



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

HOCHWASSERSTATISTIK

STATIONSBERICHT

Kleine Emme - Emmen

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

Inhaltsverzeichnis

1	Datengrundlage	2
2	Resultate der parametrischen Verfahren	5
2.1	Block Maximum Ansatz (BLOCK)	6
2.1.1	Gesamte Auswertungsperiode: 1936-2015	6
2.1.1.a	Stationäre Modellvariante	6
2.1.1.b	Nicht stationäre Modellvariante	8
2.1.2	Vergleichsperiode: 1974-2015	9
2.1.2.a	Stationäre Modellvariante	9
2.1.3	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1978-2015	11
2.1.3.a	Stationäre Modellvariante	11
2.2	Peaks Over Threshold Ansatz (POT)	12
2.2.1	Auswertungsperiode POT: 1974-2015	13
2.2.1.a	Stationäre Modellvariante	13
2.2.2	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1978-2015	15
2.2.2.a	Stationäre Modellvariante	15
3	Vergleich der verschiedenen Resultate	17
3.1	Beurteilung der unterschiedlichen Auswertungsperioden	17
3.2	Allgemeiner Vergleich der verschiedenen Modellansätze	17
4	Literatur	19
Anhang		20
A	Bestimmung des Schwellenwerts zur Abgrenzung von Extremwerten	20
B	Glossar	21

1 Datengrundlage

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

Vorhandene Daten	seit	bis
Digitale Monatsmaxima	01.01.1936	31.12.2015
Digitale Tagesmaxima	01.01.1974	31.12.2015

Ein Limnigraph wurde am 16. Juni 1931 in Betrieb genommen, die digitalen Monatsmaxima sind erst seit dem 1.1.1936 verfügbar. Von diesem Zeitpunkt bis zum 31.5.1977 stammen die Daten von der Station „2193 Kleine Emme - Malters“, deren Einzugsgebiet rund 448 km² umfasst. Vom 1.6.1977 - 31.12.2012 stammen die Daten von der Station „2425 Kleine Emme - Littau, Reussbühl“, bei der das Einzugsgebiet um rund 30 km², auf 477 km², vergrößert wurde. Diese Messstation wurde per 31.12.2012 ausser Betrieb gesetzt, weil sie sich im Bereich der Renaturierung der Kleinen Emme befand. Seit dem 11.12.2012 stammen die Abflussdaten von der Station „2634 Kleine Emme - Emmen“.

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	22.08.2005	650 m ³ /s
Grösstes Tagesmaximum	22.08.2005	650 m ³ /s

Die Abflussdaten können folgendermassen charakterisiert werden:

Abflussverlauf	Beschreibung
Abflussregime	Nivo-pluvial préalpin: Höchste Abflüsse im Sommer
Ausprägung der Saisonalität	In Monats- und Tagesmaxima zu erkennen (Abbildung 3 und Abbildung 4)
Beeinflussung	geringe Beeinflussung durch mehrere Laufkraftwerke: Wolhusen (1906), Ettisbühl, Malters (2011) und Emmenweid (1931).

Die meisten Jahresmaxima bewegen sich zwischen ungefähr 200 und 350 m³/s, wobei die Werte in diesem Bereich stark streuen. Besonders auffällig scheint die Vielzahl an Werten um ca. 280 m³/s. Seit 1978 nehmen die Jahresmaxima über 350 m³/s stark zu und ab diesem Zeitpunkt werden erstmals Werte oberhalb von 400 m³/s beobachtet. Innerhalb der Untersuchungsperiode wurde ein einmalig hoher Wert von 650 m³/s registriert (2005). Die Reihe der Jahresmaxima weist damit auf eine Zunahme der maximalen Abflüsse ab 1978 hin. Die Bruchpunktanalyse ergibt einen signifikanten Bruchpunkt ab 1977 (Konfidenzintervall 1948-1983). Im Jahr 1977 wurde die Station verlegt, welches das Abflussverhalten ab diesem Zeitpunkt verändert haben könnte. Die Zunahme der Maxima und die Übereinstimmung mit der Bruchpunktanalyse führen dazu, dass die Datenreihe ab 1978 unterteilt wird.

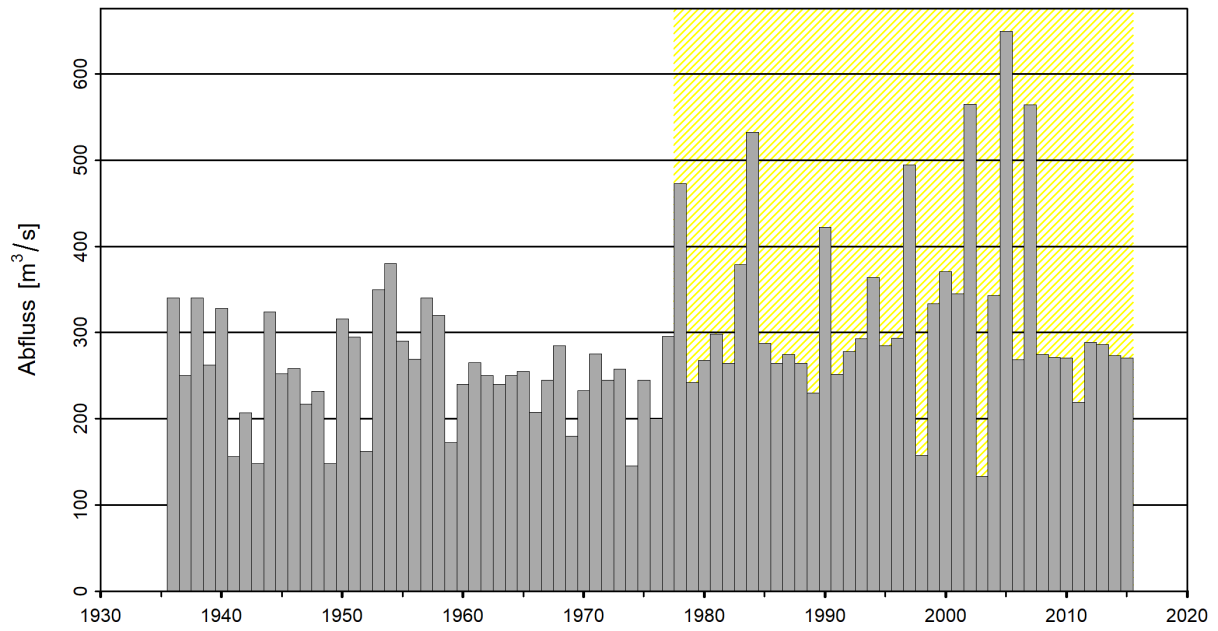


Abbildung 1: Zeitreihe der Jahresmaxima [m^3/s] (1936 - 2015, dunkelgrau: verwendete Jahresmaxima der gesamten Auswertungsperiode ab Limnigrapheninstallation). Gelb schraffiert: Auswertungsperiode ab Bruchpunkt (1978)

