

Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse Ergebnisse aus KLIWA

Helmut Straub

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

In jüngster Vergangenheit traten in verschiedenen Flussgebieten Hochwasserereignisse auf, die erhebliche Schäden verursacht haben. Dies führte in der Öffentlichkeit zu Diskussionen, ob solche Naturereignisse das Ergebnis einer bereits eingetretenen Klimaveränderung sind. In diesen Diskussionen fehlen jedoch weitgehend Zahlen und Fakten für eine objektive Beurteilung.

Um diesen Mangel zu beheben, erhielt das Institut für Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA den Auftrag, für den Bereich der Länder Baden-Württemberg (BW) und Bayern (BY) das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse zu untersuchen und zu bewerten. Dabei sollten die derzeit gängigen statistischen Verfahren zur Anwendung kommen.

Basis der Untersuchungen waren:

- jährliche Höchstabflüsse an Pegeln in den Einzugsgebieten der Länder BW und BY (ohne Pegel am Rhein)
 - Zeitreihen, für die gesicherte Abflüsse vorliegen
- Zuverlässige Abflüsse liegen bei einem Pegel bereits ab 1851 vor; bei den meisten Pegeln jedoch gibt es jährliche Höchstabflüsse erst ab den 30-er Jahren des 20. Jahrhunderts.



Abb.1: Hochwassermarken in Heidelberg/Neckar

Die in der statistischen Auswertung verwendete Zeitreihe für den Pegel Heidelberg/Neckar ist die längste aller untersuchten Zeitreihen; sie beginnt ab 1851. Die Zeitreihe beinhaltet als höchstes das Ereignis vom Dezember 1882. Weitere Ereignisse mit noch höheren Abflüssen sind die Hochwasser HW 1817, HW 1789, HW Okt. 1824, HW Febr. 1784 (Wasserstand ist von Eisstau beeinflusst). Für diese Hochwasser liegen zwar Angaben über die damaligen

Wasserstände in Form von Hochwassermarken (siehe Abb. 1) vor, die zugehörigen Abflüsse können jedoch erst nach aufwendigen Erhebungen der damaligen Querprofilaten und nach Durchführung hydraulischer Berechnungen ermittelt werden. Da also für solche bedeutenden Hochwasser derzeit keine zuverlässigen Abflussangaben vorhanden sind, konnten Daten dieser Ereignisse in die Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Hochwasserabflüsse nicht einbezogen werden, obwohl sie wichtige Informationen beinhalten.

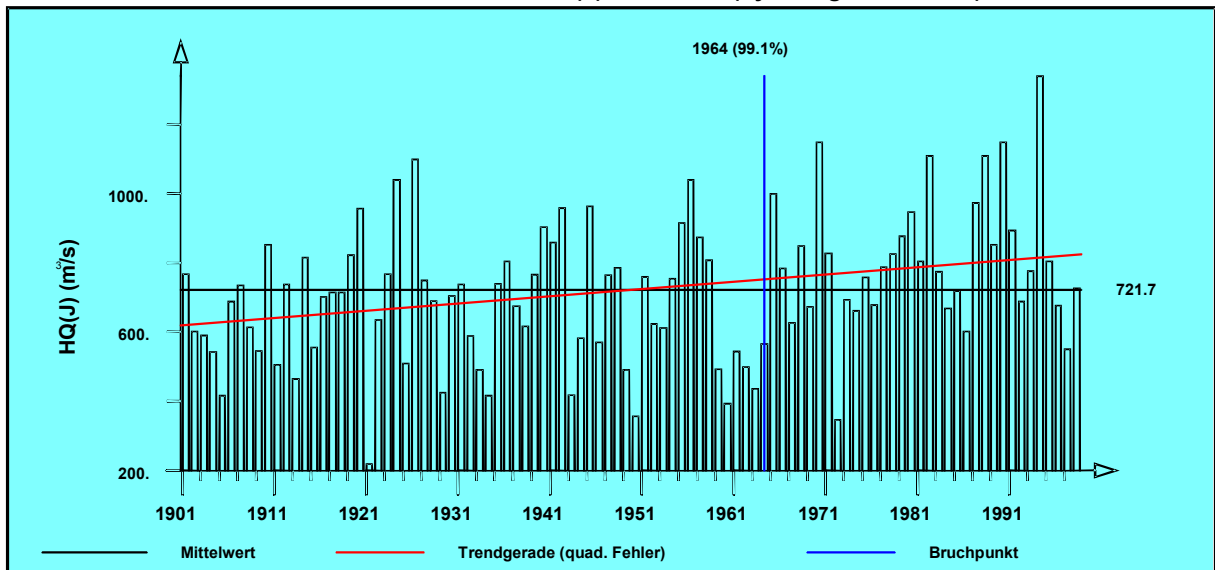
Die in die Untersuchung zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse einbezogenen Pegel der Länder Baden-Württemberg und Bayern sind in Abb. 2 dargestellt. Es sind insgesamt 158 Pegel. Sie verteilen sich relativ gleichmäßig auf die Einzugsgebiete der Donau (violett), des Mains (gelb), des Neckars (grün) und des Hoch- und Oberrheingebietes (blau).

Das Spektrum der Einzugsgebietsgrößen der untersuchten Pegel reicht von $< 100 \text{ km}^2$ bis 50.000 km^2 , die überwiegende Zahl der Pegel (81 %) deckt ein Einzugsgebiet zwischen 100 und 5.000 km^2 ab. Die Dauer der jeweils an den Pegeln verfügbaren Zeitreihe mit jährlichen Höchstabflüssen schwankt zwischen 20 und 150 Jahren. Die meisten Pegel verfügen jedoch über eine Zeitreihe mit einer Länge von 60 bis 80 Jahren.

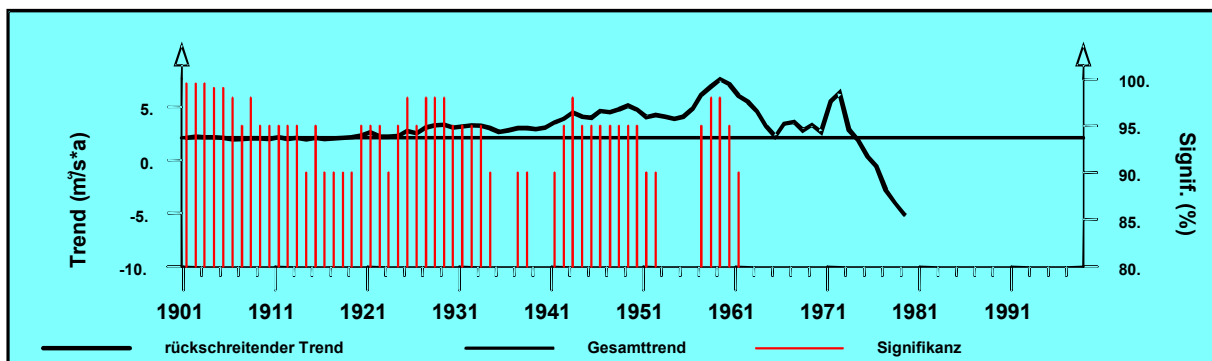
Pegel Donauwörth/Donau

(Pegel-Nr. 1003980)

