



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Umwelt BAFU

HOCHWASSERSTATISTIK

STATIONSBERICHT

Aare - Brügg, Ägerten

weitere Erläuterungen: [Leitfaden](#)
Kontakt: hydrologie@bafu.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Datengrundlage	2
2	Resultate der parametrischen Verfahren	5
2.1	Block Maximum Ansatz (BLOCK)	6
2.1.1	Gesamte Auswertungsperiode: 1922-2015	6
2.1.1.a	Stationäre Modellvariante	6
2.1.1.b	Nicht stationäre Modellvariante	8
2.1.2	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1974-2015	9
2.1.2.a	Stationäre Modellvariante	9
2.1.2.b	Nicht stationäre Modellvariante	11
2.2	Peaks Over Threshold Ansatz (POT)	12
2.2.1	Auswertungsperiode POT: 1974-2015	13
2.2.1.a	Stationäre Modellvariante	13
2.2.1.b	Nicht stationäre Modellvariante	15
3	Vergleich der verschiedenen Resultate	17
3.1	Beurteilung der unterschiedlichen Auswertungsperioden	17
3.2	Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze	17
4	Literatur	19
Anhang		20
A	Bestimmung des Schwellenwerts zur Abgrenzung von Extremwerten	20
B	Glossar	21

1 Datengrundlage

Es stehen die folgenden Abflussdaten für die extremwertstatistischen Auswertungen zur Verfügung:

Vorhandene Daten	seit	bis
Digitale Monatsmaxima	01.01.1905	31.12.2015
Digitale Tagesmaxima	01.01.1974	31.12.2015

Ein Limnigraph wurde am 23. April 1921 in Betrieb genommen.

Für die Auswertungen werden entweder die mit Limnigraph erfassten vollständigen Jahre der Monatsmaxima oder die digitalen Tagesmaxima verwendet (siehe Kapitel 2).

Der grösste Abfluss wurde wie folgt beobachtet:

Grösste Abflussspitze	Datum	Abfluss
Grösstes Monatsmaximum	07.05.2015	783 m ³ /s
Grösstes Tagesmaximum	07.05.2015	783 m ³ /s

Die Abflussdaten können folgendermassen charakterisiert werden:

Abflussverlauf	Beschreibung
Abflussregime	Nicht eindeutig klassifizierbar: Im Sommer zumeist höhere Abflüsse als im Winter
Ausprägung der Saisonalität Beeinflussung	In Monats- und Tagesmaxima erkennbar (Abbildung 3 und Abbildung 4) Beeinflussung durch diverse Kraftwerke oberhalb des Bielersees und Regulierung des Sees. 2. Juragewässerkorrektion 1962-1973, neues Regulierreglement nach 1982, Einführung der Prognoseregulierung ab 2008 (s. Regulierung Jurarandseen)

Die meisten Jahresmaxima bewegen sich zwischen ungefähr 400 und 600 m³/s, wobei die Werte in diesem Bereich stark streuen. In Abbildung 1 ist erkennbar, dass die Jahresmaxima ab Ende der 1960er-Jahre im Mittel deutlich gestiegen sind. In der Zeit von 1922 (nach Limnigrapheninstallation) bis 1970 wurden nur 3 Jahresmaxima mit einem Abfluss >600 m³/s beobachtet, seither wurden 16 verzeichnet. Nach 1970 sind die Jahresmaxima im Mittel fast 100 m³/s grösser als zuvor, auch wenn in Einzeljahren nach wie vor Jahresmaxima unter 400 m³/s auftreten können.

Die Bruchpunktanalyse ergibt einen signifikanten Bruchpunkt ab 1977 (Konfidenzintervall 1966-1983). Dieser Zeitpunkt fällt in etwa mit dem Ende der 2. Juragewässerkorrektion 1962-1973 zusammen. Aus diesem Grund wird die Datenreihe ab 1974 unterteilt.

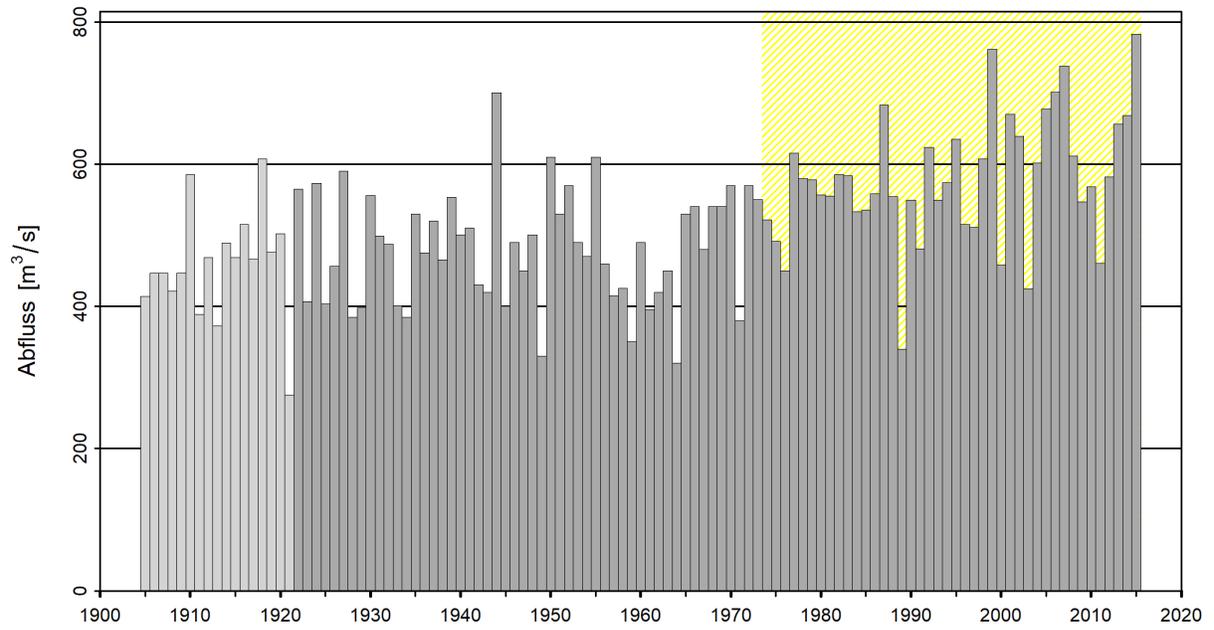


Abbildung 1: Zeitreihe der Jahresmaxima [m^3/s] (1905 - 2015, hellgrau: nicht für die Statistik verwendete Jahresmaxima, dunkelgrau: verwendete Jahresmaxima der gesamten Auswertungsperiode ab Linnigrapheninstallation). Gelb schraffiert: Auswertungsperiode ab Bruchpunkt (1974)

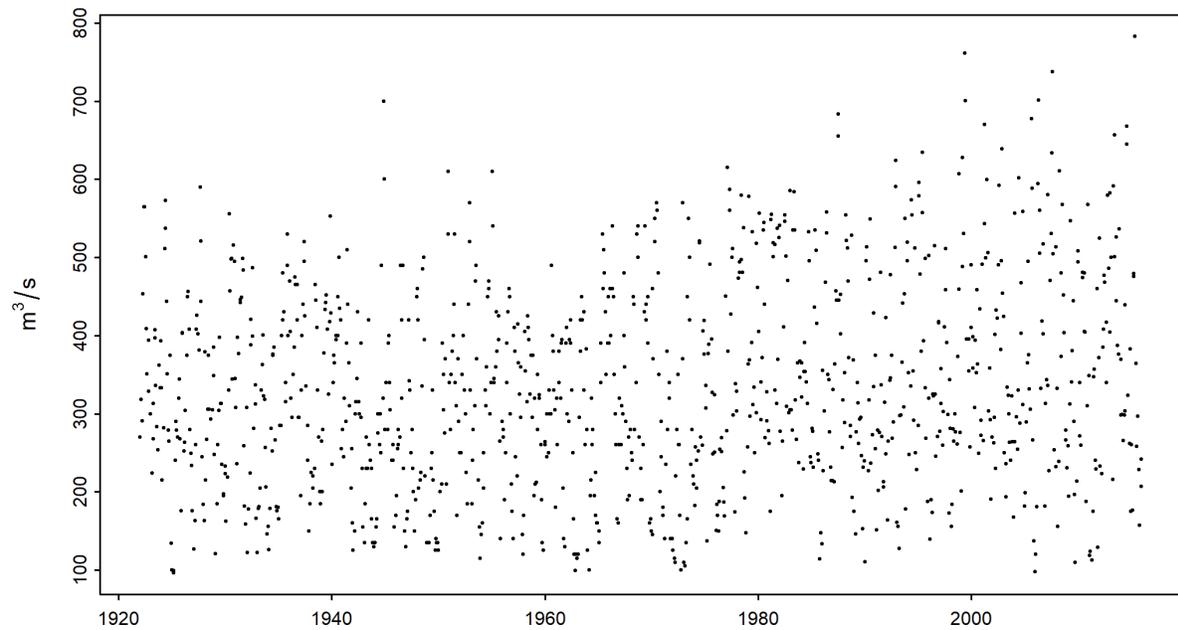


Abbildung 2: Zeitreihe der Monatsmaxima [m^3/s] (01.01.1922 - 31.12.2015)