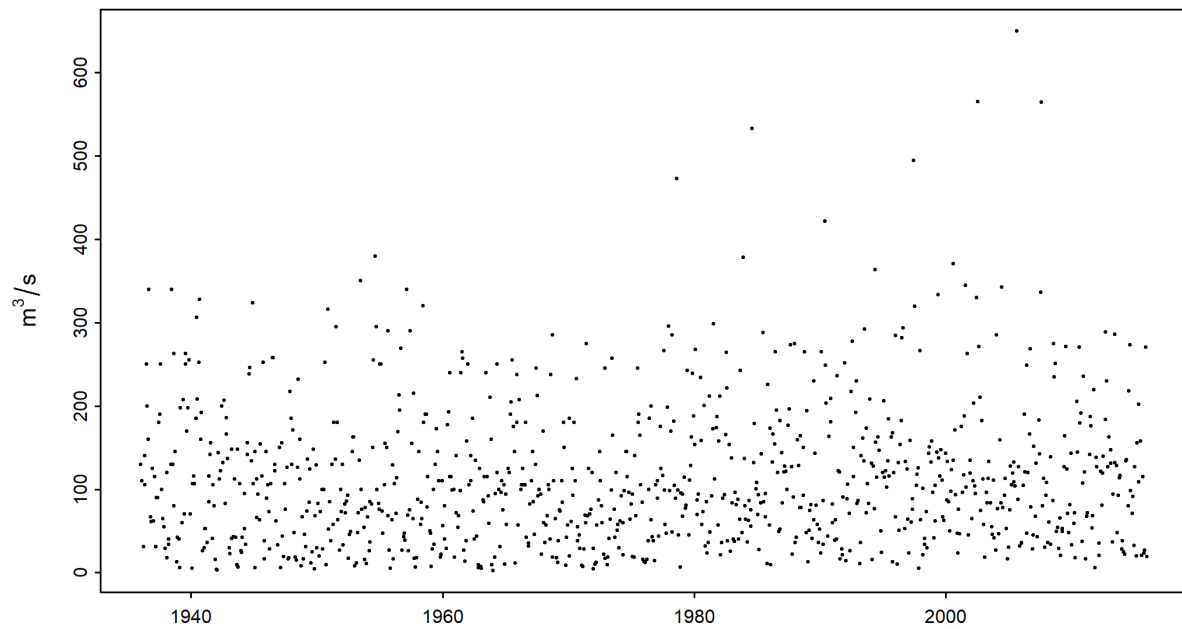


Abbildung 2: Zeitreihe der Monatsmaxima [m^3/s] (01.01.1936 - 31.12.2015)

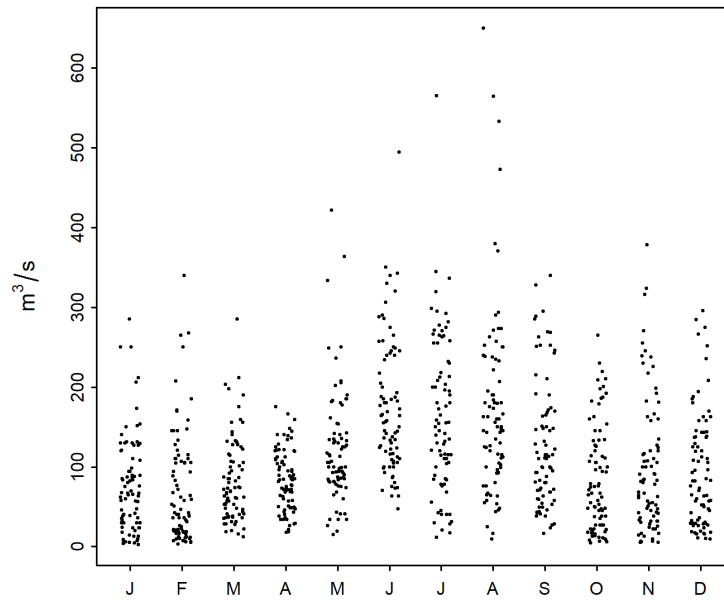


Abbildung 3: Saisonaler Verlauf der Monatsmaxima [m^3/s] (01.01.1936 - 31.12.2015)

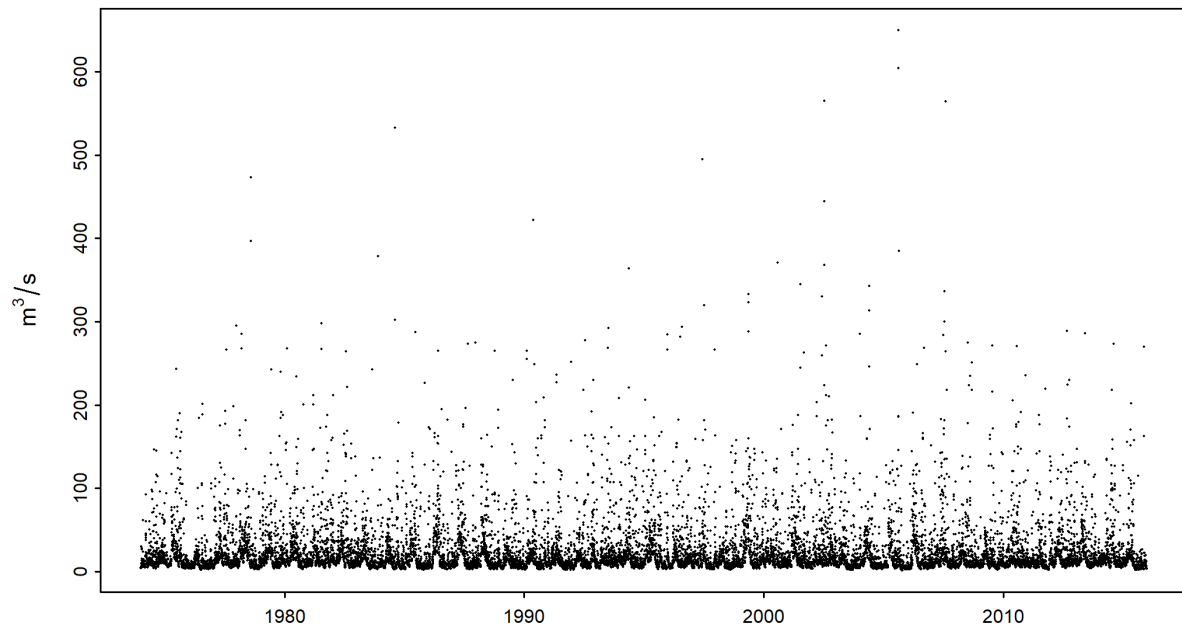


Abbildung 4: Zeitreihe der maximalen Tagesabflüsse [m^3/s] (01.01.1974 - 31.12.2015)

Fazit für die Modellvarianten

Veränderungen	Auswirkungen	Folgerungen
Stationsverlegung 1977	Monatsmaxima werden grösser	Vermutlich nicht stationär

Bruchpunktanalyse

Jahr	Signifikanter Bruchpunkt	Folgerungen
1977 / 1978	ja	Unterteilung der Daten, da der Bruchpunkt mit Unterlagen zu Station (Stationsverlegung) und Einzugsgebiet begründbar

2 Resultate der parametrischen Verfahren

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

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

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
1936 - 2015	gesamte Auswertungsperiode	stat mujump	Kapitel 2.1.1.a Kapitel 2.1.1.b
1974 - 2015	Vergleichsperiode	stat	Kapitel 2.1.2.a
1978 - 2015	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt	stat	Kapitel 2.1.3.a

