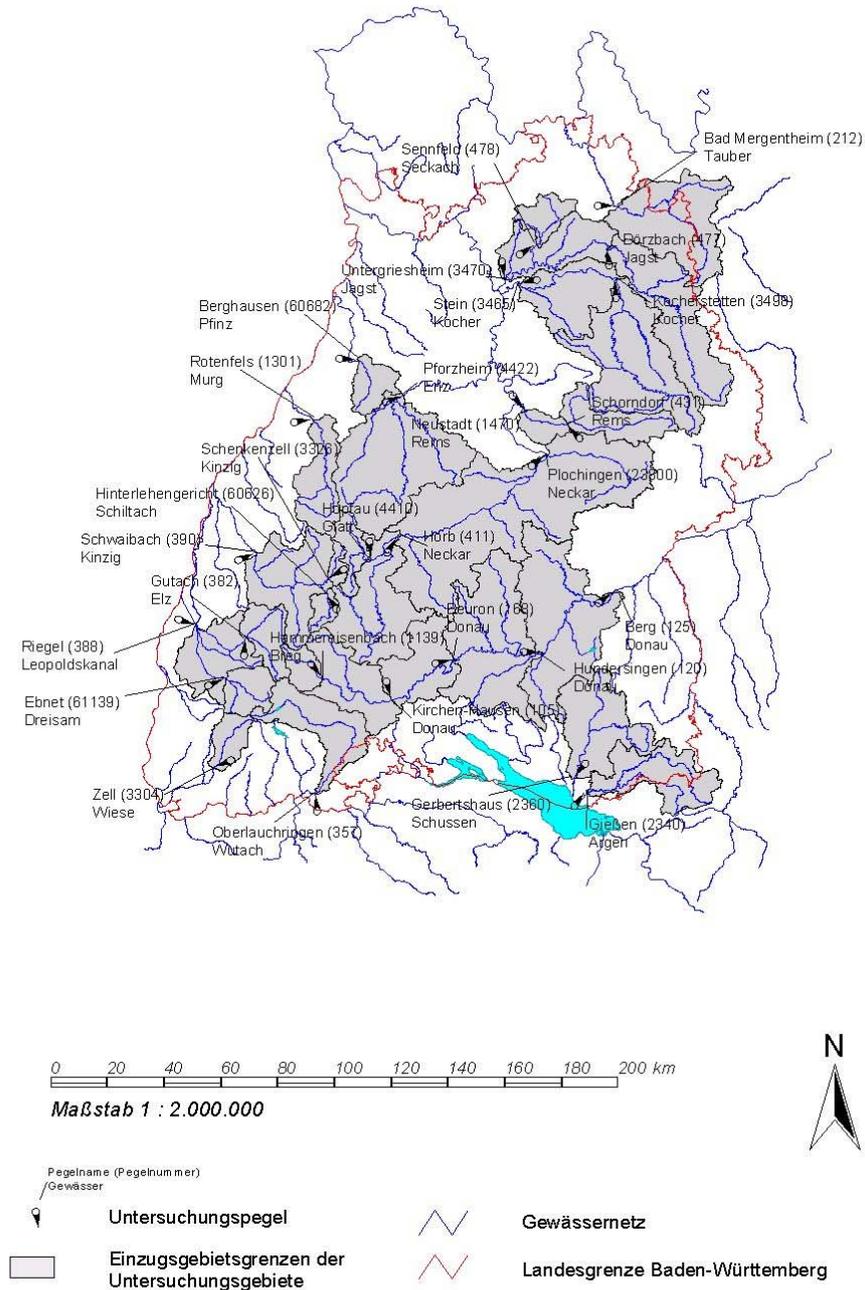


Abb.1: Lage der untersuchten 29 Pegel und deren Einzugsgebiete.

