



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

# HOCHWASSERSTATISTIK

## STATIONSBERICHT

# Aare - Murgenthal

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Datengrundlage</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Resultate der parametrischen Verfahren</b>	<b>5</b>
2.1	Block Maximum Ansatz (BLOCK) . . . . .	6
2.1.1	Gesamte Auswertungsperiode: 1916-2015 . . . . .	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
2.2	Peaks Over Threshold Ansatz (POT) . . . . .	11
2.2.1	Auswertungsperiode POT: 1974-2015 . . . . .	11
2.2.1.a	Stationäre Modellvariante . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Vergleich der verschiedenen Resultate</b>	<b>14</b>
3.1	Beurteilung der unterschiedlichen Auswertungsperioden . . . . .	14
3.2	Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>16</b>
	<b>Anhang</b>	<b>17</b>
A	Bestimmung des Schwellenwerts zur Abgrenzung von Extremwerten . . . . .	17
B	Glossar . . . . .	18

# 1 Datengrundlage

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

Vorhandene Daten	seit	bis
Digitale Monatsmaxima	01.01.1916	31.12.2015
Digitale Tagesmaxima	01.01.1974	31.12.2015

Ein Limnigraph wurde am 22. September 1898 in Betrieb genommen, die Abflussdaten sind allerdings erst ab 1916 verfügbar, da vorher nur der Wasserstand aufgezeichnet wurde.

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	09.08.2007	1262 m <sup>3</sup> /s
Grösstes Tagesmaximum	09.08.2007	1262 m <sup>3</sup> /s

Die Abflussdaten können folgendermassen charakterisiert werden:

Abflussverlauf	Beschreibung
Abflussregime	Nicht eindeutig klassifizierbar: Die Abflussmaxima im Sommer liegen im unteren Bereich der Werte höher als im Winter (s. Abbildung 3)
Ausprägung der Saisonalität	In Monats- und Tagesmaxima deutlich zu erkennen (Abbildung 3 und Abbildung 4)
Beeinflussung	Beeinflussung durch diverse Laufkraftwerke oberhalb der Station, z.B. Wynau (1896), Schwarzhäusern (1923) und Bannwil (1970) und diverse Kraftwerke oberhalb des Bielersees, sowie die Regulierung der Jurarandseen. 2. Juragewässerkorrektion 1962-1973, neues Regulierreglement nach 1982, Einführung der Prognoseregulierung ab 2008 (s. auch <a href="#">Regulierung Jurarandseen</a> ).

Die meisten Jahresmaxima bewegen sich zwischen ungefähr 600 und 850 m<sup>3</sup>/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 1916 bis 1970 wurden nur 8 Jahresmaxima mit einem Abfluss >800 m<sup>3</sup>/s beobachtet, seither wurden 27 verzeichnet. Nach 1970 sind die Jahresmaxima im Mittel fast 150 m<sup>3</sup>/s grösser als zuvor, auch wenn in Einzeljahren nach wie vor Jahresmaxima unter 600 m<sup>3</sup>/s auftreten können.

Die Bruchpunktanalyse ergibt einen signifikanten Bruchpunkt ab 1977 (Konfidenzintervall 1968-1985). Dieser Zeitpunkt fällt in etwa mit dem Ende der 2. Juragewässerkorrektion 1962-1973 zusammen. Aus diesem Grund wird die Datenreihe ab 1974 unterteilt.

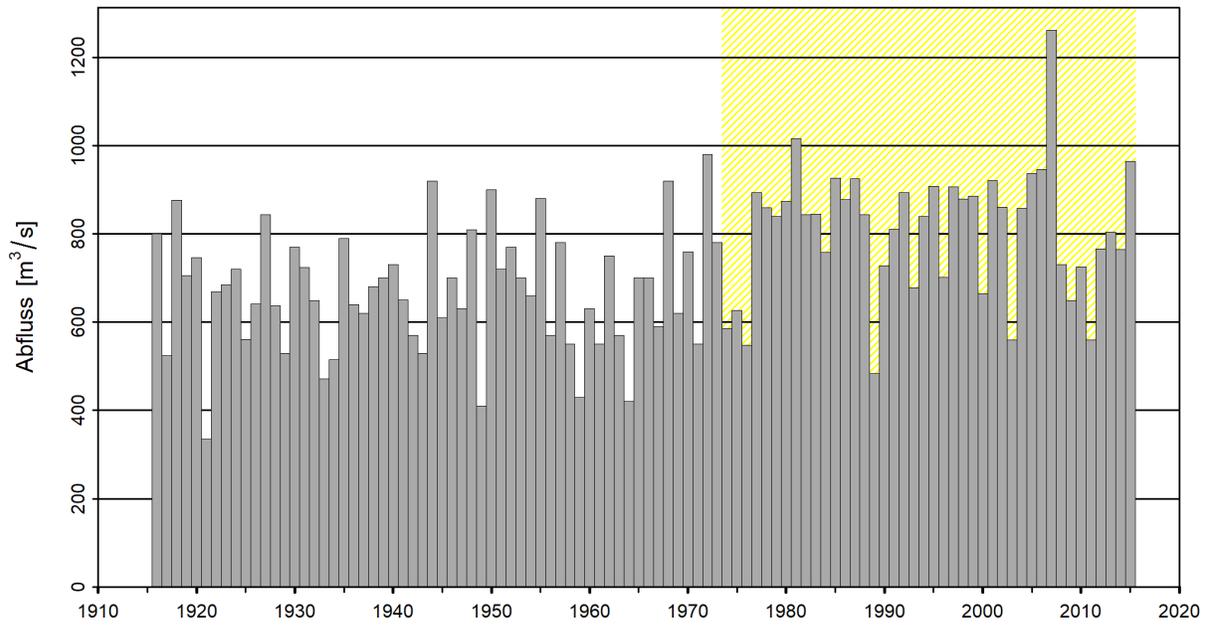


Abbildung 1: Zeitreihe der Jahresmaxima [m<sup>3</sup>/s] (1916 - 2015, dunkelgrau: verwendete Jahresmaxima der gesamten Auswertungsperiode ab 1916). Gelb schraffiert: Auswertungsperiode ab Bruchpunkt (1974)

