



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

HOCHWASSERSTATISTIK

STATIONSBERICHT

Aare - Bern, Schönau

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

Inhaltsverzeichnis

1	Datengrundlage	2
2	Resultate der parametrischen Verfahren	6
2.1	Block Maximum Ansatz (BLOCK)	7
2.1.1	Gesamte Auswertungsperiode: 1918-2015	7
2.1.1.a	Stationäre Modellvariante	7
2.1.1.b	Nicht stationäre Modellvariante	9
2.1.2	Vergleichsperiode: 1974-2015	10
2.1.2.a	Stationäre Modellvariante	10
2.2	Peaks Over Threshold Ansatz (POT)	12
2.2.1	Auswertungsperiode POT: 1974-2015	12
2.2.1.a	Stationäre Modellvariante	12
2.2.1.b	Nicht stationäre Modellvariante	14
3	Vergleich der verschiedenen Resultate	16
3.1	Beurteilung der unterschiedlichen Auswertungsperioden	16
3.2	Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze	16
4	Literatur	18
Anhang		19
A	Bestimmung des Schwellenwerts zur Abgrenzung von Extremwerten	19
B	Glossar	20

1 Datengrundlage

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

Vorhandene Daten	seit	bis
Digitale Monatsmaxima	01.02.1917	31.12.2015
Digitale Tagesmaxima	01.01.1974	31.12.2015

Ein Limnigraph wurde am 03. Februar 1917 in Betrieb genommen. Von Messbeginn bis 31.12.1970 befand sich die Abflussmessstation in Bern, Dählhölzli, seit 1.1.1971 ist sie in Bern, Schönau. Die Messreihen wurden aneinandergehängt, um eine kontinuierliche Reihe zu erhalten, welche für den vorliegenden Stationsbericht verwendet wird.

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	16.05.1999	613 m ³ /s
Grösstes Tagesmaximum	16.05.1999	613 m ³ /s

Die Abflussdaten können folgendermassen charakterisiert werden:

Abflussverlauf	Beschreibung
Abflussregime	Nicht eindeutig klassifizierbar: Hohe Abflüsse im Sommer, tiefe Abflüsse im Winter
Ausprägung der Saisonalität	In Monats- und Tagesmaxima deutlich zu erkennen (Abbildung 3 und Abbildung 4)
Beeinflussung	Beeinflussung durch die Kraftwerke Oberhasli (ab 1929) sowie die Brienzer- und Thunersee-Regulierung. Inbetriebnahme Hochwasser-Entlastungsstollen Thunersee im Mai 2009. Aufgrund der Überprägung des Abflussregimes durch die Seen ist die Beeinflussung durch die Kraftwerke in den Daten nicht erkennbar. Auch die Auswirkungen der Seeregulierungen sowie der Einfluss des Hochwasser-Entlastungsstollens in jüngster Zeit sind anhand der Daten schwierig abzuschätzen (siehe Abbildung 2).

Die Jahresmaxima betragen in den meisten Jahren zwischen ungefähr 250 und 450 m³/s, in den Jahren 1999, 2004, 2005, 2007 und 2015 wurden allerdings deutlich höhere Abflüsse beobachtet. Seit 1999 scheinen die Jahresmaxima insgesamt grösser zu sein. Die Bruchpunktanalyse ergibt einen signifikanten Bruchpunkt um 1993 (Konfidenzintervall 1973-1997). Der Bruchpunkt lässt sich nicht auf eine bestimmte Ursache zurückführen. Sowohl Veränderungen im Kraftwerksbetrieb oder bei den Seeregulierungen wie auch klimatische Veränderungen könnten die Zunahme der Maxima verursacht haben. Aus diesem Grund wird auf eine Auswertungsperiode ab Bruchpunkt verzichtet.

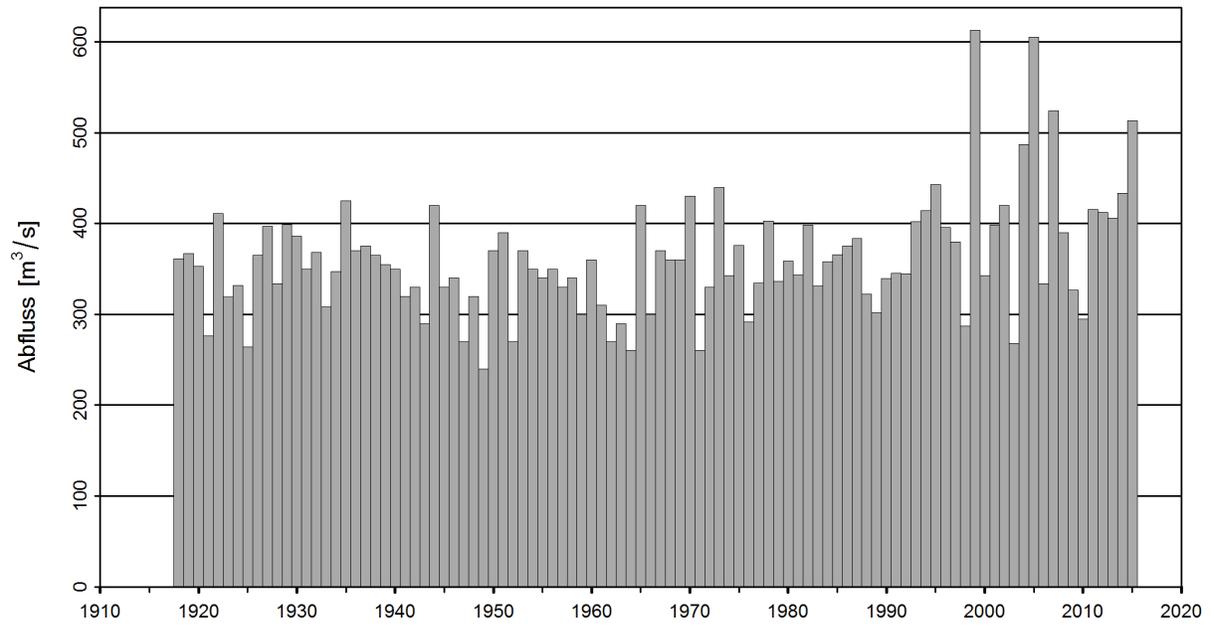


Abbildung 1: Zeitreihe der Jahresmaxima [m³/s] (1918 - 2015, dunkelgrau: verwendete Jahresmaxima)

