



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

# STATIONSBERICHT HOCHWASSERSTATISTIK

## Leitfaden

Kontakt: [hydrologie@bafu.admin.ch](mailto:hydrologie@bafu.admin.ch)

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Erläuterungen zu Kapitel 1 „Datengrundlage“</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Erläuterungen zu Kapitel 2 „Resultate der parametrischen Verfahren“</b>	<b>6</b>
2.1	Erläuterung der parametrischen Verfahren . . . . .	6
2.1.1	Block Maximum Ansatz (BLOCK) . . . . .	6
2.1.2	Peaks over Threshold Ansatz (POT) . . . . .	7
2.1.3	Verwendete Modellvarianten . . . . .	7
2.1.4	Verwendete Auswertungszeiträume . . . . .	10
2.2	Inhalt des Kapitels . . . . .	11
2.2.1	Beschreibung des Modells und der Modelleingangsdaten . . . . .	11
2.2.2	Tabelle mit geschätzten Modellparametern . . . . .	13
2.2.3	Diagnostikplots mit Bewertung . . . . .	13
2.2.4	Tabellen der Wiederkehrwerte $HQ_T$ . . . . .	17
2.2.5	Plots der Veränderung der mit nicht stationären Modellvarianten berechneten $HQ_{100}$ . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Erläuterungen zu Kapitel 3 „Vergleich der verschiedenen Resultate“</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>21</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>22</b>
I	Beispiel für Station mit signifikantem Bruchpunkt . . . . .	22
II	Beispiele für Diagnostikplots . . . . .	23

# 0 Einleitung

Der vorliegende Leitfaden soll helfen, die Verständlichkeit und Lesbarkeit der Stationsberichte zur Hochwasserstatistik zu gewährleisten. Die Berichte dienen dazu Nicht-Stationaritäten in den Daten zu erkennen, eine Übersicht über die mit zwei verschiedenen Ansätzen berechneten Abflussmengen für vorgegebene Wiederkehrperioden ( $HQ_T$ ) zu gewinnen und die Unterschiede zwischen diesen zu beurteilen. Für die Beantwortung konkreter Fragestellungen, z. B. bei der Bestimmung von Bemessungsabflüssen, bilden die Resultate dieser statistischen Auswertungen nur eine Grundlage. Kenntnisse über die hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet, Überlegungen zu Worst-Case-Szenarien für Niederschlag und Abfluss usw. sind unerlässlich um das Hochwasserrisiko abzuschätzen. Die Abteilung Hydrologie des BAFU befürwortet eine „hydrologisch-argumentative Vorgehensweise“ wie sie Merz und Blöschl (2008, zitiert in DWA 2012:52) vorschlagen.

## 1 Erläuterungen zu Kapitel 1 „Datengrundlage“

Kapitel 1 gibt Auskunft über die für die betrachtete Abflussmessstation zur Verfügung stehenden Messreihen. Dabei werden der abgedeckte Zeitraum, allfällige Lücken, anthropogene Beeinflussungen des Gewässers und der Abflussregimetyp thematisiert. Zusätzlich ist der grösste beobachtete Abflusswert mit dem Datum des Auftretens aufgeführt.

Für die verschiedenen Auswertungsmethoden werden die Abflussdaten in unterschiedlicher Auflösung benötigt. Zurzeit stehen am BAFU Monatsmaxima ab dem jeweiligen Messbeginn, Tagesmaxima aber erst ab 1974 digital zur Verfügung. Für den Block Maximum Ansatz (BLOCK) können die Monatsmaxima als Grundlage dienen, für den Peaks Over Threshold Ansatz (POT) sind dagegen die Tagesmaxima notwendig. Der Auswertungszeitraum des BLOCK-Ansatzes unterscheidet sich daher bei den meisten Messstationen von jenem des POT-Ansatzes.

Die Zeitreihendarstellungen der Jahres-, Monats- und Tagesmaxima (Abbildungen 1 bis 4 des Stationsberichts) vermitteln einen ersten Eindruck von den verwendeten Datengrundlagen und können Hinweise bezüglich Stationarität der Daten geben.

Für den Block Maximum Ansatz werden aus der Reihe der Monatsmaxima die Jahresmaxima extrahiert (grösstes Monatsmaximum pro Jahr<sup>1</sup>). Dabei werden erst die Daten ab Installation eines Linnigraphen bzw. der kontinuierlichen Erfassung des Abflusses verwendet. Zur Identifikation möglicher Sprünge innerhalb der Reihe der Jahresmaxima wird eine Bruchpunktanalyse nach Bai & Perron durchgeführt (Bai & Perron 1998 zitiert in KHR 2007).

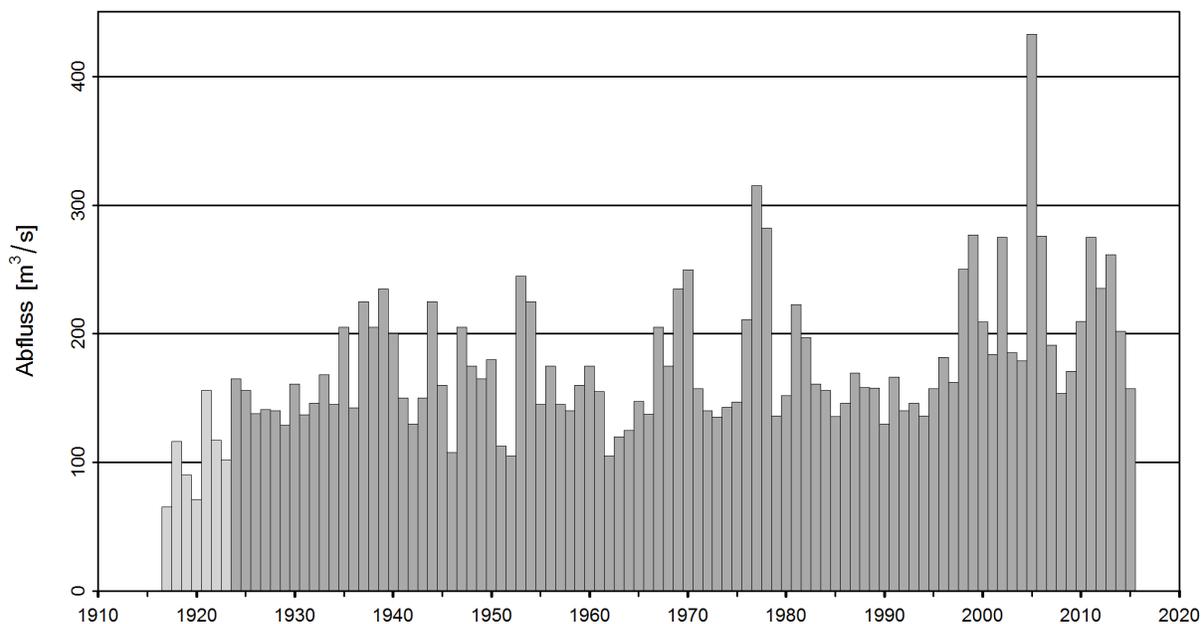
Signifikante Bruchpunkte werden anhand der Geschichte der Station sowie der bekannten, potenziell relevanten anthropogenen Beeinflussungen im Einzugsgebiet analysiert. Wo sie, unter Berücksichtigung des Konfidenzintervalls des Auftretenszeitpunkts, erklärbar sind, wird die Datenreihe entsprechend unterteilt. Für die Erstellung der Hochwasserstatistik-Resultatblätter, die auf der Webseite des BAFU publiziert sind, wird nur der Zeitraum nach einer allfälligen Teilung der Rei-

---

<sup>1</sup>Die Jahresmaxima werden auf Unabhängigkeit geprüft und gegebenenfalls korrigiert (vgl. Kapitel 2.1.1).

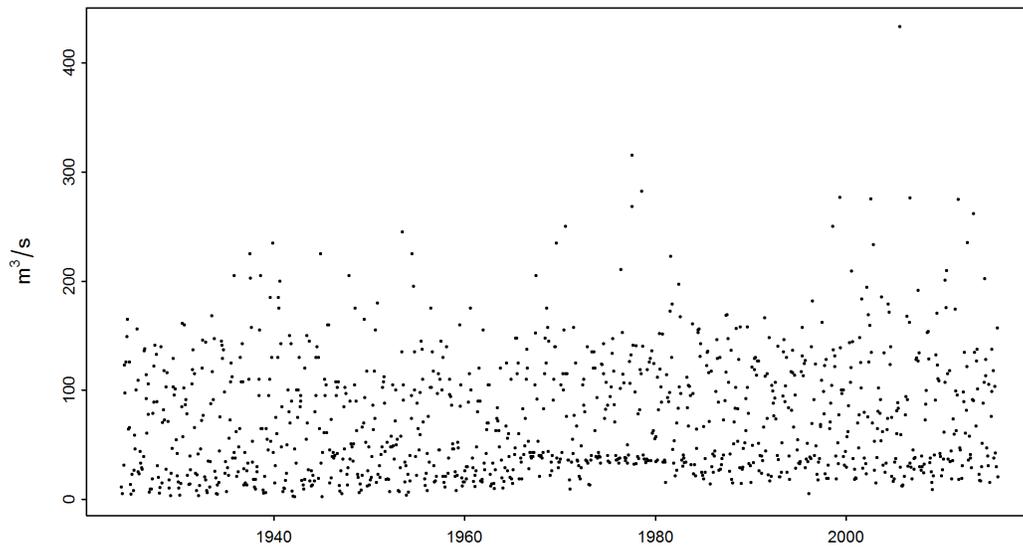
he verwendet. In den Stationsberichten ist in diesen Fällen auch die Auswertung für die gesamte Zeitreihe der Jahresmaxima enthalten (siehe Beispiel im Anhang A).

Abbildung 1 zeigt als Beispiel die Jahresmaxima der Muota in Ingenbohl. Da erst im Verlaufe des Jahres 1923 ein Linnigraph installiert wurde, werden für den Block Maximum Ansatz die Jahresmaxima erst ab 1924 verwendet. In Abbildung 1 sind daher die Werte 1917-1923 hellgrau dargestellt. In der Reihe der Jahresmaxima ab 1924 wird mit der Bruchpunktanalyse ein signifikanter Bruchpunkt zwischen 1997 und 1998 gefunden (Konfidenzintervall 1987-2002). Aus den zur Station und zum Einzugsgebiet vorliegenden Unterlagen sind für diesen Zeitraum keine Eingriffe bekannt, die das Abflussgeschehen entsprechend verändert haben könnten. Die Inbetriebnahme eines Wasserkraftwerks im Jahr 1970 geht dagegen aus der Bruchpunktanalyse nicht als signifikant hervor. Die Zeitreihe der Jahresmaxima wird aus diesen Gründen nicht weiter unterteilt. Im Beispiel der Muota in Ingenbohl werden für den BLOCK-Ansatz die Auswertungen 1924-2015 (gesamte Auswertungsperiode) und 1974-2015 (Vergleichsperiode) untersucht. Die Analyse des POT-Ansatzes erfolgt für die Auswertungsperiode POT (1974-2015) (siehe Kapitel 2.1.4). (Ein Beispiel mit Unterteilung findet sich im Anhang A.)