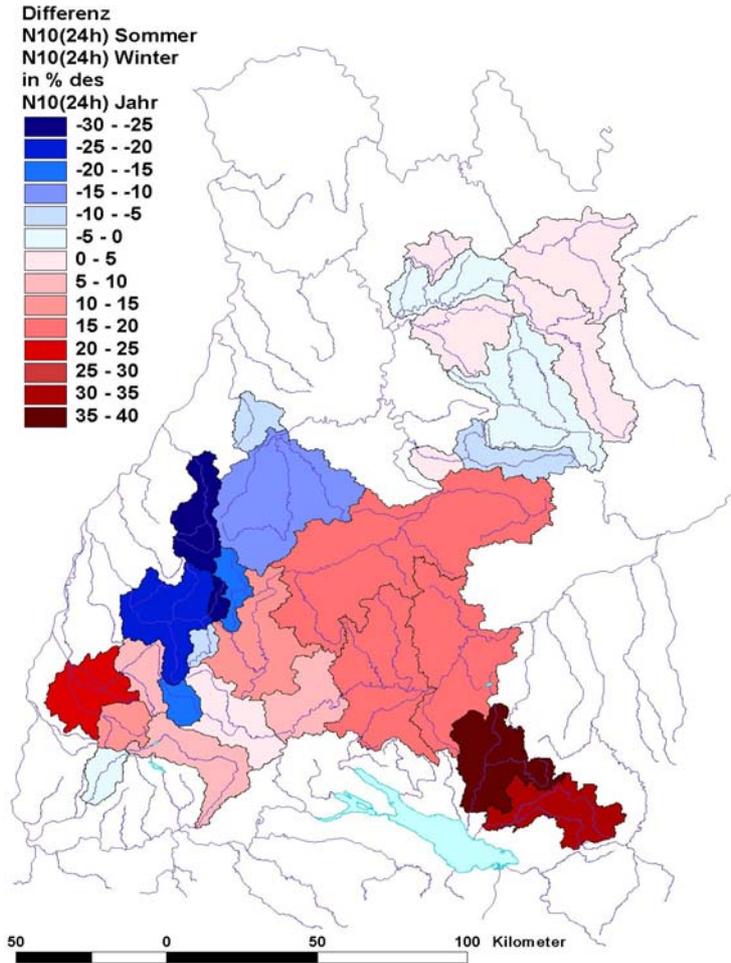


Abb.2: Verteilung der Differenz aus zehnjährlichen Sommer- und Wintergebietsniederschlag der Dauerstufe 24 Stunden als Anteil des zehnjährlichen Jahresgebietsniederschlag der selben Dauerstufe.

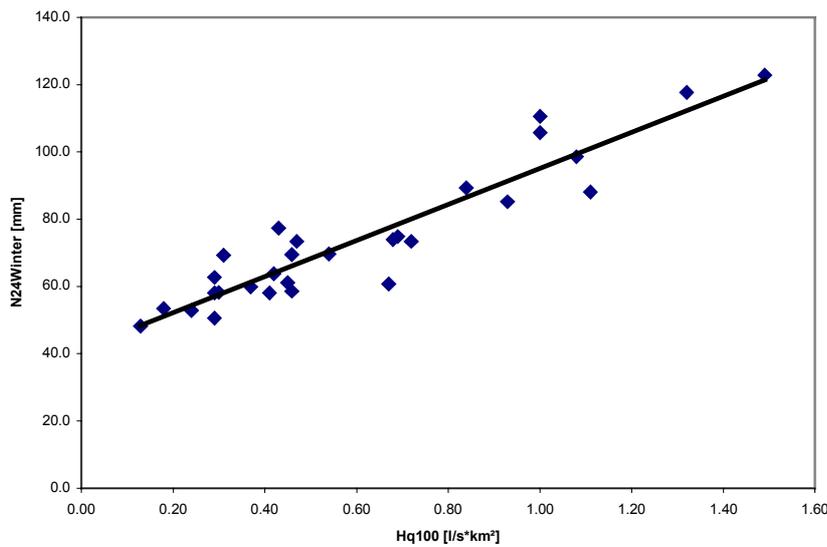


Abb.3: Abflusssspende mit der Jährlichkeit 100 Jahre (Hq_{100}) aller 29 Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit des 100jährigen 24-Stunden-Wintergebietsniederschlages ($N_{24Winter}$); $r^2=0,87$ (lineare Regression).