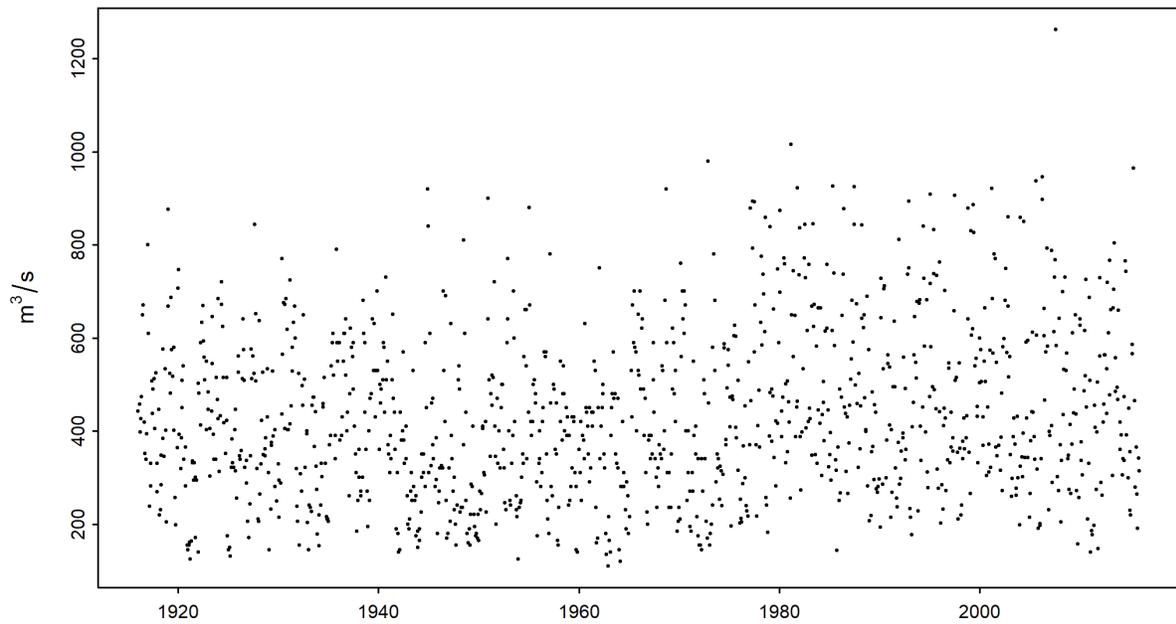


Abbildung 2: Zeitreihe der Monatsmaxima [m<sup>3</sup>/s] (01.01.1916 - 31.12.2015)

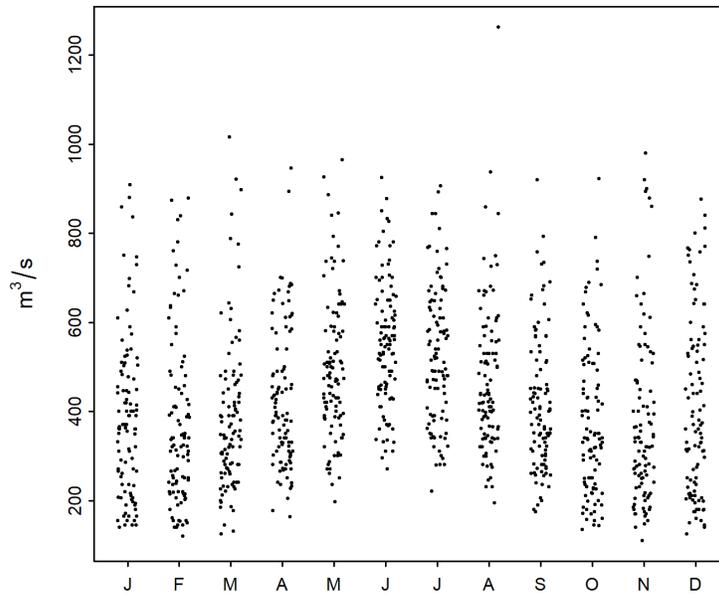


Abbildung 3: Saisonaler Verlauf der Monatsmaxima [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (01.01.1916 - 31.12.2015)

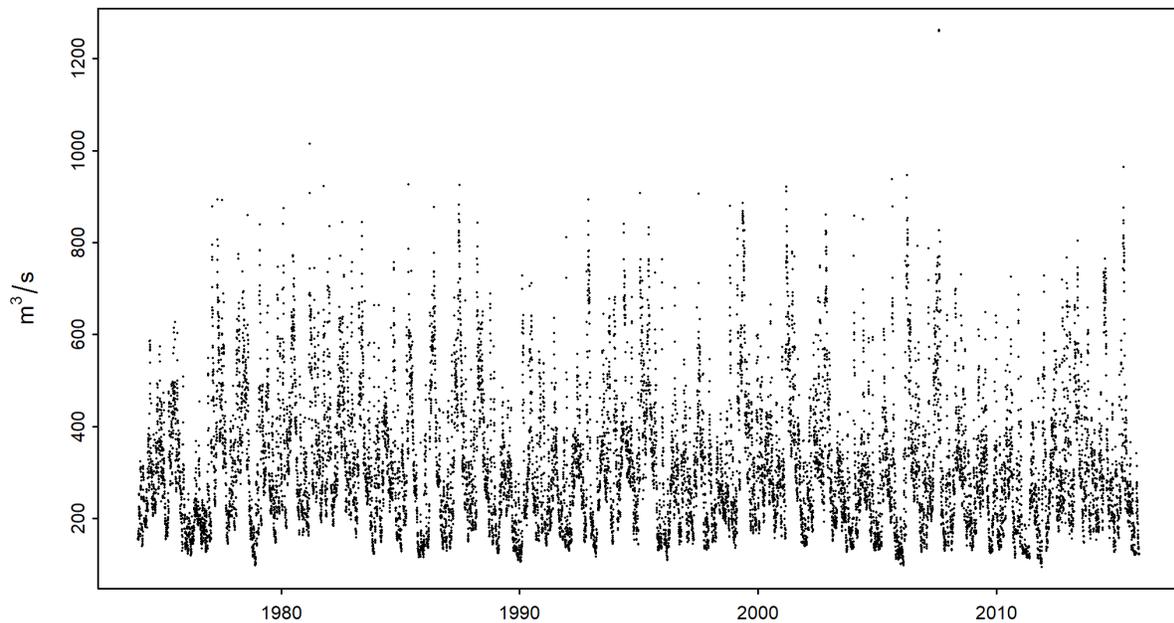


Abbildung 4: Zeitreihe der maximalen Tagesabflüsse [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (01.01.1974 - 31.12.2015)