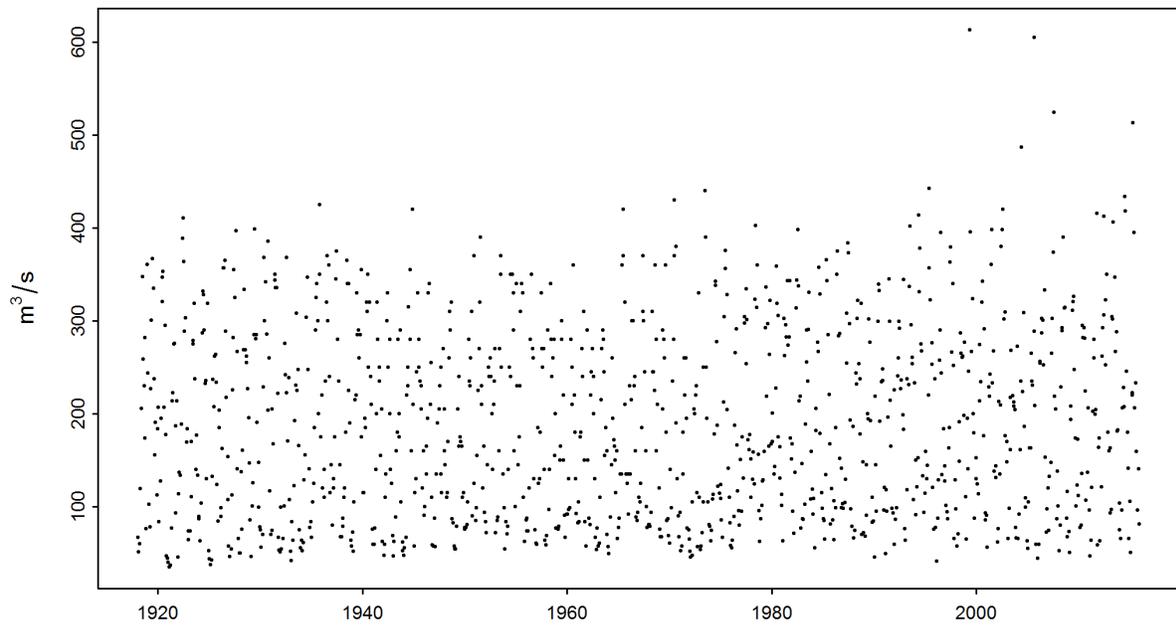


Abbildung 2: Zeitreihe der Monatsmaxima [m³/s] (01.01.1918 - 31.12.2015)

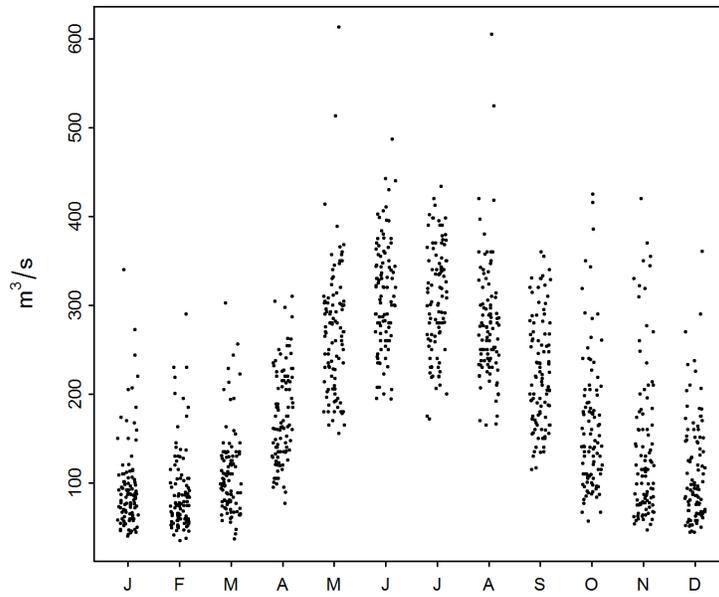


Abbildung 3: Saisonaler Verlauf der Monatsmaxima [m³/s] (01.01.1918 - 31.12.2015)

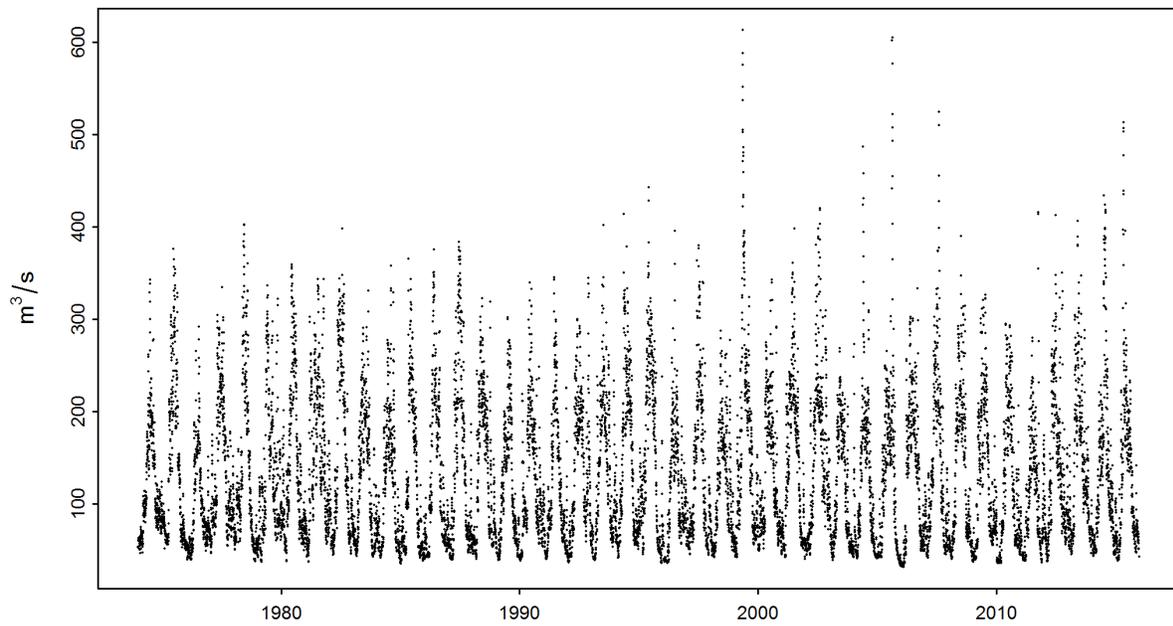


Abbildung 4: Zeitreihe der maximalen Tagesabflüsse [m³/s] (01.01.1974 - 31.12.2015)