2.1.1 Gesamte Auswertungsperiode: 1936-2015

2.1.1.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1936-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
80	246.33	71.45	0.0076

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

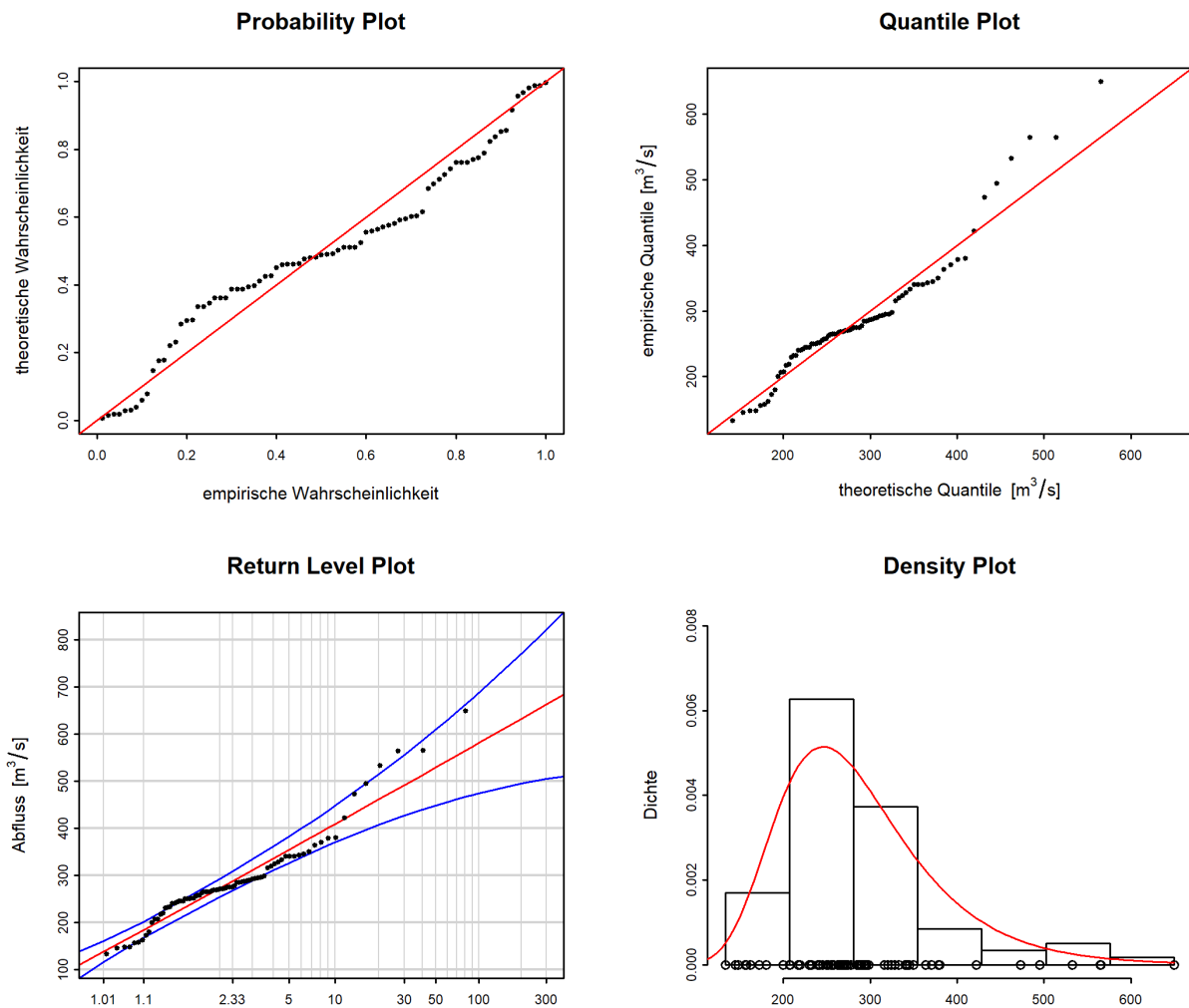


Abbildung 5: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1936-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 5):

Kriterien	Bewertung ²	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel	Werte werden im unteren Bereich über-, im oberen Bereich unterschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	Werte werden überschätzt
Anpassung oberer Bereich	schlecht	Werte werden stark unterschätzt
Konfidenzintervall	klein	-

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die gesamte Auswertungsperiode 1936-2015 (inkl. 95% - Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ ₂	253	273	292
HQ ₁₀	370	409	447
HQ ₃₀	427	491	556
HQ ₁₀₀	474	581	688
HQ ₃₀₀	504	663	821

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 „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. 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	mujump1978	1936-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}^4$		Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
	a_1	a_2		
80	229.56	41.83	69.84	-0.0217

Die Güte der Modellvariante „mujump1978“ über die gesamte Auswertungsperiode wird grafisch anhand der in Abbildung 6 dargestellten Diagnostikplots beurteilt.

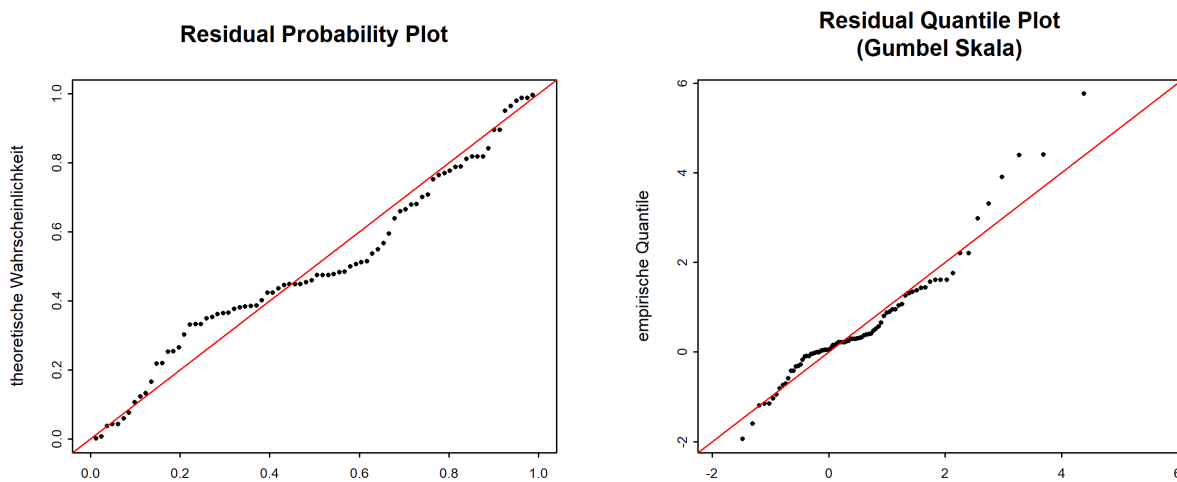


Abbildung 6: Diagnostikplots der Modellvariante „mujump1978“ des BLOCK-Ansatzes (1936-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 6):

Kriterien	Bewertung ⁵	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel	kleinsten Werte werden überschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	gut	-
Anpassung oberer Bereich	schlecht	Werte werden stark unterschätzt
Vergleich mit stationärem Modell	gleich	keine Verbesserung sichtbar

³Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „mujump“ wird aufgrund des Resultats der Bruchpunktanalyse das Jahr 1978 gewählt (siehe Kapitel 1).

