



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

HOCHWASSERSTATISTIK

STATIONSBERICHT

Vispa - Visp

weitere Erläuterungen: [Leitfaden](#)
Kontakt: hydroanalysen@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: 1923-2015	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
2.1.3	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1967-2015	12
2.1.3.a	Stationäre Modellvariante	12
2.2	Peaks Over Threshold Ansatz (POT)	13
2.2.1	Auswertungsperiode POT: 1974-2015	14
2.2.1.a	Stationäre Modellvariante	14
2.2.1.b	Nicht stationäre Modellvariante	16
3	Vergleich der verschiedenen Resultate	18
3.1	Beurteilung der unterschiedlichen Auswertungsperioden	18
3.2	Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze	18
4	Literatur	21
Anhang		22
A	Bestimmung des Schwellenwerts zur Abgrenzung von Extremwerten	22
B	Glossar	23

1 Datengrundlage

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

Vorhandene Daten	seit	bis
Digitale Monatsmaxima	01.01.1903	31.12.1912
	01.01.1922	31.12.2015
Digitale Tagesmaxima	01.01.1974	28.02.1996

Ein Limnigraph wurde am 09. März 1922 in Betrieb genommen. Zwischen 1913 und 1921 wurden keine Beobachtungen durchgeführt, was die Datenlücke erklärt.

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	04.09.1948	375 m ³ /s
Grösstes Tagesmaximum	24.09.1993	329 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 mehrere Kraftwerke und Seen: Mattmark-Stausee 101 Mio m ³ (Inbetriebnahme 1967, Vollbetrieb 1969) mit den Kraftwerken Zermeiggen (1965), Saas-Fee (1960) sowie Stalden (1965). Weitere Speicherkraftwerke in Stafel (1961) und Z'mutt (1965). Zusätzlich befinden sich einige kleinere Laufkraftwerke im Gebiet, welche aber nur geringen Einfluss ausüben. Die Beeinflussung des Mattmark-Stausees ist in den Daten deutlich erkennbar (siehe Abbildung 1 & 2).

Die Jahresmaxima bewegen sich zwischen ungefähr 70 und 370 m³/s, wobei die Werte in diesem Bereich stark streuen. Zwei Abflussmengen über 300 m³/s bilden die Spitze der Jahresmaxima, während die meisten Werte zwischen 130 und 250 m³/s (bis 1966) bzw. zwischen 80 und 200 m³/s (seit 1967) liegen. Ein deutlicher Rückgang der durchschnittlichen Jahresmaxima ist ab ca 1965 zu verzeichnen: Die kleineren Jahresmaxima sind um 50 m³/s gesunken, während seither allerdings trotzdem zwei der drei höchsten Abflusswerte aufgetreten sind, wodurch die Veränderung bei den Ereignissen mit hoher Wiederkehrperiode kleiner zu sein scheint (s. Abbildung 1). Die durchschnittlichen Monatsmaxima dagegen sind seit 1965 viel konstanter; die kleineren Ereignisse sind grösser geworden, während dafür weniger Abflüsse über 150 m³/s registriert wurden (s. Abbildung 2). In dieser Zeit wurde der Staudamm des Mattmarksee gebaut, welcher das Abflussverhalten ab diesem Zeitpunkt verändert haben könnte. Auch die Bruchpunktanalyse ergibt einen signifikanten Bruchpunkt um 1962 (Konfidenzintervall 1956 - 1968), welcher zu dieser Beeinflussung passt. Die deutlich erkennbare Veränderung der Maxima sowie die Übereinstimmung mit der Bruchpunktanalyse führen dazu, dass die Datenreihe ab 1967, dem Jahr der Inbetriebnahme des Stausees, unterteilt und eine Auswertungsperiode ab Bruchpunkt berücksichtigt wird.

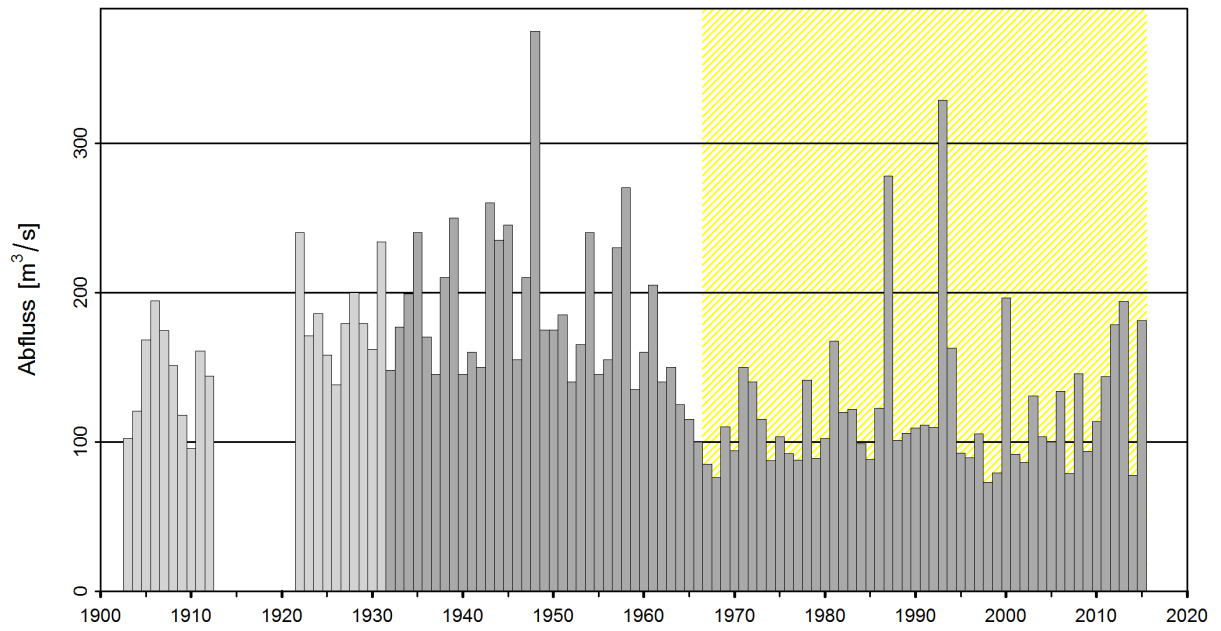


Abbildung 1: Zeitreihe der Jahresmaxima [m^3/s] (1903 - 2015, hellgrau: nicht für die Statistik verwendete Jahresmaxima, dunkelgrau: verwendete Jahresmaxima der gesamten Auswertungsperiode ab Limnigrapheninstallation). Gelb schraffiert: Auswertungsperiode ab Bruchpunkt (1969)