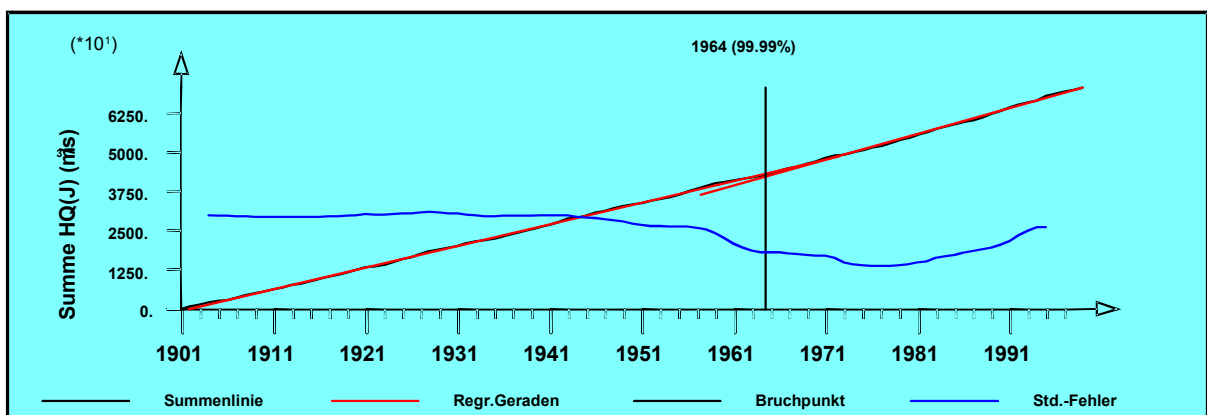
Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1901-1998 (hydrologisches Jahr)



Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend: $2.084 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 99.5%)



Rückschreitender Trend mit Signifikanz nach Mann-Kendall



Signifikanz des Bruchpunkts nach dem Summenlinienvorgang
und Verlauf der Summe des Standardfehlers

Abb.3: Ergebnisdarstellung des Langzeitverhaltens der jährlichen Höchstwerte HQ (J)



Für alle Pegel wurden die **jährlichen Höchstabflüsse** nach einheitlichen statistischen Verfahren untersucht. Aus den Ergebnisdarstellungen (Abb. 3, Beispiel Pegel Donauwörth/Donau) sind die verwendeten Verfahren ersichtlich. Die Darstellungen enthalten folgende Daten und Ergebnisse (in Klammern Werte für Pegel Donauwörth/Donau):

- oberes Diagramm: die jährlichen Höchstabflüsse HQ(J) mit folgenden Ergebnissen:
 - mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss MHQ (721 m³/s)
 - Trendgerade mit Angabe der jährlichen Abflussänderung (2,08 m³/s pro Jahr)
 - Trendsignifikanz nach dem verteilungsunabhängigen MANN-KENDALL-Test (99,5 %)
 - Für die Signifikanz gelten folgende Bewertungen:
 - 80 % < α < 90 %: schwache Zeichen einer Veränderung sind vorhanden
 - 90 % < α < 99 %: Veränderungen sind wahrscheinlich
 - α > 99 %: Veränderungen sind sehr wahrscheinlich
 - Kennzeichnung des Bruchpunktes nach MANN-WHITNEY mit Angabe des Jahres (1964) und der Wahrscheinlichkeit (99 %).

Die Ermittlung der Koeffizienten der Trendgeraden erfolgte nach der Methode der Fehlerquadratsumme und nach der Methode der Fehlerabsolutsumme. Es hat sich gezeigt, dass bei der Methode der Fehlerabsolutsumme die vielen relativ kleinen Hochwasser, die unter MHQ liegen, das Ergebnis der Trendschätzung stark beeinflussen; große Hochwasser werden dagegen gleichwertig berücksichtigt. Bei der Methode der Fehlerquadratsumme orientiert sich der Trend stärker an großen Ereignissen. Bei langen Zeitreihen sind die Unterschiede beider Methoden gering. Bei kürzeren Reihen treten bei der Methode der Fehlerabsolutsumme deutlich höhere Streuungen auf, obwohl sich die jeweilige Fehlerabsolutsumme nur geringfügig unterscheidet. Für die weiteren Betrachtungen kam daher nur die Methode der Fehlerquadratsumme zur Anwendung.

- mittleres Diagramm:
 - den rückschreitenden Trend aus mindestens 20 Jahren
Dargestellt ist der jeweilige Trend (linke Achse), an dem die jeweilige Teilzeitreihe beginnt. Am Ende deckt sich der rückschreitende Trend mit dem Trend für die gesamte Zeitreihe (siehe oberes Diagramm).
 - das Signifikanzniveau des Trends der jeweiligen Teilreihe (für α > 80 %) nach dem Test nach MANN-KENDALL (rechte Achse)
Beispiel: Am Anfang hat die Teilzeitreihe einen negativen Trend mit Werten von - 5 [m³/s*a] (Abnahme), am Ende hat die Teilzeitreihe einen positiven Trend mit einem Wert in Höhe von + 2 m³/s (Zunahme).
- unteres Diagramm:
 - die Summenlinie der Abflüsse längs der Zeitachse (schwarz)
 - den Zeitpunkt (1964) des Bruchpunktes nach MANN-WHITNEY (wie im oberen Diagramm) und die Signifikanz α (99,9 %) für die Steigerungsänderung nach dem „t-Test“ (bei α < 80 % ist die Steigungsänderung nicht signifikant)
 - die beiden Korrelationsgeraden für die Teil-Summenlinien, die sich durch Teilung der Summenlinie am Bruchpunkt ergeben (rot)
 - die Summe der Standardfehler der beiden Regressionsgeraden (blau)

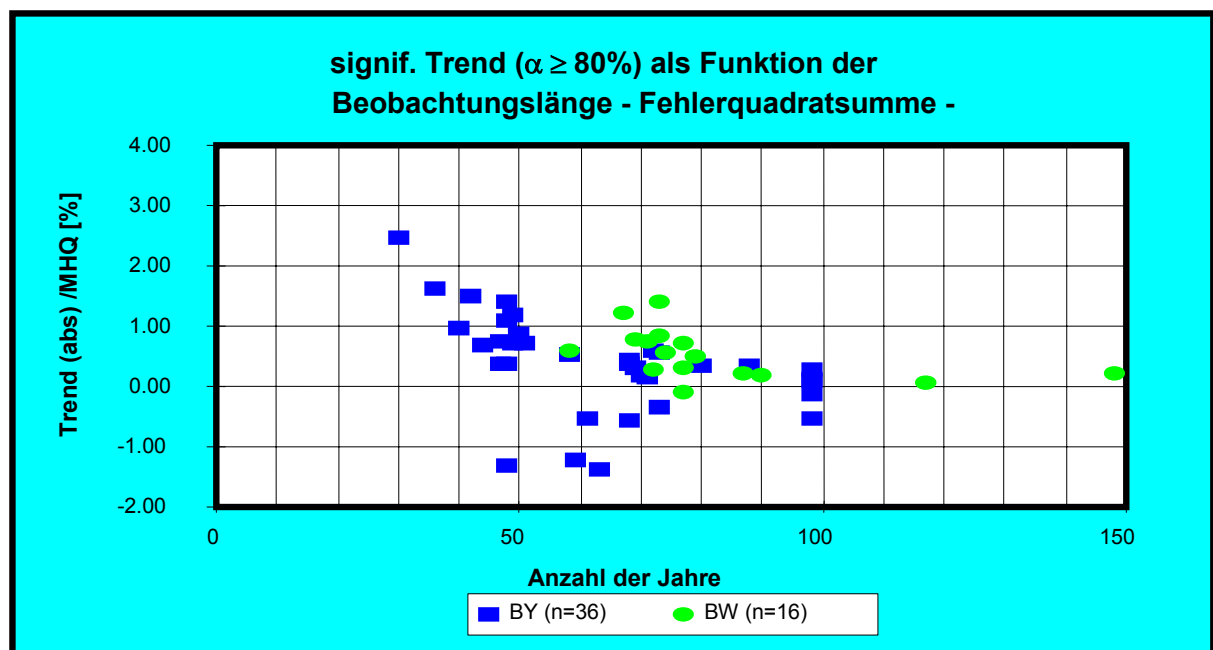
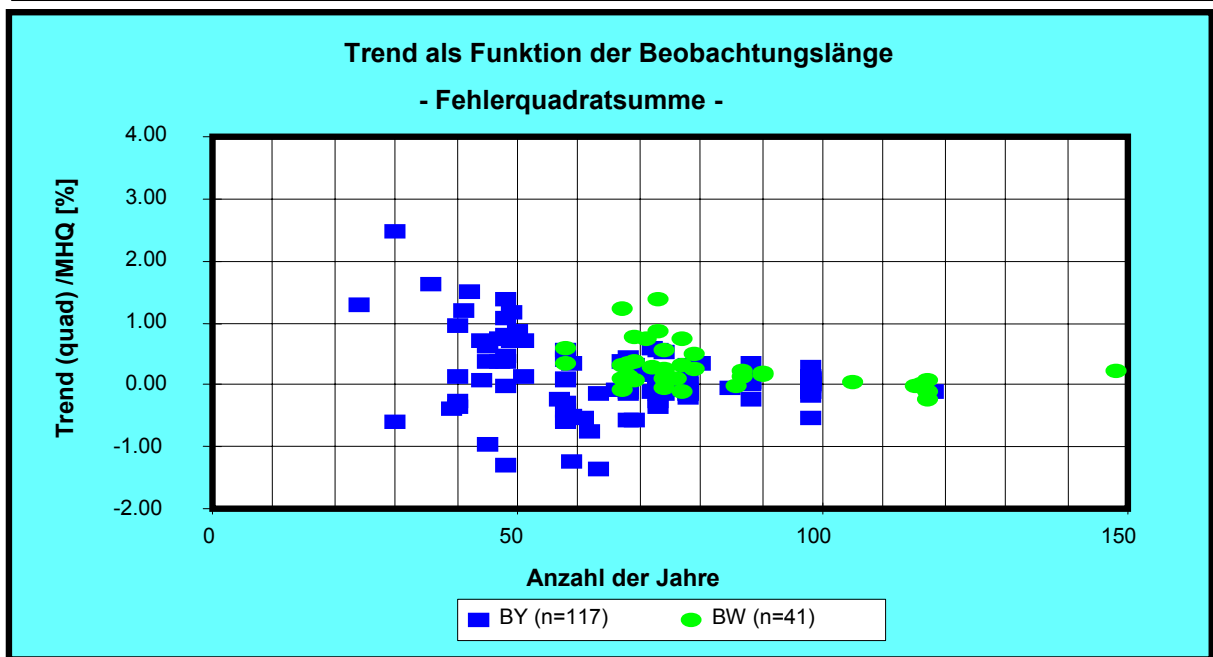