#### Fazit für die Modellvarianten

Veränderungen	Auswirkungen	Folgerungen
2. Juragewässerkorrektur 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)	$\mu$ Lageparameter	Jahresmaxima
	$\sigma$ Skalenparameter	
	$\kappa$ Formparameter	
Peaks Over Threshold (POT)	$\lambda$ Ereignisrate	Tagesmaxima
	$\sigma$ Skalenparameter <sup>1</sup>	
	$\kappa$ 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.  $\mu$  Lageparameter (mu),  $\sigma$  Skalenparameter (sigma),  $\kappa$  Formparameter (kappa)

Modellvarianten BLOCK			
Name	Beschreibung	Parameter (t: Jahr)	Anzahl Parameter
stat	Stationäre Variante	$\mu, \sigma, \kappa$	3
mul	Linearer Trend von $\mu$	$\mu = a_1 + a_2 * t, \sigma, \kappa$	4
muq	Quadratischer Trend von $\mu$	$\mu = a_1 + a_2 * t + a_3 * t^2, \sigma, \kappa$	5
sigl	Linearer Trend von $\sigma$	$\mu, \sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	4
musigl	Linearer Trend von $\mu$ und $\sigma$	$\mu = a_1 + a_2 * t, \sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	5
mujump	Nicht-kontinuierliche Veränderung von $\mu$ 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.  $\sigma$  Lageparameter (sigma),  $\kappa$  Formparameter (kappa)

Modellvarianten POT			
Name	Beschreibung	Parameter (t: Jahr)	Anzahl Parameter
stat	Stationäre Variante	$\sigma, \kappa$	2
sigl	Linearer Trend von $\sigma$	$\sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	3
sigjump	Nicht-kontinuierliche Veränderung von $\sigma$ 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.

<sup>1</sup>Der Skalenparameter  $\sigma$  des POT-Ansatzes ist numerisch nicht identisch mit dem  $\sigma$  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:

Auswertungs- periode	Beschreibung	ausgewählte Modellvariante	Kapitel
1916 - 2015	gesamte Auswertungsperiode	stat mujump	Kapitel 2.1.1.a Kapitel 2.1.1.b
1974 - 2015	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt	stat	Kapitel 2.1.2.a

Für die Periode ab Bruchpunkt zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen der stationären und den nicht stationären Modellvarianten.<sup>2</sup>

### 2.1.1 Gesamte Auswertungsperiode: 1916-2015

#### 2.1.1.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1916-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte $n$	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
100	666.99	151.87	-0.1975

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

<sup>2</sup>Als Zeitpunkt  $t_0$  für das Modell „mujump“ wird das Jahr 1983 gewählt.