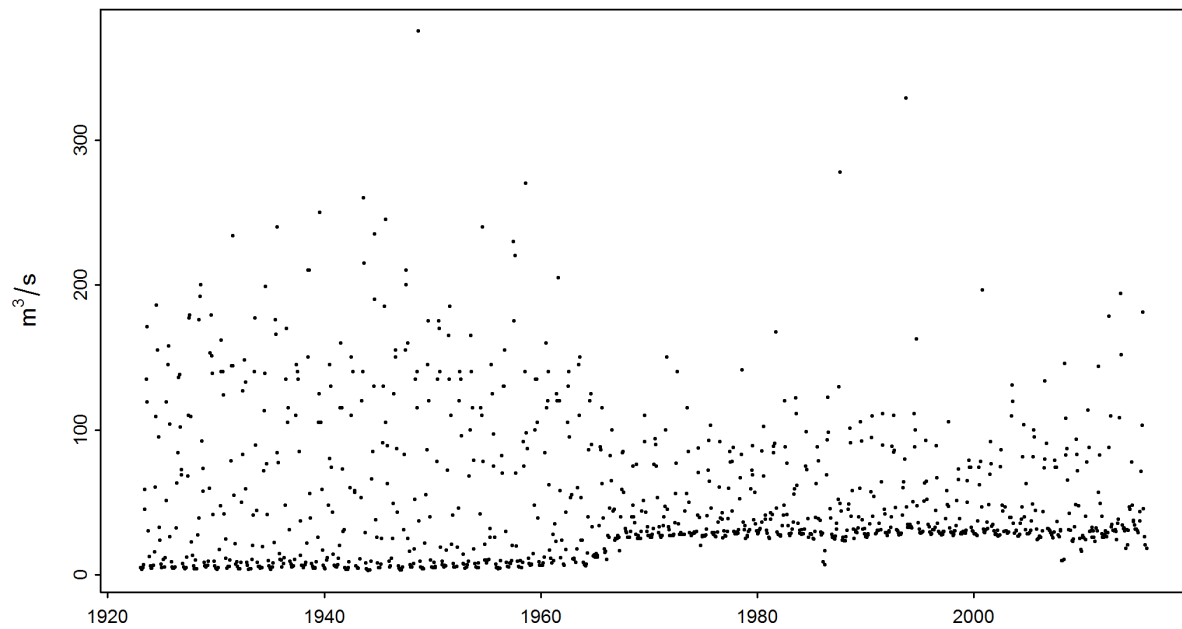


Abbildung 2: Zeitreihe der Monatsmaxima [m^3/s] (01.01.1923 - 31.12.2015)

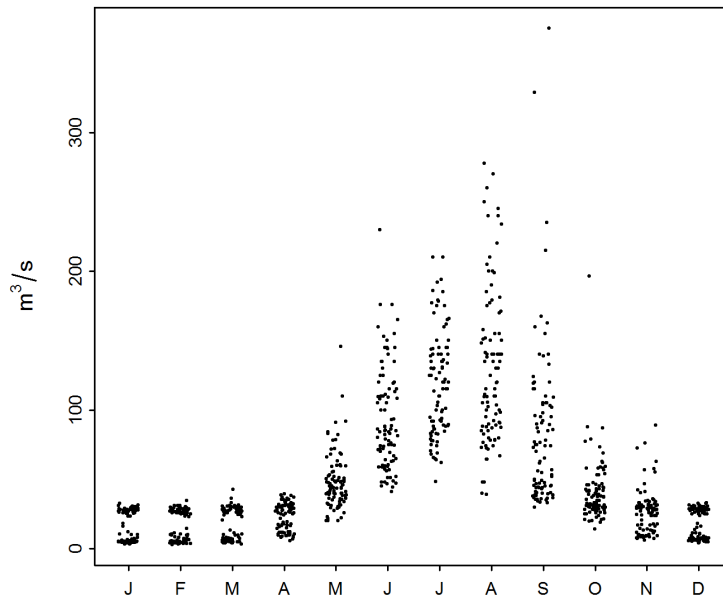


Abbildung 3: Saisonaler Verlauf der Monatsmaxima [m^3/s] (01.01.1923 - 31.12.2015)

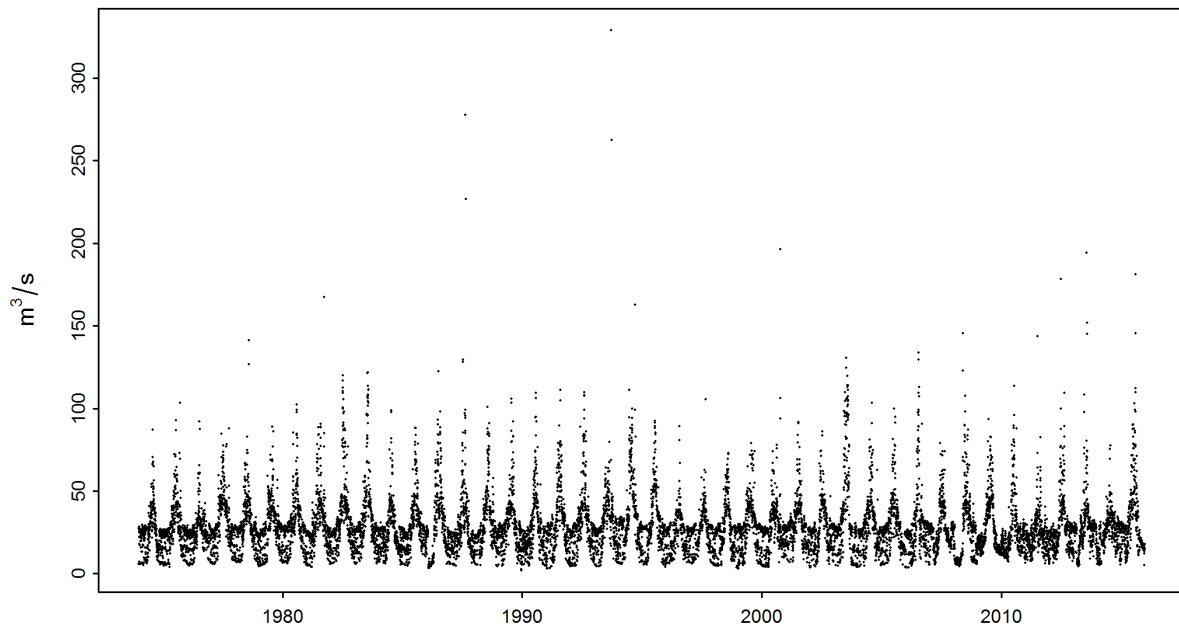


Abbildung 4: Zeitreihe der maximalen Tagesabflüsse [m^3/s] (01.01.1974 - 31.12.2015)

Fazit für die Modellvarianten

Veränderungen	Auswirkungen	Folgerungen
Mattmark-Stausee ab 1967	Kleine Monatsmaxima steigen an, grössere Monatsmaxima und Jahresmaxima werden kleiner	Vermutlich nicht stationär

Bruchpunktanalyse

Jahr	Signifikanter Bruchpunkt	Folgerungen
1966 / 1967	ja	Unterteilung der Daten, da der Bruchpunkt mit Unterlagen zu Station (Bau von Kraftwerk) und Einzugsgebiet begründbar ist

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
1923 - 2015	gesamte Auswertungsperiode	stat mujump	Kapitel 2.1.1.a Kapitel 2.1.1.b
1974 - 2015	Vergleichsperiode	stat	Kapitel 2.1.2.a
1967 - 2015	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt	stat	Kapitel 2.1.3.a

