



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Applied Life Sciences, Vienna

Erprobung neuer Verfahren zur Abschätzung von Wiederkehrwahrscheinlichkeiten von Hochwasserereignissen

Vergleich der Standard-Hochwasserberechnung nach BMLFUW (2011) mit der
Upper Boundary-Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES (2010)

Bearbeiter:

Schößwendter Johannes – 01041054

Betreuer:

Ass.Prof. Dr. Mathias Bernhardt

Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Matthew Herrnegger

Department:

Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Institut:

Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau (IWHW)

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Wien, am 28.04.2018



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre des Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien, am _____

Datum

Unterschrift

DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinen beiden Betreuern Herrn Ass.Prof. Dr. Mathias Bernhardt und Herrn Dipl.Ing. Dr.nat.techn. Matthew Herrnegger für die gute Zusammenarbeit bedanken. Da dies ein wichtiger Abschnitt in meiner beruflichen Laufbahn war, bin ich froh so kompetente Betreuer an meiner Seite gehabt zu haben, die mich stets in die richtige Richtung lenkten.

Meinen Eltern möchte ich hier ebenfalls meine große Dankbarkeit aussprechen. Ihr Beide habt mir die Möglichkeit zum Studieren gegeben und wart von Beginn an meine größten Unterstützer. Leider könnt ihr jetzt nicht dabei sein, wenn ich dieses Kapitel in meinem Leben abschließe. Ich hoffe, ihr seid stolz auf mich.

ABSTRACT

In this thesis we compare classical (standard) and upper bounded statistical approaches for the calculation of flood return periods. The project area is the Mur/Mürz catchment in Austria.

For the classical approach we use several distribution functions, such as Gumbel, Weibull, Paerson 3, LogNormal 3 and Generalized extreme value, which are recommended in the guidelines of the Federal Ministry of agriculture, forestry and environment for the calculation of flood return periods.

For the upper bounded statistical approach, we use the following distribution functions:

- Extreme value with four parameters distribution (EV4)
- Slade-type four parameter log normal distribution (LN4)
- Transformed Extreme value type distribution (TDF)

These distributions were proposed by BOTERO and FRANCES (2010) for the calculation of flood return periods.

The main difference of the classical and the upper bounded statistical approach is the lack of an upper boundary in the classical approach. With increasing return periods, the estimated values increase with no limit, which is not correct. With no upper limit the calculation of flood events with a high return period generates a high degree of uncertainty.

The upper boundary, or probable maximum flood (PMF), for the observed gauging stations in the Mur/Mürz catchment is calculated according to the WMO-Guideline “Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)”.

The main research questions are:

- Can more reliable return levels be calculated with the upper bounded statistical approaches?
- How do the upper bounded distributions react to big flood events (outlier)?

Keywords: flood frequency analysis, return period, probable maximum precipitation, probable maximum flood, upper bounded statistical approach

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Einleitung und wissenschaftliche Fragestellung	1
1.2	Berechnungsprogramm	3
1.3	Projektgebiet und hydrologische Daten	3
1.4	Berechnung von Hochwasserkennwerten	7
1.5	Jährliche und partielle Serie (AMS und PDS)	9
1.6	Parameterschätzmethoden	10
1.7	Wahrscheinlichkeitsverteilungen	12
1.8	Anpassungstests	14
1.9	Vertrauensbereich (Konfidenzintervall).....	15
1.10	PMP (Probable Maximum Precipitation).....	15
1.11	PMF (Probable Maximum Flood)	17
2	Methodik	18
2.1	Hochwasserberechnung nach dem Standardverfahren laut BMLFUW (2011)..	18
2.2	PMP-Berechnung	21
2.3	Hochwasserberechnung mit dem Upper Boundary-Verfahren nach BOTERO und FRANCES (2010)	35
3	Ergebnisse	37
3.1	Ergebnisse Standard-Hochwasserberechnung	37
3.2	Ergebnisse PMP-Berechnung	42
3.3	Ergebnisse der PMF-Berechnung	55
3.4	Ergebnisse Upper Boundary-Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES (2010)	58
3.5	Gegenüberstellung der Ergebnisse	65
4	Diskussion und Ausblick	69
4.1	Diskussion der Ergebnisse	69
4.2	Ausblick	71
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	72
6	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	74
7	R-Packages	78

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

WMO	World Meteorological Organization
P _ü	Überschreitungswahrscheinlichkeit
P _u	Unterschreitungswahrscheinlichkeit
T _n	Jährlichkeit
PMP	Probable maximum precipitation, wahrscheinlich max. Niederschlag
PMF	Probable maximum flood, wahrscheinlich maximale Flut
AMS	annual maximum series, Jahresserie
PDS	partial duration series, partielle Serie
EV1	Gumbel-Verteilung
EV3	Weibull-Verteilung
AEV	Allgemeine Extremwertverteilung
P3	Paerson-3-Verteilung
LN3	3-parametrige-Log-Normal-Verteilung
EV4	4-parametrige Extremwert-Verteilung (EV4)
LN4	Slade-Type 4-parametrige Log-Normal-Verteilung
TDF	Transformierte Extremwert-Verteilung
HRU	Hydrological Response Unit
R	Anzahl der Resamplingvorgänge im Bootstrap Verfahren
\bar{x}_n	Mittelwert
σ_n	Standardabweichung
<i>km</i>	Häufigkeitsfaktor (frequency factor)
<i>digHAO</i>	<i>digitaler Hydrologischer Atlas Österreichs</i>

1 Einleitung

1.1 Einleitung und wissenschaftliche Fragestellung

Hochwässer sind Teil des natürlichen Wasserkreislaufs und aus diesem Grund nicht zu vermeiden. Bei Beginn des Niederschlags wird das auftreffende Regenwasser noch von den Pflanzen bzw. dem Boden zurückgehalten, doch je länger der Niederschlag anhält, desto höher wird der Anteil des Wassers welches oberflächlich abfließt. Dies führt zu einem Anstieg der Wasserstände in Fließgewässern. Je länger es regnet, umso schneller sind die natürlichen Retentionsmöglichkeiten (Pflanzen und Boden) aufgebraucht und immer mehr Niederschlag fließt unmittelbar nach dem Auftreffen oberflächlich ab. Hochwässer sind die Folge und je nach Zusammentreffen ungünstiger Konstellationen (gesättigte Bodenspeicher, hoher Abflussbeiwert, lang andauernde Starkniederschläge) können diese auch zu Extremereignissen mit hohem Schadenspotential werden (PATT und JÜPNER, 2013).

Extreme Hochwässer sind in ihrem zeitlichen und räumlichen Auftreten sehr variabel. Daher kann es über mehrere Jahre andauernde Perioden geben in denen kein Hochwasser auftritt bzw. beobachtet wird. Auf diese Perioden können jedoch Zeiträume mit folgenschweren Katastrophenhochwässern folgen. Deshalb ist es wichtig geeignete Schutzmaßnahmen zu entwickeln, deren Ausmaß auf der Berechnung von Hochwasserkennwerten (z.B. HQ100-Werte) beruht. Die Grundlagendaten für die Berechnung von Hochwasserkennwerten können aus unterschiedlichen Gründen zum Teil unterschiedliche Qualität bzw. Repräsentativität aufweisen, was uns zum eigentlichen Problem der Hochwasservorhersage führt. Die Berechnung und Abschätzung von Hochwasserereignissen ist stets mit Unsicherheiten behaftet (BMLFUW, 2011).

Laut MERZ und BLÖSCHL (2008) werden die folgenden Punkte als Unsicherheiten bzw. Schwächen bei der Extrapolation von Hochwasserkennwerten gesehen:

- Die verfügbaren Aufzeichnungen von Hochwasserereignissen weisen nicht dieselbe Charakteristik wie die zukünftigen Hochwässer auf.
- Die Zeitserien aus denen Hochwässer mit hohen Wiederkehrintervallen extrapoliert werden, sind oft zu kurz (unter 30 Jahre).
- Die Veränderung der Landnutzung im Einzugsgebiet führt zu einer Verschärfung (bzw. auch Entschärfung) der Hochwassersituation.
- Veränderungen in der Flussmorphologie resultieren ebenfalls in einer Abänderung des Abflussverhaltens.

- Die Aufzeichnungen von kleinen bzw. mittleren Fluten geben nicht immer die Charakteristik von extremen Fluten wieder.
- Messfehler nehmen bei höheren Abflüssen (Hochwasser) stark zu.

Die Berechnung der Hochwasserkennwerte erfolgt mittels der Extremwerte aus hydrologischen Zeitreihen. Bei der Extremwertstatistik werden die ausgelesenen Werte mit gewählten Verteilungsfunktionen analysiert. Die Zeitreihenanalyse geht von stationären Verhältnissen aus, das bedeutet, dass Veränderungen im Einzugsgebiet, in der Flussmorphologie und im Klima die Auswertung der Zeitreihen erheblich erschwert (NACHTNEBEL et.al., 2007).

Im Leitfaden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten des BMLFUW (2011) werden verschiedene Verteilungsfunktionen mit 2 – 4 Parameter für die Berechnung von Flutwiederkehrintervallen vorgestellt.

Laut BOTERO und FRANCES (2010) haben diese Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen, welche als Standardverfahren genutzt werden, alle dieselbe Eigenschaft. Sie besitzen keine Obergrenze (Anm.: bei positiver Schiefe). Je höher also das angenommene Wiederkehrintervall ist, desto höher ist die geschätzte Flut. Durch eine fehlende Begrenzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung steigt der berechnete Hochwasserkennwert ohne Limit an und würde bei einem entsprechend hohen Wiederkehrintervall auch die physikalisch im Einzugsgebiet mögliche Abflussgröße überschreiten. Diese Überschätzung bei hohen Wiederkehrintervallen führt zu einer Unterschätzung bei den gängigen Jährlichkeiten (HQ100), welche für den Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen herangezogen werden.

Um dieser Fehlerquelle zu entgehen wird die Implementierung eines zusätzlichen Parameters g als Begrenzung für das obere Limit von einigen Autoren empfohlen (ELIASSON, 1994, TAKARA und LOEBIS 1996, TAKARA und TOSA 1999).

Durch die Einsetzung einer rechtsseitigen Begrenzung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen sollen realitätstreuere Hochwasserkennwerte generiert werden (BOTERO und FRANCES, 2010).

In der vorliegenden Masterarbeit werden die vom Leitfaden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten des BMLFUW (2011) erwähnten Verteilungsfunktionen mit den von BOTERO und FRANCES (2010) empfohlenen Verteilungsfunktionen verglichen.

BMLFUW (2011) – Standardverfahren:

- Gumbel-Verteilung (EV1)
- Weibull-Verteilung (EV3)
- Allgemeine Extremwertverteilung (AEV)
- Paerson III-Verteilung (P3)
- 3-parametrische Log-Normal-Verteilung (LN3)

BOTERO und FRANCES (2010) – Upper Boundary-Verfahren:

- 4-parametrische Extremwert-Verteilung (EV4)
- Slade-Type 4-parametrische Log-Normal-Verteilung (LN4)
- Transformierte Extremwert-Verteilung (TDF)

Die wissenschaftlichen Fragestellungen welche im Zuge der Masterarbeit behandelt werden lauten wie folgt:

- Liefern die Upper Boundary-Verfahren zuverlässige Kennwerte für die Hochwasserabschätzung im Vergleich zu den Standardverfahren nach BMLFUW?
- Wie reagieren die einzelnen Verteilungsfunktionen auf Ausreißer (Implementierung HQ200 in die Zeitserie und Vergleich mit der originalen Zeitserie)? Welche Verteilungsfunktion liefert die stabilsten Hochwasserkennwerte?

1.2 Berechnungsprogramm

Für die Berechnungen wird das Programm R verwendet. Durch die speziellen Erweiterungspackages kann das Programm für eine Vielzahl von Möglichkeiten verwendet werden. Für die Berechnungen wurden einige dieser Zusatzpackages verwendet, welche im Anhang aufgelistet sind.

1.3 Projektgebiet und hydrologische Daten

Für meine Masterarbeit habe ich das Einzugsgebiet der Mur in Österreich gewählt.

Die Mur entspringt in den Radstätter Tauern auf einer Höhe von ca. 1.900 m ü. A. und fließt zunächst in östlicher Richtung bis zur Ortschaft Bruck an der Mur. Hier verbindet sich die Mur mit der Mürz und fließt anschließend Richtung Süden weiter. Ab Spielfeld (Steiermark) markiert die Mur die Grenze zwischen Österreich und Slowenien. Bei der Ortschaft Radkersburg verlässt die Mur Österreich und fließt anschließend noch durch Slowenien, Kroatien und Ungarn. In Ungarn mündet die Mur bei Legrad auf einer Seehöhe von 130 m ü. A. in die Drau. Das gesamte Einzugsgebiet der Mur beträgt 14.371 km²,

wobei 10.341 km² auf Österreich entfallen. Vom Ursprung in den Radstätter Tauern bis hin zur Einmündung in die Drau weist die Mur eine Gesamtlänge von 468,80 km (359,00 km in Österreich). Die wichtigsten Zubringer der Mur sind Mürz (AUT), Kainach (AUT), Sulm (AUT), Scavnica (SLO) und Kerka (HUN) (BRILLY et. al., 2012).

Die hydrologischen Daten für meine Arbeit werden von der Homepage des Hydrologischen Dienst Österreich (www.ehyd.gv.at) heruntergeladen. In der nachfolgenden Tabelle 1 und der Abbildung 1 sind die verwendeten Abfluss-Messstellen, welche für die Berechnung der Hochwasserkennwerte verwendet werden, aufgelistet bzw. dargestellt.

Tabelle 1: Verwendete Pegelmessstellen an der Mur bzw. Mürz (ehyd.gv.at, Abrufung: 08.05.2017)

HZB-No.	Pegelmessstelle	EZG [km ²]	Start TS	Ende TS
203745	MUHR	75.7	01.01.1961	31.12.2013
203752	ST.MICHAEL	289.2	01.01.1961	31.12.2013
203794	MOERTELSDORF	366.9	01.01.1971	31.12.2013
211086	GESTUETHOF	1698.3	01.01.1961	31.12.2013
211102	ST. Georgen	2367.5	01.01.1951	31.12.2013
211136	ZELTWEG	2957.5	01.01.1966	31.12.2013
211185	LEOBEN	4391.9	01.01.1951	31.12.2013
211227	NEUBERG AN DER MUERZ	229.4	01.01.1961	31.12.2013
211243	KINDTHAL	727.7	01.01.1966	31.12.2013
211292	BRUCK A. D. MUR, BELOW MUERZ	6214	01.01.1967	31.12.2013
211490	MURECK	9769.9	01.01.1974	31.12.2013
211573	GRAZ	7042.8	01.01.1966	31.12.2013

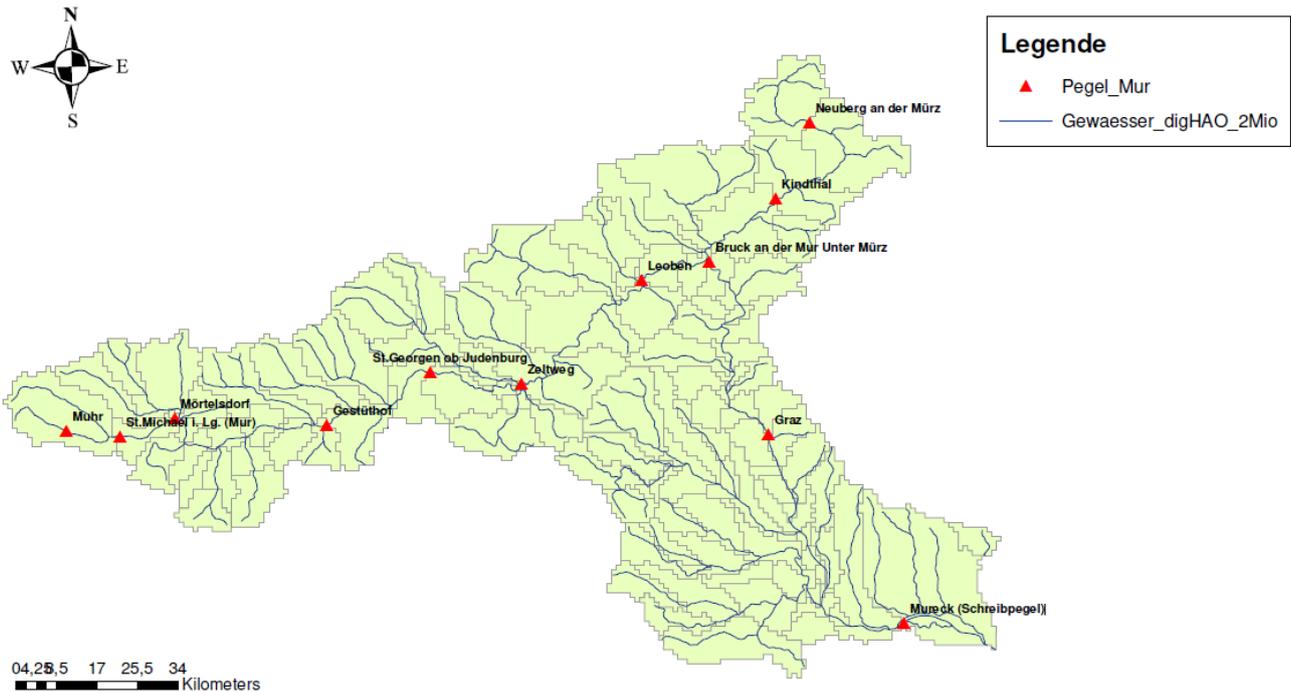


Abbildung 1: Lage der einzelnen Pegelmessstellen (ehyd.gv.at, Abrufung: 08.05.2017)

Für die Berechnung des theoretisch maximalen Niederschlags (PMP) im Einzugsgebiet der Mur werden alle Niederschlagsmessstellen mit einer Zeitreihe länger als 20 Jahre herangezogen (insgesamt 93 Stationen). In der folgenden Tabelle 2 und der Abbildung 2 sind die einzelnen Niederschlagsmesspunkte aufgelistet bzw. dargestellt.

Tabelle 2: Niederschlagsmessstellen im Einzugsgebiet der Mur (ehyd.gv.at, Abrufung: 10.05.2017)

Stationsname	Station	Stationsname	Station	Stationsname	Station
Eisenerzer Ramsau	101675	Mautern	111831	Gleinstätten	112524
Hüttschlag	103689	Trofaiach	111872	Stanz	112540
St.Nikolai im Sölkatal	106005	Mürzsteg	111906	Wies	112557
Hohentauern	106120	Preiner Gscheid	111914	Veitsch	112565
Brunngraben	106237	Bürgeralm bei Aflenz	111971	Neuhof	112573
Weichselboden	106245	Tragöß	111997	Södingberg	112649
Donnersbachwald	106500	Breitenau bei Mixnitz	112003	Zehensdorf	112664
Planneralm	106567	Frohnleiten	112037	Leoben-Hinterberg	112672
Neuhaus am Zellerain	107003	Semriach	112045	Limberg	112680
Mitterbach	107136	Gratkorn	112078	Gschnaidt	112698
Naßwald	109827	Graz-Andritz	112086	Soboth	112706
Naßwald (Wasseralm)	110155	Maria Lankowitz	112177	St. Lorenzen	112714
Trattenbach	110213	Ligist	112185	Trauhütten	112730
Rettenegg	111021	Sajach	112219	Kreuzberg	112748
Hohenau an der Raab	111369	St. Anna ob Schwanberg	112227	Osterwitz	112755
Fladnitzberg	111401	Eibiswald	112268	Klosterwinkl	112763
Alpl	111435	Leutschach	112292	Großlobming	112771

Muhr	111500	Kitzeck im Sausal	112300	Jägerwirt	112789
Zederhaus	111526	St. Nikolai im Sausal	112318	Pernegg	112847
Tweng	111542	Hebalpe	112334	Haringgraben	112854
Weißpriach	111559	Stainz	112367	Gedersberg	112862
Thomatal	111591	Kirchbach in Steiermark	112383	Gaberl	112896
St. Lambrecht	111682	St.Peter am Otterbach	112391	St.Peter im Katschtal	113324
Unzmarkt	111708	Unterpurkla	112409	Innerkrams	113332
St. Johann am Tauern	111724	Straden	112425	Flattnitz	113951
Pusterwald-Hinterwinkl	111732	Waltra	112433	Reichenfels	114298
Schmelz	111765	Zelting	112441	Brandl-Koralpe	114363
Obdach	111773	Bonisdorf	112466	Grades-Klachl	114587
Ingering II	111781	Bärnbach	112490	Breitenstein	115691
Kraubath an der Mur	111807	Paal-Stadl	112508	Kernhof	115923
Wald am Schoberpaß	111815	Straß	112516	Trattenbach	116186

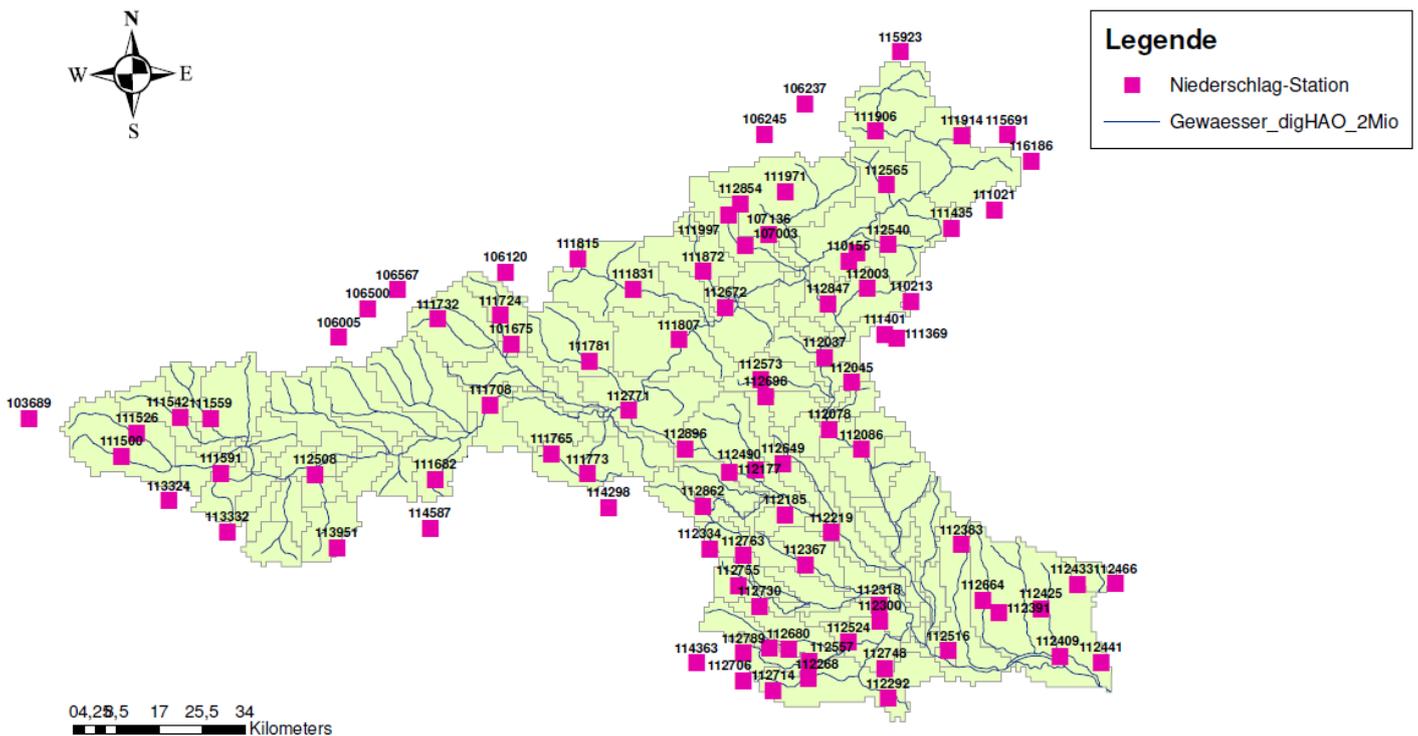


Abbildung 2: Lage der einzelnen Niederschlagsmessstellen (ehyd.gv.at, Abrufung: 08.05.2017)

1.4 Berechnung von Hochwasserkennwerten

Nachfolgend werden die grundlegenden Begriffe und Berechnungsschritte für die Ermittlung von Hochwasserkennwerten dargestellt und beschrieben.