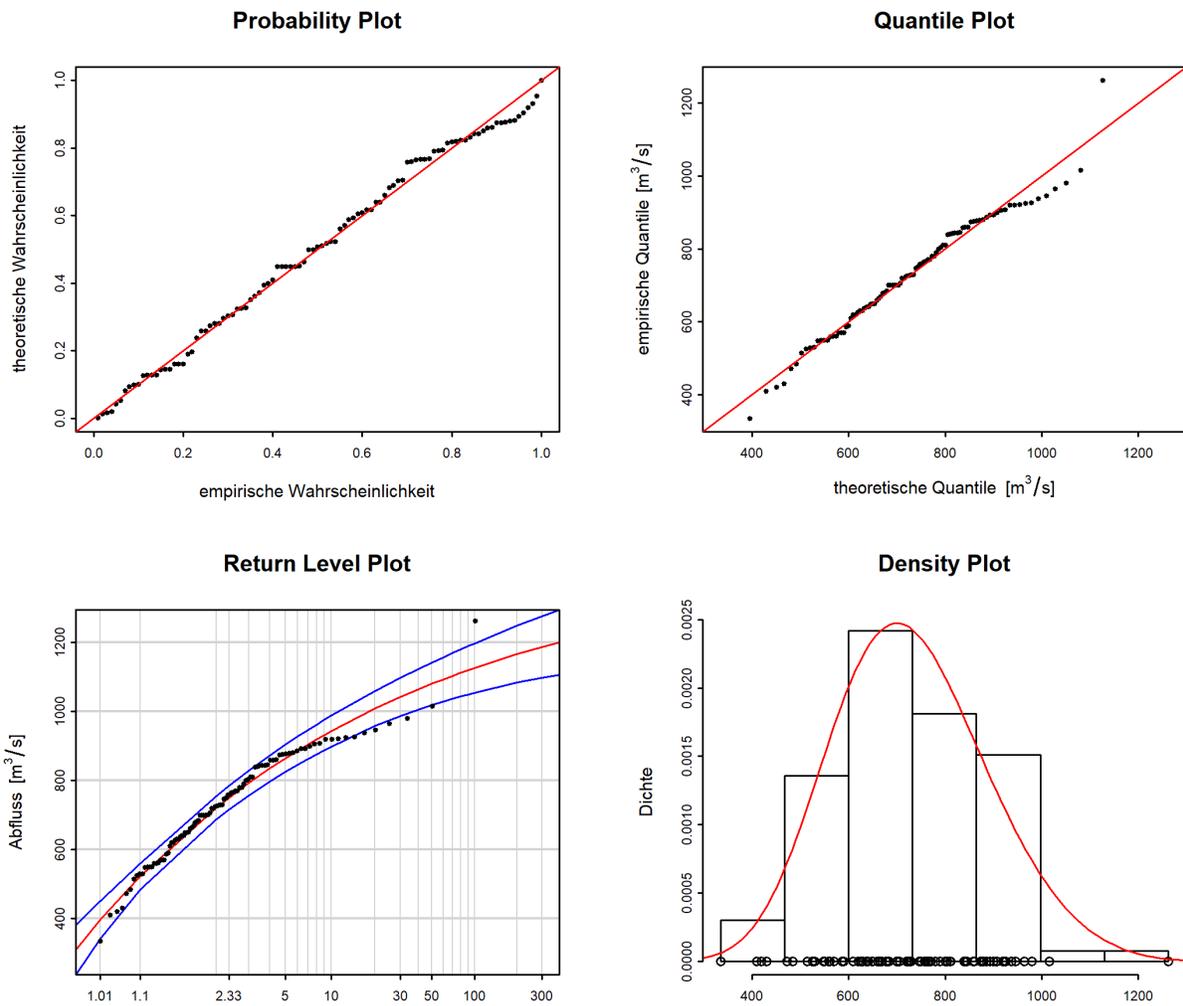


Abbildung 5: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1916-2015)

**Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 5):**

Kriterien	Bewertung <sup>3</sup>	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	schlecht	kleinster Wert überschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	Werte überschätzt, grösster Wert stark unterschätzt
Konfidenzintervall	klein	-

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die gesamte Auswertungsperiode 1916-2015 (inkl. 95% - Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ <sub>T</sub>	untere Konfidenzgrenze [m <sup>3</sup> /s]	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	obere Konfidenzgrenze [m <sup>3</sup> /s]
HQ <sub>2</sub>	687	721	754
HQ <sub>10</sub>	898	943	988
HQ <sub>30</sub>	987	1042	1097
HQ <sub>100</sub>	1055	1126	1197
HQ <sub>300</sub>	1097	1187	1276

<sup>3</sup>Siehe [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.<sup>4</sup>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	1916-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}^5$		Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
	$a_1$	$a_2$		
100	615.87	139.94	139.51	-0.2223

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

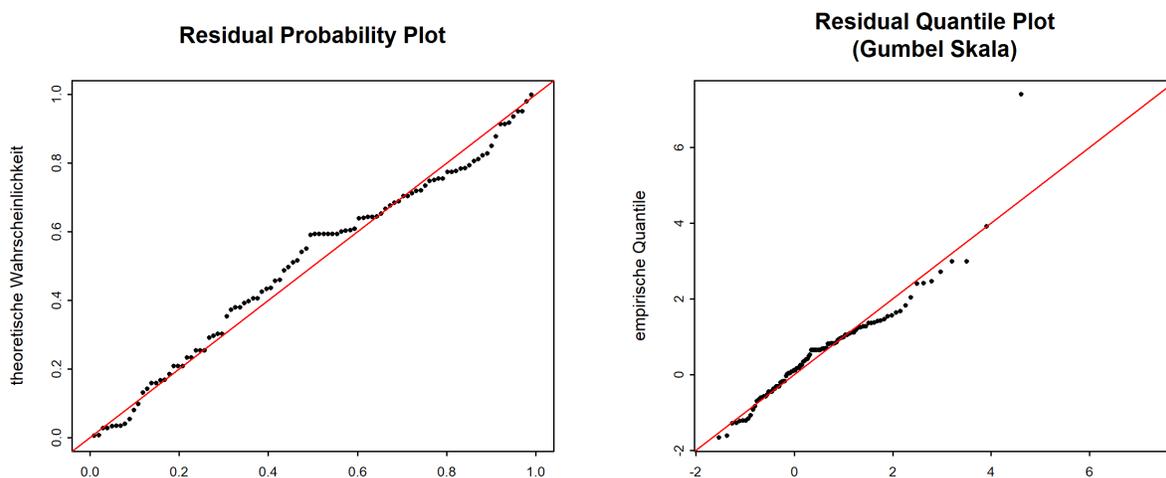


Abbildung 6: Diagnostikplots der Modellvariante „mujump1974“ des BLOCK-Ansatzes (1916-2015)

#### Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 6):

Kriterien	Bewertung <sup>6</sup>	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	grösster Wert unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	etwas besser	deutliche Verbesserung im unteren und oberen Bereich, aber grösster Wert immer noch schlecht

<sup>4</sup>Als Zeitpunkt  $t_0$  für das Modell „mujump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1974 gewählt (siehe Kapitel 1).

<sup>5</sup> $\hat{\mu} = a_1 + a_2 * i$ ,  $i = 0$  für  $t < t_0$ ,  $i = 1$  für  $t \geq t_0$  (s. Tabelle 1)

<sup>6</sup>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 1916-2015 (inkl. 95%-Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ <sub>T</sub>	untere Konfidenzgrenze [m <sup>3</sup> /s]	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	obere Konfidenzgrenze [m <sup>3</sup> /s]
HQ <sub>2</sub>	759	805	851
HQ <sub>10</sub>	953	1003	1053
HQ <sub>30</sub>	1034	1088	1142
HQ <sub>100</sub>	1095	1158	1220
HQ <sub>300</sub>	1133	1207	1280

In Abbildung 7 ist die Veränderung des mit dem Modell „mujump1974“ berechneten HQ<sub>100</sub> zwischen 1916 und 2015 dargestellt.

