



Retentionspotentialstudie am Inn

Endbericht für Teilprojekt B:

Wellenstatistik mittels Copula-Verfahren

München, im Februar 2018

Technische Universität München
Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement
Prof. Dr.-Ing. Markus Disse
Dr.-Ing. Giorgia Marcolini
Arcisstraße 21
80333 München

unter Mitarbeit des Büros Dr. Winfried Willems
Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik (IAWG)
Dr. Winfried Willems
Alte Landstr. 12-14
85521 Ottobrunn

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	1
2. Datenübernahme und Prüfung	2
2.1.1. Beschreibung der Daten.....	2
2.2. Test auf Trendfreiheit und Homogenität.....	5
3. Allgemeine Einführung in Abhängigkeitsmodelle (Copulas).....	9
4. Variablenauswahl und Parametrisierung von Wahrscheinlichkeitsmodellen	19
4.1. Bestimmung des Ereignisses und zugehöriger Variablen – QV – Modell.....	19
4.2. Bestimmung des Ereignisses und zugehöriger Variablen – QVTB - Modell	20
4.3. Bestimmung des Ereignisses und zugehöriger Variablen – QVTS – Modell	23
4.4. Berechnung der T-jährlichen Abflüsse	24
5. Anwendung von pegelspezifischen Abhängigkeitsmodellen (Copulas).....	26
5.1. Anwendung der Copula: QV Modellierung	26
5.2. Anwendung der Vine-Copula: QVTB-Modellierung	43
5.3. Anwendung der Vine-Copula: QVTS-Modellierung	43
5.4. Erzeugung von Wellen und Rückhaltewirkungslinien.....	50
6. Mehrgipfligkeit und pegelübergreifende Abhängigkeitsmodelle	54
6.1. Mehrgipflige Wellen mit Modellbaustein „Kozeny-Wellenzerlegung“	54
6.2. Pegelübergreifende Abhängigkeitsmodellierung.....	58
7. Vergleich mit den Ergebnissen von Teilprojekt A.....	69
7.1. Vergleich der pegelbezogenen Copulas mit der NA-Modellierung	69
7.2. Vergleich räumlicher Abhängigkeiten bei pegelübergreifender Copula und NA- Modellierung.....	78
8. Zusammenfassung / Schlussfolgerung / Ausblick.....	82
9. Literatur.....	85

1. Einführung

Das Teilprojekt B „Wellenstatistik mittels Copula-Verfahren“ verfolgt das Ziel der Erzeugung von synthetischen Hochwasserbemessungs-Ganglinien mit Hilfe von statistischen, copula-basierten Methoden, wobei sowohl pegelspezifische als auch pegelübergreifende Ansätze umgesetzt werden.

Bei den pegelbasierten Ansätzen werden Hochwasserwellen erzeugt, die sowohl im Hinblick auf die Abflussscheitel als auch im Hinblick auf die Füllen Eigenschaften aufweisen, die den anhand von Messdaten abgeleiteten Charakteristika in Ausmaß, Auftretenswahrscheinlichkeit und Korrelation entsprechen. Bei den pegelübergreifenden Ansätzen werden darüber hinaus zusätzlich auch die räumlichen Korrelationen zwischen den betrachteten Pegeln erhalten. Damit stellen die Methoden Alternativen zu den innerhalb von Teilprojekt A umgesetzten Niederschlag-Abflussmodellierungen dar. Sie werden hier insbesondere zur Validierung des NA-Modells eingesetzt.

Zunächst werden die hydrologischen Datengrundlagen aufbereitet und im Hinblick auf Konsistenz und Homogenität überprüft (Abschnitt 2). Nach einer allgemeinen Einführung in die Copula-Modellierung (Abschnitt 3) werden dann zweidimensionale Copula-Modelle zur gleichzeitigen synthetischen Erzeugung von Abflussscheitel und Volumen sowie vierdimensionale Modelle zur Erzeugung von Abflussscheitel, Volumen, Anstiegszeit und Basisabfluss erstellt. Die im Zuge der vierdimensionalen Modelle erzeugten Variablen dienen dabei als Eingangsdaten für Kozeny-Ansätze zur Erzeugung synthetischer Hochwasserganglinien (Abschnitt 4 und 5). Bei der pegelübergreifenden Modellierung werden die genannten Variablen gleichzeitig für mehrere Inn-Pegel und Nebengewässerpegel generiert und der Wellenablauf entlang des Inns durch zusätzliche Einbindung eines hydrologischen Wellenablaufmodells miterfasst (Abschnitt 6), so dass physikalisch mögliche Hochwasserwellen für das Gewässersystem abgeleitet werden können.

Im abschließenden Abschnitt 7 werden die Ergebnisse der pegelspezifischen und der pegelübergreifenden Methoden schließlich mit Ergebnissen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung verglichen.

Die Arbeiten zu den pegelspezifischen Copulas werden am Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement der TU München umgesetzt, während die Arbeiten zur Mehrgipfligkeit und den pegelübergreifenden Copulas am IAWG Ottobrunn durchgeführt werden.

2. Datenübernahme und Prüfung

2.1.1. Beschreibung der Daten

Um Hochwasserscheitel und -volumina an unterschiedlichen Pegeln des Inns und seiner Nebenflüsse für ausgewählte Jährlichkeiten mit Hilfe des Copula-Verfahrens bestimmen zu können, werden zunächst 18 Abflusszeitreihen von Pegeln aus Bayern und Österreich betrachtet. Wie in Abbildung 1 gezeigt, befinden sich davon sechs Pegel am Inn, elf an Zuflüssen des Inns, sowie der Pegel Hofkirchen an der Donau.

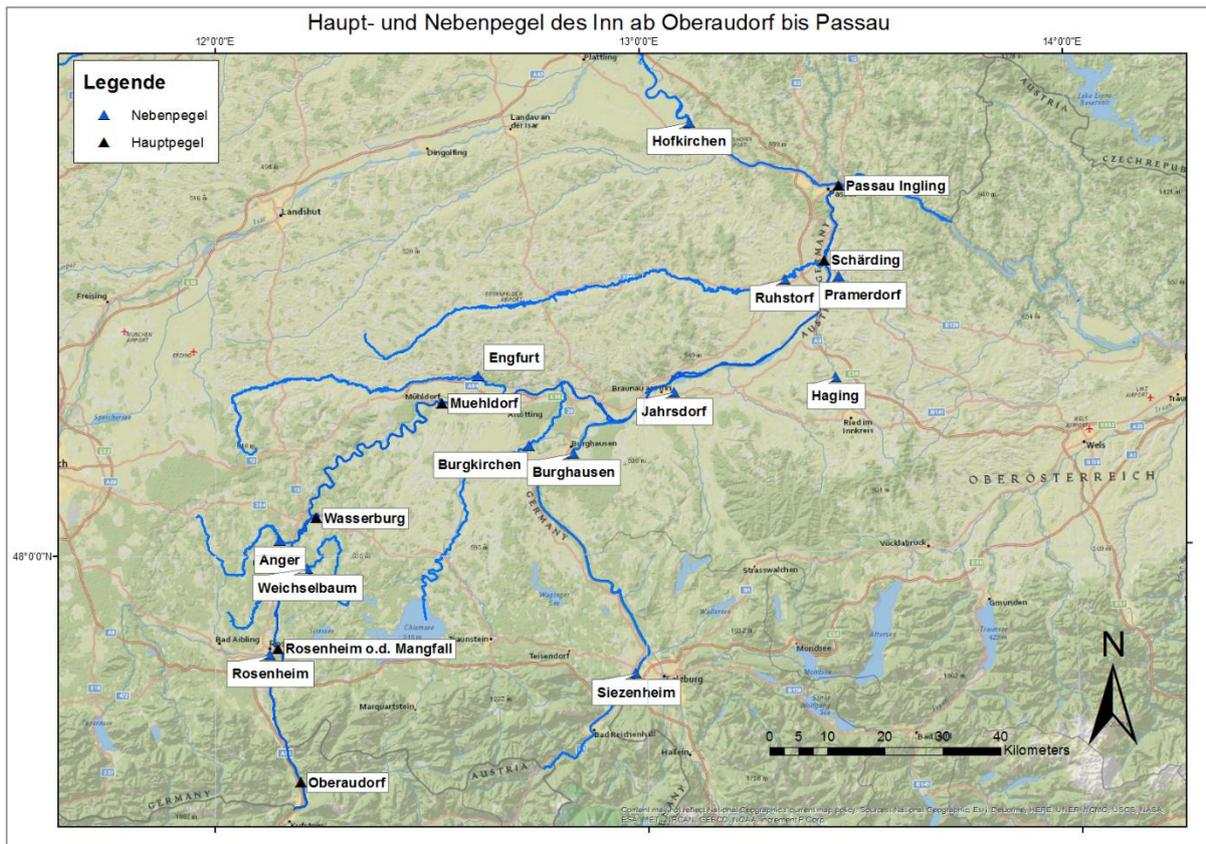


Abbildung 1: Karte der hier betrachteten Pegel

In Abbildung 2 sind die Längen der für die Pegel verfügbaren Zeitreihen dargestellt. Manche Zeitreihen beginnen im Jahr 1900, die meisten jedoch nach 1950. Die österreichischen Zeitreihen beginnen ausschließlich in den Jahren 1976 und 1977 und enthalten Daten bis Ende 2013, während die bayerischen Zeitreihen mit dem Jahr 2014 enden.

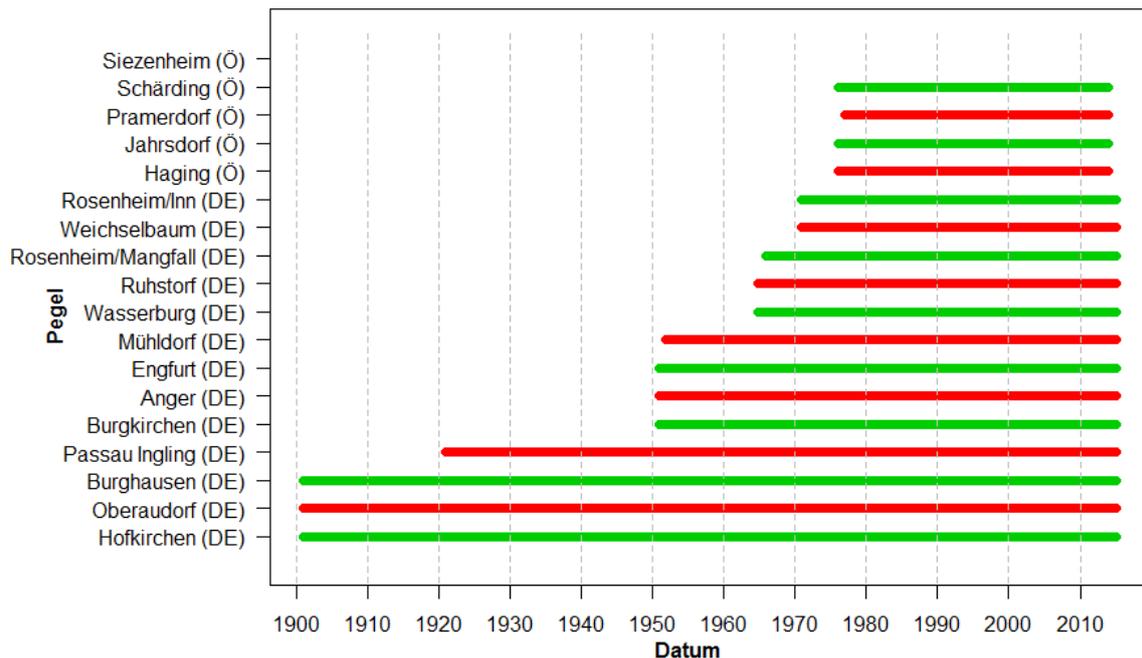


Abbildung 2: Zeitliche Verteilung der beobachteten Zeitreihen

Für die österreichischen Pegel (Siezenheim, Jahrsdorf, Pramerdorf, Schärding und Haging) stehen stündliche Werte zur Verfügung.

Wie Abbildung 3 zeigt, variiert die zeitliche Auflösung der bayerischen Daten. Bis zum 31.10.1970 bestehen sie meist aus Tageswerten. Es folgen bis zum 31.12.2006 diskrete Werte und anschließend 15-Minuten-Werte. In einer Zeitreihe mit diskreten Werten sind nur die Werte enthalten, bei denen der Abfluss sich signifikant vom vorherigen Wert unterscheidet. Um eine komplette Zeitreihe bestehend aus 15-Minuten-Werten zu erhalten, werden die diskreten Werte linear interpoliert. Die Tageswerte werden nach dem in Wagner (2012) beschriebenen Disaggregationsverfahren auf 15 Minutenschrittweite disaggregiert. Dieses Verfahren ist bilanztreu und basiert auf der Erzeugung eines Polynoms dritten Grades für die Beschreibung des Abflusses an einem bestimmten Tag. Ein Disaggregationsbeispiel wird in Abbildung 4 dargestellt. Diese Grafik bezieht sich auf einen Abschnitt der Zeitreihe des Pegels Wasserburg, bei dem Tageswerte und 15-Minuten-Werte verfügbar sind. Die grüne Linie beschreibt den Verlauf der Tageswerte, während die rote Linie die daraus mittels des Disaggregationsverfahrens berechneten 15-Minuten-Werte darstellt. Zum Vergleich sind zudem die interpolierten 15-Minuten-Werte aufgetragen. Es zeigt sich, dass die disaggregierten Daten in ihrem Verlauf den interpolierten Daten ähneln, wenngleich die Scheitel leicht unterschätzt werden.

Sofern die Zeitreihen des LfU in 15-minütiger Auflösung Lücken enthalten haben, werden diese durch lineare Interpolation geschlossen.