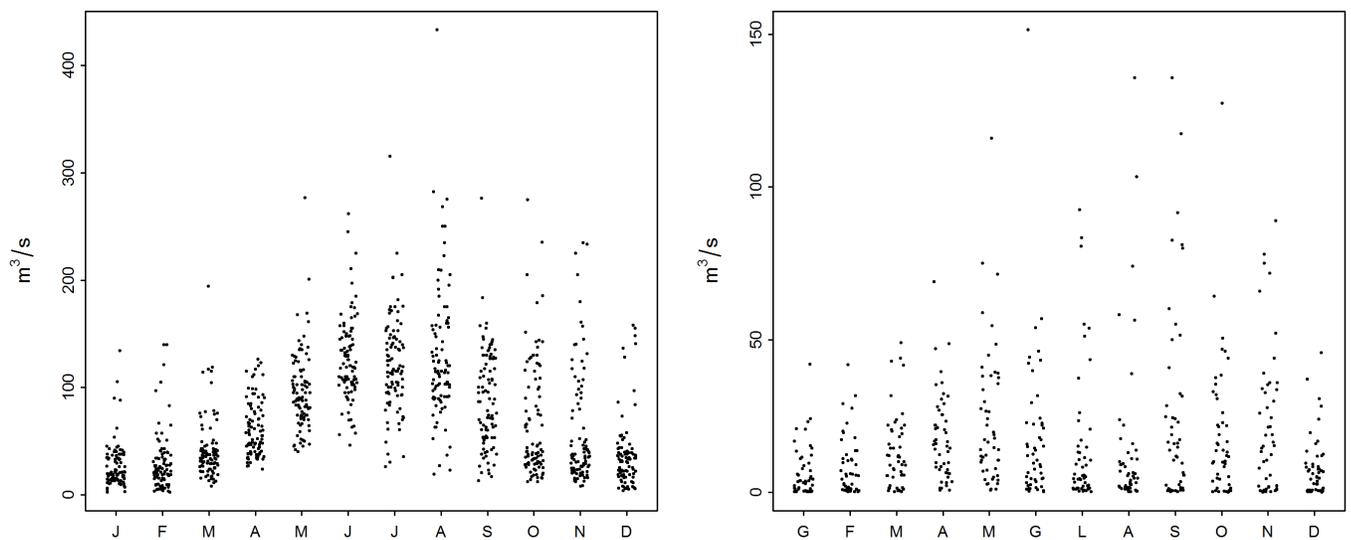
**Abbildung 1:** Zeitreihe der Jahresmaxima (Muota-Ingenbohl) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (1917 - 2015, hellgrau: nicht für die Statistik verwendete Jahresmaxima, dunkelgrau: verwendete Jahresmaxima)

Die Abbildungen der Zeitreihe der Monatsmaxima (siehe Abbildung 2), des saisonalen Verlaufs der Monatsmaxima (siehe Abbildung 3) sowie der Zeitreihe der Tagesmaxima (siehe Abbildung 4) erlauben noch detailliertere Einblicke in die Datenstruktur. So lassen sich, z.B. aufgrund eines Kraftwerkbaus, oft auch auffällige Muster feststellen. Dies zeigt sich etwa im Beispiel der Monatsmaxima der Muota (Abbildung 2): Die zuvor schon erwähnte Inbetriebnahme eines Wasserkraftwerks im Jahr 1970 bewirkt zwar in den Jahresmaxima keinen signifikanten Bruchpunkt, in den Monatsmaxima ist aber im Bereich der kleinen Werte ab etwa 1970 eine deutliche Erhöhung der tiefsten Monatsmaxima sichtbar.

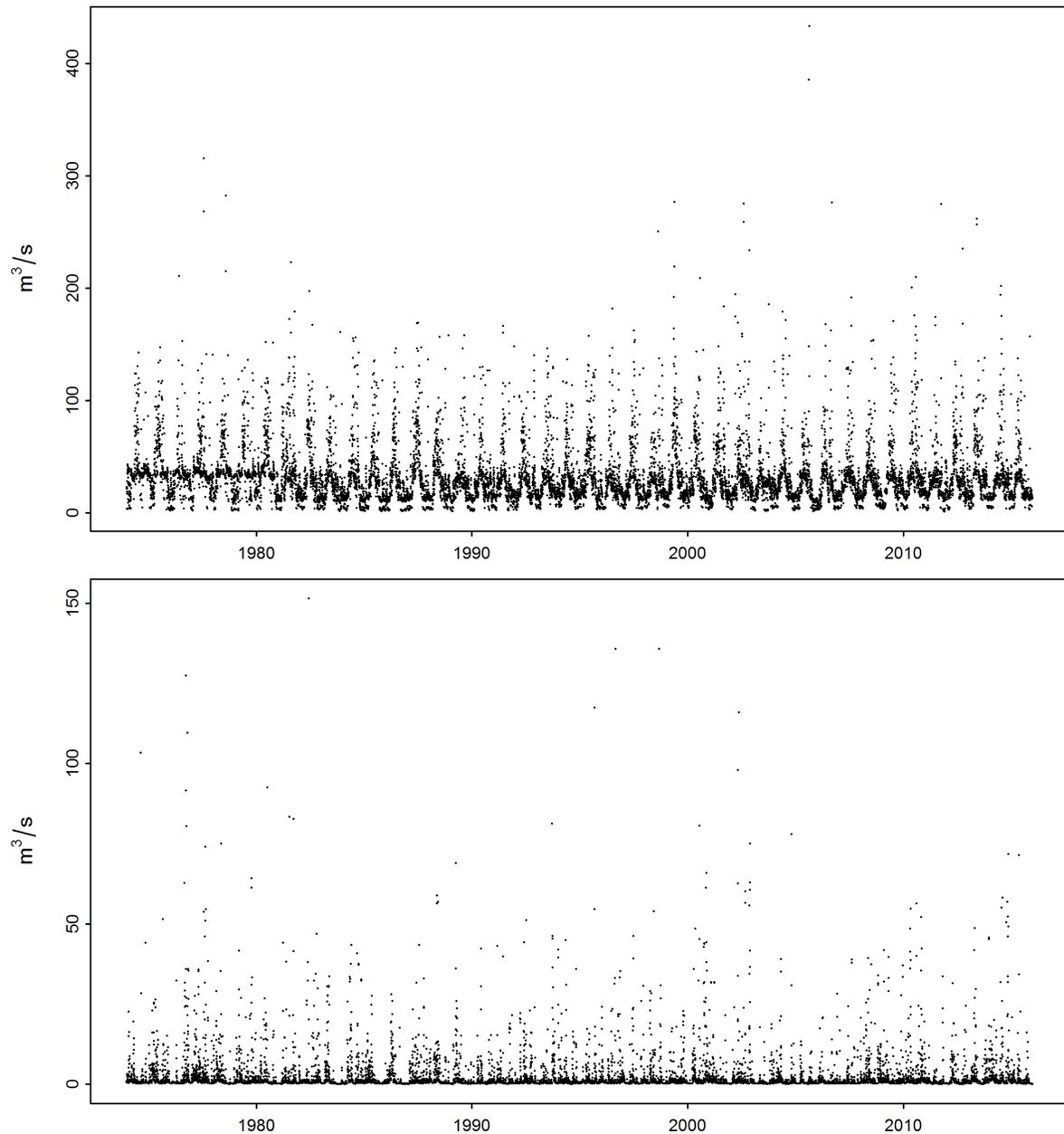


**Abbildung 2:** Zeitreihe der Monatsmaxima (Muota-Ingenbohl) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (01.01.1924 - 31.12.2015)

Abbildung 3 des Stationsberichts zeigt die verwendeten Werte aufgeschlüsselt nach Monat. Dabei werden die Datenpunkte innerhalb eines Monats, zur Verbesserung der Lesbarkeit, leicht versetzt abgebildet („jitter“, d.h. zufällige Versetzung ohne Bezug zum genauen Auftretensdatum). Die Darstellung gibt einen Eindruck der Streuung und kann eine allfällig vorhandene Saisonalität aufzeigen. So weist die Muota (Abbildung 3 links) eine recht ausgeprägte Saisonalität auf, die grössten Monatsmaxima werden im Allgemeinen in den Sommermonaten beobachtet. Bei der Breggia (Abbildung 3 rechts) ist die Saisonalität weit weniger ausgeprägt, obwohl auch hier die grössten Werte im Sommer und Herbst auftreten.



**Abbildung 3:** Saisonaler Verlauf der Monatsmaxima der Muota in Ingebohl (links) und der Breggia in Chiasso (rechts) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]



**Abbildung 4:** Zeitreihe der maximalen Tagesabflüsse [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] (oben: Muota-Ingenbohl, unten: Breggia-Chiasso)

Abbildung 4 zeigt als Beispiel für die Darstellung der Tagesmaxima die Zeitreihen der Abflussmessstationen Muota-Ingenbohl (oben) und Breggia-Chiasso (unten). Auch in den Tagesmaxima ist bei der Muota, im Gegensatz zur Breggia, eine ausgeprägte Saisonalität erkennbar.

## 2 Erläuterungen zu Kapitel 2 „Resultate der parametrischen Verfahren“

### 2.1 Erläuterung der parametrischen Verfahren

In Kapitel 2 der Stationsberichte werden die Ergebnisse der beiden verwendeten parametrischen Verfahren Block Maximum Ansatz (BLOCK) und Peaks Over Threshold (POT) zusammengefasst. Die beiden Ansätze, die sich in der Methode unterscheiden, wie Extremwerte identifiziert werden, basieren auf folgenden Modelleingangsdaten und Parametern:

Parametrisches Verfahren	Parameter	Modelleingangsdaten
Block Maximum (BLOCK)	$\mu$ Lageparameter $\sigma$ Skalenparameter $\kappa$ Formparameter	Jahresmaxima
Peaks Over Threshold (POT)	$\lambda$ Ereignisrate $\sigma$ Skalenparameter <sup>2</sup> $\kappa$ Formparameter	Tagesmaxima

#### 2.1.1 Block Maximum Ansatz (BLOCK)

Der Block Maximum Ansatz definiert den höchsten Wert innerhalb eines Zeitintervalls (=Block) als Extremwert. In dieser Studie wird eine Blockgrösse von einem Jahr gewählt. Wie beim bisher verwendeten DVWK-Verfahren (1979) werden also Jahresmaxima ausgewertet.<sup>3</sup> Die Extremwerttheorie zeigt, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Jahresmaxima der Allgemeinen Extremwertverteilung (Generalized Extreme Value Distribution, GEV) folgt. Die GEV wird durch den Lageparameter  $\mu$ , den Skalenparameter  $\sigma$  und den Formparameter  $\kappa$  beschrieben. Durch Maximierung der log-Likelihood-Funktion, welche aus dem GEV-Modell folgt, können die drei Parameter geschätzt werden (Formel 1).

$$l(\mu, \sigma, \kappa) = -n \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \kappa \frac{y_i - \mu}{\sigma}\right) - \sum_{i=1}^n \left(1 + \kappa \frac{y_i - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\kappa}} \quad (1)$$

$y_i$  entspricht dem Jahresmaximum des Jahres  $i$ . Anhand der Schätzer für  $\mu$ ,  $\sigma$  und  $\kappa$  wird schliesslich mit Formel 2 der  $T$ -jährliche Erwartungswert des Abflusses  $HQ_T$  ( $p = \frac{1}{T}$ ) bestimmt.

$$HQ_T = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\kappa} [1 - \{-\log(1-p)\}^{-\kappa}] & \text{für } \kappa \neq 0 \\ \mu - \sigma \log\{-\log(1-p)\} & \text{für } \kappa = 0 \end{cases} \quad (2)$$

<sup>2</sup>Der Skalenparameter  $\sigma$  des POT-Ansatzes ist numerisch nicht identisch mit dem  $\sigma$  des BLOCK-Ansatzes.

<sup>3</sup>Die Jahresmaxima werden analog zu den Tagesmaxima auf Unabhängigkeit geprüft (vgl. Kapitel 2.1.2). Wo zwei Jahresmaxima das Unabhängigkeitskriterium nicht erfüllen, wird der kleinere Wert durch das nächsthöhere, unabhängige Monatsmaximum des entsprechenden Jahres ersetzt.