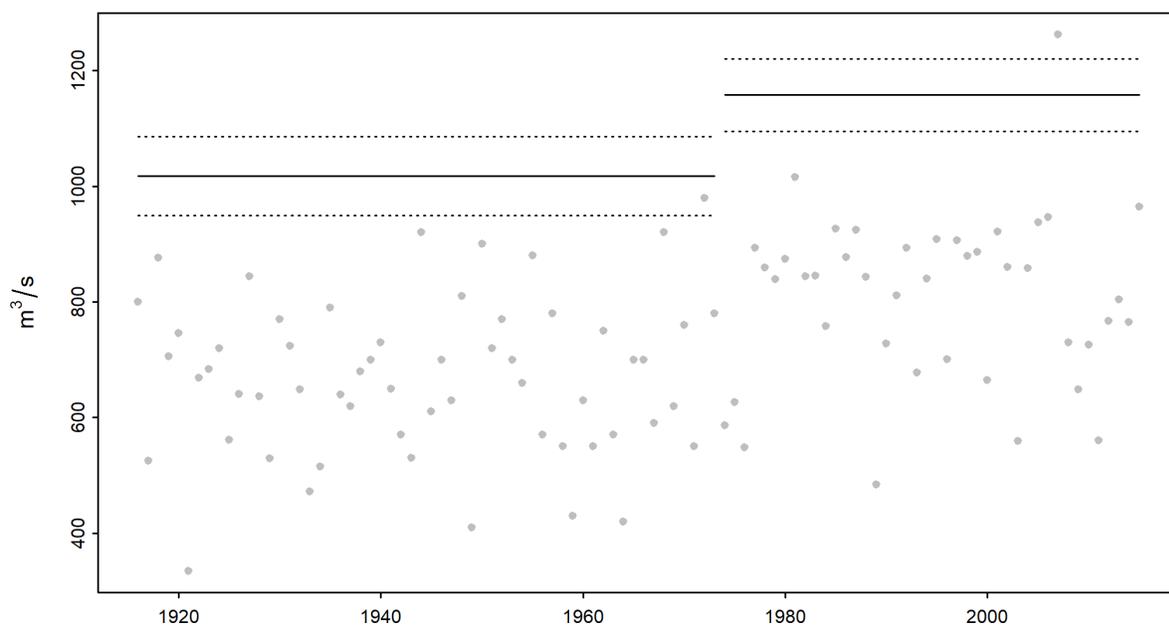


Abbildung 7: Veränderung der mit der Modellvariante „mujump1974“ berechneten HQ<sub>100</sub> (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1916-2015

## 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	751.42	145.88	-0.2076

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

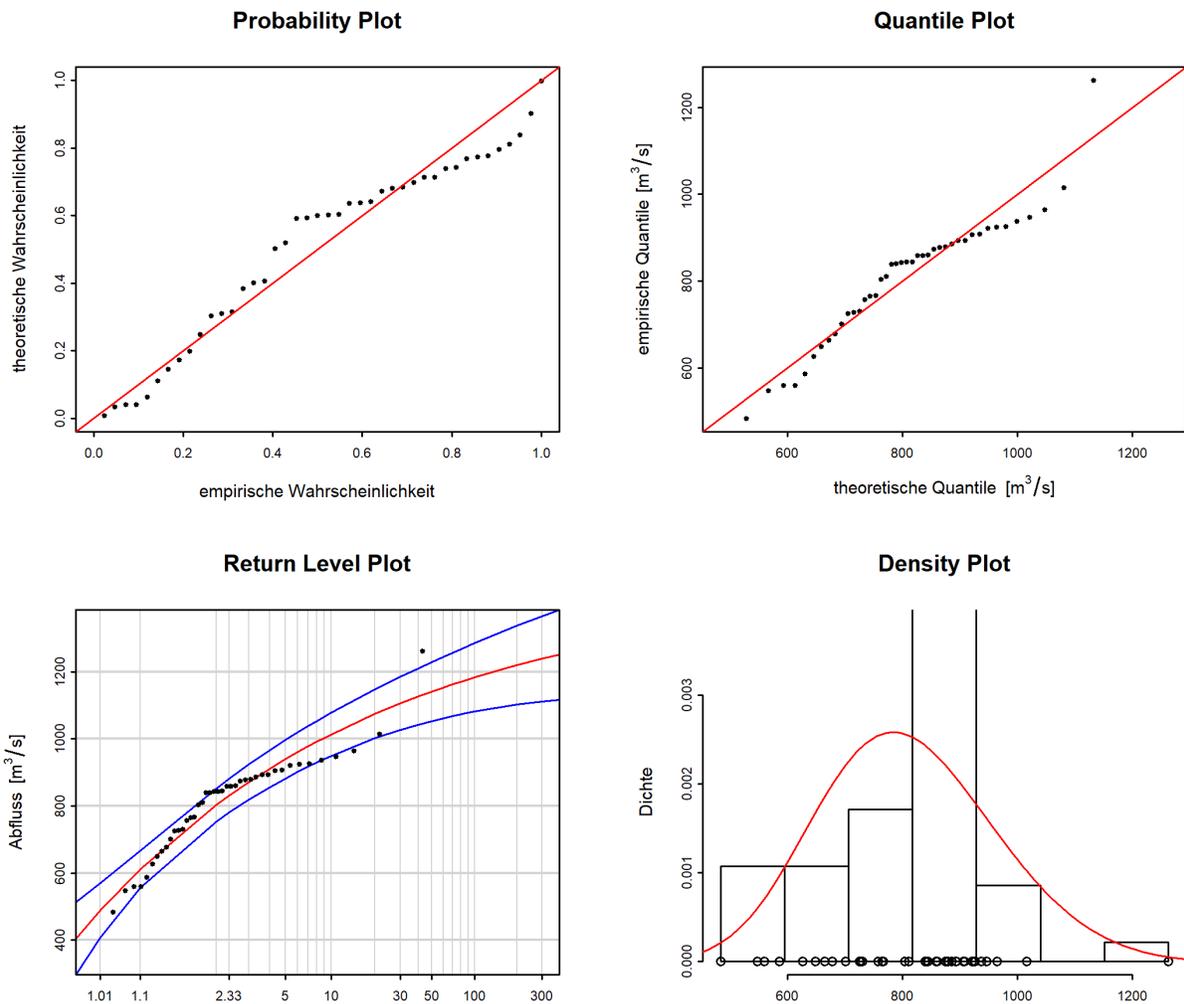


Abbildung 8: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1974-2015)

### Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 8):

Kriterien	Bewertung <sup>7</sup>	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel-schlecht	kleinere Werte über-, grössere Werte unterschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	schlecht	Werte stark überschätzt
Anpassung oberer Bereich	schlecht	grösster Wert stark 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 <sub>T</sub>	untere Konfidenzgrenze [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ <sub>2</sub>	754	803	852
HQ <sub>10</sub>	949	1014	1078
HQ <sub>30</sub>	1027	1106	1185
HQ <sub>100</sub>	1082	1184	1286
HQ <sub>300</sub>	1112	1239	1366

<sup>7</sup>Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

## 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 - Murgenthal wird der Zeitabstand  $L$  zwischen zwei unabhängigen Ereignissen auf den Mindestwert von 14 Tagen festgelegt.