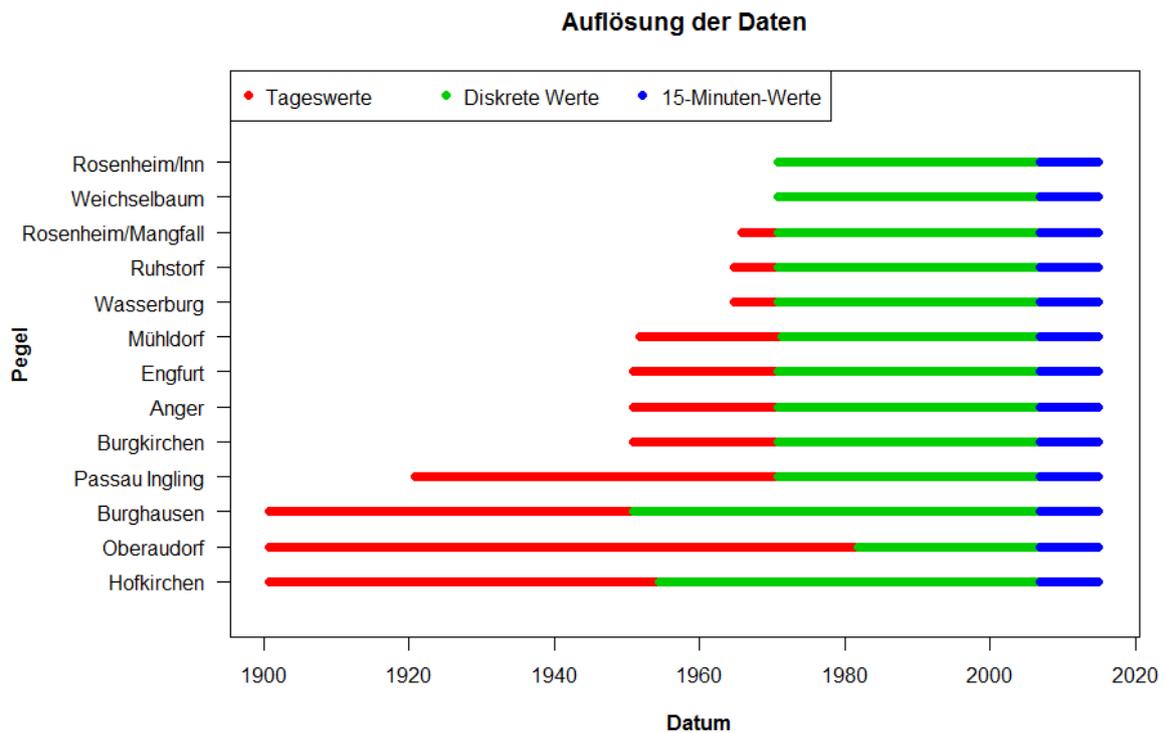


Abbildung 3: Auflösung der LfU-Daten

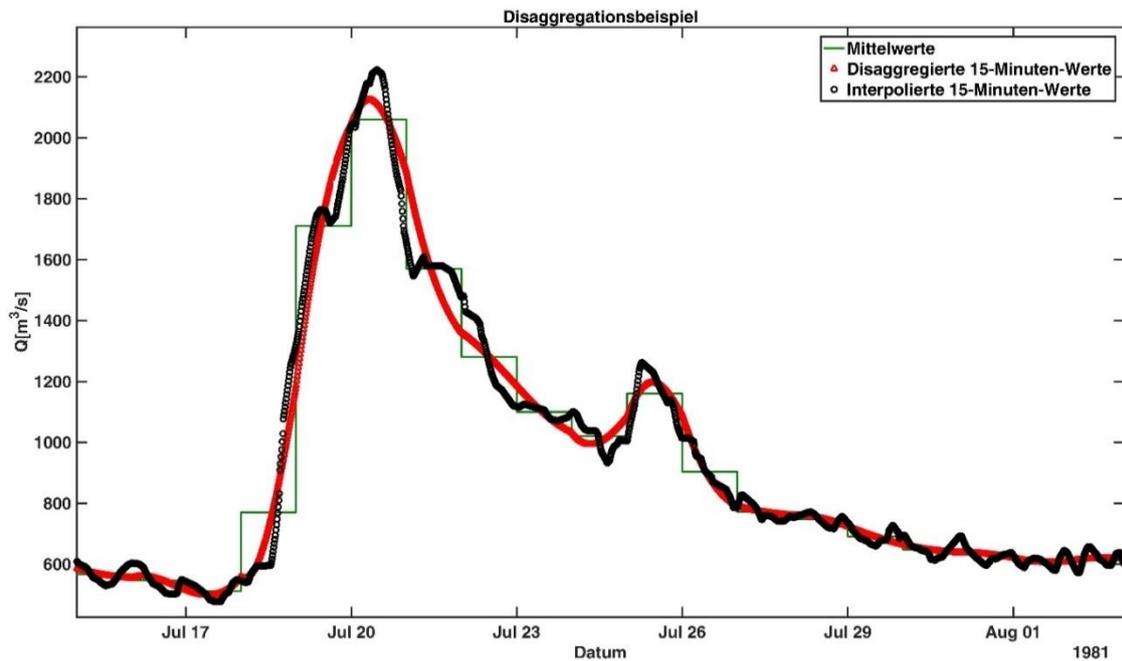


Abbildung 4: Disaggregationsbeispiel bezüglich eines Zeitabschnitts des Pegels Wasserburg am Inn

2.2. Test auf Trendfreiheit und Homogenität

Aus den Zeitreihen jedes Pegels werden Zeitreihen der Jahreshöchstwerte erzeugt.

Die Jahreshöchstwerte werden dann auf Homogenität, Trendfreiheit und Sprungpunkte getestet. Hierzu wird die Statistiksoftware HyStat, Version 4.0.8 (Willems et al. 2014) verwendet.

Folgende Verfahren werden für die Homogenitätsanalyse angewandt:

- Ausreißertest (AUSR)
- Cox-Stuart-Test, Lokation (COXLO)
- Cox-Stuart-Test, Dispersion (COXDI)
- Noether-Test (NOETH)
- Kolmogoroff-Smirnoff-Test (KS)
- Chi2-Test (CHI)
- Kruskal-Wallis-Test, 2 Stichproben (KW2SP)
- Kruskal-Wallis-Test, 3 Stichproben(KW3SP)
- t-Test (TTST)
- F-test (FTST)

Etwaige Trends werden mit den folgenden Testkriterien überprüft:

- Mann-Kendall (MK)
- Trend-Rausch-Verhältnis (TR)
- t-Test des Steigungskoeffizienten (TTST).

Das Trend-Rausch-Verhältnis wird anhand der Verfahren „Minimierung der Fehlerquadratsumme (FQS)“, „Minimierung der Fehlerabsolutsumme (FAS)“ und „Resistente Geradenschätzung (RES)“ ermittelt. Damit resultieren dann 5 verschiedene Tests auf einen möglichen Trend.

Für die Sprunganalyse werden das Bernier-, das Pettit- und das Local-Jump-Verfahren angewandt. Bezüglich weiterer Erklärungen der einzelnen Testverfahren wird auf das Handbuch zu HyStat verwiesen (Willems et al. 2014).

Tabelle 1 bis Tabelle 3 fassen die Ergebnisse der Tests zusammen. Die Ergebnisse derjenigen Tests, bei denen keine Zeitreihe eine Inhomogenität, einen Trend oder einen Sprung aufweist, sind dabei nicht aufgeführt. In der jeweils zweiten Spalte wird der Anteil der bestandenen Tests (Nullhypothese wird nicht verworfen) angegeben.

In einem früheren Stadium der Arbeiten wurden die Zeitreihen der Jahreshöchstwerte aus den Tagesmittelwerten extrahiert und auf Homogenität, Trend- und Sprungfreiheit getestet. Beim Pegel Oberaudorf zeigten sich dabei bei einer großen Zahl der umgesetzten Tests Hinweise auf Inhomogenitäten, so dass diese Messreihe von den weiteren Analysen ausgeschlossen wurde.

Die Ergebnisse für die anderen Messstellen zeigen Tabelle 1 bis Tabelle 3. Man erkennt, dass bei einigen Pegeln mehrere Tests auf Inhomogenitäten, Trends oder Sprünge hinweisen (z. B. Pramerdorf bei den Homogenitätstests oder Hofkirchen bei den Trendanalysen). Auf weitere Ausschlüsse von Pegeln für die weitergehenden Analysen wird jedoch verzichtet, um mit einer möglichst umfassenden Datenbasis arbeiten zu können.

Tabelle 1: Ergebnisse der statistischen Tests auf Homogenität für die Hochwasser (HQ) Zeitreihen

- k.A.v = keine Ausreißer vorhanden
- k.T.L. = kein Trend in Lokation
- Mitt. i. = Mittelwerte identisch
- M.i. = Mediane identisch
- V. i. = Verteilungen identisch
- Var. i. = Varianzen identisch

Reihenname	Homogenitätsanalyse								
	% Best.	AUSR	KW2SP	COXLO	KW3SP	TTST	KS	FTST	CHI
Wasserburg Inn	90%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	Verteilungen nicht identisch
Rosenheim Mangfall	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Weichselbaum Murn	70%	2012	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Varianzen nicht identisch	Verteilungen nicht identisch
Anger Attel	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Burgkirchen Alz	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Ruhstorf Rott	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Rosenheim o.d.Mangfall Inn	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Schärding-Schreibpegel Inn	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Pramerdorf Pram	60%	k.A.v.	Mediane nicht identisch	Aufwärtstrend in Lokation	M.i.	Mittelwerte nicht identisch	V.i.	Var.i.	Verteilungen nicht identisch
Hofkirchen Donau	90%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	Mediane nicht identisch	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Mühldorf Inn	90%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	Verteilungen nicht identisch
Passau-Ingling Inn	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Burghausen Salzach	80%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mittelwerte nicht identisch	V.i.	Varianzen nicht identisch	V.i.
Siezenheim Saalach	80%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Varianzen nicht identisch	Verteilungen nicht identisch
Engfurt Isen	70%	1953	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	Verteilungen nicht identisch	Varianzen nicht identisch	V.i.
Haging Antiesen	100%	k.A.v.	M.i.	k.T.L.	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.
Jahrsdorf Mattig	80%	1984.	M.i.	Aufwärtstrend in Lokation	M.i.	Mitt.i.	V.i.	Var.i.	V.i.

Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Tests auf Trends für die HQ-Zeitreihen

- M-K u.s. = M-K nicht signifikant
- β n.s.v. 0 = β nicht sign. ungleich 0

Reihenname	Trendanalyse		
	% Best.	FQS/TTEST	MK
Wasserburg/Inn	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Mühldorf/Inn	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Passau-Ingling/Inn	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Rosenheim/Mangfall	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Weichselbaum/Murn	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Anger/Attel	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Engfurt/Isen	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Burgkirchen/Alz	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Burghausen/Salzach	80%	β sign. > 0	M-K n.s.
Ruhstorf/Rott	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Rosenheim o.d. Mangfall/Inn	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Siezenheim/Saalach	80%	β sign. > 0	M-K n.s.
Schärding-Schreibpegel/Inn	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Pramerdorf/Pram	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Hofkirchen/Donau	60%	β sign. > 0	M-K signifikant
Haging/Antiesen	100%	β nicht sign. ungleich 0	M-K n.s.
Jahrsdorf/Mattig	80%	β nicht sign. ungleich 0	M-K signifikant

Tabelle 3: Ergebnisse der statistischen Tests auf Sprungpunkte für die HQ-Zeitreihen

- k.S.v. = kein Sprung vorhanden
- S.v. = Sprung vorhanden

Reihenname	Sprunganalyse			
	% Best.	BERN	PETT	LJMP
Wasserburg/Inn	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Mühdorf/Inn	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Passau-Ingling/Inn	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Rosenheim/Mangfall	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Weichselbaum/Murn	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Engfurt/Isen	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Burgkirchen/Alz	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Burghausen/Salzach	67%	S.v. (1988/89)	k.S.v.	k.S.v.
Ruhstorf/Rott	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Siezenheim/Saalach	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Rosenheim o.d. Mangfall/Inn	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Schärding-Schreibpegel/Inn	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Pramerdorf/Pram	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Anger/Attel	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Haging/Antiesen	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.
Hofkirchen/Donau	67%	S.v. (1976/77)	k.S.v.	k.S.v.
Jahrsdorf/Mattig	100%	k.S.v.	k.S.v.	k.S.v.

3. Allgemeine Einführung in Abhängigkeitsmodelle (Copulas)

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die synthetische Erzeugung von Hochwasserwellen für die betrachteten Pegel auf statistischer Grundlage. Für die Beschreibung des Direktabflusses der Hochwasserwelle wird dabei die Kozeny Funktion angewendet:

$$Q_D(t) = Q_{SD} \left(\frac{t}{T_S} \right)^m \exp \left(m \left(1 - \frac{t}{T_S} \right) \right) \quad (1)$$

wobei $Q_D(t)$ der Direktabfluss, Q_{SD} der Direktabflussscheitel, t_A die Anstiegszeit, t die Zeit und m der Formfaktor der Welle ist.

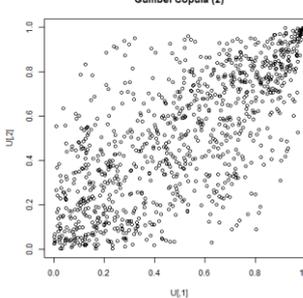
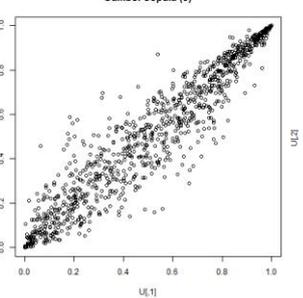
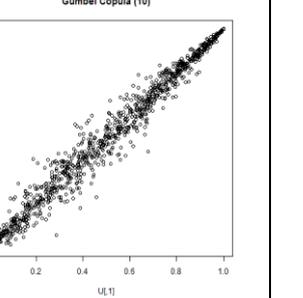
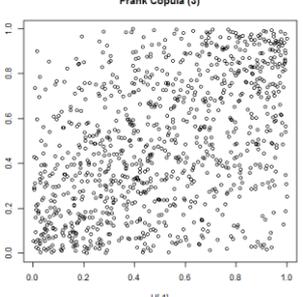
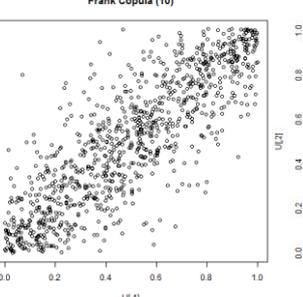
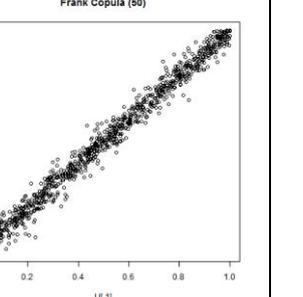
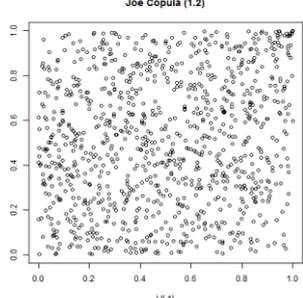
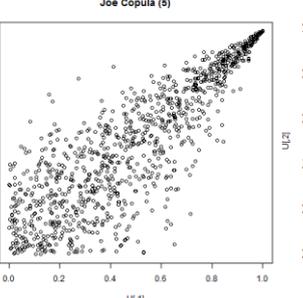
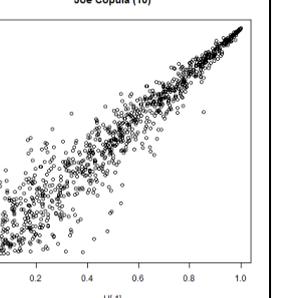
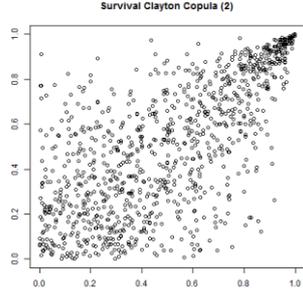
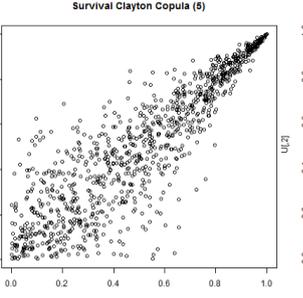
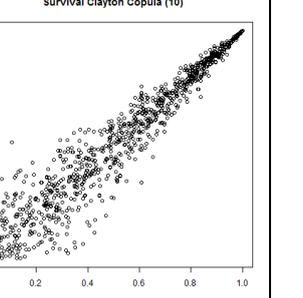
Um die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Direktabflussscheitel, Anstiegszeit, Direktabflussvolumen und Basisabfluss für jeden Pegel zu modellieren, werden hier Copulas verwendet.