2.1.1 Gesamte Auswertungsperiode: 1923-2015

2.1.1.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1923-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
93	122.38	40.45	0.1321

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

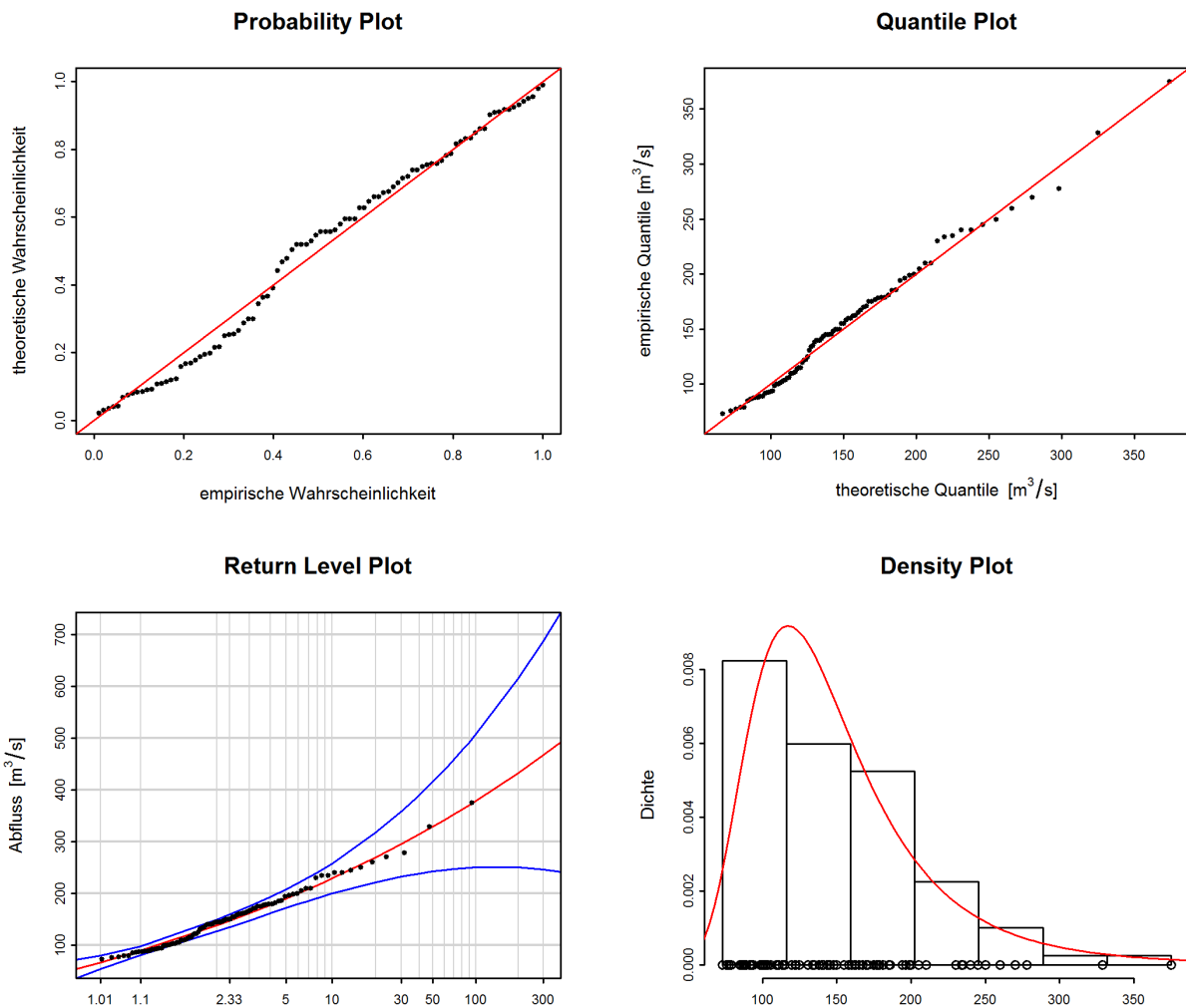


Abbildung 5: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1923-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 5):

Kriterien	Bewertung ²	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut-mittel	ein paar Werte leicht unterschätzt
Anpassung oberer Bereich	gut-mittel	ein paar Werte leicht überschätzt; Spitze gut getroffen
Konfidenzintervall	gross	für grosse Wiederkehrperioden sehr gross

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die gesamte Auswertungsperiode 1923-2015 (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	126	138	149
HQ ₁₀	199	228	258
HQ ₃₀	232	295	358
HQ ₁₀₀	250	378	507
HQ ₃₀₀	246	467	687

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.³Aufgrund des im Ablaufschema beschriebenen Vergleichsansatzes verschiedener nicht stationärer Modellvarianten kommt „mujump“ als bestes nicht stationäres Modell in Frage. Die Unterschiede zwischen den Modellen sind nur geringfügig. Daher werden im Folgenden die Resultate von „mujump“ dargestellt (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#)).

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	mujump1967	1923-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}^4$		Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
	a_1	a_2		
93	155.13	-50.78	31.14	0.1375

Die Güte der Modellvariante „mujump1967“ über die gesamte Auswertungsperiode wird grafisch anhand der in Abbildung 6 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

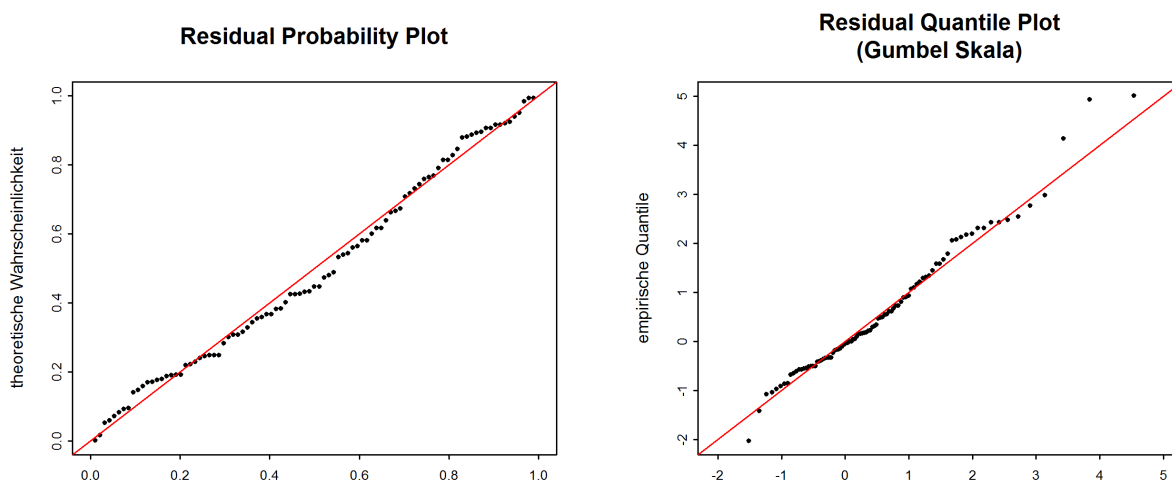


Abbildung 6: Diagnostikplots der Modellvariante „mujump1967“ des BLOCK-Ansatzes (1923-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 6):

Kriterien	Bewertung ⁵	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	mittel-schlecht	die obersten drei Werte unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	gleich gut	einige Werte liegen näher an Einheitsdiagonale, Spitzenwerte allerdings unterschätzt. Konfidenzintervall kleiner.

³Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „mujump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1967 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)

⁵Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

Folgende Tabelle enthält die für das aktuellste Jahr (2015) bestimmten Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit der Modellvariante „mujump1967“ des BLOCK-Ansatzes über die gesamte Auswertungsperiode 1923-2015 (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	107	116	125
HQ ₁₀	164	186	209
HQ ₃₀	195	239	282
HQ ₁₀₀	222	304	386
HQ ₃₀₀	239	374	509

In Abbildung 7 ist die Veränderung des mit dem Modell „mujump1967“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1923 und 2015 dargestellt.

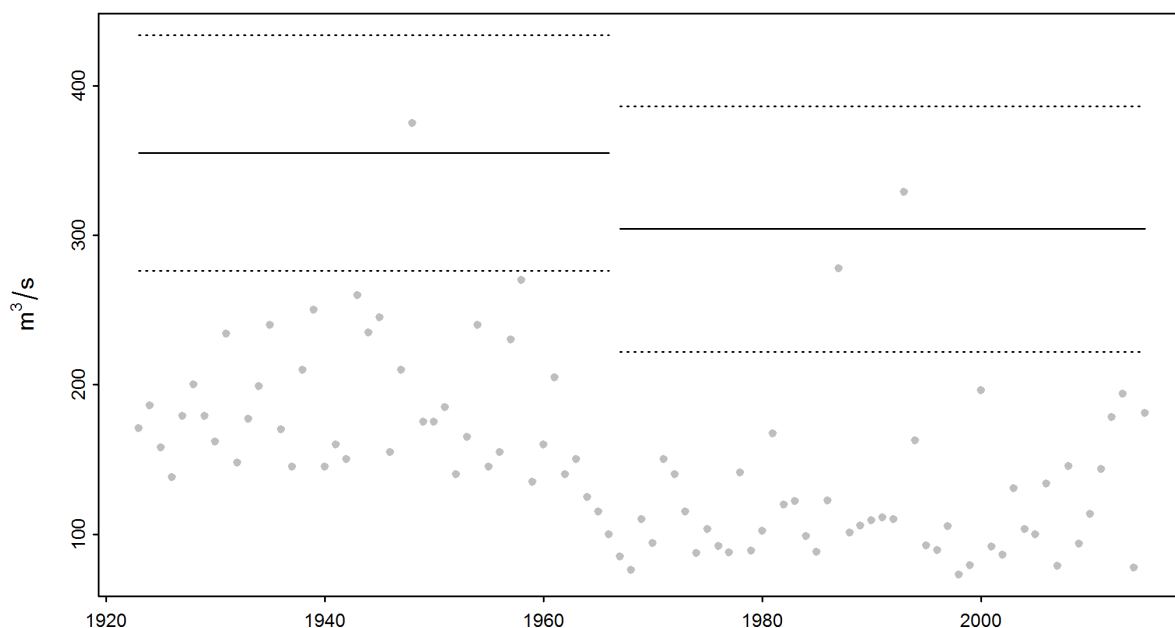


Abbildung 7: Veränderung der mit der Modellvariante „mujump1967“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1923-2015

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	98.56	22.39	0.4119

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

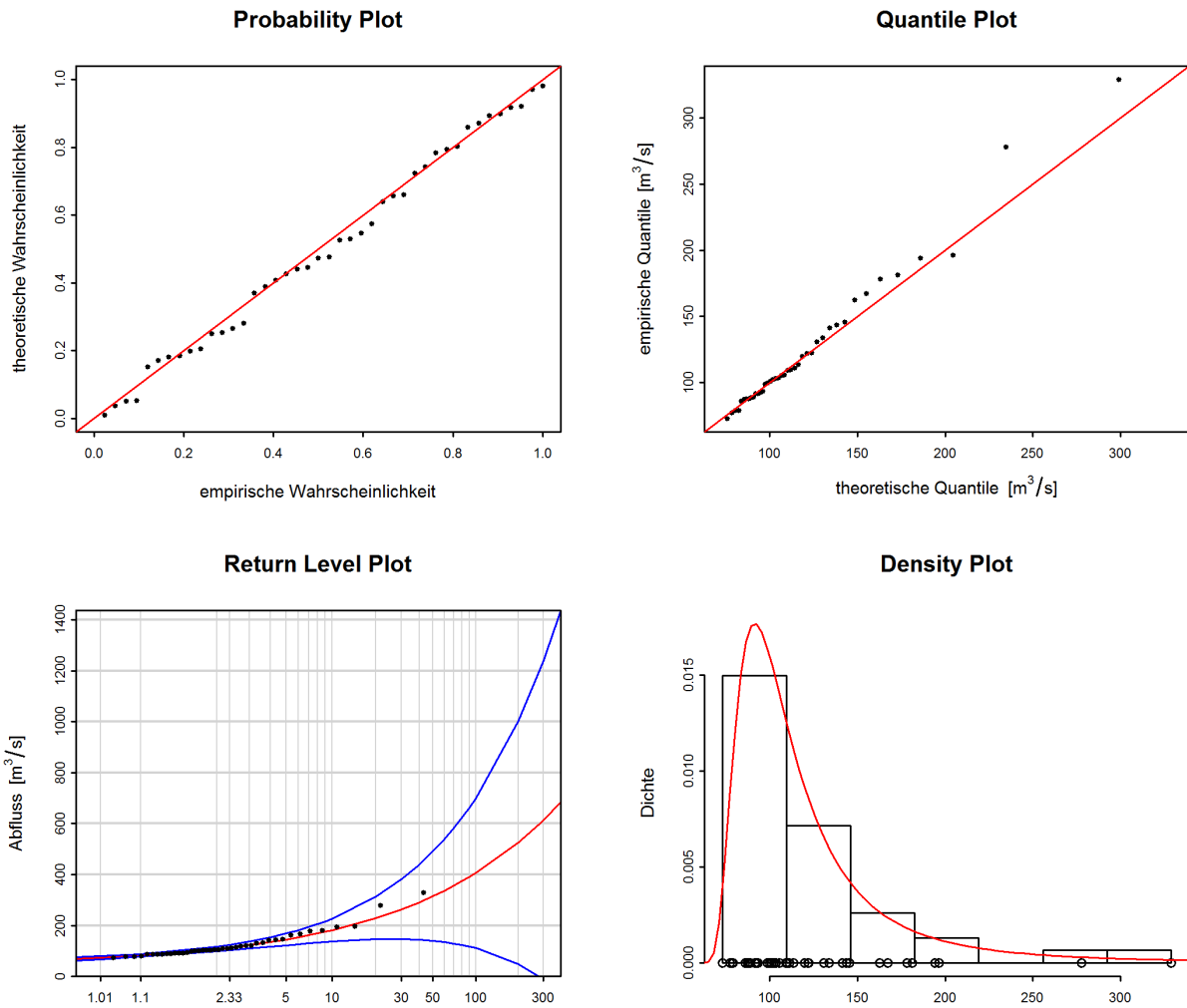


Abbildung 8: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 8):