⁴ $\hat{\mu} = a_1 + a_2 \cdot i$, $i = 0$ 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 „mujump1978“ des BLOCK-Ansatzes über die gesamte Auswertungsperiode 1936-2015 (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	271	297	323
HQ ₁₀	386	425	463
HQ ₃₀	442	499	556
HQ ₁₀₀	488	577	666
HQ ₃₀₀	518	646	774

In Abbildung 7 ist die Veränderung des mit dem Modell „mujump1978“ berechneten HQ₁₀₀ zwischen 1936 und 2015 dargestellt.

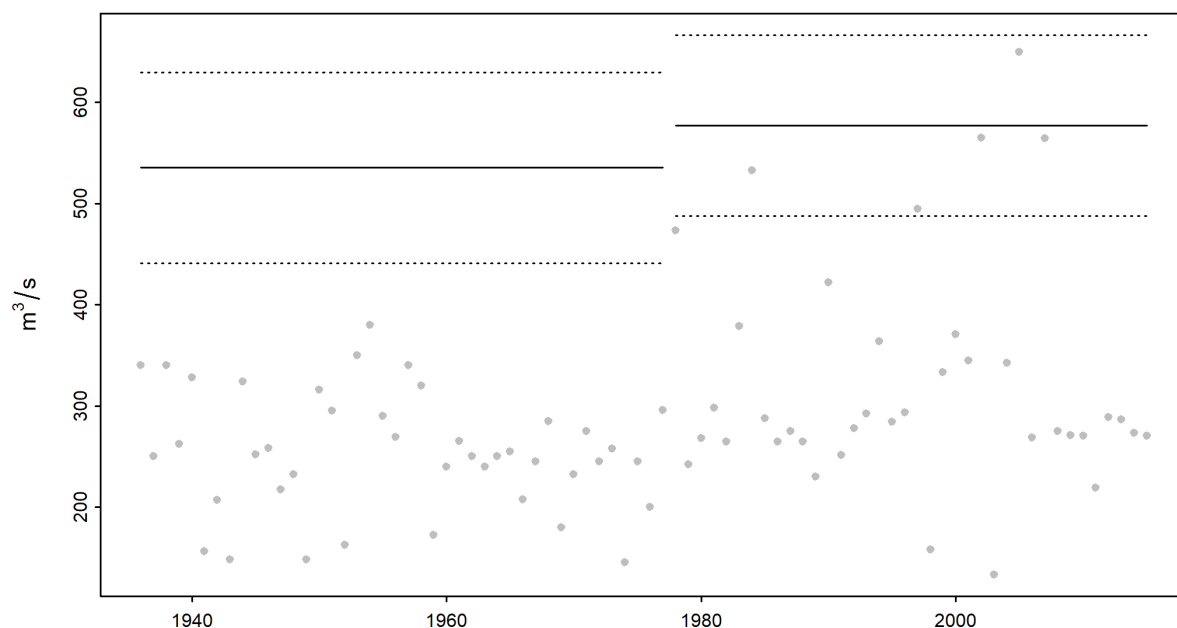


Abbildung 7: Veränderung der mit der Modellvariante „mujump1978“ berechneten HQ₁₀₀ (durchgezogene Linien) und des 95%-Konfidenzintervalls (Deltamethode; gestrichelte Linien) über die Jahre 1936-2015

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	265.15	83.25	0.0206

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

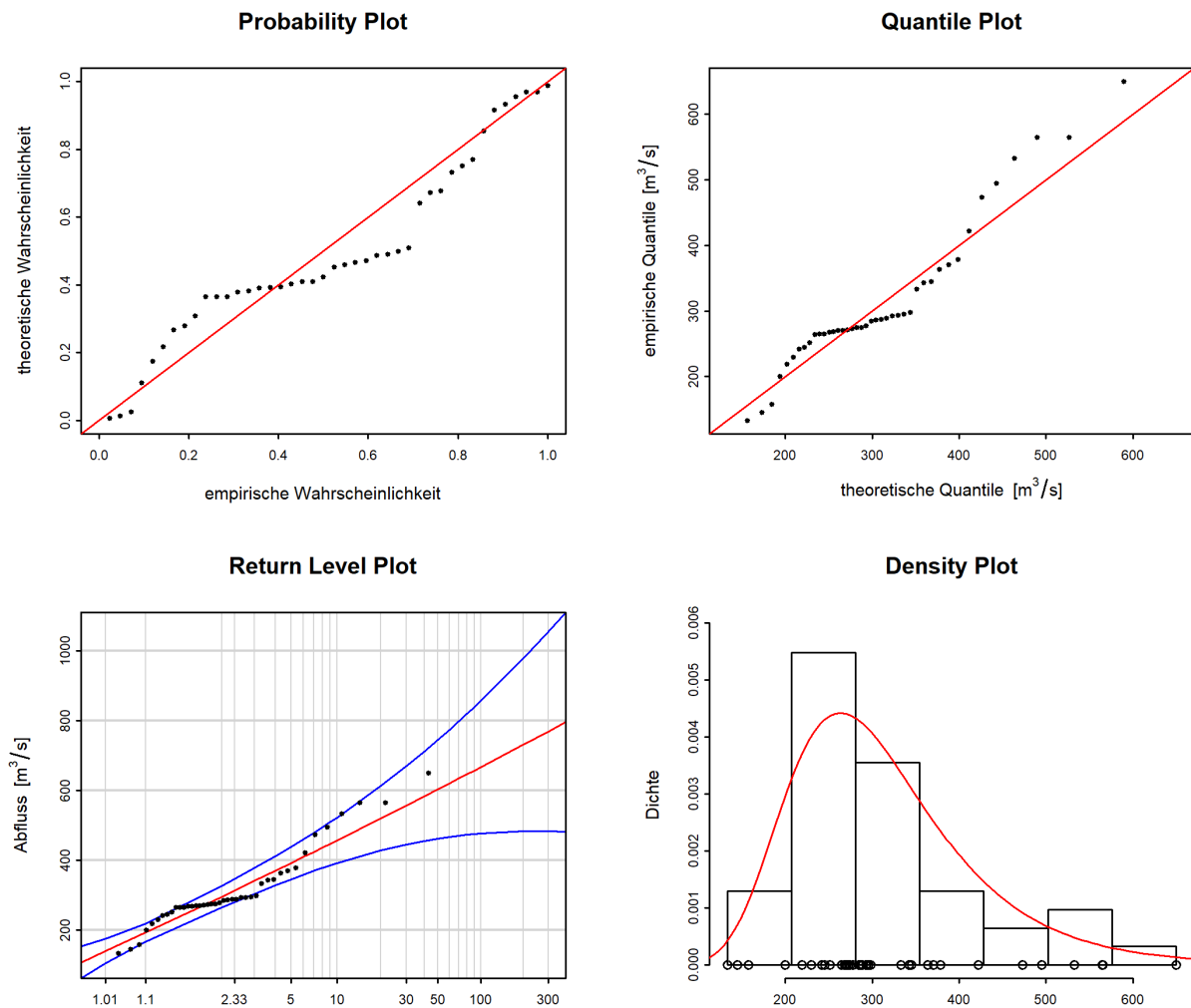


Abbildung 8: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 8):