1.4.1 Vorgangsweise Hochwasserberechnung

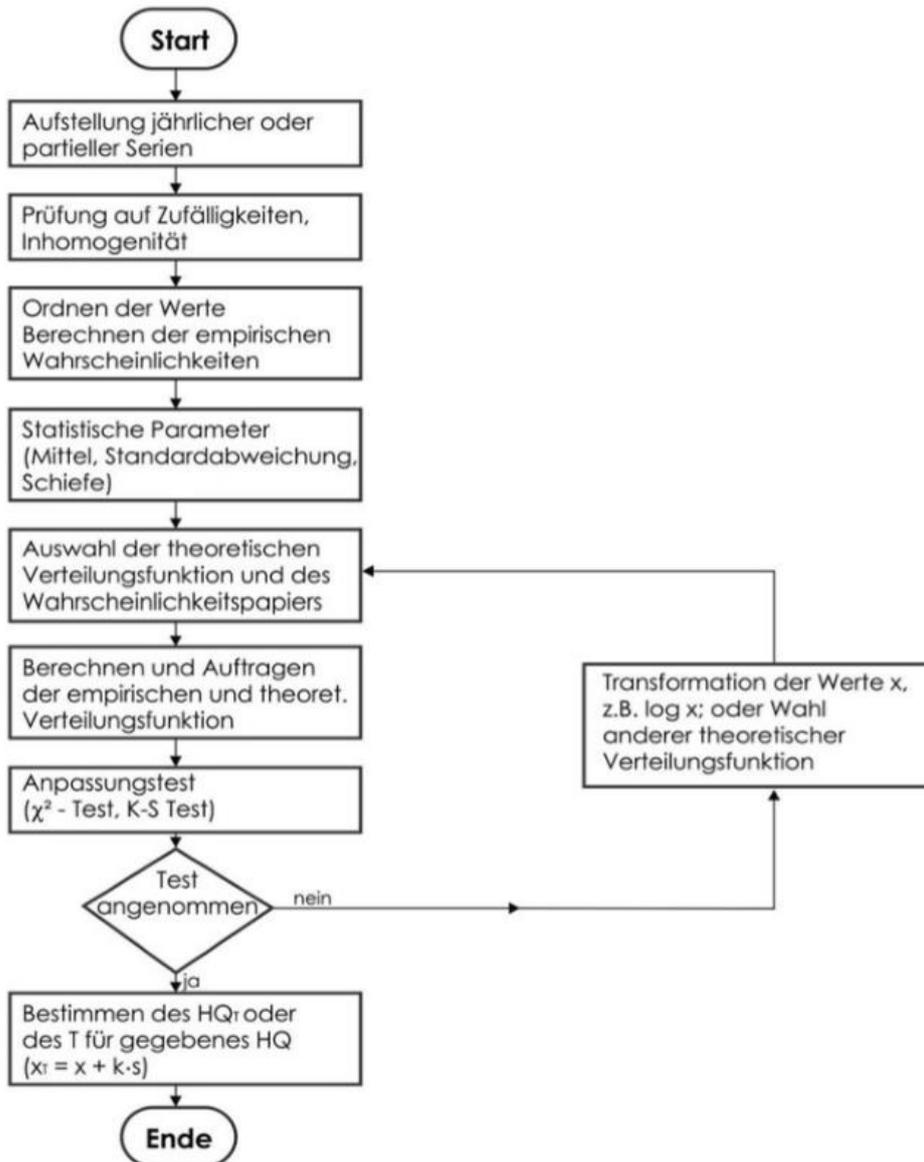


Abbildung 3: Flussdiagramm zur Bestimmung seltener Ereignisse aus Verteilungsfunktionen (MANIAK, 2010, S. 142)

Das in Abbildung 3 dargestellte Flussdiagramm beschreibt die wesentlichen Schritte für die Berechnung von Hochwasserkennwerten. Bei der Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten wird ein Zusammenhang zwischen Abfluss Q und dessen mittlerem Wiederkehrintervall T (Überschreitungshäufigkeit) hergestellt (NACHTNEBEL et. al., 2007).

1.4.2 Jährlichkeit T_n

Laut NACHTNEBEL et. al. (2007) gibt die Jährlichkeit T_n an in welchem Zeitfenster ein bestimmter Abfluss erreicht bzw. überschritten wird. Mathematisch wird die Jährlichkeit als Reziprokwert der Überschreitungswahrscheinlichkeit mit der folgenden Formel definiert:

$$T_n = 1/P_{\ddot{u}} \quad \text{Jährlichkeit} \quad (1.1)$$

Im Leitfaden für die Abschätzung von Hochwasserkennwerten vom BMLFUW aus dem Jahr 2011 sind die Überschreitungs- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit wie folgt definiert:

$$P_{\ddot{u}} = P(X \geq x_1) \quad \text{Überschreitungswahrscheinlichkeit} \quad (1.2)$$

(Wahrscheinlichkeit, dass der Wert $X \geq x_1$ auftritt)

$$P_u = P(X \leq x_2) \quad \text{Unterschreitungswahrscheinlichkeit} \quad (1.3)$$

(Wahrscheinlichkeit, dass der Wert $X \leq x_2$ auftritt)

Zwischen Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit besteht eine simple Beziehung (siehe Formel 1.4):

$$P_{\ddot{u}} + P_u = 1 \quad (1.4)$$

Der Begriff Jährlichkeit wird oft missinterpretiert. Das HQ 100, also ein Abfluss mit der Jährlichkeit von 100 Jahren wird im Mittel alle 100 Jahre überschritten bzw. erreicht. Dies bedeutet jedoch nicht, dass dieser Abfluss nur alle 100 Jahre auftritt bzw. dass nach einem solchen Ereignis die nächsten 100 Jahre kein solches Hochwasser mehr zustande kommt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Hochwasser mit der Jährlichkeit $T_n = 100$ Jahre eintritt ist in jedem Jahr gleich und beträgt:

$$P = 1/T_n, \quad \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \quad (1.5)$$

also in diesem Fall 0,01 (NACHTNEBEL et. al., 2007)

Für die wasserwirtschaftliche Planung ist neben der Jährlichkeit auch noch die statistische Sicherheit S von großem Nutzen. Sie gibt an mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Abfluss $HQ \geq HQ(T_n)$ in m Jahren auftritt und ist laut BMLFUW (2011) in der folgenden Beziehung ersichtlich

$$S = (1 - 1/T)^m \quad \text{statistische Sicherheit} \quad (1.6)$$

1.4.3 Empirische Wahrscheinlichkeiten (Plotting Position)

Laut BMLFUW (2011) ist die empirische Wahrscheinlichkeit ein wichtiges Werkzeug zur Überprüfung der gewählten theoretischen Verteilungsfunktion durch einen statistischen Anpassungstest. Da der Stichprobenumfang bei den derzeitigen vorliegenden Zeitreihen oft nicht mehr also 50 Werte umfasst, ist eine Klassenbildung mit anschließender Berechnung der Summenhäufigkeit nicht zielführend. Stattdessen wird für jeden Wert der Stichprobe die empirische Überschreitungswahrscheinlichkeit geschätzt. Für die Schätzung der empirischen Wahrscheinlichkeiten gibt es verschiedene Ansätze, von denen der folgende als allgemeine Form anerkannt ist:

$$P_{\hat{u}}(X \geq x_i) = \frac{i-\alpha}{n+1-2\alpha} \quad \text{empirische Wahrscheinlichkeit} \quad (1.7)$$

$P_{\hat{u}}(X \geq x_i)$... Überschreitungswahrscheinlichkeit

i ... *Rangzahl*

α ... Parameter zwischen 0 und 1 (für meine Berechnungen wurde der Ansatz nach Weibull verwendet – $\alpha = 0$)

n ... Anzahl der in der Stichprobe enthaltenen Werte

1.5 Jährliche und partielle Serie (AMS und PDS)

Im Leitfaden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten des BMLFUW von 2011 werden zwei Verfahren zur Auswahl von Extremwerten für die Bestimmung von Hochwasserkennwerten dargestellt. Die in dieser Arbeit für die Berechnungen verwendete jährliche Serie bzw. AMS-Ansatz (annual maximum series) besteht aus den beobachteten Maximalwerten/Jahr einer Zeitserie. Für die einzelnen Jahre wird jeweils nur das größte Ereignis in diesem Jahr ausgewählt. Das zweite Verfahren zur Auswahl von Extremwerten ist die partielle Serie bzw. der PDS-Ansatz (partial duration Series). Beim PDS-Ansatz werden alle Werte in die Stichprobe aufgenommen, welche einen bestimmten Schwellenwert überschreiten (BMLFUW, 2011).

Die Wahl des Schwellenwerts sollte so gestaltet sein, dass möglichst viele voneinander unabhängige Ereignisse in die Berechnung aufgenommen werden. Hierbei ist zu beachten, dass ein tatsächlich aufgetretenes Ereignis, welches in der Abklingphase noch sekundäre Abflussspitzen aufweist, nicht mehrmals in die Serie aufgenommen wird. Um dies zu vermeiden wurden gewisse Mindestzeiten und Mindestniveaus eingeführt (für jede Reihe bzw. Messstelle unterschiedlich), welche überschritten bzw. unterschritten werden müssen, damit dem Primäreignis nachfolgende Hochwasserscheitelpunkte als

unabhängig gelten und als eigene Ereignisse in die Serie aufgenommen werden können. In der Praxis wird der Schwellenwert oft so gewählt, dass durchschnittlich 3 Ereignisse pro Jahr über dem Schwellenwert liegen. (BMLFUW, 2011)

In der nachfolgenden Abbildung 4 sind die beiden Ansätze grafisch dargestellt:

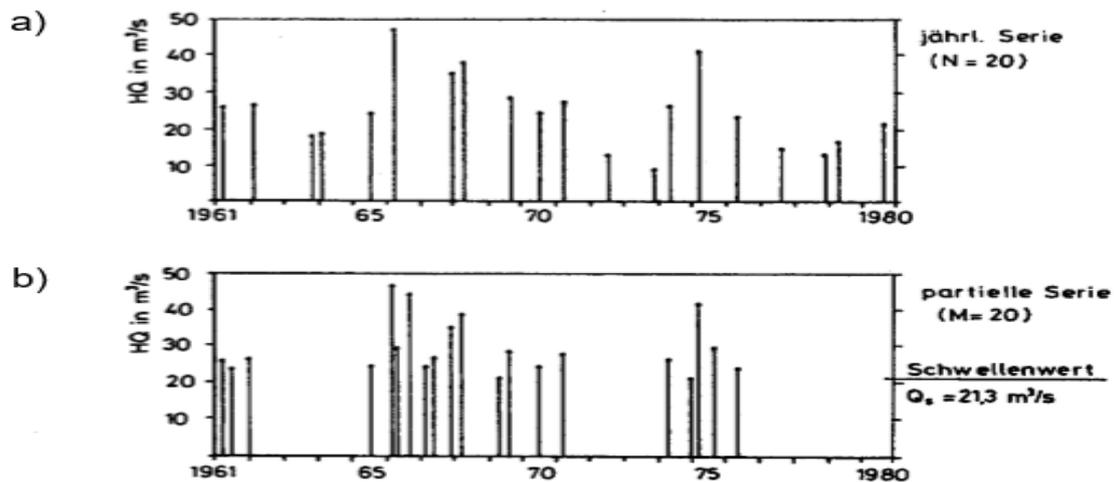


Abbildung 4: Darstellung von Extremwerten mittels jährlicher und partieller Reihen (NACHTNEBEL et. al., 2007, S. 2-4)

Voraussetzungen für die beiden Ansätze (AMS und PDS) ist die stochastische Unabhängigkeit der Beobachtungen und die Konstanz zwischen Erwartungswert und Varianz (Stationarität) (BMLFUW, 2011). Für die Überprüfung dieser Voraussetzungen sind laut Leitfaden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten des BMLFUW von 2011 folgende Testverfahren üblich:

- Test auf Unabhängigkeit: Wald-Wolfowitz
- Test auf Trendfreiheit: Mann-Kendall, Spermanns Rho, Sneyers
- Homogenitätstest: Wilcoxon

1.6 Parameterschätzmethoden

Die Stichprobe der Hochwasserabflüsse aus der gegebenen Zeitreihe entspricht nur bedingt der Grundgesamtheit. Da die Grundgesamtheit, mathematisch dargestellt durch die Verteilungsfunktion und die dazugehörigen Parameter, nicht genau bekannt ist muss der Typ der Verteilungsfunktion gewählt werden. Die Auswahl der Verteilungsfunktion wird als Schätzung betrachtet, da die Stichprobe die wahren Parameter der Grundgesamtheit nur mehr oder weniger gut repräsentiert (BMLFUW, 2011).

Ein wichtiger Punkt der Parameterschätzung ist die Auswahl eines erwartungstreuen Schätzverfahrens, welches eine möglichst geringe Fehlervarianz aufweist. Um dies zu

erreichen sollten möglichst alle zur Verfügung stehenden Informationen in die Parameterschätzung mit eingebunden werden (NACHTNEBEL et. al., 2007).

Nachfolgend werden zwei Verfahren zur Parameterschätzung beschrieben, welche in dieser Arbeit verwendet werden.

1.6.1 L-Momente

Die Methode der L-Momente wurde erstmals von HOSKING (1990) vorgestellt und ähnelt im Ansatz der PWM-Methode (probability weighted moments – wahrscheinlichkeitsgewichtete Momente). Das Verfahren der L-Momente ist jedoch im Vergleich zu anderen Verfahren der Parameterschätzung robuster gegenüber Ausreißern und liefert auch für kleinere Stichproben relativ gute Parameterwerte. Ein weiterer Vorteil ist die größere Anschaulichkeit sowie leichtere Interpretierbarkeit (BMLFUW, 2011).

Laut Hosking (HOSKING, 1990) wird das r^{te} L-Moment der Verteilung von X wie folgt definiert:

$$\lambda_r = \frac{1}{r} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} E(X_{r-k:r}) \quad \text{Berechnung L-Moment} \quad (1.8)$$

Die ersten vier L-Momente λ_1 , λ_2 , λ_3 und λ_4 werden zur Bewertung des Orts, der Streuung, der Schiefe und der Wölbung der Verteilung der Grundgesamtheit herangezogen (BMLFUW, 2011).

1.6.2 Maximum-Likelihood Methode

Grundgedanke der ML-Methode ist, dass für eine angenommene Verteilung Parameter geschätzt werden, welche die angenommene Verteilung am wahrscheinlichsten wiedergeben. Vom theoretischen Standpunkt aus hat die Maximum-Likelihood Methode zahlreiche günstige Eigenschaften, jedoch sind die Fehler bei kürzeren Zeitreihen (< 500 Werte) deutlich höher, als bei anderen Schätzmethoden. Die Anwendung in der Hydrologie wo meist nur kürzere Zeitreihen vorhanden sind, ist daher nur bedingt gegeben (BMLFUW, 2011).

Laut BMLFUW (2011) wird die Parameterbestimmung als Optimierungsfunktion mit der Zielfunktion L (Likelihood-Funktion) wie folgt dargestellt:

$$L(u_1, \dots, u_m) = f(x_1, u_1, \dots, u_m) * f(x_2, u_1, \dots, u_m) * \dots * f(x_n, u_1, \dots, u_m) \quad (1.9)$$

u_1, \dots, u_m : die m zu bestimmenden Parameter der Dichte- bzw. Verteilungsfunktion

$f(x_1, u_1, \dots, u_m)$: Funktionswerte der Dichtefunktion der gewählten Verteilung für den i -ten Beobachtungswert x von n Werten

Für ein möglichst akkurates Ergebnis sind die gesuchten Parameter so zu wählen, dass $L(u_1, \dots, u_m)$ maximal wird. Um die Likelihood-Funktion als Summe darzustellen, was in manchen Fällen praktikabler ist, wird die maximierende Größe auch als $\log(L)$ gewählt (BMLFUW, 2011).

1.7 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Für die Bestimmung der Hochwasserkennwerte in dieser Arbeit werden zwei verschiedene Berechnungsarten betrachtet. Die Standard-Herangehensweise mit den Verteilungsfunktionen welche im Leitfaden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten des BMLFUW (2011) zu finden sind. Für die zweite Herangehensweise werden die im Paper von BOTERO und FRANCES (2010) vorgestellten Verteilungsfunktionen, welche über eine Obere Grenze (Upper Boundary) verfügen, herangezogen.

1.7.1 Standardverfahren nach BMLFUW (2011)

In den Studienblättern für Hydrologie und Flussgebietsmanagement von NACHTNEBEL et al (2007) werden die vom BMLFUW empfohlenen Verteilungsfunktionen wie folgt beschrieben:

- Gumbel-Verteilung (EV1)
 - 2-parametrig
 - doppelt exponentiell
 - asymmetrisch mit fester Schiefe ($cs = 1,139$)
 - linksseitig und rechtsseitig unbegrenzt

- Weibull-Verteilung (EV3)
 - 3-parametrig
 - Wird häufiger für Niedrigwasserereignisse verwendet (seltener für Hochwasserberechnungen)
 - Rechtsseitig begrenzt, linksseitig unbegrenzt

- Allgemeine Extremwertverteilung (AEV)
 - Umfasst die Extremwertverteilungen I, II und III
 - 3-parametrig

- Paerson III-Verteilung (P3)
 - Auch als verschobene Gammaverteilung bezeichnet
 - Standardverfahren zur Bestimmung von HW-Häufigkeit bei jährlichen Serien
 - 3-parametrig
 - Einseitig begrenzt (rechts bei negativer Schiefe, links bei positiver Schiefe)

- 3-parametrige Log-Normal-Verteilung (LN3)
 - Ähnlich der 2-parametrischen Log-Normal-Verteilung (LN2)
 - Unterschied zu LN2: zusätzlicher Lageparameter λ
 - Linksseitig begrenzt, rechtsseitig unbegrenzt

1.7.2 Upper Boundary-Verfahren nach BOTERO und FRANCES (2010)

BOTERO und FRANCES (2010) wählten die nachstehenden Verteilungsfunktionen aus, da diese schon zuvor erfolgreich für hydrologische Analysen eingesetzt wurden. Die drei folgenden Verteilungsfunktionen weisen alle eine rechtsseitige Begrenzung g (upper boundary) auf.

- 4-parametrige Extremwert-Verteilung (EV4)
 - Erstmals vorgestellt von KANDA (1981) für die Berechnung von Erdbebenwellen und Windgeschwindigkeiten.
 - Von TAKARA und TOSA (1999) erstmals für hydrologische Zwecke verwendet
 - Ableitung aus der verallgemeinerten Extremwertverteilungsfamilie
 - 4-parametrig

- Slade-Type 4-parametrige Log-Normal-Verteilung (LN4)
 - Erstmals vorgestellt von SLADE (1936) und von TAKARA und LOEBIS (1996), für hydrologische Studien in Japan und Indonesien angewendet
 - Applikation der Slade-Type-Variablen Transformation zur LN2-Verteilung
 - 4-parametrig

- Transformierte Extremwert-Verteilung (TDF)
 - Entwickelt von ELIASSON (1994)

- Definition aus ELIASSON (1997): Eine transformierte Extremwert-Verteilungsfunktion (TDF) die aus einer Basisverteilungsfunktion (BDF) abgeleitet wurde, welche der EV1-Verteilung entspricht
- 4-parametrig

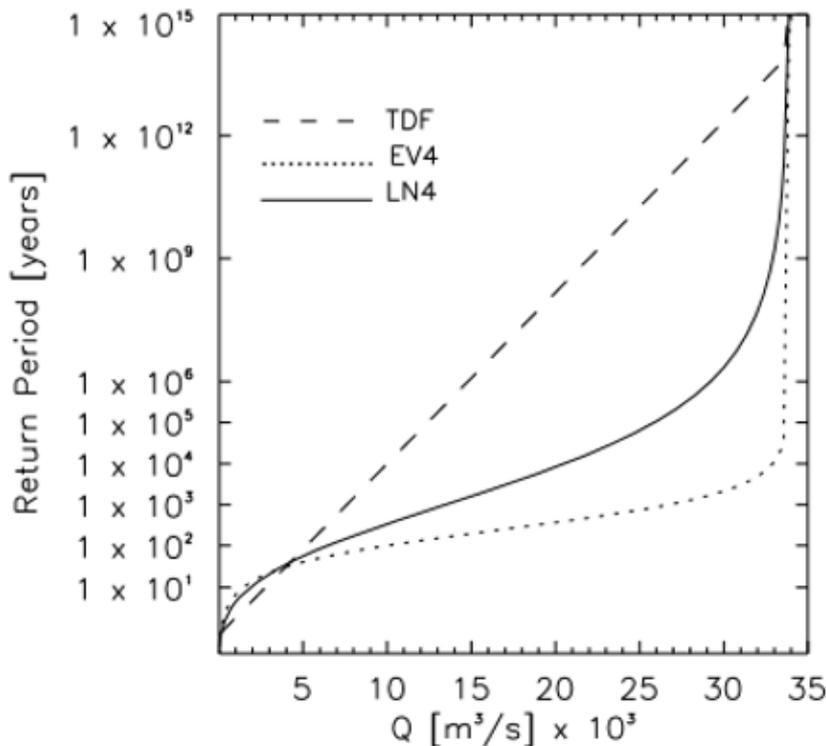


Abbildung 5: Unterschiedliches Verhalten der EV4, LN4 und TDF Verteilungen bei der Annäherung an die rechteckige Begrenzung g (BOTERO, B. A., FRANCES, F., 2010, S. 2623)

Wie in Abbildung 5 ersichtlich nähert sich die EV4-Verteilung ziemlich schnell der festgelegten Obergrenze g . Im Gegensatz dazu nähert sich die TDF-Verteilung nur sehr langsam der rechtsseitigen Begrenzung.

1.8 Anpassungstests

Betrachtet man die Anzahl der zur Verfügung stehenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen unterscheiden sich manche nur geringfügig voneinander. Um trotzdem die beste Variante zu wählen, werden Anpassungstests (engl.: Goodnes of fit-test) durchgeführt. Statistische Verfahren hierfür sind unter anderem:

- Kolmogorow-Smirnow-Test
- Chi²-Anpassungstest

Diese Tests vergleichen die angenommene Verteilung mit der tatsächlichen Verteilung und ermitteln somit, welche Variante die geringsten Differenzen zur Stichprobe besitzt (BMLFUW, 2011)

1.9 Vertrauensbereich (Konfidenzintervall)

Beschreibt das Wertintervall in dem auf Grund der vorliegenden Stichprobeninformation bestimmte Kenngrößen bzw. Parameter voraussichtlich enthalten sind (BMLFUW, 2011). In dieser Arbeit werden die Konfidenzintervalle mittels des nichtparametrischen Bootstrap-Verfahrens berechnet.

Das Bootstrap-Verfahren ist ein Resampling-Verfahren, welches auf der Grundlage basiert, dass in einer beobachteten Stichprobe eine Vielzahl von Bootstrapstichproben enthalten sind. Die Erzeugung der Bootstrap-Stichproben erfolgt durch zufälliges Ziehen von Werten aus der beobachteten Stichproben mit Zurücklegen. Durch dieses Vorgehen kann jeder beobachteten Werte zwischen 0 und n-mal in der neuen Stichprobe enthalten sein (BMLFUW, 2011).

1.10 PMP (Probable Maximum Precipitation)

Definition PMP laut WMO (2009):

Der theoretisch maximale Niederschlag für eine bestimmte Zeitspanne unter den gegebenen meteorologischen Bedingungen.

Hauptziel der PMP-Abschätzung ist die Berechnung der theoretisch maximalen Hochwasserwelle (probable maximum flood, PMF)

Niederschläge und die daraus resultierenden Hochwasserereignisse haben eine physikalische Obergrenze, welche als PMP oder PMF bezeichnet wird. Aufgrund der Komplexität der Abläufe, welche zu Hochwasserereignissen führen und der geringen Menge an verfügbaren Klimadaten liegen für diese Obergrenzen zurzeit jedoch nur Schätzwerte vor (WMO, 2009).

1.10.1 Methoden zur PMP-Berechnung

Laut WMO Handbuch von 2009 zur Berechnung des wahrscheinlich maximalen Niederschlags PMP gibt es sechs verschiedene Methoden zur PMP-Abschätzung:

- **Local Method**
 - Das PMP wird vom maximalen Niederschlagsereignis des gewählten Einzugsgebiets abgeleitet. Diese Methode wird nur bei ausreichend langen Aufzeichnungen angewendet.
- **Transposition Method**
 - Ein außerordentliches Starkregenereignis aus einer benachbarten Zone wird in das beobachtete Gebiet eingesetzt und dort analysiert.
- **Combination Method**
 - Zwei oder mehrere starke Niederschlagsereignisse werden kombiniert, um eine Sequenz aus starkem Niederschlag über eine längere Zeitdauer zu erzeugen.
- **Inferential Method**
 - Der 3-dimensionale Aufbau eines Starkregenereignisses wird zu einer einfacheren Niederschlagsformel mit einem Hauptterm, welcher für das Ausmaß des Niederschlags verantwortlich ist, umgewandelt.
- **Generalized Method**
 - Dient zur PMP-Berechnung von großen, meteorologisch homogenen Zonen.
- **Statistical Method**
 - Methode nach Hershfield
 - Frequenzanalyse der maximalen Regenereignisse im beobachteten Einzugsgebiet.