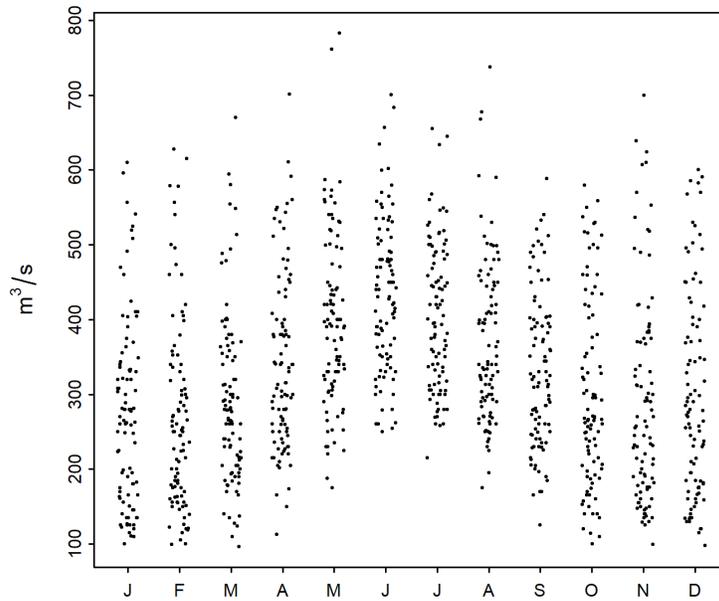


Abbildung 3: Saisonaler Verlauf der Monatsmaxima [m^3/s] (01.01.1922 - 31.12.2015)

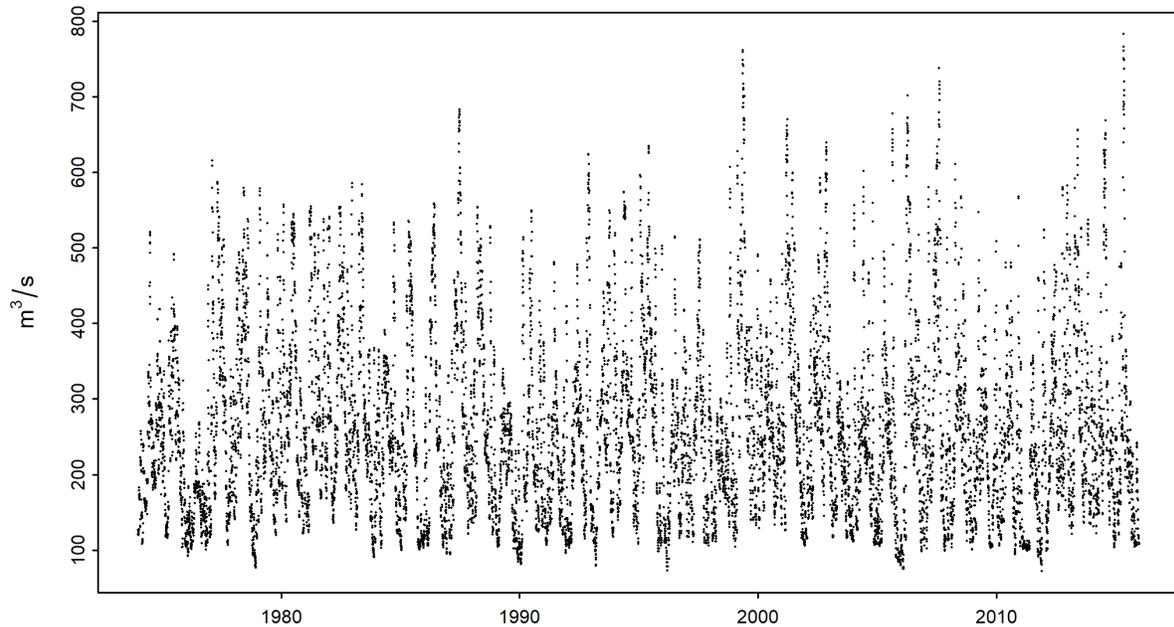


Abbildung 4: Zeitreihe der maximalen Tagesabflüsse [m^3/s] (01.01.1974 - 31.12.2015)

Fazit für die Modellvarianten

Veränderungen	Auswirkungen	Folgerungen
2. Juragewässerkorrektion 1962-1973	Jahresmaxima werden grösser	Vermutlich nicht stationär

Bruchpunktanalyse

Jahr	Signifikanter Bruchpunkt	Folgerungen
1973 / 1974	ja	Unterteilung der Daten, da der Bruchpunkt mit Unterlagen zu Station und Einzugsgebiet begründbar

2 Resultate der parametrischen Verfahren

Mit Hilfe von zwei parametrischen Verfahren (BLOCK- und POT-Ansatz) werden Hochwasserwahrscheinlichkeiten HQ_T abgeschätzt. Die beiden Ansätze unterscheiden sich in der Methode wie Extremwerte identifiziert werden. Sie basieren auf folgenden Modelleingangsdaten und Parametern:

Parametrisches Verfahren	Parameter	Modelleingangsdaten
Block Maximum (BLOCK)	μ Lageparameter	Jahresmaxima
	σ Skalenparameter	
	κ Formparameter	
Peaks Over Threshold (POT)	λ Ereignisrate	Tagesmaxima
	σ Skalenparameter ¹	
	κ Formparameter	

Für beide parametrischen Ansätze wird jeweils der stationäre Fall berechnet. Das heisst es wird angenommen, dass alle Parameter der Verteilungsfunktion über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant sind. Wenn die Stationsgeschichte jedoch eine zeitliche Veränderung vermuten lässt, können die Parameter der entsprechenden Verteilungsfunktion zeitlich abhängig modelliert werden. Folgende, in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführten Modellvarianten werden verwendet:

Tabelle 1: Verwendete Modellvarianten des BLOCK-Ansatzes. μ Lageparameter (mu), σ Skalenparameter (sigma), κ Formparameter (kappa)

Modellvarianten BLOCK			
Name	Beschreibung	Parameter (t: Jahr)	Anzahl Parameter
stat	Stationäre Variante	μ, σ, κ	3
mul	Linearer Trend von μ	$\mu = a_1 + a_2 * t, \sigma, \kappa$	4
muq	Quadratischer Trend von μ	$\mu = a_1 + a_2 * t + a_3 * t^2, \sigma, \kappa$	5
sigl	Linearer Trend von σ	$\mu, \sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	4
musigl	Linearer Trend von μ und σ	$\mu = a_1 + a_2 * t, \sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	5
mujump	Nicht-kontinuierliche Veränderung von μ zum Zeitpunkt t_0	$\mu = a_1 + a_2 * i, \sigma, \kappa,$ $i = 0$ für $t < t_0, i = 1$ für $t \geq t_0$	4

Tabelle 2: Verwendete Modellvarianten des POT-Ansatzes. σ Lageparameter (sigma), κ Formparameter (kappa)

Modellvarianten POT			
Name	Beschreibung	Parameter (t: Jahr)	Anzahl Parameter
stat	Stationäre Variante	σ, κ	2
sigl	Linearer Trend von σ	$\sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	3
sigjump	Nicht-kontinuierliche Veränderung von σ zum Zeitpunkt t_0	$\sigma = b_1 + b_2 * i, \kappa,$ $i = 0$ für $t < t_0, i = 1$ für $t \geq t_0$	3

Die Güte der Modellvarianten wird jeweils grafisch mit Hilfe eines Probability und eines Quantile Plots beurteilt (siehe z.B. Abbildung 5 oben und [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3). Je besser die Daten auf der Einheitsdiagonale liegen, desto eher kann davon ausgegangen werden, dass die Modellannahmen korrekt sind. Anhand eines Ablaufschemas wird schliesslich entschieden, welches nicht stationäre Modell allenfalls weiterverwendet wird (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#) Kapitel 2.1.3). Im Folgenden sind jeweils die Verfahren mit den besten Resultaten aufgeführt.

¹Der Skalenparameter σ des POT-Ansatzes ist numerisch nicht identisch mit dem σ des BLOCK-Ansatzes.

2.1 Block Maximum Ansatz (BLOCK)

Der Block Maximum Ansatz (BLOCK) definiert den höchsten Wert innerhalb eines Zeitintervalls (Block, im vorliegenden Fall ein Jahr) als Extremwert.

