



Trendanalyse für Abflusszeitreihen im Land Brandenburg

Datum: 02.09.21

Seite 1 von 20

Inhalt

1.	Konsistenz & Homogenität...	1
2.	Zeitreihenlänge...	2
3.	Datenbasis...	3
4.	Trendanalyse...	6
5.	Ergebnisse...	7
6.	Zusammenfassung...	18
7./8.	Abkürzungsverzeichnis / Literaturverzeichnis...	19/20

1. Konsistenz & Homogenität

Zur Beurteilung der langfristigen Entwicklung des Abflusses in Fließgewässern werden Abflusszeitreihen mittels einer Trendanalyse untersucht. Dafür müssen die Abflussdaten auf Konsistenz und Homogenität geprüft werden. Die Konsistenz einer Zeitreihe ist gegeben, „wenn sie nicht durch Fehler bei der Messung (Gerätedefekte, Wechsel des Messgerätes oder der Messmethodik, Stationsverlegung, Ablesefehler, Beobachterwechsel u.ä.) beeinflusst“ ist (DYCK 1979). Die Konsistenz der Datenreihe wird in der Regel durch den Betreiber sichergestellt. Inhomogenitäten treten in einer Zeitreihe durch Regimeänderungen des zu beobachtenden Gebietes auf. Dabei wären nach DYCK (1979) folgende zu nennen: „Naturkatastrophen (Windbruch, Flächenbrand, Hangrutschungen, Landsenkungen, Erdbeben usw.)“, „anthropogene Eingriffe (Melioration, Gewässerausbau, Speicherung, Wasserge- und verbrauch o.ä.)“ sowie „allmähliche Änderungen (z.B. Klimaänderungen)“. Für eine Betrachtung klimatischer Änderungen wäre demnach zunächst ein Ausschluss aller anderen Einflüsse vorzunehmen. Andere Autoren, wie SCHÖNWIESE (1992), RAPP (2000) und BLÜMEL (2001) hingegen definieren Inhomogenitäten als nicht stationäre Änderungen nicht meteorologischen Ursprungs. Werden daher Änderungen auf meteorologische Veränderungen zurückgeführt, sprechen die o.g. Autoren von einer homogenen Zeitreihe, die jedoch gleichzeitig nicht stationär, also instationär ist.

Eine strikte Trennung der Einflussfaktoren ist jedoch nicht immer eindeutig möglich oder die Ursachen sind nicht eindeutig identifizierbar, da ein komplexes System wie der Wasserhaushalt vielfältigen Prozessen und sich gegenseitig temporär bedingenden Einflussfaktoren unterliegt, wobei bestimmte Prozesse oft auch erst beim Überschreiten von Schwellenwerten (teils unumkehrbar) ausgelöst werden.

Die Untersuchung auf Homogenität kann mit stochastischen Tests (absolute und relative Homogenitätstest, letztere benutzen Referenzdatenreihen), systemtheoretisch oder auch in grafischer Form erfolgen. Nicht homogene Daten müssen aus der Zeitreihe entfernt oder korrigiert, d.h. homogenisiert werden. Problematisch sieht RAPP (2000) die Homogenisierung der Daten zum Zwecke einer Trendanalyse, „da hierbei lediglich die Informationen der homogenen Referenzreihe auf die zu homogenisierende übertragen und somit für die Berechnung eines Trendfeldes keine neue räumliche Information bereitgestellt wird.“

2. Zeitreihenlänge

Zur Beurteilung langfristiger Abflusstrends in einem Fließgewässer werden möglichst lange Abflusszeitreihen benötigt. RAPP (2000) führt auf, dass Trendbetrachtungen mit Zeitreihenlängen von weniger als 30 (Niederschlag) bzw. 20 Jahren (Lufttemperatur) nicht interpretierbar sind und vermieden werden sollten, da die Fluktuation der Trendwerte dann so stark ist, dass eine zeitliche Repräsentanz meist fehlschlägt. Daher verweist RAPP (2000) auf die von der WMO eingeführte CLINO-Periode von 30 Jahren als sinnvollen untersten Grenzwert. Der Arbeitskreis KLIWA (2002, 2003) empfiehlt für „statistisch zuverlässige Aussagen über das Trendverhalten“ mindestens 60 bis 70 Beobachtungsjahre des Durchflusses, da Untersuchungen zeigen, dass ab 80 Jahren nur noch eine geringe Variabilität der Trendergebnisse vorliegt. Beide Autoren sowie zahlreiche weitere Studien zeigen die starke Abhängigkeit des Trends von dem gewählten Analysezeitraum (HUXOL 2000, FABIG 2007, STAHL et al. 2010). FABIG (2007) sowie der Arbeitskreis KLIWA (2002, 2003) zeigen bei der Betrachtung von kürzeren Zeitfenstern eine Zunahme der Variabilität der Trendergebnisse bis hin zum Vorzeichenwechsel, die „eher zufällig zu bewerten und daher in der Regel nur wenig aussagekräftig sind“ (Arbeitskreis KLIWA 2003). Trendanalysen sollten sich daher auf möglichst lange Zeitreihen stützen.

3. Datenbasis

Auf die Eignung für eine Trendanalyse wurden zahlreiche Pegel in Brandenburg untersucht, als Kriterien wurden eine Reihenlänge von mindestens 60 Jahren, die bis ins Jahr 2020 beobachtet wurde und der Ausschluss von Inhomogenität verwendet.

Auf Grund der beschriebenen Komplexität eignen sich für eine Trendanalyse in Brandenburg folgende drei Pegel: Eisenhüttenstadt (Oder, Betreiber WSA Oder-Havel), Wittenberge (Elbe, Betreiber WSA Elbe) sowie Babelsberg (Babelsberg-Drewitz, Nuthe, Betreiber LfU, W12). Für die beiden Pegel der WSV liegt eine langjährige Abflussganglinie von 100 Jahren vor, für den Pegel Babelsberg eine 66-jährige Reihe.

Die kausale sowie grafische Betrachtung der Jahreswerte des mittleren Durchflusses für den Pegel **Eisenhüttenstadt** legen nahe, dass bei der Abflussreihe von einer homogenen Reihe ausgegangen werden kann.

HATZ et al. (2018) untersucht in einer großangelegten Studie die Homogenität von Hochwasserreihen u.a. des Pegels **Wittenberge**, da zum Beispiel durch die Errichtung mehrerer Talsperren bis zum Jahr 1968 komplexe anthropogene Veränderungen im Einzugsgebiet des Pegels stattfanden, die auf den Verlauf einer Hochwasserwelle nachweislich Einfluss nehmen. Eine kausale und grafische Untersuchung sowie eine Doppelsummenanalyse zeigen jedoch für den mittleren Durchfluss keine sichtbaren Auswirkungen dieser Inhomogenitäten zwischen 1921–2020. Es wird daher auch hier von einer homogenen Reihe für den mittleren Durchfluss ausgegangen.

Der Pegel **Babelsberg** hingegen zeigt zwischen 1954 und 2020 einen deutlichen Trend bei der Betrachtung des jährlichen mittleren Durchflusses. Auf Grund der Datenlage muss von einer inhomogenen oder nicht stationären Datenlage ausgegangen werden. Nähere Untersuchungen lassen jedoch keine inhomogene Wirkungskette erkennen. Bei einer Betrachtung der Grundwassermessstellen im Einzugsgebiet der Nuthe (und darüber hinaus) spiegeln diese ein ähnliches Verhalten wider, siehe **Abbildung 1**. Es zeigt sich, dass dieses Muster großflächig in Brandenburg auftritt. Des Weiteren wurde der Einfluss der Rieselfelder südlich Berlins auf den Pegel Babelsberg analysiert. Die Rieselfelder wurden seit dem Ende des 19. Jahrhunderts bis 1994 mit unterschiedlicher Intensität genutzt, besonders

intensiv in den 80-iger Jahren, ab 1989 wurden die Beaufschlagungsmengen stark zurückgefahren (TRÖGER et al. 1995). Die Rieselfelder führten zu einer Grundwasseranreicherung im Bereich des Pegels Babelsberg, daher musste dieser als instationär beeinflusst ausgeschlossen werden. Um den möglichen Einfluss der Rieselfelder abschätzen zu können, wurde der 34 km oberhalb liegende Pegel Woltersdorf II (Hammerfließ, Betreiber LfU, W12) untersucht, dieser liegt außerhalb des Einflussbereiches der Rieselfelder. **Abbildung 2** zeigt eine Gegenüberstellung der Entwicklung des Abflussverhaltens für beide Pegel für die Sommer- und Winterhalbjahre ab 1968, der frühesten Datenaufzeichnung am Pegel Woltersdorf II. An beiden Pegeln spiegelt sich eine ähnliche Entwicklung des Abflusses wider. Damit kann die Einstellung der Rieselfelder als alleinige Ursache für die Trendentwicklung in der Abflussganglinie des Pegels Babelsberg ausgeschlossen werden. Darüber hinaus war Ende der Achtziger Jahre im ehemaligen Bezirk Potsdam in Bezug auf Gewässerausbau (Ziel: schadlose Abführung von Hochwässern) und Entwässerung von Niederungsflächen durch ein System von Dränagen, Gräben und Schöpfwerken (Ziel: Nutzbarmachung von im Frühjahr vernässten Flächen für die maschinelle Landwirtschaft) ein Höchstmaß erreicht worden. Ob dies die Bruchpunkte in den Zeitreihen Woltersdorf II und Babelsberg mit verursacht haben könnte, wurde nicht untersucht. Die Datenreihe des Mittleren Abflusses des Pegel Babelsberg (1954–2020) wird für eine Trendanalyse als homogen und instationär eingestuft.