Die erwähnten Methoden zur PMP-Abschätzung können laut WMO (2009) in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

- Herangehensweise für eine größere meteorologisch homogene Zone (indirekte Herangehensweise)
 - Es werden mehrere PMP-Werte über eine größere Fläche ermittelt und anschließend auf das beobachtete Einzugsgebiet adaptiert (Transposition)
 - Methoden: Generalized und Statistical Method
- Herangehensweise für ein bestimmtes Einzugsgebiet (direkte Herangehensweise)
 - Ein Niederschlagsereignis wird innerhalb der Einzugsgebietsgrenzen implementiert und in dessen Ausmaß bzw. Stärke maximiert (Maximization).
 - Methoden: Local, Transposition, Combination und Inferential Method

Für die Berechnung des PMP im Einzugsgebiet der Mur in Österreich wird in dieser Masterarbeit die statistische Methode nach Hershfield (Statistical Method) verwendet.

1.10.2 Genauigkeit der PMP-Berechnung

Die Genauigkeit der Abschätzung des maximalen Niederschlags in einem Einzugsgebiet hängt zu einem großen Teil von der Qualität bzw. Quantität der vorhandenen Daten ab. Zurzeit gibt es noch keine Möglichkeit, die Genauigkeit einer PMP-Abschätzung zu bewerten. Deshalb ist es wichtig die Ergebnisse von verschiedenen PMP-Berechnungen miteinander zu analysieren und zu vergleichen (consistency check) (WMO, 2009).

1.11 PMF (Probable Maximum Flood)

Definition PMF laut WMO (2009):

Die theoretisch maximale Hochwasserwelle für ein Einzugsgebiet unter den gegebenen meteorologischen Bedingungen.

Der wichtigste Schritt in der PMF-Berechnung ist die Umwandlung des PMP im Einzugsgebiet in eine Hochwasserwelle beim Gebietsauslass. Für diese Umwandlung werden Niederschlag-Abfluss-Modelle herangezogen (WMO,2009).

2 Methodik

Die folgenden Methoden wurden zur Ausarbeitung der Fragestellung verwendet:

2.1 Hochwasserberechnung nach dem Standardverfahren laut BMLFUW (2011)

Die Zeitserien der unter Punkt 1.3. angeführten Pegelmessstellen wurden von der Homepage des hydrographischen Zentralbüros Österreichs (HZB) heruntergeladen und anschließend mit dem Programm R ausgewertet. Für die einzelnen Pegel wird ein Hochwasser mit einer Jährlichkeit Tn von 100 Jahren berechnet. Für die Berechnung des HQ100 werden drei unterschiedliche Beobachtungszeiträume verwendet:

- 30 Jahre: Zeitraum von 01.01.1984 bis 31.12.2013 (12 Pegel)
- 40 Jahre: Zeitraum von 01.01.1974 bis 31.12.2013 (12 Pegel)
- 50 Jahre: Zeitraum von 01.01.1964 bis 31.12.2013 (6 Pegel)

Für die drei verschiedenen Beobachtungszeiträume werden die jährlichen Maxima pro Pegelmessstelle ausgelesen und die empirischen Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Extremwerte berechnet. Anschließend wird eine theoretische Verteilungsfunktion ausgewählt und an die empirische Verteilung angepasst. Die Parameter der theoretischen Verteilungsfunktion werden mittels der L-Momenten-Methode geschätzt. Nach der Anpassung der theoretischen Verteilungsfunktion werden die HQ100-Werte berechnet. Laut Leitfaden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten (BMLFUW, 2011) reicht ein Beobachtungszeitraum von 30 Jahren aus, um repräsentative Hochwasserkennwerte zu generieren. Folgende Verteilungsfunktionen werden für die Standard-Hochwasserberechnung verwendet (NACHTNEBEL et.al., 2007):

- Gumbel-Verteilung (EV1)

- Verteilungsfunktion: $F(x) = \exp(-e^{-\frac{x-c}{d}})$ (2.1)

- d Maßstabsparameter

- c Lageparameter

- Weibull-Verteilung (EV3)

- Verteilungsfunktion: $F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x+\zeta}{\beta}\right)^\delta}$ (2.2)

- ζ Lageparameter

- β Maßstabsparameter

- δ Formparameter

- Allgemeine Extremwertverteilung (AEV)
 - Verteilungsfunktion: $F(x) = e^{-e^{-y}}$ (2.3)
 - $y = -k^{-1} \log\left(1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha}\right)$ (2.4)
 - ξ Lageparameter
 - α Maßstabsparameter
 - k Formparameter

- Paerson III-Verteilung (P3)
 - $F(x) = G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right) / \Gamma(\alpha)$ (2.5)
 - α Lageparameter
 - β Maßstabsparameter
 - ξ Formparameter

- 3-parametrische Log-Normal-Verteilung (LN3)
 - $F(x) = \Phi(y)$ (2.6)
 - $y = (\log(x - \zeta) - \mu) / \sigma$ (2.7)
 - $(x - \zeta)$ Untere Begrenzung
 - μ Lageparameter
 - σ Maßstabsparameter

2.1.1 Modifizierte Zeitreihe (HQ200 Implementierung)

Um die Auswirkung von großen Hochwasserereignissen auf die Berechnung von Hochwasserkennwerten bzw. die Veränderung von bestehenden Hochwasserkennwerten zu analysieren, wird in die gegebene Zeitreihe ein Abflusswert mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren (HQ200) eingefügt. Die Berechnung des HQ200-Werts erfolgt wie unter Punkt 2.1 beschrieben ebenfalls für verschiedene Zeiträume und mit unterschiedlichen Verteilungsfunktionen. Für die Implementierung werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Verteilungsfunktionen verglichen und der maximale Abflusswert verwendet. Der berechnete HQ200-Wert wird am 01.01.2011 in die Zeitreihen der einzelnen Pegel eingefügt. Das derzeitige maximale Hochwasserereignisse aus dem Jahr 2011 für die Pegelmessstellen lag von der Höhe her im unteren Drittel der Jahresserie und wird durch den neuen HQ200-Wert ersetzt. Durch den Vergleich der Hochwasserkennwerte, welche mit der ursprünglichen Zeitreihe berechnet wurden, und den Hochwasserkennwerten, welche mit der modifizierten Zeitreihe berechnet wurden, sollen Auswirkungen von Ausreißern in der Zeitreihe bei der Bestimmung von

Hochwasserkennwerten aufgezeigt werden. Die nachfolgenden Tabellen 3 bis 5 zeigen die berechneten HQ200-Werte in m³/s für die gegebenen Zeitreihen der einzelnen Pegel und in der Spalte „IMPL. HQ200“ die in die modifizierte Zeitreihe eingefügten Werte.

Tabelle 3: Eingefügte HQ200-Werte [m³/s] für die 30-jährige Zeitreihe

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV	IMPL. HQ200
203745	21	27	27	25	28	28
203752	69	85	84	85	87	87
203794	79	97	94	98	97	98
211086	348	427	456	434	502	502
211102	442	544	563	548	606	606
211136	451	560	546	550	565	565
211185	599	742	759	732	809	809
211227	146	171	176	190	189	190
211243	178	213	197	227	200	227
211292	852	1051	997	1052	1017	1052
211490	1245	1531	1380	1548	1374	1548
211573	849	1046	1062	1052	1130	1130

Tabelle 4: Eingefügte HQ200-Werte [m³/s] für die 40-jährige Zeitreihe

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV	IMPL. HQ200
203745	22	28	29	26	32	32
203752	72	89	89	89	94	94
203794	79	98	91	98	91	98
211086	334	410	423	415	454	454
211102	427	526	525	531	552	552
211136	446	554	526	543	535	554
211185	578	717	731	706	778	778
211227	143	166	180	188	201	201
211243	169	203	201	215	210	215
211292	814	1004	995	1006	1041	1041
211490	1281	1561	1432	1614	1439	1614
211573	798	985	1047	987	1146	1146

Tabelle 5: Eingefügte HQ200-Werte [m³/s] für die 50-jährige Zeitreihe

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV	IMPL. HQ200
203745	28	34	37	34	42	42
203752	82	99	101	104	107	107
211086	357	435	449	449	482	482
211102	454	553	550	572	578	578
211185	675	826	856	844	922	922
211227	140	163	172	183	188	188

2.2 PMP-Berechnung

Für die Abschätzung des maximalen Niederschlags im Einzugsgebiet wird die statistische Methode nach Hershfield (1964) verwendet.

2.2.1 Statistische Methode nach Herrshfield

Bei dieser Methode handelt es sich, um eine Frequenzanalyse der beobachteten Extremwerte einer Zeitreihe. Im gewählten Einzugsgebiet werden für 93 Niederschlagsmessstationen die PMP-Werte berechnet. Als Auswahlkriterium für die Niederschlagsstationen ist laut WMO (2009) nur die Länge der Zeitreihe (über 20 Jahre) heranzuziehen. Durch diese Methode erhält man Punktwerte im Einzugsgebiet, welche dann in einen räumlich verteilten Niederschlag umgewandelt werden müssen (WMO, 2009). Für die Berechnung der PMP-Werte sind laut Handbuch zur PMP-Abschätzung der WMO (2009) folgende Schritte erforderlich:

1. Extraktion der Jahresserie (AMS) aus den einzelnen Zeitreihen der Niederschlagsmessstellen.
2. Berechnung des Mittelwerts \bar{x}_n und der Standardabweichung σ_n für die Jahresserie
3. Ausschluss des größten Werts aus der Jahresserie und Berechnung des Mittelwerts \bar{x}_{n-1} und der Standardabweichung σ_{n-1} (jeweils ohne vorherig ausgeschlossenen Maximalwert) (WMO, 2009).

4. Berechnung des Faktors km

$$a. \quad km = \frac{Xm - \bar{x}_{n-1}}{\sigma_{n-1}} \quad (2.8)$$

Xm ... Maximalwert aus der Jahresserie

5. Erstellen der Hüllkurve (siehe Abbildung 6) für die Berechnung des charakteristischen km -Faktors für das Einzugsgebiet (CASAS et. al, 2009).

$$a. \quad km = -14 * \log(xn) + 31 \quad (2.9)$$

6. Anpassung des Mittelwerts \bar{x}_n und der Standardabweichung σ_n

- a. Anpassung für das maximal beobachtete Regenereignis auf Basis der Verhältnisse \bar{x}_{n-1}/\bar{x}_n bzw. σ_{n-1}/σ_n , siehe Abbildung 7 und 8

- b. Anpassung für die Länge des Beobachtungszeitraums, siehe Abbildung 9

7. Berechnung der PMP- Punktwerte mittels der Formel:

$$a. PMP = \bar{x}_n(1 - k_m C_v) \quad (2.10)$$

$$\text{Laut Everitt (1998): } C_v = \frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}} * 100 \quad (2.11)$$

8. Multiplikation des PMP-Wertes mit dem Faktor 1,13 (zur Anpassung des PMP-Wertes aufgrund der Verwendung von Daten aus fixen Zeitintervallen – 24 h Intervall [WMO, 2009]).

9. Transformation der Punktwerte in flächigen Niederschlag

10. Flächen-Abminderung der PMP-Werte laut Abbildung 10

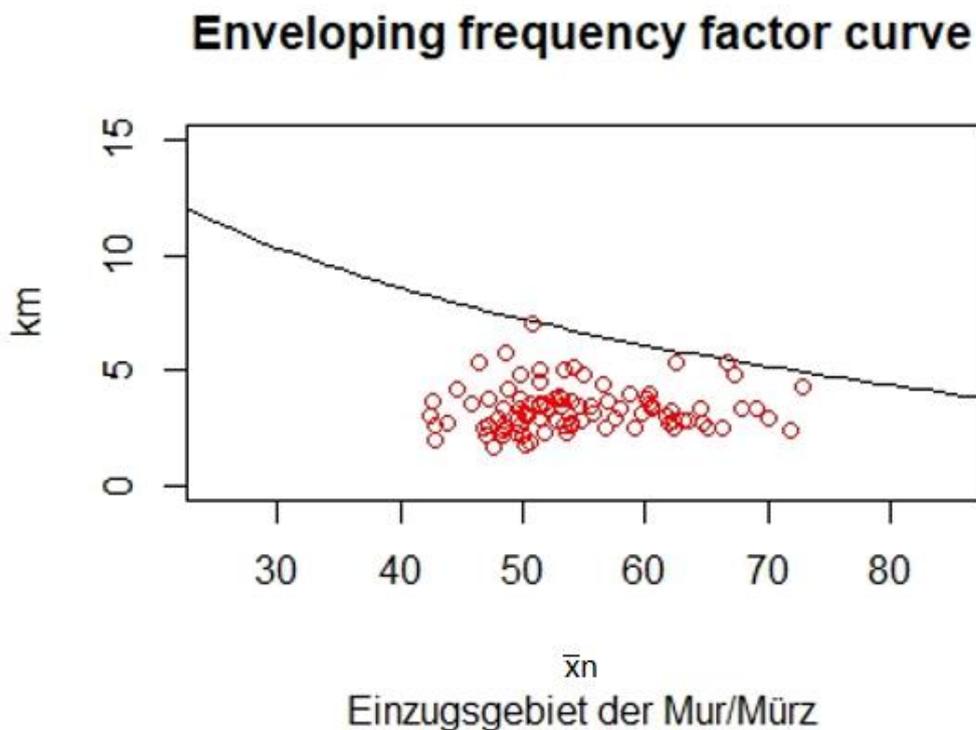


Abbildung 6: Hüllkurve für die Berechnung des km-Faktors für das Einzugsgebiet Mur / Mürz

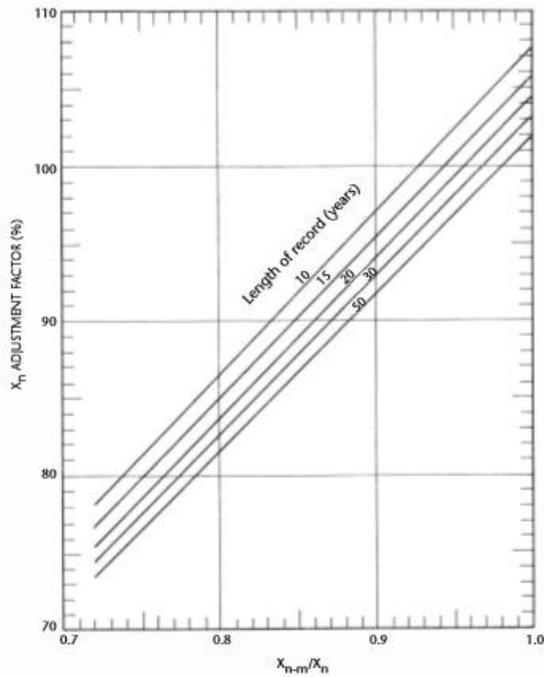


Abbildung 7: Anpassung des Mittelwertes aufgrund des maximal beobachteten Ereignisses (WMO, 2009, S. 67)

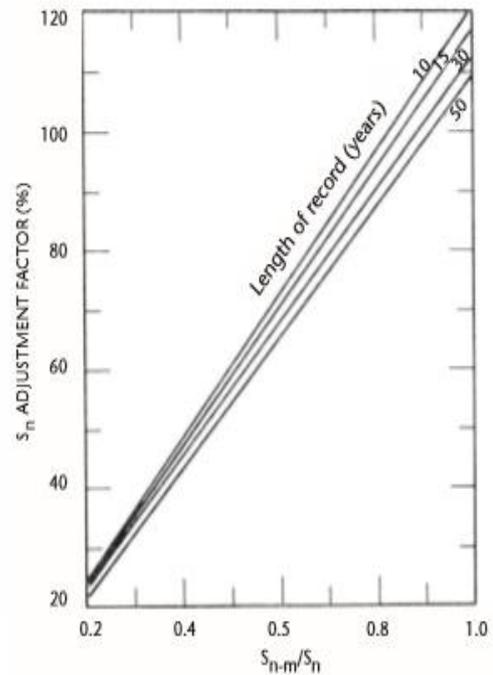


Abbildung 8: Anpassung der Standardabweichung aufgrund des maximal beobachteten Ereignisses (WMO, 2009, S. 67)

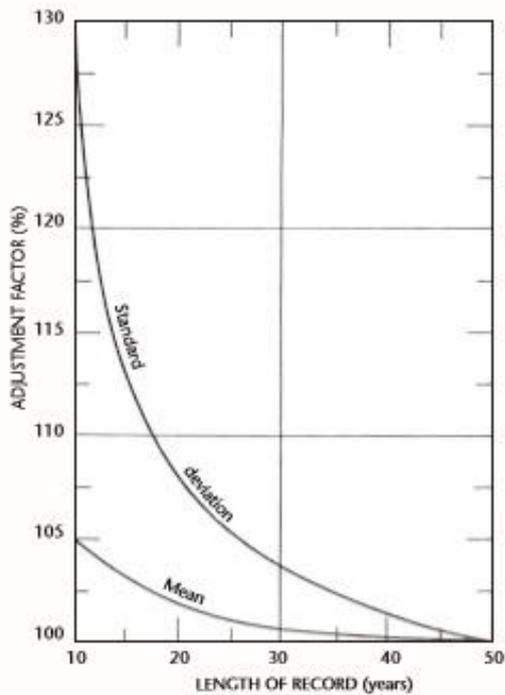


Abbildung 9: Anpassung des Mittelwertes und der Standardabweichung aufgrund der Länge der Zeitreihe (WMO, 2009, S. 67)

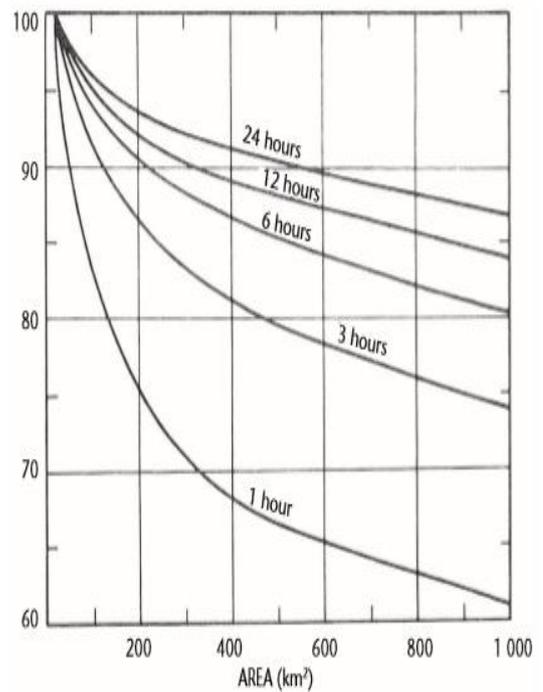


Abbildung 10: Flächenreduktionskurven laut WMO für den Westen der vereinigten Staaten (WMO, 2009, S. 69)

2.2.2 Zeitliche Disaggregation des PMP

Wie in Punkt 1.1 bereits erwähnt, ist für die Entstehung von Hochwässern auch die Dauer des Niederschlags von essentieller Bedeutung. Bei länger andauernden Regenereignissen werden, bei entsprechender Stärke des Niederschlags, die natürlichen Retentionsmöglichkeiten (Pflanzen, Boden, etc.) aufgefüllt und ein steigender Prozentsatz des auftreffenden Wassers fließt oberflächlich ab. Je kleiner das überregnete Einzugsgebiet ist, desto schneller wird der auftreffende Niederschlag im Ablauf des Vorfluters erkennbar. Bei Einzugsgebietsgrößen von 1 – 10 km² können bis zum Erreichen der Hochwasserspitze nur wenige Minuten vergehen. In größeren Einzugsgebieten bedarf es langanhaltende Niederschläge, bis das gesamte Einzugsgebiet am beobachteten Gebietsauslass zum Abfluss beiträgt. Liegt die Größe des Einzugsgebiets über 1.000 km² wird der Abfluss fast ausschließlich durch die flussmorphologischen Eigenschaften des Gewässernetzes bestimmt. Setzt man einen konstant anhaltenden Niederschlag voraus, kann es bei entsprechend langen Fließstrecken mehrere Stunden bis Tage dauern bis das gesamte Einzugsgebiet am Abfluss beiträgt. Die Niederschlagsintensität nimmt jedoch mit der zeitlichen Dauer des Niederschlagsereignisses ab (siehe Abbildung 11) (PATT und JÜPNER, 2013).

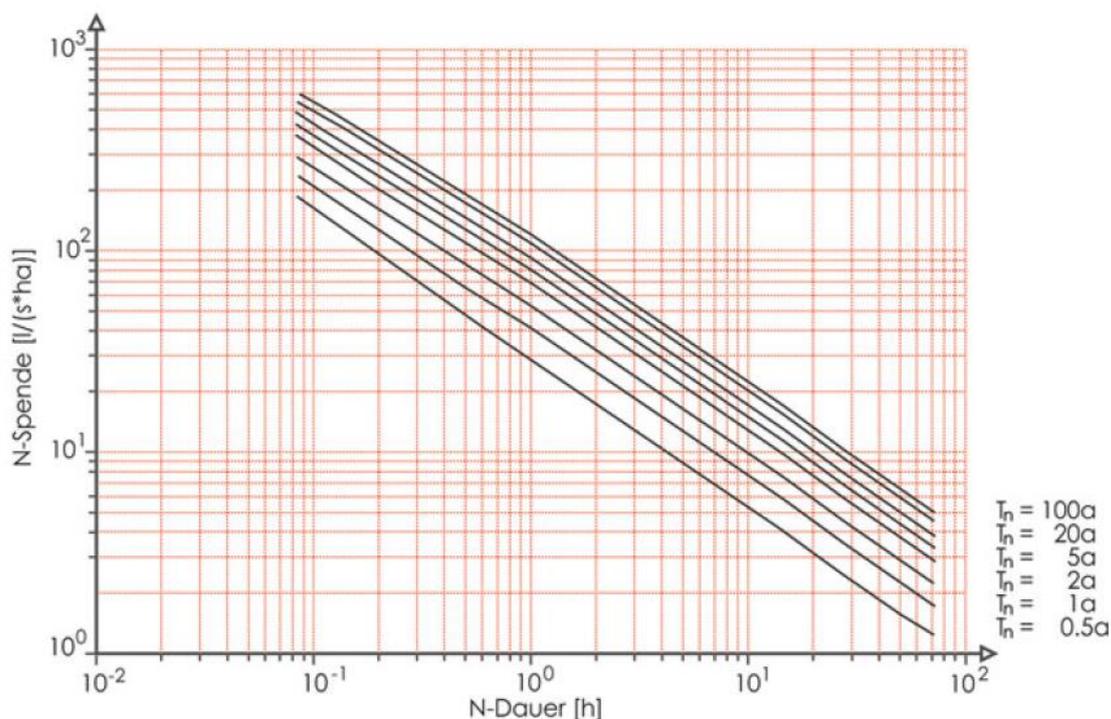


Abbildung 11: Dauer-Intensitäts-Häufigkeitsdiagramm für eine Niederschlagsmessstelle - Prinzipskizze (PATT und JÜPNER, S. 25, 2013)

In der vorliegenden Masterarbeit wird aus den aufgezeichneten 24-Stunden-Niederschlagswerten (in mm) von den einzelnen Messstationen das 24 h PMP berechnet.

Um die zeitliche Verteilung des 24 h PMP-Ereignisses darstellen zu können, wurde eine Summenlinie (siehe Abbildung 12 und 13) aus hochaufgelösten Niederschlagsdaten erstellt (Zeitintervall: 15 Minuten). Die hochaufgelösten Niederschlagsdaten wurden vom hydrographischen Dienst Steiermark zur Verfügung gestellt. Die zeitliche Niederschlagsverteilung wurde wie folgt ermittelt.