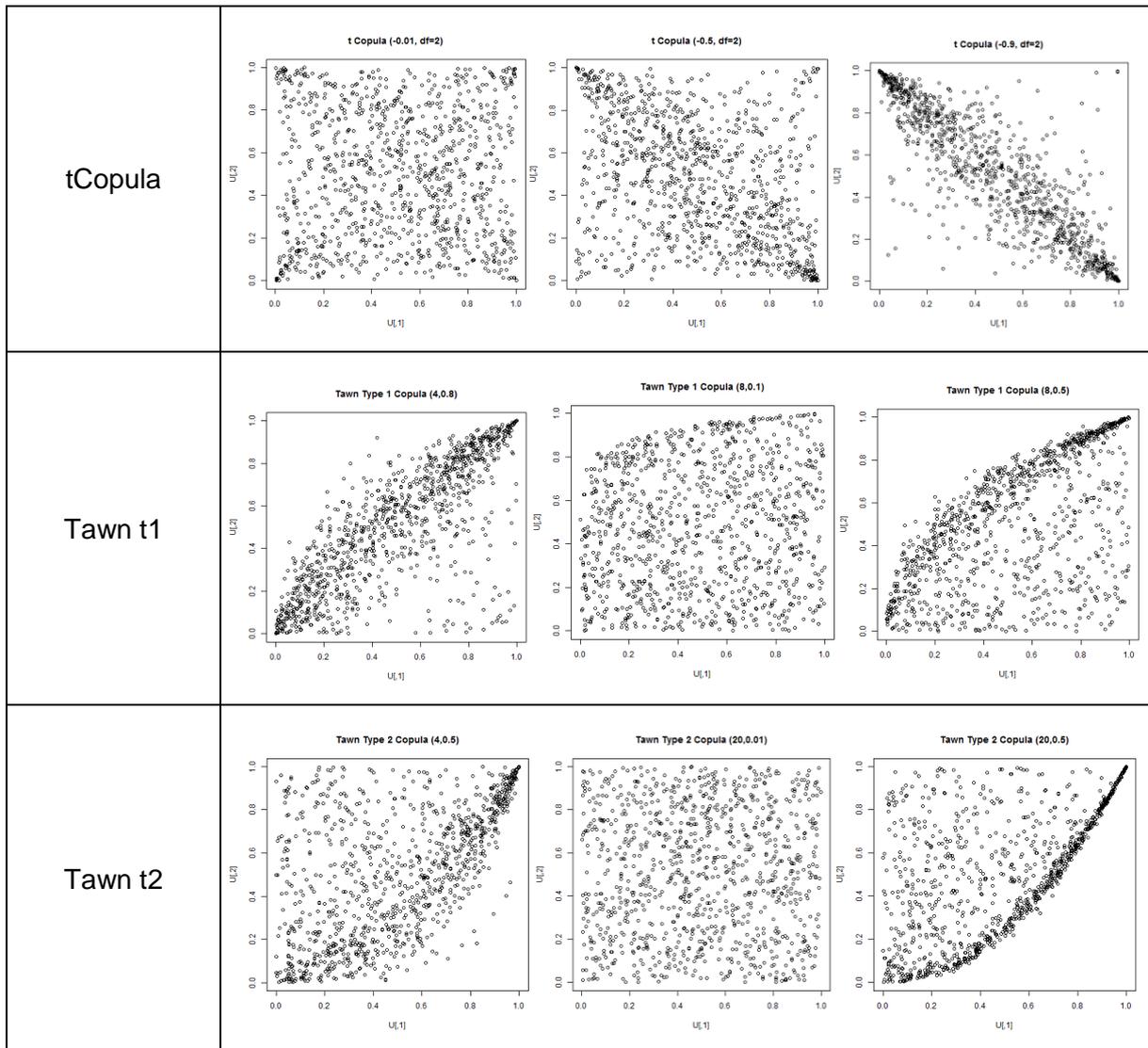
Copulas werden oft für die Erzeugung von synthetischen Daten herangezogen. Sie sind besonders nützlich, weil sie es erlauben, die Randverteilungen (d.h. die Verteilung jeder einzelnen Variablen) und ihre Abhängigkeiten (d.h. ihre Beziehungen zueinander) separat zu modellieren. Dabei werden die Randverteilungen der betrachteten Größen (in unserem Fall z. B. die Anstiegszeit t_A oder der Direktabflussscheitel Q_{SD}) unter Kenntnis der Parameter der jeweiligen Verteilungsfunktion separat modelliert. Die Abhängigkeitsstruktur zwischen den Variablen hingegen wird jeweils durch eine Copula abgebildet. In diesem Sinne ist die Copula eine Beschreibung der wechselseitigen Abhängigkeiten von Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ausgewählter Variablen.

Theoretische Einführungen in das Gebiet der Copulas liefern zum Beispiel die Arbeiten von Joe (1997), Nelson (2006) oder Genest / Favre (2007). Copulas finden bereits verschiedene Anwendungen z. B. in der Versicherungs- und Finanzbranche und seit einigen Jahren auch in der Hydrologie.

Copulas sind als multivariate Verteilungsfunktionen definiert, deren Randverteilungen gleichverteilt über dem Intervall $[0,1]$, also $U(0,1)$, sind. In Tabelle 4 sind einige Beispiele von bivariaten Copulas gezeigt.

Tabelle 4: Beispiel von bivariaten Copulas mit verschiedenen Parametern

Copula	Beispiele		
Gumbel	 <p>Gumbel Copula (2)</p>	 <p>Gumbel Copula (5)</p>	 <p>Gumbel Copula (10)</p>
Frank	 <p>Frank Copula (3)</p>	 <p>Frank Copula (10)</p>	 <p>Frank Copula (50)</p>
Joe	 <p>Joe Copula (1.2)</p>	 <p>Joe Copula (5)</p>	 <p>Joe Copula (10)</p>
Survival Clayton	 <p>Survival Clayton Copula (2)</p>	 <p>Survival Clayton Copula (5)</p>	 <p>Survival Clayton Copula (10)</p>



Eine Copula hat jeweils so viele Dimensionen wie Eingangsgrößen. Um die Beziehung zwischen Direktabflussscheitel, Direktabflussvolumen, Anstiegszeit und Basisabfluss zu modellieren, ist also eine 4-dimensionale Copula zu verwenden. Eine Copula mit d Dimensionen ist demnach eine Verteilungsfunktion auf dem d -dimensionalen Einheitswürfel $[0,1]^d$. Nach Sklar's Theorem (1959) ist jeder multivariaten Verteilung eine Copula zugeordnet, welche eindeutig ist, falls die Randverteilungen kontinuierlich sind. Beispielsweise kann eine 4-dimensionale Copula ($d = 4$) folgendermaßen dargestellt werden:

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), F_3(x_3), F_4(x_4)]$$

wobei $F(\cdot)$ eine multivariate Verteilungsfunktion, $C[\cdot]$ die Copula und $F_i(\cdot)$ die Randverteilungen beschreiben. Da die Copula auf dem Einheitswürfel definiert ist und ihre Randverteilungen auf $[0,1]$ gleichverteilt sind, werden die realen Daten (Beobachtungen) in Pseudo-Observationen transformiert. Pseudo-Observationen werden durch Anwendung der paramet-

risierten Randverteilung oder durch eine Rang-Transformation R der Beobachtungen erzeugt:

$$R(x) := \frac{\text{rang}(x)}{n + 1}$$

wobei x eine Beobachtung des Beobachtungvektors X und n die Länge von X ist.

Copulas erlauben die Darstellung nicht-linearer Abhängigkeitsstrukturen. Dies ist ein Vorteil gegenüber linearen Abhängigkeitsmaßen, welche das Maß eines Zusammenhangs als über alle Beobachtungen konstant ansehen. Tatsächlich kann beobachtet werden, dass die extremen Werte zweier Variablen (besonders große oder besonders kleine Werte) hoch korreliert sind. Diese Eigenschaft wird als *tail dependence* bezeichnet. Wenn man die Korrelation besonders kleiner Werte beschreibt, spricht man von lower tail dependence. Beschreibt man die Korrelation besonders großer Werte, so spricht man von upper tail dependence.

Um beispielsweise die Beziehung zwischen Direktabflussscheitel, Direktabflussvolumen, Anstiegszeit und Basisabfluss zu modellieren, muss eine 4-dimensionale Copula an die Daten angepasst werden. Dabei ist zu beachten, dass nicht jede Copula für mehrdimensionale Fälle definiert werden kann. Die überwiegend benutzten Copulas lassen sich in zwei Familien einteilen: elliptische Copulas und archimedische Copulas.

Elliptische Copulas, wie z. B. die Normal-Copula und die t-Copula, können auch in 4-dimensionaler Form definiert werden. Sie haben allerdings den Nachteil, dass sie symmetrisch sind, was nicht immer das Verhalten der Daten widerspiegelt. Zudem ermöglicht die Normal-Copula keine tail dependence. Sie ist daher als für unsere Zwecke ungeeignet anzusehen.

Archimedische Copulas, wie z. B. die Gumbel-Copula, sind nur in 2-dimensionalen Fällen definiert. Dafür müssen Archimedische Copulas nicht symmetrisch sein (die einzige radial-symmetrisch archimedische Copula ist die Frank-Copula).

Um auch die vorteilhaften Eigenschaften der archimedischen Copulas nutzen zu können, wird hier bei höherdimensionalen Fragen mit Vine-Copulas gearbeitet. Die Grundidee einer Vine-Copula ist es, eine mehrdimensionale Copula als eine schrittweise Kombination von bivariaten Copulas zu erzeugen. Dazu wird die ursprüngliche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in Produkte von weniger-dimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zerlegt.

Im Fall von einer dreidimensionalen Vine-Copula gibt es nur eine mögliche Baumstruktur, wie in Abbildung 5 gezeigt. V_1 , V_2 und V_3 sind die Pseudo-Observationen dreier Variablen, deren Abhängigkeitsstruktur die 3-dimensionale Vine-Copula beschreiben soll. Ihre paarwei-

se Abhängigkeit wird durch die bivariaten Copuladichten c_{12} und c_{23} beschrieben. Die bivariaten Copulas können dann durch die Variable V_2 konditioniert werden. Als Ergebnis erhält man die bedingten Verteilungsfunktionen $F_{1|2}$ und $F_{3|2}$. Im zweiten Schritt werden die bedingten Verteilungsfunktionen auf alle Triplets (x_1, x_2, x_3) in der Stichprobe angewandt. Diese bedingten Beobachtungen sind dann auch auf $[0,1]$ gleichverteilt und werden für die Erzeugung der Copuladichte $c_{13|2}$ herangezogen. Die ganze Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann man dann folgenderweise schreiben:

$$\begin{aligned}
 f_{123}(x_1, x_2, x_3) &= f_1(x_1) f_2(x_2) f_3(x_3) && \text{(Randdichten)} \\
 \times c_{12}(F_1(x_1), F_2(x_2)) c_{23}(F_2(x_2), F_3(x_3)) &&& \text{(nicht bedingte Paare)} \\
 \times c_{13|2}(F_{1|2}(x_1 | x_2), F_{3|2}(x_3 | x_2)) &&& \text{(bedingtes Paar)}
 \end{aligned}$$

Die Wahl der Anordnung und Kombination der Variablen, um bivariate Copulas zu konditionieren, ist nicht eindeutig und kann verschiedene Ergebnisse bringen. Im Allgemeinen kann man sagen, dass verschiedene Vine-Copula Zerlegungen die grundlegende multivariate Verteilung unterschiedlich abschätzen.

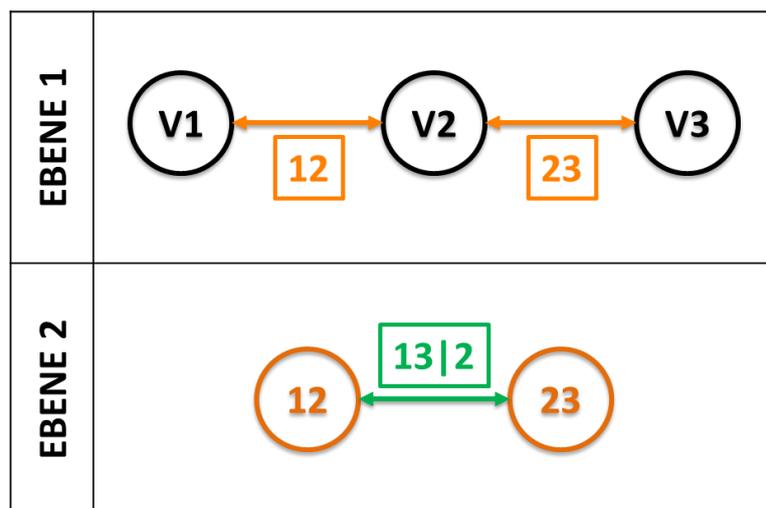


Abbildung 5: Struktur einer 3-dimensionalen Vine-Copula. Die Vierecke zeigen Copulas (so wie z. B. c_{12} oder $c_{13|2}$) und die Kreise zeigen die Pseudo-Observationen, aus denen die Copulas erzeugt wurden (z. B. x_1 oder $F_1(x_1)$)

Die Struktur einer 4-dimensionalen Vine-Copula ist nicht festgelegt. Wenn alle gegenseitigen Abhängigkeiten in Beziehung zu derselben Variable (z. B. Variable V_1) stehen, spricht man von einer kanonischen Vine-Copula (C-Vine; siehe Abbildung 6 für ein Beispiel dieser Struktur für eine 4-dimensionale Copula). Dies entspricht der folgenden Zerlegung der ganzen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion:

$$f_{1234} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot c_{12} \cdot c_{13} \cdot c_{14} \cdot c_{23|1} \cdot c_{24|1} \cdot c_{34|12}$$

wobei $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4$ die Randdichten, $c_{12} \cdot c_{13} \cdot c_{14}$ die nicht bedingte Paare und $c_{23|1} \cdot c_{24|1} \cdot c_{34|12}$ die bedingte Paare sind.

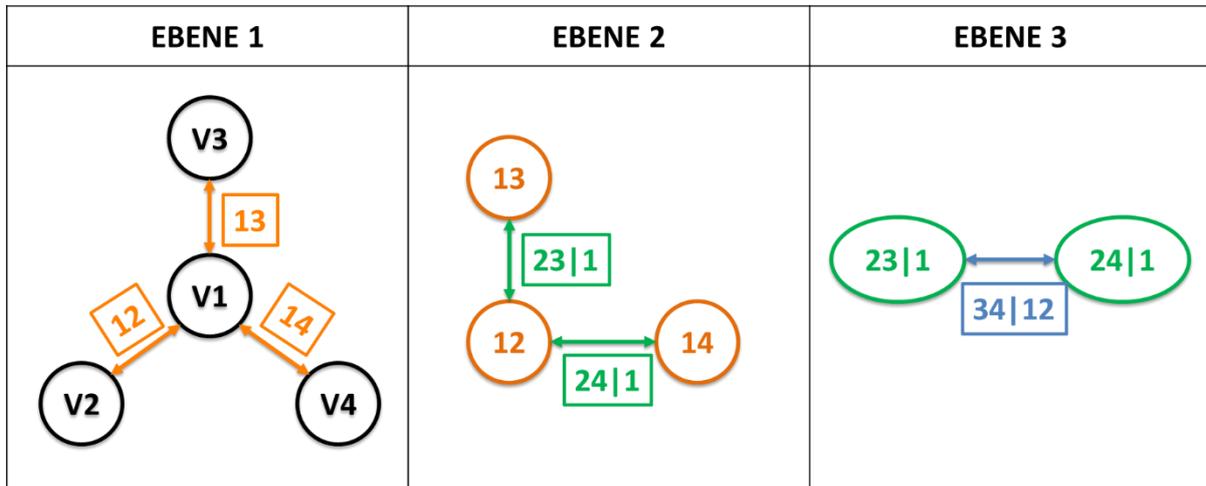


Abbildung 6: Struktur einer 4-dimensionalen kanonischen Vine-Copula. Die Vierecke zeigen Copulas (so wie z. B. c_{12} oder $c_{24|1}$) und die Kreise zeigen die Pseudo-Observationen, aus denen die Copulas erzeugt wurden (z. B. x_1 oder $F_1(x_1)$)

Wenn die Struktur aller Schritte einen Pfad ergibt, d.h. die gegenseitigen Abhängigkeiten nacheinander betrachtet werden, wird die Vine-Copula als drawable Vine-Copula, kurz D-Vine, bezeichnet (siehe Abbildung 7 für ein Beispiel dieser Struktur für eine 4-dimensionale Copula). Dies entspricht der folgenden Zerlegung der ganzen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion:

$$f_{1234} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot c_{12} \cdot c_{23} \cdot c_{34} \cdot c_{13|2} \cdot c_{24|3} \cdot c_{14|23}$$

wobei $f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4$ die Randdichten, $c_{12} \cdot c_{23} \cdot c_{34}$ die nicht bedingten Paare und $c_{13|2} \cdot c_{24|3} \cdot c_{14|23}$ die bedingten Paare sind.

Auch bei der 4-dimensionalen Copula kann die Anordnung der Variablen geändert werden und ist somit nicht eindeutig.