Es erfolgt daher eine erste Trendanalyse mit einer längeren Datenreihe für die hydrologischen Jahre von 1921–2020 für die Pegel Eisenhüttenstadt und Wittenberge. Eine zweite kürzere Trendanalyse erfolgt für die Pegel Babelsberg, Eisenhüttenstadt und Wittenberge für die hydrologischen Jahre 1955 – 2020, um einen einheitlichen Vergleichszeitraum zu betrachten. Die räumliche Lage der Pegel Eisenhüttenstadt, Wittenberge sowie Babelsberg ist in **Abbildung 3** dargestellt.

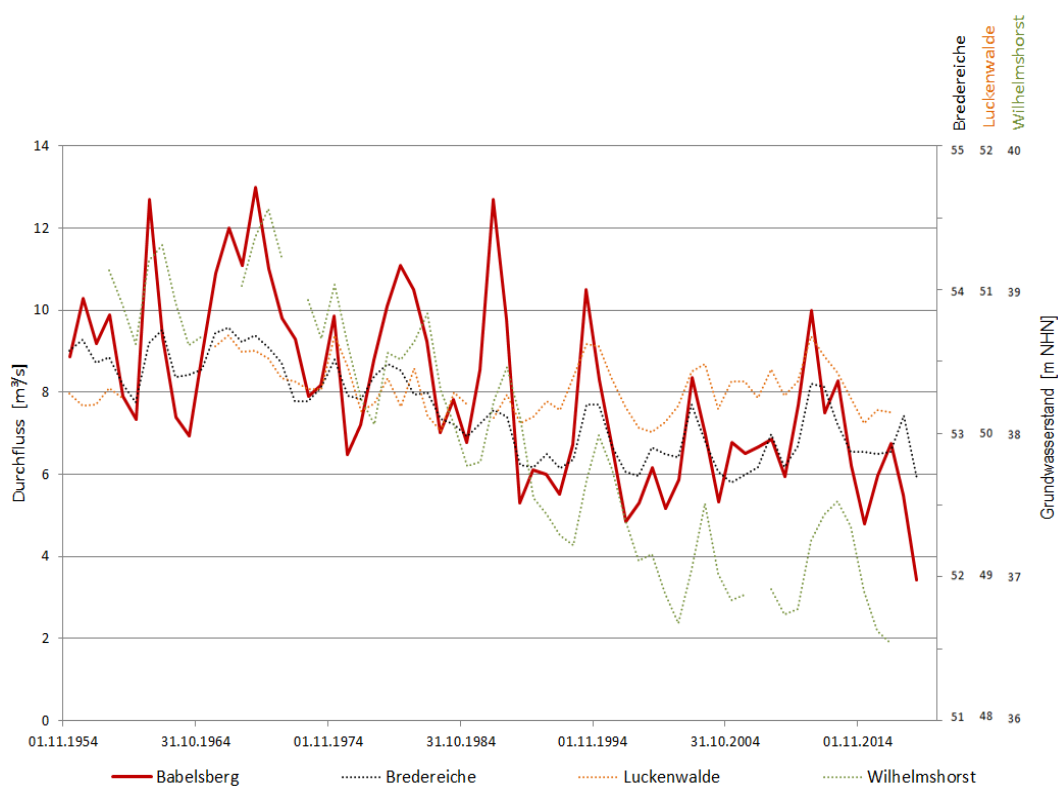


Abbildung 1: Dargestellt ist der jährliche mittlere Durchfluss am Pegel Babelsberg im Vergleich zur Entwicklung der Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes an den Messstellen Wilhelmshorst (MKZ 36441980) und Luckenwalde Stadtbad (MKZ 39441178), jeweils im Einzugsgebiet der Nuthe sowie die Messstelle Bredereiche (MKZ 28453495) im Norden von Brandenburg liegend. Die Abbildung zeigt den für Brandenburg typischen Zusammenhang zwischen der Füllung des Grundwasserleiters und den mittleren Abflüssen, stellt darüber hinaus jedoch keine statistischen Korrelations- oder Zusammenhänge dar.

	Babelsberg	Woltersdorf II	Erläuterungen
Winterhalbjahr			Hier dargestellt ist die Abflussentwicklung am Pegel Babelsberg und Woltersdorf II. Zu sehen ist eine ähnliche abfallende Tendenz der mittleren Abflussspende (Mq) für die Winterhalbjahre, wobei es am Pegel Woltersdorf II zu einer höheren Abnahme des Abflusses kommt.
WHJ CUMSUM - Analyse			Hier dargestellt ist die Änderung der Steigung der kumulativen Summe des Abflusses mittels des CUMSUM-Verfahrens nach ZEILEIS et al. 2002. Beide Pegel überschreiten circa zeitgleich 1980/1981 die Signifikanzgrenze (rot dargestellt). Zu diesem Zeitpunkt kommt es zu einer signifikanten Änderung der Steigung der kumulativen Summe des Abflusses, einem sogenannten Bruchpunkt.
Sommerhalbjahr			Hier dargestellt ist die Abflussentwicklung am Pegel Babelsberg und Woltersdorf II. Zu sehen ist ein ähnliches Verhalten der mittleren Abflussspende (Mq) für die Sommerhalbjahre, wobei es am Pegel Woltersdorf II zu einer höheren Abnahme des Abflusses kommt, die jedoch insgesamt geringer ausfällt, als in den Wintermonaten.
HJ CUMSUM - Analyse			Das CUMSUM-Verfahren für die Sommerhalbjahre zeigt ebenfalls ab circa 1978/79 eine Überschreitung der Signifikanzgrenze (rot dargestellt). Damit kommt es circa zeitgleich an beiden Pegeln zu einer abfallenden Tendenz des Abflusses.

Abbildung 2: Gegenüberstellung der Abflussentwicklung am Pegel Babelsberg und Woltersdorf II. Der Pegel Babelsberg unterliegt dem Einfluss der Rieselfelder südlich Berlins, der Pegel Woltersdorf II jedoch nicht, Woltersdorf II befindet sich ca. 34 km stromaufwärts des Pegel Babelsbergs. Die relativ hohen Abflussspenden am Pegel Woltersdorf II kommen u.a. durch das um circa 100 km² größere unterirdische EZG im Vergleich zum oberirdischen EZG zustande (GISACH diverse Jahre). Das CUMSUM-Verfahren sowie weitere Abkürzungen in der Darstellung der Abflussganglinien werden im folgenden Kapitel 4. der Trendanalyse ausführlich erläutert.