Folgende Varianten des BLOCK-Ansatzes werden in diesem Bericht beschrieben:

Auswertungsperiode	Beschreibung	ausgewählte Modellvariante	Kapitel
1922 - 2015	gesamte Auswertungsperiode	stat mujump	Kapitel 2.1.1.a Kapitel 2.1.1.b
1974 - 2015	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt	stat mujump	Kapitel 2.1.2.a Kapitel 2.1.2.b

2.1.1 Gesamte Auswertungsperiode: 1922-2015

2.1.1.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1922-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
94	488.7	92.89	-0.2178

Die Güte der Modellvariante „stat“ über die gesamte Auswertungsperiode wird grafisch anhand der in Abbildung 5 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

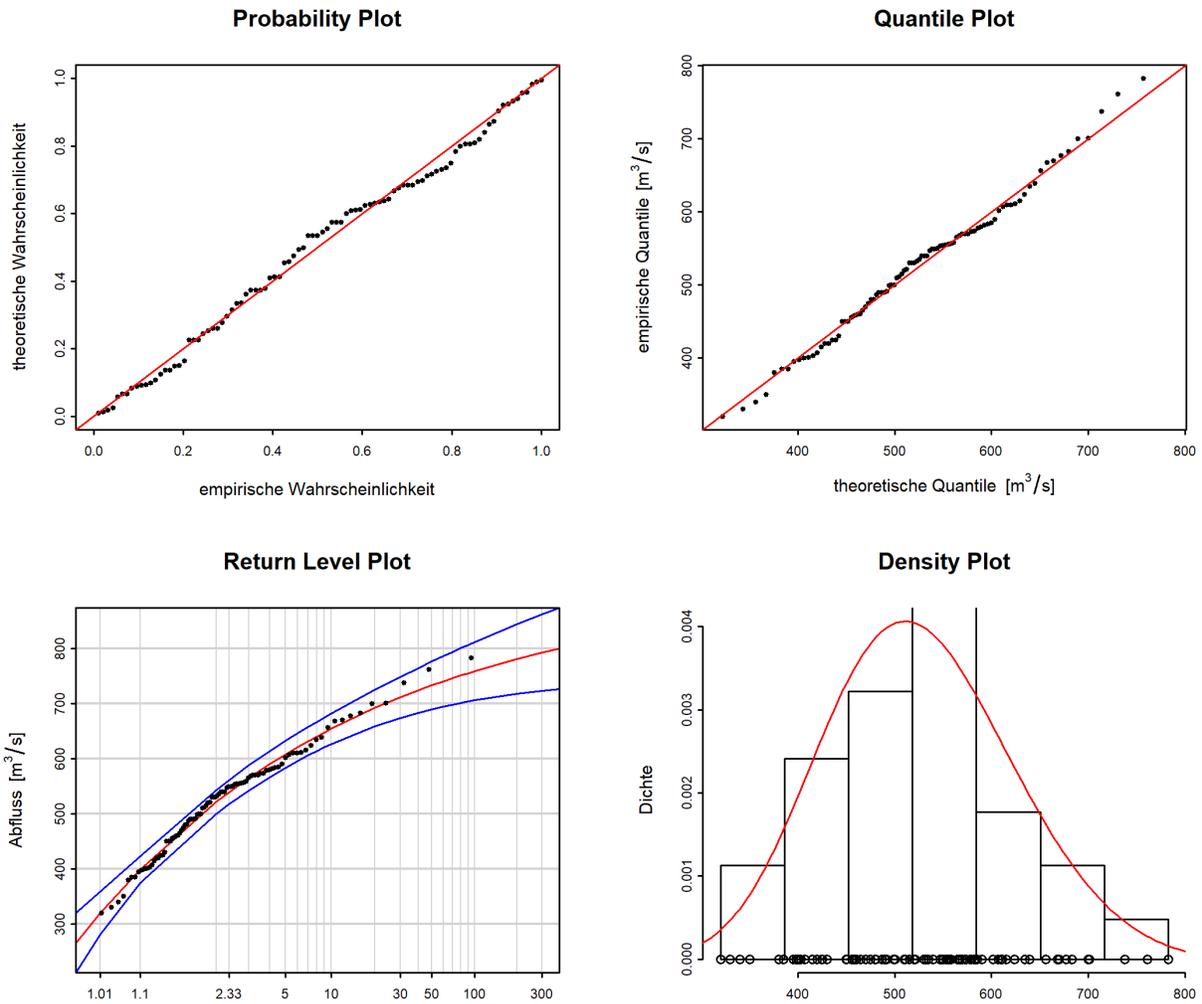


Abbildung 5: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1922-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 5):

Kriterien	Bewertung ²	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	mittel	höchste Werte werden etwas unterschätzt
Konfidenzintervall	klein	-

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die gesamte Auswertungsperiode 1922-2015 (inkl. 95% - Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ ₂	500	521	543
HQ ₁₀	626	654	682
HQ ₃₀	674	711	748
HQ ₁₀₀	706	759	812
HQ ₃₀₀	722	792	862

²Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

2.1.1.b Nicht stationäre Modellvariante

Der Vergleich der verschiedenen Modellvarianten des BLOCK-Ansatzes über die gesamte Auswertungsperiode zeigt, dass sich alle verwendeten nicht stationären Modelle signifikant vom stationären Modell („stat“) unterscheiden.³ Aufgrund des im Ablaufschema beschriebenen Vergleichsansatzes verschiedener nicht stationärer Modellvarianten kommt „mujump“ als bestes nicht stationäres Modell in Frage, da es auch hydrologisch am besten begründbar ist. Daher werden im Folgenden die Resultate von „mujump“ dargestellt (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#)).

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	mujump1974	1922-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}^4$		Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
	a_1	a_2		
94	452.55	94.92	83.27	-0.2554

Die Güte der Modellvariante „mujump1974“ über die gesamte Auswertungsperiode wird grafisch anhand der in Abbildung 6 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

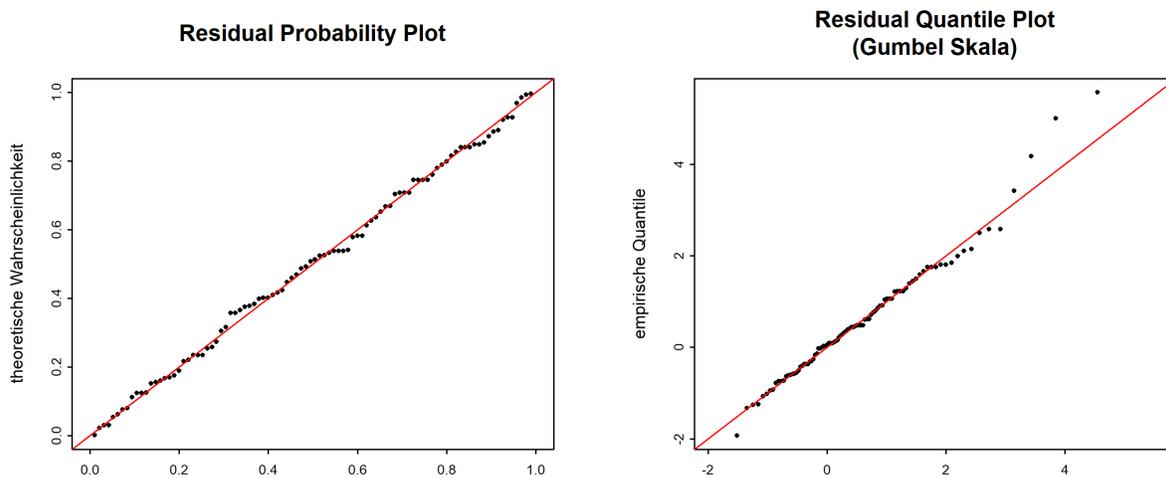


Abbildung 6: Diagnostikplots der Modellvariante „mujump1974“ des BLOCK-Ansatzes (1922-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 6):

Kriterien	Bewertung ⁵	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	unterster Wert wird eher etwas überschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	gut - mittel	-
Anpassung oberer Bereich	mittel	höchste Werte werden etwas unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	ähnlich	keine Verbesserung sichtbar

³ Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „mujump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1974 gewählt (siehe Kapitel 1).

⁴ $\hat{\mu} = a_1 + a_2 * i$, $i = 0$ für $t < t_0$, $i = 1$ für $t \geq t_0$ (s. Tabelle 1)

⁵ Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

Folgende Tabelle enthält die für das aktuellste Jahr (2015) bestimmten Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit der Modellvariante „mujump1974“ des BLOCK-Ansatzes über die gesamte Auswertungsperiode 1922-2015 (inkl. 95%-Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m ³ /s]	Abfluss [m ³ /s]	obere Konfidenzgrenze [m ³ /s]
HQ ₂	549	577	604
HQ ₁₀	661	690	719
HQ ₃₀	703	736	769
HQ ₁₀₀	732	773	813
HQ ₃₀₀	748	797	847

In Abbildung 7 ist die Veränderung des mit dem Modell „mujump1974“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1922 und 2015 dargestellt.