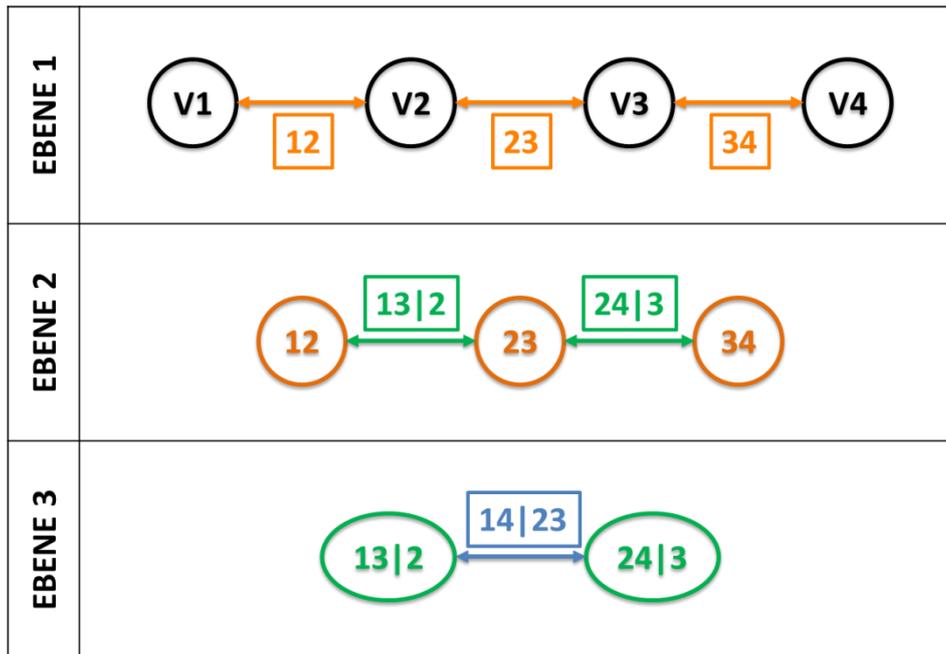


Abbildung 7: Struktur einer 4-dimensionalen drawable Vine-Copula. Die Vierecke zeigen Copulas (so wie z. B. c_{12} oder $c_{24|3}$) und die Kreise zeigen die Pseudo-Observations, auf denen die Copulas gebaut wurden (e.g. x_1 oder $F_1(x_1)$)

Für die Copula Berechnungen werden hier zwei Copula Pakete benutzt: das Paket „copula“ (Hofert et al., 2016) und das Paket „VineCopula“ (Schepsmeier, 2016). Damit werden diejenigen Copulastrukturen (sowohl die Baumstruktur der Vine Copula als auch die für die Vine Copula verwendeten bivariaten Copulas) bestimmt, die am besten auf die Daten abgestimmt sind.

Die Wahl, in welcher Reihenfolge die Variablen betrachtet werden, kann die Wahl der Copulas beeinflussen. In Gräler et al. (2013) wird darauf geachtet, dass die Copula im ersten Schritt zwischen den Variablen erstellt wird, die am stärksten korrelieren. In unserem Fall korrelieren die Variablen Direktabflussscheitel und Direktabflussvolumen sowie Direktabflussvolumen und Anstiegszeit am stärksten. Es wird deshalb darauf geachtet, dass die Abhängigkeitsstruktur zwischen diesen Variablen im ersten Schritt mit der bivariaten Copula modelliert wird.

Um Copulas anwenden zu können, müssen die Zeitreihen frei von Autokorrelation sein. Da die Werte von unabhängigen Ereignissen stammen, die in verschiedenen Jahren aufgetreten sind, ist dies näherungsweise gewährleistet.

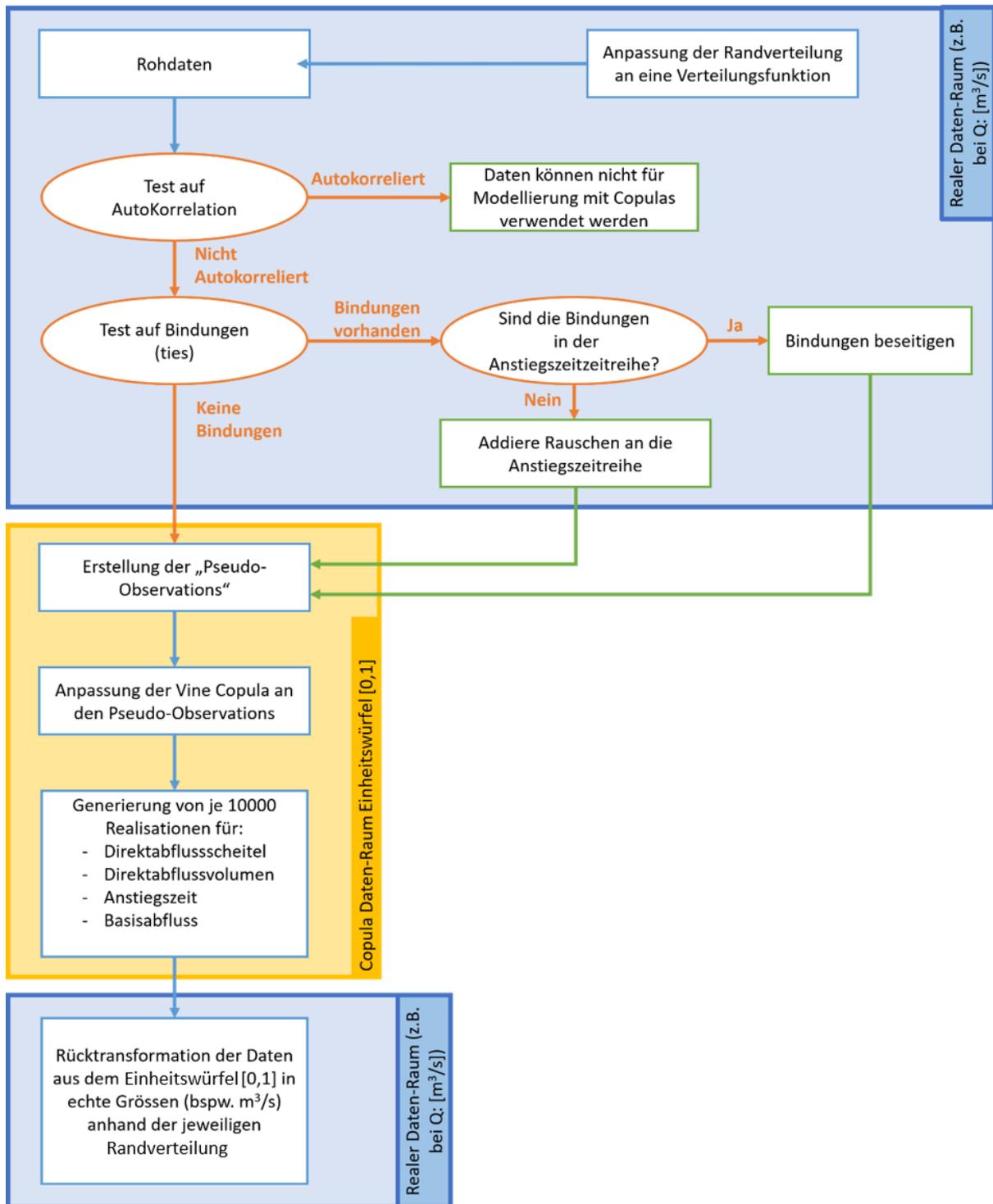


Abbildung 8: Schematischer Arbeitsablauf bei der Anwendung von Copulas

Die Prozedur für die Modellierung der Copulas hat folgende Struktur (vgl. Abbildung 8):

1. **Test auf Autokorrelation:** Die Zeitreihen dürfen nicht autokorreliert sein.
2. **Test auf Bindungen:** Copulas können nicht an Zeitreihen angewendet werden, die gleiche Werte enthalten (in denen Werte doppelt vorkommen). Jede Zeitreihe wird diesbezüglich geprüft. Wenn Bindungen in den Anstiegszeitreihen entdeckt werden, wird ein Rauschen addiert. Wenn Bindungen in den übrigen Zeitreihen entdeckt werden, werden die Bindungen beseitigt.
3. **Korrelation:** Die Korrelation zwischen den verschiedenen Variablen wird mit dem Kendall's Tau und dem Spearman's-Rho- Korrelationsindex berechnet. Diese Indizes basieren auf dem Rang der Daten und sind unabhängig von der Linearität der Beziehung zwischen den Daten. Dies ist von Bedeutung, um die Beziehung zwischen den Variablen zu bestimmen und um zu wissen, welche Paare von Variablen im ersten Schritt der Vine-Copula modelliert werden sollten (wie oben erwähnt).
4. **Vine-Copula Anpassung.** Eine Vine-Copula wird an die Daten mit Hilfe des BIC Index angepasst.
5. **Zufällige Beobachtungen.** 10.000 zufällige (synthetische) Beobachtungen werden anhand der in Punkt 4 angepassten Copula erzeugt.

Um die Copula bestmöglich anzupassen, bedarf es einer möglichst großen Anzahl an Beobachtungen. Dies ist nicht für jeden Pegel der Fall, so dass den Ergebnissen der Copula ein gewisses Unsicherheitsniveau zugrunde liegt, welches nur durch zusätzliche Beobachtungen gesenkt werden kann. In den nächsten Abschnitten werden als Maß der Abhängigkeit von zwei Variablen die Kendall's Tau und die Spearman's Rho-Indizes angewendet.

Diese zwei Rangkorrelationskoeffizienten variieren zwischen -1 (perfekte negative Korrelation) und 1 (perfekte positive Korrelation). Kendall's Tau misst die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Paare von Beobachtungen (x_1, y_1) und (x_2, y_2) konkordant sind, d.h. $x_1 > x_2$ und $y_1 > y_2$ oder $x_1 < x_2$ und $y_1 < y_2$, und ist definiert als

$$\tau = P[(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) > 0] - P[(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) < 0]$$

wobei (X_1, Y_1) und (X_2, Y_2) unabhängige Zufallspaare mit derselben kontinuierlichen Verteilung sind.

Seien F_1 und F_2 die Randverteilungen von X und Y , dann ist der Spearman's Rho Koeffizient als Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen $F_1(X)$ und $F_2(Y)$ definiert.

4. Variablenauswahl und Parametrisierung von Wahrscheinlichkeitsmodellen

In diesem Teilprojekt werden drei verschiedene pegelspezifische Modelle mit einer zwei-beziehungsweise vierdimensionalen Copula modelliert:

- **QV - Modell:** Direktabflussscheitel Q_{MHQ} und Direktabflussvolumen V_{MHQ} (Abbildung 9)
- **QVTB - Modell:** Direktabflussscheitel Q_{SD} , Direktabflussvolumen V_D , Anstiegszeit T_S und Basisabfluss Q_B (Abbildung 10)
- **QVTS - Modell:** Direktabflussscheitel Q_{SD} , Direktabflussvolumen V_D , Anstiegszeit T_S und bewegliche Schwelle Q_S (Abbildung 11)

In diesem Abschnitt werden die Prozeduren für die Auswahl der Variablen präsentiert.

4.1. Bestimmung des Ereignisses und zugehöriger Variablen – QV – Modell

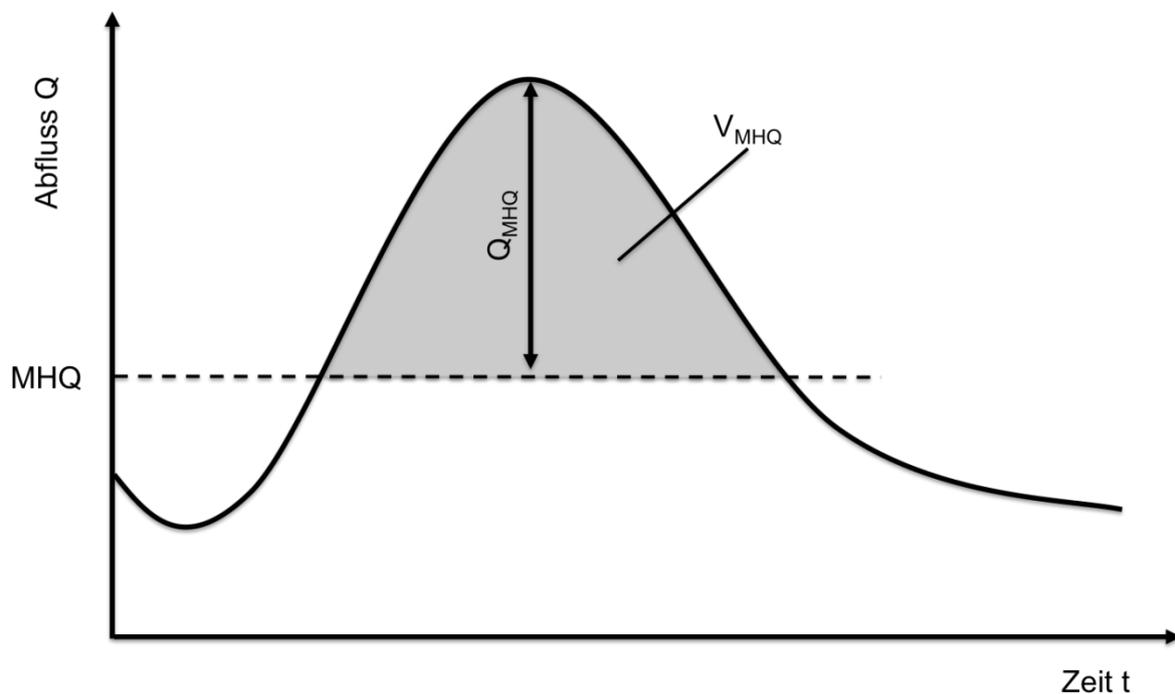


Abbildung 9: Schema der Auswahl der Variablen für das QV-Modell

Für jedes Jahr wird das höchste Ereignis ausgewählt. Der Direktabflussscheitel Q_{MHQ} wird als Differenz zwischen dem Scheitelabfluss und den MHQ des Pegels berechnet (siehe Abbil-

dung 9). Das Direktabflussvolumen V_{MHQ} wird als das Volumen der Welle oberhalb von MHQ bestimmt. Die Ereignisse, deren Scheitel kleiner als MHQ sind, werden nicht berücksichtigt.

4.2. Bestimmung des Ereignisses und zugehöriger Variablen – QVTB - Modell

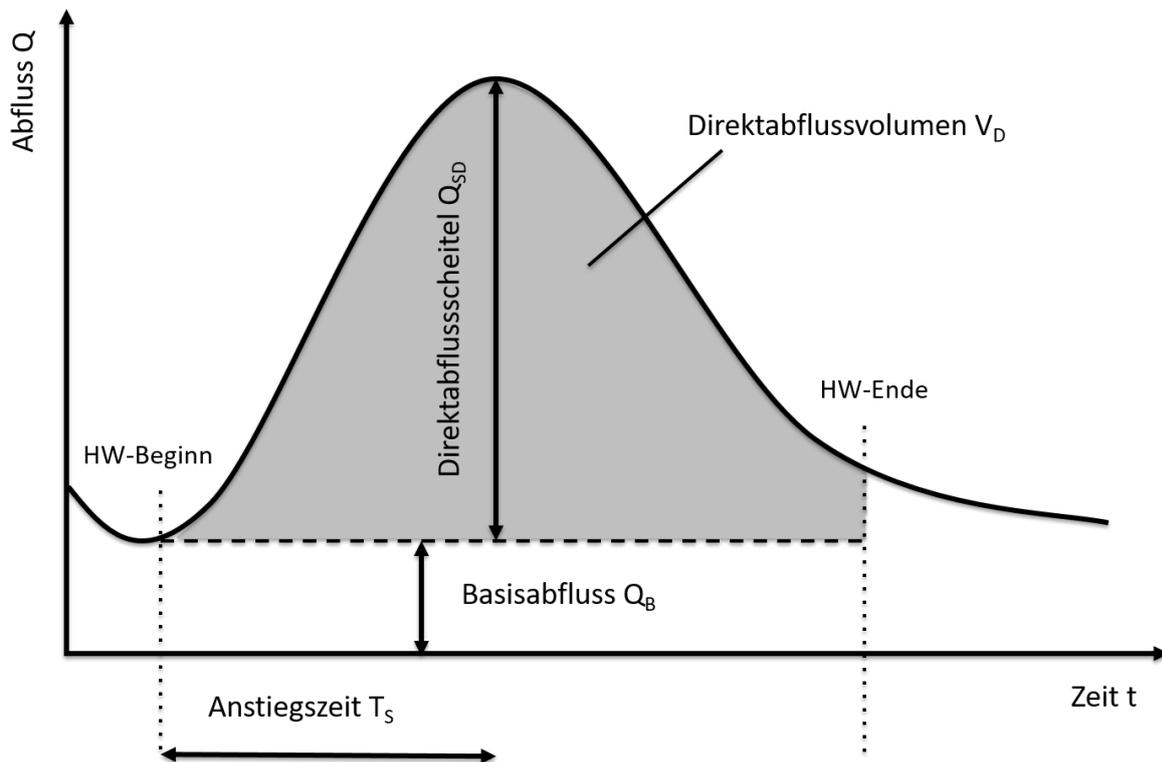


Abbildung 10: Hochwasserwelle mit charakteristischen Parametern

Nachdem die Zeitreihen generiert wurden, wurde das höchste HQ-Ereignis pro Jahr gewählt. Da die zeitliche Auflösung der bayerischen Abflusszeitreihen variiert (tägliche, diskrete und 15-Minuten-Werte), werden die verschiedenen Variablen, die das HQ-Ereignis beschreiben (Direktabflussscheitel, Direktabflussvolumen, Anstiegszeit und Basisabfluss, siehe Abbildung 10), auf unterschiedliche Weisen bestimmt. Die Prozedur ist in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tageswerte. Für die Tageswerte wird folgendes Vorgehen gewählt: da für jeden Monat das Monatsmaximum bekannt ist, wird das Ereignis mit höchstem Tagesscheitelwert innerhalb des Monats mit maximalem Monatsmaximum als jährliches HQ-Ereignis gewählt. Das dazugehörige Monatsmaximum bildet den HQ-Scheitel. Der Ereignisbeginn wird anhand der disaggregierten 15-Minuten-Zeitreihen berechnet und die Unabhängigkeit des Ereignisses von eventuellen benachbarten Scheiteln gemäß Pegelvorschrift (LAWA, 1997) berücksichtigt. Das Ereignisende wird auf der Grundlage von Rückgangsanalysen der Tageswerte-

Zeitreihen bestimmt, wobei der Basisabfluss mit dem R-Paket „lfstat“ (Koffler et al., 2015; Tallaksen und Van Lanen, 2004) berechnet wird. Die Anstiegszeit und das Volumen werden auf Grundlage der Zeitreihen in disaggregierter 15-Minuten-Auflösung berechnet. Als Basisabfluss wird das Minimum zwischen dem ersten und dem letzten Wert des Ereignisses herangezogen.