Fazit für die Modellvarianten

Veränderungen	Auswirkungen	Folgerungen
Stauseen ab 1929, Seenregulierung	grösste Monatsmaxima werden ab 1999 grösser	Vermutlich nicht stationär

Bruchpunktanalyse

Jahr	Signifikanter Bruchpunkt	Folgerungen
1992 / 1993	ja	Keine Unterteilung der Auswertungsperiode, da nicht aus Unterlagen zu Station und Einzugsgebiet begründbar. Verwendung 1993 als t_0 (siehe Kapitel 2).

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:

Auswertungs- periode	Beschreibung	ausgewählte Modellvariante	Kapitel
1918 - 2015	gesamte Auswertungsperiode	stat mujump	Kapitel 2.1.1.a Kapitel 2.1.1.b
1974 - 2015	Vergleichsperiode	stat	Kapitel 2.1.2.a

2.1.1 Gesamte Auswertungsperiode: 1918-2015

2.1.1.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1918-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
98	333.33	52.07	-0.0403

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

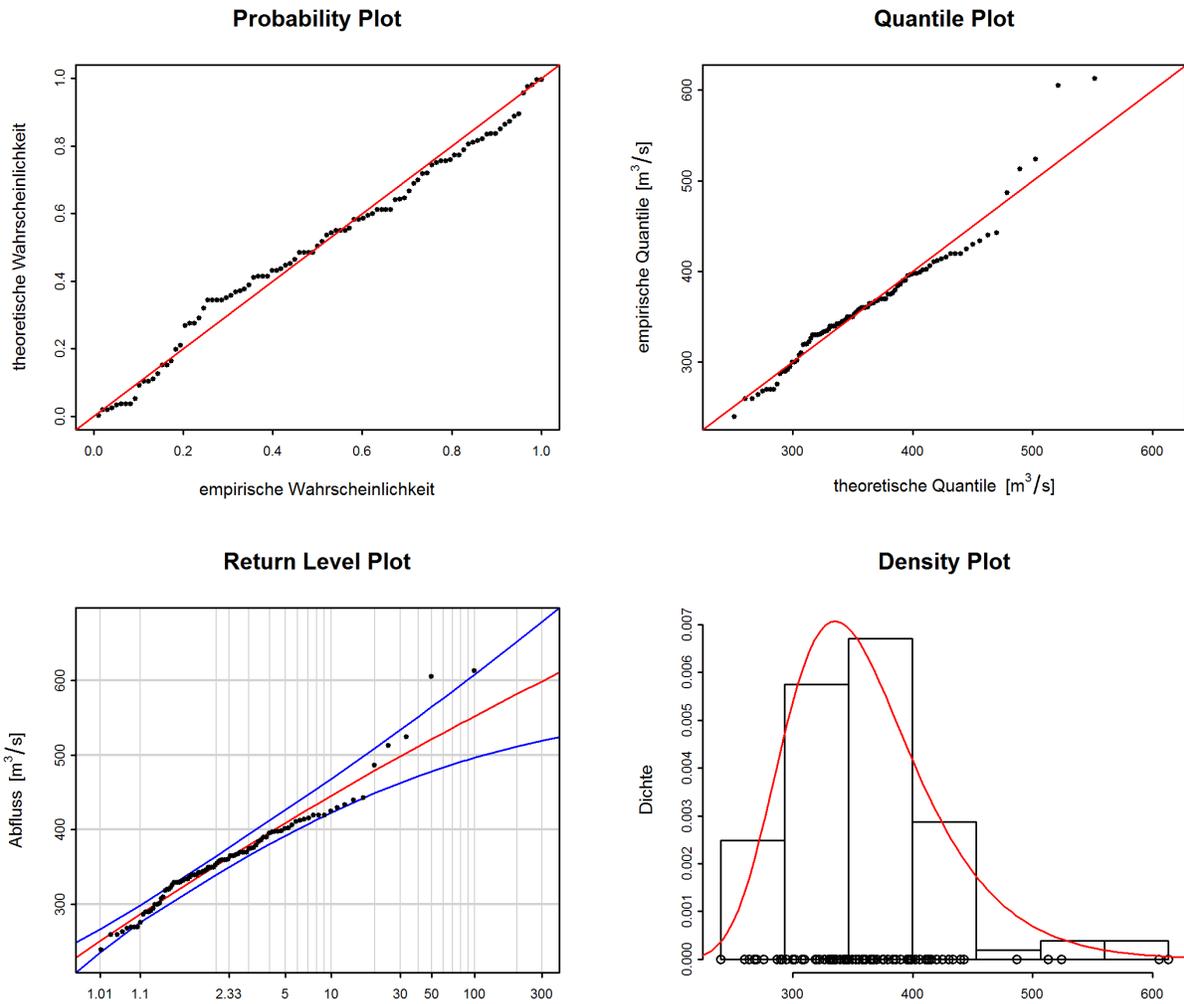


Abbildung 5: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1918-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 5):

Kriterien	Bewertung ²	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel	-
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	grösste Werte werden unterschätzt
Konfidenzintervall	klein	für grosse Wiederkehrperioden leicht erhöht

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die gesamte Auswertungsperiode 1918-2015 (inkl. 95% - Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ ₂	340	352	365
HQ ₁₀	423	445	468
HQ ₃₀	463	498	533
HQ ₁₀₀	496	552	608
HQ ₃₀₀	519	599	678

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 die Modelle „mul“, „muq“, „musigl“ und „mujump“ 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 aus hydrologischer Sicht am meisten Sinn macht. Daher werden im Folgenden die Resultate von „mujump“ dargestellt (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#)).