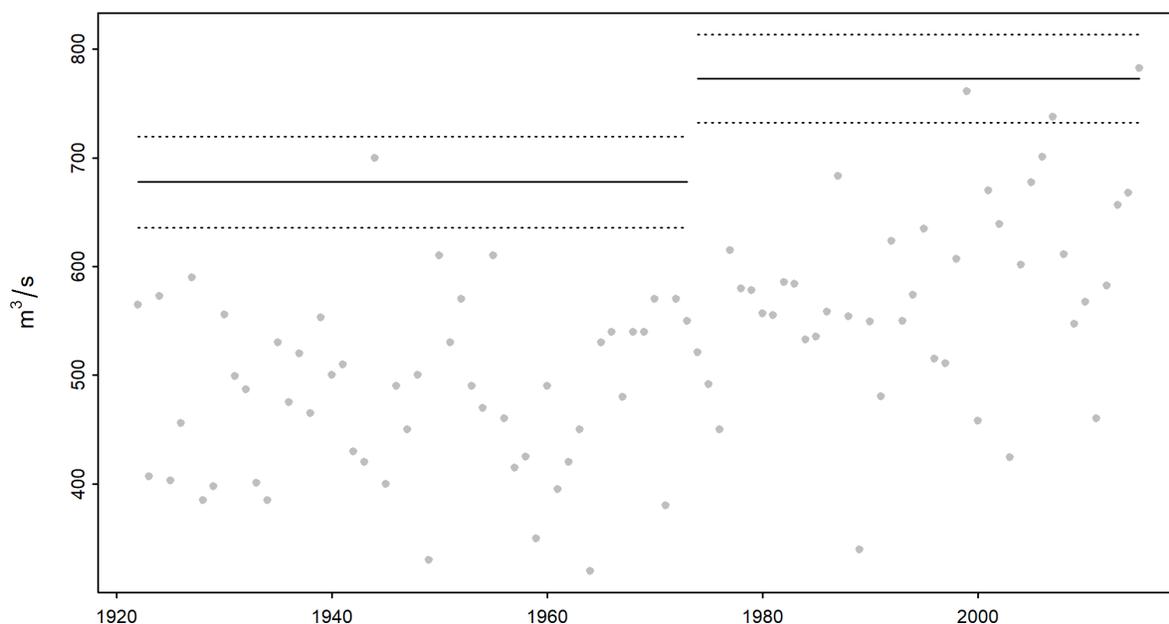


Abbildung 7: Veränderung der mit der Modellvariante „mujump1974“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1922-2015

2.1.2 Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1974-2015

2.1.2.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1974-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
42	547.74	90.42	-0.288

Die Güte der Modellvariante „stat“ über die Auswertungsperiode ab Bruchpunkt wird grafisch anhand der in Abbildung 8 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

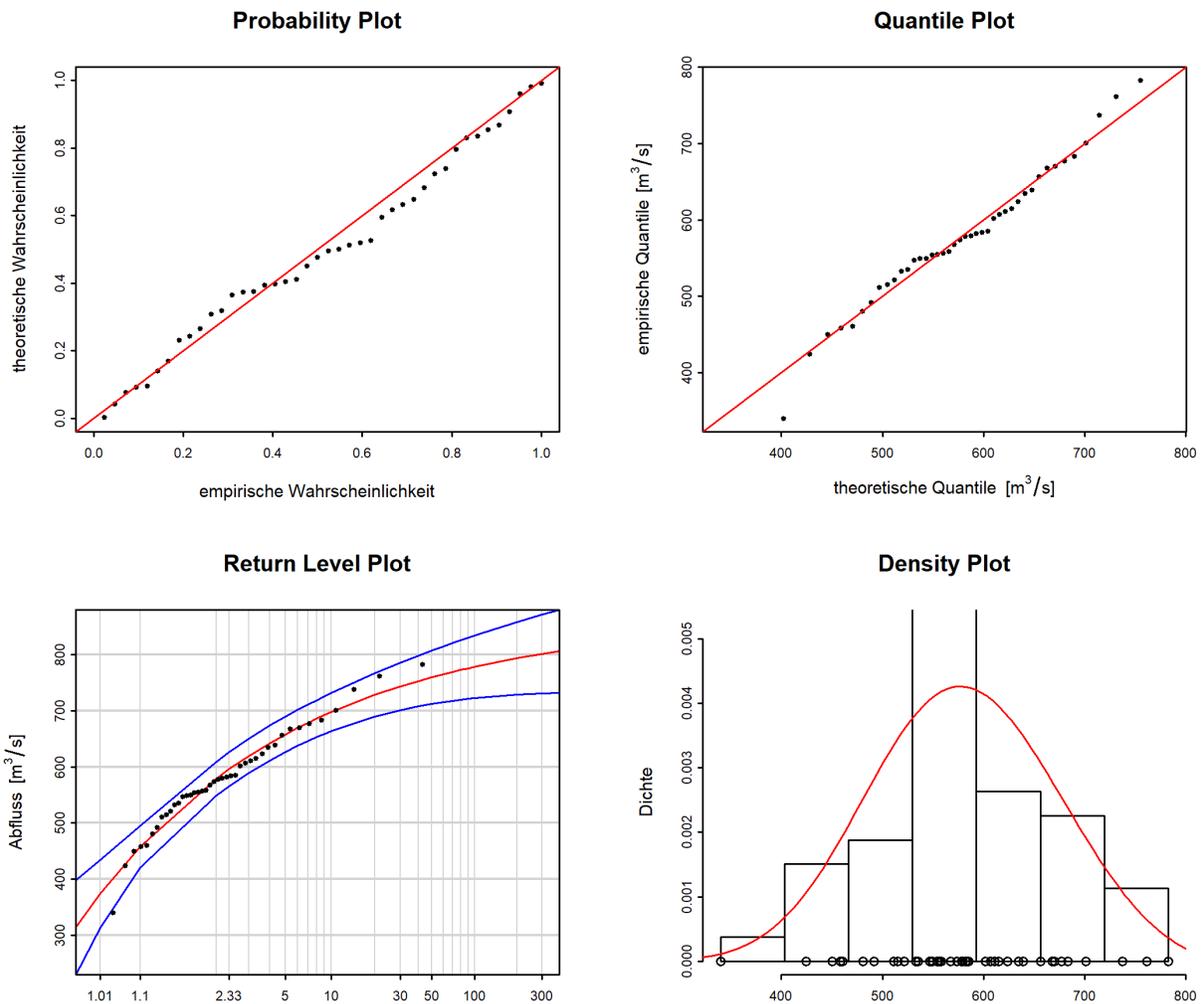


Abbildung 8: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 8):

Kriterien	Bewertung ⁶	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	schlecht	kleinster Wert wird überschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	mittel	höchste Werte werden etwas unterschätzt
Konfidenzintervall	klein	-

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die Auswertungsperiode ab Bruchpunkt 1974-2015 (inkl. 95% - Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ ₂	549	579	609
HQ ₁₀	664	697	731
HQ ₃₀	701	743	785
HQ ₁₀₀	722	778	834
HQ ₃₀₀	731	801	871

⁶Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

2.1.2.b Nicht stationäre Modellvariante

Der Vergleich der verschiedenen Modellvarianten des BLOCK-Ansatzes über die Periode ab Bruchpunkt zeigt, dass sich alle verwendeten nicht stationären Modelle signifikant vom stationären Modell („stat“) unterscheiden.⁷ Am besten schneidet dabei die Variante „mujump“ ab, deren Resultate im Folgenden dargestellt sind (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#)).

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	mujump1998	1974-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}^8$		Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
	a_1	a_2		
42	517.07	93.38	89.39	-0.4628

Die Güte der „mujump1998“ Modellvariante über die Auswertungsperiode ab Bruchpunkt wird grafisch anhand der in Abbildung 9 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

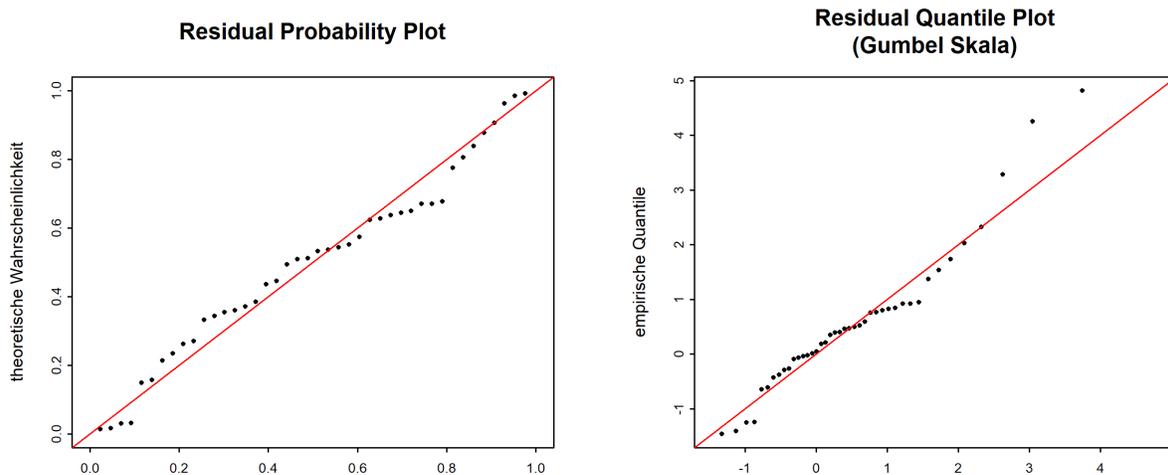


Abbildung 9: Diagnostikplots der Modellvariante „mujump1998“ des BLOCK-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 9):

Kriterien	Bewertung ⁹	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel	-
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	-
Anpassung oberer Bereich	mittel	höchste Werte werden unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	leicht verbessert	kleinster Wert ist besser angepasst

⁷ Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „mujump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse der Periode ab Bruchpunkt das Jahr 1998 gewählt.