Folgende Modellvarianten des POT-Ansatzes wurden analysiert:

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

Für die Auswertungsperiode POT zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen der stationären und den nicht stationären Modellvarianten.<sup>8</sup>

### 2.2.1 Auswertungsperiode POT: 1974-2015

Im vorliegenden Fall wurde als Schwellenwert  $u$   $670 \text{ m}^3/\text{s}$  gewählt (siehe Anhang A). Abbildung 9 zeigt die effektiv verwendeten Extremereignisse.

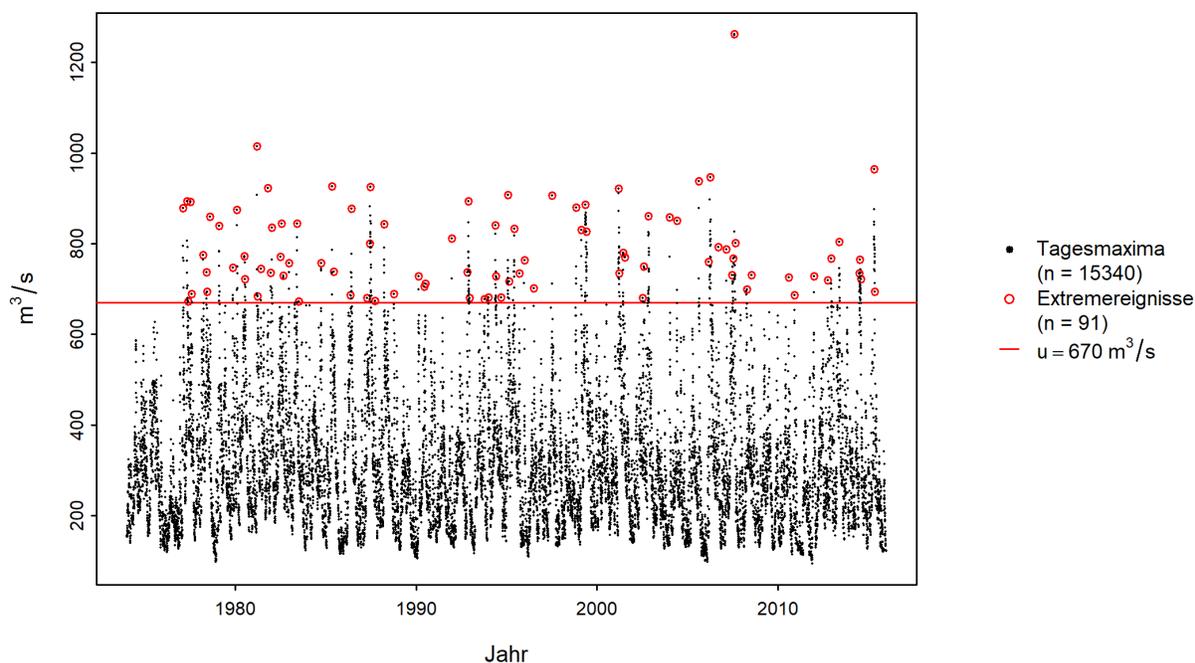


Abbildung 9: Auswahl der für den POT-Ansatz verwendeten Extremereignisse

#### 2.2.1.a Stationäre Modellvariante

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

<sup>8</sup>Als Zeitpunkt  $t_0$  für das Modell „sigjump“ wird das Jahr 1983 gewählt.

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Schwellenwert	Anzahl Werte	Ereignisrate	Skalenparameter	Formparameter
$u$	$n$	$\hat{\lambda}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\kappa}$
670 m <sup>3</sup> /s	91	2.17	136.05	-0.1518

Die Güte der Modellvariante „stat“ über die Auswertungsperiode POT wird grafisch anhand der in Abbildung 10 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