Diskrete Werte und 15-Minuten-Werte. Die Auswahl der jährlichen HQ-Ereignisse und die Bestimmung der dazugehörigen Variablen für die Beschreibung des Ereignisses verlaufen für die diskreten Werte und die 15-Minuten-Werte ähnlich, sodass sie hier gemeinsam beschrieben werden. Als jährliches HQ-Ereignis wird jeweils das Ereignis mit dem höchsten Scheitel gewählt. Ereignisanfang und –ende werden anhand der Steigung der Abflusswelle, der Unabhängigkeit des Scheitels und der Basisabflusstrennung mithilfe des R-Paketes „EcoHydRology“ (Fuka et al., 2014; Lyne und Hollick, 1979; Nathan und McMahon, 1990) bestimmt. Anstiegszeit, Scheitel und Volumen werden dann auf Basis der interpolierten 15-Minuten-Zeitreihen berechnet. Als Basisabfluss wird das Minimum zwischen dem ersten und dem letzten Abflusswert des Ereignisses herangezogen.

Tabelle 5: Prozedur für die Auswahl und Bestimmung der HQ Ereignisse

	LFU Zeitreihe	
	Tageswerte	Diskrete Werte und 15-Minuten Werte
HQ-Ereignis Auswahl	<ol style="list-style-type: none"> 1. Wähle den Monat mit dem höchsten Monatsmaximum 2. Wähle das Ereignis mit dem höchsten Tageswert innerhalb des in Schritt 1 ausgewählten Monats 	Wähle aus der auf 15 Minuten interpolierten Zeitreihe das Ereignis mit dem höchsten Scheitel
Scheitelwert	Nehme das zugehörige Monatsmaximum	Nehme den Scheitel aus der auf 15 Minuten interpolierten Zeitreihe
Ereignisbeginn	Beginn aus den auf 15 Minuten disaggregierten Werten	Beginn aus den auf 15 Minuten interpolierten Werten
Ereignisende	Ende aus den Tageswerten auf Basis der Basisabflusstrennung von R-Paket „lfstat“	Ende aus den auf 15 Minuten interpolierten Werten auf Basis der Basisabflusstrennung von R-Paket „EcoHydRology“
Anstiegszeit	Anstiegszeit aus der auf 15 Minuten disaggregierten Zeitreihe	Anstiegszeit aus der auf 15 Minuten interpolierten Zeitreihe
Volumen	Volumen aus der auf 15 Minuten disaggregierten Zeitreihe	Volumen aus der auf 15 Minuten interpolierten Zeitreihe
Basisabfluss	Nehme aus der auf 15 Minuten disaggregierten Zeitreihe das Minimum zwischen dem ersten und dem letzten Wert des Ereignisses	Nehme aus der auf 15 Minuten interpolierten Zeitreihe das Minimum zwischen dem ersten und dem letzten Wert des Ereignisses

Trotz des Versuchs, ein objektives Kriterium für den Beginn und das Ende eines Hochwasserereignisses festzulegen, erwies sich eine visuelle Überprüfung der Ergebnisse sowie die Anpassung einiger Ereignisse als unumgänglich.

4.3. Bestimmung des Ereignisses und zugehöriger Variablen – QVTS – Modell

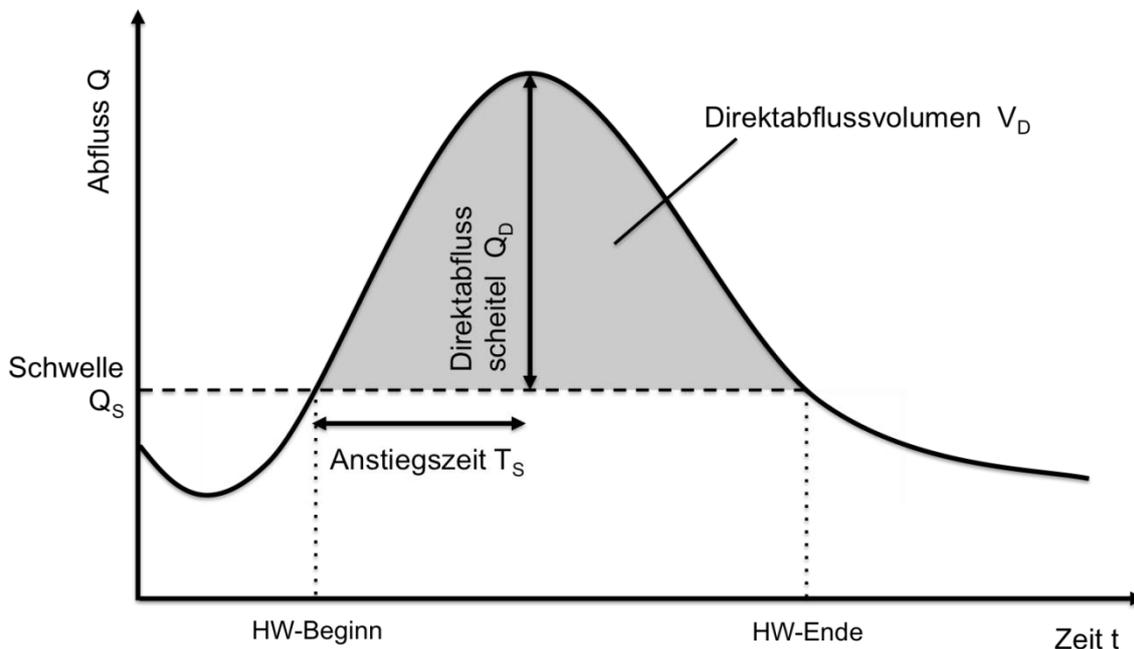


Abbildung 11: Schema der Auswahl der Variablen für das QVTS-Modell

Für die Bestimmung der vier Variablen Direktabflussscheitel Q_{SD} , Direktabflussvolumen V_D , Anstiegszeit T_S und bewegliche Schwelle Q_S (siehe Abbildung 11) wird folgende Methodik angewandt.

Der erste Schritt ist die Ermittlung der Schwelle Q_S . Diese wird für jedes Ereignis individuell festgelegt. Die Schwelle Q_S wird als der niedrigste Abfluss definiert, bei dem der mittlere prozentuelle absolute Fehler zwischen der Rückhaltewirkungslinie der gemessenen Welle und der Rückhaltewirkungslinie der angepassten Kozeny-Welle kleiner als 20 % ist. Dieser Wert wird empirisch festgelegt.

Die Prozedur verläuft folgendermaßen: Verschiedene Schwellen werden ausgewählt. Für jede Schwelle wird eine Kozeny-Funktion an die gemessene Welle angenähert. Um besser die Form der Welle annähern zu können, werden in der Kozeny-Funktion zwei verschiedene Formfaktoren für den ansteigenden Teil und für den absteigenden Teil der Welle benutzt. Die Rückhaltewirkungslinien für die gemessene und für die angepasste direkte Welle werden bestimmt und deren mittlere prozentuale absolute Fehler werden berechnet. Solange der Fehler kleiner als 20% ist, wird die Schwelle gesenkt, sonst wird die Schwelle erhöht. Das Verfahren stoppt, sobald die niedrigste Schwelle, die die oben beschriebene Bedingung erfüllt, gefunden ist.

Nachdem die Schwelle festgelegt ist, werden der Direktabflussscheitel Q_{SD} , Direktabflussvolumen V_D und Anstiegszeit T_S , wie Abbildung 11 gezeigt, berechnet. Wie schon in Abschnitt 4.2 erwähnt, wird für die disaggregierten Daten der LfU-Zeitreihen der Direktabflussscheitel als Differenz zwischen dem Monatsmaximum und der Schwelle ermittelt.

4.4. Berechnung der T-jährlichen Abflüsse

Aus den jährlichen Hochwasserabflüssen HQ werden Quantile vorgegebener Jährlichkeiten berechnet.

Eine geeignete Verteilungsfunktion für beobachtete Jahresserien von Extremabflüssen in Österreich und Deutschland ist die generalisierte Extremwertverteilung (GEV). Neben dieser werden zusätzlich auch die Gumbelverteilung (GUM) und die generalisierte Paretoverteilung (GPA) getestet. Gewählt wird diejenige Verteilung, welche das Akaike-Informationskriterium minimiert. Die Parameter werden mit drei verschiedenen Verfahren abgeschätzt: dem Momente-Verfahren (MO), dem L-Momente-Verfahren (LM) und dem Maximum-Likelihood-Verfahren (ML). Die Verteilungen werden mit dem Programm HyStat ausgewählt. Die Quantile werden dann mit dem R-Paket „extRemes“ (Gilleland / Katz, 2016) berechnet, da im weiteren Projektverlauf Quantilberechnungen für sehr lange, mit HyStat nicht verarbeitbare Zeitreihen umgesetzt werden müssen. Die Quantile werden für die Jährlichkeiten von 2, 5, 10, 20, 50 und 100 Jahren berechnet. Wie in DVWK (1979) dargestellt, sind die Quantile für die 2-jährliche und 5-jährliche Wiederholungsspanne häufiger zu erwarten, als es eine Analyse der jährlichen Höchstwerte erwarten lässt. Deswegen werden die Quantile der Jährlichkeiten $T_n=2$ und $T_n=5$ gemäß DVWK (1999) korrigiert.

In Tabelle 6 werden die Abflüsse vorgegebener Jährlichkeiten für jeden Pegel mit den Verteilungen, die für ihre Berechnung angewandt wurden, dargestellt. Die generalisierte Extremwertverteilung erweist sich in den meisten Fällen als die geeignetste Verteilung.

Die prozentuale Abweichung der berechneten Quantile von den amtlichen Werten ist ebenfalls in Tabelle 6 wiedergegeben. In den meisten Fällen ist diese kleiner als die vom bayerischen Landesamt für Umwelt angegebene Unsicherheitsspanne. Die größte Abweichung kann man beim Pegel Burgkirchen feststellen. Möglicherweise ist das auf die unregelmäßigen Ausleitungen in den Alzkanal zurückzuführen, die bei den amtlichen Berechnungen gesondert berücksichtigt wurden.

Tabelle 6: T-jährliche Scheitelabflüsse der beobachteten Zeitreihen und deren prozentuale Abweichung im Vergleich mit amtlichen Jährlichkeiten (soweit vorhanden). Die ersten drei Buchstaben des Verteilungsnamens legen die Verteilung fest. GEV steht für generalisierte Extremwertverteilung, GUM für Gumbelverteilung, GPA für generalisierte Paretoverteilung. Die letzten zwei Buchstaben geben die Methode an, mit der die Parameter abgeschätzt wurden: LM steht für den L-Momente-Verfahren, MO steht für das Momente-Verfahren

Pegel ID	Pegel	Gewässer	Verteilung	HQ ₂ (m ³ /s)	HQ ₅ (m ³ /s)	HQ ₁₀ (m ³ /s)	HQ ₂₀ (m ³ /s)	HQ ₅₀ (m ³ /s)	HQ ₁₀₀ (m ³ /s)
18209000	Rosenheim	Mangfall	GEVLM	175 (0%)	237 (-1%)	287 (3%)	351 (3%)	448 (9%)	531 (11%)
18346000	Anger	Attel	GEVLM	42 (-1%)	57 (3%)	67 (0%)	79 (-2%)	94 (-10%)	106 (-11%)
18322002	Weichselbaum	Murn	GEVLM	25 (-3%)	32 (7%)	37 (0%)	44 (-3%)	53 (-3%)	61 (-6%)
18003004	Wasserburg	Inn	GEVLM	1514 (0%)	1864 (7%)	2108 (5%)	2384 (8%)	2741 (5%)	3010 (6%)
18384509	Engfurt	Isen	GEVLM	84 (3%)	109 (-1%)	127 (-6%)	148 (-7%)	178 (-6%)	202 (-8%)
18008008	Passau-Ingling	Inn	GEVMO	3009 (0%)	3716 (0%)	4258 (0%)	4920 (0%)	5866 (-2%)	6648 (-2%)
10088003	Hofkirchen	Donau	GEVLM	1964 (0%)	2353 (2%)	2608 (-3%)	2878 (-7%)	3204 (-13%)	3432 (-16%)
18606000	Burghausen	Salzach	GEVMO	1425 (-2%)	1812 (0%)	2115 (-2%)	2492 (0%)	3042 (1%)	3507 (6%)
18408200	Burgkirchen	Alz	GEVLM	183 (-43%)	252 (-28%)	302 (-26%)	361 (-25%)	439 (-23%)	501 (-21%)
18004506	Mühldorf	Inn	GEVLM	1117 (-3%)	1477 (-2%)	1736 (0%)	2036 (4%)	2437 (6%)	2747 (6%)
18001508	Rosenheim o.d. Mangfall	Inn	GEVLM	1307 (-7%)	1597 (4%)	1807 (3%)	2051 (8%)	2380 (11%)	2636 (15%)
18808004	Ruhstorf	Rott	GEVLM	127 (16%)	166 (4%)	193 (-4%)	223 (-11%)	262	291
206201	Schärding-	Inn	GEVLM	2879	3625 (-2%)	4194 (-2%)	4888 (0%)	5877 (0%)	6692 (0%)
203570	Siezenheim	Saalach	GPALM	434	621	766 (+18%)	901 (+20%)	1078 (+13%)	1201 (+14%)
204867	Pramerdorf	Pram	GEVLM	129	162	184	207	234	254
204750	Haging	Antiesen	GEVLM	74	103	126	154	196	232
204677	Jahrsdorf	Mattig	GPALM	20	27	34	42	56	69

5. Anwendung von pegelspezifischen Abhängigkeitsmodellen (Copulas)

Für die Pegel Wasserburg und Mühldorf wird das Hochwasserereignis aus dem Jahr 1964 nicht berücksichtigt, da es sich dabei um ein Ereignis mit relativ niedrigem Abflussscheitel bei gleichzeitig sehr großen durch die lange Dauer bedingtem Volumen handelt, das nicht repräsentativ für das Verhalten dieser beiden Pegel ist.