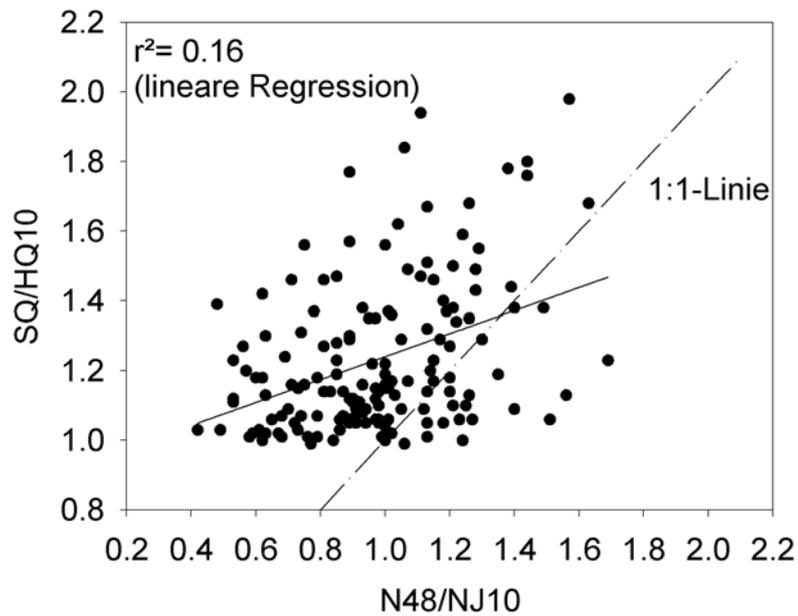


Abb.4: Zusammenhang zwischen dem Abflussereignisquotienten (Quotient aus Scheitelabfluss (SQ) und HQ_{10}) und dem Niederschlagsereignisquotienten (Quotient aus 48-Stunden-Gebietsniederschlag (N48) und Niederschlag der Jährlichkeit 10 Jahre (NJ10)).

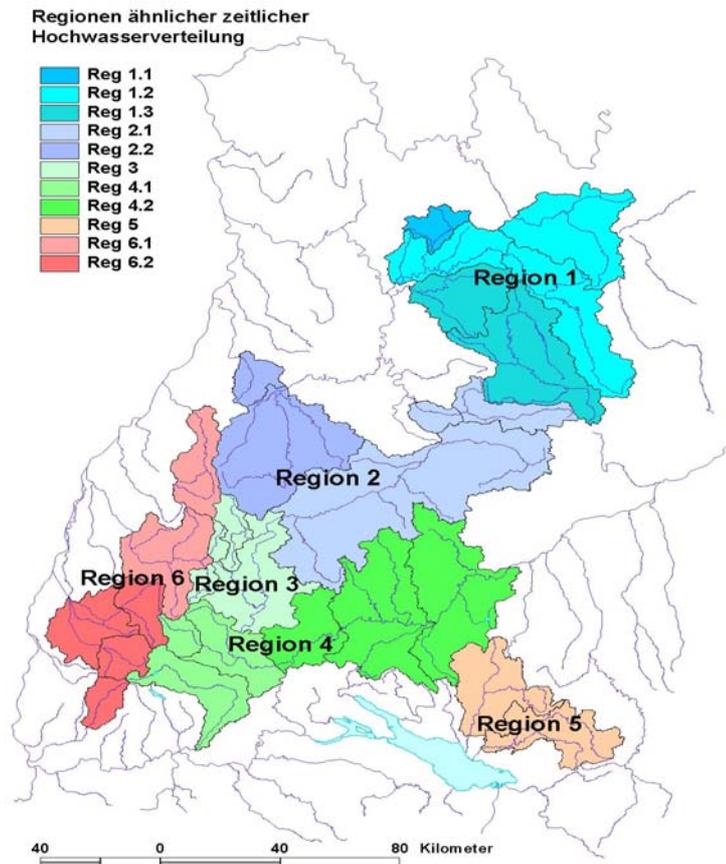


Abb.5: Regionen ähnlicher zeitlicher Hochwasserverteilung.