### 2.1.2 Peaks over Threshold Ansatz (POT)

Beim POT-Ansatz gelten Werte als Extremereignisse, wenn sie einen hohen Schwellenwert  $u$  überschreiten. Gemäss der Extremwerttheorie ist bei einem hohen  $u$  die Anzahl Schwellenwertüberschreitungen poissonverteilt mit der Ereignisrate  $\lambda$ . Die Beträge der Schwellenwertüberschreitungen folgen der Allgemeinen Paretoverteilung (Generalized Pareto Distribution, GPD). Im Verfahren, wie es das BAFU anwendet, ist die Serie der Tagesmaxima die Eingangsgrösse. Der Schwellenwert  $u$  wird anhand der grafischen Methoden „mean residual life plot“ und „fitrange plot“ (vgl. Coles 2001) festgelegt. Danach werden die Schwellenwertüberschreitungen bestimmt und die Parameter durch Maximierung der log-Likelihood-Funktion, abgeleitet aus der Poisson- und GPD-Verteilung, geschätzt (Formel 3).

$$l(\lambda, \sigma, \kappa) = n \log \lambda - \lambda t - n \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \frac{\kappa w_i}{\sigma}\right) \quad (3)$$

$w_i$  ist ein Element der Serie der  $n$  beobachteten Schwellenwertüberschreitungen. Parameter  $\lambda$  entspricht der Ereignisrate, das heisst der mittleren Anzahl Schwellenwertüberschreitungen während des Zeitintervalls von einem Jahr. Parameter  $\sigma$  entspricht auch beim POT-Ansatz dem Skalenparameter, ist aber numerisch nicht identisch mit dem  $\sigma$  des BLOCK-Ansatzes. Das  $HQ_T$  lässt sich durch Einsetzen der Parameterschätzer in Formel 4 berechnen.

$$HQ_T = u + \frac{\sigma}{\kappa} \left\{ \left( \frac{\lambda}{1-p} \right)^\kappa - 1 \right\}, T = \frac{1}{p} \quad (4)$$

Die log-Likelihood-Funktion (Formel 3) darf nur unter der Annahme verwendet werden, dass die Tagesmaximadaten unabhängig voneinander sind. Da es sehr wahrscheinlich ist, dass Schwellenwertüberschreitungen an aufeinander folgenden Tagen dasselbe Hochwasserereignis repräsentieren, werden die Daten daher vorgängig von solchen Clustern bereinigt. Beard (Cunnane 1989 zitiert in Meylan et al. 2008) berechnet den Zeitabstand  $L$  zwischen zwei unabhängigen Ereignissen über die Einzugsgebietsfläche  $A$  in Quadratmeilen (Formel 5).

$$L = 5 \text{ Tage} + \ln(A) \quad (5)$$

Die Untersuchung der BAFU-Abflussdaten hat ergeben, dass sich diese Formel gut zur Abgrenzung unabhängiger Ereignisse eignet, sofern ein Mindestabstand von 11 Tagen eingehalten wird.

### 2.1.3 Verwendete Modellvarianten

Neben dem stationären Modell werden bei beiden der zuvor vorgestellten Ansätze auch nicht stationäre Varianten geprüft. Im stationären Fall wird angenommen, dass alle Parameter der Verteilungsfunktion über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant sind, im nicht stationären Fall werden die Parameter zeitlich abhängig modelliert. Die Verwendung von nicht stationären Parametern führt dazu, dass sich auch die berechneten  $HQ_T$  über die Zeit verändern. Innerhalb des vom BAFU angewendeten Methodensets wird die Nicht-Stationarität des Lageparameters  $\mu$  und des Skalenparameters  $\sigma$  getestet. In Tabelle 1 sind alle Modellvarianten aufgelistet, welche vom BAFU beim BLOCK-Ansatz untersucht werden. Tabelle 2 zeigt die Modellvarianten des POT-Ansatzes.

**Tabelle 1:** Verwendete Modellvarianten des BLOCK-Ansatzes.  $\mu$  Lageparameter (mu),  $\sigma$  Skalenparameter (sigma),  $\kappa$  Formparameter (kappa)

<b>Modellvarianten BLOCK</b>			
<b>Name</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Parameter (t: Jahr)</b>	<b>Anzahl Parameter</b>
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

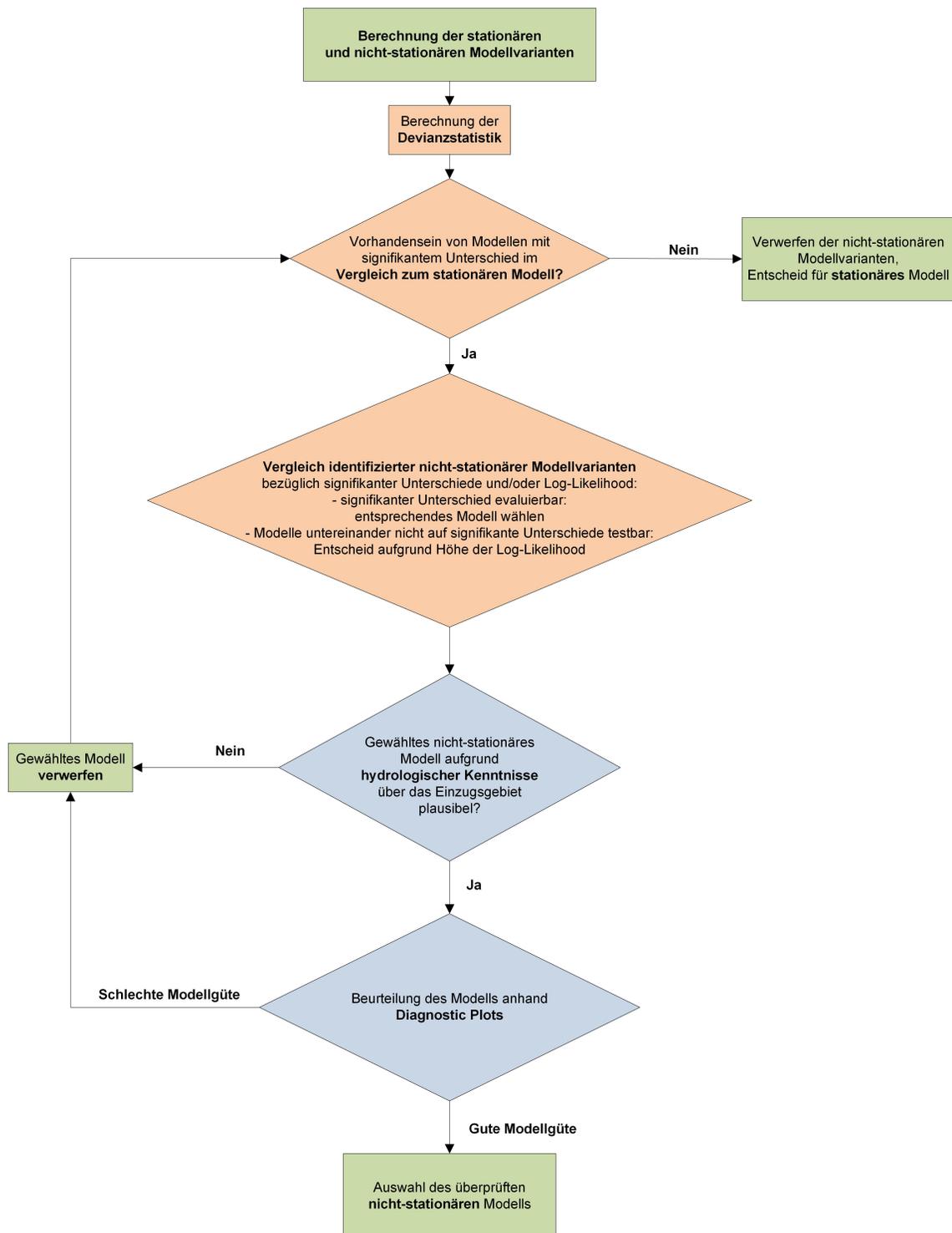
**Tabelle 2:** Verwendete Modellvarianten des POT-Ansatzes.  $\sigma$  Lageparameter (sigma),  $\kappa$  Formparameter (kappa)

<b>Modellvarianten POT</b>			
<b>Name</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Parameter (t: Jahr)</b>	<b>Anzahl Parameter</b>
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 Modellvarianten „mujump“ bzw. „sigjump“ berücksichtigen eine nicht-kontinuierliche Veränderung von  $\mu$  bzw.  $\sigma$  zum Zeitpunkt  $t_0$  und versuchen damit abrupte, strukturelle Veränderungen im Einzugsgebiet, wie den Bau einer Talsperre, abzubilden. Als Hilfsmittel für die Wahl von  $t_0$  dient ein Bruchpunkttest nach Bai & Perron (Bai & Perron 1998 zitiert in KHR, 2007). Entscheidend sind aber Kenntnisse über den Zeitpunkt allfälliger Eingriffe im Einzugsgebiet. Liegen diese innerhalb des Konfidenzintervalls des Bruchpunkts nach Bai & Perron, so wird  $t_0$  zwingend auf diesen Zeitpunkt festgelegt (vgl. Beispiel Muota-Ingenbohl, S. 3). Gibt es Widersprüche, so werden diese im Stationsbericht dargelegt und der Entscheid begründet (vgl. Beispiel Vispa-Visp, Anhang A).

Anhand eines Ablaufschemas (Abbildung 5) wird versucht, aus den verschiedenen Modellvarianten die geeignetste auszuwählen. Mit der Devianzstatistik kann die Anpassungsgüte eines Modells für einen gegebenen Datensatz untersucht werden. Damit kann überprüft werden, ob sich die Modellvarianten signifikant unterscheiden (vgl. Coles 2001). Ist dies nicht der Fall, wird das einfachere Modell gewählt. Beim Vergleich von Modellvarianten, die nicht verschachtelt sind, kann die Devianzstatistik nicht verwendet werden. Weisen die Modelle dieselbe Anzahl Parameter auf (z.B. „mul“ und „mujump“), wird die Log-Likelihood verglichen. Wo auch das nicht möglich ist (z.B. „muq“ und „mujump“), erfolgt die Wahl der Modellvariante aufgrund hydrologischer Überlegungen (wird z.B. ab einem bestimmten Zeitpunkt aus dem Einzugsgebiet Wasser abgeleitet, so ist die Modellvariante „mujump“ vermutlich plausibler als „muq“). Trifft die Wahl auf ein nicht stationäres Modell, wird in jedem Fall untersucht, ob es aus hydrologischer Sicht plausibel ist und wie die Modellgüte zu beurteilen ist. Diese Kriterien sind stark subjektiv gefärbt. Die Modellwahl wird in den Berichten kurz erläutert.

## Ablaufschema: Auswahl der geeignetsten stationären oder nicht-stationären Modellvariante



**Abbildung 5:** Ablaufschema zur Auswahl der geeignetsten stationären oder nicht stationären Modellvariante

## 2.1.4 Verwendete Auswertungszeiträume

Für beide Ansätze (BLOCK und POT) werden, je nach Situation, ein bis maximal drei verschiedene Auswertungszeiträume betrachtet.

BLOCK-Ansatz:

<b>Auswertungszeitraum</b>		<b>Anwendung</b>
gesamte Auswertungsperiode	Daten ab Installation eines Limnigraphen bzw. der kontinuierlichen Erfassung des Abflusses	Immer
Vergleichsperiode	Daten ab digitaler Verfügbarkeit von Tagesmaxima	Falls abweichend von zuvor untersuchter Periode
Auswertungsperiode ab Bruchpunkt	Daten ab signifikantem Bruchpunkt, der zur Teilung einer Zeitreihe führt	Falls signifikanter Bruchpunkt vorhanden

POT-Ansatz:

<b>Auswertungszeitraum</b>		<b>Anwendung</b>
Auswertungsperiode POT <sup>4</sup>	Daten ab digitaler Verfügbarkeit von Tagesmaxima	Immer
Auswertungsperiode ab Bruchpunkt	Daten ab signifikantem Bruchpunkt, der zur Teilung einer Zeitreihe führt	Falls signifikanter Bruchpunkt vorhanden

Der Auswertungszeitraum ab Bruchpunkt entspricht jenem Zeitraum, der für die Erstellung der Hochwasserstatistik-Resultatblätter auf der Webseite des BAFU verwendet wird, falls eine Teilung der Reihe als notwendig erachtet wird.

Da die Tagesmaxima am BAFU zurzeit erst ab 1974 digital vorliegen, umfassen die Auswertungen des POT-Ansatzes meist einen kürzeren Zeitraum als jene des BLOCK Maximum Ansatzes. Der Auswertungszeitraum ab Verfügbarkeit von Tagesmaxima beim BLOCK-Ansatz (Vergleichsperiode) dient dazu, die Resultate dieses Ansatzes direkt mit jenen von POT vergleichen zu können (d.h. Differenzen aufgrund unterschiedlicher betrachteter Messperiode können ausgeschlossen werden).