Kriterien	Bewertung ⁶	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	einige Werte leicht unterschätzt
Anpassung oberer Bereich	mittel-schlecht	die obersten zwei Werte unterschätzt
Konfidenzintervall	gross	für grosse Wiederkehrperioden extrem gross

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 [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ ₂	97.6	107	117
HQ ₁₀	137	182	226
HQ ₃₀	146	263	381
HQ ₁₀₀	111	406	700
HQ ₃₀₀	-10.94	613	1238

⁶Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

2.1.3 Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1967-2015

2.1.3.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1967-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
49	98.05	22.04	0.3852

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

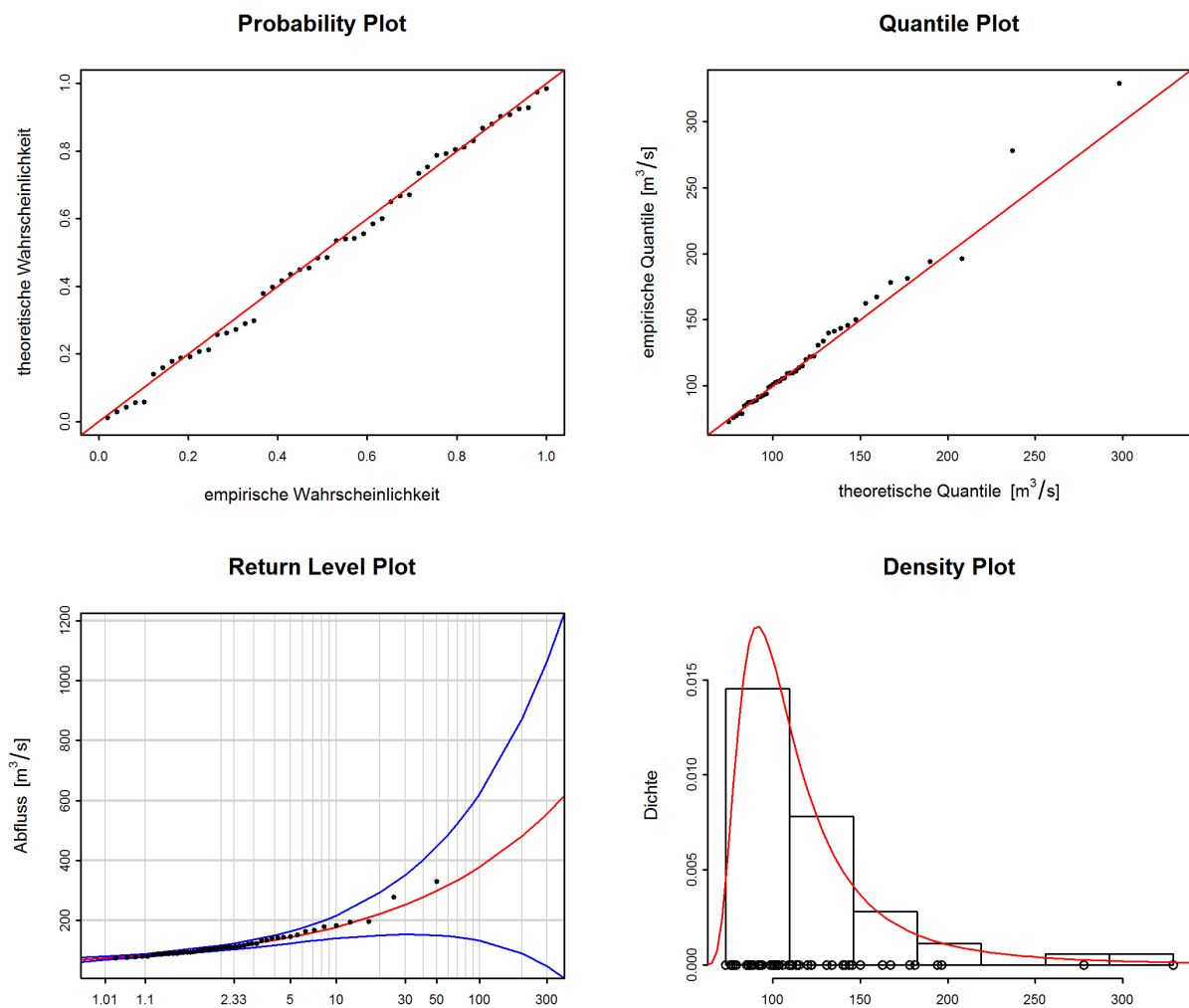


Abbildung 9: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1967-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 9):

Kriterien	Bewertung ⁷	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut-mittel	einige Werte leicht unterschätzt
Anpassung oberer Bereich	mittel-schlecht	die obersten zwei Werte unterschätzt
Konfidenzintervall	gross	für grosse Wiederkehrperioden extrem gross

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die Auswertungsperiode ab Bruchpunkt 1967-2015 (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	97.7	107	116
HQ ₁₀	138	177	215
HQ ₃₀	152	252	351
HQ ₁₀₀	132	377	623
HQ ₃₀₀	45.7	555	1065

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 Vispa - Visp wird der Zeitabstand L zwischen zwei unabhängigen Ereignissen auf den Mindestwert von 11 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

⁷Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

2.2.1 Auswertungsperiode POT: 1974-2015

Im vorliegenden Fall wurde als Schwellenwert u $80 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt (siehe Anhang A). Abbildung 10 zeigt die effektiv verwendeten Extremereignisse.