- Auswahl der hochaufgelösten Niederschlagsstationen (insgesamt 18 Stationen welche verwendet werden konnten)
- Auswahl der 3 stärksten Tagesniederschläge je Station
- Gegenüberstellung der Stundendaten für jede einzelne Station und jedes gewählte Ereignis
- Berechnung der Stundenmittelwerte
- Berechnung der Prozentwerte Niederschlag pro Stunde

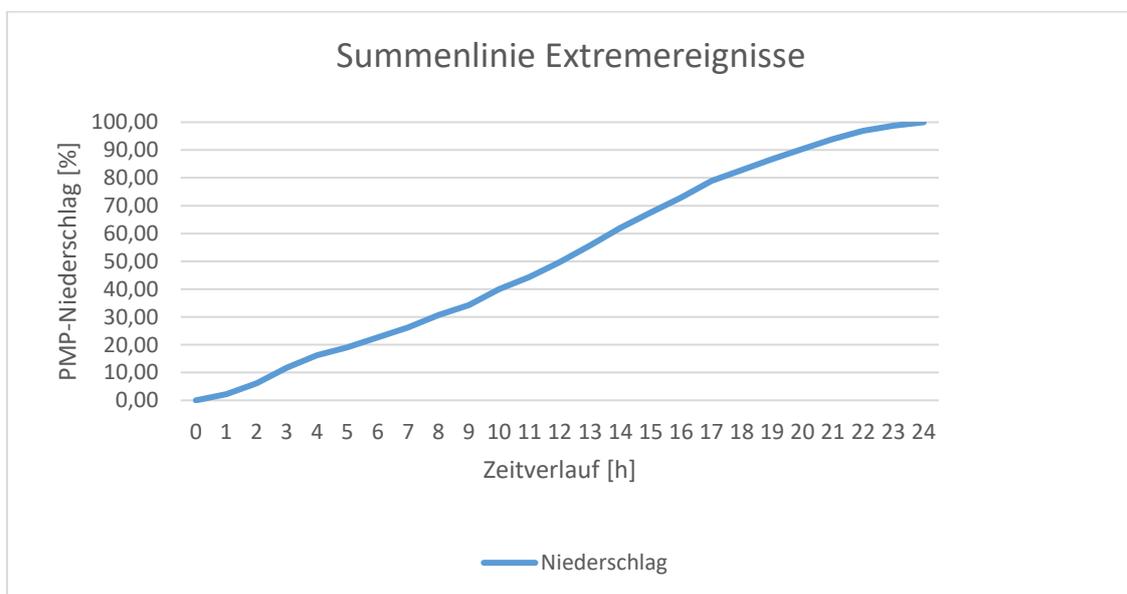


Abbildung 12: Summenlinie Extremereignisse aus hochaufgelösten Niederschlagsdaten

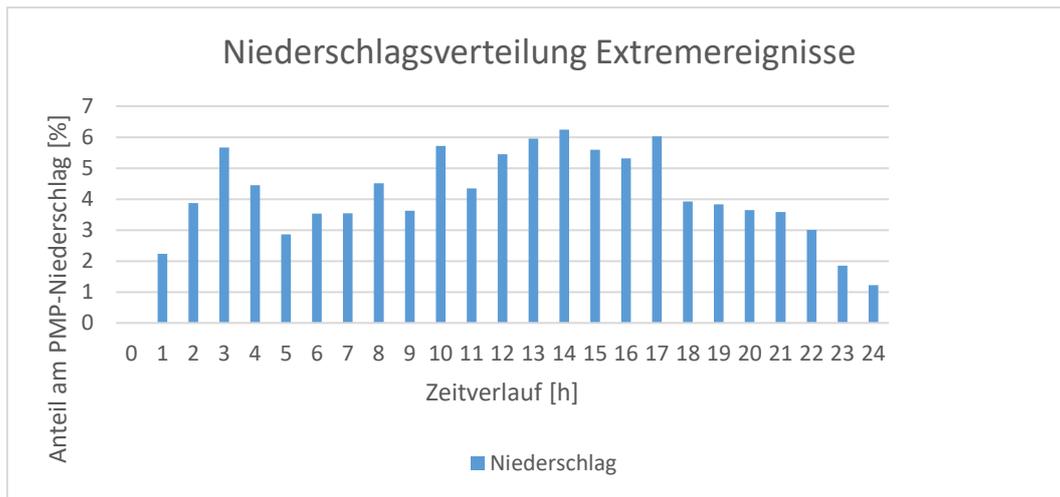


Abbildung 13: Tagesganglinie der Extremereignisse

2.2.3 Räumliche Disaggregation des PMP

Für die Umwandlung der Punktwerte in einen flächigen Niederschlag wird die Interpolationsmethode nach Thiessen verwendet. Die Thiessenpolygone wurden mittels des Programms ArcGIS erstellt. Nach erfolgter Erstellung der Thiessenpolygone wurden die Werte in ein Rasterformat umgewandelt. Die Pixelweite betrug 1 km x 1 km. Danach wurden die flächigen PMP-Punktwerte mit den einzelnen Zonen (HRU's) des COSERO-Modells verknüpft.

2.2.4 PMP zu PMF

Die Umwandlung des maximalen Niederschlags in die maximale Hochwasserwelle erfolgt mittels Niederschlag-Abfluss-Modell. Hierfür wird das vom Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau, an der Universität für Bodenkultur entwickelte COSERO-Modell verwendet.

2.2.4.1 COSERO

Für die Abflusssimulation wird das am IWHW entwickelte Niederschlags-Abfluss-Modell (N/A-Modell) COSERO (COntinuous SEmidistributed RunOff Model) angewendet. Es ist ein kontinuierliches, halbverteiltes, deterministisches Modell (HERRNEGGER et. al., 2015).

Dieses Modell wurde bereits für Prognosemodelle an Flüssen in Österreich (Salzach, Traisen, Ybbs, Enns,...) eingesetzt. Für die Erstellung des Modells wird das betrachtete Einzugsgebiet in einzelne Teileinzugsgebiete aufgeteilt (siehe Abbildung 14). Diese Teileinzugsgebiete werden dann in hydrologisch ähnliche Zonen unterteilt (HRU's, WOOD

et.al., 1988). Als Inputdaten werden räumlich verteilte Temperatur- und Niederschlagsdaten benötigt (SCHULZ et. al., 2016)

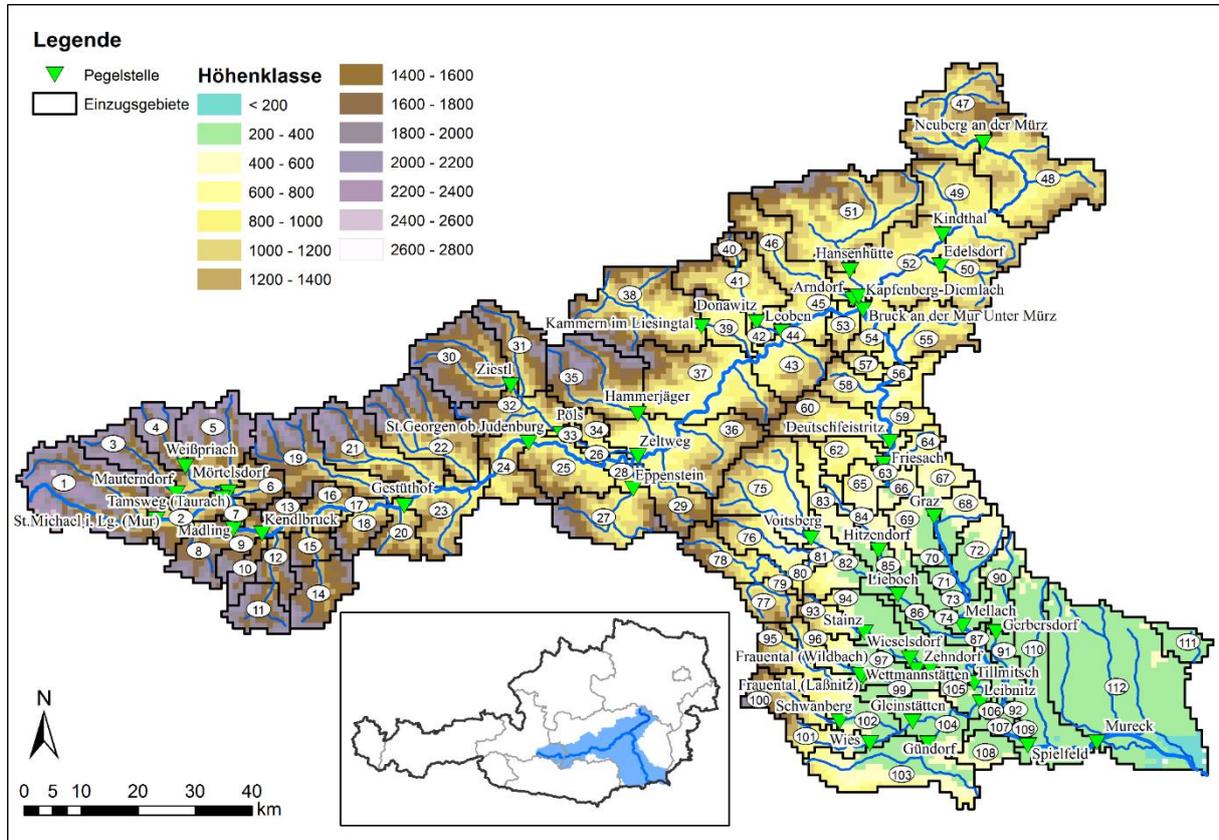


Abbildung 14: Einzugsgebietgliederung im COSERO-Modell, Lage der Pegel und Höhenstufen des Einzugsgebiets Mur/Mürz sowie dessen Lage in Österreich (SCHULZ et. al., 2016)

Modellkonzept

COSERO ist ein am IWHW entwickeltes kontinuierliches, halbverteiltes, deterministisches Niederschlags-Abflussmodell. Laut SCHULZ et. al (2016) sind die wesentlichen Bestandteile ein Bodenspeichermodul, welchem ein Schneemodul vorgeschaltet wird. Die Prozesse welche den Abfluss bilden, werden im Einzugsgebiet als Abflüsse aus einzelnen, hintereinander geschalteten Speichern beschrieben. Nachstehend sind die berücksichtigten Prozesse aufgelistet:

- Schneeschmelze und -akkumulation
- Interzeption
- Evapotranspiration
- Speicherung im Boden

- Abfluss, unterteilt in
 - rascher Abfluss
 - Interflow
 - Basisabfluss
- Routing des Oberflächenabflusses bzw. des Gerinneabflusses

Das Einzugsgebiet wird in Untereinzugsgebiet (Subbasins) aufgeteilt. Für die Untereinzugsgebiete wird ein simulierter Knotenabfluss ausgegeben. Die sogenannten Subbasins werden in hydrologisch ähnliche Zonen (HRU's) untergliedert. Die Untergliederung erfolgt auf Grundlage von räumlich verteilten Informationen (Höhe, Landnutzung, Boden, Hydrogeologie), welche für das Einzugsgebiet vorliegen. Die HRU's entsprechen im COSERO-Modell für das Einzugsgebiet der Mur einer 1,00 x 1,00 km großen Berechnungseinheit (SCHULZ et. al., 2016).

Wie in Abbildung 15 ersichtlich, wird jede dieser hydrologisch ähnlichen Zonen im Modell durch das Schneemodul, dem Bodenspeicher inklusive Interzeption, dem raschen Abfluss oder Oberflächenabfluss (Speicher BW1), Interflow (Speicher BW2), und das gemeinsame Routingmodul dieser beiden Abflusskomponenten (Speicher BW4) dargestellt. Der Basisabfluss (Speicher BW3) ist für ein gesamtes Teileinzugsgebiet definiert. Die Summe der Zonenabflüsse gemeinsam mit dem Basisabfluss ergibt die den Gebietsabfluss des Teileinzugsgebietes (QABGEB). Der Knoten- bzw. Pegelabfluss (QSIM) ergibt sich aus der Summe des gerouteten Zuflusses der obenliegenden Teileinzugsgebiete und dem Gebietsabfluss (QABGEB). Anschließend an den berechneten Pegelabfluss (QSIM) beginnt das Routing im Gerinne in einem weiteren, auf das Teileinzugsgebiet bezogenen, linearen Speicher (Speicher 5).

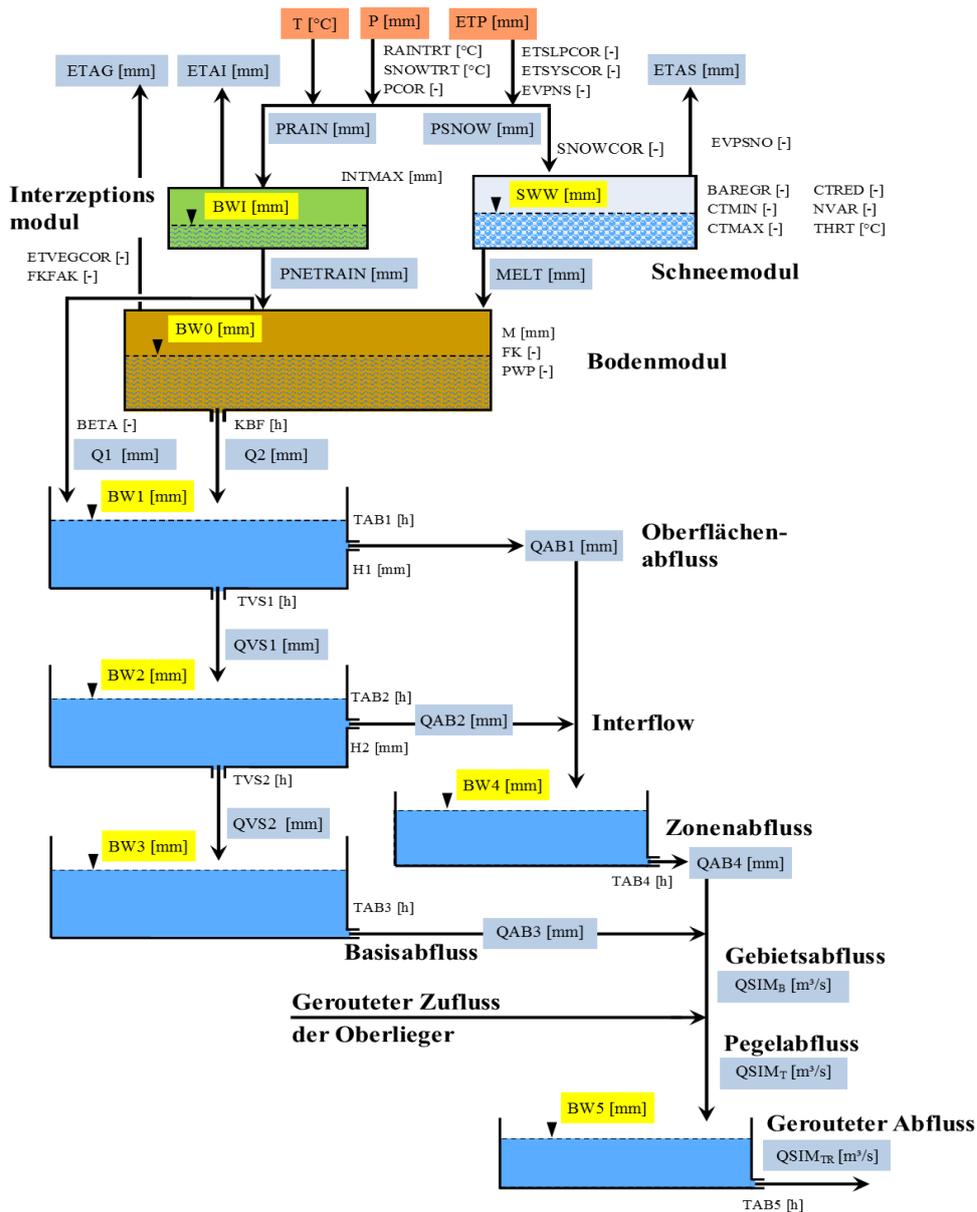


Abbildung 15: Modellstruktur COSERO (SCHULZ et. al., 2016)

Input

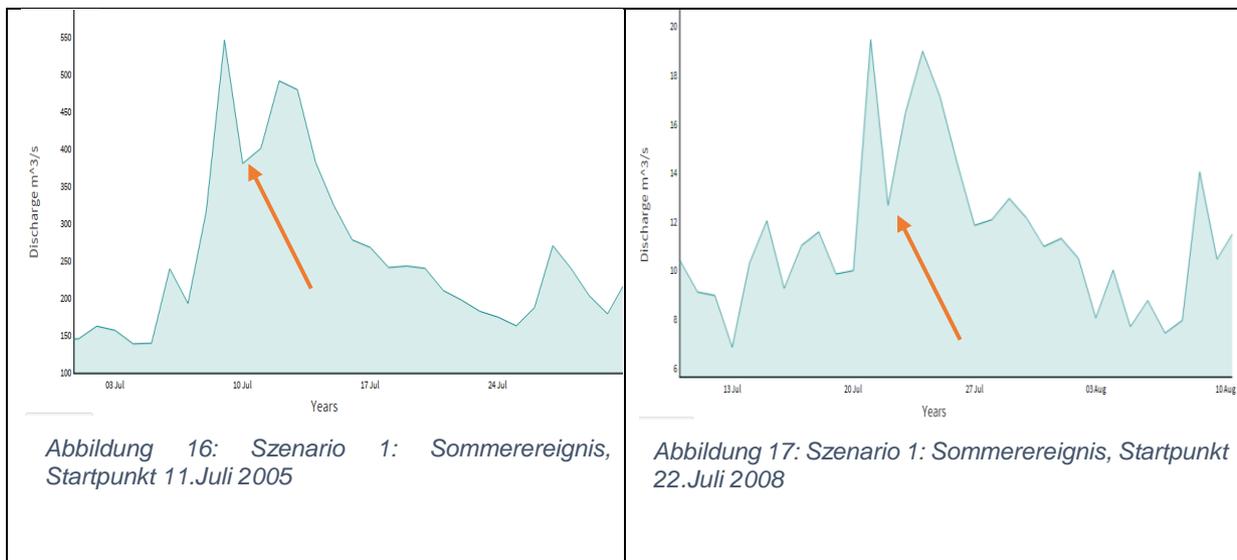
Als Input des hydrologischen Modells werden die meteorologischen Größen Niederschlag P [mm] und Temperatur T [°C] herangezogen. Das Einzugsgebiet der Mur ist im COSERO-Modell in HRU's eingeteilt. Die HRU's entsprechen einer 1,00 x 1,00 km großen Berechnungseinheit. Die Input-Daten müssen daher in Form von Rastern vorliegen und entsprechen der räumlichen Verteilung des Inputs im Einzugsgebiet für jeden Zeitschritt. Sie sind daher die Inputgröße für jede einzelne Zone im Gebiet. Die Inputdaten liefern

nach erfolgter Berechnung die unterschiedlichen Speicherstände und die Abflüsse der Speicher für jede einzelne Zone (HRU) (SCHULZ et. al., 2016).

2.2.4.2 Simulationsszenarien

Zur Generierung des PMF (maximal mögliches Hochwasser) werden 2 Szenarien im Niederschlag-Abfluss-Modell simuliert.

Das erste Szenario soll ein typisches Sommerereignis mit zwei starken aufeinanderfolgenden Niederschlagsereignissen (double peak) darstellen. Durch das erste Niederschlagsereignis werden die natürlichen Rückhaltemöglichkeiten im Modell (Bodenspeicher, Interzeptionsspeicher) aufgefüllt. Beim zweiten Niederschlagsereignis geht der Großteil des auftretenden Niederschlags sofort in den Oberflächenabfluss über. In Abbildung 16 bzw. 17 ist beispielhaft die Abflussganglinie für das Szenario 1 dargestellt:



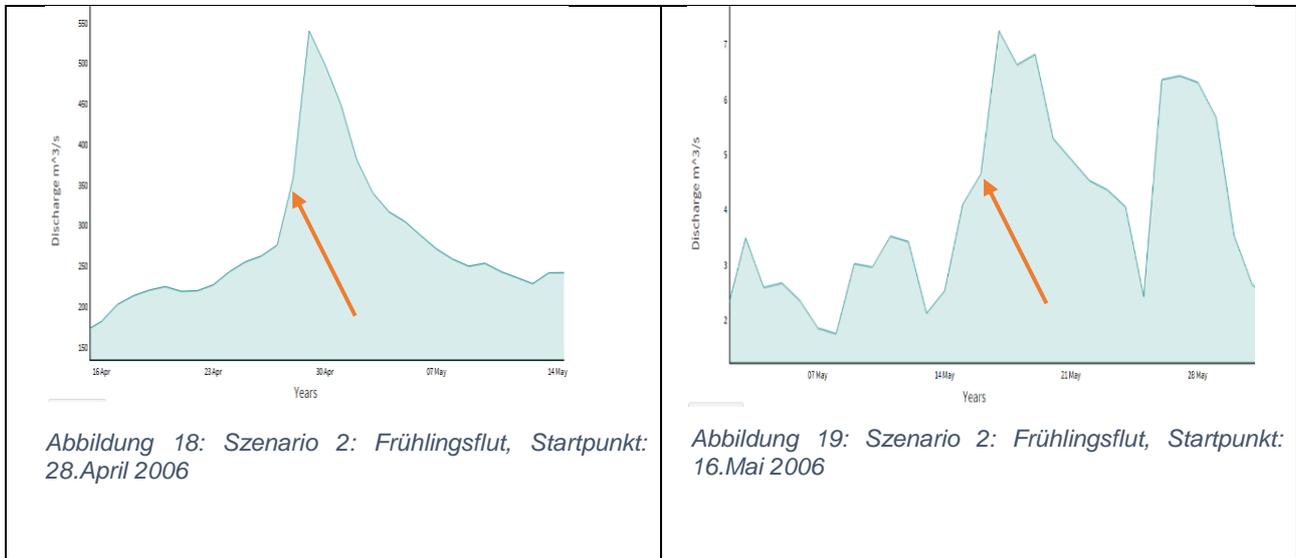
Einen Tag nach der ersten Abflussspitze wurde das PMP-Ereignis gestartet (siehe roten Pfeil in der Abbildung).

Für die Berechnung des maximal möglichen Abflusses für das Szenario 1 wurden zwei Startpunkte für das PMP-Ereignis aus den vorhandenen Abflussaufzeichnungen bei den beobachteten Pegeln ausgewählt.

- Startpunkt 1: 11. Juli 2005 (siehe Abbildung 15)
- Startpunkt 2: 22. Juli 2008 (siehe Abbildung 16)

Das zweite Szenario wird als Frühlingshochwasser (spring flood) bezeichnet. Neben dem Abfluss, welcher durch den Niederschlag induziert wird, kommen zusätzliche Wassermengen von der, durch die hohen Temperaturen ausgelösten, Schneeschmelze

hinzu. Die Temperaturen, welche für die hohe Schneeschmelzrate im jeweiligen Simulationszeitraum verantwortlich waren, wurden in der Simulation nicht verändert und aus den vorhandenen Temperatureaufzeichnungen übernommen. In der Abbildung 18 bzw. 19 ist ein solches Event dargestellt.



Das PMP-Ereignis wird einen Tag vor der zu erwartenden Abflussspitze in das NA-Modell implementiert.

Für die Berechnung des maximal möglichen Abflusses für das Szenario 2 wurden zwei Startpunkte für das PMP-Ereignis aus den vorhandenen Abflussaufzeichnungen bei den beobachteten Pegeln ausgewählt.

- Startpunkt 1: 28: April 2006 (siehe Abbildung 17)
- Startpunkt 2: 16. Mai 2006 (siehe Abbildung 18)

Um die gewünschten Systemzustände im Niederschlags-Abfluss-Modell COSERO zu erhalten, wird zuerst ein Vorlauf gestartet, welcher genau am Tag der PMP-Implementierung endet. Bei Abschluss des Vorlaufs werden die Systemzustände im COSERO-Modell zwischengespeichert (Datafile: *statvar.dmp*). Anschließend an den Vorlauf wird das COSERO-Modell erneut (mit den gewünschten bzw. zuvor gespeicherten Systemzuständen) gestartet und anstatt der original Niederschlagsdaten wird das zuvor berechnete PMP-Ereignis eingefügt.

Simulationszeit Vorlauf	11 Monate
<u>Simulationszeit PMP-Ereignis</u>	<u>1 Monat</u>
<u>Gesamtsimulationszeit:</u>	<u>12 Monate</u>

In der nachfolgenden Abbildung 20 sind die Systemmodule gekennzeichnet, welche durch unseren Modellierungsvorlauf auf ein möglichst hohes Niveau gebracht werden sollen (Rot: Szenario 1 bzw. 2, Blau: nur Szenario 2), um einen möglichst hohen Abfluss zu generieren.