---

<sup>4</sup>entspricht der Vergleichsperiode des BLOCK-Ansatzes

## 2.2 Inhalt des Kapitels

Beide parametrischen Verfahren (BLOCK und POT) werden im entsprechenden Unterkapitel des Stationsberichtes (2.1 und 2.2) beschrieben. Die Kapitel gliedern sich jeweils nach den folgenden Inhalten:

- Beschreibung des Modells und der Modelleingangsdaten
- Tabelle mit geschätzten Modellparametern
- Diagnostikplots mit Bewertung
- Tabellen der Wiederkehrwerte  $HQ_T$
- Plots der Veränderung der mit nicht stationären Modellvarianten berechneten  $HQ_{100}$

### 2.2.1 Beschreibung des Modells und der Modelleingangsdaten

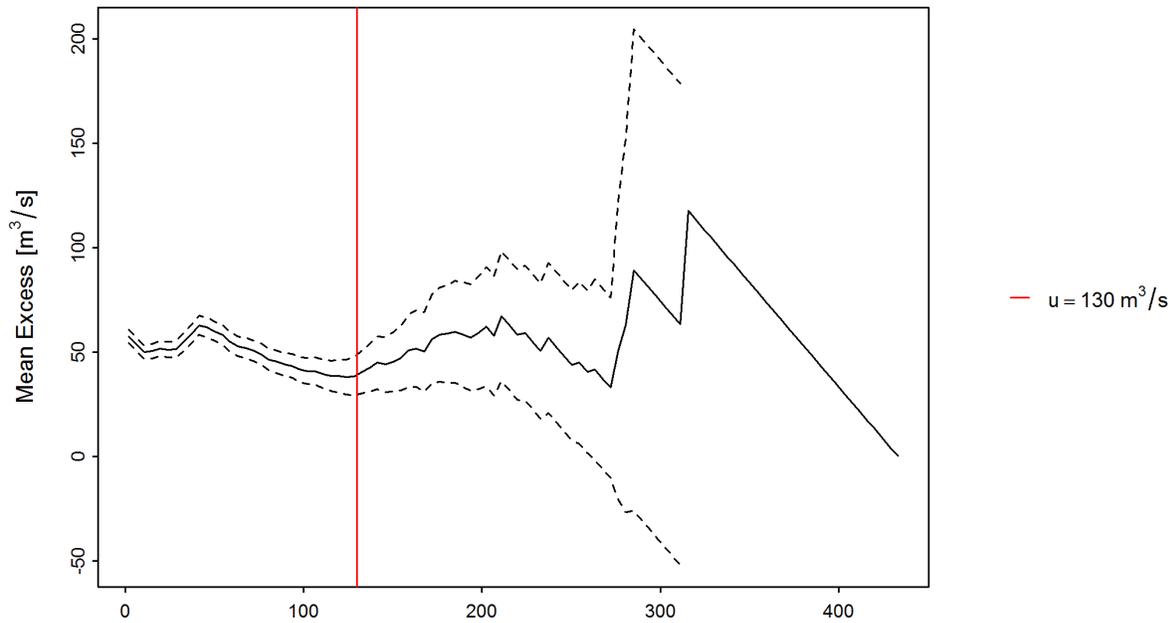
Es wird einleitend kurz erläutert, welches Modell und welche Daten effektiv verwendet werden. Dabei werden, falls vorhanden, die verschiedenen Auswertungszeiträume aufgeführt.

Die zur Verfügung stehenden Modelleingangsdaten sind in den Abbildungen 1 bis 4 im Kapitel 1 des Stationsberichtes dargestellt (vgl. Kapitel 1). Im Kapitel 2 sind einige zusätzliche, verfahrensspezifische Darstellungen der Datengrundlagen enthalten. Anschliessend wird zunächst das stationäre Modell beschrieben (Kapitel 2.x.x.a), danach folgen die nicht stationären Varianten (Kapitel 2.x.x.b). Von letzteren werden nur die Resultate jener Modellvariante aufgeführt, die als die bestangepasste Variante beurteilt wird. Der Variantenentscheid wird jeweils kurz begründet.

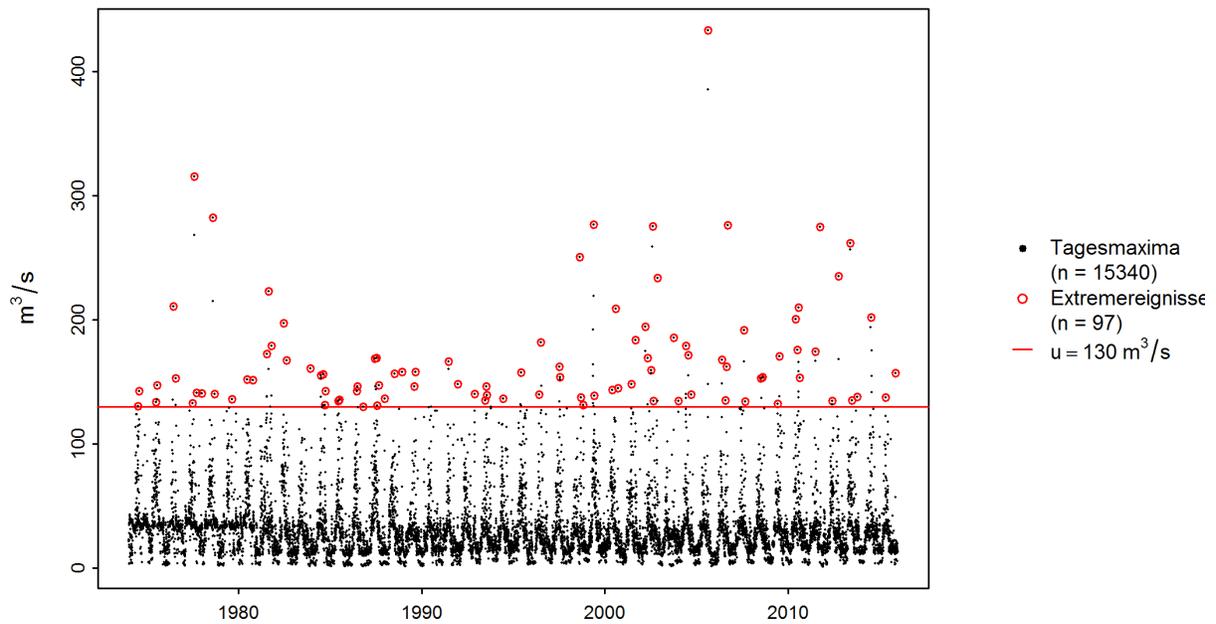
Zur Berechnung des POT-Ansatzes muss ein Schwellenwert  $u$  festgelegt werden. Dies geschieht anhand der grafischen Methode des „mean residual life plots“. Der Plot ist im Anhang A des Stationsberichts abgebildet. Für den theoretischen Hintergrund wird auf Coles (2001) verwiesen. Die Interpretation eines „mean residual life plots“ ist in der Praxis nicht immer einfach. Ziel ist es, den tiefsten Schwellenwert  $u$  zu finden, ab welchem der Plot näherungsweise linear wird, wobei auch das 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien) mitberücksichtigt werden sollte. Im Fall der Muota wird der Schwellenwert  $u$  auf  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  gesetzt (siehe Abbildung 6).

Die Wahl von  $u$  kann mit weiteren Methoden überprüft werden (z.B. „fitrange plot“), diese sind aber im Stationsbericht nicht enthalten.

Um einen Eindruck bezüglich der schliesslich im POT-Ansatz verwendeten Schwellenwertüberschreitungen zu vermitteln, werden diese in der ersten Abbildung im Kapitel 2.2.1 resp. 2.2.2 im Stationsbericht den Grundlagendaten der Tagesmaxima gegenübergestellt. In der Abbildungsliegende ist die Anzahl Extremereignisse angegeben. Dabei gilt es zu beachten, dass es sich um von Clustern bereinigte Werte handelt, d.h. nur um unabhängige Ereignisse. Im Beispiel der Muota gehen 91 Ereignisse in die Auswertung ein (siehe Abbildung 7), das sind  $2\frac{1}{3}$ -mal so viele Werte, wie beim BLOCK-Ansatz für die Vergleichsperiode 1974-2015 verwendet werden. In der hydrologischen Literatur wird davon ausgegangen, dass ab etwa einer Verdopplung der Eingangsdaten eine Verbesserung gegenüber dem BLOCK-Ansatz für die gleiche Zeitreihe resultiert (vgl. Meylan 2008).



**Abbildung 6:** „mean residual life plot“ mit gewähltem Schwellenwert  $u$  (rote Linie), mean Excess (schwarze Linie), 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien)



**Abbildung 7:** Gegenüberstellung der Tagesmaxima (schwarz) und der effektiv für den POT-Ansatz verwendeten Extremwerte (rot) (Muota-Ingenbohl)

## 2.2.2 Tabelle mit geschätzten Modellparametern

Für jede Modellvariante zeigt eine Tabelle die geschätzten Verteilungsparameter sowie die Anzahl Werte, welche zu deren Berechnung verwendet wurden. Zusätzlich enthält die Tabelle beim POT-Ansatz den verwendeten Schwellenwert  $u$  (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4.)

**Tabelle 3:** Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter beim stationären BLOCK-Ansatz über die gesamte Auswertungsperiode 1924-2015 am Beispiel der Muota in Ingenbohl:

Anzahl Werte $n$	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
89	154.08	33.76	0.1332

**Tabelle 4:** Verwendeter Schwellenwert, Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter beim Modellansatz „sigjump“ des POT-Ansatzes am Beispiel der Muota in Ingenbohl:

Schwellenwert $u$	Anzahl Werte $n$	Ereignisrate $\hat{\lambda}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$		Formparameter $\hat{\kappa}$
			$b_1$	$b_2$	
130 m <sup>3</sup> /s	97	2.31	23.68	23.54	0.1462

Die bei den nicht stationären Modellvarianten aufgeführten  $a_1$  und  $a_2$  (Lageparameter) und/oder  $b_1$  und  $b_2$  (Skalenparameter) beziehen sich auf die in Tabelle 1 (BLOCK) bzw. Tabelle 2 (POT) angegebenen Formeln für die Nicht-Stationarität. So gilt in obigem Beispiel (Tabelle 4) für den Skalenparameter:  $\hat{\sigma} = b_1$  für den Zeitraum vor dem Bruchpunkt ( $t < t_0$ ) und  $\hat{\sigma} = b_1 + b_2$  für den Zeitraum nach dem Bruchpunkt ( $t \geq t_0$ ; siehe Tabelle 2).