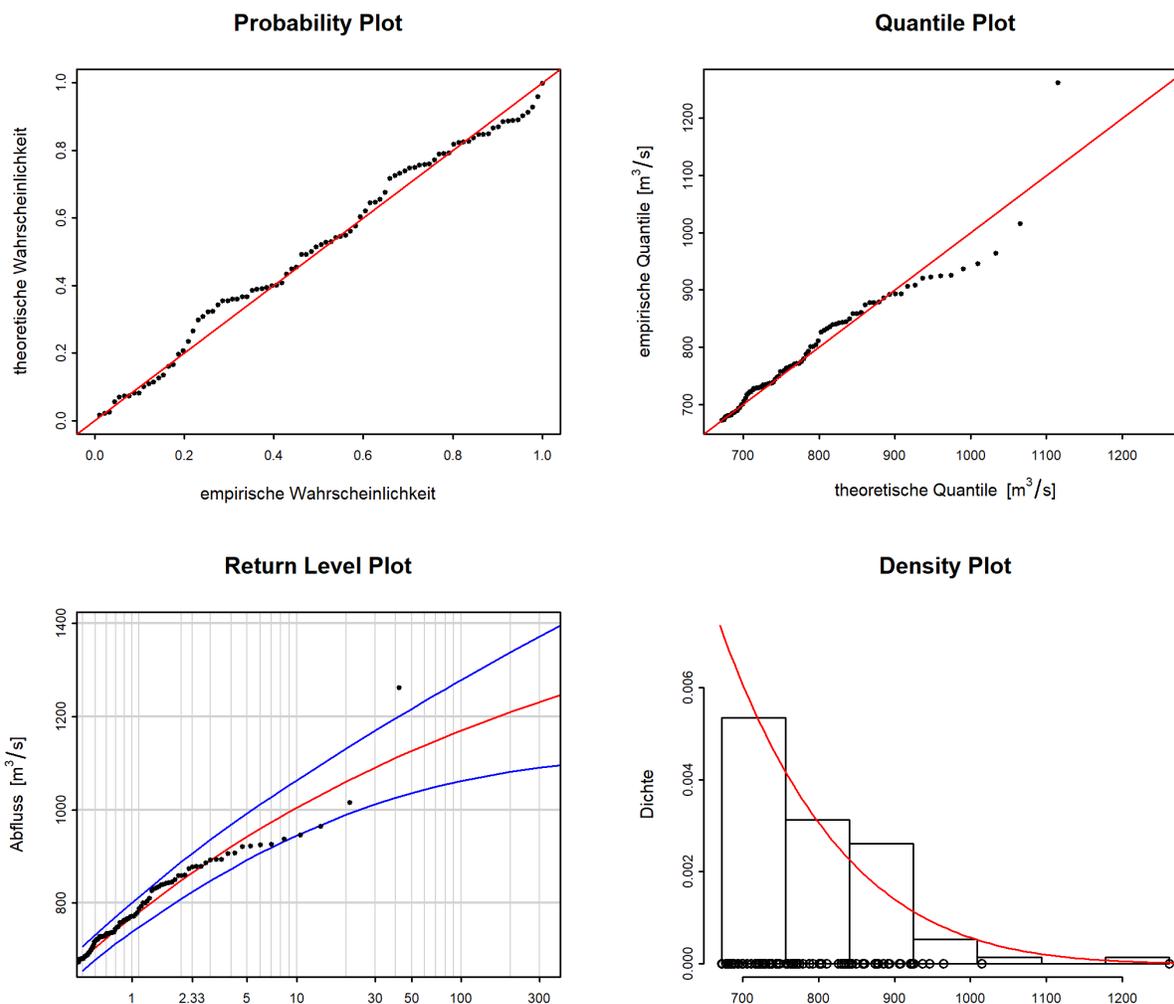


Abbildung 10: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

#### Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 10):

Kriterien	Bewertung <sup>9</sup>	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut-mittel	-
Anpassung mittlerer Bereich	schlecht	Werte überschätzt
Anpassung oberer Bereich	schlecht	grösster Wert stark unterschätzt
Konfidenzintervall	klein	-

<sup>9</sup>Siehe [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):

<b>HQ<sub>T</sub></b>	<b>untere Konfidenzgrenze [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Abfluss [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>obere Konfidenzgrenze [m<sup>3</sup>/s]</b>
HQ <sub>2</sub>	809	849	888
HQ <sub>10</sub>	945	1004	1064
HQ <sub>30</sub>	1012	1091	1169
HQ <sub>100</sub>	1062	1170	1278
HQ <sub>300</sub>	1090	1231	1372

### 3 Vergleich der verschiedenen Resultate

Abbildung 11 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 1916 - 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	deutlich höhere Werte	minimal grösser

Nach 1974 wurden durchschnittlich höhere Jahreshochwasser beobachtet. Dies führt zu höheren  $HQ_T$  in der Periode ab Bruchpunkt. Aufgrund der geringeren Datenmenge ist das Konfidenzintervall bei der Periode ab Bruchpunkt, insbesondere bei grösseren Wiederkehrperioden, deutlich 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 11 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:

Mit Ausnahme des  $HQ_2$  liegen die  $HQ_T$ -Werte des POT-Ansatzes leicht unter jenen des BLOCK-Ansatzes der Vergleichsperiode. Sie sind aber durchwegs höher als die Werte des BLOCK-Ansatzes für die gesamte Auswertungsperiode.

##### Differenzen der berechneten Konfidenzintervalle der beiden Ansätze:

Allgemein nehmen die Unsicherheiten und somit die Konfidenzintervalle zu, je grösser die Wiederkehrperiode  $T$  ist. Die Konfidenzintervalle der verschiedenen Ansätze unterscheiden sich nur geringfügig.

##### Vergleich von stationären und nicht stationären Varianten:

Beim BLOCK-Ansatz kann mit einer nicht stationären Variante die Modellgüte nur in einem sehr geringen Ausmass verbessert werden, obwohl die Zunahme grosser Hochwasser in den letzten Jahren in das Modell einbezogen wird. Die nicht stationäre Modellvariante führt zu deutlich höheren  $HQ_T$ . Eine Aussage über die zukünftige Entwicklung ist aufgrund der Abhängigkeit von der Seeregulierung schwierig.

Eine Folge der Seeregulierung ist wohl auch die Häufung von Jahresmaxima im Bereich um  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  (besonders deutlich erkennbar im Density Plot in Abbildung 8), was eine Modellanpassung beim BLOCK-Ansatz sehr schwierig macht. Grund für das Auftreten der hohen Anzahl genau dieser Werte ist möglicherweise die sogenannte Murgenthaler Bedingung (siehe dazu [Regulierung Jurarandseen](#)). Beim POT-Ansatz kommt die schlechte Modellanpassung eher aufgrund des Ausreissers im Jahr 2007 zustande.

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.