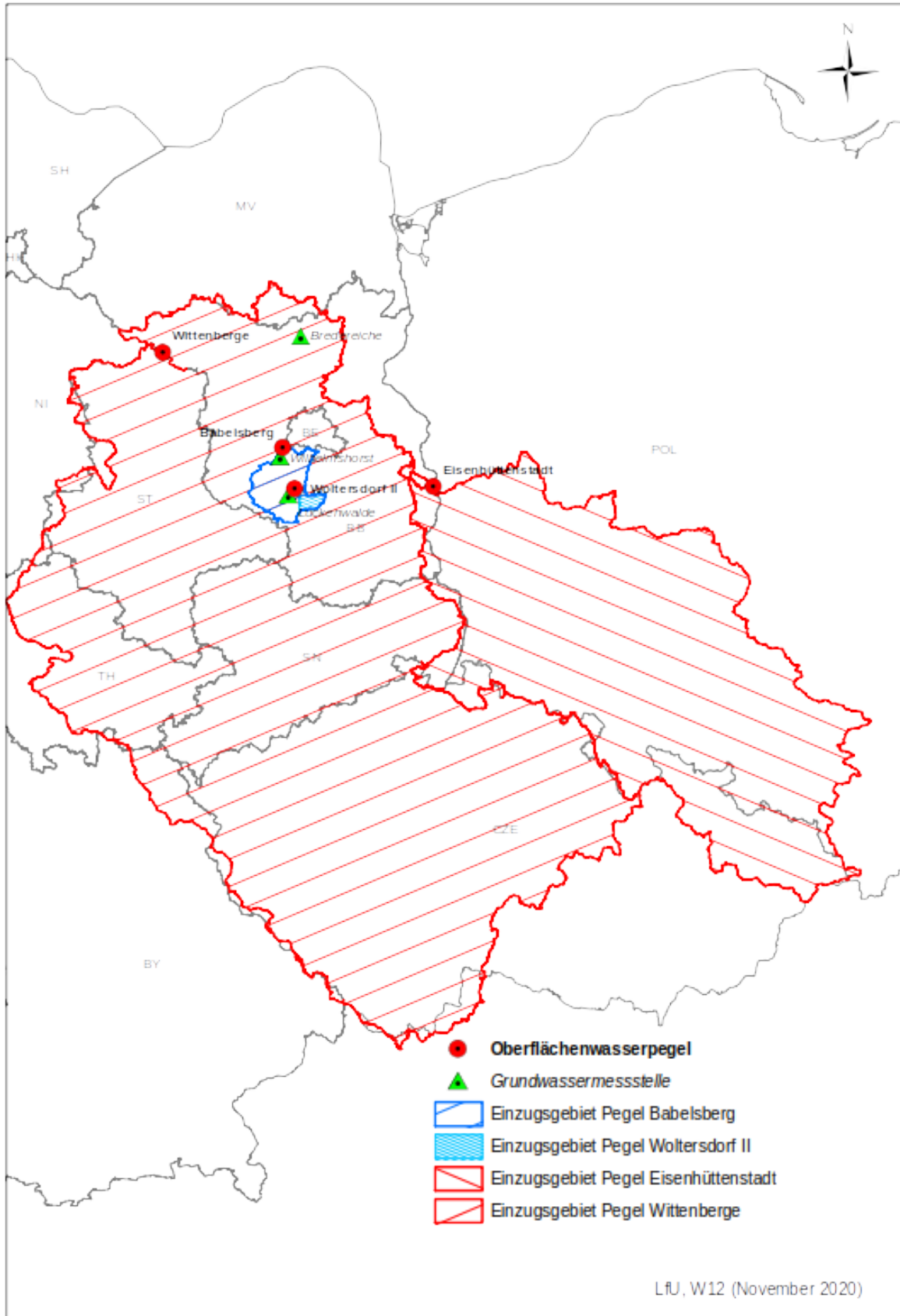


Abbildung 3: Die Karte zeigt zum einen die Lage der Oberflächenwasserpegel Wittenberge, Eisenhüttenstadt, Babelsberg und Woltersdorf II sowie die dazugehörigen Einzugsgebiete. Außerdem sind die Grundwassermessstellen Bredereiche, Wilhelmshorst und Luckenwalde dargestellt.

4. Trendanalyse

Zur Betrachtung von Trends steht eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung. Hier wird zur Untersuchung des Trendverhaltens die Berechnung eines linearen Trends angewandt. Dieser erlaubt in seinem Ergebnis eine quantifizierte Aussage über die Änderung des Abflussverhaltens in einem Untersuchungszeitraum. Die lineare Regression findet in der Klimabetrachtung oft Anwendung, jedoch zeigt erst ein anschließender Signifikanztest, ob der ermittelte Trend eine „Qualität“ hat, das heißt eine gewisse Signifikanz vorliegt. RAPP (2000) unterstreicht deren Bedeutung: „Es muss eine zusätzliche Aussage getroffen werden, wie „streng“ beziehungsweise wie „sicher“ er [der Trend] ist, also wie deutlich er sich gegenüber der Zeitreihenvariabilität heraushebt. Die Bewertung eines Trends wird durch diese qualifizierende Information erst möglich.“

Zum Einsatz kommt hier der **Mann-Kendall-Trendtest**. Dieser Test wurde für Niederschlagsdaten entwickelt und wird oft in der Hydrologie angewandt. Voraussetzung für die Durchführung des Testes sind nicht autokorrelierte, voneinander unabhängige, Daten. Dies bedeutet, dass die Korrelation einer Datenreihe mit sich selbst zu einem früheren Zeitpunkt (lag-Distance) nicht gegeben ist. Diese Voraussetzung wird an den Pegeln Eisenhüttenstadt und Wittenberge erfüllt. Das Ergebnis ist jeweils in **Abbildung 4** dargestellt. Die Abflussdaten des Pegels Babelsberg sind jedoch, wie oft in der Hydrologie, autokorreliert, hier findet daher ein angepasster Mann-Kendall-Trendtest mit erweiterter Varianz (zur Schätzung der Autokorrelation) nach HAMED & RAO (1998) statt. Der angepasste Mann-Kendall-Trendtest nach HAMED & RAO (1998) berechnet für den Pegel Babelsberg einen korrigierten $p\text{-value}_{\text{Korr}}$.

Im Ergebnis des Testes erhalten wir Größen, die eine Einordnung der Trendanalyse wie folgt erlauben:

		$p\text{-value}/p\text{-value}_{\text{Korr}} > 0,2$	nicht signifikant
0,2	\leq	$p\text{-value}/p\text{-value}_{\text{Korr}} \geq 0,1$	schwach signifikant
0,1	\leq	$p\text{-value}/p\text{-value}_{\text{Korr}} \geq 0,01$	signifikant
		$p\text{-value}/p\text{-value}_{\text{Korr}} < 0,01$	hoch signifikant

Tabelle 1: Zuordnung der Signifikanz zu den Testgrößen des Mann-Kendall-Tests nach RAPP 2000 und FABIG 2007

Der Mann-Kendall-Test hat weiterhin den Vorteil, dass die Daten nicht normalverteilt sein müssen. Da Durchflussdaten meist keiner Normalverteilung unterliegen, wie **Abbildung 5** zeigt, eignet er sich für unsere Anwendung. (FABIG 2007)

Um die zeitliche Identifikation eines Sprunges oder Bruchpunktes in einem vorhandenen Trend darzustellen bzw. zu ermitteln, gibt es verschiedene Methoden. Hier wird das **CUMSUM-Verfahren** nach ZEILEIS et al. 2002 angewandt. Dies ist eine Analyseverfahren zur Entdeckung von Änderungen in einer Zeitreihe, dabei wird die Änderung der Steigung der kumulativen Summe des Abflusses dargestellt. Änderungen außerhalb eines Grenzniveaus gelten als signifikant, diese Grenzen sind in **Abbildung 6** jeweils rot dargestellt. Auf der Zeitachse lässt sich das Jahr der Änderung ablesen.

Abbildung 7 zeigt die mittleren halbjährlichen Abflusspenden (Mq) eines Pegels, getrennt dargestellt für die hydrologischen Wintermonate (November – April) und Sommermonate (Mai – Oktober), um eventuell unterschiedliche Tendenzen bei einer jährlichen Gesamtbetrachtung nicht zu übersehen oder sogar zu eliminieren. Die Abbildung 7 zeigt weiter die mittlere halbjährliche Abflusspende von dem oberen 90 % Quantil des Durchflusses q_{90} (90% des Durchflusses liegen unterhalb dieser Linie) und dem unterem 10 % Quantil q_{10} (10% des Durchflusses liegen unterhalb dieser Linie). Weiterhin ist in

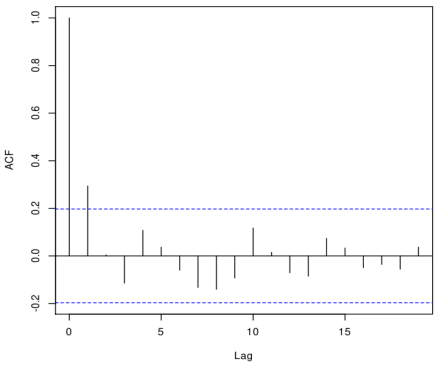
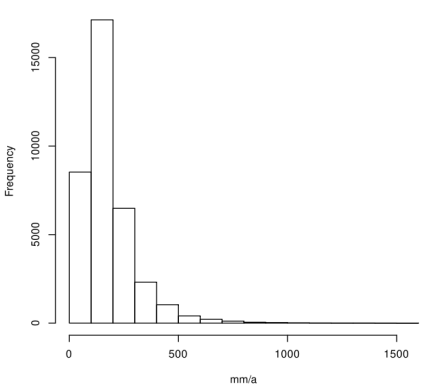
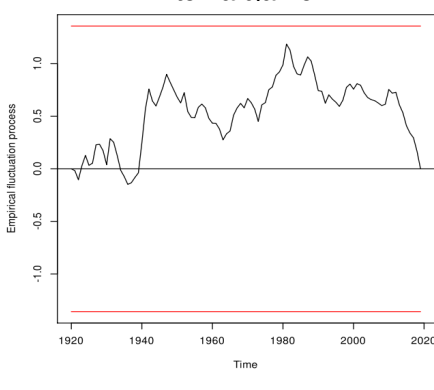
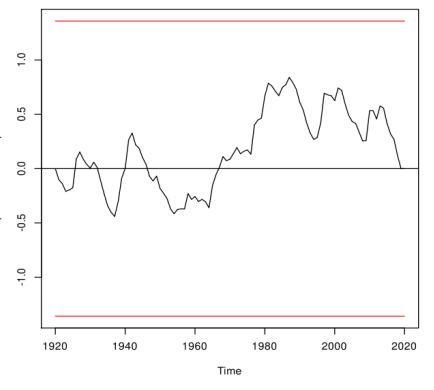
der Abbildung 7 jeweils die blaue Regressionsgerade der linearen Trendfunktion eingetragen, aus welcher sich die Änderung des Durchflusses in Millimeter pro Jahr berechnen lässt – unabhängig von dessen Signifikanz. Als weitere Linie wird die **Lowessfunktion** (LOWESS locally weighted regression nach CLEVELAND 1979) rot dargestellt, diese nicht lineare Linie ist ein Glättungsverfahren mit einer lokal gewichteten Regressionsfunktion nach der Methode der kleinsten Quadrate. Hier wird der mittlere Abfluss durch eine nicht lineare Funktion angenähert. So können nicht lineare Änderungen besser erfasst werden.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden auf folgenden Seiten detailliert dargestellt und sind in **Tabelle 2** (Kapitel 6) zusammengefasst. Die Abbildungen 4 bis 7 wiederholen sich jeweils für die einzelnen Pegel.