## 2.2.3 Diagnostikplots mit Bewertung

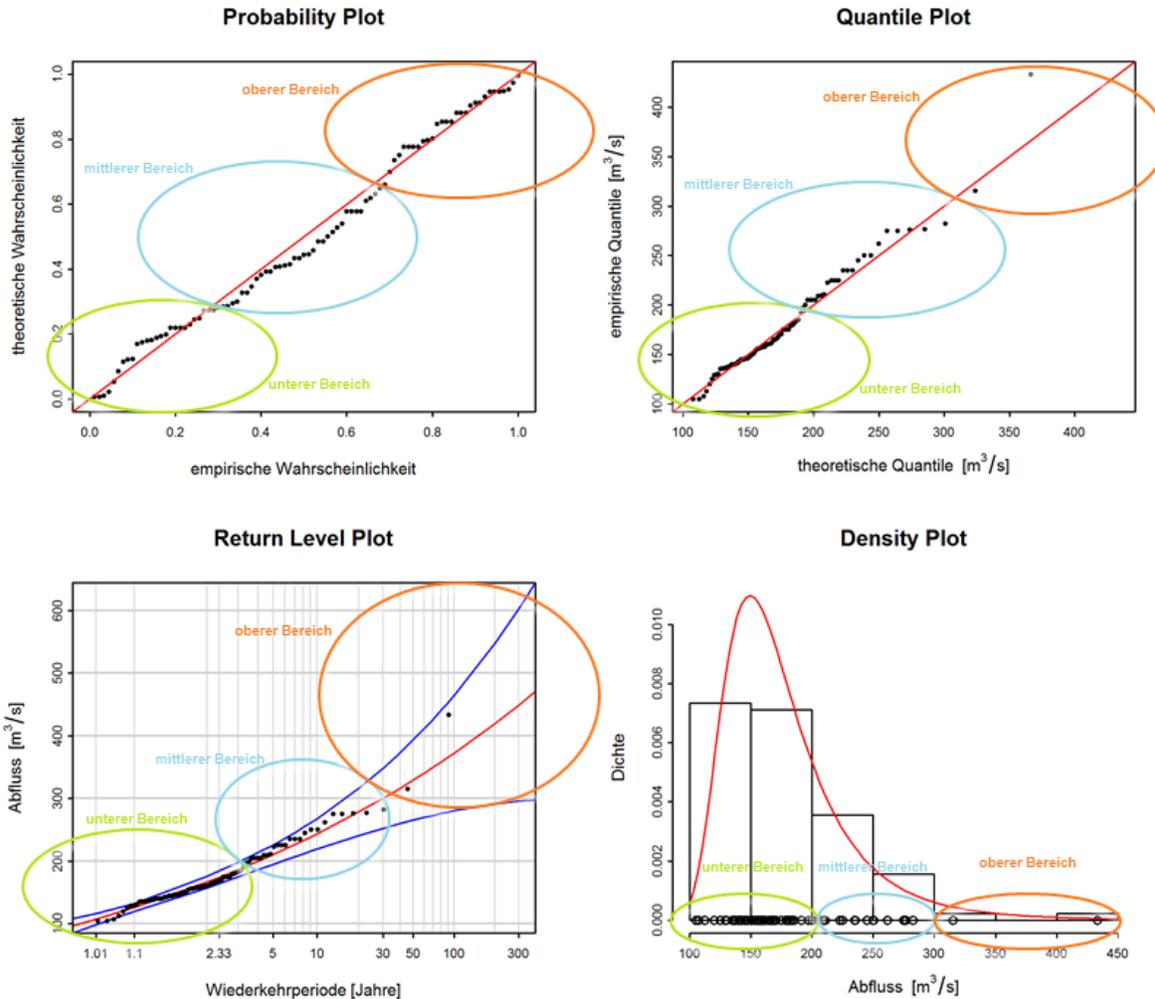
Zur Überprüfung der Modellgüte der parametrischen Verfahren BLOCK und POT sind sogenannte Diagnostikplots abgebildet, die sich im Fall der stationären Modellvarianten aus vier Teilplots zusammensetzen:

- Der *Probability Plot* und der *Quantile Plot* zeigen, wie gut sich das Modell (*theoretische Wahrscheinlichkeit* bzw. *theoretische Quantile*) an die beobachteten Werte (*empirische Wahrscheinlichkeit* bzw. *empirische Quantile*) anpasst. Je genauer die Daten auf der rot eingefärbten Einheitsdiagonale ( $Y = X$ ) liegen, desto höher die Modellgüte (siehe Abbildung 8, oben). Im Probability Plot wird die aufsummierte theoretische Häufigkeit gegen die theoretische, kumulierte Verteilungsfunktion abgetragen. Im Quantile-Plot werden Quantile der beobachteten Abflusswerte gegen die mit Hilfe des Modells berechneten Quantile abgetragen. Da sich die theoretischen Quantile aus der Umkehrfunktion der Verteilungsfunktion berechnen, werden für den direkten, optischen Vergleich mit dem entsprechenden Probability Plot die Achsen des Quantile Plots vertauscht. Die Aussage beider Plots ist dieselbe, jedoch werden sie auf unterschiedlichen Skalen dargestellt. Dies ermöglicht eine bessere Einschätzung der

Modellgüte, so wird etwa die Schwäche des Probability Plots im Bereich der extremsten Werte vom Quantile Plot aufgefangen (vgl. Coles 2001: p. 58-59).

- Der *Return Level Plot* stellt die Abflüsse bei unterschiedlichen Wiederkehrperioden dar (siehe Abbildung 8, unten links). Die rote Kurve entspricht der besten Schätzung, die blauen Kurven zeigen das 95%-Vertrauensintervall. Die Punkte sind die Beobachtungen, denen empirische Wiederkehrperioden zugeordnet werden. Der Vergleich erlaubt weitere Aussagen über die Modellgüte.
- Der *Density Plot* zeigt ein Histogramm der Extremwerte (Säulen: Klassen, Punkte: Einzelwerte) sowie die an die empirischen Daten angepasste Verteilungsfunktion (rote Kurve) (siehe Abbildung 8, unten rechts). Der Säulenverlauf sollte dabei von der Kurve möglichst gut nachgebildet werden. Die Wahl der Klassengrösse der einzelnen Säulen hat jedoch massgeblichen Einfluss auf den Eindruck, den die angepasste Kurve bezüglich Modellgüte vermittelt.

Abbildung 8 des Leitfadens zeigt die Diagnostikplots für die stationäre Modellvariante des BLOCK-Ansatzes der Messstation Muota-Ingenbohl. Der Probability Plot deutet auf eine insgesamt gute Anpassung des Modells an die Beobachtungen hin. Der Quantile Plot zeigt allerdings, dass die grösste aufgetretene Abflussspitze vom Modell relativ schlecht abgebildet werden kann. Dies wird auch im Return Level Plot sichtbar, wo die grösste Beobachtung ziemlich weit weg von der roten Kurve, aber doch noch innerhalb des Konfidenzintervalls liegt. Der Density Plot ist dagegen wieder als gut zu beurteilen. Insgesamt kann in diesem Beispiel von einer recht guten Anpassung gesprochen werden.



**Abbildung 8:** Beispiel für Diagnostikplots einer stationären Modellvariante (Muota-Ingenbohl)

Als Interpretationshilfe wird in den Stationsberichten versucht, eine Beurteilung der Diagnostikplots aufgrund verschiedener Kriterien vorzunehmen. Dabei wird u.a. die Anpassung im „unteren“, „mittleren“ und „oberen“ Bereich bewertet. Die genaue Abgrenzung dieser Bereiche ist subjektiv und kann von Messstation zu Messstation auch leicht variieren. Grundsätzlich werden darunter aber in etwa die in Abbildung 8 gekennzeichneten Bereiche verstanden. Die Beurteilung der Anpassung wird in einer Tabelle zusammengefasst (siehe Tabelle 5). Zusätzlich wird die Breite des Konfidenzintervalls bewertet.

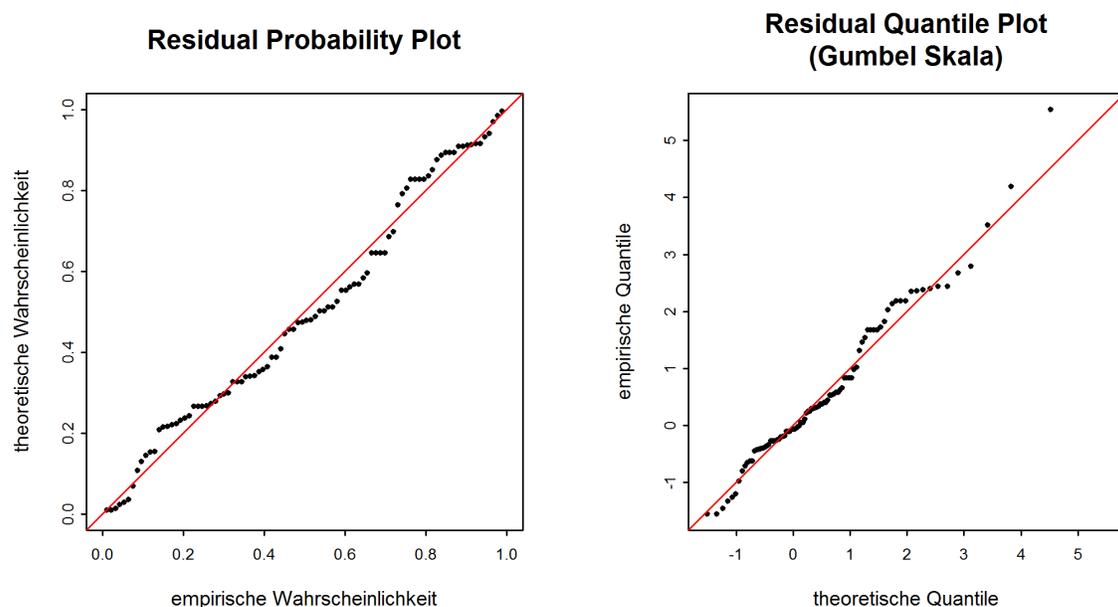
Weitere Beispiele von Diagnostikplots mit Interpretationen sind im Anhang B beschrieben.

Bei den nicht stationären Modellvarianten können nur die Quantile und Probability Plots dargestellt werden, wobei eine Standardisierung der Werte stattfinden muss. Diese erfolgt beim BLOCK-Ansatz über die Gumbelverteilung, beim POT-Ansatz über die Exponentialverteilung. Der Quantile Plot ist abhängig von der Wahl dieser Referenzverteilung. Bei der Interpretation gilt es dennoch, analog zu den Diagnostikplots der stationären Modelle darauf zu achten, wie die Datenpunkte in Bezug auf die Einheitsdiagonale liegen. Abbildung 9 zeigt die Diagnostikplots der Modellvariante

**Tabelle 5:** Beispiele Interpretation Diagnostikplots (Abbildung 8):

Kriterien	Bewertung	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	Gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	Gut	-
Anpassung oberer Bereich	Schlecht	Maximum wird unterschätzt
Konfidenzintervall	Mittel	-

„mujump“ des BLOCK-Ansatzes für die Messstation Muota-Ingenbohl. Aus dem Residual Quantile Plot geht hervor, dass der grösste beobachtete Wert mit der nicht stationären Modellvariante etwas besser angepasst werden kann als mit der stationären Variante (vgl. mit Abbildung 8). Beim Residual Probability Plot ist dagegen kaum eine Veränderung sichtbar.



**Abbildung 9:** Beispiel für Diagnostikplots einer nicht stationären Modellvariante (Muota-Ingenbohl)

Weitere Beispiele von Diagnostikplots von nicht stationären Modellvarianten sind im Anhang B beschrieben.

## 2.2.4 Tabellen der Wiederkehrwerte $HQ_T$

Nach den Diagnostikplots folgt eine Tabelle, welche für vorgegebene Wiederkehrperioden  $T$  die vom verwendeten Modell ermittelten Abflussmengen  $HQ_T$  auflistet. Tabelle 6 zeigt das Beispiel für das stationäre BLOCK-Modell der Station Muota–Ingenbohl. Im stationären Fall gelten die aufgeführten  $HQ_T$  jeweils für die gesamte betrachtete Auswertungsperiode. Bei nicht stationären Modellvarianten verändern sich die berechneten  $HQ_T$  über die Zeit. In der Tabelle sind jeweils die Werte für das aktuellste Jahr aufgeführt. Dieses Jahr ist in einem solchen Fall in der Tabellenbeschriftung angegeben.