⁸ $\hat{\mu} = a_1 + a_2 * i$, $i = 0$ für $t < t_0$, $i = 1$ für $t \geq t_0$ (s. Tabelle 1)

⁹ Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

Folgende Tabelle enthält die für das aktuellste Jahr (2015) bestimmten Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit der Modellvariante „mujump1998“ des BLOCK-Ansatzes über die Auswertungsperiode ab Bruchpunkt 1974-2015 (inkl. 95%-Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m ³ /s]	Abfluss [m ³ /s]	obere Konfidenzgrenze [m ³ /s]
HQ ₂	600	641	682
HQ ₁₀	702	735	768
HQ ₃₀	734	763	792
HQ ₁₀₀	752	781	810
HQ ₃₀₀	758	790	821

In Abbildung 10 ist die Veränderung des mit dem Modell „mujump1998“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1974 und 2015 dargestellt.

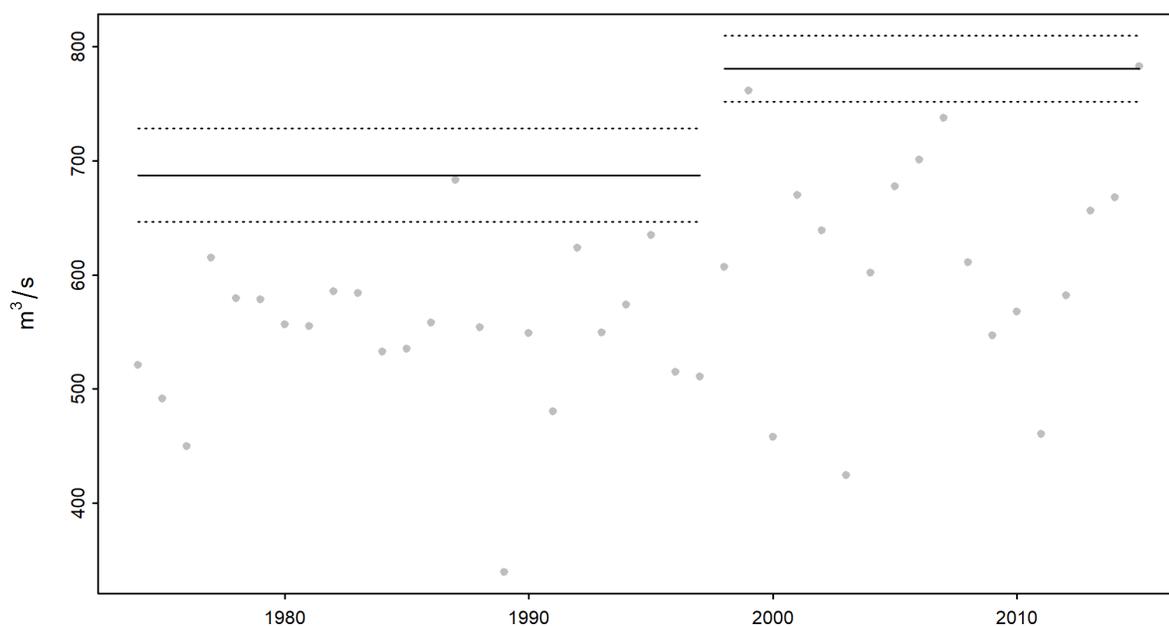


Abbildung 10: Veränderung der mit der Modellvariante „mujump1998“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1974-2015

2.2 Peaks Over Threshold Ansatz (POT)

Beim Peaks Over Threshold Ansatz (POT) gelten Werte als Extremereignisse, wenn sie einen hohen Schwellenwert u überschreiten.

Zur Berechnung des POT-Ansatzes werden die Tagesmaxima ab 1974 verwendet. Vor der Bearbeitung müssen diese von Clustern bereinigt werden. Für Aare - Brügg, Ägerten wird der Zeitabstand L zwischen zwei unabhängigen Ereignissen auf den Mindestwert von 14 Tagen festgelegt.

Folgende Modellvarianten des POT-Ansatzes werden in diesem Bericht beschrieben:

Auswertungsperiode	Beschreibung	ausgewählte Modellvariante	Kapitel
1974 - 2015	Auswertungsperiode POT	stat sigjump	Kapitel 2.2.1.a Kapitel 2.2.1.b

2.2.1 Auswertungsperiode POT: 1974-2015

Im vorliegenden Fall wurde als Schwellenwert u $510 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt (siehe Anhang A). Abbildung 11 zeigt die effektiv verwendeten Extremereignisse.

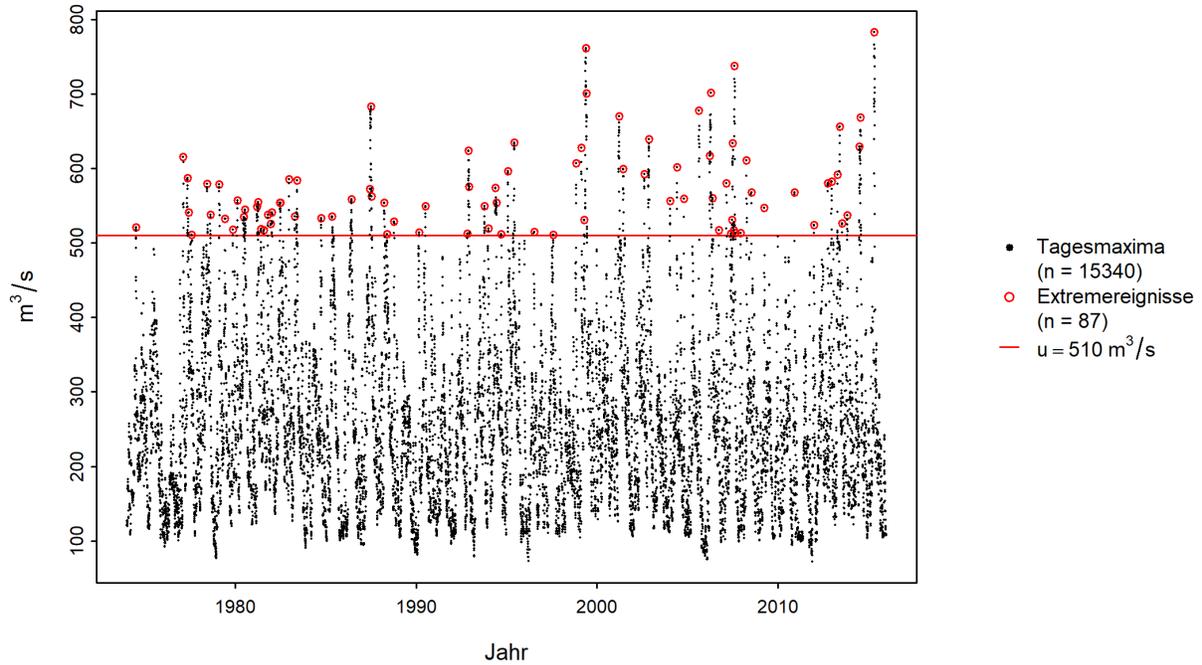


Abbildung 11: Auswahl der für den POT-Ansatz verwendeten Extremereignisse

2.2.1.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
POT	stat	1974-2015	Tagesmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Schwellenwert	Anzahl Werte	Ereignisrate	Skalenparameter	Formparameter
u	n	$\hat{\lambda}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\kappa}$
$510 \text{ m}^3/\text{s}$	87	2.07	69.99	-0.0958

Die Güte der Modellvariante „stat“ über die Auswertungsperiode POT wird grafisch anhand der in Abbildung 12 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