Pegel Eisenhüttenstadt – Oder (1921–2020)

Betreiber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Eberswalde

	<p>Abbildung 4: Dargestellt ist die Autokorrelation des Pegels Eisenhüttenstadt. Auf der Zeitachse wird die zeitliche Verschiebung der Zeitreihe abgebildet, auf der y-Achse die Kennwerte der Autokorrelation ACF = Auto Correlation Function; innerhalb der gestrichelten Linien findet keine signifikante Autokorrelation der Daten statt. Die Daten sind daher durch ihre unabhängigen Ereignisse für den Mann-Kendall-Test geeignet.</p>
	<p>Abbildung 5: Dargestellt ist das Histogramm der Daten des Pegels Eisenhüttenstadt. Die Verteilung der Daten zeigt, dass es sich nicht um normalverteilte Daten handelt.</p>
<p style="text-align: center;">Winterhalbjahre</p> 	<p>Abbildung 6: Dargestellt sind die Ergebnisse der CUMSUM-Analyse für die Winterhalbjahre und die Sommerhalbjahre. Dabei geben die roten Geraden die Signifikanzgrenzen für eine signifikante Änderung des Anstiegs an. Innerhalb der Grenzen handelt es sich nicht um einen signifikanten Bruchpunkt in der Analyse.</p>
<p style="text-align: center;">Sommerhalbjahre</p> 	<p>Sowohl in der Analyse der Winter- als auch der Sommerhalbjahre kommt es zu keinem signifikanten Bruchpunkt in der Trendanalyse der mittleren halbjährlichen Abflüsse für den Pegel Eisenhüttenstadt im betrachteten Zeitraum, d.h. eine Änderung kann statistisch als zufällig betrachtet werden.</p>

Pegel Eisenhüttenstadt – Oder (1921–2020)

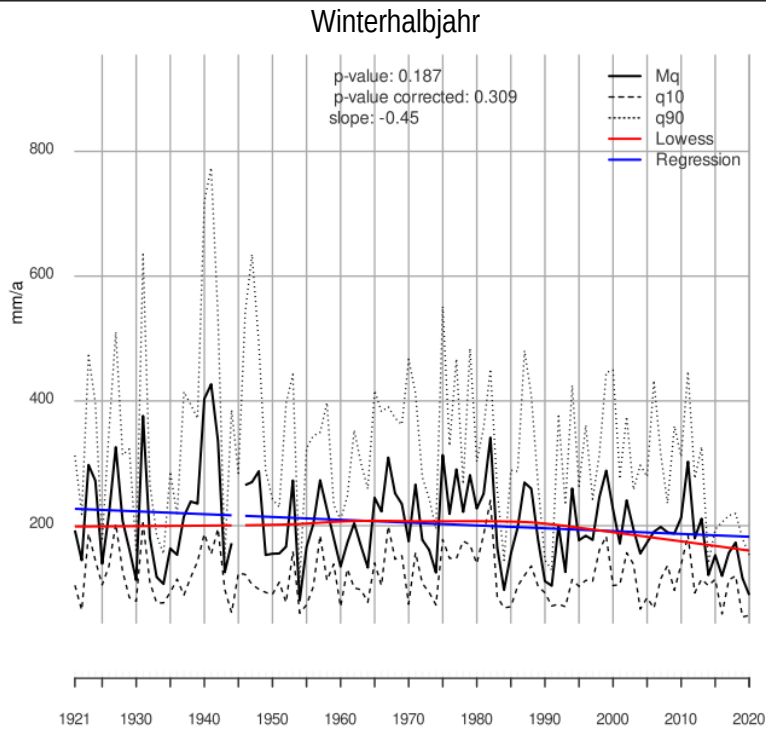


Abbildung 7a:

Dargestellt wird hier die Abflussspende (Mq) für die Winterhalbjahre am Pegel Eisenhüttenstadt. Die gestrichelte bzw. gepunktete Linie q10 und q90 stellt das 90 % Quantil bzw. das 10 % Quantil des Durchflusses dar. Die lineare Regressionsgerade (blau) zeigt eine **schwach signifikante** (p-value: 0,187) Abnahme des jährlichen Abflusses von 0,45 mm (slope) pro Jahr.

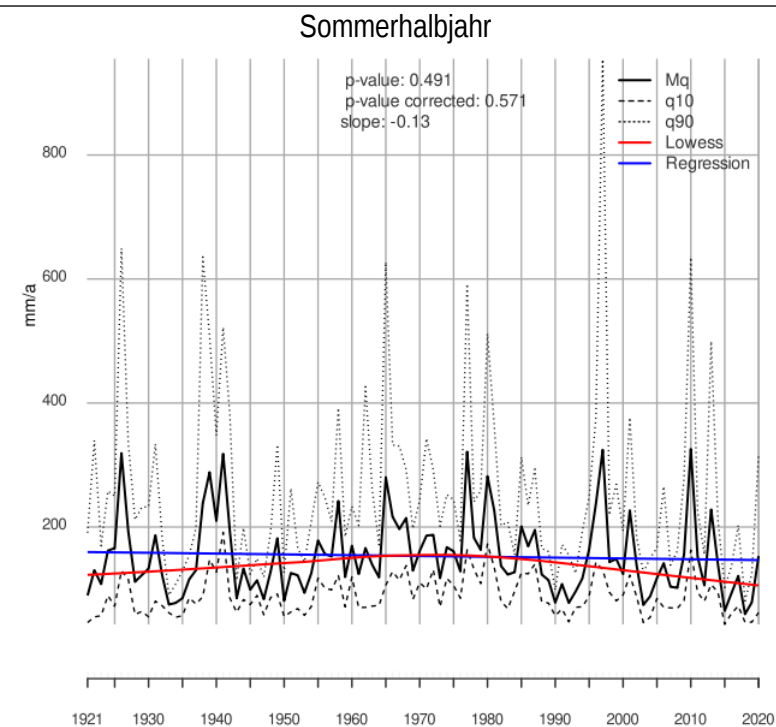
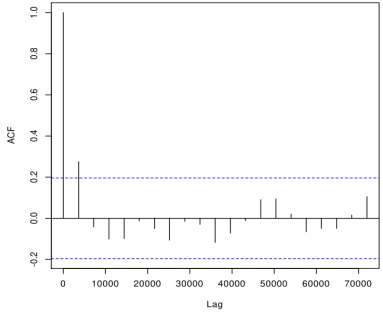
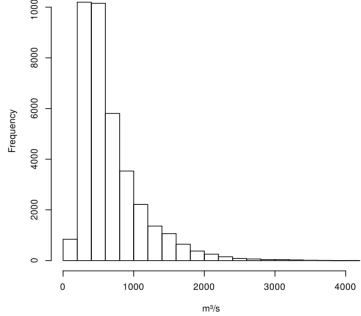
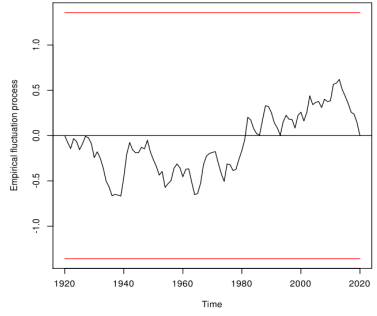
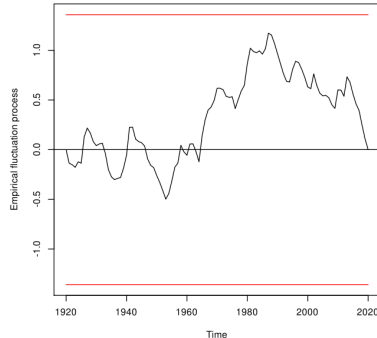


Abbildung 7b:

Die Entwicklung der mittleren Abflussspende (Mq) für die Sommermonate unterliegt einer ähnlichen Entwicklung, nimmt jedoch weniger stark ab. Dies zeigt auch die blaue Regressionsgerade. Der p-value (0,491) liegt hier über 0,2 und ist damit **nicht signifikant**. Die jährliche Abnahme des Abflusses beträgt 0,13 mm (slope) pro Jahr. Die rote, nicht lineare LOWESS-Funktion zeigt zwischen 1921 und 2019 eine Parabelfunktion, mit einem deutlichen Extrempunkt der höchsten Abflüsse in den 70-er Jahren.