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	mujump1993	1918-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}^4$		Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
	a_1	a_2		
98	326.51	43.87	52.24	-0.1109

Die Güte der Modellvariante „mujump1993“ über die gesamte Auswertungsperiode wird grafisch anhand der in Abbildung 6 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

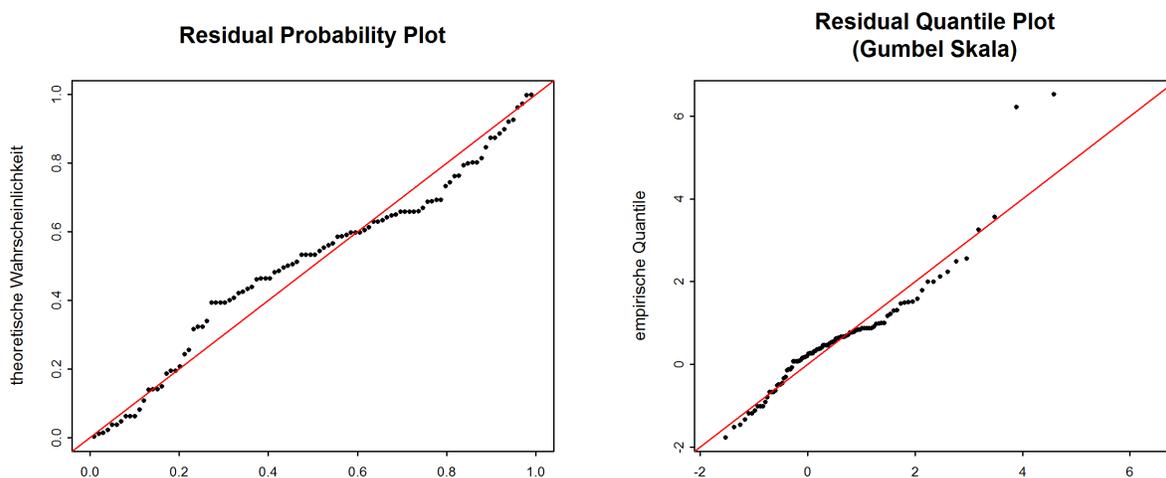


Abbildung 6: Diagnostikplots der Modellvariante „mujump1993“ des BLOCK-Ansatzes (1918-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 6):

Kriterien	Bewertung ⁵	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel-gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	Spitzenwerte bleiben unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	leicht verbessert	einige Werte liegen näher an der Einheitsdiagonale

³ Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „mujump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1993 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 „mujump1993“ des BLOCK-Ansatzes über die gesamte Auswertungsperiode 1918-2015 (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	362	389	417
HQ ₁₀	446	474	503
HQ ₃₀	487	518	549
HQ ₁₀₀	520	559	598
HQ ₃₀₀	540	591	642

In Abbildung 7 ist die Veränderung des mit dem Modell „mujump1993“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1918 und 2015 dargestellt.

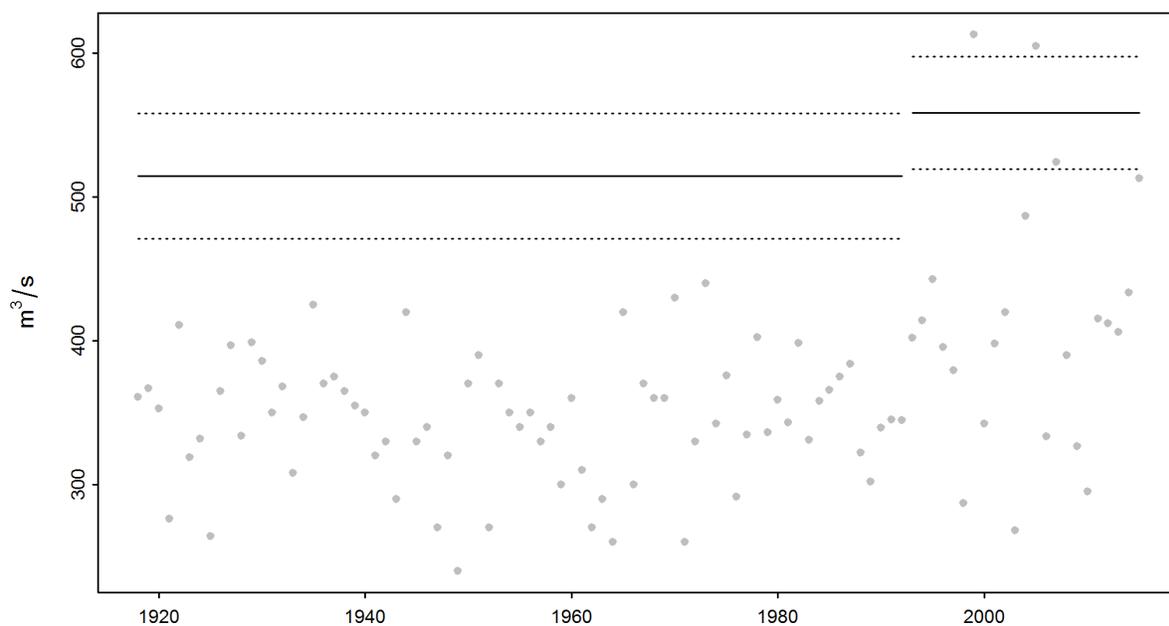


Abbildung 7: Veränderung der mit der Modellvariante „mujump1993“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1918-2015