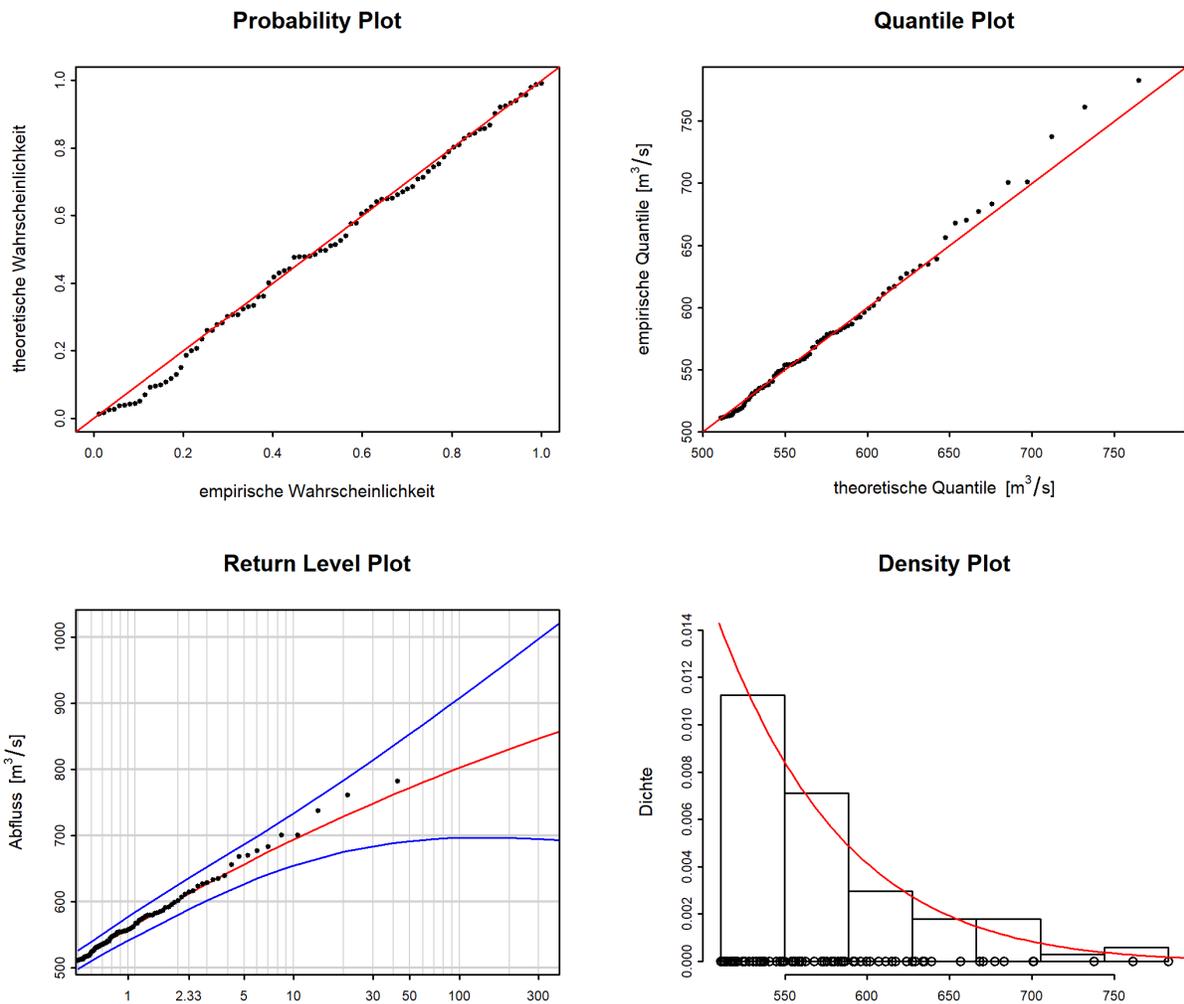


Abbildung 12: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 12):

Kriterien	Bewertung ¹⁰	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	mittel	alle grösseren Werte werden etwas unterschätzt
Konfidenzintervall	mittel	für grosse Wiederkehrperioden gross

¹⁰Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären POT-Ansatz über die Auswertungsperiode POT 1974-2015 (inkl. 95% - Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m ³ /s]	Abfluss [m ³ /s]	obere Konfidenzgrenze [m ³ /s]
HQ ₂	580	603	626
HQ ₁₀	655	694	733
HQ ₃₀	684	749	814
HQ ₁₀₀	697	802	908
HQ ₃₀₀	695	846	997

2.2.1.b Nicht stationäre Modellvariante

Der Vergleich der verschiedenen Modellvarianten des POT-Ansatzes zeigt, dass sich die Modelle „sigl“ und „sigjump“ signifikant vom stationären Modell „stat“ unterscheiden.¹¹ Aufgrund des im Ablaufschema beschriebenen Vergleichsansatzes verschiedener nicht stationärer Modellvarianten kommt „sigjump“ als bestes nicht stationäres Modell in Frage, da es auch hydrologisch am besten begründbar ist. Daher werden im Folgenden die Resultate dieser Variante dargestellt (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#)).

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
POT	sigjump1998	1974-2015	Tagesmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Schwellenwert	Anzahl Werte	Ereignisrate	Skalenparameter $\hat{\sigma}^{12}$		Formparameter
			\mathbf{b}_1	\mathbf{b}_2	$\hat{\kappa}$
510 m ³ /s	87	2.07	53.1	54.1	-0.2281

Die Güte der „sigjump1998“ Modellvariante über die Auswertungsperiode POT wird grafisch anhand der in Abbildung 13 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

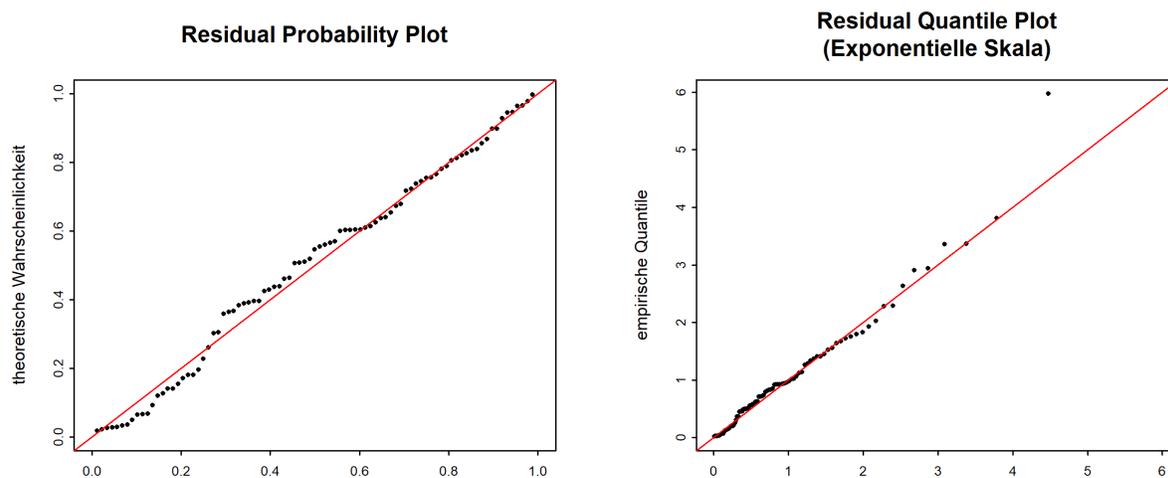


Abbildung 13: Diagnostikplots der Modellvariante „sigjump1998“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

¹¹ Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „sigjump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1998 gewählt (siehe Kapitel 1).

¹² $\hat{\sigma} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 \cdot i, i = 0$ für $t < t_0, i = 1$ für $t \geq t_0$ (s. Tabelle 1)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 13):

Kriterien	Bewertung ¹³	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	Auffälligkeiten im Probability Plot
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	höchster Wert deutlich unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	keine Verbesserung	grösster Wert schlechter angepasst

Folgende Tabelle enthält die für das aktuellste Jahr (2015) bestimmten Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit der Modellvariante „sigjump1998“ des POT-Ansatzes über die Auswertungsperiode POT 1974-2015 (inkl. 95%-Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m ³ /s]	Abfluss [m ³ /s]	obere Konfidenzgrenze [m ³ /s]
HQ ₂	604	640	676
HQ ₁₀	683	745	806
HQ ₃₀	713	797	880
HQ ₁₀₀	730	841	951
HQ ₃₀₀	736	872	1007

In Abbildung 14 ist die Veränderung des mit dem Modell „sigjump1998“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1974 und 2015 dargestellt.

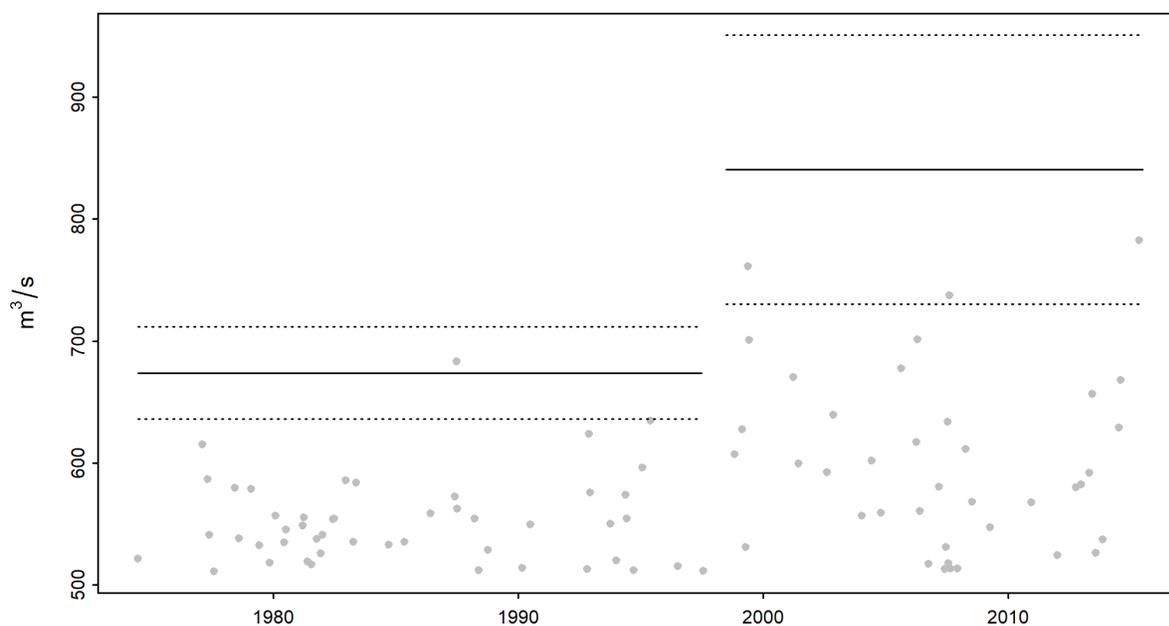


Abbildung 14: Veränderung der mit der Modellvariante „sigjump1998“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1974-2015

¹³Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

3 Vergleich der verschiedenen Resultate

Abbildung 15 zeigt die HQ_T der stationären sowie jener nicht stationären Modellvarianten, welche bei beiden parametrischen Verfahren jeweils am besten an die Daten angepasst waren. Sowohl die Werte wie auch die Grösse der Konfidenzintervalle, welche ein Mass für die Unsicherheit sind, variieren stark. Generell werden diese Unterschiede grösser, je grösser die Wiederkehrperiode T und je kleiner die zugrunde liegende Datenmenge ist.