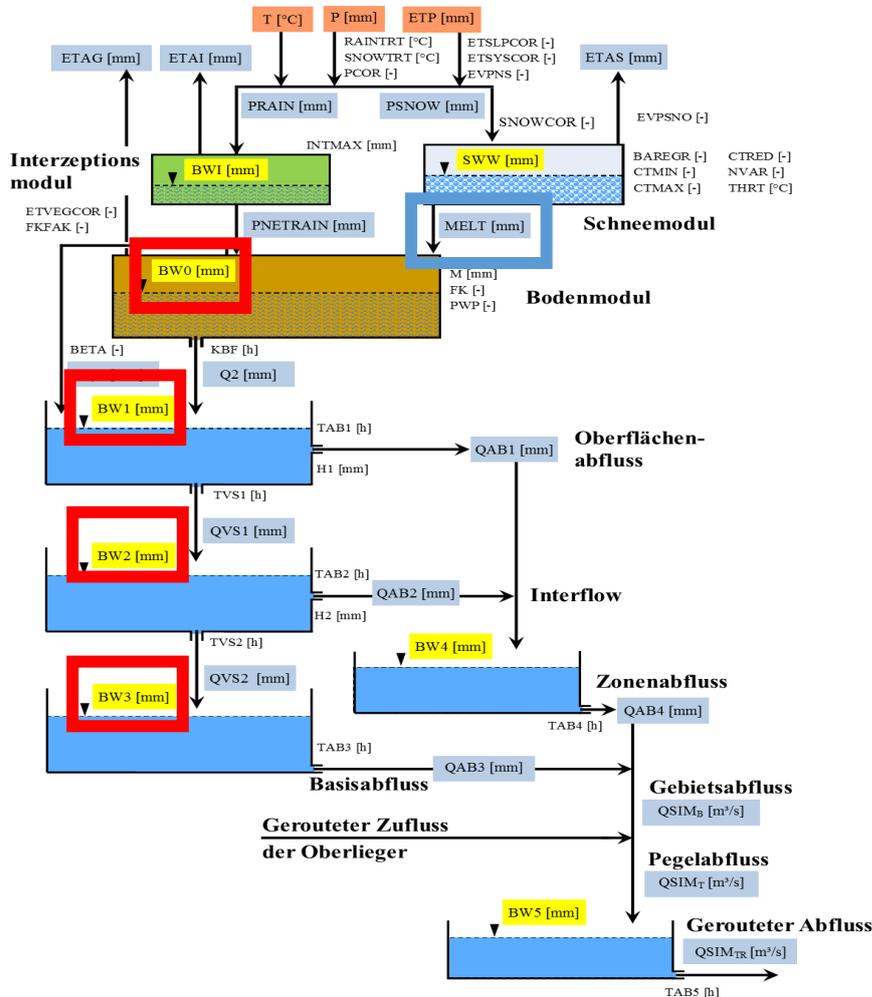


Abbildung 20: Modellstruktur COSERO mit den zu maximierenden Modellzuständen (SCHULZ et. al., 2016)

2.2.4.3 Räumlich-Zeitliche Disaggregation der Niederschläge im Einzugsgebiet

Für die zeitliche Verteilung der Niederschläge im Einzugsgebiet wurden 3 Szenarien simuliert:

Stratifomer Niederschlag

Der Niederschlag beginnt im gesamten Einzugsgebiet gleichzeitig und endet auch gleichzeitig. Es wird eine sogenannte Wetterstauage (stratifomer Niederschlag) simuliert, bei der sich die Sturmzelle über dem gesamten Einzugsgebiet befindet und dort über einen längeren Zeitraum verbleibt.

Westwetterlage

Westlage: Tiefdruckgebiete ziehen von Norden der britischen Inseln südostwärts bis nach Osteuropa. Charakteristisch für Westwetterlagen sind langanhaltende Niederschlagsperioden (KLOSE und KLOSE, 2015).

In diesem Simulationsszenario wird eine langsam ziehende Gewitterfront angenommen. Die Front zieht von West nach Ost (Westlage) über das Einzugsgebiet mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 10,00 km/h hinweg. Die Geschwindigkeit wurde so gewählt, dass eine Überlappung der Flutwellen aus den einzelnen Einzugsgebieten flussab erreicht wird. Das Einzugsgebiet ist in vier Teileinzugsgebiete aufgeteilt (Abbildung 21).

- Einzugsgebiet 1, Beginn Niederschlag: t: 00:00
- Einzugsgebiet 2: Beginn Niederschlag: t: 06:00
- Einzugsgebiet 3: Beginn Niederschlag: t: 12:00
- Einzugsgebiet 4: Beginn Niederschlag: t: 18:00

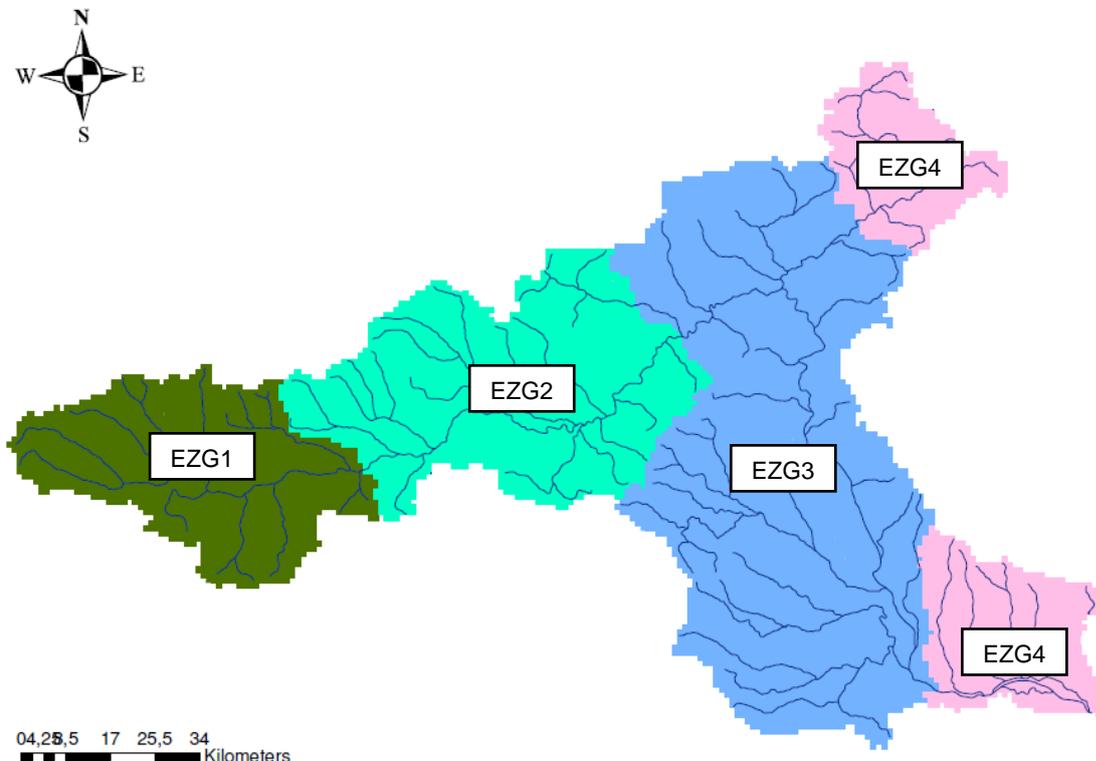


Abbildung 21: Einzugsgebietsaufteilung Szenario: Gewitterfront

Hintereinanderschaltung der Einzugsgebiete – WORST CASE

Im dritten Szenario, auch WORST-CASE-Szenario, wird das gesamte Einzugsgebiet ebenfalls in 4 Teileinzugsgebiete aufgeteilt. Die Einzugsgebiete werden so hintereinandergeschaltet, dass sich die Flutwelle je Einzugsgebiet mit der nachfolgenden Flutwelle überlappt. So entsteht am Unterlauf der Mur das maximal mögliche Ereignis (PMF). Als mittlere Fließgeschwindigkeit wurden im Oberlauf 2,50 m/s und im Unterlauf 1,50 m/s angenommen. Die zeitliche Verteilung der Niederschläge je Einzugsgebiet (Abbildung 22) ist wie folgt:

- Einzugsgebiet 1, Beginn Niederschlag: t: 00:00
- Einzugsgebiet 2: Beginn Niederschlag: t: 07:00
- Einzugsgebiet 3: Beginn Niederschlag: t: 14:00
- Einzugsgebiet 4: Beginn Niederschlag: t: 21:00

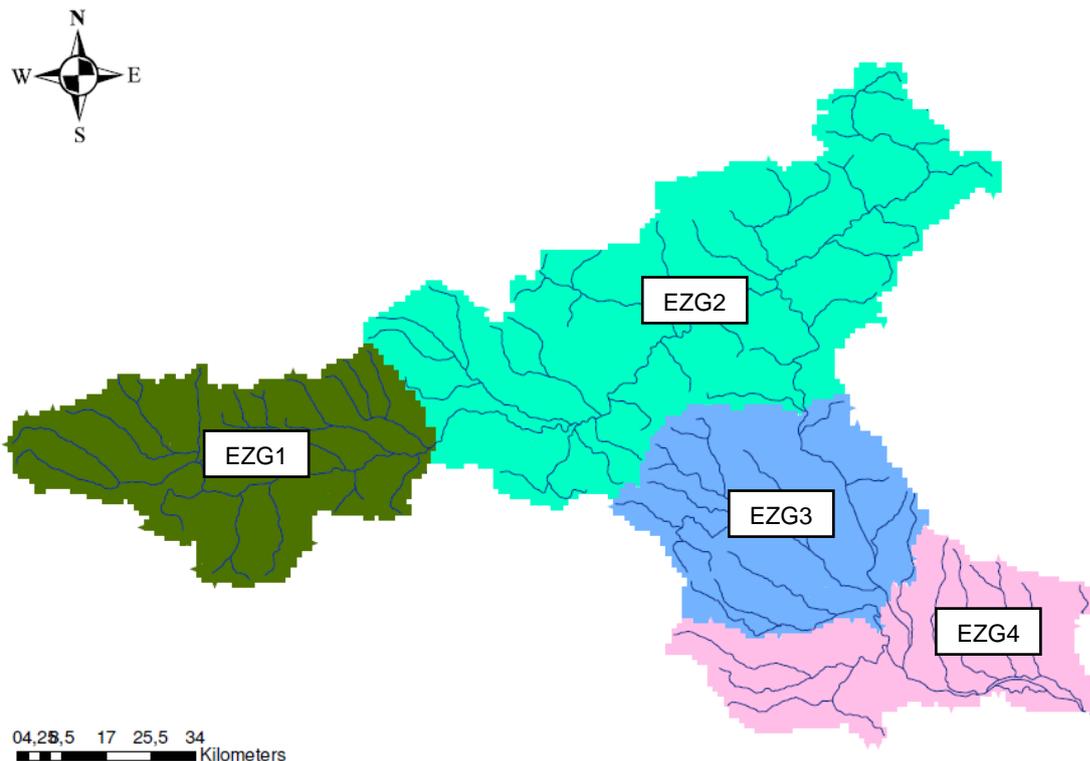


Abbildung 22: Einzugsgebietseinteilung Szenario: WORST CASE

2.3 Hochwasserberechnung mit dem Upper Boundary-Verfahren nach BOTERO und FRANCES (2010)

Der Ablauf zur Berechnung der Hochwasserkennwerte läuft in den ersten Schritten gleich wie die unter Punkt 2.1. beschriebene Berechnung bei der Standard-Herangehensweise. Die Unterschiede zur Standardberechnung nach BMLFUW (2011) bestehen in der Parameterschätzung und der Anwendung unterschiedlicher Verteilungsfunktionen.

Im Forschungsbericht von BOTERO und FRANCES (2010) werden drei verschiedene Methoden für die Parameterschätzung angeführt:

- ML-C Methode
 - Der ganze Parametersatz wird mittels Maximum-Likelihood-Methode geschätzt.

- ML-GE Methode
 - Die rechtsseitige Begrenzung g (upper limit) wird mit der sogenannten „Generic Equation“ berechnet. Die restlichen Parameter werden wieder mittels Maximum-Likelihood-Methode berechnet.

- ML-PG Methode
 - Die Obergrenze g wird zuvor mittels geeignetem Verfahren (PMP bzw. PMF Abschätzung) berechnet. Die restlichen Parameter werden wieder mit der Maximum-Likelihood-Methode bestimmt.

In dieser Arbeit wird die ML-PG Methode zur Parameterabschätzung für die Upper Boundary Verfahren verwendet.

Folgende Verteilungsfunktionen werden für die Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES (2010) verwendet:

- 4-parametriges Extremwert-Verteilung (EV4)
 - Verteilungsfunktion: $F(x) = \exp\left(-\left(\frac{g-x}{v(x-a)}\right)^k\right)$ (2.13)
 - g rechtsseitige Begrenzung
 - a linksseitige Begrenzung
 - v Maßstabsparameter
 - k Formparameter

- Slade-Type 4-parametrische Log-Normal-Verteilung (LN4)

- $F(x) = \Phi\left(\frac{1}{\sigma} \ln\left(\frac{x}{g-x}\right) - \frac{\mu}{\sigma}\right)$ (2.14)

- $y = \ln\left(\frac{x-a}{g-x}\right)$ Slade-type-Variablen Transformation (2.15)

- g rechtsseitige Begrenzung
 - a linksseitige Begrenzung
 - μ Lageparameter
 - σ Maßstabsparameter

- Transformierte Extremwert Verteilung (TDF)

- $F(x) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-x}{a} + \frac{\alpha k}{(g-x)} - b\right)\right)$ (2.16)

- g rechtsseitige Begrenzung
 - μ Lageparameter
 - σ Maßstabsparameter

2.3.1 Modifizierte Zeitreihe (HQ200 Implementierung)

Die modifizierten Zeitserien, welche beim Standard-Ansatz (siehe Punkt 2.1.1) verwendet wurden, werden ohne Veränderung auch bei dem Upper Boundary-Ansatz verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse Standard-Hochwasserberechnung

Wie im Kapitel 2.1 beschrieben, wurden für die ausgewählten Pegel die HQ100-Kennwerte berechnet. Als Parameterschätzmethode wurde bei der Hochwasserberechnung nach BMLFUW (2011) die Methode der L-Momente verwendet.

3.1.1 HQ100- Werte Standard-Hochwasserberechnung nach BMLFUW (Original Zeitreihe)

In den Tabellen 6 bis 8 sind die Ergebnisse für die HQ100-Berechnung mit den Verteilungsfunktionen der Standard-Hochwasserberechnung aufgelistet.

Tabelle 6: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m³/s, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	21	25	25	24	26
203752	66	78	77	78	79
203794	75	89	87	89	89
211086	332	390	414	395	438
211102	422	498	514	500	538
211136	433	514	506	506	517
211185	574	681	697	673	725
211227	137	155	159	168	167
211243	168	193	182	203	184
211292	814	962	925	961	938
211490	1187	1398	1289	1409	1289
211573	810	956	973	960	1011

Tabelle 7: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m³/s, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	22	26	27	24	29
203752	69	81	82	81	85
203794	76	90	85	89	85
211086	318	375	386	378	403
211102	408	480	482	484	498
211136	428	508	489	500	496
211185	555	658	672	650	698
211227	134	150	161	165	172
211243	160	185	184	193	189
211292	778	919	916	919	943
211490	1216	1421	1329	1457	1337
211573	763	901	952	902	1005

Tabelle 8: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m^3/s , Beobachtungszeitraum: 50 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	26	31	34	31	36
203752	78	90	92	93	96
211086	339	396	409	406	427
211102	431	504	504	517	520
211185	642	753	779	766	816
211227	131	147	155	161	163

3.1.2 Vergleich original vs. modifizierte Zeitreihe

Die Ergebnisse der HQ-Berechnung mit der modifizierten Zeitserie und die Steigerung der berechneten Werte gegenüber den HQ-Kennwerten aus der Berechnung mit der unveränderten Zeitserie werden nachfolgend in den Tabellen 9 bis 14 dargestellt.

Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

Tabelle 9: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m³/s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	23	27	29	26	31
203752	74	86	92	88	97
203794	84	99	102	101	107
211086	366	426	494	441	541
211102	488	568	633	586	683
211136	482	569	594	569	623
211185	657	772	844	782	904
211227	165	180	200	205	217
211243	196	221	225	240	235
211292	913	1070	1088	1091	1131
211490	1336	1559	1540	1602	1583
211573	934	1088	1180	1123	1261

Tabelle 10: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	10.72	11.05	17.22	12.47	20.23
203752	11.67	10.97	19.27	12.72	23.10
203794	12.05	11.18	17.98	13.21	21.12
211086	10.38	9.13	19.43	11.73	23.42
211102	15.61	14.21	23.12	17.28	27.04
211136	11.21	10.68	17.30	12.40	20.40
211185	14.41	13.42	21.15	16.13	24.69
211227	20.29	16.48	25.85	21.88	29.97
211243	16.93	14.52	23.46	18.39	27.48
211292	12.23	11.33	17.65	13.48	20.55
211490	12.50	11.51	19.48	13.68	22.84
211573	15.33	13.87	21.27	17.06	24.68
MITTELWERT	13.61	12.36	20.26	15.04	23.79

Beobachtungszeitraum: 40 Jahre:Tabelle 11: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m³/s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	24	28	32	27	34
203752	75	88	95	90	101
203794	82	97	96	98	99
211086	336	393	427	401	456
211102	451	527	555	541	586
211136	464	549	552	546	571
211185	614	724	777	728	825
211227	158	171	198	197	218
211243	179	205	214	219	225
211292	856	1005	1046	1022	1098
211490	1346	1558	1538	1628	1581
211573	864	1009	1130	1035	1222

Tabelle 12: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	10.31	10.59	17.00	12.00	19.68
203752	9.80	9.15	15.97	10.71	19.08
203794	8.47	8.00	13.57	9.28	15.97
211086	5.55	4.96	10.51	6.29	12.97
211102	10.62	9.70	15.14	11.72	17.67
211136	8.25	7.89	12.82	9.13	15.04
211185	10.69	10.03	15.63	11.99	18.23
211227	17.95	14.35	23.09	19.30	26.48
211243	12.42	10.76	16.38	13.54	18.97
211292	10.12	9.35	14.20	11.22	16.47
211490	10.71	9.61	15.67	11.68	18.28
211573	13.22	12.00	18.73	14.80	21.59
MITTELWERT	10.68	9.70	15.73	11.80	18.37

Beobachtungszeitraum: 50 Jahre:

Tabelle 13: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m³/s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	29	35	40	35	43
203752	85	98	104	103	111
211086	357	415	449	430	479
211102	470	544	566	567	595
211185	707	821	889	851	950
211227	148	163	181	183	195

Tabelle 14: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre

	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV
203745	11.35	10.48	16.73	12.85	19.13
203752	9.19	8.25	13.57	9.95	15.96
211086	5.39	4.70	9.85	6.05	12.12
211102	8.95	8.00	12.36	9.81	14.37
211185	10.09	9.05	14.09	11.16	16.35
211227	12.87	10.48	16.78	13.88	19.47
MITTELWERT	9.64	8.49	13.90	10.62	16.23

3.2 Ergebnisse PMP-Berechnung

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte bzw. Teilergebnisse für die PMP-Berechnung aufgelistet. Die einzelnen Schritte zur PMP-Berechnung sind in Kapitel 2.2 beschrieben.

3.2.1 Extraktion der Jahresserie (Annual Maxima Series – AMS)

Als Kriterium für die Auswahl der Niederschlagszeitreihen wird eine Beobachtungszeit von mindestens 20 Jahren empfohlen (WMO, 2009). Für die Berechnung des PMP-Wertes müssen zuerst die jährlichen Niederschlagsmaxima je Messstation (Annual Maxima Series) ausgelesen werden. Für die Berechnung der PMP-Werte wurden folgende Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet verwendet:

Tabelle 15: Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet mit den beobachteten Maximalwerten und der Beobachtungslänge

Station	Stationsname	Pmax obs. [mm]	Laenge_TS [Jahre]
111435	Alpl	114.6	24
112490	Bärnbach	99.7	43
112466	Bonisdorf	77.2	43
114363	Brandl-Koralpe	95	43
112003	Breitenau bei Mixnitz	84.1	43
115691	Breitenstein	81.5	22
106237	Brunngraben	112	43
111971	Bürgeralm bei Aflenz	90	29
106500	Donnersbachwald	76.2	38
112268	Eibiswald	103.7	43
101675	Eisenerzer Ramsau	125.4	27
111401	Fladnitzberg	99.9	26
113951	Flattnitz	104.3	43
112037	Frohnleiten	90.2	43
112896	Gaberl	98.8	23
112862	Gedersberg	72	23
112524	Gleinstätten	92.4	30
114587	Grades-Klachl	88.9	30
112078	Gratkorn	124	43
112086	Graz-Andritz	102.4	43
112771	Großlobming	72.6	26
112698	Gschnaidt	83.4	28
112854	Haringgraben	110	23
112334	Hebalpe	101.5	43
111369	Hohenau an der Raab	134.5	33
106120	Hohentauern	107	43
103689	Hüttschlag	75.4	43
111781	Ingering II	104	43

113332	Innerkrems	85	43
112789	Jägerwirt	115.5	26
115923	Kernhof	115.7	22
112383	Kirchbach in Steiermark	77.2	43
112300	Kitzeck im Sausal	94.4	43
112763	Klosterwinkl	143	27
111807	Kraubath an der Mur	70	35
112748	Kreuzberg	99.1	27
112672	Leoben-Hinterberg	86.8	30
112292	Leutschach	121.9	43
112185	Ligist	133.1	43
112680	Limberg	98	30
112177	Maria Lankowitz	106.4	43
111831	Mautern	96.5	43
107136	Mitterbach	171.8	43
111500	Muhr	103.7	43
111906	Mürzsteg	118.5	43
109827	Naßwald	130.4	43
110155	Naßwald (Wasseralm)	148.3	39
107003	Neuhaus am Zellerain	167.5	43
112573	Neuhof	93.9	35
111773	Obdach	79.3	43
112755	Osterwitz	98.7	29
112508	Paal-Stadl	68.6	40
112847	Pernegg	79.2	23
106567	Planneralm	107.9	26
111914	Preiner Gscheid	102.1	43
111732	Pusterwald-Hinterwinkl	65.3	37
114298	Reichenfels	94.2	43
111021	Rettenegg	104.5	43
112219	Sajach	103.8	43
111765	Schmelz	96.2	43
112045	Semriach	93.5	43
112706	Soboth	115.1	30
112649	Södingberg	110.9	34
112227	St. Anna ob Schwanberg	130	43
111724	St. Johann am Tauern	73	43
111682	St. Lambrecht	115.8	43
112714	St. Lorenzen	123.4	30
112318	St. Nikolai im Sausal	88.3	43
106005	St.Nikolai im Sölkthal	95	43
112391	St.Peter am Otterbach	92.4	43
113324	St.Peter im Katschtal	124	43
112367	Stainz	124.5	43
112540	Stanz	83.1	36

112425	Straden	76	43
112516	Straß	108	39
111591	Thomatal	69.7	43
111997	Tragöß	95.8	43
110213	Trattenbach	114.9	33
116186	Trattenbach	109.2	22
112730	Trauhütten	109.2	29
111872	Trofaiach	63.9	43
111542	Tweng	111.5	43
112409	Unterpurkla	77.7	43
111708	Unzmarkt	72.5	43
112565	Veitsch	103.2	36
111815	Wald am Schoberpaß	77.7	43
112433	Waltra	105.4	32
106245	Weichselboden	113.8	43
111559	Weißpriach	98.5	43
112557	Wies	106	36
111526	Zederhaus	88.9	43
112664	Zehensdorf	71.5	33
112441	Zelting	70.4	43

Die maximal beobachtete Niederschlagsmenge bei den ausgewählten Stationen reicht von 63,9 mm (Station 111872 – Trofaiach) bis zu 171,8 mm (Station 107136 – Mitterbach). Die durchschnittliche Beobachtungslänge der AMS-Reihen liegt bei ca. 37 Jahren (mind. 22 Jahre, max. 43 Jahre).

3.2.1.1 Vergleich der verwendeten Daten mit dem digHAO-Daten

Die hydrologischen Daten für meine Arbeit wurden von der Homepage des Hydrologischen Dienst Österreich (www.ehyd.gv.at) heruntergeladen. Die auf ehyd.gv.at verfügbaren Niederschlagsdaten weisen eine wesentliche kürzere Beobachtungsdauer auf, als jene Niederschlagsdaten, welche im digitalen Hydrologischen Atlas Österreichs (digHAO) zur Verfügung stehen.

Aufgrund der kürzeren Beobachtungsdauer bzw. der geringeren Datenmenge wurden nicht alle Starkniederschlagsereignisse, die im Einzugsgebiet der Mur aufgezeichnet wurden, in die durchgeführte PMP-Berechnung mit einbezogen. Die verwendeten Niederschlagsdaten entsprechen jedoch den von der WMO geforderten Richtlinien für die PMP-Berechnung und können somit als ausreichend eingestuft werden. Eine Erweiterung der ehyd-Datensätze, um die im digHAO verfügbaren Daten, wäre bei zukünftigen Berechnungen zu empfehlen. Bei einer höheren Beobachtungsdauer, gleichbedeutend mit einer höheren Anzahl an Starkniederschlagsereignissen, welche in die Berechnung

einfließen, kann man davon ausgehen ein präziseres Ergebnis für den PMP-Wert zu erhalten.