Abb.4: Abhängigkeit des Trends von der Länge der Beobachtungsreihe
(gesamte Zeitreihen)

Bei den Untersuchungen hat es sich gezeigt, dass der ermittelte Betrag des Trends an einem Pegel auch von der Dauer der jeweils untersuchten Zeitreihe mitbestimmt wird. Die Abb.4 zeigt die Abhängigkeit des Trends (ermittelt nach der Methode der Fehlerquadratsumme) von der Länge der Beobachtungsreihe: links für alle Zeitreihen, rechts für die Zeitreihen mit $\alpha > 80\%$. Aus der Abb. 4 wird deutlich, dass die Streubreite des Trends bei kurzen Zeitreihen deutlich größer ist als bei langen Reihen. Liegen weniger als ca. 70 Jahre vor, ergibt sich eine deutliche Zunahme der Variabilität der Trends. Hierdurch wird bestätigt, dass sich die Untersuchung des Langzeitverhaltens auf eine möglichst große Beobachtungslänge stützen sollte.



Generell bezog sich die Untersuchung auf folgende 3 Kollektive:

- die jeweils vorhandenen ("gesamten") Zeitreihen der 158 Pegel (unterschiedliche Länge der Zeitreihen)
- die Zeitreihen der Zeitspanne 1932-1998 (67 Beobachtungsjahre). Ab 1932 liegen an 39 Pegel aus Baden-Württemberg (BW) und 68 Pegel aus Bayern (BY), also an insgesamt 107 Pegeln Daten vor (einheitliche Länge der Zeitreihen)
- die "langen" Zeitreihen (mit Beginn vor 1932) 107 Pegel (unterschiedliche Länge der Zeitreihen)

Die Hauptaussagen der durchgeführten Untersuchung stützen sich auf die beiden letzten Kollektive.

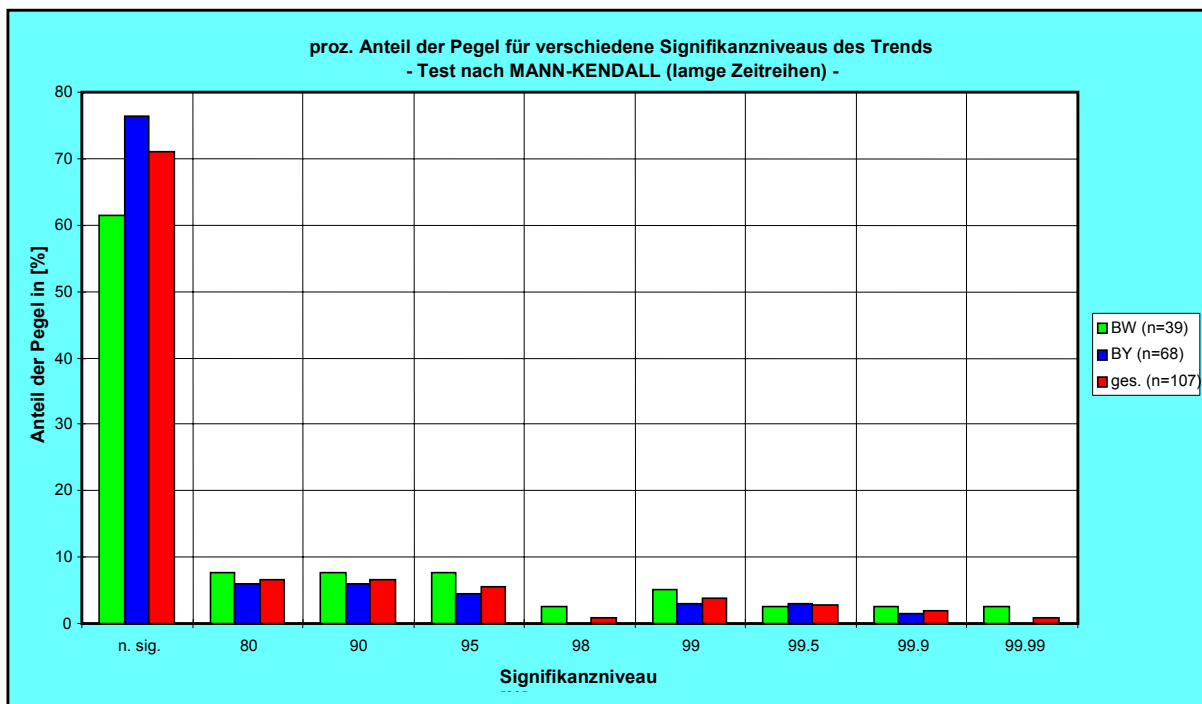


Abb.5: Prozentuale Verteilung der Pegel auf die verschiedenen Signifikanzniveaus (Zeitreihen 1932-1998), $\alpha > 80\%$