3.1 Beurteilung der unterschiedlichen Auswertungsperioden

Nur mit dem BLOCK-Ansatz, der auf der Untersuchung von Monatsmaxima basiert, ist eine Analyse der Auswertungsperiode 1922 - 2015 möglich. Für die Darstellung des Einflusses der Messperiode wurden die Resultate des BLOCK-Ansatzes für die verschiedenen Auswertungsperioden verglichen:

Perioden	HQ_T	Konfidenzintervall
Periode ab Bruchpunkt / Gesamte Auswertungsperiode	höhere Werte	minimal grösser

Nach 1974 wurden durchschnittlich höhere Jahreshochwasser beobachtet. Dies führt zu höheren HQ_T in der Periode ab Bruchpunkt. Trotz der geringeren Datenmenge ist das Konfidenzintervall bei der Periode ab Bruchpunkt nur unwesentlich grösser als in der gesamten Auswertungsperiode. Die Periode ab Bruchpunkt entspricht bei dieser Station der Vergleichsperiode, da sie ebenso 1974 beginnt, wie die Auswertungsperiode des POT-Ansatzes.

3.2 Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze

In Abbildung 15 und der zugehörigen Tabelle sind die Resultate der verschiedenen Modellansätze zusammengefasst und zeigen folgende Sachverhalte auf:

Differenzen der Resultate der berechneten HQ_T der beiden Ansätze:

Die HQ_T des stationären POT-Ansatzes liegen, mit Ausnahme des HQ_{10} , jeweils etwas höher als diejenigen des BLOCK-Ansatzes der Vergleichsperiode. Der Vergleich der jeweiligen nicht stationären Modellvarianten zeigt bei grossen Wiederkehrperioden deutlich höhere Werte für den POT-Ansatz.

Differenzen der berechneten Konfidenzintervalle der beiden Ansätze:

Allgemein nehmen die Unsicherheiten und somit die Konfidenzintervalle zu, je grösser die Wiederkehrperiode T ist. Für grössere Wiederkehrperioden sind die Konfidenzintervalle des POT-Ansatzes deutlich grösser als jene des BLOCK-Ansatzes.

Vergleich von stationären und nicht stationären Varianten:

Mit den nicht stationären Modellvarianten kann in allen Fällen höchstens eine leichte Verbesserung der Modellgüte erreicht werden. Mit Ausnahme des HQ_{300} beim Block-Ansatz für die Periode 1974-2015, führt die Verwendung einer nicht stationären Modellvariante zu zum Teil deutlich höheren HQ_T . Eine Aussage über die zukünftige Entwicklung ist aufgrund der Abhängigkeit von der Seeregulierung schwierig.

Für die Beantwortung konkreter Fragestellungen bilden die Resultate dieser statistischen Auswertungen nur eine von verschiedenen Grundlagen. Kenntnisse über die hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet, Überlegungen zu Worst-Case-Szenarien für Niederschlag und Abfluss etc. sind unerlässlich, um das Hochwasserrisiko abzuschätzen. Die Abteilung Hydrologie des BAFUs befürwortet eine „hydrologisch-argumentative Vorgehensweise“ wie sie Merz und Blöschl (2008 zitiert in DWA 2015:52) vorschlagen.

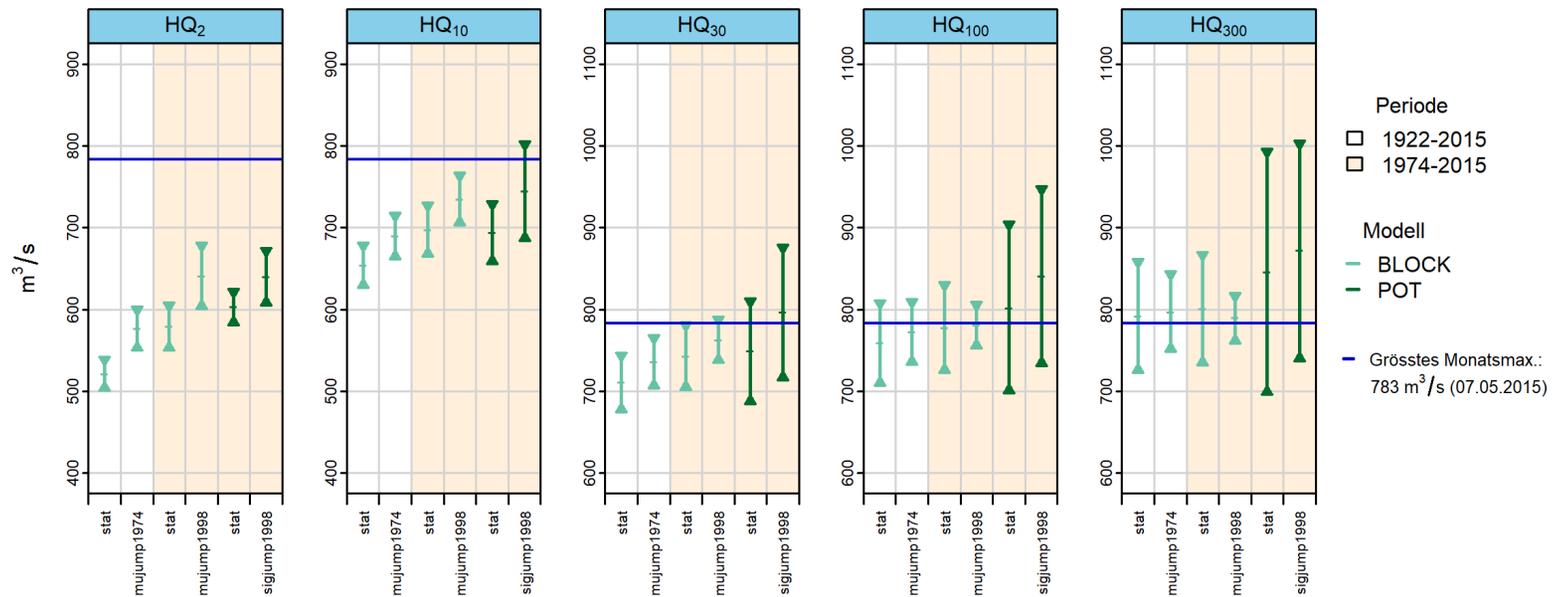


Abbildung 15: HQ_T [m^3/s] inkl. 95%-Konfidenzintervalle, berechnet mit den stationären sowie den jeweils bestangepassten Modellvarianten des BLOCK- und POT-Ansatzes für das Jahr 2015

Auswertungsperiode	Verfahren	Anpassung			Bemerkung
1922 - 2015	BLOCK stat	gut	gut	mittel	höchste Werte werden etwas unterschätzt
	BLOCK mujump1974	gut	gut - mittel	mittel	höchste Werte werden etwas unterschätzt keine Verbesserung sichtbar
1974 - 2015	BLOCK stat	schlecht	gut	mittel	höchste Werte werden etwas unterschätzt
	BLOCK mujump1998	mittel	mittel	mittel	höchste Werte werden unterschätzt kleinster Wert ist besser angepasst
1974 - 2015	POT stat	gut	gut	mittel	alle grösseren Werte werden etwas unterschätzt
	POT sigjump1998	gut	gut	schlecht	höchster Wert deutlich unterschätzt grösster Wert schlechter angepasst

4 Literatur

BAFU (2015): Leitfaden zu den Stationsberichten der Hochwasserstatistik. BAFU, Bern.

Baumgartner, E., Boldi, M.-O., Kan, C., Schick, S. (2013): Hochwasserstatistik am BAFU - Diskussion eines neuen Methodensets. Wasser Energie Luft, Heft 2/2013. Baden.

BWG (Hrsg.) (2003a): Wörterbuch Hochwasserschutz. Haupt Verlag, Bern.

BWG (Hrsg.) (2003b): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4, Bern.

Coles, S. (2001): An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer. London.

DWA (Hrsg.) (2012): Merkblatt DWA-M 552. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Hennef.

Anhang

A Bestimmung des Schwellenwerts zur Abgrenzung von Extremwerten

Der Schwellenwert u zur Abgrenzung der Extremwerte des POT-Ansatzes für die Auswertungsperiode 1974 - 2015 (siehe Kapitel 2.2.1) wird anhand des „mean residual life plots“ auf $510 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt (siehe Abbildung 16).