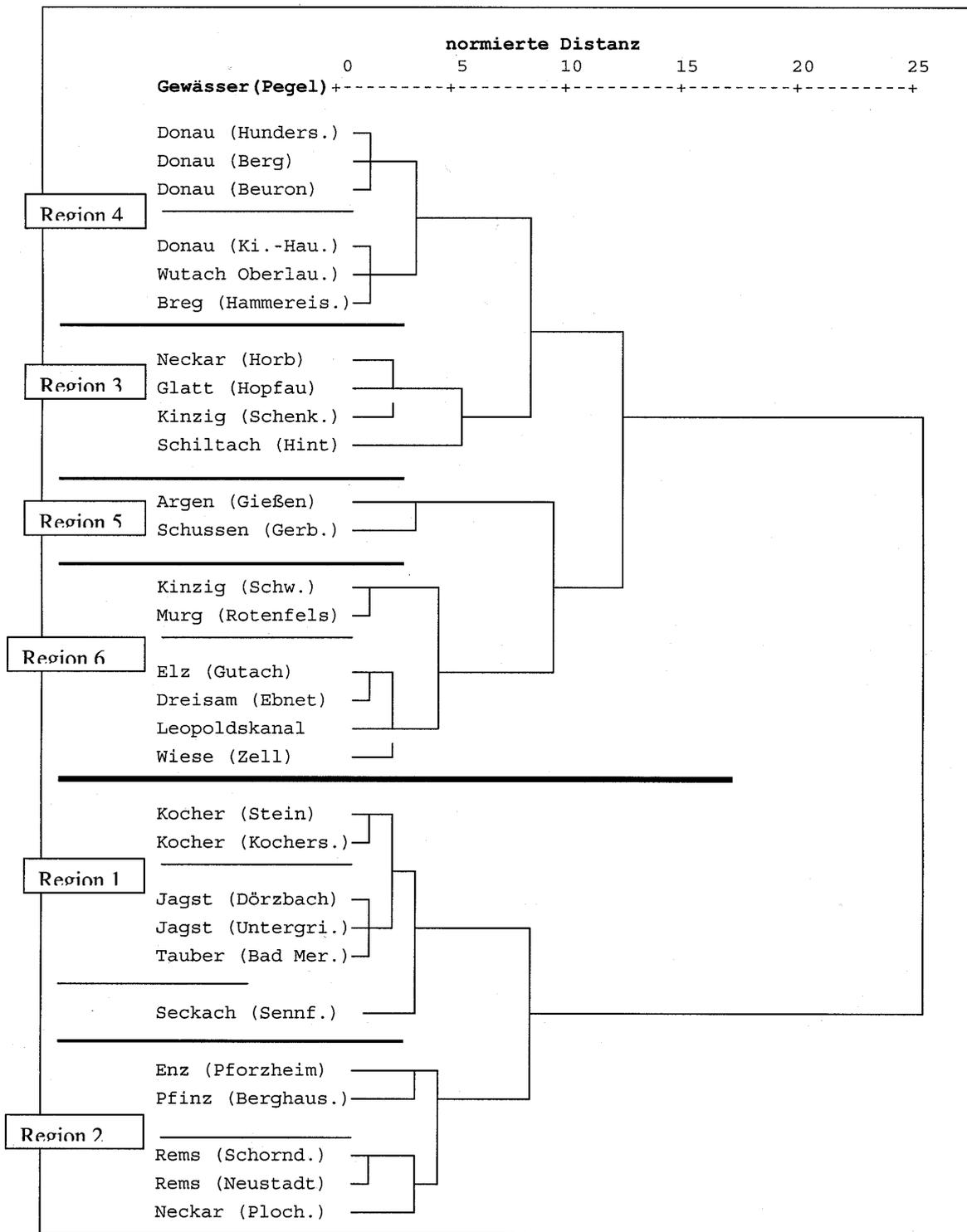


Abb.6: Dendrogramm der hierarchischen Clusteranalyse.

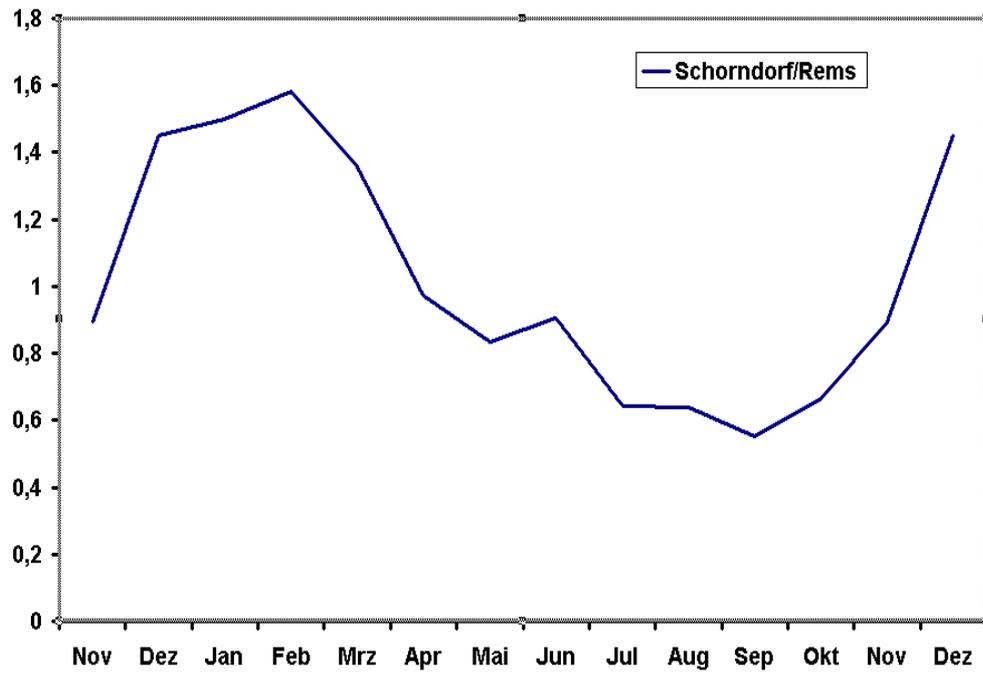


Abb.7: Exemplarische Darstellung des MHQ-Regimes des Pegels Schorndorf/Rems



Saisonalität der MHQ- und MHN-Regime

Legende:

MHQ-Regime

Pfeillänge entspricht prozentualer Abweichung des Pardé-Koeffizienten vom Mittelwert (1), z.B. Pardé-Koeffizient von 1,5 entspricht Pfeillänge von 0,5 cm

MHN-Regime

Pfeillänge entspricht prozentualer Abweichung des Pardé-Koeffizienten vom Mittelwert (1) multipliziert mit Faktor 2, z.B. Pardé-Koeffizient von 1,2 entspricht Pfeillänge von 0,4 cm

KM: kein ausgeprägtes Maximum

Monat des Auftretens der Regimemaxima:

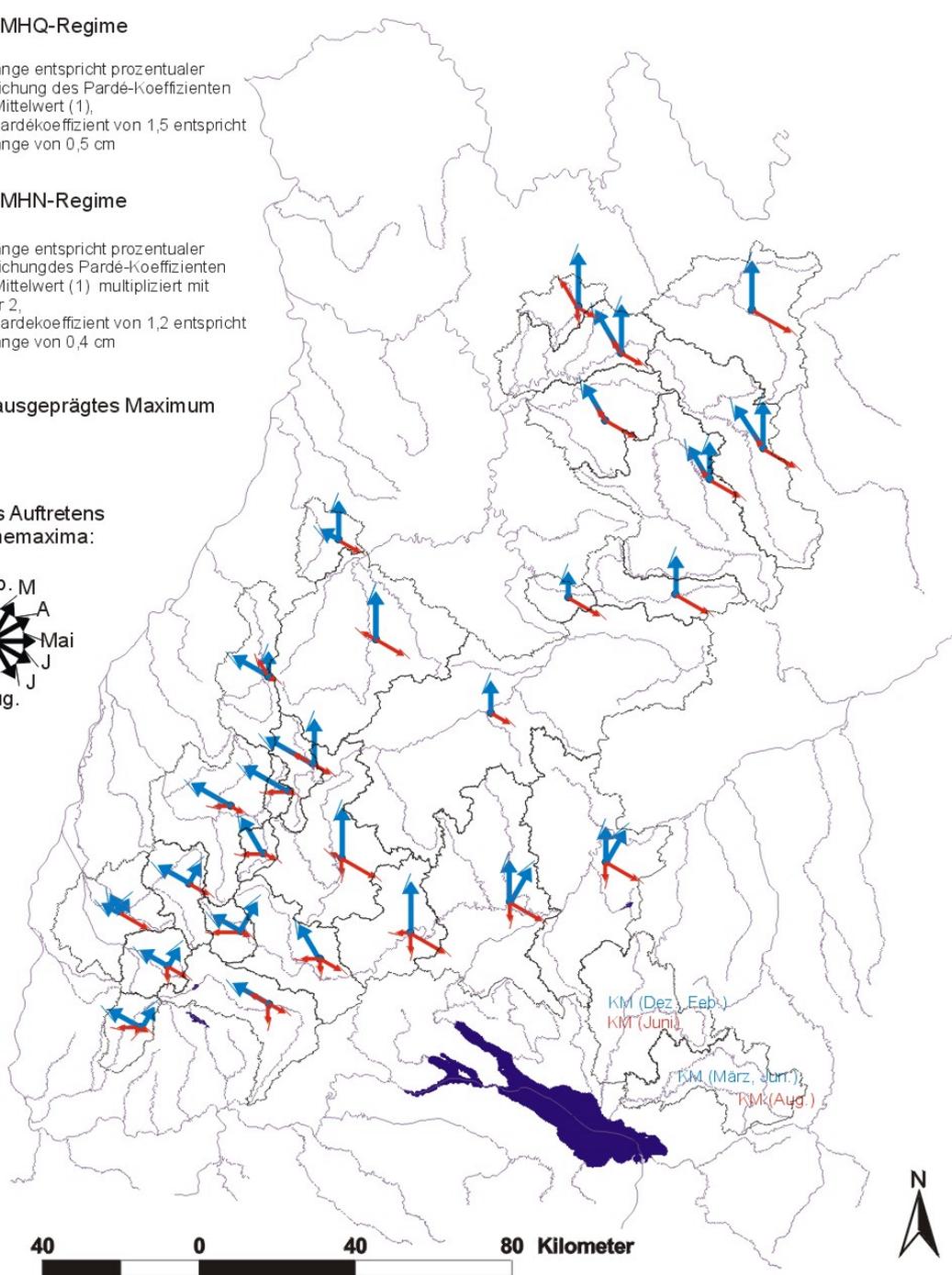
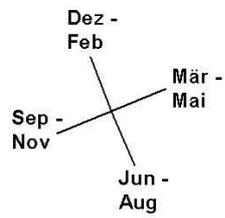