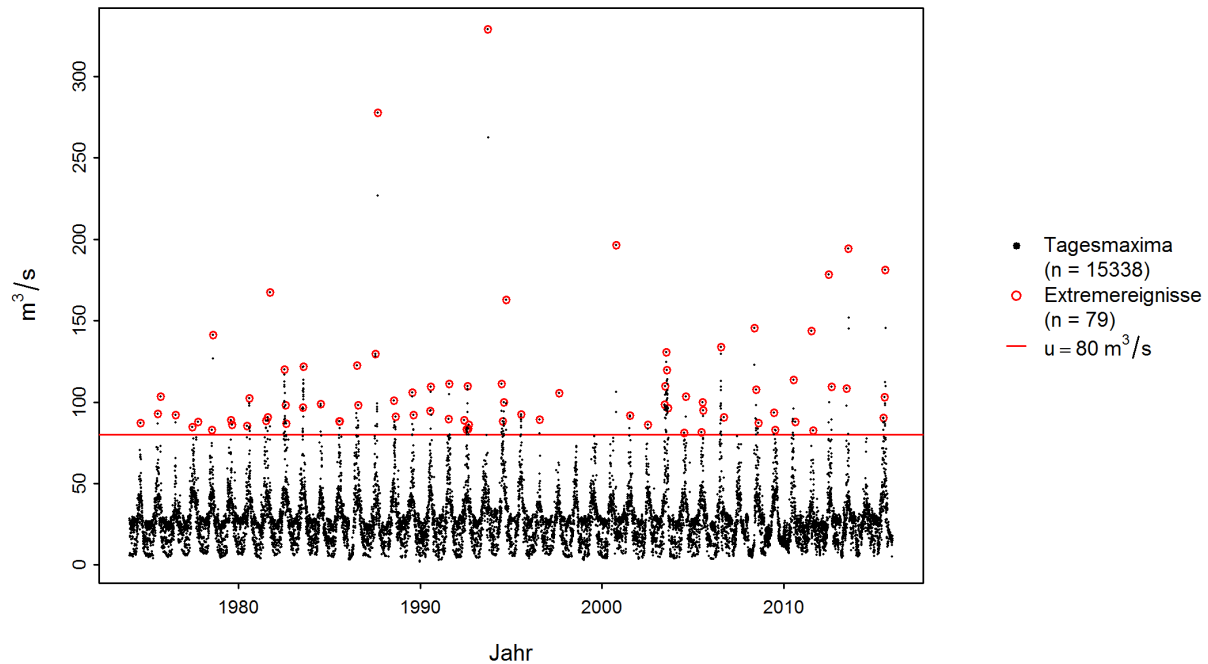


Abbildung 10: Auswahl der für den POT-Ansatz verwendeten Extremereignisse

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	$\hat{\lambda}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\kappa}$
$80 \text{ m}^3/\text{s}$	79	1.88	23.73	0.2285

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

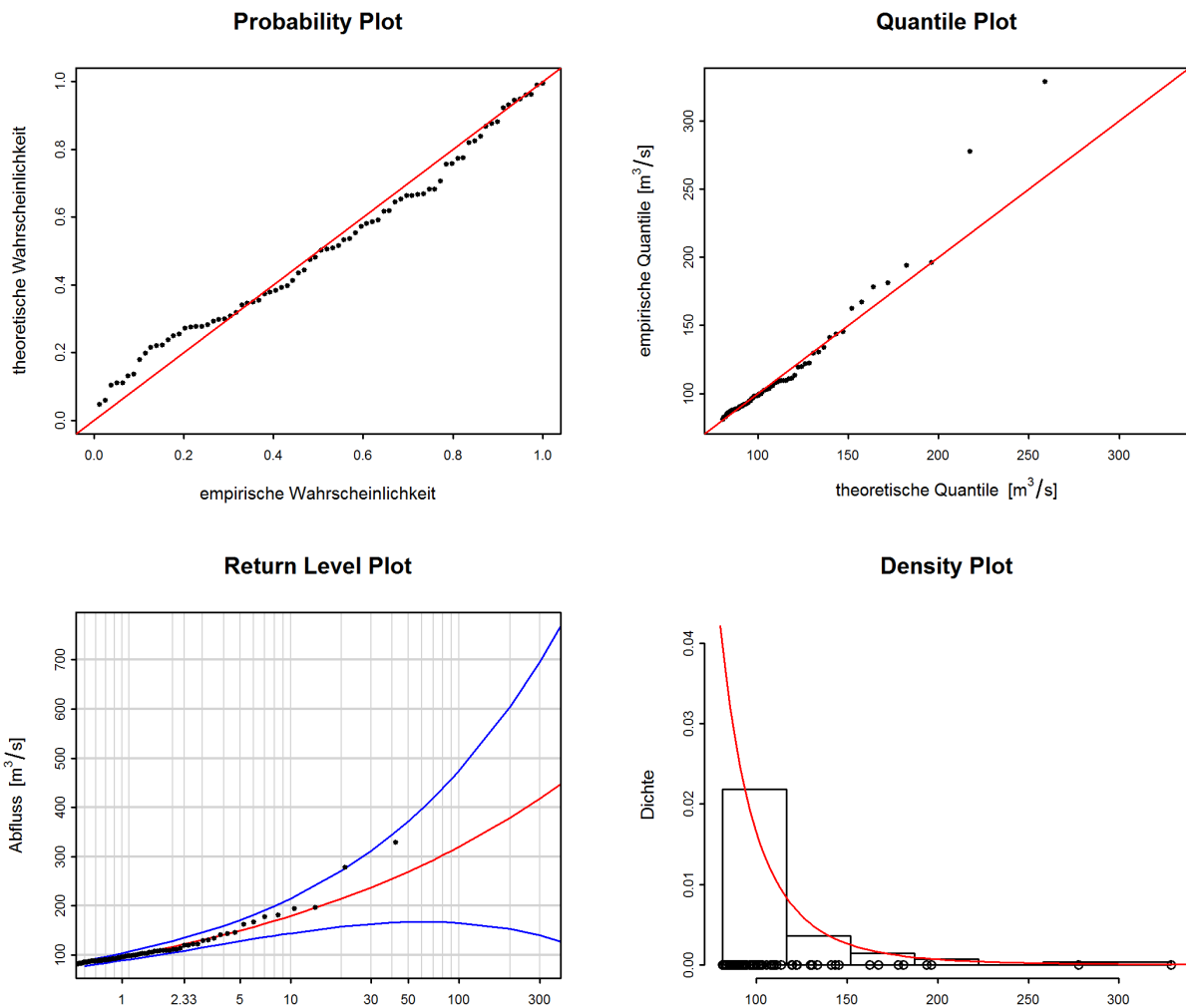


Abbildung 11: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 11):

Kriterien	Bewertung ⁸	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut-mittel	einige Werte leicht unterschätzt
Anpassung oberer Bereich	schlecht	die obersten zwei Werte stark unterschätzt
Konfidenzintervall	gross	für grosse Wiederkehrperioden sehr gross

⁸Siehe [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	105	117	129
HQ ₁₀	144	179	214
HQ ₃₀	163	237	311
HQ ₁₀₀	165	320	474
HQ ₃₀₀	140	418	696

2.2.1.b Nicht stationäre Modellvariante

Der Vergleich der verschiedenen Modelle zeigt, dass sich nur das Modell „sigjump“ signifikant vom stationären Modell „stat“ unterscheidet.⁹Daher werden im Folgenden die Resultate von „sigjump“ dargestellt (siehe Abbildung 5 im [Leitfaden](#)).