Pegel Wittenberge – Elbe (1921–2020)

Betreiber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe

	<p>Abbildung 4: Dargestellt ist die Autokorrelation des Pegels Wittenberge. Auf der Zeitachse wird die zeitliche Verschiebung der Zeitreihe abgebildet, auf der y-Achse der Kennwerte der Autokorrelation ACF = Auto Correlation Function; innerhalb der gestrichelten Linien findet keine signifikante Autokorrelation der Daten statt. Die Daten sind daher durch ihre unabhängigen Ereignisse für den Mann-Kendall-Test geeignet.</p>
	<p>Abbildung 5: Dargestellt ist das Histogramm der Pegeldaten des Pegels Wittenberge. Die Verteilung der Daten zeigt, dass es sich nicht um normalverteilte Daten handelt.</p>
<p style="text-align: center;">Winterhalbjahre</p> 	<p>Abbildung 6: Dargestellt sind die Ergebnisse der CUMSUM-Analyse für die Winterhalbjahre und die Sommerhalbjahre. Dabei geben die roten Geraden die Signifikanzgrenzen für eine signifikante Änderung des Anstiegs an. Innerhalb der Grenzen handelt es sich nicht um einen signifikanten Bruchpunkt in der Analyse.</p>
<p style="text-align: center;">Sommerhalbjahre</p> 	<p>Sowohl in der Analyse der Winter- als auch der Sommerhalbjahre kommt es zu keinem signifikanten Bruchpunkt in der Trendanalyse der mittleren halbjährlichen Abflüsse für den Pegel Eisenhüttenstadt in dem dargestellten Zeitraum, d.h. eine Änderung kann statistisch als zufällig betrachtet werden.</p>

Pegel Wittenberge – Elbe (1921–2020)

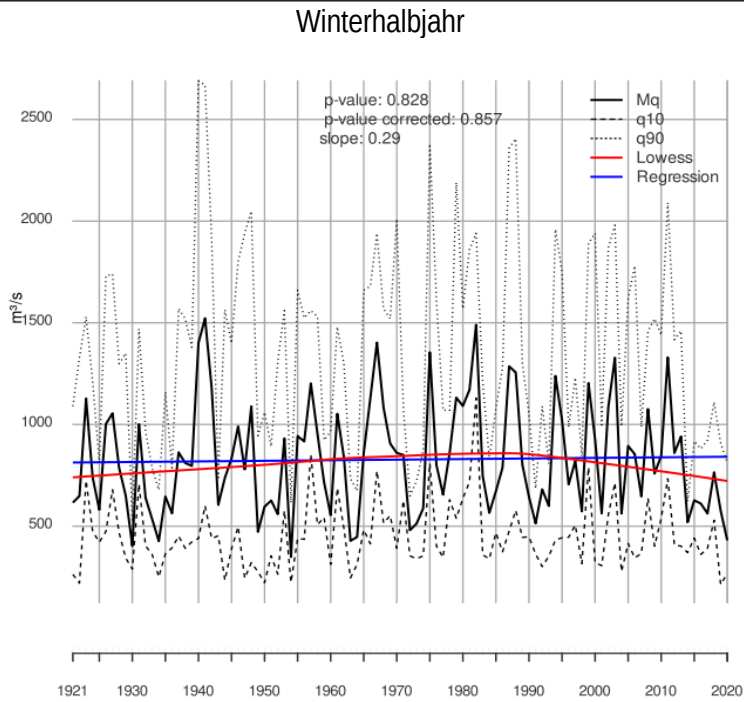


Abbildung 7a:

Dargestellt wird hier die mittlere Abflussspende (Mq) für die Winterhalbjahre am Pegel Wittenberge. Die lineare Regressionsgerade zeigt eine **nicht signifikante** (p-value: 0,828) Zunahme des jährlichen Abflusses von 0,29 mm (slope) pro Jahr.

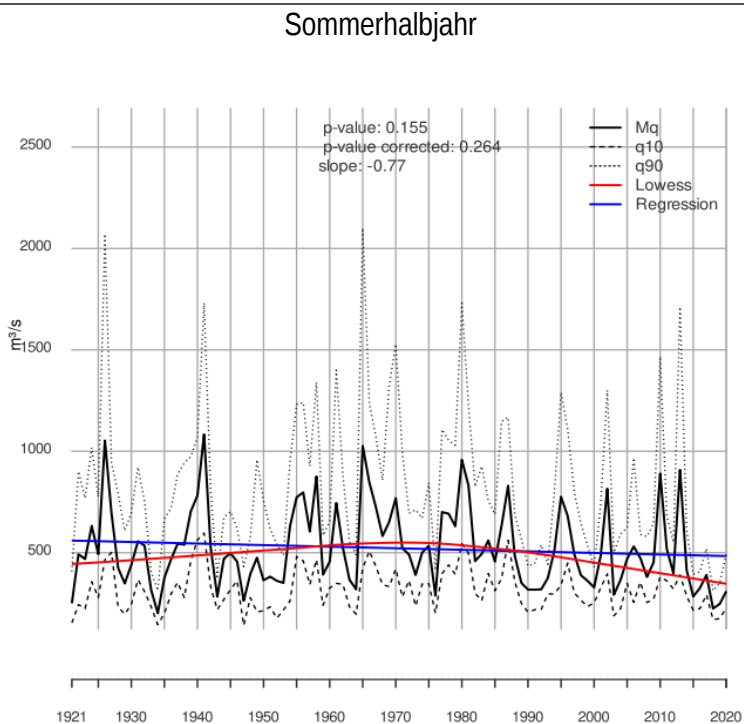
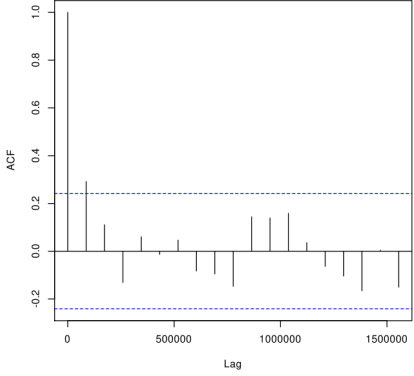
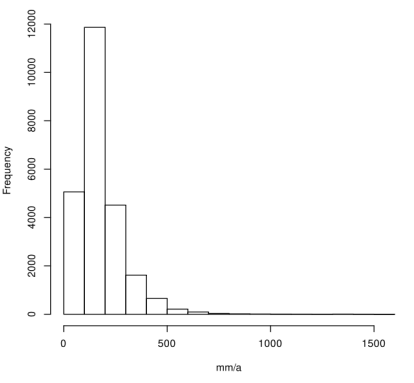
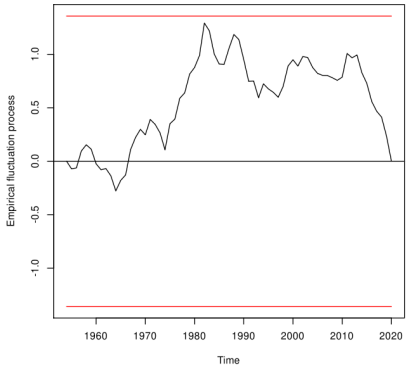
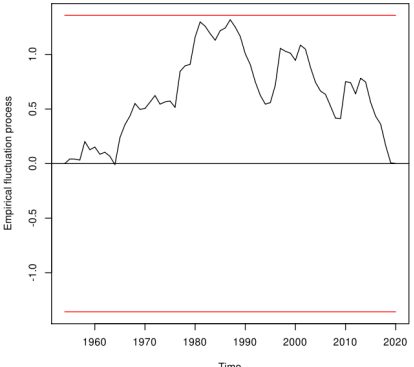


Abbildung 7b:

Die Entwicklung für die Sommermonate wird als **schwach signifikante** Abnahme des mittleren Abflusses eingestuft, mit einem p-value von 0,155 beträgt die Abnahme pro Jahr 0,77 mm. Die rote, nicht lineare LOWESS-Funktion zeigt auch hier zwischen 1921 und 2020 eine Parabelfunktion, mit den höchsten Abflüssen in den 70-er Jahre.

Pegel Eisenhüttenstadt – Oder (1955–2020)

Betreiber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Oder-Havel

	<p>Abbildung 4: Dargestellt ist die Autokorrelation des Pegels Eisenhüttenstadt. Auf der Zeitachse wird die zeitliche Verschiebung der Zeitreihe abgebildet, auf der y-Achse die Kennwerte der Autokorrelation ACF = Auto Correlation Function; innerhalb der gestrichelten Linien findet keine signifikante Autokorrelation der Daten statt. Die Daten sind daher durch ihre unabhängigen Ereignisse für den Mann- Kendall-Test geeignet</p>
	<p>Abbildung 5: Dargestellt ist das Histogramm der Pegelabflüsse des Pegels Eisenhüttenstadt. Die Verteilung der Daten zeigt, dass es sich nicht um normalverteilte Daten handelt.</p>
<p style="text-align: center;">Winterhalbjahre</p> 	<p>Abbildung 6: Dargestellt sind die Ergebnisse der CUMSUM-Analyse für die Winterhalbjahre und die Sommerhalbjahre. Dabei geben die roten Geraden die Signifikanzgrenze für eine signifikante Änderung des Anstiegs an. Innerhalb der Grenzen handelt es sich nicht um einen signifikanten Bruchpunkt in der Analyse.</p>
<p style="text-align: center;">Sommerhalbjahre</p> 	<p>Sowohl in der Analyse der Winter- als auch der Sommerhalbjahre kommt es für den kurzen Trendanalysezeitraum von 1955–2020 zu keinem signifikanten Bruchpunkt in der Trendanalyse der mittleren halbjährlichen Abflüsse für den Pegel Eisenhüttenstadt in dem dargestellten Zeitraum, d.h. eine Änderung kann statistisch als zufällig betrachtet werden.</p>

Pegel Eisenhüttenstadt - Oder (1955–2020)