5.1. Anwendung der Copula: QV Modellierung

Die QV-Modellierung wird für alle Pegel durchgeführt. In Tabelle 7 wird für jeden Pegel die schließlich gewählte QV-Copula gezeigt. Die Auswahl der Copula aus einer größeren Zahl von möglichen Modellen basiert auf dem Bayesschen Informationskriterium. In Tabelle 7 werden auch die Kendall's Tau und die Spearman's Rho der beobachteten und der simulierten Daten aufgeführt. Man erkennt, dass sich die Korrelationskoeffizienten der simulierten Daten sehr gut denjenigen der beobachteten Daten annähern. Dies ist wichtig, weil das ein Zeichen dafür ist, dass die Abhängigkeitsstruktur der simulierten Daten die Abhängigkeitsstruktur der beobachteten Daten gut approximiert.

Tabelle 7: Für die Modellierung der QV-Beziehung angewendete Copulas inklusive der Korrelationskoeffizienten von beobachteten und simulierten Daten

Pegel	QV-Copula	Korrelation der beobachteten Daten		Korrelation der simulierten Daten	
		τ_K	ρ_S	τ_K	ρ_S
Anger	Survival Gumbel (7.62)	0.88	0.97	0.87	0.98
Burghausen	Gaussian (0.98)	0.89	0.98	0.87	0.98
Burgkirchen	BB7 (3.99, 6)	0.8	0.91	0.77	0.92
Engfurt	Gumbel (4.98)	0.82	0.95	0.80	0.94
Haging	BB7 (3.81, 6)	0.69	0.80	0.76	0.91
Hofkirchen	BB1 (3.27, 3)	0.87	0.97	0.88	0.98
Jahrsdorf	Survival Gumbel (5.57)	0.86	0.95	0.82	0.96
Mühdorf	Gaussian (0.97)	0.88	0.98	0.85	0.97
Passau Ingling	Survival Gumbel (8.38)	0.91	0.98	0.88	0.98
Pramerdorf	Joe (10.61)	0.85	0.95	0.83	0.96
Rosenheim	Gumbel (6.48)	0.87	0.96	0.84	0.97
Rosenheim OD Mangfall	Surv. Gumbel (6.97)	0.88	0.98	0.85	0.97
Ruhstorf	Survival Gumbel (5.39)	0.82	0.94	0.81	0.95
Schärding	Gumbel (4.93)	0.85	0.95	0.80	0.95
Siezenheim	BB1 (5, 3.74)	0.92	0.99	0.92	0.99
Wasserburg	Survival Gumbel (8.94)	0.92	0.98	0.89	0.98
Weichselbaum	Gumbel (4.35)	0.75	0.91	0.77	0.92

In Abbildung 12 bis Abbildung 28 wird für jeden Pegel eine Grafik gezeigt, in der die gemessenen Pseudobeobachtungen (rote Punkte) und die simulierten Pseudobeobachtungen (schwarze Kreise) verglichen werden. Auf der x-Achse werden die Q-Werte der Pseudobeobachtungen gezeigt, während auf der y-Achse die V-Werte der Pseudobeobachtungen dar-

gestellt werden. Die Abbildungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung im Hinblick auf die Abhängigkeitsstrukturen zwischen den beobachteten und den gemessenen Daten. Interessant sind dabei die Asymmetrien in den Abhängigkeitsstrukturen: Während zumeist stärkere Abhängigkeiten ausgewiesen werden, wenn Q und V klein sind (Anger, Burgkirchen, Hofkirchen, Jahrsdorf, Passau-Ingling, Rosenheim o.d.M., Ruhsdorf, Siezenheim, Wasserburg), finden sich stärkere Abhängigkeiten im oberen Wertebereich von Q und V seltener (besonders ausgeprägt bei Pramerdorf, auch bei Rosenheim und Schärding und Weichselbaum). Physikalisch-prozessbezogen sind straffere Abhängigkeiten im oberen Wertebereich sicher schwerer erklärbar und könnten möglicherweise auch durch kleine Stichproben bedingt sein (vgl. Abbildung 2).

Anger

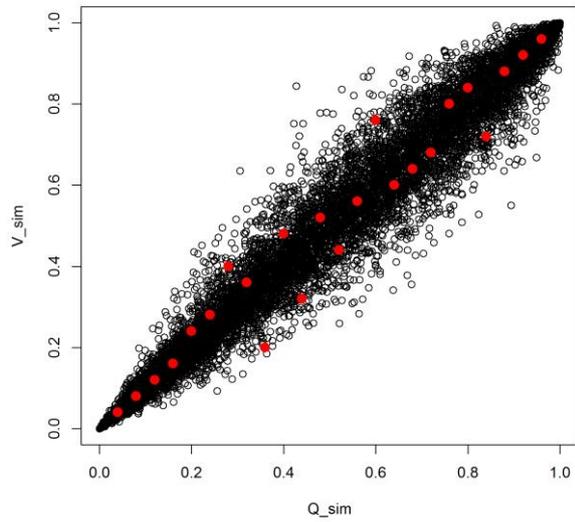


Abbildung 12: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Anger

Burghausen

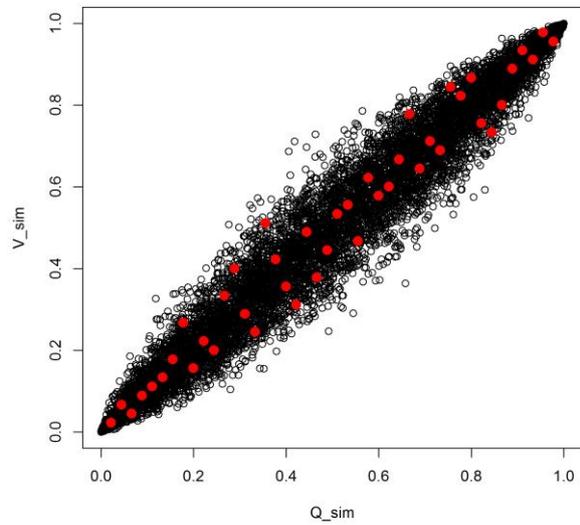


Abbildung 13: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Burghausen

Burgkirchen

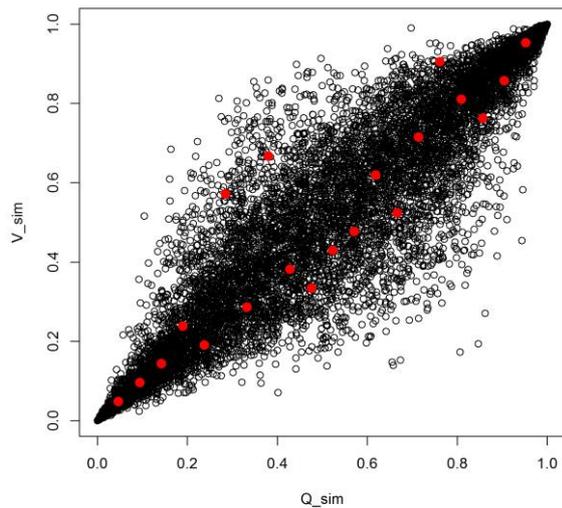


Abbildung 14: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Burgkirchen

Engfurt

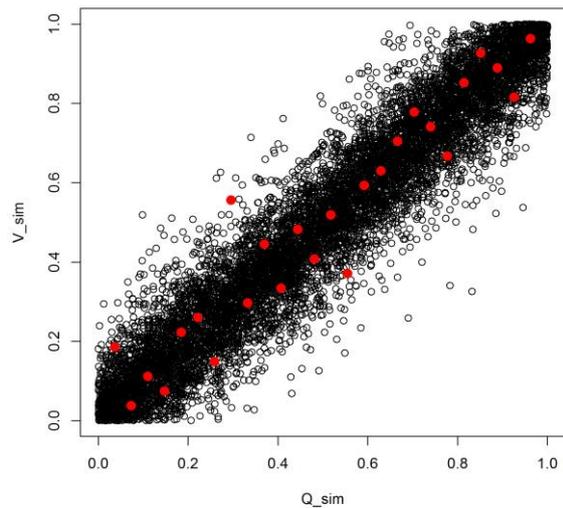


Abbildung 15: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Engfurt

Haging

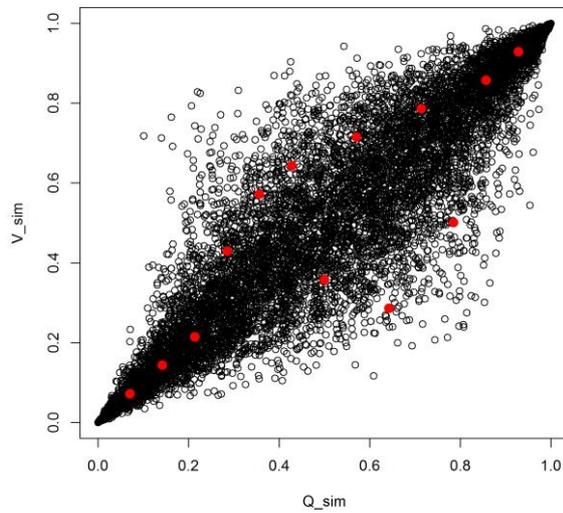


Abbildung 16: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Haging

Hofkirchen

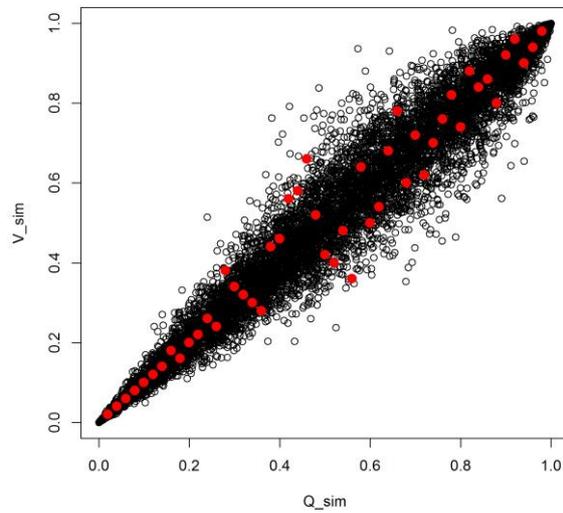


Abbildung 17: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Hofkirchen

Jahrsdorf

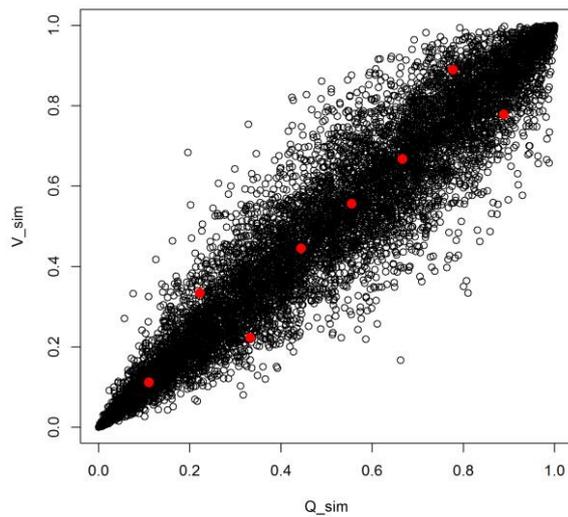


Abbildung 18: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Jahrsdorf

Mühdorf

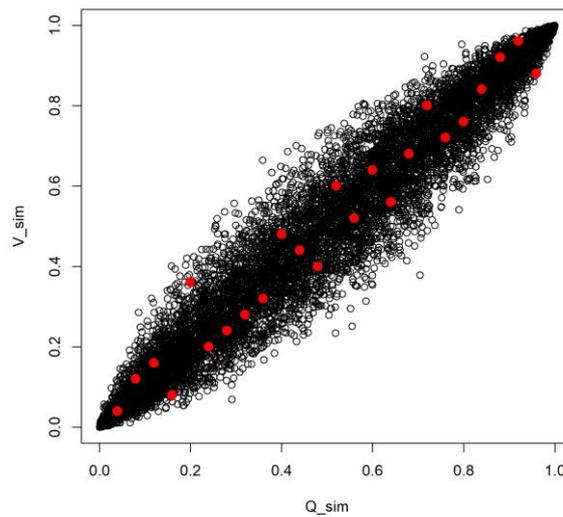


Abbildung 19: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Mühdorf

Passau-Ingling

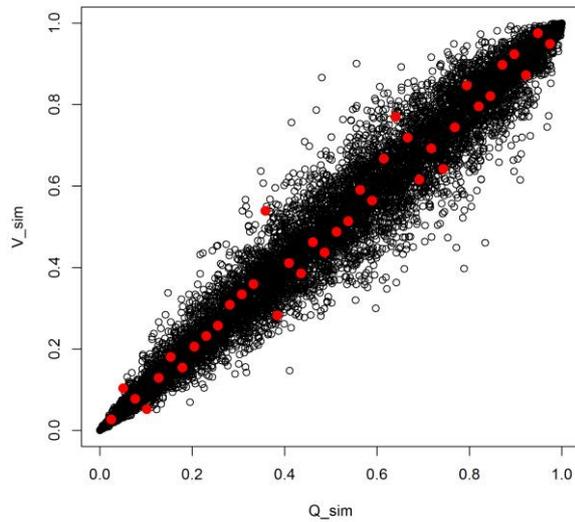


Abbildung 20: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Passau-Ingling

Pramerdorf

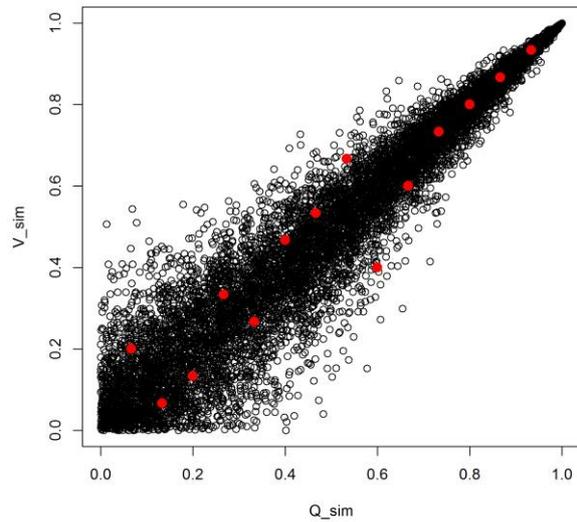


Abbildung 21: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Pramerdorf

Rosenheim

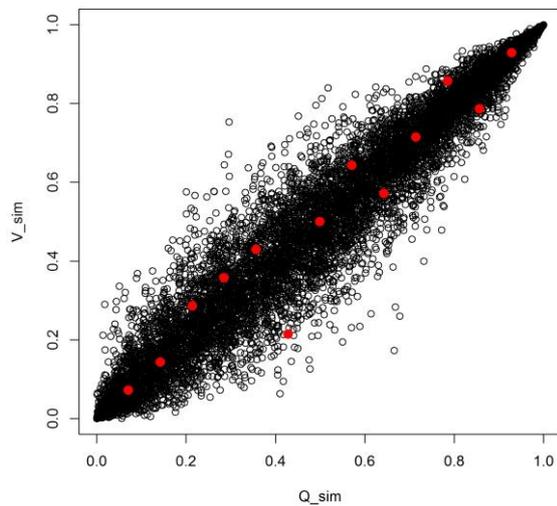


Abbildung 22: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Rosenheim

Rosenheim o.d. Mangfall

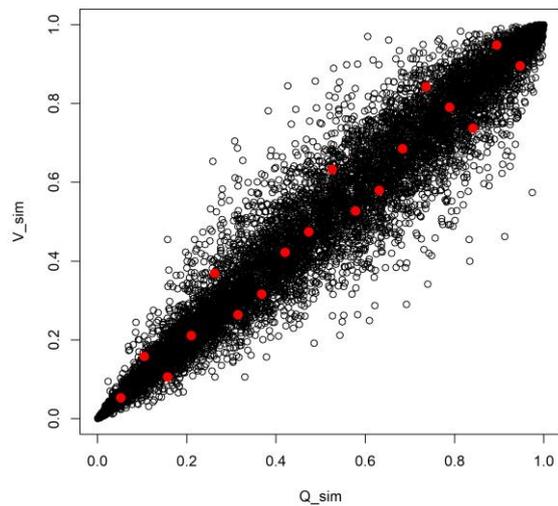


Abbildung 23: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Rosenheim o.d. Mangfall