2.1.2 Vergleichsperiode: 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	350.52	54.15	0.0508

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

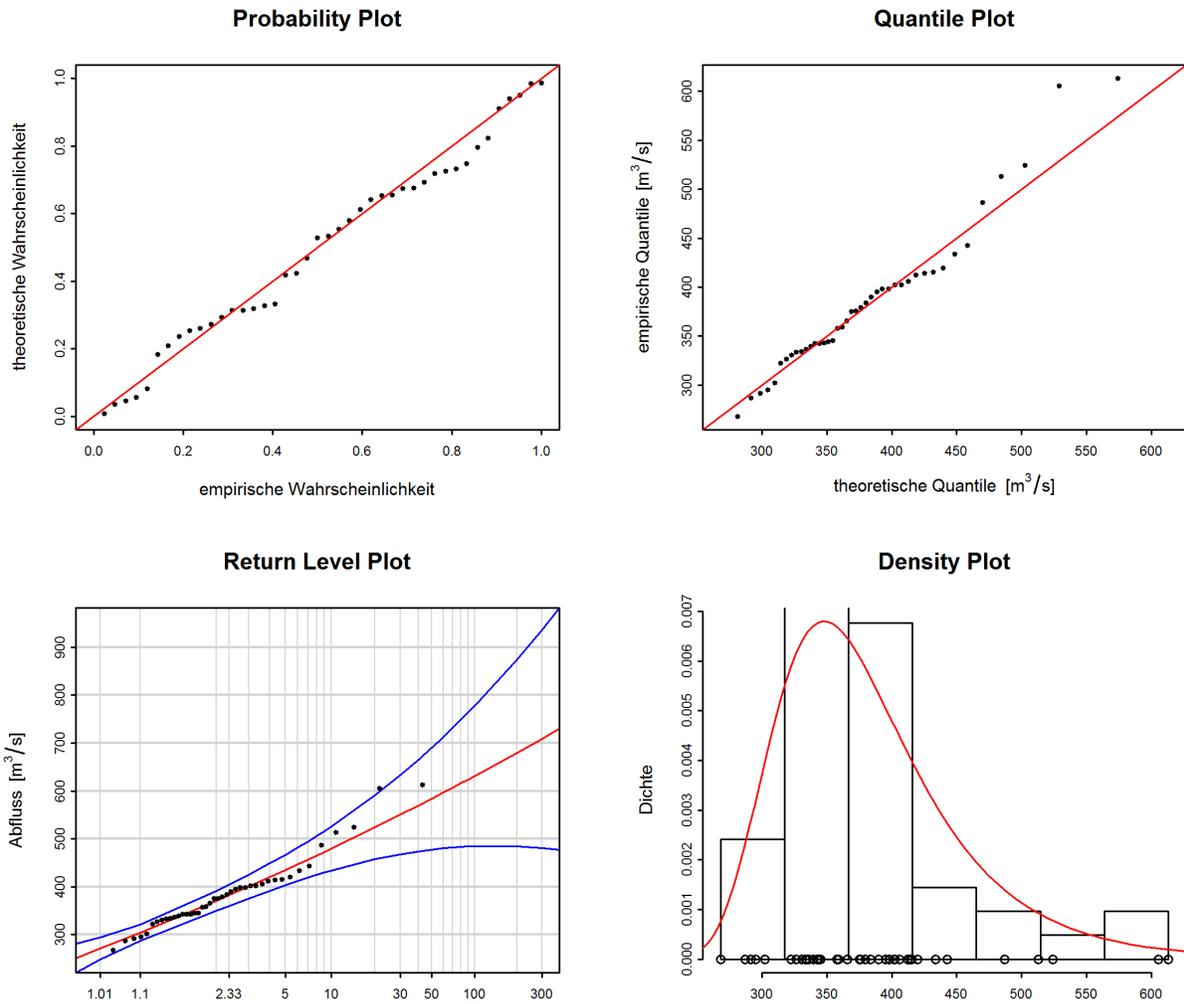


Abbildung 8: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 8):

Kriterien	Bewertung ⁶	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut-mittel	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut-mittel	-
Anpassung oberer Bereich	mittel-schlecht	insbesondere der zweitgrösste Wert wird deutlich unterschätzt
Konfidenzintervall	gross	für kleinere Wiederkehrperioden mittel

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die Vergleichsperiode 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	350	371	391
HQ ₁₀	434	480	525
HQ ₃₀	468	550	633
HQ ₁₀₀	485	631	777
HQ ₃₀₀	481	709	936

⁶Siehe [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 - Bern, Schönau wird der Zeitabstand L zwischen zwei unabhängigen Ereignissen auf den Mindestwert von 13 Tagen festgelegt.

Folgende Modellvarianten des POT-Ansatzes wurden analysiert:

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 $290 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt (siehe Anhang A). Abbildung 9 zeigt die effektiv verwendeten Extremereignisse.

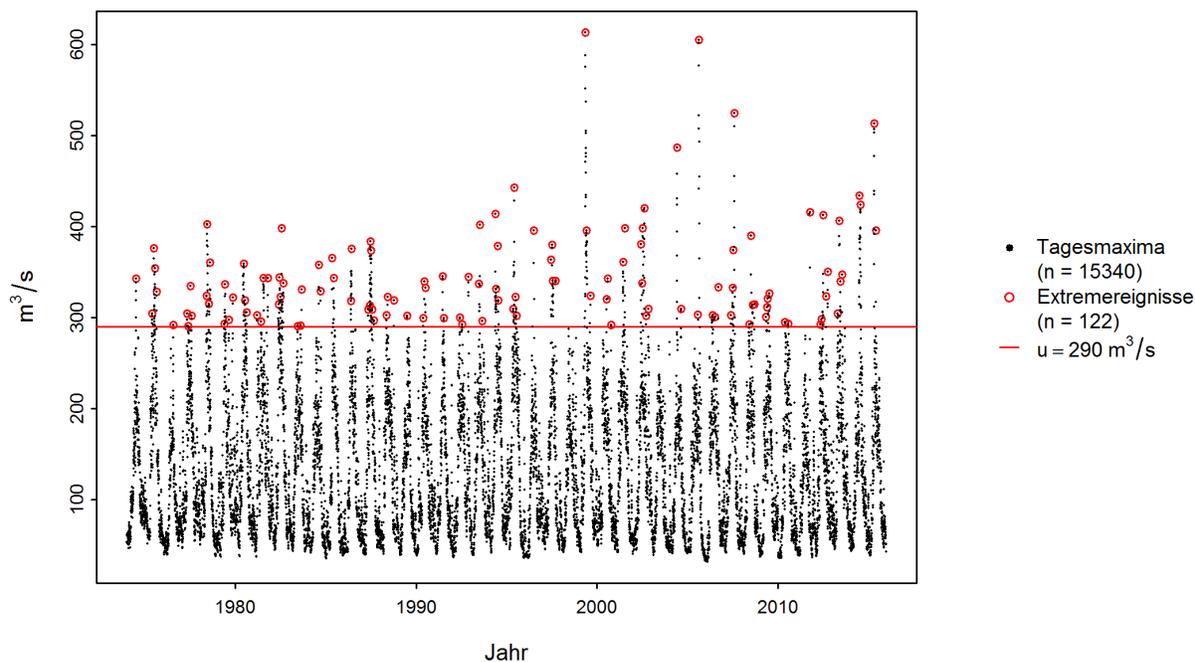


Abbildung 9: Auswahl der für den POT-Ansatz verwendeten Extremereignisse

2.2.1.a Stationäre Modellvariante

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

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Schwellenwert	Anzahl Werte	Ereignisrate	Skalenparameter	Formparameter
u	n	$\hat{\lambda}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\kappa}$
290 m ³ /s	122	2.9	53.09	0.0363