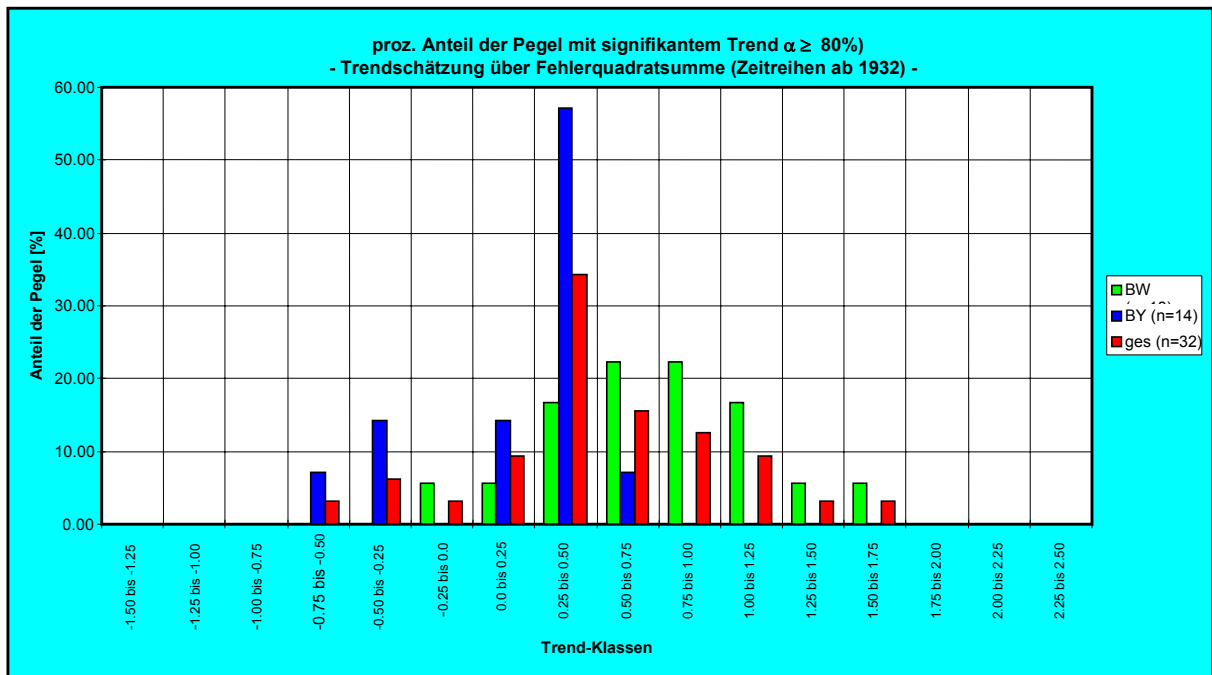


Abb. 6: Prozentuale Verteilung der Pegel auf die verschiedenen Trendklassen (Zeitreihen 1932-1998), $\alpha > 80\%$

Zeitreihen 1932-1998

Die Untersuchungen ergaben folgendes:

- Der überwiegende Teil (ca. 70 %) aller 107 Pegel weist für die Zeitreihe 1932-1998 keinen signifikanten Trend (Trend mit einem Signifikanzniveau $\alpha < 80\%$ ist nicht signifikant) auf (Abb. 5, oben).
- Signifikanzen zwischen 80 und 90 % („schwache Zeichen einer Veränderung sind vorhanden“) treten bei 13 % der Pegel auf.
- Höhere Trends signifikanz mit $\alpha > 90\%$ und $\alpha < 99\%$ („Veränderungen sind wahrscheinlich“) treten lediglich an 11 % der Pegel auf.
- Bei $\alpha > 99\%$ („Veränderungen sind sehr wahrscheinlich“) sind 6 % der Pegel betroffen.

Von den 107 Pegeln weisen lediglich 32 Pegel (30%) eine Trends signifikanz von $\alpha > 80\%$ auf. Nimmt man als Signifikanz-Grenze statt $\alpha > 80\%$ $\alpha > 90\%$ („Veränderungen sind wahrscheinlich“), so sind nur insgesamt 19 Pegel betroffen, davon 13 Pegel in BW und 6 in BY. Nimmt man als Grenze $\alpha > 99\%$ („Veränderungen sind sehr wahrscheinlich“), so sind lediglich 3 Pegel von BW betroffen: Hammereisenbach/Breg ($A_{E0}=158 \text{ km}^2$, Reihe ab 1926), Pfäfersingen/Ammer ($A_{E0}=133 \text{ km}^2$, Reihe ab 1912), Hopfau/Glatt ($A_{E0}=202 \text{ km}^2$, Reihe ab 1928).

Die ermittelten Trends (jeweils auf MHQ bezogen) der 32 Pegel, die eine Signifikanz $\alpha > 80\%$ aufweisen, schwanken zwischen den Klassen „- 0,75 bis - 0,50“ [%/Jahr] und „+ 1,50 bis 1,75“ [%/Jahr] (Abb. 6). Die häufigsten Trends liegen zwischen „0 und + 0,75“ [%/Jahr]. Auffällig ist, dass die meisten dieser Pegel eine Tendenz zu einer Zunahme der Hochwasser-Abflüsse aufweisen.

Die prozentual größte Abnahme ($\alpha = 90,0\%$) wurde am Pegel Birnbach/Rott ermittelt; sie beträgt: $\Delta Q = - 0,60 \text{ \%/Jahr}$. Bei einem MHQ in Höhe von $132,9 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die Abnahme somit $0,80 \text{ m}^3/\text{s/Jahr}$. Die prozentual größte Zunahme ($\alpha = 99,9\%$) wurde am Pegel Hammereisenbach/Breg ermittelt; sie beträgt: $\Delta Q = + 1,53 \text{ \%/Jahr}$. Bei einem MHQ in Höhe von $53,08 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt somit die Zunahme $0,81 \text{ m}^3/\text{s/Jahr}$.



„lange“ Zeitreihen

Im Vergleich zu den Zeitreihen 1932-1998 treten bei den „langen“ Zeitreihen geringere Trendbeträge auf; außerdem sind die niederen Trendklassen häufiger vertreten. Von den 107 Pegeln weisen 37 % der Pegel eine negative Steigung (Abnahme der jährlichen Höchstabflüsse), 63 % der Pegel eine positive Steigung (Zunahme der jährlichen Höchstabflüsse) auf.

Die Untersuchungen ergaben folgendes:

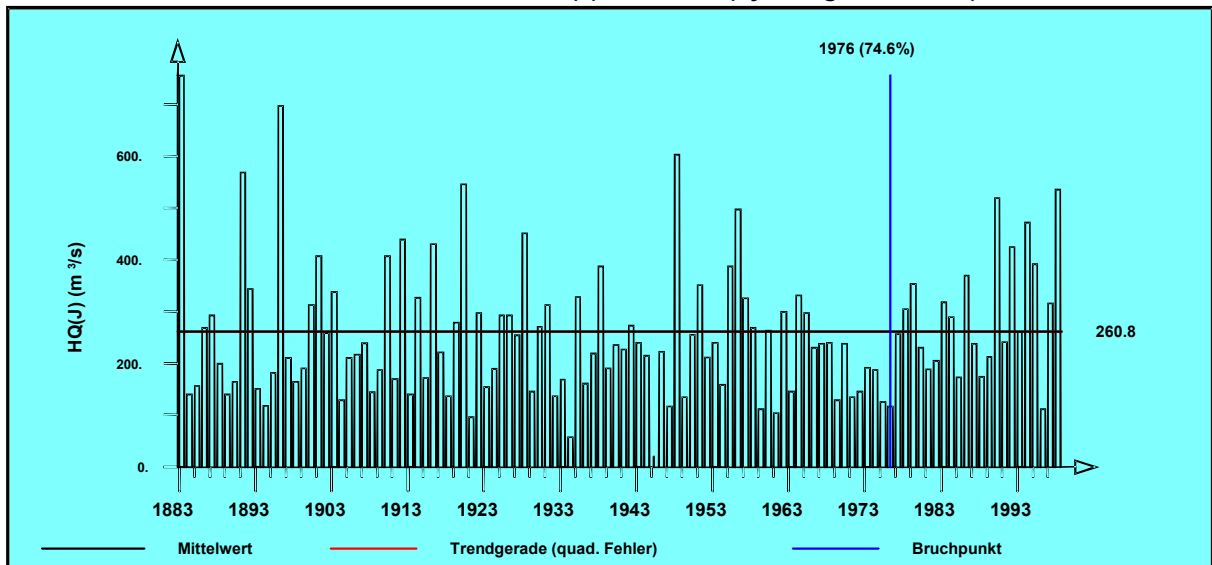
- Der überwiegende Teil (ca. 71 %) aller 107 Pegel weist für die „langen“ Zeitreihe keinen signifikanten Trend (Trend mit einem Signifikanzniveau $\alpha < 80$ % ist nicht signifikant) auf.
- Signifikanzen zwischen 80 und 90 % („schwache Zeichen einer Veränderung sind vorhanden“) treten bei 14 % der Pegel auf.
- Höhere Trends signifikanz mit $\alpha > 90$ % und $\alpha < 99$ % („Veränderungen sind wahrscheinlich“) treten lediglich an 6 % der Pegel auf.
- Bei $\alpha > 99$ % („Veränderungen sind sehr wahrscheinlich“) sind 9 % der Pegel betroffen.