3.2.2 Berechnung des Mittelwerts \bar{x}_n und der Standardabweichung σ_n

Die ausgewählten Stationen verfügen alle über einen Beobachtungszeitraum von mehr als 20 Jahren. Für die ausgelesenen Serien wird der Mittelwert und die Standardabweichung für die jährlichen maximal Niederschlagswerte berechnet. Nachfolgend sind die Ergebnisse je Station aufgelistet.

Tabelle 16: Mittelwert und Standardabweichung für die jährlichen Maximalereignisse je Zeitreihe

Station	\bar{x}_n	σ_n	Station	\bar{x}_n	σ_n	Station	\bar{x}_n	σ_n
101675	63.17	25.61	111831	51.47	12.24	112524	53.11	12.90
103689	48.45	11.23	111872	42.92	10.96	112540	50.34	12.37
106005	50.14	16.04	111906	56.89	19.57	112557	60.26	15.32
106120	48.60	13.75	111914	51.43	16.55	112565	46.36	14.56
106237	59.70	18.57	111971	48.36	15.91	112573	56.68	16.65
106245	60.57	17.73	111997	53.94	16.65	112649	52.87	18.52
106500	48.32	13.65	112003	49.71	11.77	112664	50.07	10.49
106567	62.17	16.97	112037	51.47	14.76	112672	44.57	13.01
107003	72.88	26.98	112045	53.92	16.32	112680	61.85	15.23
107136	66.71	25.79	112078	55.54	22.79	112698	53.59	14.36
109827	58.81	21.31	112086	53.14	16.35	112706	69.15	16.63
110155	67.78	27.90	112177	55.75	17.98	112714	62.42	16.36
110213	58.00	20.22	112185	56.55	21.15	112730	66.31	19.53
111021	57.56	17.93	112219	52.07	17.57	112748	60.36	12.54
111369	50.88	19.33	112227	70.03	23.10	112755	61.81	14.43
111401	53.99	15.99	112268	60.38	14.06	112763	67.37	22.08
111435	60.10	18.68	112292	64.47	19.78	112771	50.28	13.47
111500	51.37	17.50	112300	54.67	15.53	112789	71.82	20.64
111526	45.77	14.15	112318	52.68	13.97	112847	51.79	13.35
111542	49.82	16.61	112334	62.34	16.82	112854	63.60	19.61
111559	47.30	15.92	112367	54.19	17.59	112862	49.46	11.27
111591	47.08	11.04	112383	48.67	12.33	112896	65.11	15.56
111682	54.91	16.01	112391	50.14	15.60	113324	53.44	17.94
111708	42.70	9.44	112409	48.08	11.14	113332	53.35	13.23
111724	42.49	11.11	112425	47.26	12.10	113951	60.59	14.80
111732	47.63	10.87	112433	52.50	17.22	114298	50.62	14.14
111765	59.19	16.10	112441	46.81	10.10	114363	54.62	13.57
111773	49.51	11.37	112466	48.42	12.94	114587	49.82	12.81
111781	48.84	15.80	112490	51.82	15.55	115691	49.87	14.45
111807	42.82	11.44	112508	43.82	10.23	115923	64.70	22.31
111815	50.49	15.03	112516	51.42	14.71	116186	62.29	19.72

3.2.3 Berechnung des berichtigten Mittelwerts \bar{x}_{n-1} und der Standardabweichung σ_{n-1}

Nach der Berechnung des Mittelwerts bzw. der Standardabweichung für die gesamte AMS (annual maxima series) wird nun das größte Niederschlagsereignis aus der Serie exkludiert. Ohne den Maximalwert werden wieder für jede Serie der Mittelwert bzw. die Standardabweichung berechnet (WMO, 2009).

Tabelle 17: Berichtiger Mittelwert bzw. Standardabweichung für die jährlichen Maximalereignisse je Zeiterie

Station	\bar{x}_{n-1}	σ_{n-1}	Station	\bar{x}_{n-1}	σ_{n-1}	Station	\bar{x}_{n-1}	σ_{n-1}
101675	60.78	22.83	111831	50.40	10.14	112524	51.76	10.73
103689	47.82	10.56	111872	42.42	10.58	112540	49.40	11.18
106005	49.08	14.61	111906	55.43	17.25	112557	58.95	13.36
106120	47.21	10.41	111914	50.22	14.72	112565	44.74	10.97
106237	58.46	16.88	111971	46.28	13.06	112573	55.59	15.57
106245	59.30	15.85	111997	52.95	15.50	112649	51.12	15.66
106500	47.57	13.02	112003	48.89	10.60	112664	49.40	9.92
106567	60.34	14.47	112037	50.52	13.60	112672	43.11	10.46
107003	70.63	22.85	112045	52.96	15.26	112680	60.60	13.85
107136	64.21	20.14	112078	53.91	20.38	112698	52.48	13.37
109827	57.10	18.37	112086	51.97	14.61	112706	67.56	14.44
110155	65.67	24.89	112177	54.55	16.34	112714	60.32	11.83
110213	56.23	17.73	112185	54.72	17.66	112730	64.59	17.82
111021	56.45	16.56	112219	50.84	15.80	112748	58.87	10.06
111369	48.27	12.37	112227	68.57	21.33	112755	60.50	12.79
111401	52.15	13.23	112268	59.35	12.48	112763	64.46	16.41
111435	57.73	14.96	112292	63.10	17.84	112771	49.39	12.94
111500	50.12	15.66	112300	53.72	14.41	112789	70.07	19.00
111526	44.75	12.60	112318	51.83	12.97	112847	50.55	12.22
111542	48.10	13.12	112334	61.40	15.85	112854	61.49	17.19
111559	46.08	13.94	112367	52.52	13.92	112862	48.44	10.38
111591	46.39	10.46	112383	47.92	11.56	112896	63.58	14.04
111682	53.46	13.04	112391	49.14	14.31	113324	51.76	14.33
111708	41.99	8.32	112409	47.37	10.26	113332	52.60	12.42
111724	41.76	10.16	112425	46.58	11.38	113951	59.55	13.29
111732	47.16	10.60	112433	50.79	14.50	114298	49.58	12.54
111765	58.19	15.08	112441	46.25	9.52	114363	53.65	12.16
111773	48.80	10.50	112466	47.75	12.30	114587	48.47	10.66
111781	47.52	13.41	112490	50.59	13.64	115691	48.37	12.91
111807	42.04	10.60	112508	43.18	9.53	115923	62.27	19.66
111815	49.85	14.59	112516	49.93	11.56	116186	60.06	17.12

3.2.4 Berechnung des Faktors km

Im vierten bzw. fünften Schritt der PMP-Berechnung wird der Frequenzfaktor km berechnet. km ist ein statistischer Faktor, welcher sich je nach Verteilung der Extremwertereignisse bzw. je nach Einzugsgebiet ändert. Nachfolgend ist die Formel zur km Berechnung angeführt (WMO, 2009).

$$a. \quad km = \frac{Xm - \bar{x}_{n-1}}{\sigma_{n-1}}, \text{ mit} \quad (2.8)$$

Xm Maximalwert aus der Jahresserie

Nach erfolgter Berechnung des km -Werts für jede Station werden die Werte mit den dazugehörigen Mittelwerten x_n für die jeweilige Station gegenübergestellt. Es wird eine Hüllkurve (enveloping frequency factor curve) an die äußersten Punkte der Verteilung angepasst. Die km -Werte für die PMP-Berechnung ergeben sich aus der gewählten Funktion für die Hüllkurve (Abbildung 23).

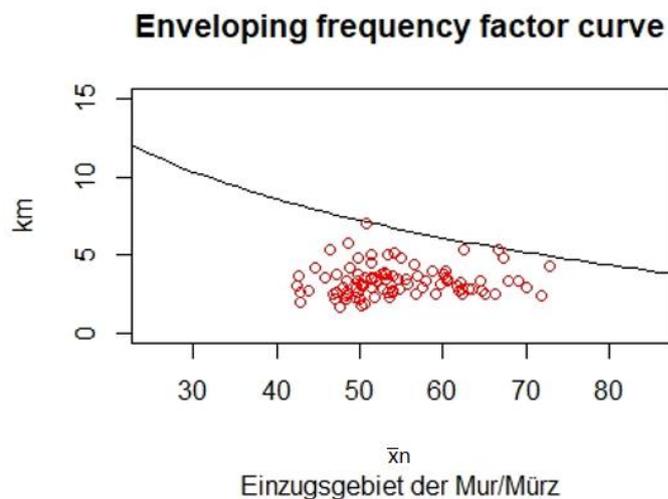


Abbildung 23: km -Hüllkurve - enveloping frequency factor curve

Formel für km :
$$km = -14 * \log(x_n) + 31 \quad (2.9)$$

Nachfolgend wird in Abbildung 24 die Hüllkurve zur Bestimmung des km -Faktors für eine PMP-Berechnung in Katalonien, Spanien, dargestellt. Die Hüllkurve wurde in diesem Beispiel ebenfalls an die äußersten x_n / km -Punkte angepasst. Laut Hershfield (1965) soll nur der maximale Wert aus der km -Berechnung mittels Formel 2.8 zur Berechnung des maximal möglichen Niederschlags im gesamten Einzugsgebiet herangezogen werden. Durch die Erstellung der „enveloping frequency factor curve“ können jedoch bessere Ergebnisse erzielt werden (CASAS et. al., 2008).

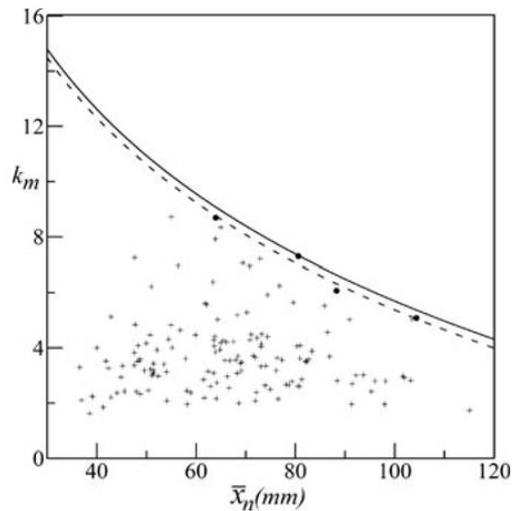


Abbildung 24: Beispiel für eine k_m -Faktor-Kurve, (CASAS et. al., 2008, S. 295)

Die Hüllkurve in Abbildung 24 ist etwas steiler als die k_m -Hüllkurve für das Einzugsgebiet Mur-Mürz (Abbildung 23). Dies führt zu höheren k_m -Werten bei AMS-Reihen mit einem niedrigeren Mittelwert und zu geringeren k_m -Werten bei höherem Mittelwert. Im mittleren Bereich von 40 zu 80 (x_n) liefern die beiden Kurven ähnliche k_m -Werte.

Nachfolgend sind die k_m -Werte für das Einzugsgebiet Mur / Mürz welcher mit der Formel 2.9 ermittelt wurden, aufgelistet.

Tabelle 18: k_m -Werte je Station

Station	km										
101675	5.79	111435	6.10	111872	8.14	112300	6.67	112557	6.08	112847	7.00
103689	7.41	111500	7.05	111906	6.43	112318	6.90	112565	7.67	112854	5.75
106005	7.20	111526	7.75	111914	7.04	112334	5.87	112573	6.45	112862	7.28
106120	7.39	111542	7.24	111971	7.42	112367	6.72	112649	6.87	112896	5.61
106237	6.14	111559	7.55	111997	6.75	112383	7.38	112664	7.21	113324	6.81
106245	6.05	111591	7.58	112003	7.25	112391	7.20	112672	7.91	113332	6.82
106500	7.42	111682	6.65	112037	7.04	112409	7.45	112680	5.92	113951	6.05
106567	5.89	111708	8.17	112045	6.76	112425	7.56	112698	6.79	114298	7.14
107003	4.92	111724	8.20	112078	6.58	112433	6.92	112706	5.24	114363	6.68
107136	5.46	111732	7.51	112086	6.84	112441	7.62	112714	5.87	114587	7.24
109827	6.23	111765	6.19	112177	6.55	112466	7.41	112730	5.50	115691	7.23
110155	5.36	111773	7.27	112185	6.47	112490	7.00	112748	6.07	115923	5.65
110213	6.31	111781	7.36	112219	6.97	112508	8.02	112755	5.92	116186	5.88
111021	6.36	111807	8.16	112227	5.17	112516	7.04	112763	5.40		
111369	7.11	111815	7.15	112268	6.07	112524	6.85	112771	7.18		
111401	6.75	111831	7.04	112292	5.67	112540	7.17	112789	5.01		

3.2.5 Berechnung der PMP- Punktwerte

Nach erfolgter Anpassung (Abbildung 7-9) bzw. Bestimmung (Abbildung 23) aller erforderlichen Werte wird nun mittels der nachfolgend angeführten Formel der PMP-Wert (in mm/24 h) je Station berechnet.

$$a. PMP = \bar{x}_n(1 - k_m C_v) \quad (2.10)$$

$$\text{Laut EVERITT (1998): } C_v = \frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}} * 100 \quad (2.11)$$

Tabelle 19: PMP-Werte in mm/24h je Messstation ohne Flächenabminderung

Station	PMP_RAW	Station	PMP_RAW	Station	PMP_RAW
101675	253	111831	154	112524	162
103689	158	111872	162	112540	165
106005	196	111906	211	112557	178
106120	159	111914	195	112565	168
106237	204	111971	188	112573	199
106245	195	111997	199	112649	206
106500	183	112003	158	112664	154
106567	189	112037	185	112672	165
107003	232	112045	197	112680	183
107136	222	112078	240	112698	186
109827	218	112086	192	112706	183
110155	254	112177	204	112714	168
110213	217	112185	216	112730	209
111021	204	112219	204	112748	155
111369	181	112227	225	112755	175
111401	186	112268	169	112763	201
111435	196	112292	207	112771	185
111500	204	112300	189	112789	214
111526	181	112318	178	112847	179
111542	183	112334	193	112854	211
111559	193	112367	186	112862	162
111591	158	112383	168	112896	185
111682	178	112391	193	113324	191
111708	139	112409	156	113332	172
111724	158	112425	167	113951	175
111732	160	112433	196	114298	176
111765	190	112441	149	114363	169
111773	157	112466	175	114587	163
111781	186	112490	185	115691	188
111807	165	112508	151	115923	229
111815	194	112516	168	116186	212

Je nach Größe des Einzugsgebiets werden die Werte noch abgemindert.

Nachfolgend sind die Wirkungsflächen sowie die Abminderungsfaktoren je Niederschlagsmessstation aufgelistet:

Tabelle 20: Thiessenpolygonflächen in km² und Abminderungsfaktor je Niederschlagsstation

Station	Fläche [km ²]	Red-Faktor	Station	Fläche [km ²]	Red-Faktor	Station	Fläche [km ²]	Red-Faktor	Station	Fläche [km ²]	Red-Faktor
101675	162	93.41	111724	99	95.31	112300	69	96.70	112706	5	100.00
103689	22	100.00	111732	223	92.18	112318	177	93.07	112714	36	99.20
106005	200	92.60	111765	148	93.76	112334	33	99.54	112730	89	95.72
106120	25	100.00	111773	100	95.27	112367	140	93.97	112748	90	95.68
106237	1	100.00	111781	251	91.73	112383	284	91.25	112755	74	96.43
106245	12	100.00	111807	220	92.23	112391	101	95.23	112763	84	95.94
106500	8	100.00	111815	121	94.54	112409	129	94.29	112771	209	92.43
106567	1	100.00	111831	210	92.41	112425	120	94.57	112789	39	98.90
107003	84	95.94	111872	148	93.76	112433	110	94.90	112847	157	93.53
107136	113	94.80	111906	193	92.74	112441	58	97.37	112854	79	96.18
109827	75	96.38	111914	150	93.71	112466	15	100.00	112862	105	95.08
110155	76	96.33	111971	169	93.25	112490	72	96.53	112896	208	92.45
110213	30	99.91	111997	101	95.23	112508	429	89.66	113324	42	98.61
111021	35	99.31	112003	69	96.70	112516	180	93.01	113332	116	94.70
111369	0	100.00	112037	128	94.32	112524	104	95.12	113951	127	94.35
111401	24	100.00	112045	88	95.76	112540	107	95.01	114298	9	100.00
111435	86	95.85	112078	115	94.73	112557	42	98.61	114363	6	100.00
111500	114	94.77	112086	264	91.53	112565	198	92.64	114587	0	100.00
111526	139	94.00	112177	87	95.81	112573	154	93.61	115691	20	100.00
111542	145	93.84	112185	117	94.67	112649	109	94.94	115923	64	96.99
111559	254	91.68	112219	213	92.36	112664	127	94.35	116186	22	100.00
111591	178	93.05	112227	39	98.90	112672	171	93.20			
111682	269	91.46	112268	71	96.59	112680	59	97.30			
111708	293	91.13	112292	58	97.37	112698	128	94.32			

3.2.7 Berechnung PMP-Wert je Thiessen-Polygonfläche

Durch die Multiplikation der PMP-Punktweite aus Tabelle 19 mit den Abminderungsfaktoren aus Tabelle 20 erhält man die PMP-Werte je Thiessenpolygonfläche, welche anschließend zur PMF-Berechnung verwendet werden.

Tabelle 21: Endergebnisse der PMP-Berechnung im Vergleich zum maximal beobachteten Niederschlagswert je Station

Station	P_max obs [mm]	PMP [mm]	Station	P_max obs [mm]	PMP [mm]	Station	P_max obs [mm]	PMP [mm]
101675	125.4	236	111831	96.5	142	112524	92.4	154
103689	75.4	158	111872	63.9	152	112540	83.1	157
106005	95	181	111906	118.5	196	112557	106	176
106120	107	159	111914	102.1	183	112565	103.2	155
106237	112	204	111971	90	175	112573	93.9	187
106245	113.8	195	111997	95.8	190	112649	110.9	195
106500	76.2	183	112003	84.1	153	112664	71.5	145
106567	107.9	189	112037	90.2	174	112672	86.8	154
107003	167.5	222	112045	93.5	189	112680	98	178
107136	171.8	211	112078	124	227	112698	83.4	175
109827	130.4	210	112086	102.4	176	112706	115.1	183
110155	148.3	245	112177	106.4	196	112714	123.4	167
110213	114.9	217	112185	133.1	204	112730	109.2	200
111021	104.5	203	112219	103.8	189	112748	99.1	148
111369	134.5	181	112227	130	222	112755	98.7	169
111401	99.9	186	112268	103.7	163	112763	143	193
111435	114.6	188	112292	121.9	201	112771	72.6	171
111500	103.7	193	112300	94.4	183	112789	115.5	211
111526	88.9	170	112318	88.3	165	112847	79.2	167
111542	111.5	172	112334	101.5	193	112854	110	203
111559	98.5	177	112367	124.5	175	112862	72	154
111591	69.7	147	112383	77.2	153	112896	98.8	171
111682	115.8	163	112391	92.4	183	113324	124	188
111708	72.5	126	112409	77.7	147	113332	85	163
111724	73	151	112425	76	158	113951	104.3	165
111732	65.3	148	112433	105.4	186	114298	94.2	176
111765	96.2	178	112441	70.4	145	114363	95	169
111773	79.3	150	112466	77.2	175	114587	88.9	163
111781	104	171	112490	99.7	179	115691	81.5	188
111807	70	152	112508	68.6	136	115923	115.7	222
111815	77.7	184	112516	108	157	116186	109.2	212

3.2.8 Darstellung der PMP-Verteilung im Einzugsgebiet

In Abbildung 26 ist die Verteilung des maximal möglichen Niederschlags (PMP) im Einzugsgebiet der Mur ersichtlich.

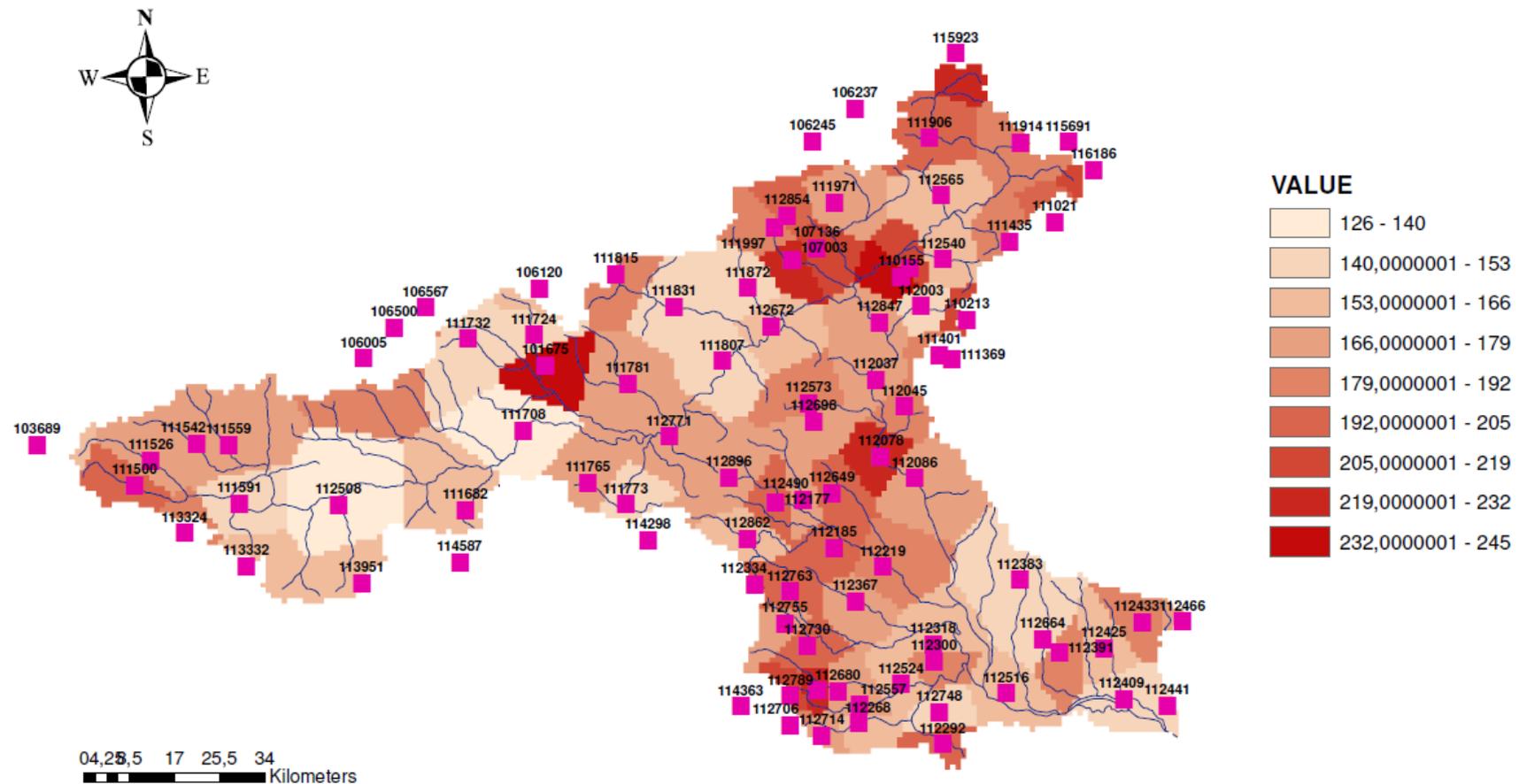


Abbildung 26: PMP-Verteilung im Einzugsgebiet

3.2.9 Interpretation der Ergebnisse

Laut Berechnung mittels Gumbel-Verteilung (EV1) bewegen sich die ermittelten PMP-Werte in einem Wiederkehrintervall von 10^4 bzw. 10^5 Jahren. Die Berechnung der Wiederkehrintervalle mittels Weibull-Verteilung (EV3) ergab Werte von bis zu 10^9 Jahren. Laut dem amerikanischen National Research Council (1994) haben die PMP-Werte in den Vereinigten Staaten eine Wiederkehrzeit von 10^5 bis 10^9 Jahren. Die PMP-Werte im Einzugsgebiet Mur/Mürz besitzen im Vergleich zu den PMP-Werten in den Vereinigten Staaten ähnlich hohe Wiederkehrintervalle.