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

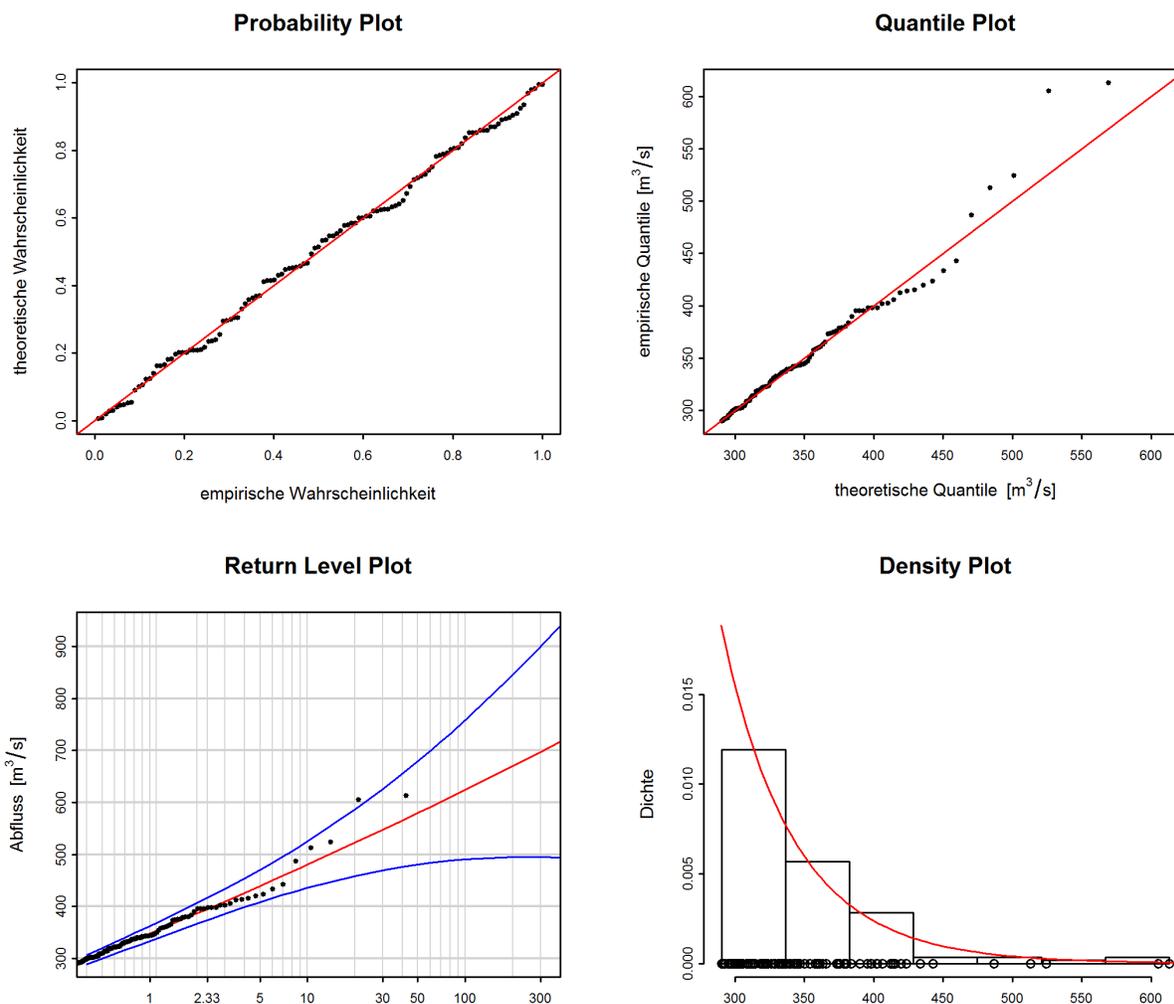


Abbildung 10: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 10):

Kriterien	Bewertung ⁷	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	höchste Werte werden unterschätzt
Konfidenzintervall	mittel	für grosse Wiederkehrperioden gross

⁷Siehe [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	366	386	407
HQ ₁₀	436	480	525
HQ ₃₀	469	547	626
HQ ₁₀₀	491	624	758
HQ ₃₀₀	495	697	899

2.2.1.b Nicht stationäre Modellvariante

Der Vergleich der verschiedenen Modelle zeigt, dass sich die Modelle „sigl“ und „sigjump“ signifikant vom stationären Modell „stat“ unterscheiden.⁸ Am besten schneidet dabei die Variante „sigjump“ ab, deren Resultate im Folgenden dargestellt sind (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#)).

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
POT	sigjump1993	1974-2015	Tagesmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Schwellenwert	Anzahl Werte	Ereignisrate	Skalenparameter $\hat{\sigma}^9$		Formparameter
			\mathbf{b}_1	\mathbf{b}_2	$\hat{\kappa}$
290 m ³ /s	122	2.9	40.71	43.06	-0.1407

Die Güte der „sigjump1993“ Modellvariante über die Auswertungsperiode POT wird grafisch anhand der in Abbildung 11 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