Die häufigsten Trendklassen verteilen sich bei den „langen“ Reihen auf die Klasse zwischen 0 und 0,75 [%/Jahr]. Davon sind insgesamt 31 Pegel (15 in BW, 16 in BY) betroffen.

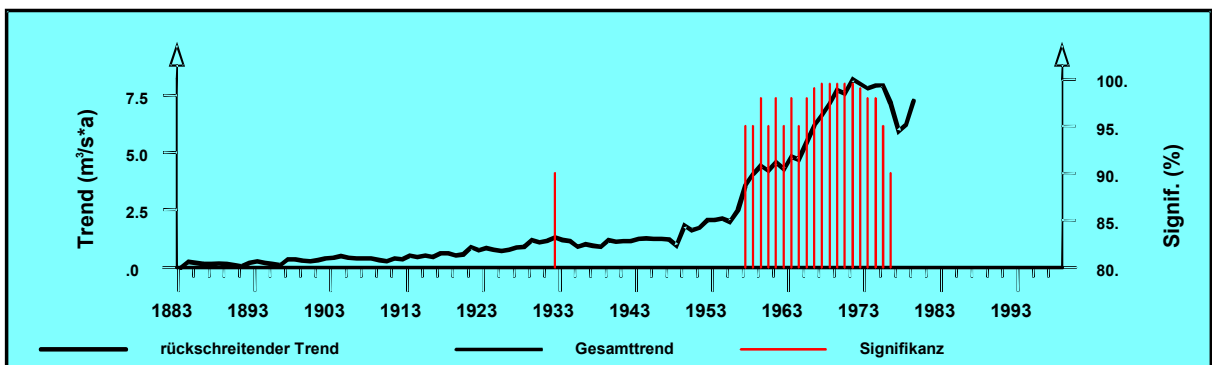
Pegel Rotenfels/Murg

(Pegel-Nr. 1301)

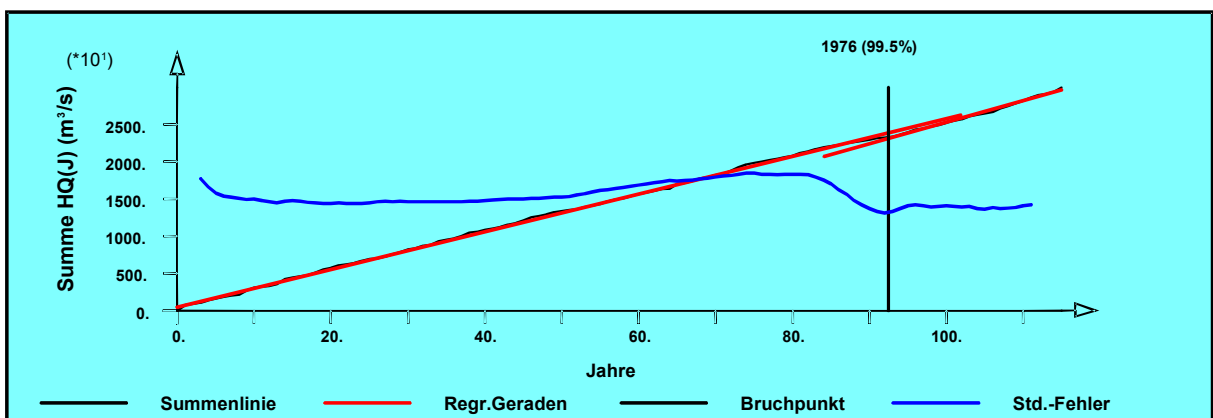
Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1883-1998 (hydrologisches Jahr)



Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend: $0.000 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 50%)



Rückschreitender Trend mit Signifikanz nach Mann-Kendall



Signifikanz des Bruchpunkts nach dem Summenlinienverfahren
und Verlauf der Summe des Standardfehlers

Abb.7: Pegel Rotenfels/Murg („lange“ Zeitreihe)



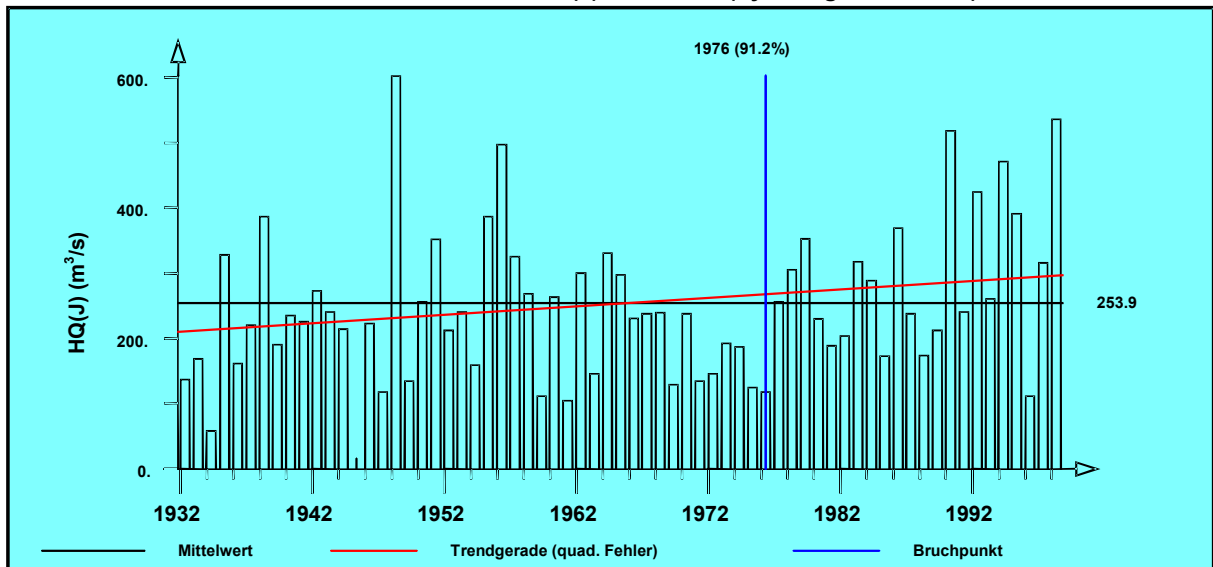
Der Pegel Rotenfels (am Westabhang des Schwarzwaldes gelegen) stellt ein Beispiel für eine "lange" Zeitreihe dar; die Jahreshöchstwerte reichen hier bis zum Jahr 1883 zurück (Abb. 7).

Für die Gesamtreihe liegt kein Trend vor, signifikante Trends (Signifikanz > 90 %) gibt es nur für die Teilreihen 1955-1998, 1956-1998, 1957-1998 usw. und für eine einzige Teilreihe 1932-1998 (mittlerer Teil der Darstellung).