Ruhstorf

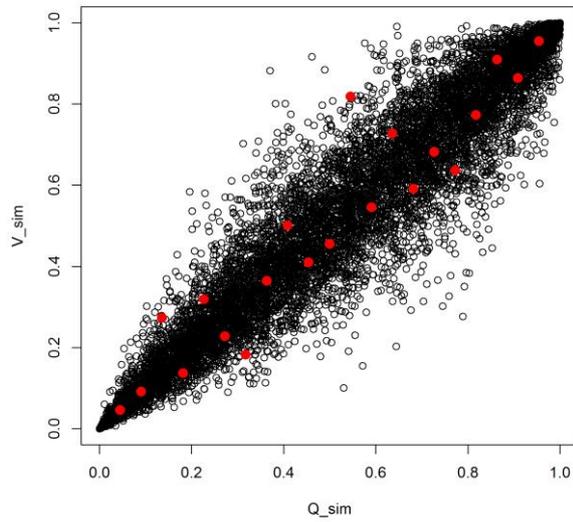


Abbildung 24: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Ruhstorf

Schärding

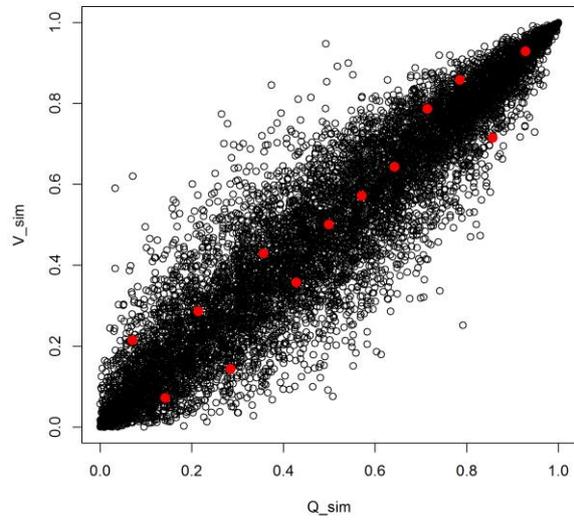


Abbildung 25: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Schärding

Siezenheim

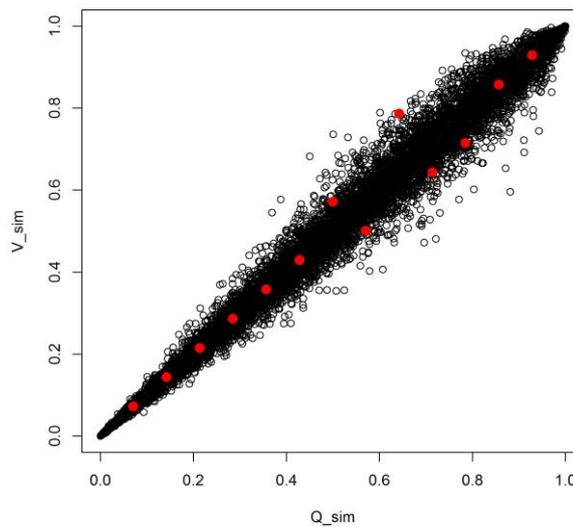


Abbildung 26: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Siezenheim

Wasserburg

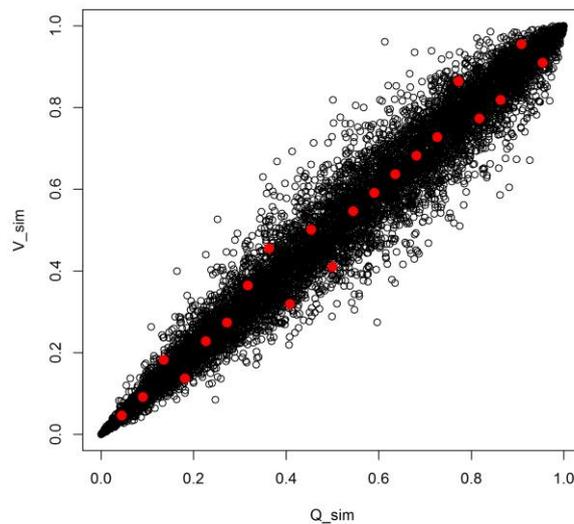


Abbildung 27: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Wasserburg

Weichselbaum

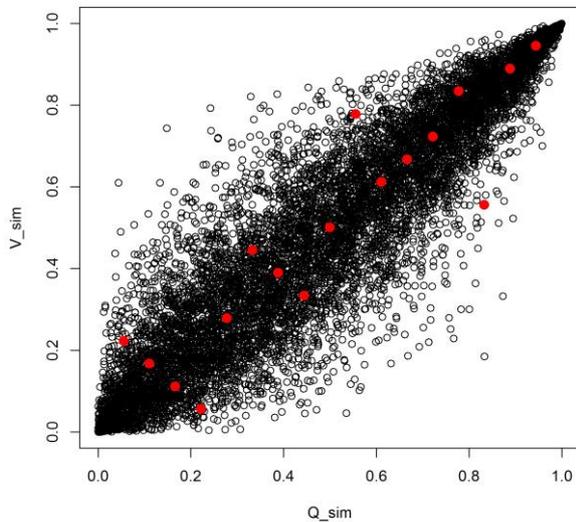


Abbildung 28: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Weichselbaum

Wie in Abbildung 8 gezeigt, werden die Werte mit einer Rücktransformation wieder in den reellen Raum gebracht. In Abbildung 29 bis Abbildung 45 werden die Ergebnisse dieses letzten Schrittes dargestellt. Die simulierten Werte werden als blaue Pluszeichen dargestellt. Die Q_{MHQ} -Werte sind dabei um MHQ nach rechts verschoben. Was auf der x-Achse gezeigt wird, entspricht also dem simulierten Wert von Q_{MHQ} plus MHQ.

Die in Abbildung 12 bis Abbildung 28 sich zeigenden Abhängigkeitsstrukturen werden dabei in die originären Wertebereiche übertragen. Die simulierten Werte zeigen plausible, anhand der Messwerte in der Regel gut nachvollziehbare Strukturen. Dies gilt vermutlich nicht für die oben bereits genannten Messstellen mit sehr straffen Abhängigkeiten im Extremstbereich, insbesondere Pramerdorf und Rosenheim. Im Fall von Burgkirchen erkennt man – anders als bei den meisten anderen Pegeln - eine Tendenz zu einer überproportionalen Zunahme von V mit zunehmendem Q. Da dies erst jenseits der durch Messungen belegten Werte erkennbar ist und sich im Wesentlichen nur bei diesem Pegel deutlich zeigt, sollte dieser Zusammenhang sicher mit Vorsicht interpretiert werden.