Kriterien	Bewertung ⁶	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel	Werte im unteren Bereich werden über-, im oberen unterschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	Werte werden überschätzt
Anpassung oberer Bereich	mittel	Werte werden unterschätzt
Konfidenzintervall	gross	für grosse Wiederkehrperioden 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	265	296	327
HQ ₁₀	392	457	522
HQ ₃₀	445	557	669
HQ ₁₀₀	477	667	856
HQ ₃₀₀	484	769	1054

⁶Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

2.1.3 Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1978-2015

2.1.3.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
BLOCK	stat	1978-2015	Jahresmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Anzahl Werte n	Lageparameter $\hat{\mu}$	Skalenparameter $\hat{\sigma}$	Formparameter $\hat{\kappa}$
38	275.14	82.5	0.0228

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

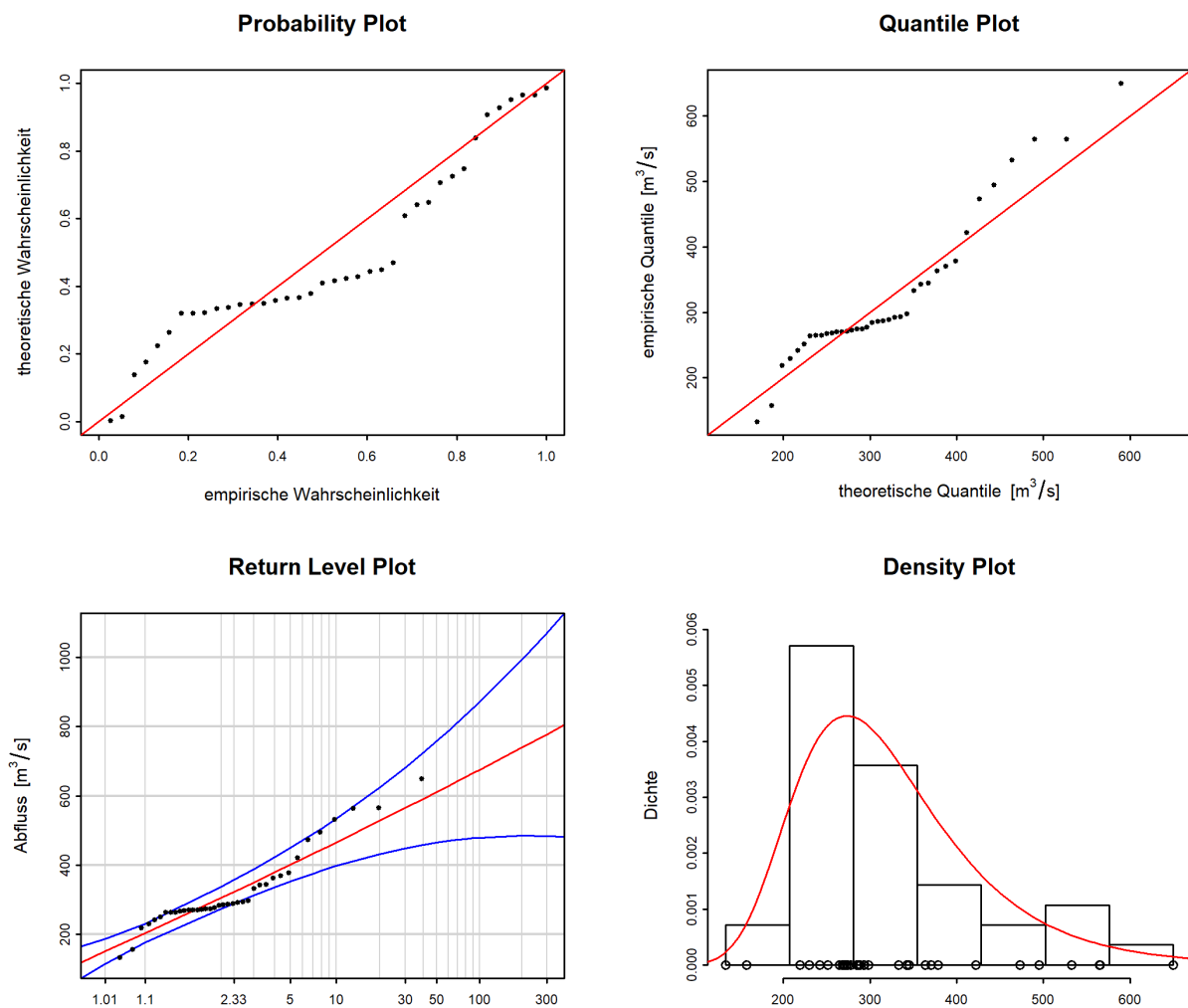


Abbildung 9: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des BLOCK-Ansatzes (1978-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 9):

Kriterien	Bewertung ⁷	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	mittel	Werte im unteren Bereich werden über-, im oberen unterschätzt
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	Werte werden überschätzt
Anpassung oberer Bereich	mittel	Werte werden unterschätzt
Konfidenzintervall	gross	für grosse Wiederkehrperioden gross

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären BLOCK-Ansatz über die Auswertungsperiode ab Bruchpunkt 1978-2015 (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	274	306	337
HQ ₁₀	397	466	534
HQ ₃₀	449	565	682
HQ ₁₀₀	479	675	871
HQ ₃₀₀	484	778	1071

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 Kleine Emme - Emmen wird der Zeitabstand L zwischen zwei unabhängigen Ereignissen auf den Mindestwert von 11 Tagen festgelegt.

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

Auswertungsperiode	Beschreibung	ausgewählte Modellvariante	Kapitel
1974 - 2015	Auswertungsperiode POT	stat	Kapitel 2.2.1.a
1978 - 2015	Auswertungsperiode ab Bruchpunkt	stat	Kapitel 2.2.2.a

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

⁷Siehe [Leitfaden](#) Kapitel 2.2.3

⁸Als Zeitpunkt t_0 für das Modell „sigjump“ wird das Jahr 1978 gewählt.

2.2.1 Auswertungsperiode POT: 1974-2015

Im vorliegenden Fall wurde als Schwellenwert u $200 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt (siehe Anhang A). Abbildung 10 zeigt die effektiv verwendeten Extremereignisse.