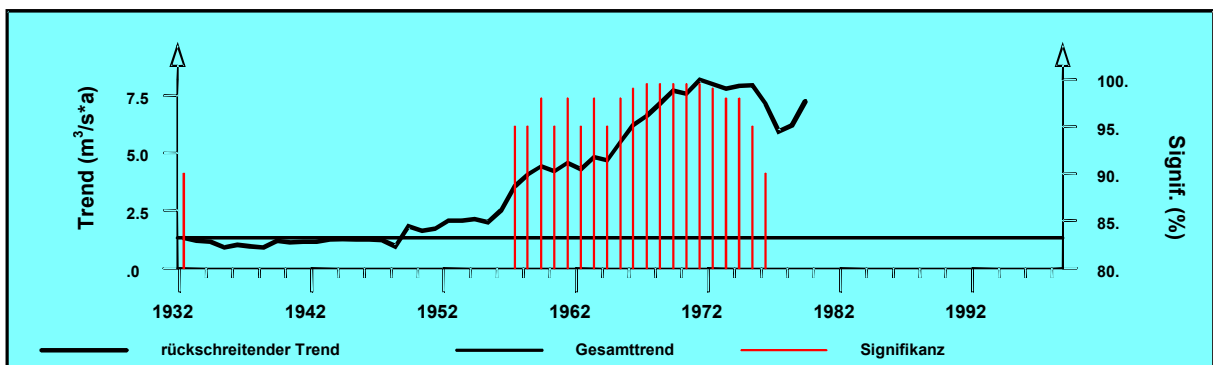
Pegel Rotenfels/Murg

(Pegel-Nr. 1301)

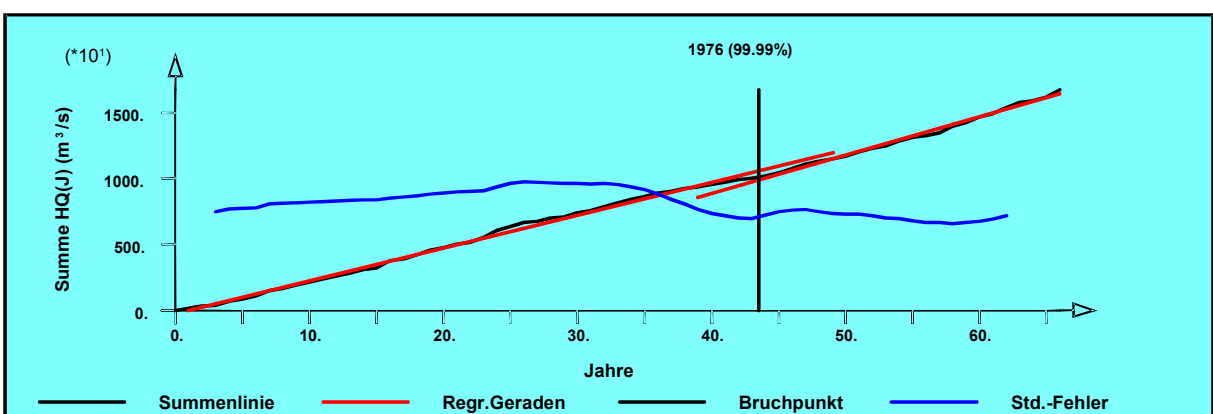
Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1932-1998 (hydrologisches Jahr)



Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend: $1.303 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 90%)



Rückschreitender Trend mit Signifikanz nach Mann-Kendall



Signifikanz des Bruchpunkts nach dem Summenlinienverfahren
und Verlauf der Summe des Standardfehlers

Abb.8: Pegel Rotenfels/Murg (Zeitreihe 1932-1998)



Die auf die Zeitspanne 1932-1998 verkürzte Zeitreihe des Pegels Rotenfels/Murg (Abb. 8) weist einen signifikanten Trend (90 %) auf. Das Beispiel zeigt die Bedeutung einer langen Zeitreihe. Die verkürzte Zeitreihe beinhaltet nicht die Information der bedeutenden Hochwasser am Ende des 19. Jahrhunderts mit den HW 1882 und HW 1896.

Langzeitverhalten von Hochwasserabflüssen HQ(J)

Karte 3: Prozentuale Trendänderung bezogen auf den mittleren jährlichen Hochwasserabfluss und Signifikanz des Trends nach Mann-Kendall (lange Zeitreihen mit Beobachtungsbeginn 1932 und früher)

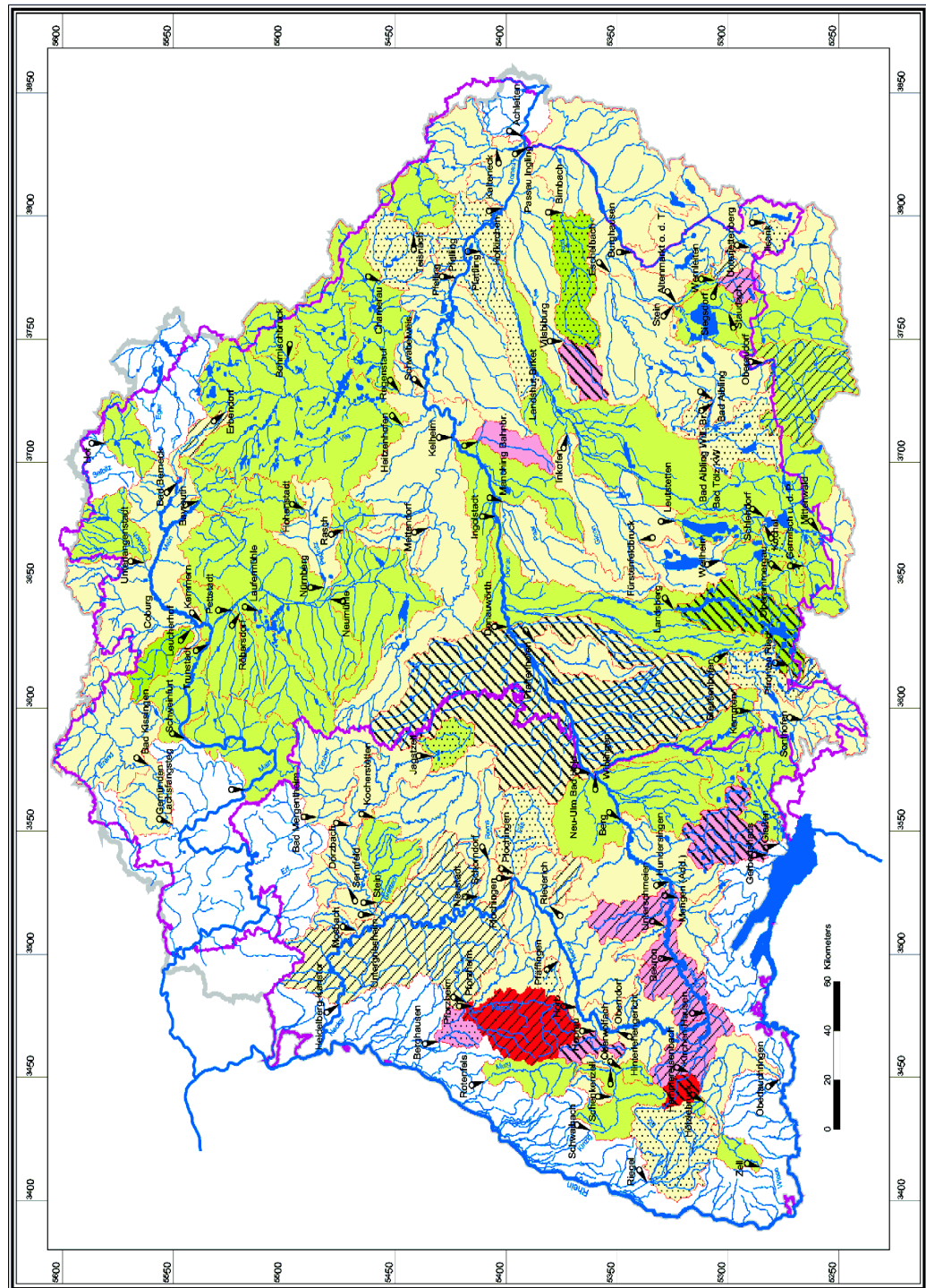


Abb.9: Karte "Prozentuale Trendänderung" ("lange" Reihen)



Wie sich die Trendänderungen bei den „langen“ Zeitreihen auf die Einzugsgebiete in den Ländern BW und BY verteilen, ist aus Abb. 9 ersichtlich:

- Abnahmen (grün),
- Zunahmen zwischen 0 und 0,5 %/Jahr (gelb),
- Zunahmen zwischen 0,5 und 1,0 %/Jahr (hellrot),
- Zunahmen zwischen 1,0 und 2,0 %/Jahr (rot).