Vergleicht man die PMP-Werte mit den 24h-Bemessungsniederschlägen des MaxModN-Modells entsprechen die Werte einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren. Die Berechnung der MaxModN-Niederschläge erfolgt bei maximierten Rand- bzw. Anfangsbedingungen (WEILGUNI, 2013). Dies bedeutet, dass die Eingangsparameter zur Berechnung der Niederschlagswerte so angenommen werden, dass ein möglichst maximaler Niederschlagswert berechnet wird. Die statistische Methode nach Hershfield ist in Bezug auf die MaxModN-Methode ein stark vereinfachter Rechenansatz, bei dem nur die vorhandenen Daten bzw. die aufgetretenen Maximalereignisse einer Frequenzanalyse unterzogen werden (siehe Punkt 2.2). Die vom MaxModN-Modell generierten Werte für den maximal möglichen Niederschlag können daher über den PMP-Werten, welche durch die statistische Methode nach Hershfield berechnet wurden, liegen. Andere PMP-Berechnungsmethoden (local method, combination method), die im Rechenansatz dem MaxModN-Ansatz ähneln, würden höhere PMP-Werte liefern als die statistische Methode nach Hershfield. Da aber in der statistischen Methode tatsächlich aufgetretene Niederschlagsereignisse herangezogen werden, kann davon ausgegangen werden, dass die in dieser Arbeit berechneten Werte wahrscheinlicher auftreten können.

Für die räumliche Disaggregation der PMP-Punktwerte wurde die Interpolationsmethode nach Thiessen verwendet. Diese Methode wird in alpinen Einzugsgebieten, aufgrund der Komplexität des Einzugsgebiets und der großen Anzahl von kleinen Teileinzugsgebieten, wenig angewendet.

Die Einzugsgebietsgröße der Mur beträgt im COSERO-Modell 10.418 km^2 . Dies ergibt bei 93 Niederschlagsstationen eine durchschnittliche Fläche pro Messstation von ca. 112 km^2 . Das Messnetz im Einzugsgebiet ist also dicht genug, um eine Interpolation mittels Thiessen-Polygonen als ausreichend zu betrachten.

3.3 Ergebnisse der PMF-Berechnung

Für die Simulation der maximal möglichen Flut (PMF) wird das Niederschlags-Abfluss-Modell COSERO verwendet. Die Methodik für die Berechnung des maximal möglichen Hochwassers ist unter Punkt 2.2.4 beschrieben. Für den Pegel Muhr – 203745 gibt es im COSERO Modell kein eigenes Teileinzugsgebiet. Aufgrund der ähnlichen Charakteristika des Teileinzugsgebiets für den Pegel St. Michael – 203752 und des Pegels Muhr (beide alpine Einzugsgebiete) wird der PMF-Wert für die Durchflussmessstelle Muhr anteilmäßig über die Größe des Einzugsgebiets berechnet. Der Pegel Muhr verfügt über ein Einzugsgebiet von 78,7 km², der Pegel St. Michael besitzt ein Einzugsgebiet von 289,2 km². Die PMF-Werte der Durchflussmessstelle St. Michael werden daher mit dem Faktor 0,27 (78,7 km²/289,2 km²) multipliziert, um die PMF-Werte für die Messstation Muhr zu erhalten. Nachfolgend sind die Ergebnisse für die einzelnen Modellvorgänge für die gewählten Szenarien aufgelistet.

3.3.1 Abflüsse bei Stratiformen Niederschlag

Tabelle 22: Scheitelabflüsse bei stratiformen Niederschlag im Einzugsgebiet

EZG	Station-Nr.	Station	Q max obs. [m ³ /s]	Q 10 Juli 2005	Q 21 Juli 2008	Q 16 Mai 2006	Q 26 April 2006
				Double Peak [m ³ /s]		Spring Flood [m ³ /s]	
-	203745	Muhr	32	67	72	60	68
1	203752	St. Michael	110	247	266	219	251
2	203794	Mörtelsdorf	120	276	301	232	293
20	211086	Gestüthof	490	1125	1212	861	1207
24	211102	St. Georgen	550	1429	1519	1122	1552
34	211136	Zeltweg	610	1680	1767	1351	1825
43	211185	Leoben	840	2215	2297	1847	2399
47	211227	Neuberg	117	240	241	244	261
49	211243	Kindtal	154	501	484	505	556
53	211292	Bruck	825	2867	2960	2448	3156
67	211573	Graz	1180	3123	3179	2690	3387
110	211490	Mureck	1251	3916	3966	3537	4283

3.3.2 Abflüsse bei Westwetterlage

Tabelle 23: Scheitelabflüsse bei Westwetterlage im Einzugsgebiet

EZG	Station-Nr.	Station	Q max obs. [m ³ /s]	Q 10 Juli 2005	Q 21 Juli 2008	Q 16 Mai 2006	Q 26 April 2006
				Double Peak [m ³ /s]		Spring Flood [m ³ /s]	
-	203745	Muhr	32	65	74	57	66
1	203752	St. Michael	110	240	272	210	242
2	203794	Mörtelsdorf	120	268	308	222	283
20	211086	Gestüthof	490	985	1088	650	966
24	211102	St. Georgen	550	1232	1338	838	1251
34	211136	Zeltweg	610	1423	1524	1000	1474
43	211185	Leoben	840	1827	1904	1357	1931
47	211227	Neuberg	117	220	220	198	237
49	211243	Kindtal	154	448	430	429	497
53	211292	Bruck	825	2330	2384	1835	2561
67	211573	Graz	1180	2590	2595	2096	2806
110	211490	Mureck	1251	3844	3789	3488	4230

3.3.3 Abflüsse beim WORST-CASE-Szenario

Tabelle 24: Scheitelabflüsse beim Worst-Case-Szenario im Einzugsgebiet

EZG	Station-Nr.	Station	Q max obs. [m ³ /s]	Q 10 Juli 2005	Q 21 Juli 2008	Q 16 Mai 2006	Q 26 April 2006
				Double Peak [m ³ /s]		Spring Flood [m ³ /s]	
-	203745	Muhr	32	66	72	53	67
1	203752	St. Michael	110	244	264	193	246
2	203794	Mörtelsdorf	120	272	299	205	288
20	211086	Gestüthof	490	1113	1206	720	1157
24	211102	St. Georgen	550	1415	1512	967	1504
34	211136	Zeltweg	610	1649	1744	1186	1764
43	211185	Leoben	840	2132	2205	1633	2292
47	211227	Neuberg	117	214	215	194	229
49	211243	Kindtal	154	424	406	404	471
53	211292	Bruck	825	2730	2788	2189	2992
67	211573	Graz	1180	3002	3010	2459	3243
110	211490	Mureck	1251	4442	4459	3944	4864

3.3.4 PMF für die einzelnen Stationen

Die Ergebnisse in den alpinen Einzugsgebieten (Einzugsgebiete des Oberlaufs Mur bzw. Mürz) sind bei allen Wetterlagen und Simulationszeitpunkten ähnlich. Bei den flussab liegenden Einzugsgebieten wirkt sich die Überlagerung der einzelnen Hochwasserwellen (Worst-Case-Szenario) bei der Berechnung des PMF-Wertes am Stärksten aus. Nachfolgend sind die PMF-Werte je Station aufgelistet. Die generierten PMF-Werte werden anschließend bei der Upper Boundary-Hochwasserberechnung als Parameter g eingefügt.

Tabelle 25: PMF-Endergebnis in m^3/s je Pegel

EZG	Station-Nr.	Station	Q max obs. (beobachtet)	PMF	PMF / Qmax obs.
-	203745	Muhr	32	74	2.32
1	203752	St. Michael	110	272	2.48
2	203794	Mörtelsdorf	120	308	2.56
20	211086	Gestüthof	490	1212	2.47
24	211102	St. Georgen	550	1552	2.82
34	211136	Zeltweg	610	1825	2.99
43	211185	Leoben	840	2399	2.86
47	211227	Neuberg	117	261	2.23
49	211243	Kindtal	154	556	3.61
53	211292	Bruck	825	3156	3.83
67	211573	Graz	1180	3387	2.87
110	211490	Mureck	1251	4864	3.89

3.3.4.1 Interpretation der PMF-Ergebnisse

Die simulierten Maximalabflüsse weisen ein Wiederkehrintervall von 10^5 bis 10^7 Jahren auf (Gumbel- bzw. Weibull-Verteilung). Es ist anzunehmen, dass das Flussbett der Mur solche Wassermassen wahrscheinlich nicht aufnehmen kann und es durch Überflutungen zu einem natürlichen Rückhalt der Wasser im Einzugsgebiet kommt.

Für die Berechnung der HQ100-Werte mittels der Upper Boundary-Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES (2010) werden die Endergebnisse der PMF-Berechnung jedoch ohne Abminderung übernommen, da eine Abschätzung des natürlichen Rückhalts bei Überflutungen schwer quantifizierbar ist.

3.4 Ergebnisse Upper Boundary-Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES (2010)

In den Abbildungen 27 bis 29 sind beispielhaft am Pegel 211086 – Gestüthof die angepassten Verläufe der EV4-, LN4- und TDF-Verteilung dargestellt.

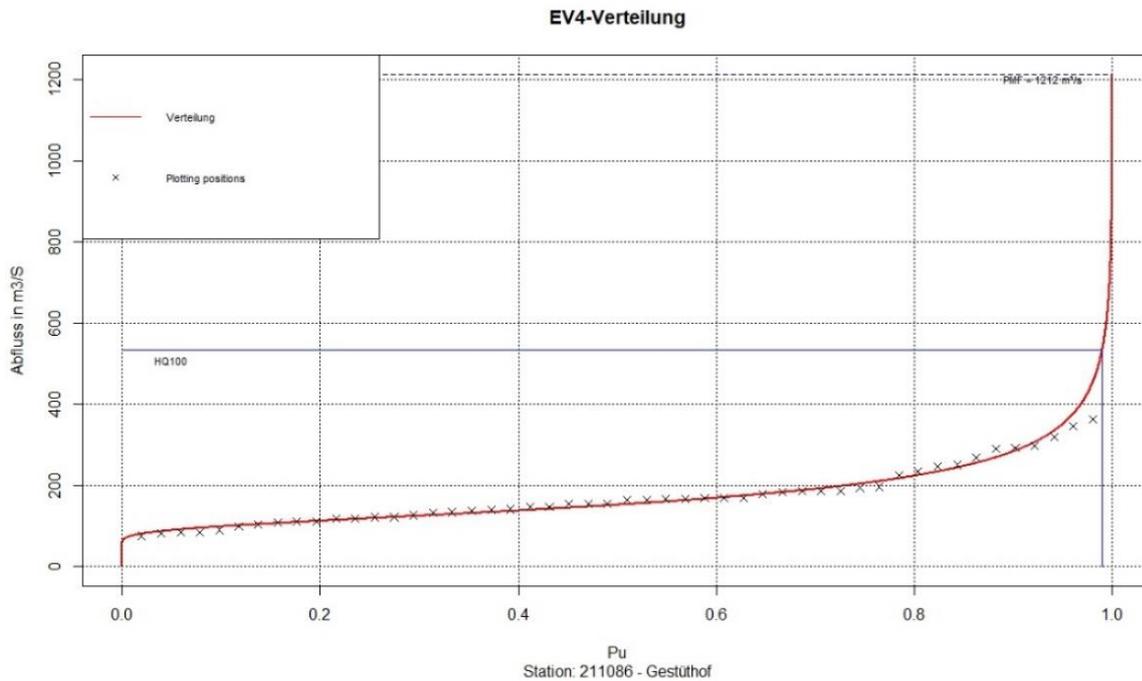


Abbildung 27: EV4-Verteilung für den Pegel Gestüthof - Zeitserie 50 Jahre

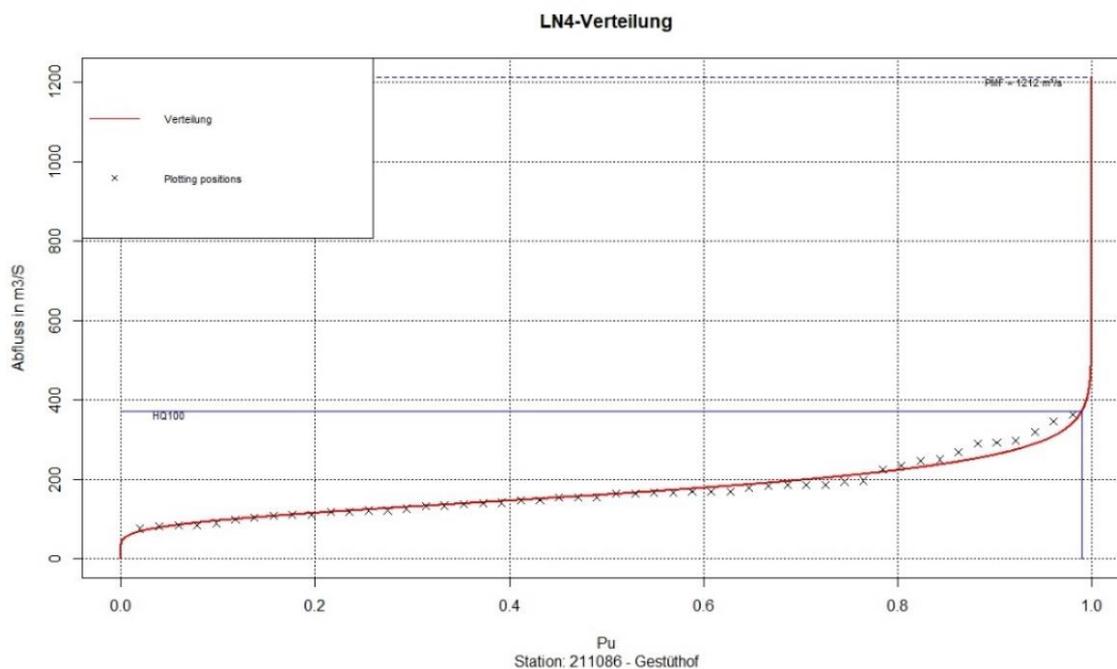


Abbildung 28: LN4-Verteilung für den Pegel Gestüthof - Zeitserie 50 Jahre

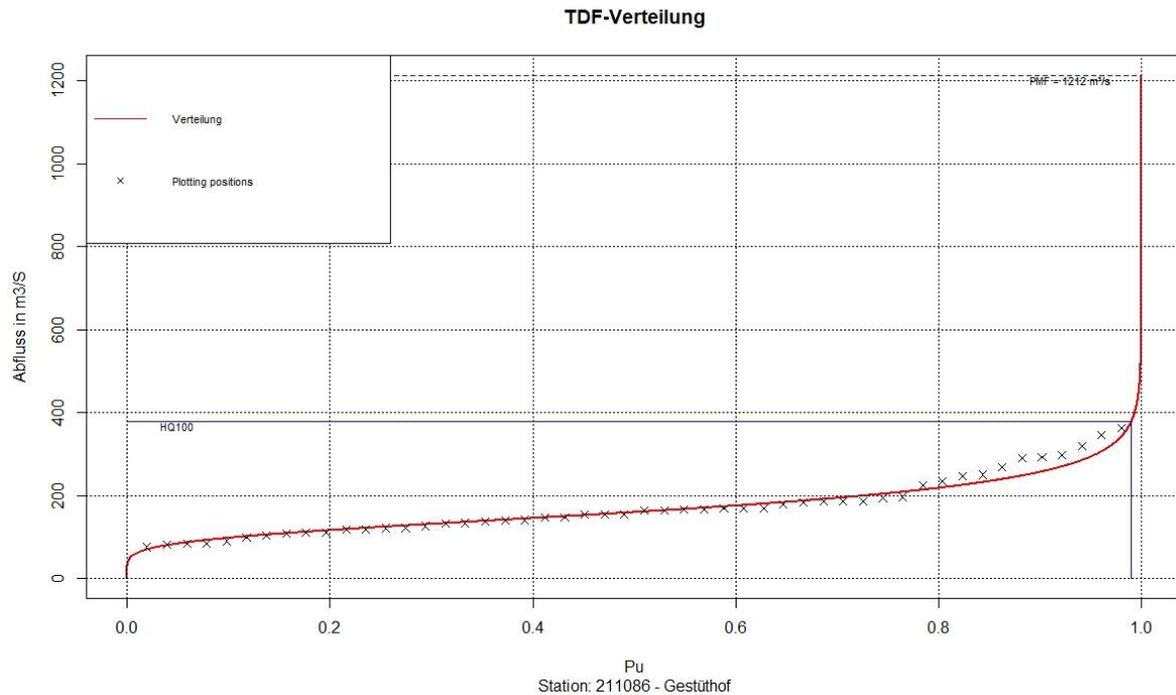


Abbildung 29: TDF-Verteilung für den Pegel Gestüthof - Zeitserie 50 Jahre

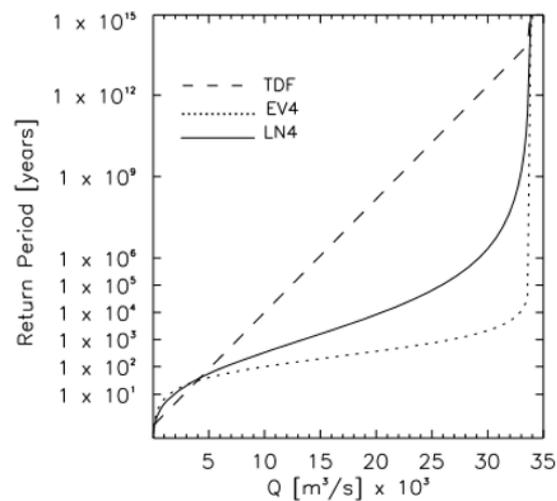


Abbildung 30: Unterschiedliches Verhalten der EV4, LN4 und TDF Verteilungen bei der Annäherung an die rechtseitige Begrenzung g (BOTERO, B. A., FRANCES, F., 2010, S. 2623)

Laut Abbildung 30 erreicht die EV4-Verteilung am Schnellsten das obere Limit g . Dieses Verhalten können wir auch beim Vergleich der Abbildungen 27 bis 29 erkennen. Aufgrund der schnelleren Annäherung der EV4-Verteilung an den oberen Grenzwert werden durch diese Verteilung auch höhere HQ100-Kennwerte generiert. Die HQ100-Kennwerte der TDF und der LN4-Verteilung liegen noch unterhalb von 400 m³/s. Der HQ100- Wert der EV4- Verteilung schon oberhalb von 500 m³/s.

3.4.1 HQ100-Werte Upper Boundary-Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES (2010) (Original Zeitreihe)

Wie im Kapitel 2.1 bzw. 2.3 beschrieben wurden, für die ausgewählten Pegel die HQ100-Kennwerte berechnet. Als Parameterschätzmethode wurde bei der Upper Boundary-Hochwasserberechnung, wie von BOTERO und FRANCES (2010) empfohlen, die Maximum-Likelihood-Methode verwendet (ML-PG Methode, siehe Punkt 2.3). In den Tabellen 26 bis 28 sind die Ergebnisse für die HQ100-Berechnung aufgelistet.

Tabelle 26: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m³/s, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	33	23	26
203752	107	73	76
203794	120	83	86
211086	508	362	370
211102	662	463	478
211136	684	477	525
211185	881	630	655
211227	188	140	145
211243	341	190	192
211292	1340	896	940
211490	2245	1342	1363
211573	1303	890	914

Tabelle 27: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m³/s, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	33	24	26
203752	109	76	78
203794	125	84	89
211086	507	350	360
211102	673	452	468
211136	688	474	505
211185	843	610	634
211227	177	137	137
211243	312	179	180
211292	1214	854	888
211490	2158	1366	1411
211573	1151	837	850

Tabelle 28: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m³/s, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	41	29	31
203752	125	85	86
211086	533	372	379
211102	731	479	490
211185	1006	705	717
211227	177	135	137

3.4.2 Vergleich original vs. modifizierte Zeitreihe

Die Ergebnisse der HQ-Berechnung mit der modifizierten Zeitserie und die Steigerung der berechneten Werte gegenüber den HQ-Kennwerten aus der Berechnung mit der unveränderten Zeitserie werden nachfolgend in den Tabellen 29 bis 34 dargestellt.

Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

Tabelle 29: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m³/s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	35	25	27
203752	114	80	82
203794	132	92	94
211086	526	398	387
211102	732	531	528
211136	744	528	546
211185	974	716	720
211227	202	164	162
211243	365	217	212
211292	1463	998	1016
211490	2437	1495	1450
211573	1442	1016	1001

Tabelle 30: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	6.07	10.39	6.38
203752	6.71	10.67	7.43
203794	9.44	11.30	8.49
211086	3.54	9.87	4.68
211102	10.50	14.55	10.36
211136	8.73	10.80	3.96
211185	10.57	13.80	9.86
211227	7.57	16.62	11.99
211243	7.13	13.98	10.33
211292	9.22	11.44	8.04
211490	8.54	11.37	6.36
211573	10.64	14.21	9.57
MITTELWERT	8.22	12.42	8.12

Beobachtungszeitraum: 40 Jahre

Tabelle 31: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m³/s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	35	27	28
203752	115	82	83
203794	133	91	95
211086	516	369	369
211102	723	496	502
211136	733	512	534
211185	911	673	682
211227	190	158	152
211243	330	198	194
211292	1309	936	949
211490	2323	1498	1442
211573	1255	941	923

Tabelle 32: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	5.37	10.50	5.94
203752	5.22	9.01	6.15
203794	6.30	7.99	5.83
211086	1.87	5.32	2.38
211102	7.43	9.87	7.08
211136	6.61	8.00	5.92
211185	8.08	10.38	7.51
211227	7.38	15.98	10.48
211243	5.82	10.63	7.85
211292	7.80	9.60	6.88
211490	7.63	9.69	2.19
211573	9.04	12.51	8.60
MITTELWERT	6.55	9.96	6.40

Beobachtungszeitraum: 50 Jahre

Tabelle 33: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m³/s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	43	33	33
203752	132	92	91
211086	543	391	387
211102	774	518	520
211185	1074	771	682
211227	187	150	147

Tabelle 34: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre

	EV4	LN4	TDF
203745	5.04	10.77	6.41
203752	5.52	8.23	5.97
211086	1.85	4.98	2.30
211102	5.93	8.14	6.08
211185	6.77	9.27	0.36
211227	5.42	11.25	7.54
MITTELWERT	5.09	8.77	4.78

3.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Zur besseren Veranschaulichung werden die Ergebnisse der Standard-Hochwasserberechnung der Upper Boundary-Hochwasserberechnung gegenübergestellt.

3.5.1 Vergleich der HQ100-Kennwerte

In der Tabelle 35 bis 37 sind alle, mittels der originalen Zeitreihen berechneten, HQ100-Kennwerte für die einzelnen Pegel dargestellt.

Tabelle 35: HQ100-Kennwerte in m³/s aller Verteilungen: Zeitserie: 30 Jahre

PEGEL	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV	EV4	LN4	TDF
203745	21	25	25	24	26	33	23	26
203752	66	78	77	78	79	107	73	76
203794	75	89	87	89	89	120	83	86
211086	332	390	414	395	438	508	362	370
211102	422	498	514	500	538	662	463	478
211136	433	514	506	506	517	684	477	525
211185	574	681	697	673	725	881	630	655
211227	137	155	159	168	167	188	140	145
211243	168	193	182	203	184	341	190	192
211292	814	962	925	961	938	1340	896	940
211490	1187	1398	1289	1409	1289	2245	1342	1363
211573	810	956	973	960	1011	1303	890	914

Tabelle 36: HQ100 Kennwerte in m³/s aller Verteilungen: Zeitserie: 40 Jahre

PEGEL	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV	EV4	LN4	TDF
203745	22	26	27	24	29	33	24	26
203752	69	81	82	81	85	109	76	78
203794	76	90	85	89	85	125	84	89
211086	318	375	386	378	403	507	350	360
211102	408	480	482	484	498	673	452	468
211136	428	508	489	500	496	688	474	505
211185	555	658	672	650	698	843	610	634
211227	134	150	161	165	172	177	137	137
211243	160	185	184	193	189	312	179	180
211292	778	919	916	919	943	1214	854	888
211490	1216	1421	1329	1457	1337	2158	1366	1411
211573	763	901	952	902	1005	1151	837	850

Tabelle 37: HQ100-Kennwerte in m³/s aller Verteilungen, Zeitserie: 50 Jahre

PEGEL	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV	EV4	LN4	TDF
203745	26	31	34	31	36	41	29	31
203752	78	90	92	93	96	125	85	86
211086	339	396	409	406	427	533	372	379
211102	431	504	504	517	520	731	479	490
211185	642	753	779	766	816	1006	705	717
211227	131	147	155	161	163	177	135	137

3.5.2 Vergleich originaler vs. modifizierter Zeitreihe

In Tabelle 38 sind die durchschnittlichen Veränderungen der Hochwasserkennwerte im Vergleich von original Zeitreihe und modifizierter Zeitreihe ersichtlich.