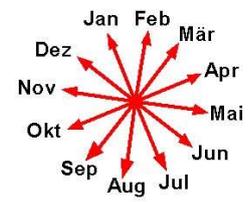
Abb.8: Raumzeitliche Verteilung der MHQ- und MHN-Regime.

Saisonalität der Scheitelabflüsse (\geq HQ10) und Häufigkeit des Auftretens

Quartale des Auftretens



Richtung der
Vektorsummen aus
den Ereignissen



Häufigkeiten
der Ereignisse

- 1 -
- 2 —
- 3 —
- 4 —
- 5 —
- 6 —
- 7 —
- 11 —

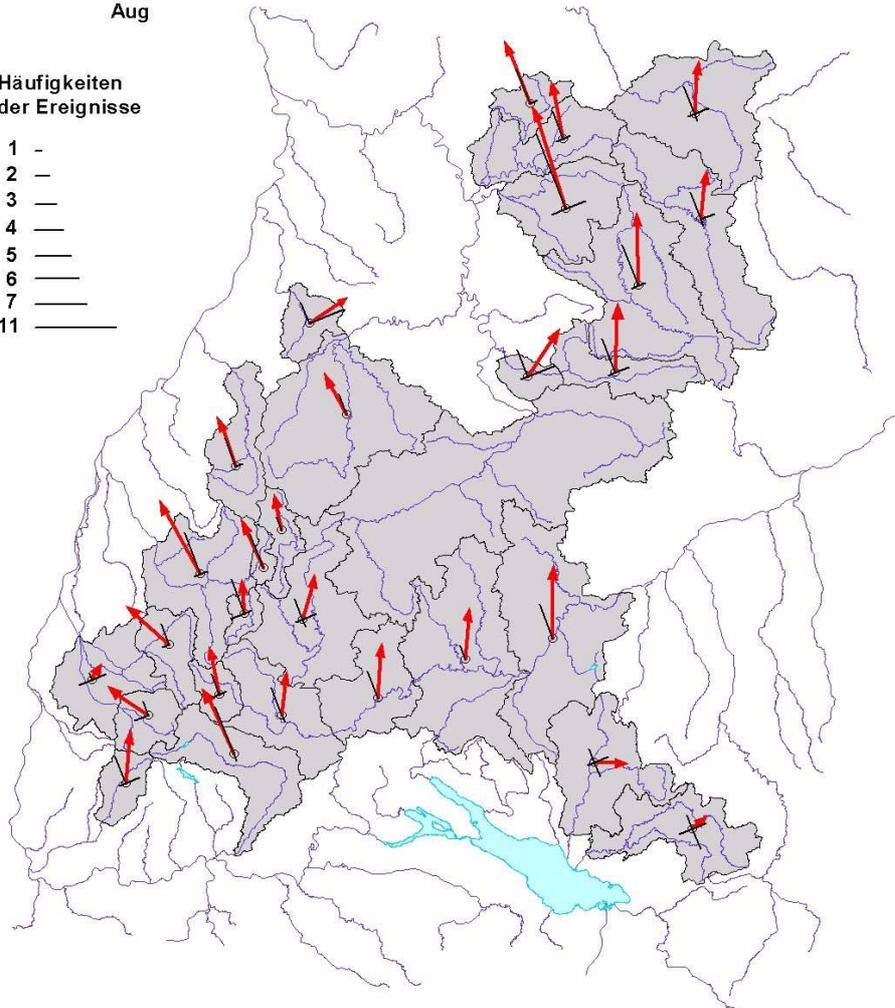


Abb.9: Raumzeitliche Verteilung der Saisonalität der extremen Hochwasser.