Die Signifikanz nach MANN-KENDALL ist wie folgt dargestellt:

- kein Raster: keine Signifikanz
- gepunktetes Raster: schwach signifikant ($80 < \alpha < 90 \%$)
- dünnes Geraden-Raster: wahrscheinlich signifikant ($90 < \alpha < 99 \%$)
- dickes Geraden-Raster: sehr wahrscheinlich signifikant ($\alpha > 99 \%$)

Die Karte zeigt eine gleichmäßige Verteilung der Trends. Schwerpunkte mit bestimmten Merkmalen sind ausgeprägt nicht vorhanden. Insbesondere bei den prozentualen Trendänderungen und den zugehörigen Signifikanzen ist eine gleichmäßige Verteilung über BW und BY vorhanden.

Eine Ausnahme davon stellt der östliche Rand des Schwarzwaldes dar. Hier treten gehäuft hohe Zunahmen der jährlichen Hochwasserabflüsse mit hohen Signifikanzen auf. Bei der Bewertung dieses Phänomens ist jedoch zu beachten, dass die Pegel dieser Einzugsgebiete alle über nur relativ kurze Zeitreihen verfügen; diese Zeitreihen enthalten nicht die Hochwasser-Ereignisse am Ende des 19. Jahrhunderts.

Das Verhalten der „langen“ Zeitreihen (Beginn 1932 und früher) unterscheidet sich wenig von dem der Reihe 1932-1998. Unterschiede gibt es an folgenden Pegeln (Abb. 9): Vilsbiburg/Grosse Vils (Reihe ab 1928), Gerbertshaus/Schussen (Reihe ab 1920) und Donauwörth/Donau (Reihe ab 1924). Diese Pegel weisen für die „langen“ Reihen signifikante Trends als „sehr wahrscheinlich“, für die Reihen ab 1932 jedoch nur als „wahrscheinlich“ aus.

Pegel Hundersingen/Donau

(Pegel-Nr. 120)

Jahresgänge MHQ(m) und Jahresmittel MHQ(J)

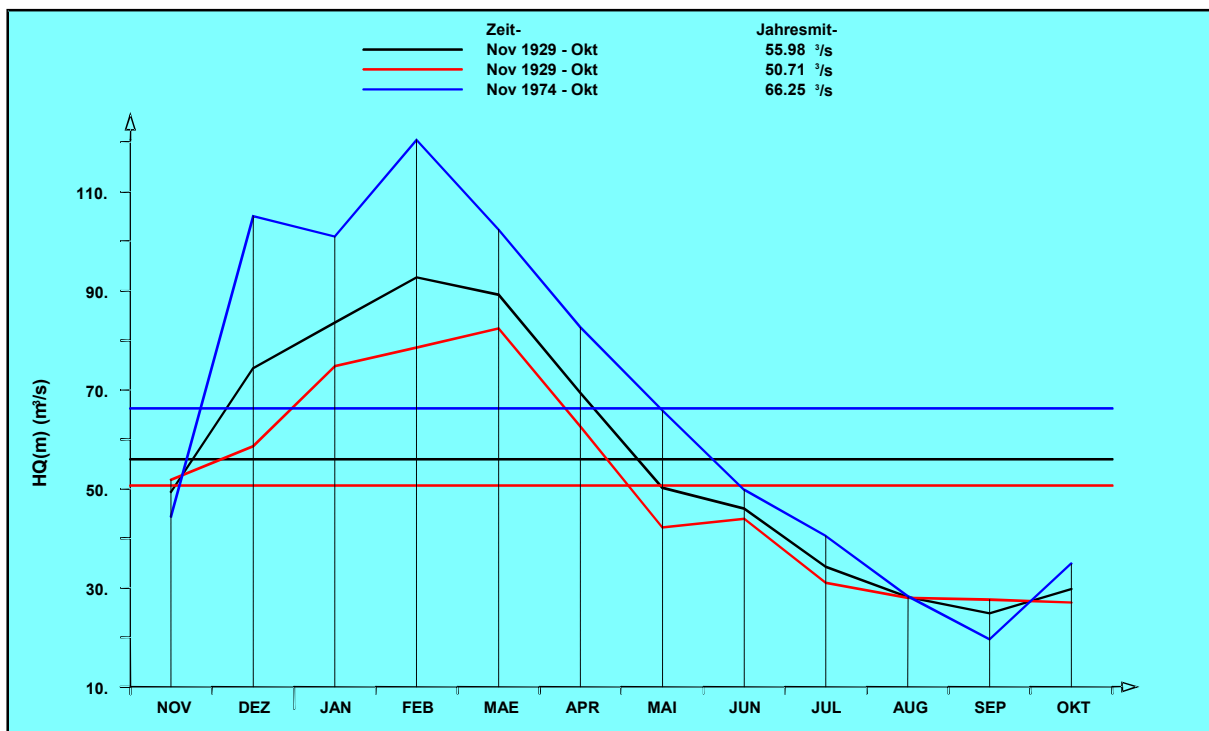


Abb.10: Ergebnisdarstellung Jahresgang

Um weitere langfristige Änderungen bei den Hochwasserabflüssen zu analysieren, wurde auch der mittlere Jahresgang der **monatlichen Höchstabflüsse** untersucht. Dafür standen ausgewählte Zeitreihen von insgesamt 52 Pegeln (30 BW, 22 BY) zur Verfügung. Dabei wurde der Jahresgang jeweils für folgende Perioden untersucht: die Mittelwerte der gesamten Zeitreihe (schwarz)

- die Mittelwerte der gesamten Zeitreihe (schwarz)
- die Mittelwerte der Reihe 1929-1974 (rot)
- die Mittelwerte der Reihe 1974-1998 (blau).

Das Jahr 1974 ergab sich aus der Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITNEY; sie ergab, dass bei vielen Pegeln in diesem Jahr der Bruchpunkt war. Für den in Abb. 10 dargestellten Pegel Hundersingen/Donau ist ersichtlich, dass vor dem Trennungsjahr 1974 die monatlichen Höchstabflüsse fast durchgängig niedriger sind als nach dem Trennungsjahr.