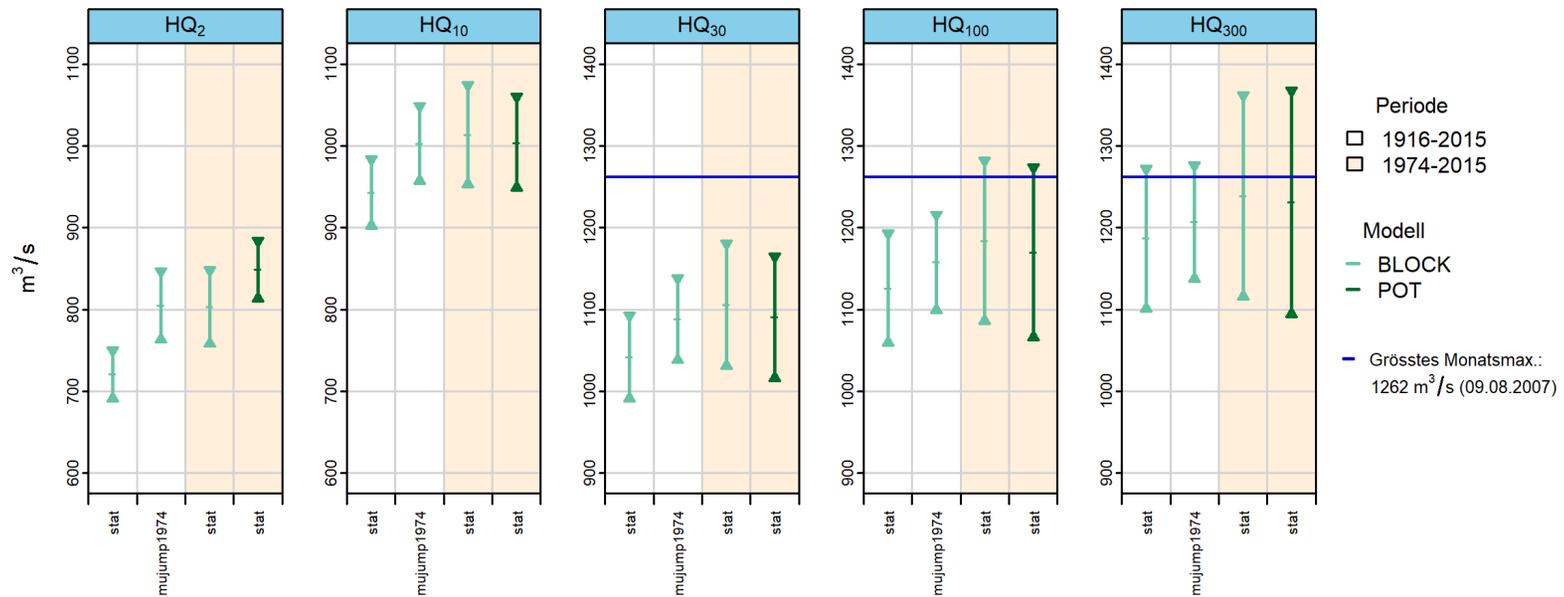


Abbildung 11:  $HQ_T$  [ $m^3/s$ ] inkl. 95%-Konfidenzintervalle, berechnet mit den stationären sowie den jeweils bestangepassten Modellvarianten des BLOCK- und POT-Ansatzes für das Jahr 2015

Auswertungsperiode	Verfahren	Anpassung			Bemerkung
1916 - 2015	BLOCK stat	schlecht	gut	schlecht	Werte überschätzt, grösster Wert stark unterschätzt
	BLOCK mujump1974	gut	gut	schlecht	grösster Wert unterschätzt deutliche Verbesserung im unteren und oberen Bereich, aber grösster Wert immer noch schlecht
1974 - 2015	BLOCK stat	mittel- schlecht	schlecht	schlecht	grösster Wert stark unterschätzt
1974 - 2015	POT stat	gut- mittel	schlecht	schlecht	grösster Wert stark unterschätzt

## 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. Hef. 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  $670 \text{ m}^3/\text{s}$  festgelegt (siehe Abbildung 12).

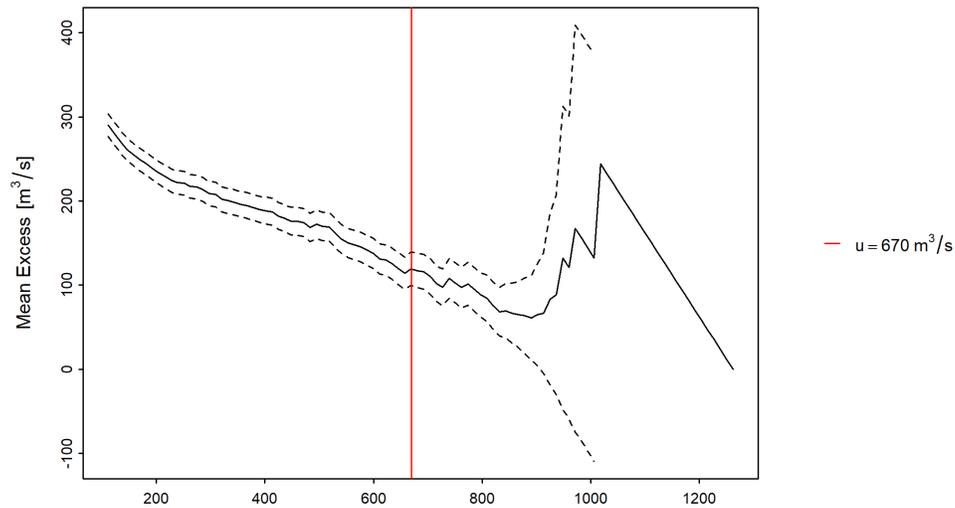


Abbildung 12: „mean residual life plot“ mit gewählttem Schwellenwert  $u$  (rote Linie) mean Excess (schwarze Linie), 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien)

## 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 <a href="#">Leitfaden</a> 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 <a href="#">Leitfaden</a> 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	
$\kappa$ Formparameter (kappa)	Der Formparameter $\kappa$ steht in direktem Zusammenhang mit der sogenannten "Heaviness of Tail" der Verteilung. Als Tail wird der Bereich mit den Ausreißern nach oben bezeichnet. Ist $\kappa$ gross, so werden viele solche Ausreisser angenommen. Bei negativen Werten für $\kappa$ hingegen wird angenommen, dass für die Extremwerte eine obere Schranke existiert.
$\lambda$ Ereignisrate (lambda)	Beim POT-Ansatz entspricht die Ereignisrate $\lambda$ der mittleren Anzahl Schwellenwertüberschreitungen während des Zeitintervalls von einem Jahr.
$\mu$ Lageparameter (mu)	Beschreibt die mittlere Lage der Stichprobenelemente (hier: Abflussmessungen) in Bezug auf die Messskala (hier: $m^3/s$ bzw. $l/s$ ).