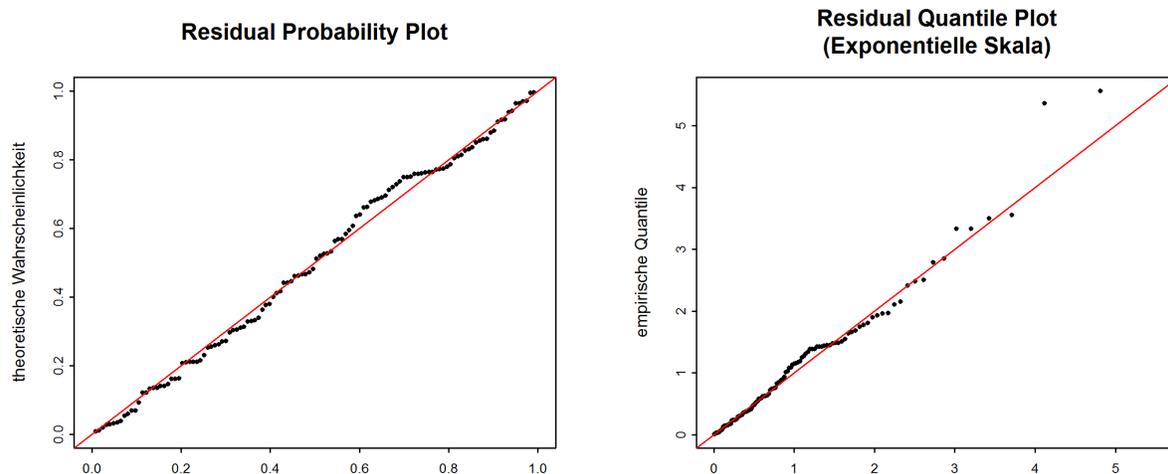


Abbildung 11: Diagnostikplots der Modellvariante „sigjump1993“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

⁸Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „sigjump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1993 gewählt (siehe Kapitel 1).

⁹ $\hat{\sigma} = b_1 + b_2 * i, i = 0$ für $t < t_0, i = 1$ für $t \geq t_0$ (s. Tabelle 1)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 11):

Kriterien	Bewertung ¹⁰	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	höchste Werte bleiben unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	verbessert	leichte Verbesserung vor allem im mittleren Bereich

Folgende Tabelle enthält die für das aktuellste Jahr (2015) bestimmten Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit der Modellvariante „sigjump1993“ 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	389	421	452
HQ ₁₀	469	515	561
HQ ₃₀	506	568	630
HQ ₁₀₀	530	617	705
HQ ₃₀₀	540	656	771

In Abbildung 12 ist die Veränderung des mit dem Modell „sigjump1993“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1974 und 2015 dargestellt.

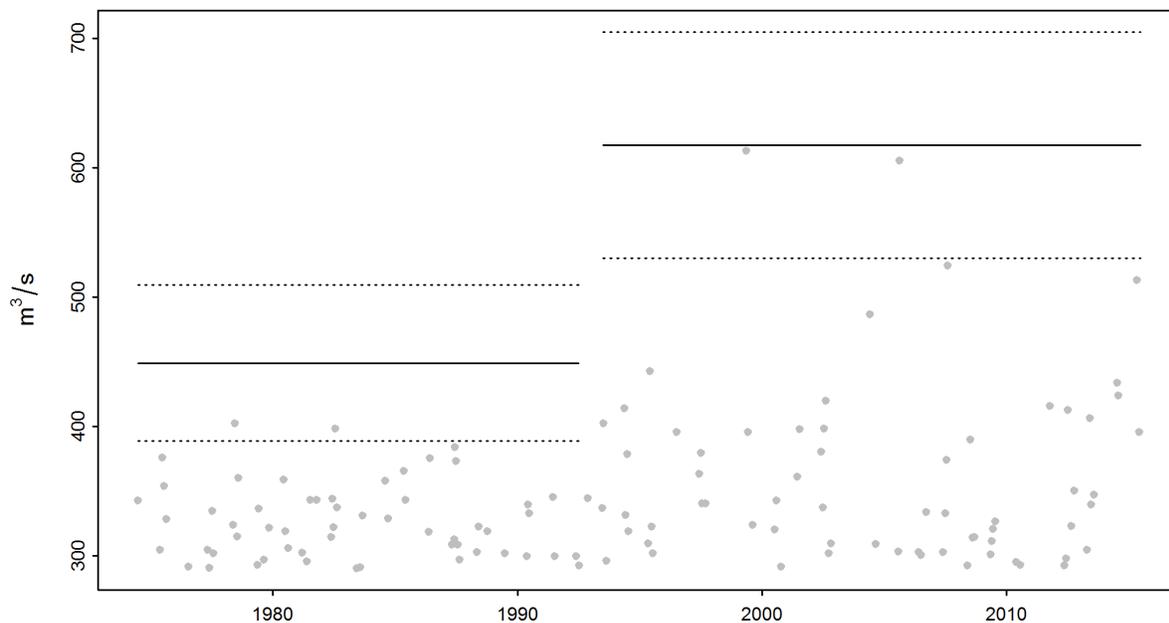


Abbildung 12: Veränderung der mit der Modellvariante „sigjump1993“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1974-2015

¹⁰Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

3 Vergleich der verschiedenen Resultate

Abbildung 13 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. 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 1918 - 2015 möglich. Für die Darstellung des Einflusses der Messperiode wurden die Resultate des BLOCK-Ansatzes für die verschiedenen Auswertungsperioden verglichen:

Perioden	HQ_T	Konfidenzintervall
Vergleichsperiode / Gesamte Auswertungsperiode	deutlich höhere Werte	deutlich grösser

Nach 1999 wurden durchschnittlich höhere Jahreshochwasser beobachtet. Dies führt zu höheren HQ_T in der Vergleichsperiode. Aufgrund der geringeren Datenmenge ist das Konfidenzintervall bei der Vergleichsperiode viel grösser als in der gesamten Auswertungsperiode.

3.2 Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze

In Abbildung 13 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_2 des stationären POT-Ansatzes liegen etwas höher als diejenigen des BLOCK-Ansatzes der Vergleichsperiode, bei den grösseren Wiederkehrperioden sind die Werte sehr ähnlich. Beim Vergleich mit dem BLOCK-Ansatz der gesamten Auswertungsperiode liegen die HQ_T des POT-Ansatzes durchgehend höher.