Tabelle 38: Durchschnittliche Steigerung in % zwischen originaler bzw. modifizierter Zeitreihe

ZEITREIHE	WEIBULL	GUMBEL	PE3	LN3	GEV	EV4	LN4	TDF
30 JAHRE	13.61	12.36	20.26	15.04	23.79	8.22	12.42	8.12
40 JAHRE	10.68	9.70	15.73	11.80	18.37	6.55	9.96	6.40
50 JAHRE	9.64	8.49	13.90	10.62	16.23	5.09	8.77	4.78

3.5.3 Vergleich der Konfidenzintervalle

Für die einzelnen Verteilungen der Standard-, sowie der Upper Boundary-Hochwasserberechnung wurden für eine Beobachtungslänge von 50 Jahren HQ100-Kennwerte mit ihren dazugehörigen Konfidenzintervallen ($\alpha = 0,05$) berechnet (Tabelle 39 bis 46). Die Ermittlung der Konfidenzintervalle erfolgte mittels des Bootstrap-Resampling-Verfahrens ($R=1000$).

3.5.3.1 Standard-Hochwasserberechnung nach BMLFUW (2011)

Tabelle 39: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Weibull Verteilung

Weibull	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	22.18	26.39	34.62	-18.98	23.77
203752	66.44	77.61	95.5	-16.81	18.73
211086	269.71	323.08	390.53	-19.79	17.27
211102	364.76	431.04	518.09	-18.17	16.80
211185	552.24	641.73	839.05	-16.20	23.52
211227	107.27	130.95	157.06	-22.08	16.62
				-18.67	19.45

Tabelle 40: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Gumbel Verteilung

Gumbel	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	26.34	31.27	38.91	-18.72	19.64
203752	77.57	90.29	108.59	-16.40	16.85
211086	324.01	379.06	450.87	-16.99	15.93
211102	427.98	503.69	617.61	-17.69	18.45
211185	649.25	753.07	938.84	-15.99	19.79
211227	127.22	147.45	175.18	-15.90	15.83
				-16.95	17.75

Tabelle 41: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Pearson 3 Verteilung

P3	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	26.76	33.92	43.11	-26.76	21.32
203752	78.18	91.82	118.13	-17.45	22.27
211086	320.53	388.36	470.57	-21.16	17.47
211102	419.04	503.59	614.03	-20.18	17.99
211185	653.86	779.45	1116.63	-19.21	30.20
211227	134.34	154.61	175.2	-15.09	11.75
				-19.97	20.17

Tabelle 42: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die LogNormal 3 Verteilung

LN3	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	25	30.97	40.71	-23.88	23.93
203752	78.77	93.41	116.92	-18.59	20.11
211086	325.91	385.5	480.21	-18.28	19.72
211102	434.35	516.58	646.93	-18.93	20.15
211185	640.8	765.54	996.62	-19.47	23.19
211227	131.38	160.94	195.3	-22.50	17.59
				-20.27	20.78

Tabelle 43: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Allgemeine Extremwert Verteilung

GEV	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	26.87	36.16	45.92	-34.57	21.25
203752	80.68	95.55	129.54	-18.43	26.24
211086	328.63	405.02	500.37	-23.24	19.06
211102	427.99	520	641.95	-21.50	19.00
211185	662.14	816.41	1143.93	-23.30	28.63
211227	140.98	163.34	186.68	-15.86	12.50
				-22.82	21.11

3.5.3.2 Upper Boundary-Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES (2010)

Tabelle 44: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die EV4 Verteilung

EV4	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	32.83	41.07	46.46	-25.10	11.60
203752	101.24	124.85	144.12	-23.32	13.37
211086	438.21	532.81	625.34	-21.59	14.80
211102	594.35	730.59	839.28	-22.92	12.95
211185	825.27	1005.66	1176.5	-21.86	14.52
211227	147.48	177.03	197.45	-20.04	10.34
				-22.47	12.93

Tabelle 45: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die LN4 Verteilung

LN4	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	24.54	29.38	33.53	-19.74	12.37
203752	72.06	85.38	97.52	-18.48	12.45
211086	314.44	372.23	425.05	-18.38	12.43
211102	408.65	479.43	544.83	-17.32	12.00
211185	595.71	705.48	809.92	-18.43	12.90
211227	113.87	134.82	150.65	-18.40	10.51
				-18.46	12.11

Tabelle 46: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die TDF Verteilung

TDF	lower	HQ100	upper	% lower	% upper
203745	26.32	30.77	34.85	-16.90	11.69
203752	73.71	86.31	98.16	-17.10	12.07
211086	325.42	378.71	431.75	-16.37	12.28
211102	424.67	489.99	553.05	-15.38	11.40
211185	619.75	717.20	817.89	-15.72	12.31
211227	113.87	136.84	156.89	-20.17	12.78
				-16.94	12.09

Die Verteilungsfunktionen der Upper Boundary-Hochwasserberechnung liefern im Vergleich zu den Verteilungsfunktionen der Standard-Herangehensweise engere Konfidenzintervalle. Vor allem die obere Grenze des Wertebereichs liegt deutlich niedriger als dies bei den Standard-Verteilungsfunktionen der Fall ist.

4 Diskussion und Ausblick

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Die in Kapitel 1.1 angesprochenen Fragestellungen werden im nachfolgenden Teil diskutiert.

- **Liefert die Upper Boundary-Hochwasserberechnung zuverlässige Kennwerte für die Hochwasserabschätzung im Vergleich zur Standard-Herangehensweise?**

Bei der Standard-Hochwasserberechnung mittels Weibull-, Gumbel-, Paerson 3-, LogNormal 3-, und Allgemeiner Extremwertverteilung liefert die Weibull-Verteilung die niedrigsten HQ100-Kennwerte. Die HQ100-Werte der Weibull-Verteilung liegen im Schnitt ca. 20,00 % unterhalb des größten HQ100-Kennwerts bei der standardisierten Herangehensweise. Die höchsten Hochwasserkennwerte werden im Durchschnitt von der Allgemeinen Extremwertverteilung (GEV) generiert.

Bei der Upper Boundary-Herangehensweise mittels EV4-, LN4- und TDF-Verteilung liefert die LN4-Verteilung die niedrigsten HQ100-Kennwerte. Die TDF-Verteilung liefert ähnliche Ergebnisse als die LN4-Verteilung, die Werte sind jedoch, um ca. 3 – 5 % höher. Im direkten Vergleich zu den Verteilungen der Standard-Herangehensweise sind die Werte der LN4- sowie der TDF-Verteilung geringfügig niedriger als die Kennwerte der Gumbel, Paerson 3, LogNormal 3 und Allgemeinen Extremwertverteilung.

Die größten HQ100-Kennwerte bei der Upper Boundary-Hochwasserberechnung, sowie bei der Standard-Hochwasserberechnung wurden bei der Verwendung der EV4-Verteilung erzeugt. Die Hochwasserkennwerte waren im Schnitt ca. 20 – 40 % höher als die Kennwerte, welche mit den anderen Verteilungsfunktionen erzeugt wurden.

Um die Frage zu beantworten, ob die Upper Boundary-Herangehensweise nach BOTERO und FRANCES (2010) zuverlässige Kennwerte liefert, sollte ein direkter Vergleich der HQ100-Kennwerte herangezogen werden. Die Hochwasserkennwerte der Gumbel-, Paerson 3- und LogNormal 3-Verteilungen und die Werte der LN4- und TDF-Verteilung sind für die einzelnen Pegel ähnlich hoch. Die Abweichungen vom mittleren HQ100-Wert der zuvor genannten Verteilungen beträgt ca. +/- 4,00 %. Die LN4- und TDF-Verteilungsfunktion der Upper Boundary-Herangehensweise liefern also Hochwasserkennwerte, welche von den Verteilungsfunktionen der Standard-Herangehensweise nach BMLFUW (2011) ebenfalls generiert werden. Da die klassischen

Verteilungsfunktionen für die Abschätzung von Hochwasserkennwerten vom BMLFUW empfohlen werden, kann für die LN4- bzw. TDF-Verteilung, welche ähnliche Werte liefern, ebenfalls eine Empfehlung für die Abschätzung von HQ-Werten ausgesprochen werden.

Die EV4-Verteilung generiert Hochwasserkennwerte die 20-40 % über den Kennwerten der anderen Verteilungsfunktionen liegen. Nach den zurzeit gültigen Standards sind diese Kennwerte als zu hoch einzustufen. Betrachtet man jedoch die Konfidenzintervalle der klassischen Verteilungsfunktionen, sieht man das die obere Grenze des Wertbereichs meist 16,00 – 30,00 % über den ermittelten HQ100 Kennwerten liegt. Die von der EV4-Verteilung berechneten HQ100-Werte befinden sich also im möglichen Wertebereich der Standard-Herangehensweise.

Die durchgeführten Berechnungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Verteilungsfunktionen der Herangehensweise nach BOTERO und FRANCES (2010) (upper bounded statistical approach) in der Lage sind Hochwasserkennwerte zu erzeugen, welche auch von den, als Standard geltenden, Verteilungsfunktionen generiert werden.

- **Wie reagieren die einzelnen Verteilungsfunktionen auf Ausreißer (Implementierung HQ200 in die Zeitserie)? Welche Verteilungsfunktion liefert die stabilsten Hochwasserkennwerte?**

Durch den Vergleich der HQ100-Kennwerte aus der Berechnung mit der originalen bzw. mit der modifizierten Zeitreihe (siehe Punkt 2.1.1) konnte das Verhalten der einzelnen Verteilungsfunktionen auf Ausreißer in der Zeitserie beobachtet werden. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 38 ersichtlich.

Bei der Standard-Hochwasserberechnung liefert die Gumbel-Verteilung die stabilsten Werte, im Sinne von, geringste Veränderung beim Vergleich originaler vs. modifizierter Zeitreihe. Am stärksten reagiert die Allgemeine Extremwertverteilung auf Ausreißer in der Zeitserie. Hier liegt die Steigerung der HQ100-Kennwerte bei 16,23 % (Beobachtungslänge: 50 Jahre) bis 23,79 % (Beobachtungslänge: 30 Jahre).

Die Upper Boundary-Hochwasserberechnung liefert bei den durchgeführten Berechnungen im Durchschnitt die stabilsten Hochwasserkennwerte. Die Steigerung bei einer Beobachtungslänge von 50 Jahren liegt zwischen 4,78 % (TDF-Verteilung) und 8,77 % (LN4-Verteilung). Auch bei einer Beobachtungslänge von 30 Jahren sind die Veränderungen zum Großteil deutlich geringer, als die Veränderungen bei den klassischen Verteilungsfunktionen.

Die Verteilungsfunktionen der Upper Boundary-Hochwasserberechnungen nach BOTERO und FRANCES (2010) erzeugen im Vergleich zu den Standard-Verteilungsfunktionen bei den durchgeführten Berechnungen **die stabileren Kennwerte**.

Grundsätzlich kann man sagen, dass die Veränderungen bei der Berechnung von HQ100-Kennwerte im Vergleich von originaler und modifizierter Zeitreihe mit länger werdenden Beobachtungszeitraum, gleichbedeutend mit höherem Stichprobenumfang, niedriger werden. Je länger die Zeitreihe ist, desto geringer sind die Auswirkungen von Ausreißern in der Zeitreihe bei der Berechnung von Hochwasserkennwerten.

4.2 Ausblick

Durch die Einführung einer oberen Grenze bei der Berechnung von Hochwasserkennwerten erzeugt man für die verwendeten Verteilungsfunktionen einen Wertebereich in dem sie operieren können. Die erzeugten Werte übersteigen nicht den oberen Grenzwert und können somit auch nicht ins Unendliche anwachsen. Dies führt, wie in den durchgeführten Berechnungen gezeigt wurde, zu stabileren Hochwasserkennwerten. Des Weiteren kann durch die Berechnung des wahrscheinlich maximalen Hochwasserereignisses abgeschätzt werden, mit welchen Hochwasserereignissen im schlimmsten Fall zu rechnen ist. Dies ist vor allem bei großen Flussbauprojekten (Speicherseen, Kraftwerksbau, etc) von Vorteil. Dadurch können Sicherheitsmaßnahmen dementsprechend hoch angesetzt werden.

Die Erzeugung des PMF (probable maximum flood) wurde in dieser Arbeit durch die N/A-Modellierung eines PMP-Ereignisses im Einzugsgebiet der Mur erzeugt. Der maximal mögliche Niederschlag im Einzugsgebiet wurde mit der statistischen Methode laut WMO – Handbuch zur PMP-Abschätzung (2009) berechnet. Wie in Kapitel 1.10.2 erwähnt, hängt die Genauigkeit des PMP-Wertes zu einem Großteil von der Qualität bzw. Quantität der verwendeten Daten ab. Eine weitere Möglichkeit zur Präzisierung des Wertes ist die Berechnung mit einer zusätzlichen Methode zur PMP-Abschätzung. Durch die Kombination von mehreren PMP-Berechnungen und einer hohen Datenqualität bzw. -quantität können gute Abschätzungen für den maximal möglichen Niederschlag und in weiterer Folge für das maximal mögliche Hochwasser (PMF) getroffen werden.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Abschätzung von Hochwasserereignissen immer mit einer gewissen Unsicherheit verbunden sein wird. Doch durch die Einführung von neuen Parametern und der Eingliederung aller verfügbaren Daten in die Berechnung kann diese Unsicherheit in einem gewissen Maß abgemindert werden.

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

BMLFUW (2011): Leitfaden – Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten, Wien: BMLFUW – Abt. VII3 – Wasserhaushalt.

BOTERO B. A., FRANCES F. (2010): Estimation of high return period flood quantiles using additional non-systematic information with upper bounded statistical models, *Hydrology and Earth System Science*, 14: 2617 – 2628, Göttingen: Copernicus Publications

BRILLY M., SRAJ M., VIDMAR A., HORVAT A. KOPRIVSEK M. (2012): Hydrologische Studie der Mur, Ljubljana: Universität Ljubljana.

CASAS, M.C., RODRIGUEZ R., NIETO, R., REDANO, A. (2008): The Estimation Of Probable Maximum Precipitation: The Case of Catalonia, *Annals of the New York Academy of Sciences* 1146: 291-302, New York: New York Academy of Sciences

ELIASSON, J. (1994): Statistical Estimates of PMP values. *Nord. Hydrol.* 25: 301-312.

ELIASSON, J. (1997): A Statistical Model for Extreme Precipitation, *Water Resour. Res.* 33: 449-455.

EVERITT, B. (1998): *The Cambridge Dictionary of Statistics*. Cambridge: Cambridge University Press.

HERRNEGGER, M., SENONER, T., KLOTZ, D., WESEMANN, J., NACHTNEBEL, H.P., SCHULZ, K. (2015): *Rainfall-Runoff-Model COSERO: Handbook 2015.2*, Wien: Universität für Bodenkultur Wien, IWHW.

HERSHFIELD, D.M. (1965): Method for estimating probable maximum precipitation, *J.A.M. Waterworks Assoc.* 57, S. 965-972.

KANDA J. (1981): A New Value Distribution with lower and upper Limits for earthquake motions and wind speeds.

MANIAK U. (2010): *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*. 6. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

MERZ R., and BLÖSCHL G. (2008): Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information, *Water Resour. Res.*, 44, W08432, doi:10.1029/2007WR006744.

NACHTNEBEL H.P., FÜRST J., GAMPERLING C., HABERSACK H., HOLZMANN H., LEROCH K., NEUHOLD C., SCHUSTER G. (2007): Studienblätter – Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Wien: Universität für Bodenkultur Wien.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1994): Estimating Bounds on Extreme Precipitation Events, Washington, DC: National Academy Press

PATT H., JÜPNER R. (2013): Hochwasser – Handbuch. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

SCHULZ K., HERRNEGGER M., WESEMANN J., KLOTZ D., SENONER T. (2016): Kalibrierung COSERO – Mur für Pro-Vis, Wien: Universität für Bodenkultur Wien, IWHW.

SLADE J. (1936): An Asymmetric Probability Function, Transactions of American Society of Civil Engineers.

TAKARA K., LOEBIS, J. (1996): Frequency Analysis Introducing Probable Maximum Hydrologic Events: Preliminary Studies in Japan and in Indonesia, in: Proceedings of International Symposium on Comparative Research on Hydrology and Water Resources in Southeast Asia and the Pacific, Yogyakarta, Indonesia, 18–22 November 1996, Indonesian National Committee for International Hydrology Programme, 67–76.

TAKARA K., TOSA K., (1999): Storm and Flood Frequency Analysis Using PMP/PMF Estimates, in: Proceedings of International Symposium on Floods and Droughts, Nanjing, China, 18–20 October 1999, 7–17.

KLOSE B., KLOSE H. (2015): Meteorologie – Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

WEILGUNGI V. (2013): EHYD – Fachkarte Bemessungsniederschlag, Wien: BMLFUW – Abt. VII3 – Wasserhaushalt, Wien.

WOOD E.F., SIVAPALAN M., BEVEN K., BAND L. (1988): Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling, Journal of Hydrology 102, 29 – 47.

6 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Lage der einzelnen Pegelmessstellen (ehyd.gv.at, Abrufung: 08.05.2017)	5
Abbildung 2: Lage der einzelnen Niederschlagsmessstellen (ehyd.gv.at, Abrufung: 08.05.2017)	6
Abbildung 3: Flussdiagramm zur Bestimmung seltener Ereignisse aus Verteilungsfunktionen (MANIAK, 2010, S. 142).....	7
Abbildung 4: Darstellung von Extremwerten mittels jährlicher und partieller Reihen (NACHTNEBEL et. al., 2007, S. 2-4)	10
Abbildung 5: Unterschiedliches Verhalten der EV4, LN4 und TDF Verteilungen bei der Annäherung an die rechtseitige Begrenzung g (BOTERO, B. A., FRANCES, F., 2010, S. 2623)	14
Abbildung 6: Hüllkurve für die Berechnung des km-Faktors für das Einzugsgebiet Mur / Mürz.	22
Abbildung 7: Anpassung des Mittelwertes aufgrund des maximal beobachteten Ereignisses (WMO, 2009, S. 67)	23
Abbildung 8: Anpassung der Standardabweichung aufgrund des maximal beobachteten Ereignisses (WMO, 2009, S. 67).....	23
Abbildung 9: Anpassung des Mittelwerts und der Standardabweichung aufgrund der Länge der Zeitreihe (WMO, 2009, S. 67)	23
Abbildung 10: Flächenreduktionskurven laut WMO für den Westen der vereinigten Staaten (WMO, 2009, S. 69)	23
Abbildung 11: Dauer-Intensitäts_Häufigkeitsdiagramm für eine Niederschlagsmessstelle - Prinzipalskizze (PATT und JÜPNER, S. 25, 2013)	24
Abbildung 12: Summenlinie Extremereignisse aus hochaufgelösten Niederschlagsdaten	25
Abbildung 13: Tagesganglinie der Extremereignisse	26
Abbildung 14: Einzugsgebietsgliederung im COSERO-Modell, Lage der Pegel und Höhenstufen des Einzugsgebiets Mur/Mürz sowie dessen Lage in Österreich (SCHULZ et. al., 2016)	27
Abbildung 15: Modellstruktur COSERO (SCHULZ et. al., 2016)	29
Abbildung 16: Szenario 1: Sommerereignis, Startpunkt 11.Juli 2005	30
Abbildung 17: Szenario 1: Sommerereignis, Startpunkt 22.Juli 2008	30
Abbildung 18: Szenario 2: Frühlingsflut, Startpunkt: 28.April 2006.....	31
Abbildung 19: Szenario 2: Frühlingsflut, Startpunkt: 16.Mai 2006	31
Abbildung 20: Modellstruktur COSERO mit den zu maximierenden Modellzuständen (SCHULZ et. al., 2016)	32
Abbildung 21: Einzugsgebietsaufteilung Szenario: Gewitterfront	33
Abbildung 22: Einzugsgebietseinteilung Szenario: WORST CASE	34

Abbildung 23: km-Hüllkurve - enveloping frequency factor curve	47
Abbildung 24: Beispiel für eine km-Faktor-Kurve, (CASAS et. al., 2008, S. 295)	48
Abbildung 25: Thiessenpolygonflächen je Niederschlagsmessstation	50
Abbildung 26: PMP-Verteilung im Einzugsgebiet	53
Abbildung 27: EV4-Verteilung für den Pegel Gestüthof - Zeitserie 50 Jahre	58
Abbildung 28: LN4-Verteilung für den Pegel Gestüthof - Zeitserie 50 Jahre	58
Abbildung 29: TDF-Verteilung für den Pegel Gestüthof - Zeitserie 50 Jahre	59
Abbildung 30: Unterschiedliches Verhalten der EV4, LN4 und TDF Verteilungen bei der Annäherung an die rechtseitige Begrenzung g (BOTERO, B. A., FRANCES, F., 2010, S. 2623)	59
Tabelle 1: Verwendete Pegelmessstellen an der Mur bzw. Mürz (ehyd.gv.at, Abrufung: 08.05.2017).....	4
Tabelle 2: Niederschlagsmessstellen im Einzugsgebiet der Mur (ehyd.gv.at, Abrufung: 10.05.2017).....	5
Tabelle 3: Eingefügte HQ200-Werte [m ³ /s] für die 30-jährige Zeitreihe	20
Tabelle 4: Eingefügte HQ200-Werte [m ³ /s] für die 40-jährige Zeitreihe	20
Tabelle 5: Eingefügte HQ200-Werte [m ³ /s] für die 50-jährige Zeitreihe	20
Tabelle 6: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m ³ /s, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre	37
Tabelle 7: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m ³ /s, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre	37
Tabelle 8: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m ³ /s, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre	38
Tabelle 9: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m ³ /s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre.....	39
Tabelle 10: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre	39
Tabelle 11: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m ³ /s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre	40
Tabelle 12: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre.....	40
Tabelle 13: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m ³ /s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre	41

Tabelle 14: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre.....	41
Tabelle 15: Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet mit den beobachteten Maximalwerten und der Beobachtungslänge	42
Tabelle 16: Mittelwert und Standardabweichung für die jährlichen Maximalereignisse je Zeitreihe	45
Tabelle 17: Berichtigter Mittelwert bzw. Standardabweichung für die jährlichen Maximalereignisse je Zeitserie	46
Tabelle 18: km-Werte je Station.....	48
Tabelle 19: PMP-Werte in mm/24h je Messstation ohne Flächenabminderung	49
Tabelle 20: Thiessenpolygonflächen in km ² und Abminderungsfaktor je Niederschlagsstation.	51
Tabelle 21: Endergebnisse der PMP-Berechnung im Vergleich zum maximal beobachteten Niederschlagswert je Station.....	52
Tabelle 22: Scheitelabflüsse bei stratiformen Niederschlag im Einzugsgebiet	55
Tabelle 23: Scheitelabflüsse bei Westwetterlage im Einzugsgebiet	56
Tabelle 24: Scheitelabflüsse beim Worst-Case-Szenario im Einzugsgebiet.....	56
Tabelle 25: PMF-Endergebnis in m ³ /s je Pegel	57
Tabelle 26: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m ³ /s, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre	60
Tabelle 27: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m ³ /s, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre	60
Tabelle 28: Ergebnisse HQ100-Kennwerte in m ³ /s, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre	61
Tabelle 29: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m ³ /s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre	62
Tabelle 30: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 30 Jahre.....	62
Tabelle 31: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m ³ /s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre	63
Tabelle 32: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 40 Jahre.....	63
Tabelle 33: Ergebnisse HQ100-Berechnung in m ³ /s modifizierte Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre	64
Tabelle 34: Steigerung in % gegenüber der unveränderten Zeitserie, Beobachtungszeitraum: 50 Jahre.....	64
Tabelle 35: HQ100-Kennwerte in m ³ /s aller Verteilungen: Zeitserie: 30 Jahre	65
Tabelle 36: HQ100 Kennwerte in m ³ /s aller Verteilungen: Zeitserie: 40 Jahre	65
Tabelle 37: HQ100-Kennwerte in m ³ /s aller Verteilungen, Zeitserie: 50 Jahre	66
Tabelle 38: Durchschnittliche Steigerung in % zwischen originaler bzw. modifizierter Zeitreihe	66

Tabelle 39: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Weibull Verteilung 66

Tabelle 40: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Gumbel Verteilung..... 67

Tabelle 41: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Pearson 3 Verteilung..... 67

Tabelle 42: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die LogNormal 3 Verteilung..... 67

Tabelle 43: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die Allgemeine Extremwert Verteilung
..... 67

Tabelle 44: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die EV4 Verteilung 68

Tabelle 45: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die LN4 Verteilung..... 68

Tabelle 46: HQ100-Kennwerte mit Konfidenzintervall für die TDF Verteilung 68

7 R-Packages

- shiny
- dygraphs
- leaflet
- boot
- Imom
- gdata
- scales
- ggthemes
- lattice
- latticeExtra
- plyr
- dplyr
- moments
- lsr
- rmarkdown
- magrittr
- xts
- shinydashboard
- shinyBS
- stats4
- stats