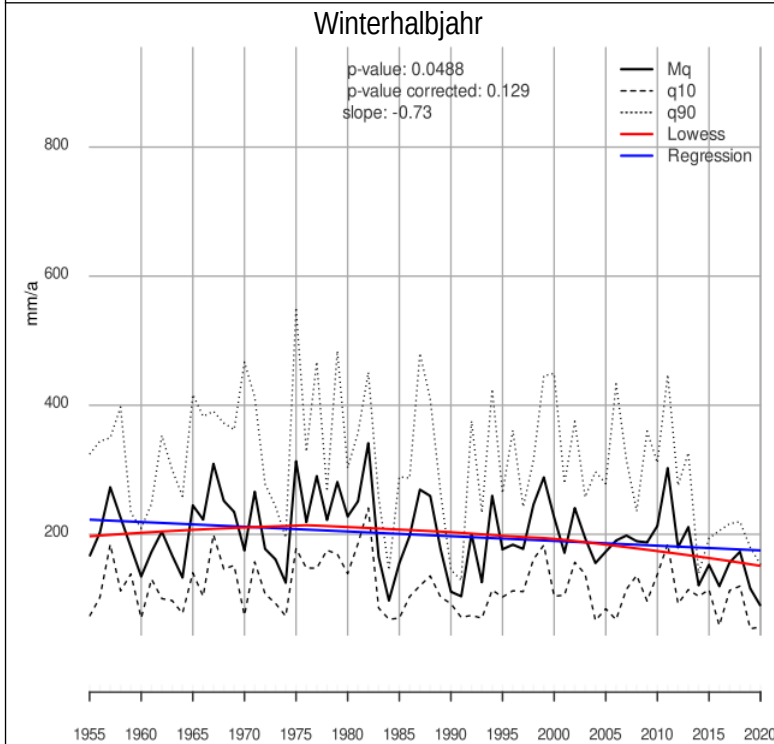


Abbildung 7a:

Dargestellt wird hier die Abflussspende (Mq) für die Winterhalbjahre am Pegel Eisenhüttenstadt für den kurzen Trendanalysezeitraum von 1955–2020. Die gestrichelte bzw. gepunktete Linie q10 und q90 stellt das 90 % Quantil bzw. das 10 % Quantil des Durchflusses dar. Die lineare Regressionsgerade (blau) zeigt eine **wahrscheinlich signifikante** (p-value: 0,0448) Abnahme des jährlichen Abflusses von 0,73 mm (slope) pro Jahr.

Die längerfristige Trendanalyse von 1921–2020 zeigt eine schwach signifikante Änderung mit einem p-value von 0,187.

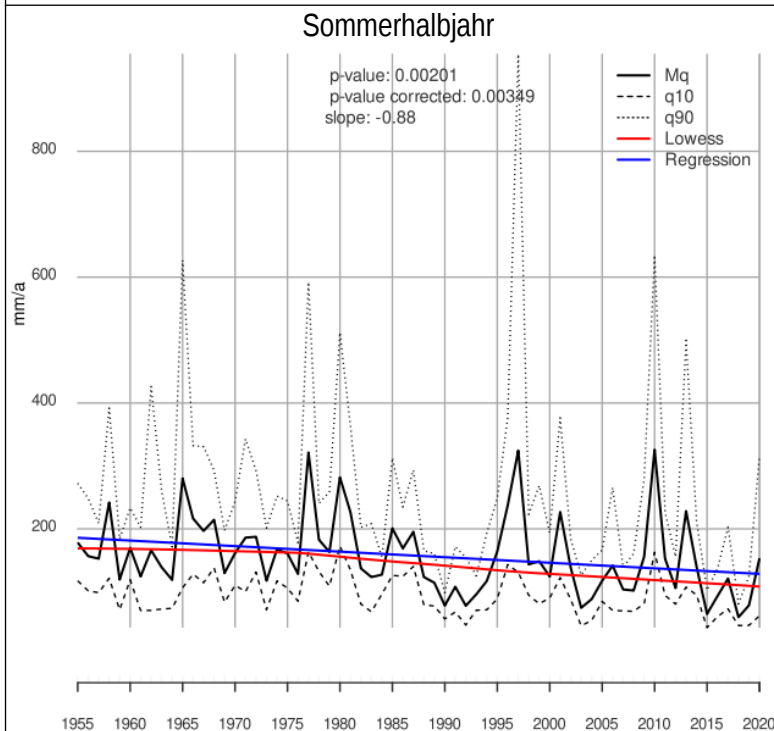
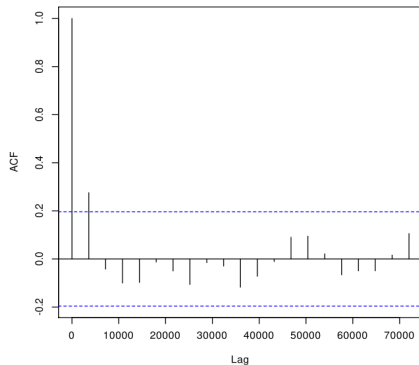


Abbildung 7b:

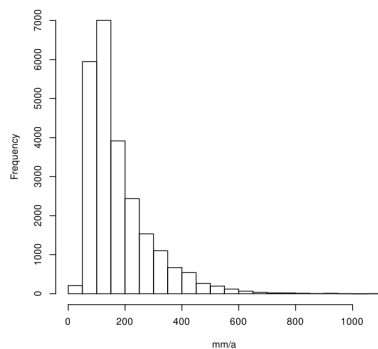
Die Entwicklung der mittleren Abflussspende (Mq) für die Sommermonate unterliegt einer stärkeren Tendenz. Dies zeigt auch die blaue Regressionsgerade. Der p-value liegt hier bei 0,00201 und ist damit **hoch signifikant**. Die jährliche Abnahme des Abflusses beträgt 0,88 mm (slope) pro Jahr. Die längerfristige Trendanalyse von 1921–2020 zeigt eine nicht signifikante Änderung mit einem p-value von 0,491.

Pegel Wittenberge - Elbe (1955–2020)

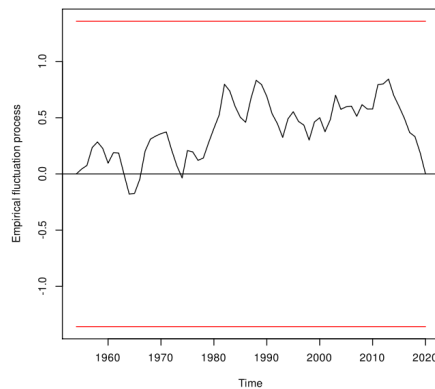
Betreiber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe

**Abbildung 4:**

Dargestellt ist die Autokorrelation des Pegels Wittenberge. Auf der Zeitachse wird die zeitliche Verschiebung der Zeitreihe abgebildet, auf der y-Achse die Kennwerte der Autokorrelation ACF = Auto Correlation Function; innerhalb der gestrichelten Linien findet keine signifikante Autokorrelation der Daten statt. Die Daten sind daher durch ihre unabhängigen Ereignisse für den Mann-Kendall-Test geeignet.

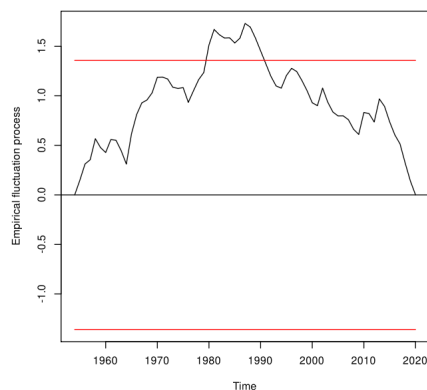
**Abbildung 5:**

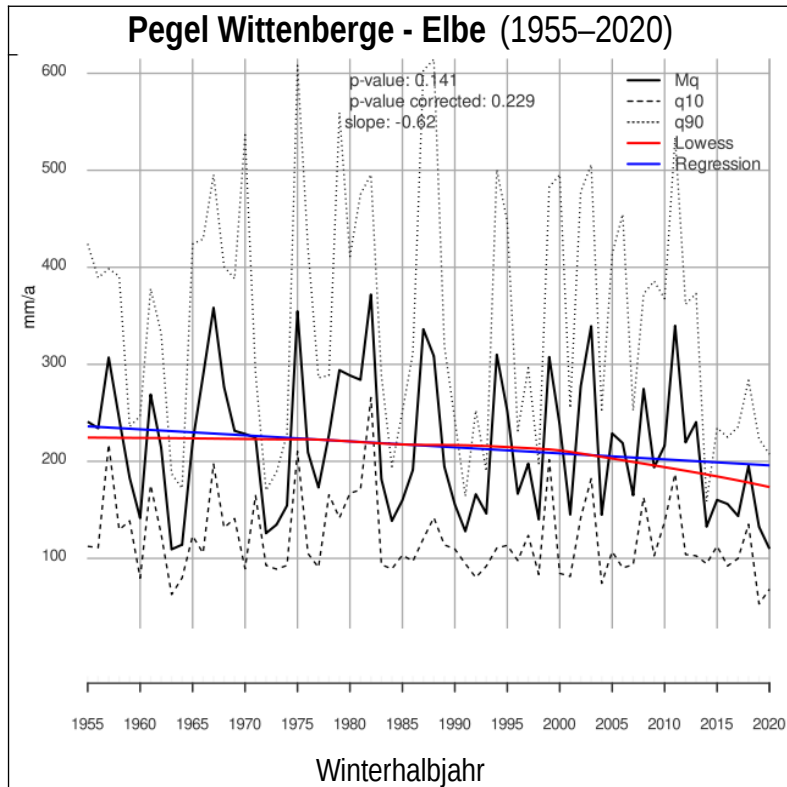
Dargestellt ist das Histogramm der Pegeldaten des Pegels Wittenberge. Die Verteilung der Daten zeigt, dass es sich nicht um normalverteilte Daten handelt.