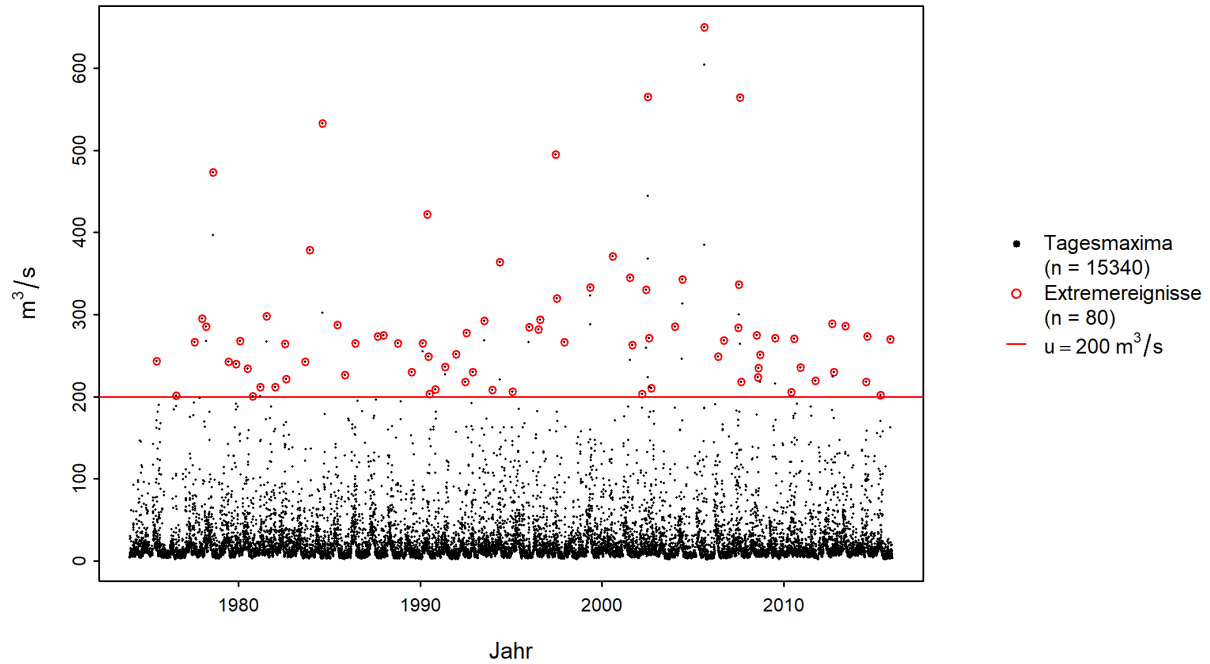


Abbildung 10: Auswahl der für den POT-Ansatz verwendeten Extremereignisse

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	$\hat{\lambda}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\kappa}$
$200 \text{ m}^3/\text{s}$	80	1.9	80.32	0.0473

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

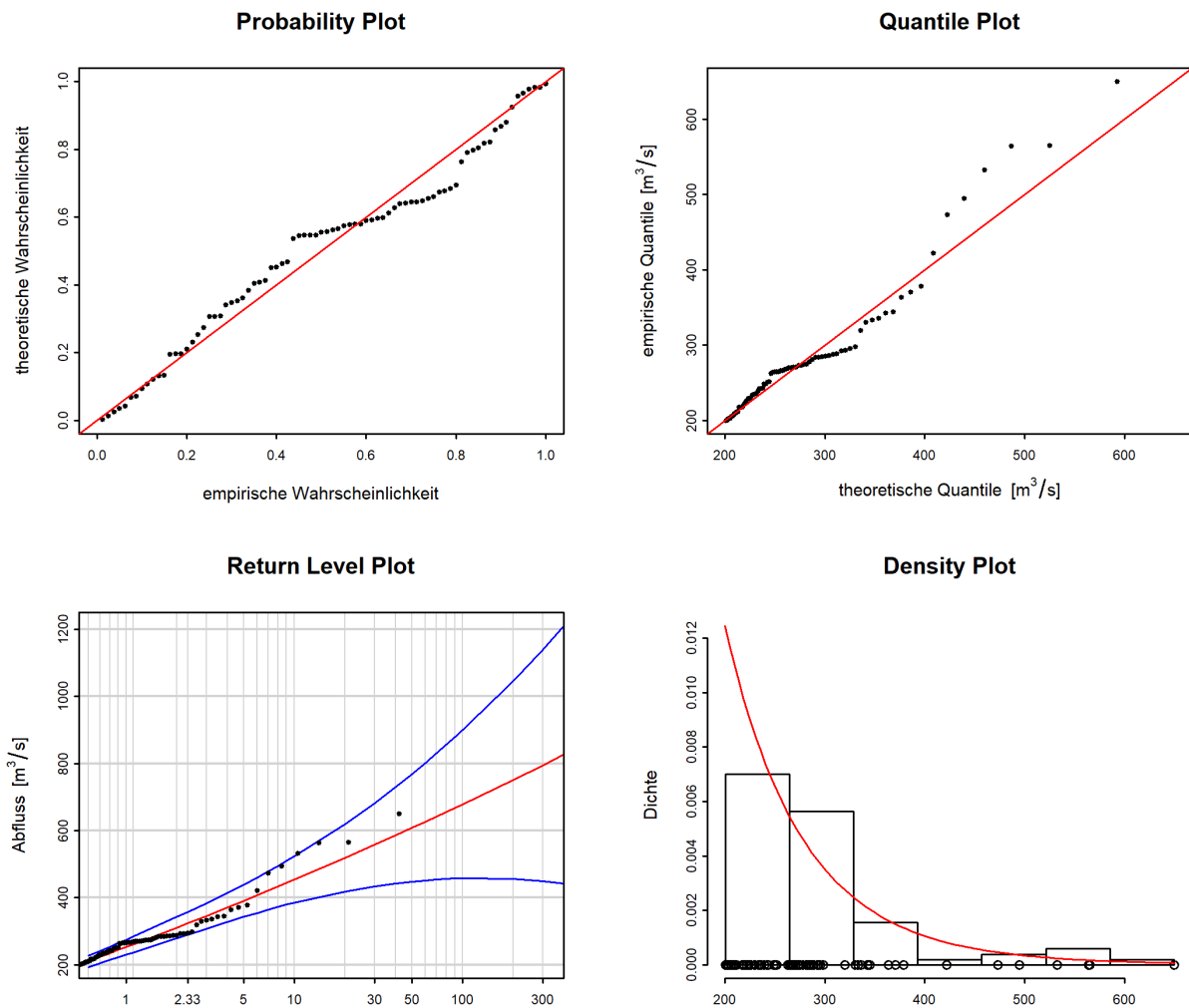


Abbildung 11: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des POT-Ansatzes (1974-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 11):

Kriterien	Bewertung ⁹	Bemerkungen
Anpassung unterer Bereich	gut	-
Anpassung mittlerer Bereich	mittel	Werte im oberen Bereich werden unterschätzt
Anpassung oberer Bereich	gut-mittel	Werte werden etwas unterschätzt
Konfidenzintervall	gross	für grosse Wiederkehrperioden gross

⁹Siehe [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 [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ ₂	279	311	343
HQ ₁₀	385	454	523
HQ ₃₀	434	558	682
HQ ₁₀₀	458	679	899
HQ ₃₀₀	450	795	1140

2.2.2 Auswertungsperiode ab Bruchpunkt: 1978-2015

2.2.2.a Stationäre Modellvariante

Verfahren	Modellvariante	Auswertungsperiode	Modelleingangsdaten	Bemerkung
POT	stat	1978-2015	Tagesmaxima	-

Verwendete Anzahl Werte und geschätzte Modellparameter:

Schwellenwert	Anzahl Werte	Ereignisrate	Skalenparameter	Formparameter
u	n	$\hat{\lambda}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\kappa}$
205 m ³ /s	72	1.89	81.09	0.0536

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

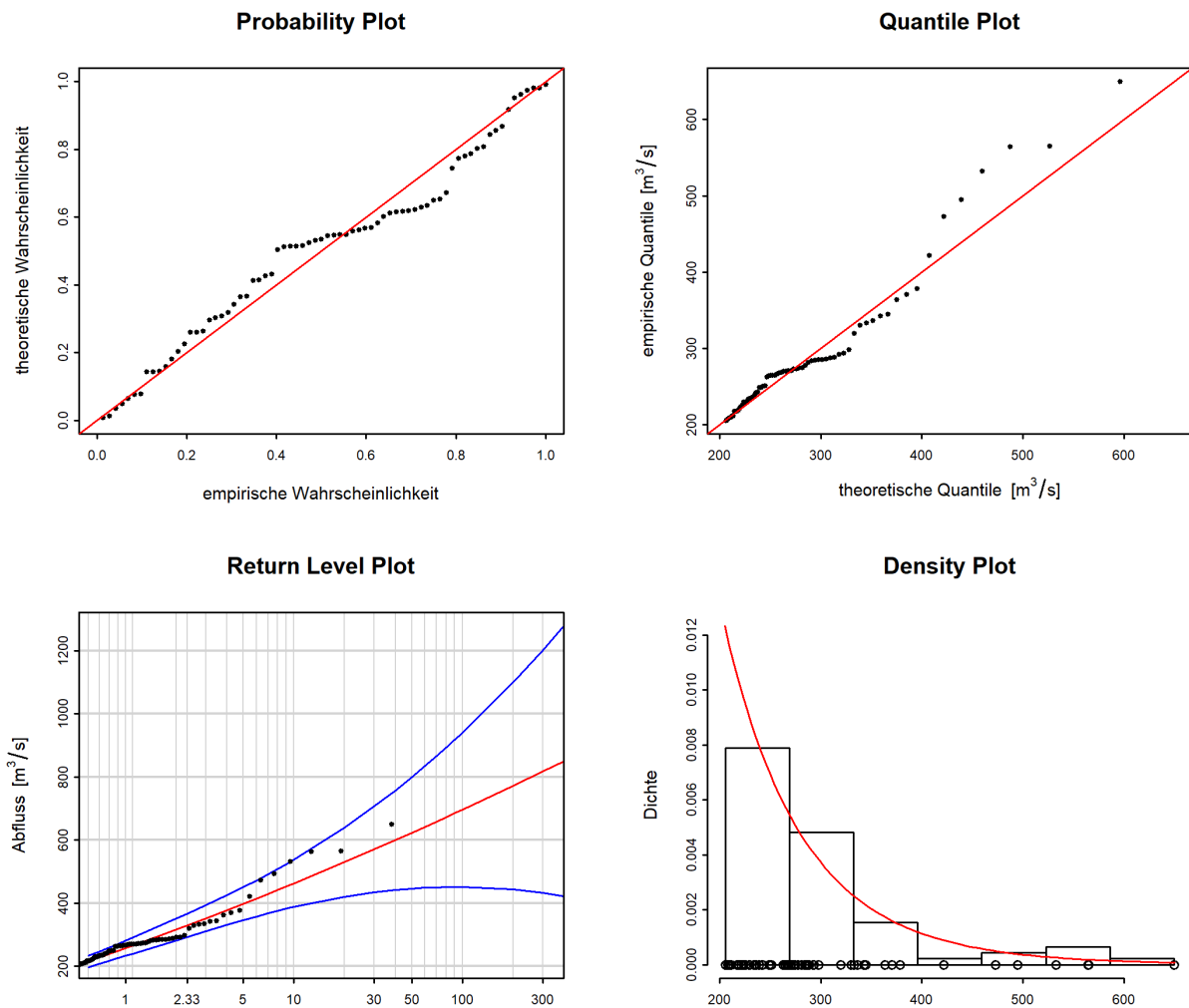


Abbildung 12: Diagnostikplots der Modellvariante „stat“ des POT-Ansatzes (1978-2015)

Bewertung Diagnostikplots (Abbildung 12):

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

Folgende Tabelle enthält die Abflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden, berechnet mit dem stationären POT-Ansatz über die Auswertungsperiode ab Bruchpunkt 1978-2015 (inkl. 95% - Konfidenzintervall berechnet über die Deltamethode):

HQ _T	untere Konfidenzgrenze [m³/s]	Abfluss [m³/s]	obere Konfidenzgrenze [m³/s]
HQ ₂	283	317	351
HQ ₁₀	389	463	538
HQ ₃₀	435	571	707
HQ ₁₀₀	452	696	940
HQ ₃₀₀	433	818	1202

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 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 1936 - 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
Periode ab Bruchpunkt / Gesamte Auswertungsperiode	deutlich höhere Werte	deutlich grösser
Periode ab Bruchpunkt / Vergleichs- periode	kaum Unterschiede	etwa gleichgross

Nach 1977 wurden durchschnittlich höhere Jahreshochwasser beobachtet. Dies führt zu höheren HQ_T in der Periode ab Bruchpunkt und 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_T des POT-Ansatzes ab 1974 liegen - bis auf HQ_{10} - höher als bzw. gleich hoch wie diejenigen des BLOCK-Ansatzes der Vergleichsperiode. Bei einem Vergleich mit dem BLOCK-Ansatz der gesamten Auswertungsperiode liegen die HQ_T des POT-Ansatzes ab 1974 bei jeder Wiederkehrperiode 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 nur geringfügig.

Vergleich von stationären und nicht stationären Varianten:

Beim BLOCK-Ansatz kann mit einer nicht stationären Variante die Modellgüte nicht wesentlich verbessert werden, obwohl die Zunahme grosser Hochwasser in den letzten Jahren in das Modell einbezogen wird. Die berechneten Wiederkehrwerte für das Jahr 2015 sind in der Folge bei den kleineren Wiederkehrperioden höher und bei HQ_{100} und HQ_{300} tiefer als mit den stationären Modellvarianten. 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.