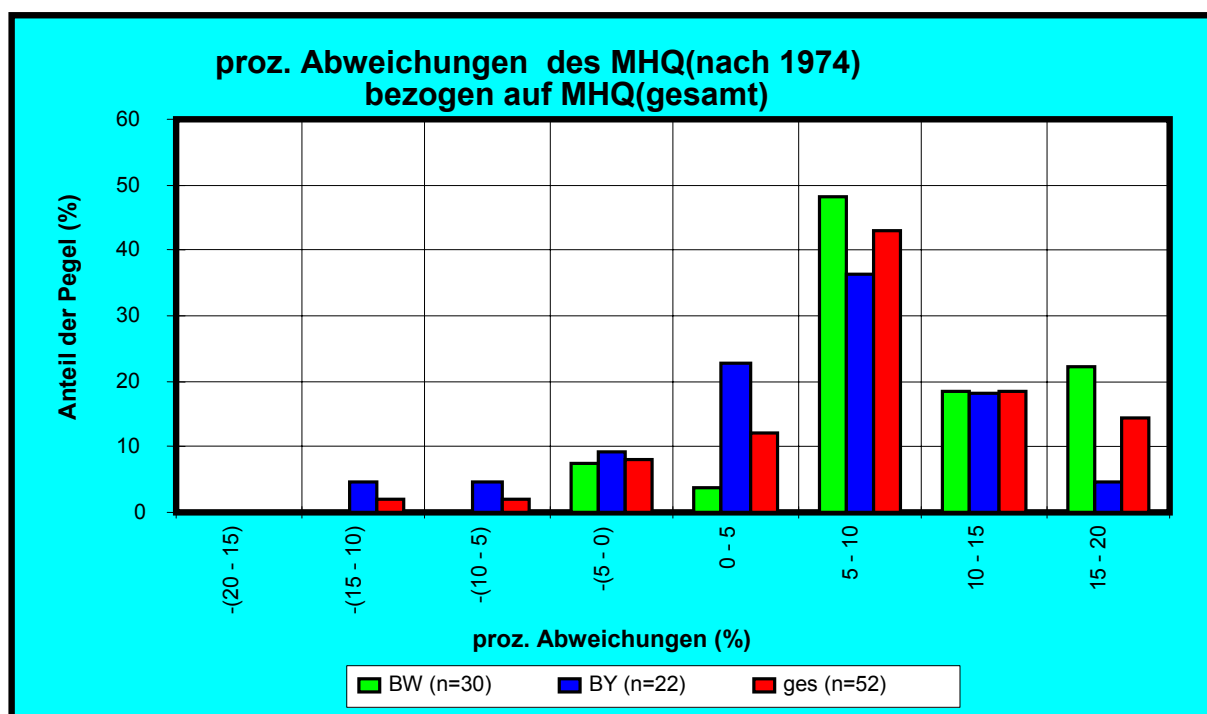
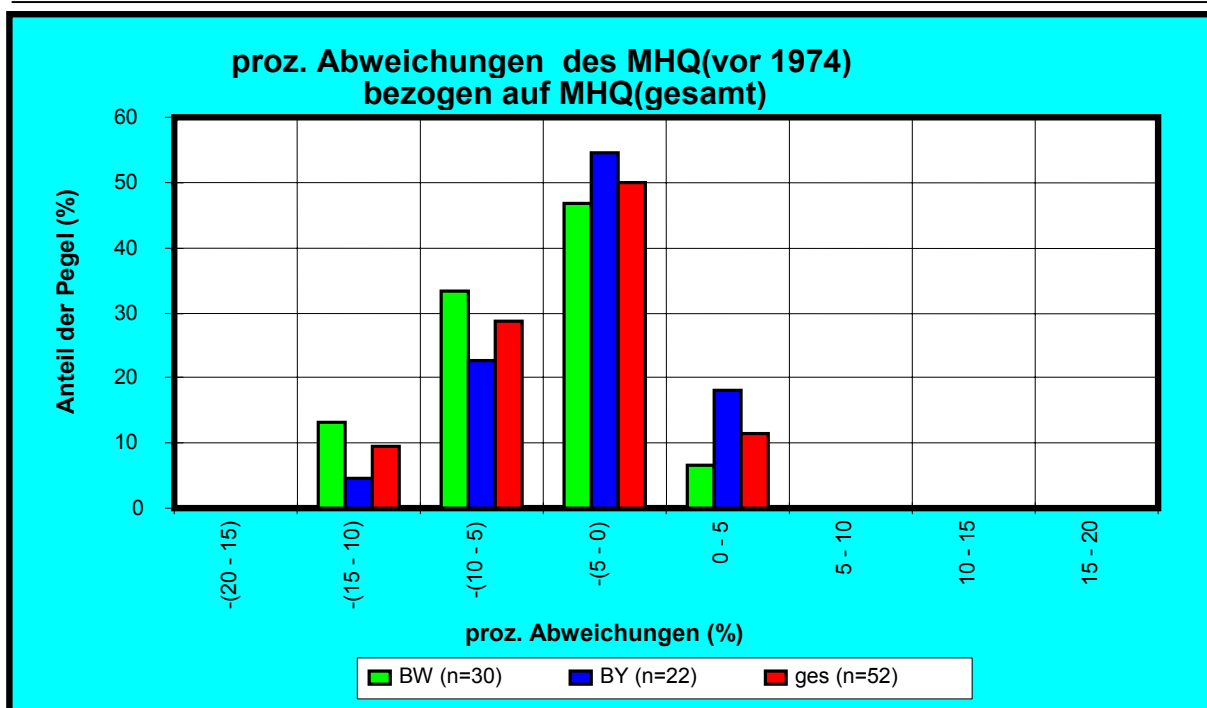


Abb.11: Prozentuale Verteilung der Pegel mit Abweichungen vom langjährigen MHQ vor und nach 1974

Abb. 11 zeigt die prozentualen Abweichungen von MHQ aller 52 untersuchten Pegel. Vor dem Trennungsjahr 1974 (oben) sind die prozentualen Abweichungen bei den meisten Pegeln kleiner als nach dem Trennungsjahr (unten). Die häufigsten Pegel (50 %) der Teilreihe „vor 1974“ liegen in der Klasse „- 5 bis 0“ [%], bei der Teilreihe „nach 1974“ liegen die häufigsten (42%) Pegel in der Klasse „+ 5 bis + 10“ [%]. Dies deutet auf eine Verschiebung hin. Die höheren Abflüsse treten in der Periode nach 1974 auf.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich folgendes feststellen:

- Die Tendaussage hängt sehr stark von der Länge der Zeitreihe ab.
- Der überwiegende Teil der Pegel weist keine oder nur eine schwache Trendsignifikanz auf. Eine Ausnahme davon sind einige Pegel am Ostrand des Schwarzwaldes mit einer Zunahme der jährlichen Hochwasser-Abflüsse.
- Signifikante Abnahmen der Hochwasser-Abflüsse gibt es hauptsächlich in BY.
- Lange Reihen weisen meist keine Trends auf, insbesondere, wenn Hochwasser, die Ende des 19. Jahrhunderts aufgetreten sind, in der Reihe enthalten sind.
- Bei sehr langen Reihen, für die bereits ab dem Hochwasser-Jahr 1882 Abflüsse vorliegen (6 Pegel), tritt nur am Pegel Heidelberg /Neckar ein signifikanter Trend für eine Zunahme (99 %, „Veränderungen wahrscheinlich“) auf. Die Ursache dafür könnte der Ausbau des Neckars sein.
- Der mittlere Jahresgang der monatlichen Höchstabflüsse hat sich bei den meisten Pegeln geändert. Der mittlere Hochwasserabfluss ist in der Zeit nach 1974 höher als in den früheren Jahren.

Generell lässt sich aufgrund der mit den gängigen statistischen Verfahren durchgeführten Untersuchungen ableiten, dass eine signifikante, flächendeckende Veränderung im Verhalten der jährlichen Höchstabflüsse bisher nicht eingetreten ist. Es besteht daher derzeit kein Anlass, die bisherigen Bemessungswerte für den Hochwasserschutz auf eine neue Basis zu stellen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass eine Änderung im jahreszeitlichen Verhalten der monatlichen Höchstabflüsse eingetreten ist: im Winterhalbjahr sind die Hochwasserabflüsse ab den 70er Jahren höher als in der Zeit davor.

Weitere Untersuchungen sollten zu einem späteren Zeitpunkt noch mit den erst in Entwicklung befindlichen Methoden der Fraktaltheorie folgen.

Die weiteren Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse müssen zusätzlich das Langzeitverhalten des Niederschlages einbeziehen. Weiterhin bleibt die Aufgabe, das künftige Verhalten der hochwasserrelevanten Kenngrößen im „Integrierten Messnetz KLIWA“ zu beobachten und auszuwerten, damit gegebenenfalls rechtzeitig Maßnahmen gegen mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung getroffen werden können.