Winterhalbjahre**Abbildung 6:**

Dargestellt sind die Ergebnisse der CUMSUM-Analyse für die Winterhalbjahre und die Sommerhalbjahre. Dabei geben die roten Geraden die Signifikanzgrenze für eine signifikante Änderung des Anstiegs an. Innerhalb der Grenzen handelt es sich nicht um einen signifikanten Bruchpunkt in der Analyse.

Die Ergebnisse zeigen für den kurzen Trendanalysezeitraum von 1955–2020, dass für die Winterhalbjahre keine Signifikanz der Änderung festgestellt wird. Für die Sommermonate wird jedoch ein signifikanter Bruchpunkt in den 80-iger Jahren analysiert.

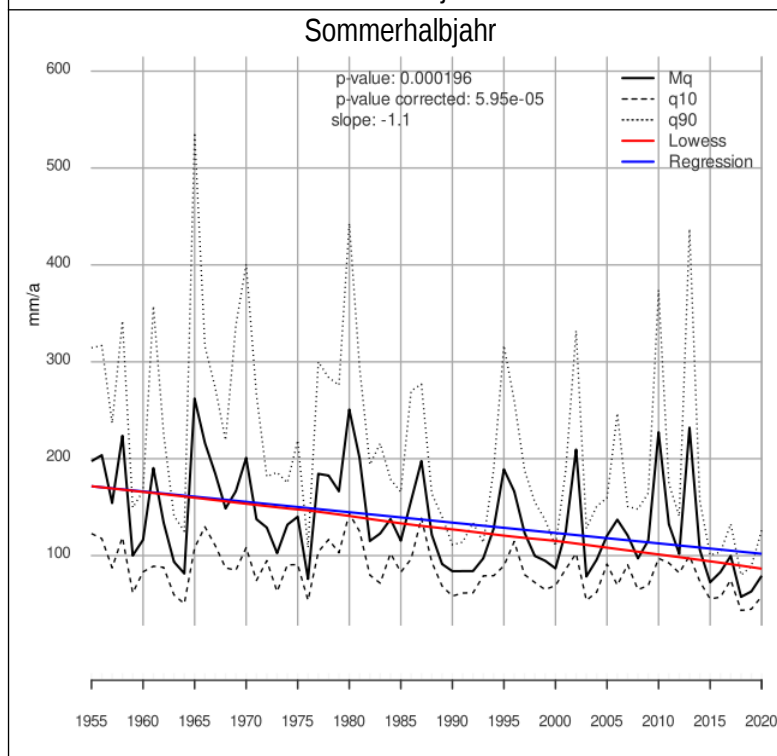
Sommerhalbjahre

**Abbildung 7a:**

Dargestellt wird hier die mittlere Abflusspende (Mq) für die Winterhalbjahre am Pegel Wittenberge für den kurzen Trendanalysezeitraum von 1955–2020.

Die lineare Regressionsgerade zeigt eine **schwach signifikante** (p-value: 0,141) Abnahme des jährlichen Abflusses von 0,62 mm (slope) pro Jahr.

Die längerfristige Trendanalyse von 1921–2020 zeigt eine nicht signifikante Änderung mit einem p-value von 0,828.

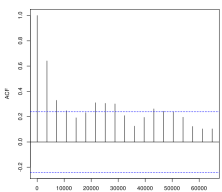
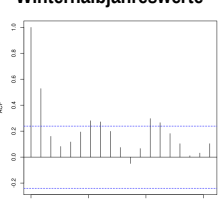
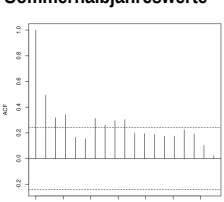
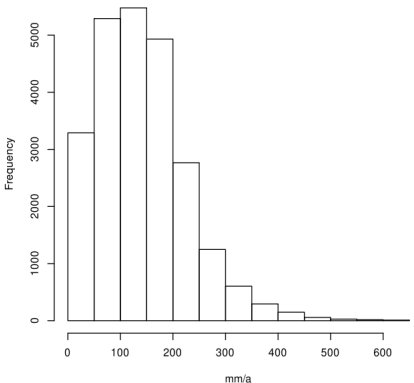
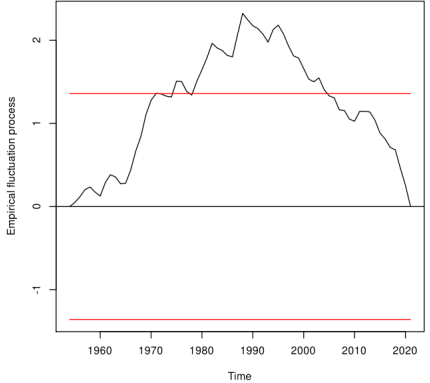
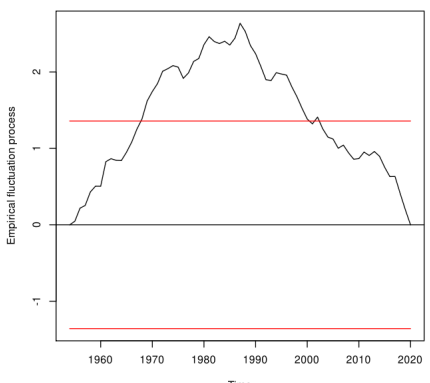
**Abbildung 7b:**

Die Entwicklung für die Sommermonate wird dem entgegen jedoch als **hoch signifikante** Abnahme des mittleren Abflusses eingestuft, mit einem p-value von 0,000196 beträgt die Abnahme pro Jahr 1,1 mm.

Die längerfristige Trendanalyse von 1921–2019 zeigt eine **schwach signifikante** Änderung mit einem p-value von 0,155.

Pegel Babelsberg - Nuthe (1955–2020)

Betreiber: Landesamt für Umwelt, W12

<p>Jahreswerte</p> 		<p>Abbildung 4: Dargestellt ist die Autokorrelation des Pegels Babelsberg. Auf der Zeitachse wird die zeitliche Verschiebung der Zeitreihe abgebildet, auf der y-Achse die Kennwerte der Autokorrelation ACF = Auto Correlation Function; innerhalb der gestrichelten Linien findet keine signifikante Autokorrelation der Daten statt. Die Daten sind daher durch ihre abhängigen Ereignisse nicht für den Mann-Kendall-Test geeignet, hier wird der erweiterte Mann-Kendall-Test nach HAMED & RAO (1998) angewandt, der die Autokorrelation der Daten berücksichtigt.</p>
<p>Winterhalbjahreswerte</p> 	<p>Sommerhalbjahreswerte</p> 	
		
<p>Winterhalbjahre</p> 		<p>Abbildung 5: Dargestellt ist das Histogramm der Pegeldata des Pegels Babelsbergs. Die Verteilung der Daten zeigt, dass es sich nicht um normalverteilte Daten handelt.</p> <p>Abbildung 6: Dargestellt sind die Ergebnisse der CUMSUM-Analyse für den kurzen Trendanalysezeitraum von 1955–2020 für die Winterhalbjahre und die Sommerhalbjahre. Dabei geben die roten Geraden die Signifikanzgrenzen für eine signifikante Änderung des Anstiegs an. Innerhalb der Grenzen handelt es sich nicht um einen signifikanten Bruchpunkt in der Analyse.</p> <p>Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl für die Winterhalbjahre als auch für die Sommermonate eine Signifikanz der Änderung festgestellt wird. Für die Wintermonate wird die Signifikanzgrenze circa zwischen 1975 und dem Jahr 2005 überschritten. Für die Sommermonate ist ein signifikanter Bruchpunkt schon ab Beginn der 1970-er Jahre / Ende der 1960-er Jahre zu erkennen, welcher circa im Jahre 2000 wieder unterschritten wird.</p>
<p>Sommerhalbjahre</p> 		

Pegel Babelsberg - Nuthe (1955–2020)

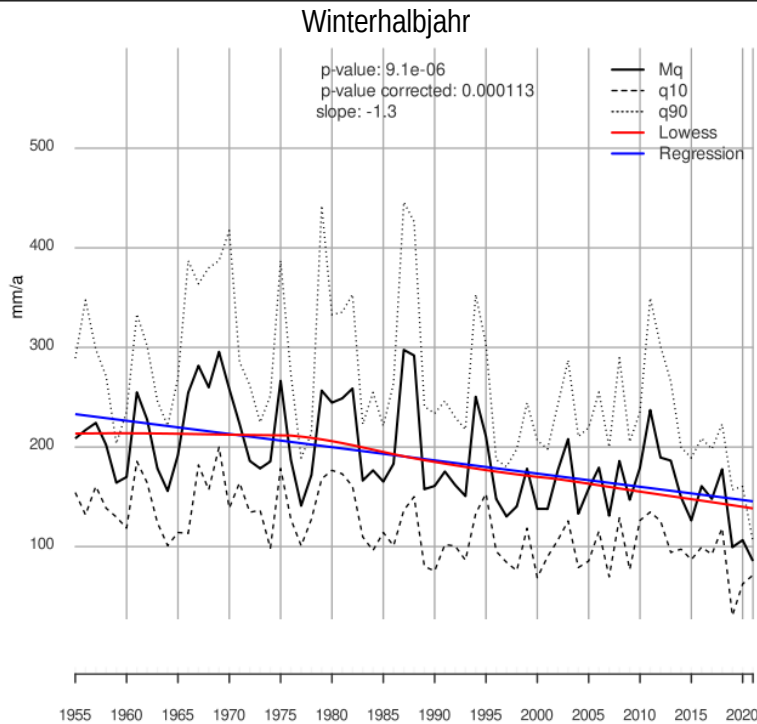


Abbildung 7a:

Dargestellt wird hier die mittlere Abflusspende (Mq) für den kurzen Trendanalysezeitraum von 1955–2020 für die Winterhalbjahre am Pegel Babelsberg.