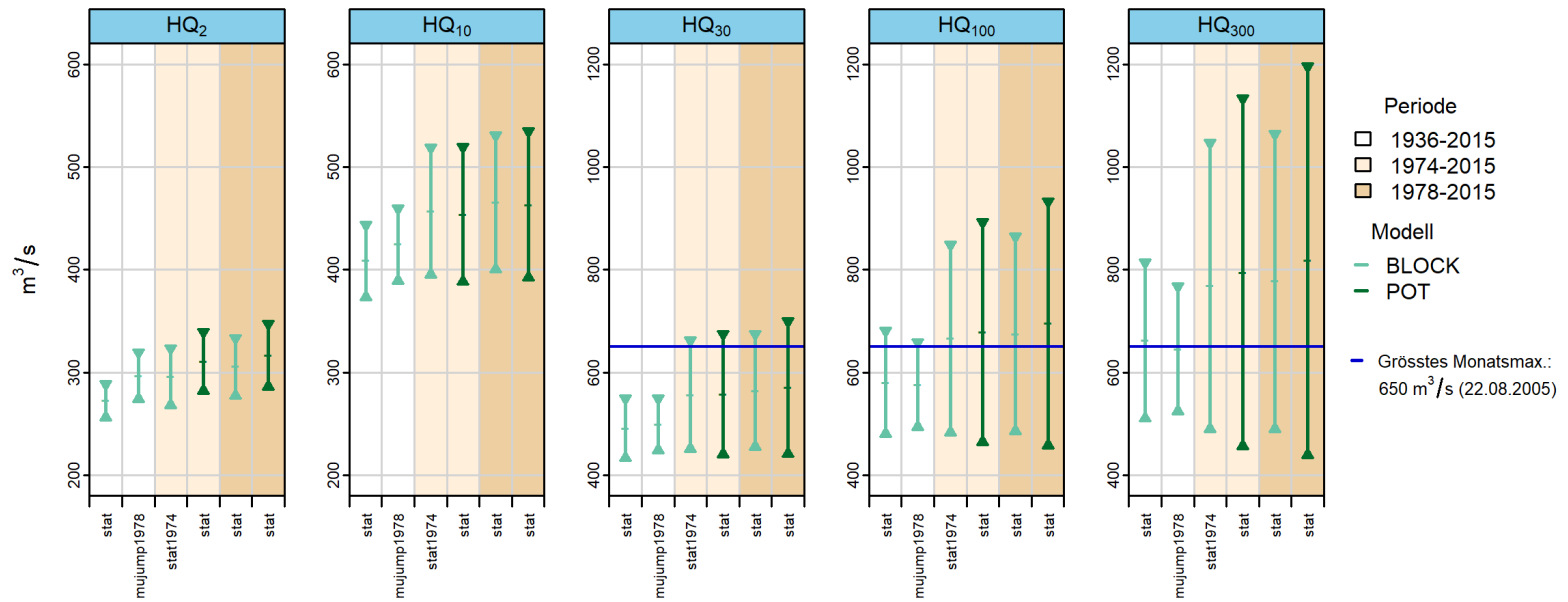


Abbildung 13: HQ_T [m³/s] inkl. 95%-Konfidenzintervalle, berechnet mit den stationären sowie den jeweils bestangepassten Modellvarianten des BLOCK- und POT-Ansatzes für das Jahr 2015

Auswertungsperiode	Verfahren	Anpassung			Bemerkung
1936 - 2015	BLOCK stat	mittel	mittel	schlecht	Werte werden stark unterschätzt
	BLOCK mujump1978	mittel	gut	schlecht	Werte werden stark unterschätzt keine Verbesserung sichtbar
1974 - 2015	BLOCK stat	mittel	mittel	mittel	Werte werden unterschätzt
1978 - 2015	BLOCK stat	mittel	mittel	mittel	Werte werden unterschätzt
1974 - 2015	POT stat	gut	mittel	gut-mittel	Werte werden etwas unterschätzt
1978 - 2015	POT stat	gut	mittel	gut-mittel	Werte im oberen Bereich werden etwas unterschätzt

4 Literatur

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

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

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

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

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

DWA (Hrsg.) (2012): Merkblatt DWA-M 552. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. 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 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt (siehe Abbildung 14).

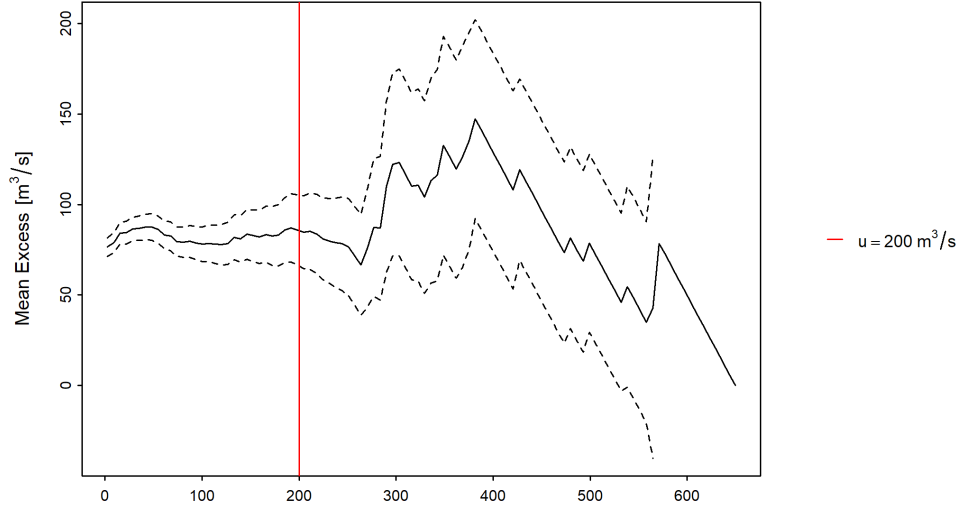


Abbildung 14: „mean residual life plot“ mit gewähltem Schwellenwert u (rote Linie) mean Excess (schwarze Linie), 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien)

Der Schwellenwert u zur Abgrenzung der Extremwerte des POT-Ansatzes für die Auswertungsperiode 1978 - 2015 (siehe Kapitel 2.2.2) wird anhand des „mean residual life plots“ auf $205 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt (siehe Abbildung 15).

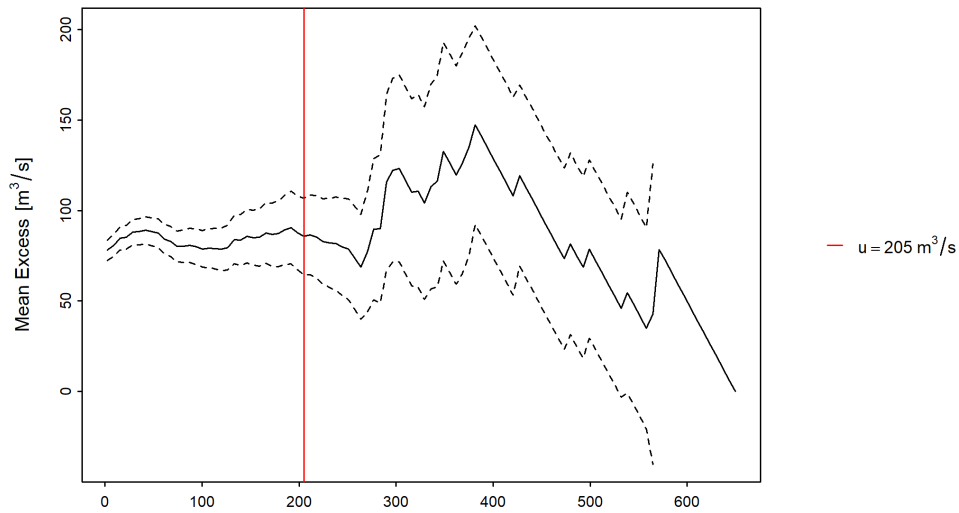


Abbildung 15: „mean residual life plot“ mit gewähltem Schwellenwert u (rote Linie) mean Excess (schwarze Linie), 95%-Konfidenzintervall (gestrichelte Linien)

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 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).