**Tabelle 6:** Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden (inkl. 95%-Konfidenzintervall, Deltamethode) für die gesamte Auswertungsperiode (1924 - 2015)

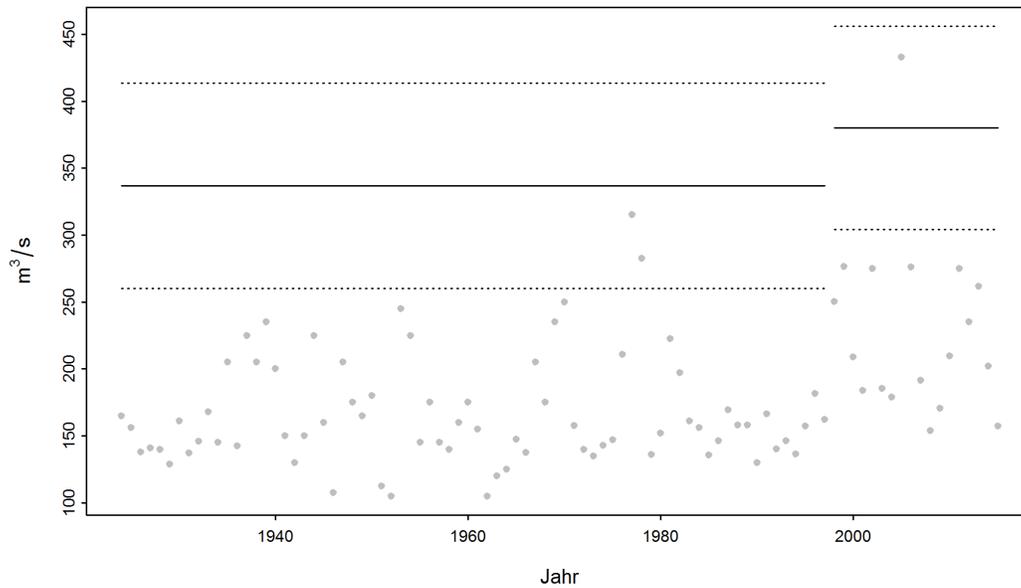
$HQ_T$	untere Konfidenzgrenze [ $m^3/s$ ]	Abfluss [ $m^3/s$ ]	obere Konfidenzgrenze [ $m^3/s$ ]
$HQ_2$	158	167	176
$HQ_{10}$	219	243	266
$HQ_{30}$	252	298	345
$HQ_{100}$	280	368	456
$HQ_{300}$	297	442	588

Das angegebene Konfidenzintervall erlaubt eine Aussage über die Unsicherheit der berechneten Wiederkehrwerte, die sich aufgrund der zufälligen Schwankungen in der Stichprobe (d.h. der Messreihe) ergibt. Weitere Unsicherheiten, insbesondere bezüglich Korrektheit des verwendeten Modells, werden durch Konfidenzintervalle nicht berücksichtigt.

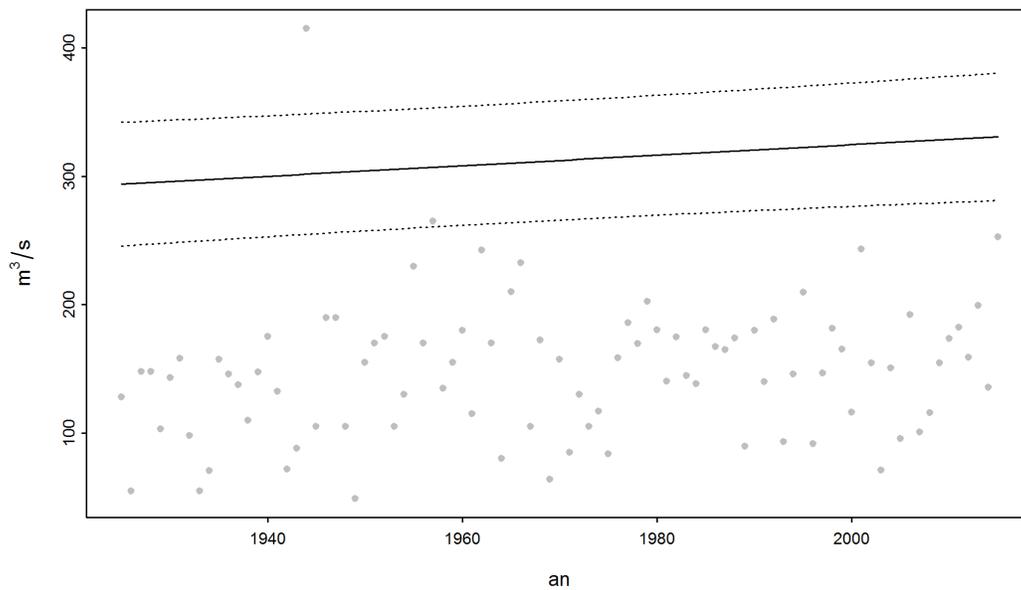
Das BAFU berechnet die Konfidenzintervalle anhand der Deltamethode. Die Methode basiert auf einer Taylor-Entwicklung der Funktion zur Berechnung der  $HQ_T$  und einer asymptotischen Normalverteilung. Die Güte der so berechneten Intervalle ist schwierig einzuschätzen und von Fall zu Fall unterschiedlich. Die Deltamethode ist aber für alle, auch nicht stationären Modellvarianten einfach verwendbar. Für technische Details wird auf Coles verwiesen (2001: p. 56/57 & 82).

## 2.2.5 Plots der Veränderung der mit nicht stationären Modellvarianten berechneten $HQ_{100}$

Die berechneten  $HQ_T$  sind bei nicht stationären Modellvarianten von Jahr zu Jahr verschieden bzw. ändern zu einem bestimmten Zeitpunkt sprunghaft (Varianten „mujump“ und „sigjump“). Während in der Tabelle der Wiederkehrwerte nur die  $HQ_T$  für das aktuellste Jahr aufgeführt sind, erlaubt eine Abbildung der berechneten  $HQ_{100}$  über die Jahre hinweg, die Veränderung zu erkennen. Im Beispiel der Muota-Ingenbohl (siehe Abbildung 10) wurde für die Modellvariante „mujump“ des BLOCK-Ansatzes das Jahr 1998 als Zeitpunkt  $t_0$  gewählt. Vor 1998 liegt das berechnete  $HQ_{100}$  bei  $337m^3/s$ , ab 1998 bei  $380 m^3/s$  (durchgezogene Linien). Die gestrichelten Linien begrenzen das 95%-Konfidenzintervall. Abbildung 11 zeigt ein weiteres Beispiel mit einer linearen Veränderung des berechneten  $HQ_{100}$ .



**Abbildung 10:** Veränderung der mit einer nicht stationären Modellvariante berechneten HQ<sub>100</sub> (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode, gestrichelte Linien) über die Jahre 1974 - 2015 (Muota-Ingenbohl)



**Abbildung 11:** Veränderung der mit einer nicht stationären Modellvariante berechneten HQ<sub>100</sub> (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode, gestrichelte Linien) über die Jahre 1925 - 2015 (Broye-Payerne)

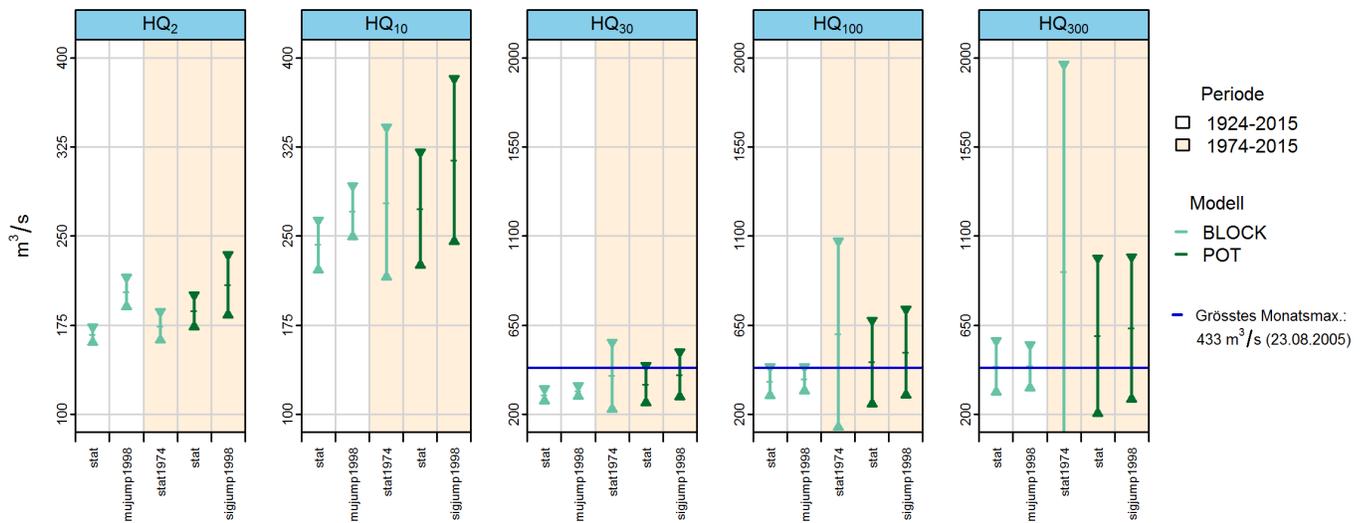
### 3 Erläuterungen zu Kapitel 3 „Vergleich der verschiedenen Resultate“

Das letzte Kapitel der Stationsberichte fasst die Resultate der verschiedenen Verfahren zusammen und vergleicht sie.

Der Überblick über die  $HQ_T$  jener Modellvarianten, welche bei den beiden betrachteten parametrischen Verfahren jeweils am besten an die Daten angepasst waren, erfolgt in grafischer Form (siehe Abbildung 12). Zusätzlich sind bei jedem Verfahren immer auch die Resultate der stationären Modellvariante abgebildet. Dargestellt ist neben dem geschätzten  $HQ_T$  (Querstrich) jeweils auch das Konfidenzintervall (Linie begrenzt durch zwei Dreiecke, welche die obere und untere Grenze des Intervalls markieren). Die berechneten  $HQ_T$  gelten bei allen nicht stationären Modellvarianten jeweils nur für einen bestimmten Zeitpunkt. Wie im vorangegangenen Kapitel werden jeweils die Werte für das aktuellste Jahr verwendet, wobei das Jahr in der Abbildungsbeschriftung aufgeführt wird. Zu beachten ist, dass sich die Skalen der y-Achse (Abflüsse in  $m^3/s$  oder  $l/s$ ) je nach Wiederkehrperiode unterscheiden können. Verglichen werden die Resultate jeweils mit dem höchsten, an der jeweiligen Station gemessenen Abfluss (blaue Linie).

Die Darstellung (siehe Abbildung 12) erlaubt den direkten Vergleich der im vorangegangenen Kapitel einzeln tabellierten Resultate. Um zu verhindern, dass Resultate verglichen werden, die auf unterschiedlichen Berechnungsperioden gründen, sind diese in der Grafik farblich unterschieden (weisser, bzw. gelboranger Hintergrund). Da beim BAFU Monats- bzw. Jahresmaxima ab Messbeginn digital verfügbar sind, Tagesmaxima aber meist erst ab 1974, basiert der BLOCK-Ansatz häufig auf einer anderen Periode als der POT-Ansatz. Dies gilt auch für das Beispiel der Muota (vgl. Abbildung 12 des Leitfadens), wo der BLOCK-Ansatz auf der Datenreihe 1924-2015, der POT-Ansatz dagegen auf den Daten 1974-2015 basiert. Aus diesem Grund wird, wie in Kapitel 2.1.4 des vorliegenden Leitfadens erläutert, beim BLOCK-Ansatz zusätzlich die Zeitreihe ab 1974 (Vergleichsperiode) ausgewertet.

Die Abbildung 12 verdeutlicht, dass die unterschiedliche Datengrundlage im Fall der Muota einen entscheidenden Einfluss hat, zumal nach 1974 durchschnittlich höhere Jahreshochwasser beobachtet werden. Das wesentlich breitere Konfidenzintervall bei  $HQ_{100}$  und  $HQ_{300}$  im BLOCK-Ansatz für die Vergleichsperiode 1974-2015 gegenüber dem POT-Ansatz für die gleiche Periode ist eine Folge davon, dass deutlich weniger Eingangsdaten für das Modell verwendet wurden (BLOCK: 42 Ereignisse, POT: 97). Im Fall des  $HQ_{300}$  ist das Konfidenzintervall beim  $HQ_{300}$  so gross, dass es einerseits negative Werte und andererseits für die Muota in Ingenbohl unrealistisch hohe Werte ( $-145 m^3/s$  bis  $1982 m^3/s$ ) umfasst. Dies verdeutlicht die grosse Unsicherheit bezüglich der berechneten Wiederkehrwerte in diesem Modell.