Die lineare Regressionsgerade zeigt eine **hoch signifikante** (p-value_{Korr.}: 0,000113) Abnahme des jährlichen Abflusses von 1,3 mm (slope) pro Jahr.

(Für eine längere Trendanalyse von 1921–2020 liegen keine Daten vor.)

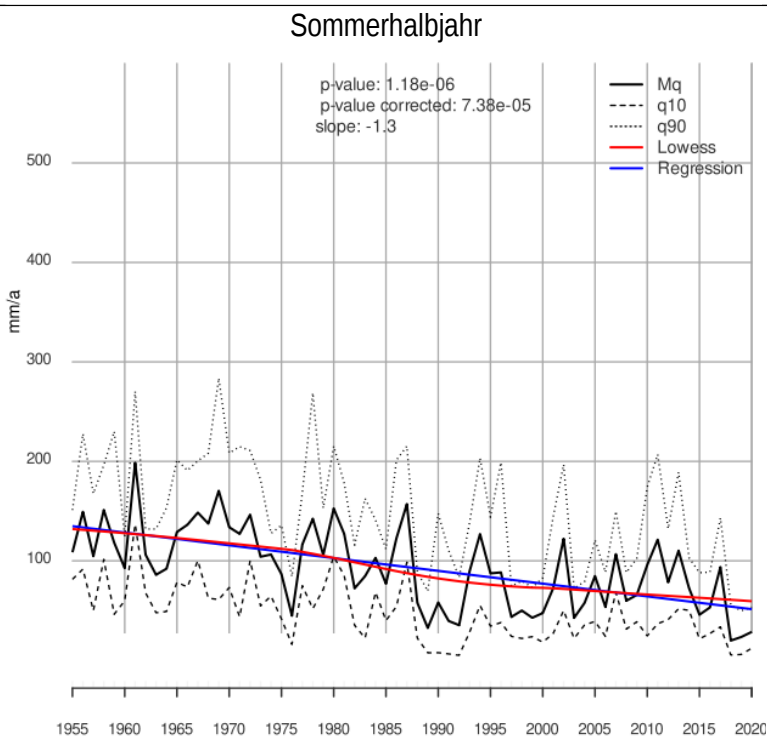


Abbildung 7b:

Die Entwicklung für die Sommermonate wird ebenfalls als **hoch signifikante** Abnahme des mittleren Abflusses eingestuft, mit einem p-value_{Korr.}: 0,0000738 beträgt die Abnahme pro Jahr ebenfalls 1,3 mm.

6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Trendanalyse sind in der hier folgenden **Tabelle 2** zusammengefasst.

Pegel	Zeitraum	Winterhalbjahr			Sommerhalbjahr		
		p-value/ p-value _{Korr} *	Trend	slope [mm/a]	p-value/ p-value _{Korr} *	Trend	slope [mm/a]
Eisenhüttenstadt (Oder)	lang 01.11.1920– 31.10.2020	0,187	schwach signifikant	-0,45	0,491	nicht signifikant	-0,13
Wittenberge (Elbe)		0,828	nicht signifikant	+0,29	0,155	Schwach signifikant	-0,77
Eisenhüttenstadt (Oder)	kurz 01.11.1954– 31.10.2020	0,0488	wahrscheinlich signifikant	-0,73	0,00201	hoch signifikant	-0,88
Wittenberge (Elbe)		0,141	schwach signifikant	-0,62	0,000196	hoch signifikant	-1,1
Babelsberg* (Nuthe)		0,000113*	hoch signifikant	-1,3	0,0000738*	hoch signifikant	-1,3

Tabelle 2: Trendanalyse langjähriger Durchflussreihen in Brandenburg anhand halbjährlicher mittlerer Abflusssspenden; **p-value:** Ergebnisgröße des Mann-Kendall-Testes; **p-value_{Korr}:** Testgröße des angepassten Mann-Kendall-Trendtestes nach HAMED & RAO (1998) für Babelsberg*; **slope:** Abflussänderung in [mm/a] der linearen Regression

7. Abkürzungsverzeichnis:

ACF	Auto Correlation Function
CLINO	climate normal = Normalperiode
CUMSUM	cumulative sum, kumulativen Summe nach ZEILEIS et al. 2002
Lag [-Distance]	zeitliche Verschiebung einer Zeitreihe
LfU	Landesamt für Umwelt Brandenburg
LOWESS	Locally weighted regression nach CLEVELAND, W.S. 1979
p-value	Ergebnisgröße des Mann-Kendall-Testes
p-value _{Korr}	korrigierte Ergebnisgröße des angepassten Mann-Kendall-Testes nach HAMED & RAO 1998
Mq	mittlere Abflusspende (hier halbjährliche Betrachtung)
SHJ	Sommerhalbjahr
slope	Abflussänderung in [mm/a] der linearen Regressionsfunktion
q10	10 % Quantil von Mq
q90	90 % Quantil von Mq
WHJ	Winterhalbjahr
WMO	World Meteorological Organization; Weltorganisation für Meteorologie
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe bzw. Oder-Havel
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

8. Literaturverzeichnis:

- AREITSKREIS KLIWA (2002): Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Deutscher Wetterdienst, KLIWA-Projekt A 2.1.3, Analyse zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse, KLIWA-Berichte Heft 2
- AREITSKREIS KLIWA (2003): Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Deutscher Wetterdienst, Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Projekt A 2.1.2, Analyse zum Langzeitverhalten der mittleren jährlichen und monatlichen Abflüsse, KLIWA-Berichte Heft 3
- BLÜMEL, K. (2001): Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 219
- CLEVELAND, W.S. (1979): Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, Journal of the American Statistical Association, DOI: 10.1080/01621459.1979.10481038
- DYCK, S. (1979): Angewandte Hydrologie, Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse, Verlag für Bauwesen
- FABIG, I. (2007): Die Niederschlags- und Starkregenentwicklung der letzten 100 Jahre im Mitteldeutschen Trockengebiet als Indikatoren möglicher Klimaänderungen. Univ. Halle, Dissertation, DOI <https://doi.org/10.23689/fidgeo-328>.
- GISACH (div. Jahre): Oberirdisches EZG des Gebietes Hammerfließ ca. 212km² nach GISACH-Datensatz Gewässernetz 4.2, Stand 28.10.2016; unterirdisches EZG des Gebietes Hammerfließ ca. 300km² nach Stand 26.11.2015 sowie Isohypsen des oberen genutzten Grundwasserleiters für das Frühjahr 2015, Stand 20.01.2020;

- HAMED & RAO (1998) Hamed, K.H., Rao, A.R. (1998): A modified Mann-Kendall trend test for auto-correlated data? *Journal of Hydrology*, Vol. 204, S. 182–196, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- HATZ, M.; BUSCH, N.; BELZ, J.-U.; LARINA-POOTHALLE, M. (2018): Homogenisierung der HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) BfG-1938 Bericht, DOI: 10.5675/BfG-1938
- HUXOL, S. (2007): Trendanalyse von Zeitreihen der Komponenten des Wasserkreislaufes im Einzugsgebiet der Dreisam zur prozessorientierten Beurteilung hydrologischer Klimafolgen, Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut Freiburg i.Br.
- RAPP, J. (2000): Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 212
- SCHÖNWIESE, C.D. (1992): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart
- STAHL, K.; HISDAL, H.; HANNAFORD, J.; TALLAKSEN, L.M.; VAN LANEN, H.; et al. (2010): Stream-flow trends in Europe: Evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 14. 2367-2382. 10.5194/hess-14-2367-2010.
- TRÖGER, U.; ADERHOLD, G.; ASBRAND, M.; GÖRITZ, S.; GRÜTZMACHER, G.; HANSEN, P.-D.; HEBERER, T.; HERBERT, A.; KLINGELHÖFER, D.; KROLL, A.; MATHEIS, S.; PASTEKA, O.; REJMAN-RASINSKI, R.; ROSENFELD, M.; SIAD, A.; STEY, W.; WINKLER, C.; WITTEKINDT, E. (1995): Projekt Rieselfelder südlich Berlins – Altlast, Grundwasser, Oberflächenwasser, Teilprojekt II –Hydrogeologie, Abschlussbericht Band 2, Hauptbericht Zustandsanalyse, TU Berlin, Im Auftrag des Landesumweltamt Brandenburg
- ZEILEIS, A.; LEISCH, F.; HORNIK, K.; KLEIBER, C.: strucchange: AnRpackage for testing for structural change in linear regression models. *Journal of Statistical Software*, 7(2):1–38, 2002. URL-<http://www.jstatsoft.org/v07/i02/>.