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
POT	sigjump1981	1974-2015	Tagesmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Schwellenwert	Anzahl Werte	Ereignisrate	Skalenparameter $\hat{\sigma}^{10}$		Formparameter
			\mathbf{b}_1	\mathbf{b}_2	$\hat{\kappa}$
80 m ³ /s	79	1.88	12.45	14.72	0.1857

Die Güte der „sigjump1981“ Modellvariante über die Auswertungsperiode POT wird grafisch anhand der in Abbildung 12 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

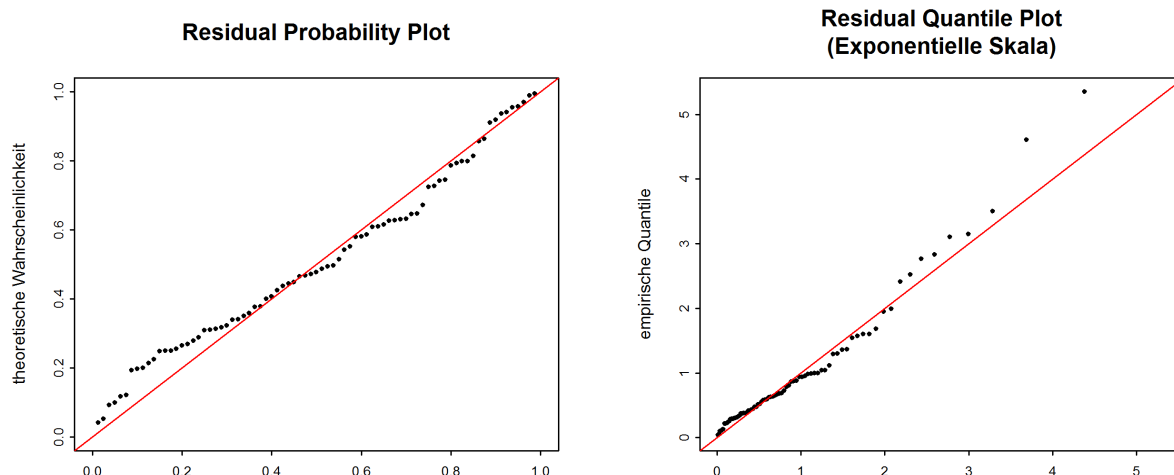


Abbildung 12: Diagnostikplots der Modellvariante „sigjump1981“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

⁹Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „sigjump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1981 gewählt (siehe Kapitel 1).

¹⁰ $\hat{\sigma} = b_1 + b_2 \cdot i, i = 0$ für $t < t_0, i = 1$ für $t \geq t_0$ (s. Tabelle 1)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 12):

Kriterien	Bewertung ¹¹	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	gut-mittel	einige Werte leicht unterschätzt
Anpassung oberer Bereich	schlecht	die obersten zwei Werte stark unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	gleich gut	Resultate der beiden Methoden sehr ähnlich

Folgende Tabelle enthält die für das aktuellste Jahr (2015) bestimmten Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit der Modellvariante „sigjump1981“ 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	107	121	135
HQ ₁₀	149	186	223
HQ ₃₀	170	243	316
HQ ₁₀₀	177	321	464
HQ ₃₀₀	160	408	656

In Abbildung 13 ist die Veränderung des mit dem Modell „sigjump1981“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1974 und 2015 dargestellt.

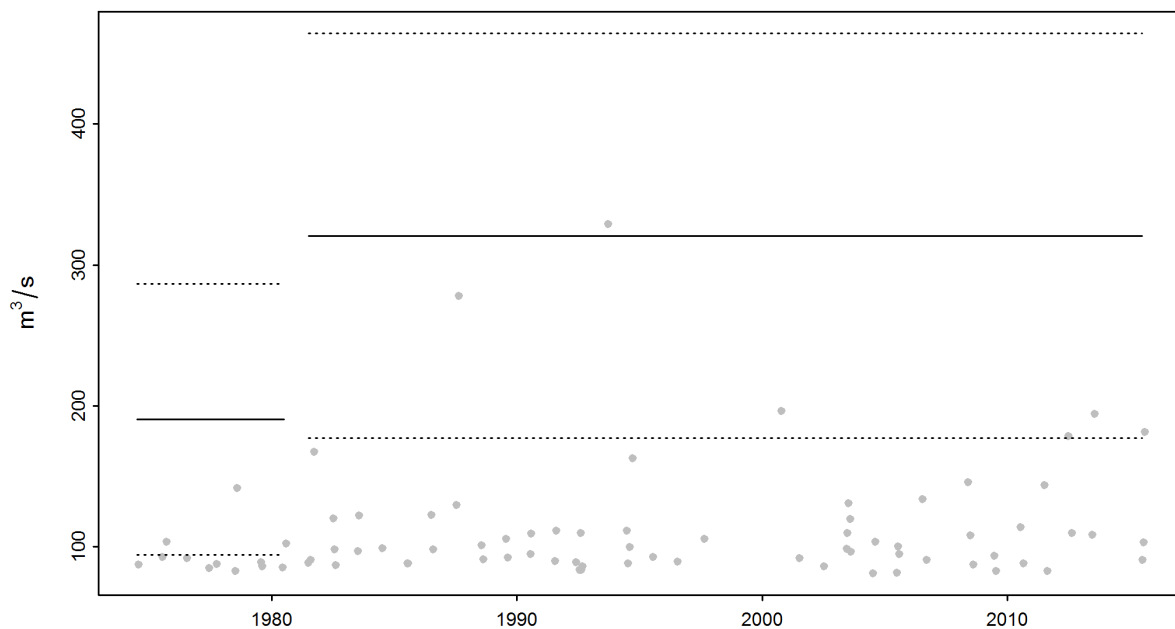


Abbildung 13: Veränderung der mit der Modellvariante „sigjump1981“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1974-2015

¹¹Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

3 Vergleich der verschiedenen Resultate

Abbildung 14 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 1923 - 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	kleinere Werte für kleine Wiederkehrperioden; grössere Werte für grosse Wiederkehr- perioden	deutlich grösser
Periode ab Bruchpunkt / Gesamte Auswertungsperiode	kleinere Werte für kleine Wie- derkehrperioden; etwas grö- ssere Werte für grosse Wieder- kehrperioden	deutlich grösser
Periode ab Bruchpunkt / Vergleichs- periode	kaum Unterschiede; etwas kleinere Werte für grosse Wiederkehrperioden	etwas etwas kleiner

Nach 1967 wurden durchschnittlich tiefere Jahreshochwasser beobachtet. Dies führt zu kleineren HQ_T in der Periode ab Bruchpunkt und der Vergleichsperiode für kleine und mittlere Wiederkehrperioden. Durch die grössere Varianz zwischen kleinen und sehr grossen Jahreshochwasser werden für sehr grosse Wiederkehrperioden (HQ_{300}) jedoch sogar grössere Werte als in der gesamten Auswertungsperiode erreicht. Aufgrund der geringeren Datenmenge ist das Konfidenzintervall bei der Vergleichsperiode und der Auswertungsperiode ab Bruchpunkt viel grösser als in der gesamten Auswertungsperiode.

3.2 Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze

In Abbildung 14 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 POT-Ansatzes liegen für grössere Wiederkehrperioden etwas tiefer als diejenigen des BLOCK-Ansatzes der Vergleichsperiode, im Vergleich mit dem BLOCK-Ansatz der gesamten Auswertungsperiode liegen die HQ_T des POT-Ansatzes durchgehend tiefer.

Differenzen der berechneten Konfidenzintervalle der beiden Ansätze:

Allgemein nehmen die Unsicherheiten und somit die Konfidenzintervalle zu, je grösser die Wiederkehrperiode T ist. Die Konfidenzintervalle des POT-Ansatzes sind dabei kleiner als diejenigen des BLOCK-Ansatzes der Vergleichsperiode und der Periode ab Bruchpunkt, während sie etwas grösser als diejenigen des BLOCK-Ansatzes der gesamten Auswertungsperiode sind.