**Abbildung 12:** HQ<sub>T</sub> [m<sup>3</sup>/s] inkl. 95%-Konfidenzintervalle, berechnet mit den stationären sowie den jeweils bestangepassten Modellvarianten des BLOCK- und POT-Ansatzes für das Jahr 2015 (Muota-Ingenbohl)

Bei beiden Ansätzen (BLOCK und POT) kann im Fall der Muota-Ingenbohl mit nicht stationären Varianten die Modellgüte verbessert werden, da die Häufung grosser Hochwasser in den letzten Jahren einbezogen wird. Die berechneten Wiederkehrwerte sind in der Folge höher als mit den stationären Modellvarianten. Die einfachen mathematischen Formeln zur Berücksichtigung von Nicht-Stationaritäten (Tabellen 1 und 2) bilden die Realität allerdings nur annäherungsweise ab. Zudem bleibt unklar, ob sich ein Trend in der Zukunft unverändert fortsetzt. Die Stationsgeschichte erlaubt zwar selbst keine Aussage über die Zukunft, ermöglicht aber eventuell Rückschlüsse auf die Ursachen einer Veränderung. Sind diese bekannt, kann die weitere Entwicklung eher abgeschätzt werden.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass alle Modellansätze Vor- und Nachteile haben, was eine generelle Modellwahl ausschliesst. Auch bei einer einzelnen Auswertung bleibt unbekannt, welcher Ansatz die Realität am besten widerspiegelt.

Der grundlegende Unterschied zwischen den beiden verwendeten parametrischen Verfahren liegt bei der Extremwertidentifikation. Beim POT-Ansatz wird im Gegensatz zum BLOCK-Ansatz die Bildung von Datenblöcken umgangen, was verhindert, dass Extremwerte weggelassen werden, nur weil im selben Block ein höherer Wert vorkommt (Coles 2001). Das Risiko, beim POT-Ansatz Abflussdaten auszuwerten, die nicht extrem sind, kann mit einer guten Wahl des Schwellenwerts  $u$  minimiert werden. Die meist fehlenden digitalen Grundlegendaten vor 1974 schränken jedoch die Anwendung des POT-Ansatzes ein.

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 2012:52) vorschlagen.

## 4 Literatur

*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.

*KHR (Hrsg.)* (2007), Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert. Analyse, Veränderungen, Trends. Bericht Nr. I-22 der KHR, Lelystad.

*Meylan, P., Favre, A.-C., Musy, A.* (2008). Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne.

*Merz, R., Blöschl, G.* (2008). Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence. Water Resources Research, 44 (8), zitiert in DWA (2012).

# A Anhang

## I Beispiel für Station mit signifikantem Bruchpunkt

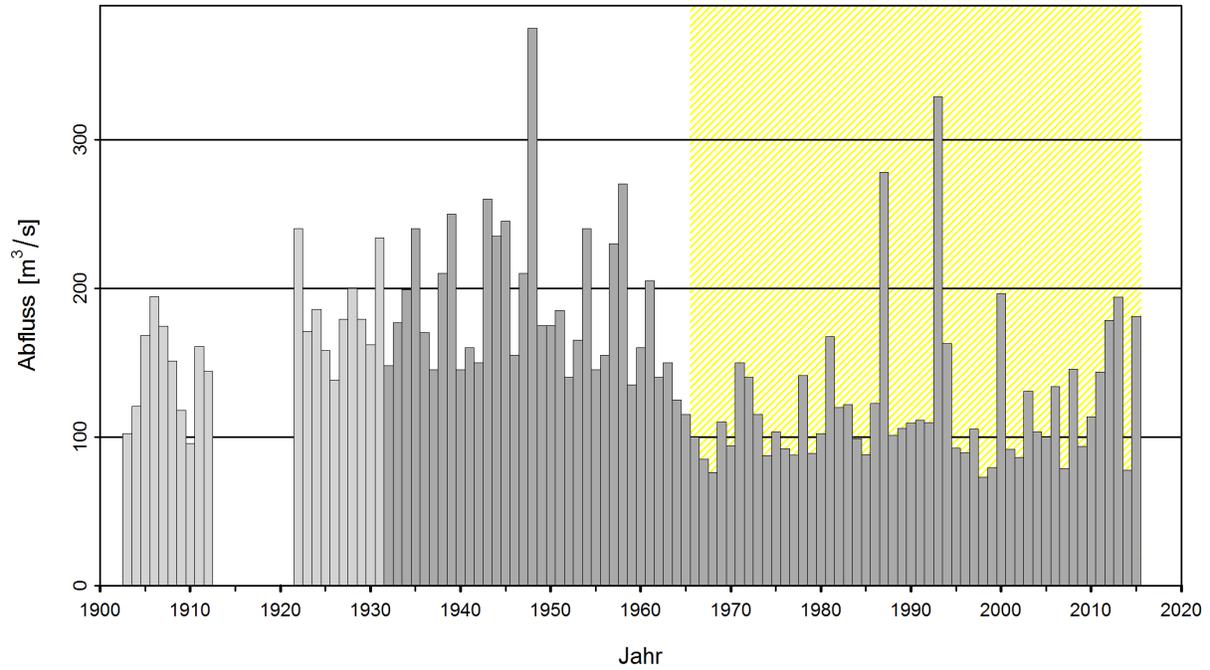


Abbildung 13: Zeitreihe der Jahresmaxima (Vispa-Visp)

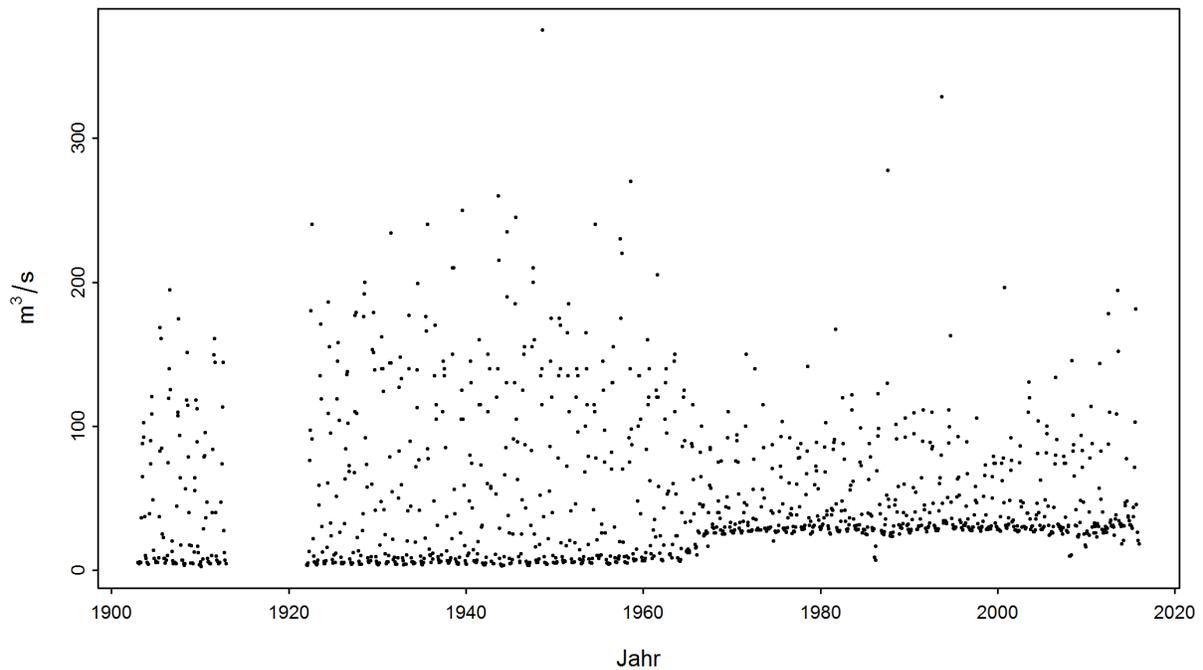
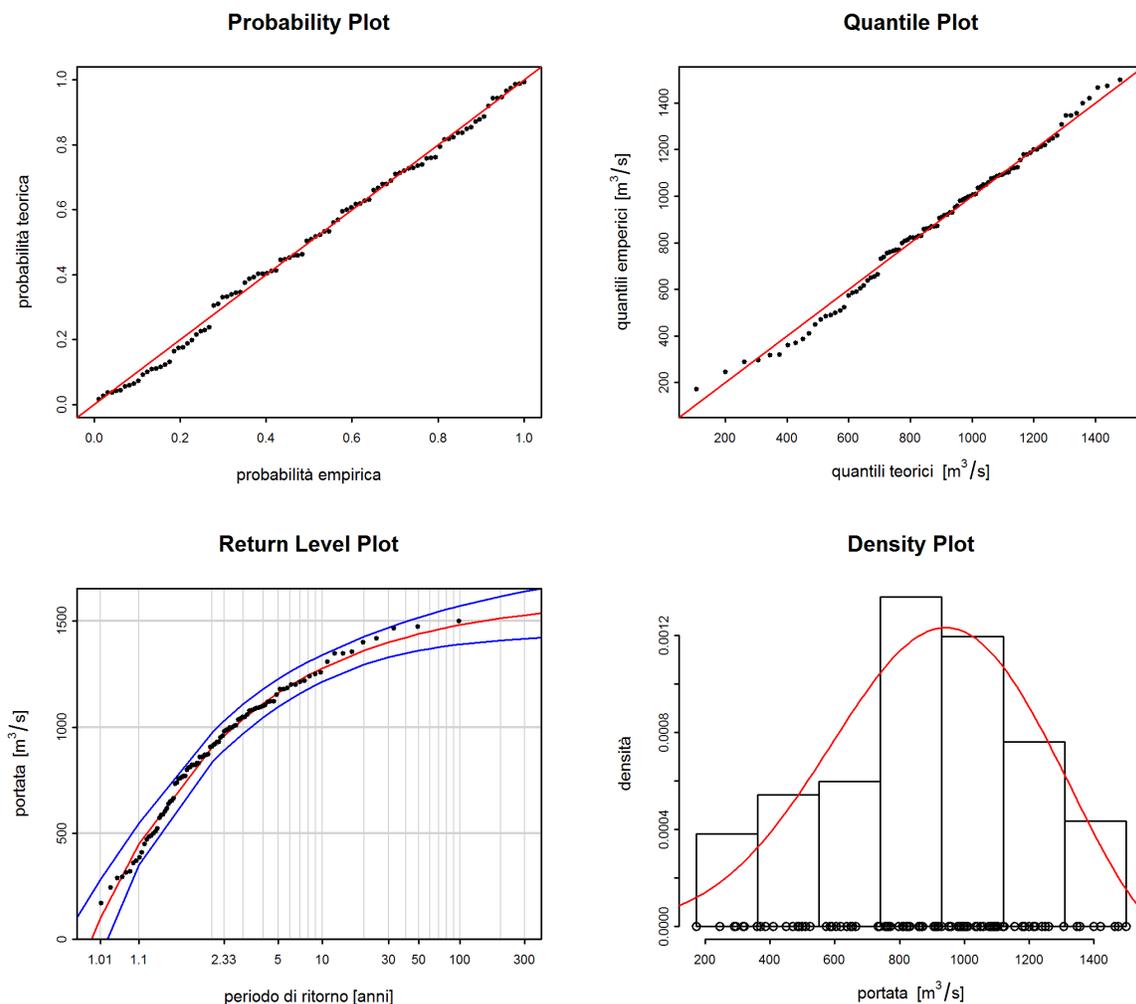


Abbildung 14: Zeitreihe der Monatsmaxima (Vispa-Visp)

Für die Station Vispa-Visp liegen Monatsmaxima für den Zeitraum 1903-1913 und ab 1922 vor. Ein Linnigraph wurde am 9.3.1922 installiert. Die Daten werden daher erst ab 1923 ausgewertet. Die Jahresmaxima der Station weisen einen signifikanten Bruchpunkt im Jahr 1962 (Konfidenzintervall: 1956-1968) auf. Aufgrund der Beeinflussung durch das Kraftwerk Mattmark (Stausee Mattmark 1965 sowie Ab- und Zuleitungen im Einzugsgebiet) werden für das Resultatblatt im Internet die Jahresmaxima ab 1966 verwendet. Im Stationsbericht werden für den BLOCK-Ansatz die Auswertungen 1923-2015 (mit  $t_0=1966$ ) (gesamte Auswertungsperiode), 1966-2015 (Auswertungsperiode ab Bruchpunkt) und 1974-2015 (Vergleichsperiode) durchgeführt. Die Analyse der Resultate des POT-Ansatzes erfolgt für die Auswertungsperiode POT (1974-2015).