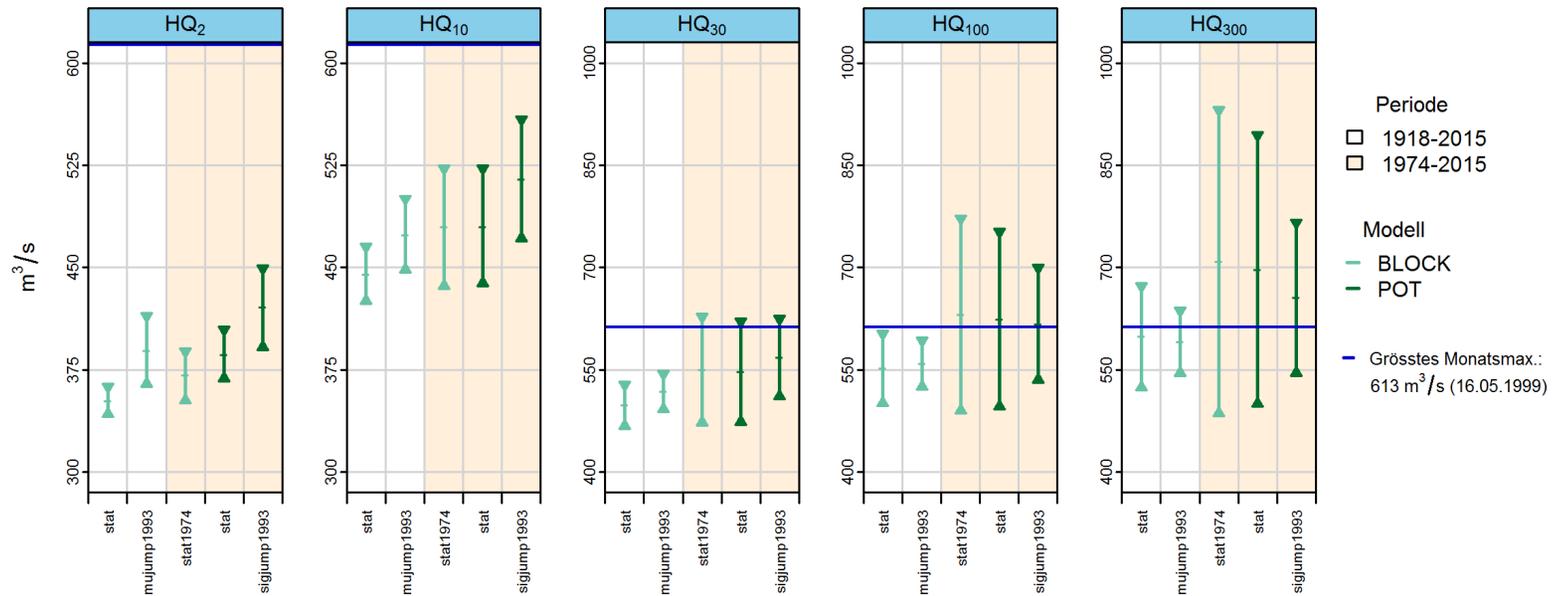
Differenzen der berechneten Konfidenzintervalle der beiden Ansätze:

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

Vergleich von stationären und nicht stationären Varianten:

Sowohl beim BLOCK- wie auch beim POT-Ansatz kann mit einer nicht stationären Variante die Modellgüte in einem geringen Ausmass verbessert werden, da die Zunahme grosser Hochwasser in den letzten Jahren in das Modell einbezogen wird. Die berechneten Wiederkehrwerte der nicht stationären Modellvarianten für das Jahr 2015 sind in der Folge für die kleineren Wiederkehrperioden höher als mit den stationären Modellvarianten, bei Wiederkehrperioden ab HQ_{100} aber kleiner. Eine Aussage über die zukünftige Entwicklung ist nicht möglich, da den Veränderungen keine eindeutigen Ursachen zugewiesen werden können.

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.



21

Abbildung 13: 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
1918 - 2015	BLOCK stat	mittel	mittel	schlecht	grösste Werte werden unterschätzt
	BLOCK mujump1993	mittel-gut	mittel	schlecht	Spitzenwerte bleiben unterschätzt einige Werte liegen näher an der Einheitsdiagonale
1974 - 2015	BLOCK stat	gut-mittel	gut-mittel	mittel-schlecht	insbesondere der zweitgrösste Wert wird deutlich unterschätzt
1974 - 2015	POT stat	gut	mittel	schlecht	höchste Werte werden unterschätzt
	POT sigjump1993	gut	gut	schlecht	höchste Werte bleiben unterschätzt leichte Verbesserung vor allem im mittleren Bereich

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 $290 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt (siehe Abbildung 14).

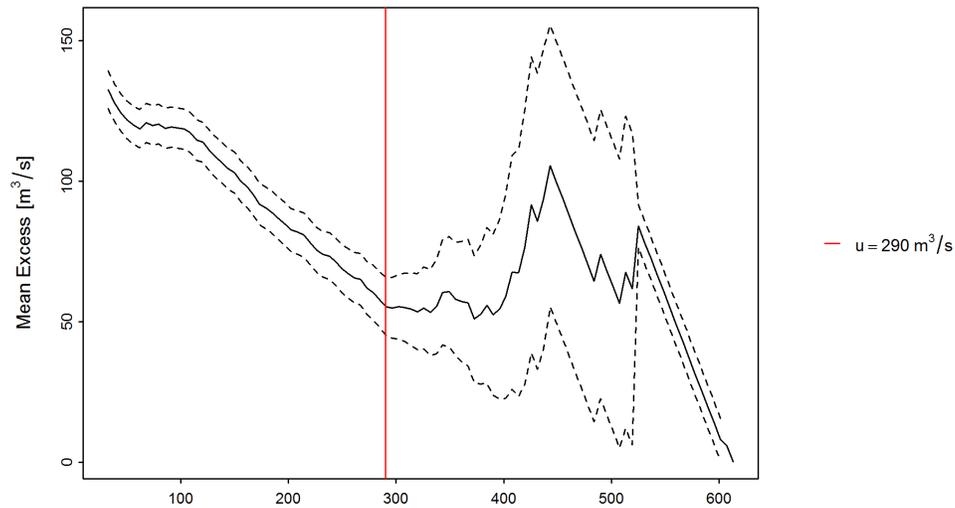


Abbildung 14: „mean residual life plot“ mit gewähltem Schwellenwert u (rote Linie) mean Excess (schwarze Linie), 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien)

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).