Vergleich von stationären und nicht stationären Varianten:

Beim BLOCK-Ansatz kann mit einer nicht stationären Variante die Modellgüte nicht verbessert werden, auch wenn die deutliche Veränderung der Jahresmaxima seit 1967 in das Modell einbezogen wird. Die berechneten Wiederkehrwerte für das Jahr 2015 sind in der Folge tiefer als mit den stationären Modellvarianten. Einige Werte liegen zwar besser auf der Einheitsdiagonale und das Konfidenzintervall wird viel kleiner, jedoch wer-

den die höchsten Abflusswerte unterschätzt, was für Hochwasserabschätzungen ungünstig ist. Für geringe und mittlere Jährlichkeiten jedoch trifft das nicht stationäre Modell die Daten besser. Beim POT-Ansatz unterscheiden sich die Ergebnisse des nicht stationären Modell kaum vom stationären Modell. 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.

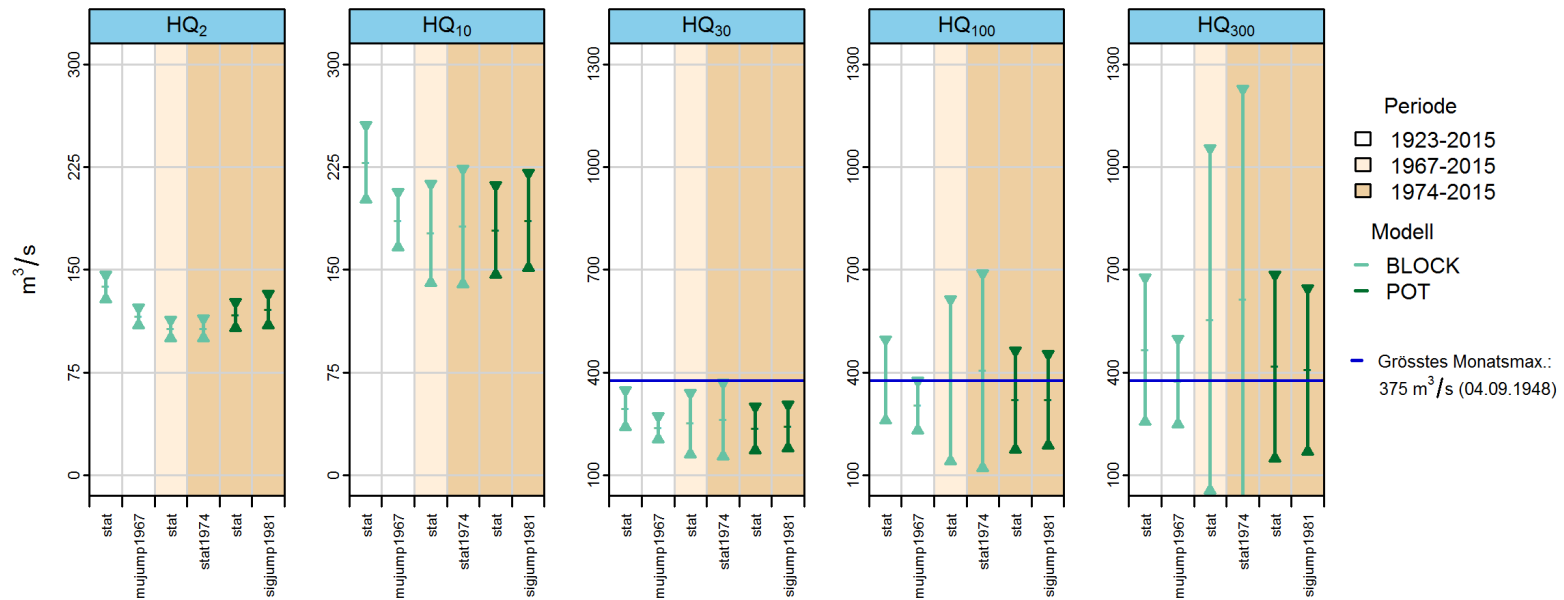


Abbildung 14: HQ_T [m³/s] inkl. 95%-Konfidenzintervalle, berechnet mit den stationären sowie den jeweils bestangepassten Modellvarianten des BLOCK- und POT-Ansatzes für das Jahr 2015

Auswertungsperiode	Verfahren	Anpassung		Bemerkung
1923 - 2015	BLOCK stat	gut	gut-mittel	gut-mittel ein paar Werte leicht überschätzt; Spitze gut getroffen
	BLOCK mujump1967	gut	gut	mittel-schlecht die obersten drei Werte unterschätzt einige Werte liegen näher an Einheitsdiagonale, Spitzenwerte allerdings unterschätzt. Konfidenzintervall kleiner.
1974 - 2015	BLOCK stat	gut	mittel	mittel-schlecht die obersten zwei Werte unterschätzt
1967 - 2015	BLOCK stat	gut	gut-mittel	mittel-schlecht die obersten zwei Werte unterschätzt
1974 - 2015	POT stat	gut	gut-mittel	schlecht die obersten zwei Werte stark unterschätzt
	POT sigjump1981	gut	gut-mittel	schlecht die obersten zwei Werte stark unterschätzt Resultate der beiden Methoden sehr ähnlich

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 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt (siehe Abbildung 15).

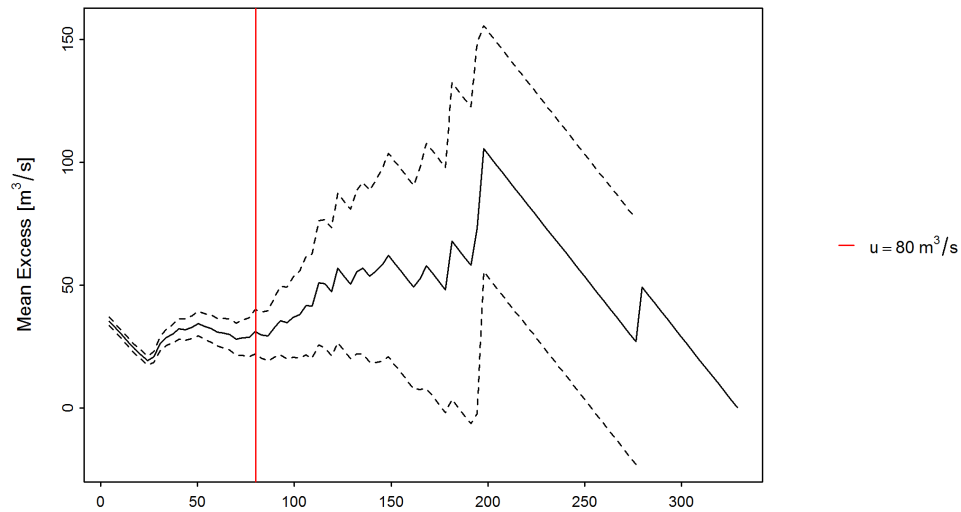


Abbildung 15: „mean residual life plot“ mit gewähltem Schwellenwert u (rote Linie) mean Excess (schwarze Linie), 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien)

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 unbekanntes 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).