## II Beispiele für Diagnostikplots

### Stationäre Modellvariante

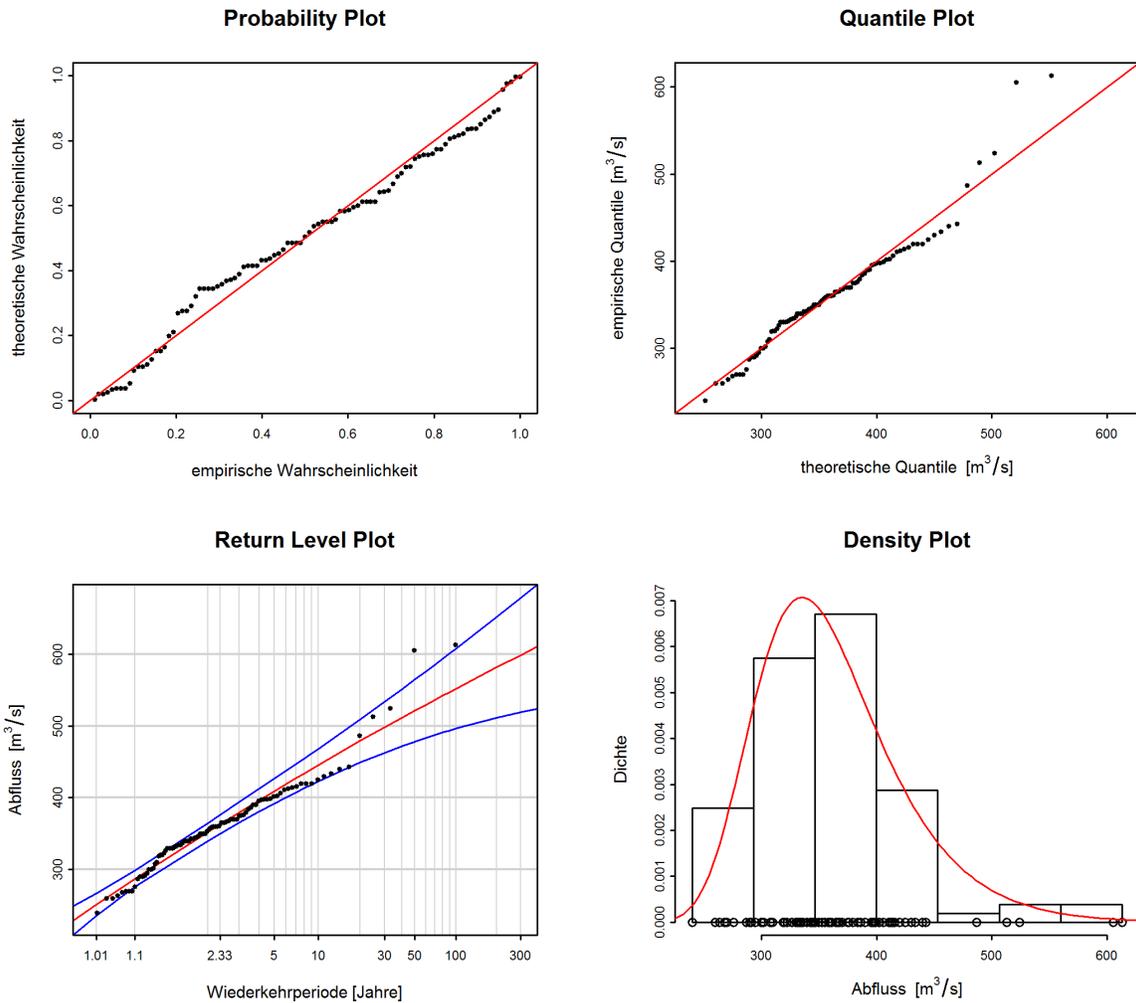


**Abbildung 15:** Beispiel für Diagnostikplots einer stationären Modellvariante mit guter Anpassung in allen Bereichen (BLOCK-Ansatz, Ticino-Bellinzona)

Der Probability Plot sowie der Quantile Plot deuten auf eine insgesamt gute Anpassung des Modells an die Beobachtungen hin. Leichte Abweichungen sind im unteren Bereich zu beobachten. Sämtliche Beobachtungen liegen zudem innerhalb des engen Konfidenzintervalls. Insgesamt kann in diesem Beispiel von einer guten Anpassung gesprochen werden.

**Tabelle 7:** Interpretation Diagnostikplots (Abbildung 15)

<b>Kriterien</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Bemerkungen</b>
Anpassung unterer Bereich	Gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	Gut	-
Anpassung oberer Bereich	Gut	-
Konfidenzintervall	Klein	-



**Abbildung 16:** Beispiel für Diagnostikplots einer stationären Modellvariante mit schlechter Anpassung im oberen Bereich (BLOCK-Ansatz, Aare - Bern)

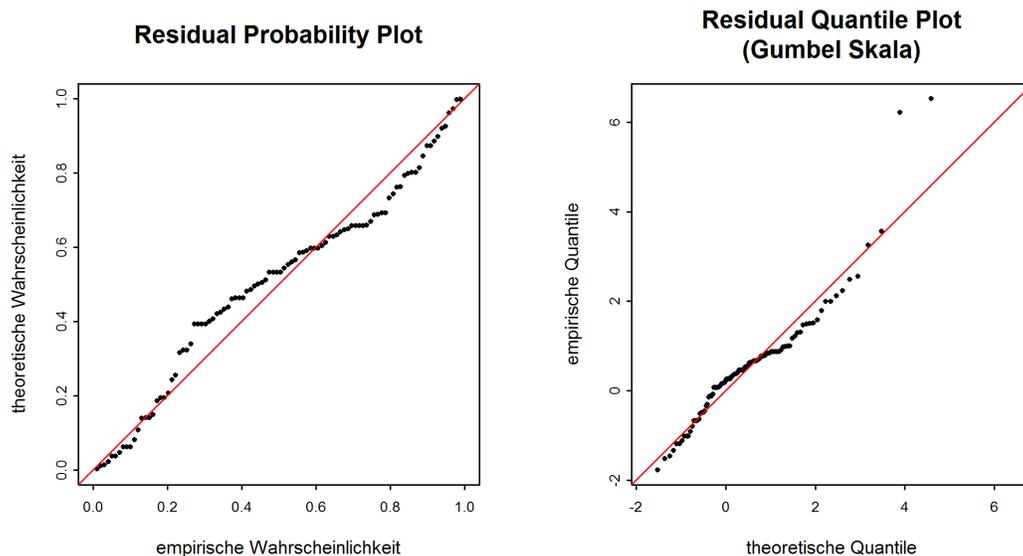
Der Probability Plot deutet auf eine insgesamt eher mittlere Anpassung des Modells an die Beobachtungen hin. Der Quantile Plot zeigt im unteren Bereich eine bessere Anpassung. Allerdings zeigt der Plot auch, dass die grösste aufgetretene Abflussspitze vom Modell relativ schlecht abgebildet werden kann. Dies wird auch im Return Level Plot sichtbar, wo die grössten Beobachtungen ausserhalb des Konfidenzintervalls liegen. Der Density Plot ist dagegen wieder als gut zu beurteilen. Insgesamt kann in diesem Beispiel von einer mittleren Anpassung gesprochen werden.

**Tabelle 8:** Interpretation Diagnostikplots (Abbildung 16)

Kriterien	Bewertung	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	Mittel	-
Anpassung mittlerer Bereich	Mittel	-
Anpassung oberer Bereich	Schlecht	Grösste Werte werden unterschätzt
Konfidenzintervall	Klein	-

### Nicht stationäre Modellvariante

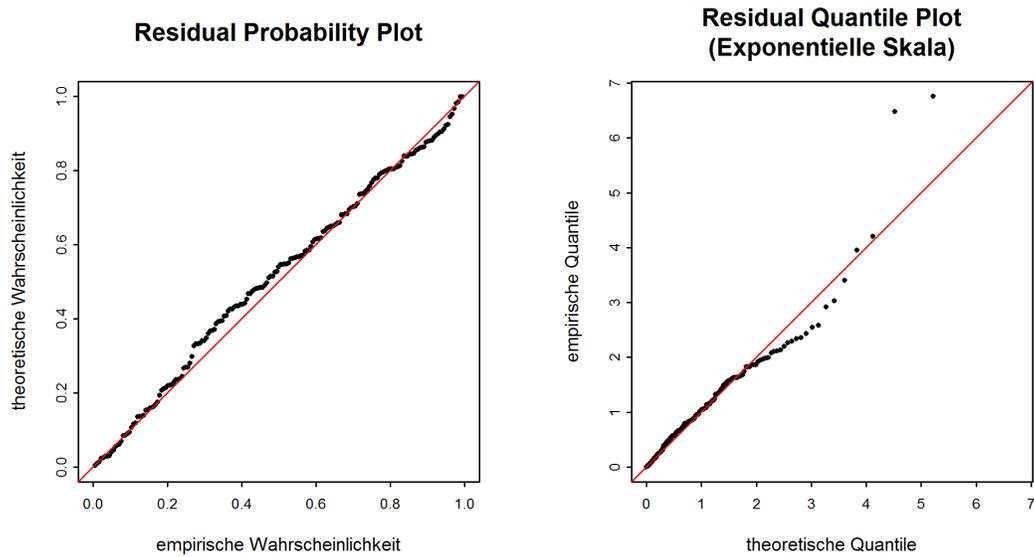
Abbildung 17 zeigt die Diagnostikplots der Modellvariante „mujump“ des BLOCK-Ansatzes für die Messstation Aare-Bern. Die Anpassung ist bei beiden Plots ähnlich wie mit der stationären Variante (siehe Abbildung 16). Es ist kaum eine Veränderung sichtbar.



**Abbildung 17:** Beispiel für Diagnostikplots einer nicht stationären Modellvariante (BLOCK-Ansatz, „mujump 1993“, Aare-Bern)

Abbildung 18 zeigt die Diagnostikplots der Modellvariante „sigjump“ des POT-Ansatzes für die Messstation Aare-Bern. Beim Probability Plot ist die Anpassung insgesamt etwas besser als mit

der stationären Variante (keine Abbildung). Beim Quantile Plot ist die Anpassung vor allem im mittleren Bereich sowie auch im oberen Bereich besser als mit der stationären Variante.



**Abbildung 18:** Beispiel für Diagnostikplots einer nicht stationären Modellvariante (POT-Ansatz, „sigjump 1993“, Aare-Bern)

# Index

## A

Ablaufschema ..... 9  
Auswertungszeitraum ..... 10, 23  
    Auswertungsperiode ab Bruchpunkt 10, 23  
    Auswertungsperiode POT ..... 10, 23  
    gesamte Auswertungsperiode ..... 10, 23  
    Vergleichsperiode ..... 10, 19, 23

## B

Bruchpunktanalyse ..... 2, 8

## C

Cluster ..... 7

## D

Datengrundlage ..... 2, 10, 20  
Diagnostikplot ..... 14, 15  
    Density Plot ..... 14, 15  
    Probability Plot (P-P-Plot) ..... 14, 15  
    Quantile Plot (Q-Q-Plot) ..... 14, 15  
    Return Level Plot ..... 14, 15

## H

HQ<sub>T</sub> ..... 17, 19

## K

Konfidenzintervall ..... 17

## M

mean residual life plot ..... 12

## N

nicht stationärer Fall ..... 7, 16, 20  
    nicht stationäre Modellvarianten ..... 7, 18

## P

parametrische Verfahren ..... 6, 20  
    Block Maximum Ansatz (BLOCK) ... 6, 20  
    Peaks Over Threshold (POT) ..... 6, 20

## S

Saisonalität ..... 4  
Schwellenwert ..... 7, 12, 13  
stationärer Fall ..... 7, 15, 20  
    stationäre Modellvarianten ..... 7

## U

Unabhängigkeit von Ereignissen ..... 7

## V

Verteilungsparameter ..... 6, 13  
    Ereignisrate  $\lambda$  ..... 6  
    Formparameter  $\kappa$  ..... 6  
    Lageparameter  $\mu$  ..... 6  
    Skalenparameter  $\sigma$  ..... 6