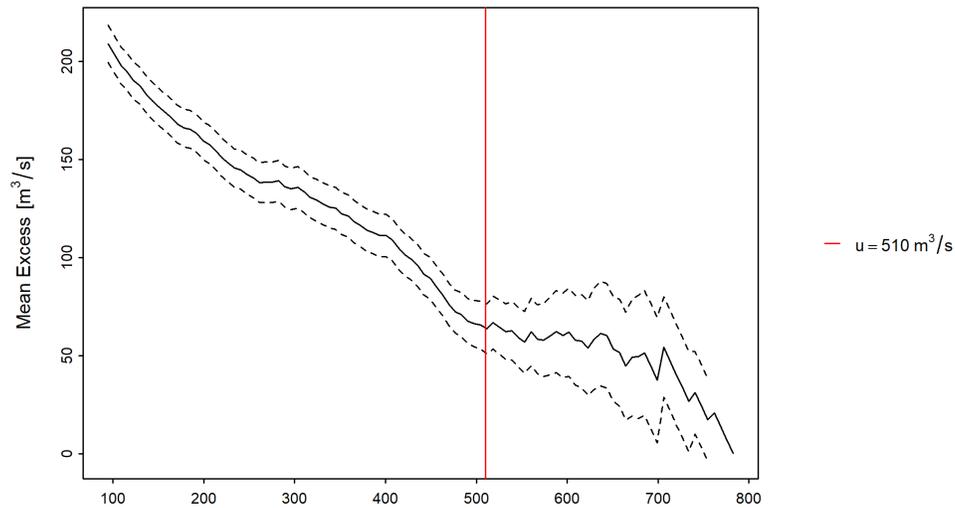


Abbildung 16: „mean residual life plot“ mit gewähltem Schwellenwert u (rote Linie) mean Excess (schwarze Linie), 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien)

B Glossar

Auswertungsperiode	Begrenzter Zeitraum, aus welchem eine Stichprobe der Hochwasserabflüsse stammt, die als repräsentativ für die Grundgesamtheit angenommen wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Eigenschaften der Grundgesamtheit mit dieser Stichprobe annähernd abgebildet werden.
Devianzstatistik	Mit der Devianzstatistik kann die Anpassungsgüte eines Modells für einen gegebenen Datensatz untersucht werden.
Deltamethode	Das BAFU nutzt die Deltamethode zur Berechnung von Konfidenzintervallen in den Return Level Plots. Die Methode basiert auf einer Taylor-Entwicklung der Funktion der HQ_T und einer asymptotischen Normalverteilung (für technische Details siehe Coles 2001, S. 33).
Güte auch Anpassungsgüte oder Anpassung	Mass für die Abweichung eines statistischen Modells (theoretische Werte) und einer Menge von Beobachtungen bzw. Messungen (empirische Daten).
HQ_T	Der mittels Verteilungsfunktion für eine vorgegebene Jährlichkeit T bestimmte Hochwasserabfluss. HQ_T ist ein Schätzwert, der über oder unter dem wahren Wert der Hochwasserabflüsse mit statistisch gesehen T -jährlicher Wiederkehrperiode liegen kann. HQ_T wird auch als Wiederkehrwert bezeichnet. Die mit den parametrischen Verfahren berechneten HQ_T gelten für eine ganze Periode (stationärer Fall) bzw. das aktuelle Berichtsjahr (nicht-stationärer Fall).
Konfidenzintervall auch Vertrauensintervall	Konfidenzintervalle beschreiben die Unsicherheit des Outputs eines statistischen Modells. Sie berücksichtigen dabei den Fehler des Modells selbst, nicht aber weitere Unsicherheiten (z.B. Messfehler).
Maximum-Likelihood-Methode	Bezeichnung für ein Verfahren, das die Parameter einer Verteilungsfunktion aus den Informationen einer Stichprobe schätzt, indem der Maximum-Likelihood-Wert der Funktion maximiert wird.
Parametrische Verfahren	Ein wichtiges Ziel der Statistik ist es, mittels der Daten einer Stichprobe Aussagen über eine unbekannte Grundgesamtheit herzuleiten. Dafür eignen sich u. a. parametrische Verfahren, bei welchen angenommen wird, dass die Grundgesamtheit eine vorgegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung besitzt, welche durch einen oder mehrere Parameter eindeutig bestimmt ist. Die beiden betrachteten Verfahren stützen sich auf die Allgemeine Extremwertverteilung (BLOCK), bzw. auf die Allgemeine Pareto-Verteilung (POT), weil diese Verteilungen die Natur der Daten (Blockmaxima, bzw. Daten ab einem gewissen Schwellwert) am besten reflektieren (siehe Coles 2001).
Block-Maximum-Ansatz (BLOCK)	Der Block Maximum Ansatz (BLOCK) definiert den höchsten Wert innerhalb eines Zeitintervalls (Block, im vorliegenden Fall ein Jahr) als Extremwert (siehe Leitfaden Kapitel 2.1.1 oder Coles 2001, Kapitel 3.1).
Peaks Over Threshold (POT)	Beim Peaks-Over-Threshold-Ansatz (POT) gelten Werte als Extremereignisse, wenn sie einen gewissen Schwellenwert u (in m^3/s bzw. l/s) überschreiten. Die verwendeten Daten werden vorgängig von Clustern befreit (siehe Leitfaden Kapitel 2.1.2 oder Coles 2001, Kapitel 4.2).
Probability Plot (P-P-Plot)	Exploratives, grafisches Werkzeug, in dem die Verteilungsfunktionen zweier statistischer Variablen gegeneinander aufgetragen werden, um ihre Verteilungen zu vergleichen. Hier: aufsummierte empirische Häufigkeiten vs. die theoretische, kumulierte Verteilungsfunktion. Je besser die Daten auf der Einheitsdiagonale liegen, desto mehr kann davon ausgegangen werden, dass die Modellannahmen korrekt sind. (Enthält die gleichen Informationen wie der Q-Q-Plot, dargestellt auf einer unterschiedlichen Skala.)

Quantile Plot (Q-Q-Plot)	Exploratives, grafisches Werkzeug, in dem die Quantile zweier statistischer Variablen gegeneinander aufgetragen werden, um ihre Verteilung zu vergleichen. Hier: beobachtete Abflusswerte vs. die mit Hilfe eines Modells berechneten Abflussdaten. Stimmen die empirischen und theoretischen Quantile annähernd überein, liegen die Werte in der Grafik nahe der Diagonalen. (Enthält die gleichen Informationen wie der P-P-Plot, dargestellt auf einer unterschiedlichen Skala.) Hinweis: Die theoretischen Quantile werden aus der Umkehrfunktion der Verteilungsfunktion berechnet. Für den direkten, optischen Vergleich mit dem entsprechenden Probability Plot sind die Achsen des Quantile Plots daher vertauscht.
Stationarität	Beobachtet man bei einer Messstation, dass sich das Abflussverhalten über die Beobachtungsperiode nicht wesentlich ändert, so empfiehlt es sich, ein stationäres Modell zu verwenden. Im stationären Fall wird angenommen, dass alle Parameter der Verteilungsfunktion über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant sind.
Nicht-Stationarität	Nicht-stationäre Modelle werden verwendet, um ein Abflussverhalten zu beschreiben, welches zeitlichen Änderungen unterliegt. Solche Änderungen können durch einen Wechsel der Messgeräte und Messmethoden, durch Stationsverlagerung, durch Gerinneveränderungen und durch anthropogene Einflüsse verursacht werden. Bei anthropogenen Einflüssen können die Veränderungen meist nicht einem einzelnen Eingriff zugeordnet werden, sondern sie bestehen aus Überlagerungen von verschiedenen, wasserwirtschaftlichen Massnahmen. Werden zeitliche Veränderungen der Daten vermutet, werden die Parameter der entsprechenden Verteilungsfunktion zeitlich abhängig modelliert. Dies führt dazu, dass sich auch die berechneten HQ_T über die Zeit verändern.
Verteilungsfunktion	Beschreibt die Grundgesamtheit der Hochwasserabflüsse aus einem Einzugsgebiet. Die Verteilungsfunktion gibt die Wahrscheinlichkeiten an, dass ein Hochwasserabfluss HQ in einem Jahr erreicht oder unterschritten wird.
Empirische Häufigkeitsverteilung	Kann aus der gewählten Stichprobe bestimmt werden.
Theoretische Wahrscheinlichkeitsverteilung	Schliesst von der gewählten Stichprobe auf die Grundgesamtheit. Es gibt viele verschiedene theoretische Verteilungsfunktionen, welche die Voraussetzungen für die Anwendung in der Hochwasserstatistik erfüllen, aber keine, die für alle Stichproben die besten Resultate gewährleistet.
Verteilungsparameter	
κ Formparameter (kappa)	Der Formparameter κ steht in direktem Zusammenhang mit der sogenannten "Heaviness of Tail" der Verteilung. Als Tail wird der Bereich mit den Ausreißern nach oben bezeichnet. Ist κ gross, so werden viele solche Ausreisser angenommen. Bei negativen Werten für κ hingegen wird angenommen, dass für die Extremwerte eine obere Schranke existiert.
λ Ereignisrate (lambda)	Beim POT-Ansatz entspricht die Ereignisrate λ der mittleren Anzahl Schwellenwertüberschreitungen während des Zeitintervalls von einem Jahr.
μ Lageparameter (mu)	Beschreibt die mittlere Lage der Stichprobenelemente (hier: Abflussmessungen) in Bezug auf die Messskala (hier: m^3/s bzw. l/s).