Anger

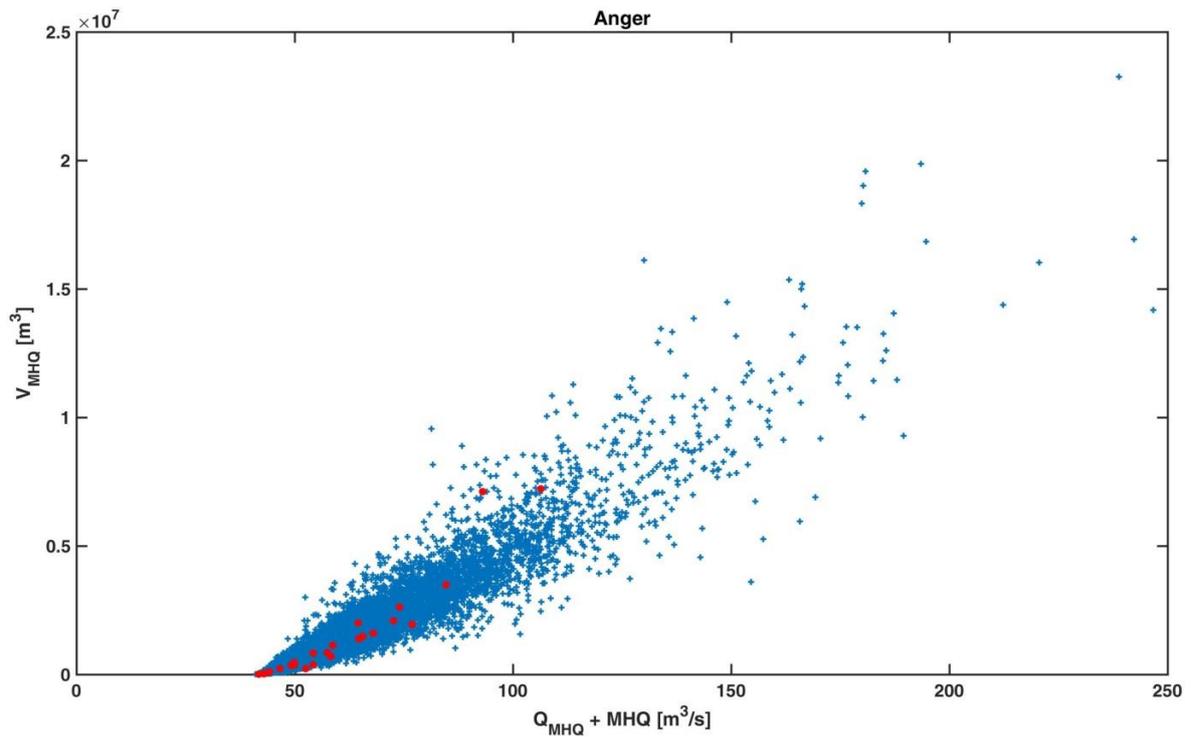


Abbildung 29: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Anger

Burghausen

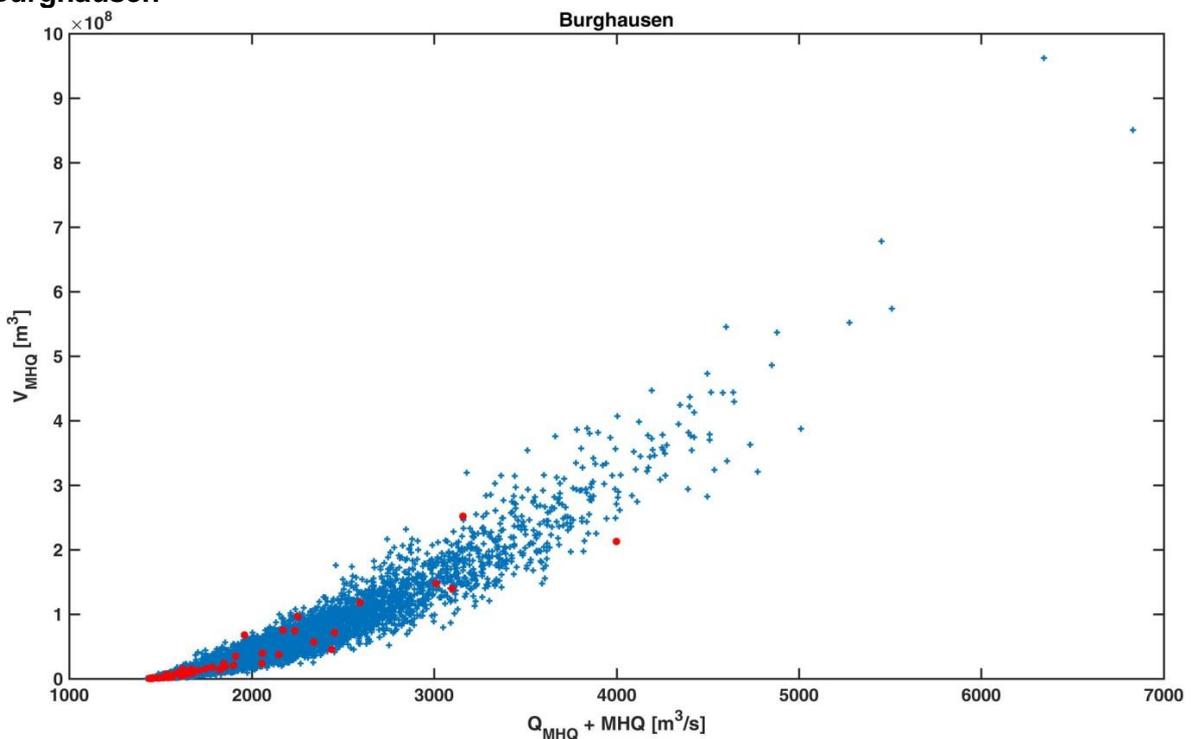


Abbildung 30: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Burghausen

Burgkirchen

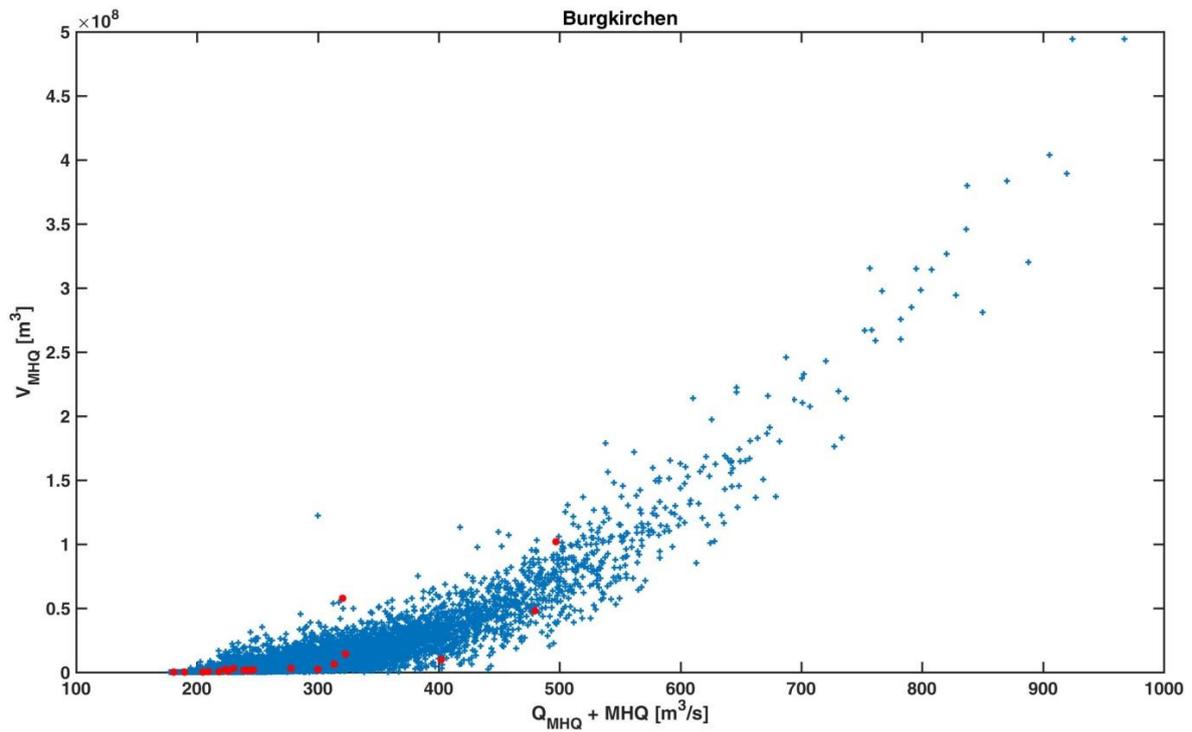


Abbildung 31: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Burgkirchen

Engfurt

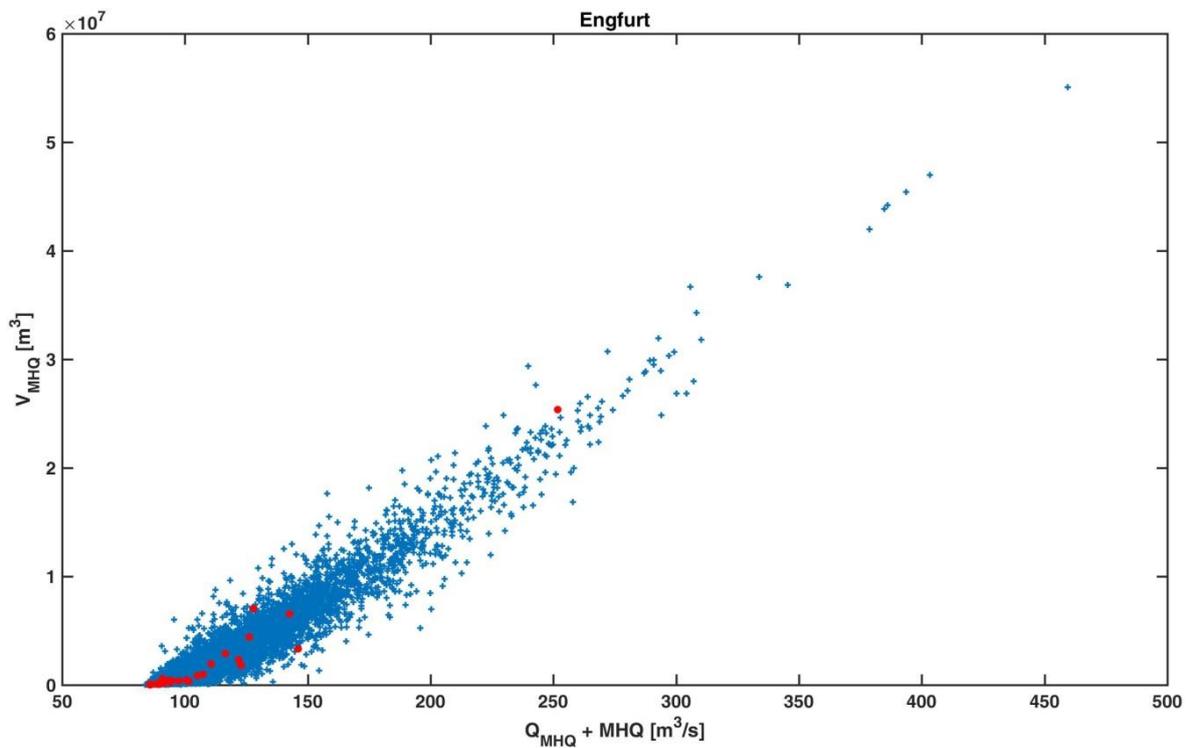


Abbildung 32: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Engfurt

Haging

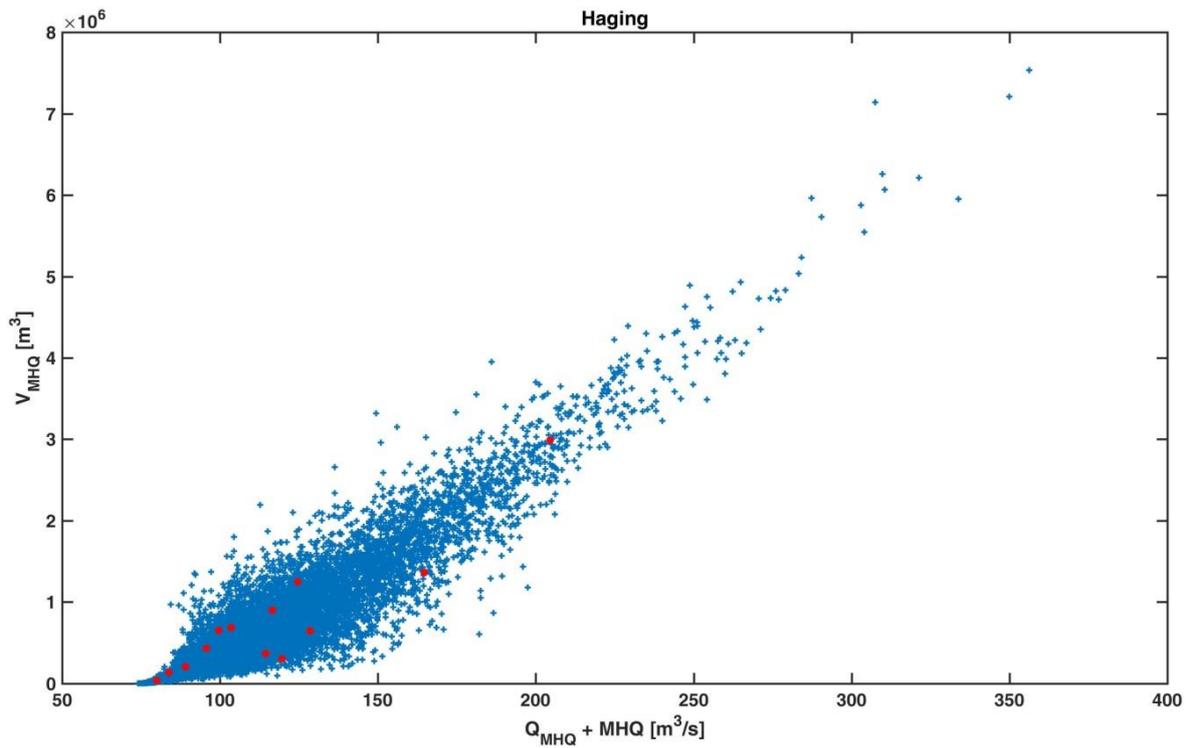


Abbildung 33: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Haging

Hofkirchen

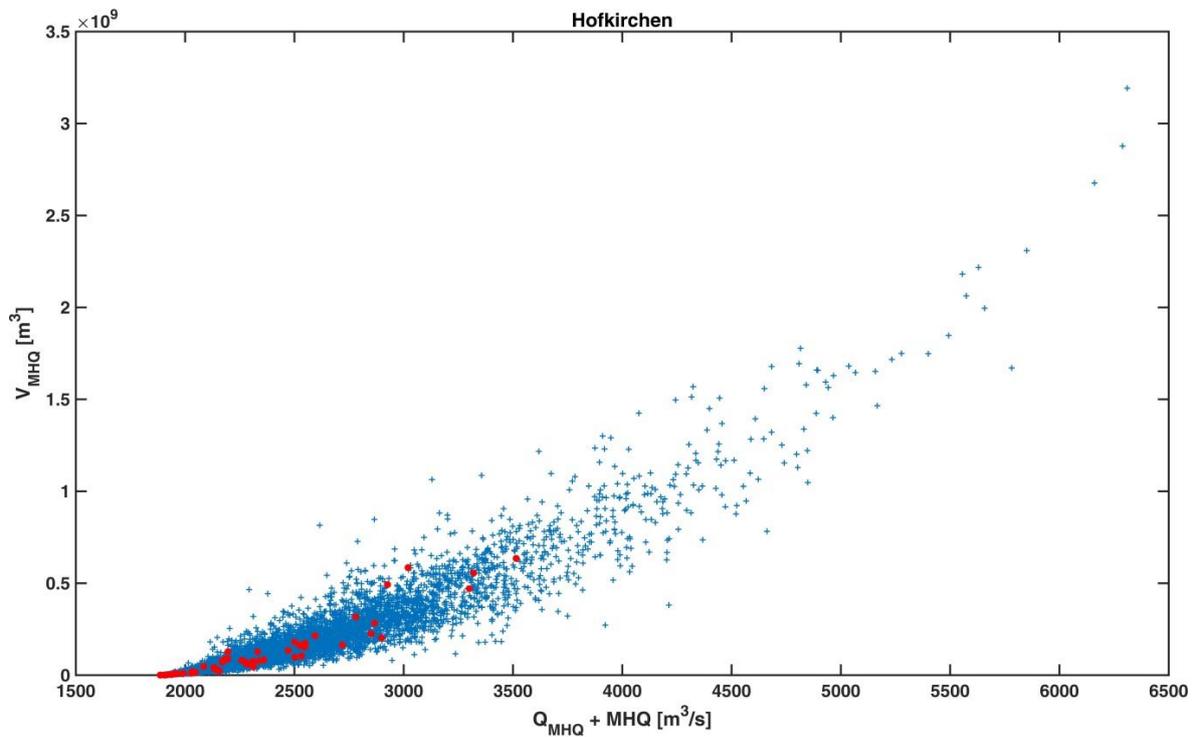


Abbildung 34: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Hofkirchen

Jahrsdorf

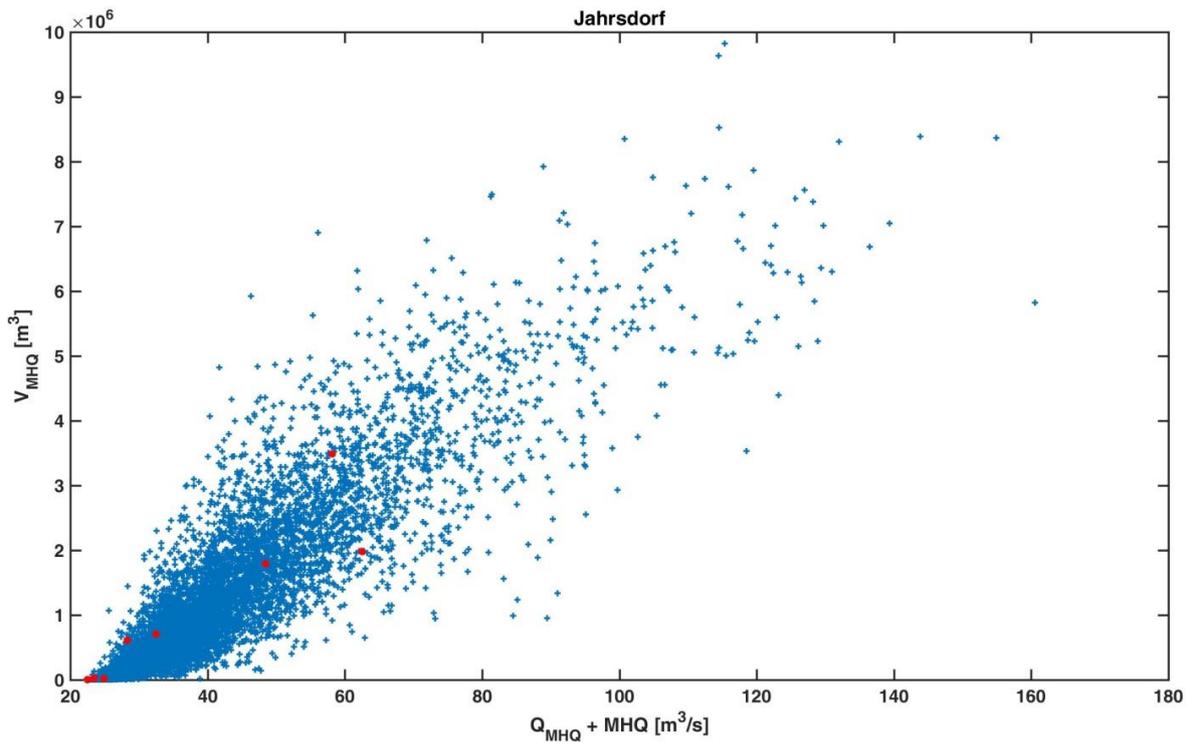


Abbildung 35: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Jahrsdorf

Mühdorf

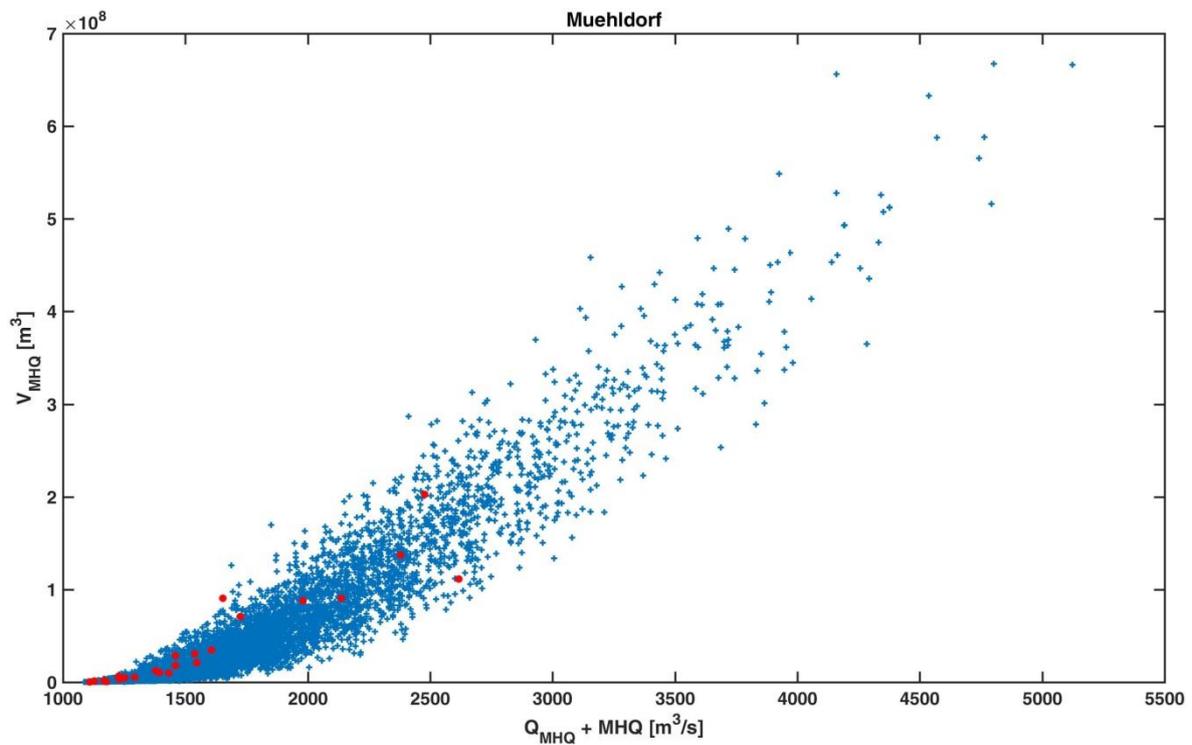


Abbildung 36: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Mühdorf

Passau-Ingling

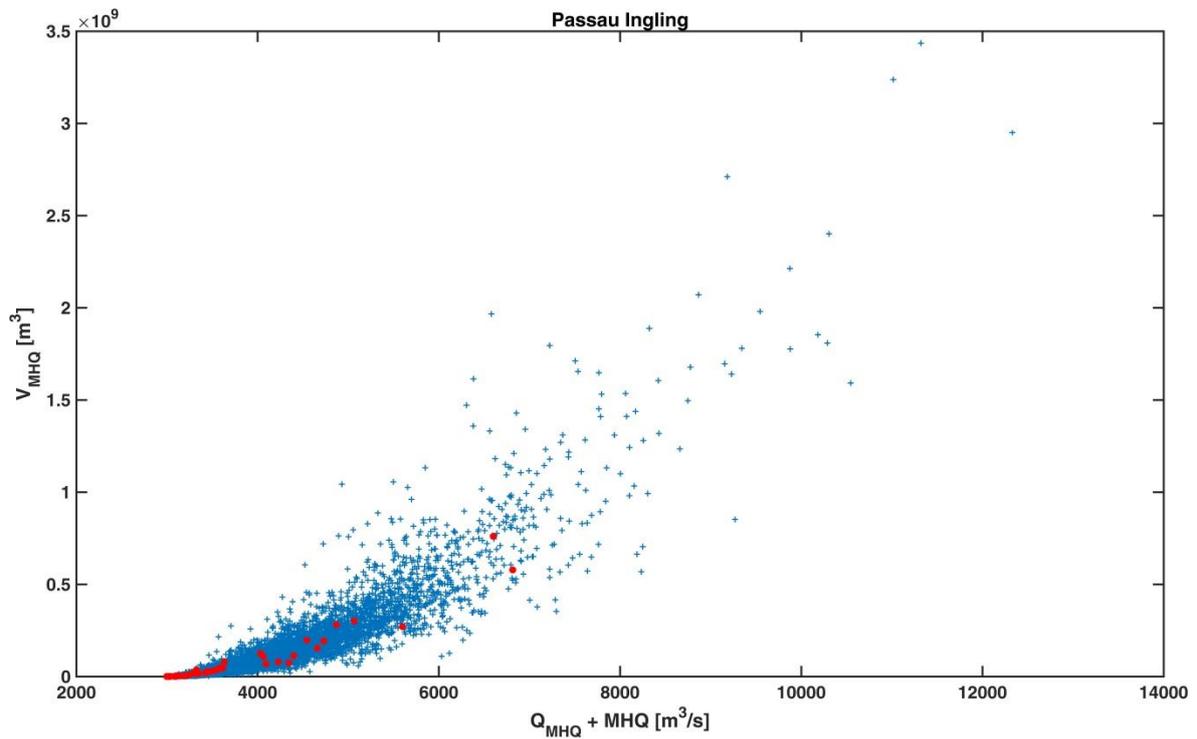


Abbildung 37: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Passau-Ingling

Pramerdorf

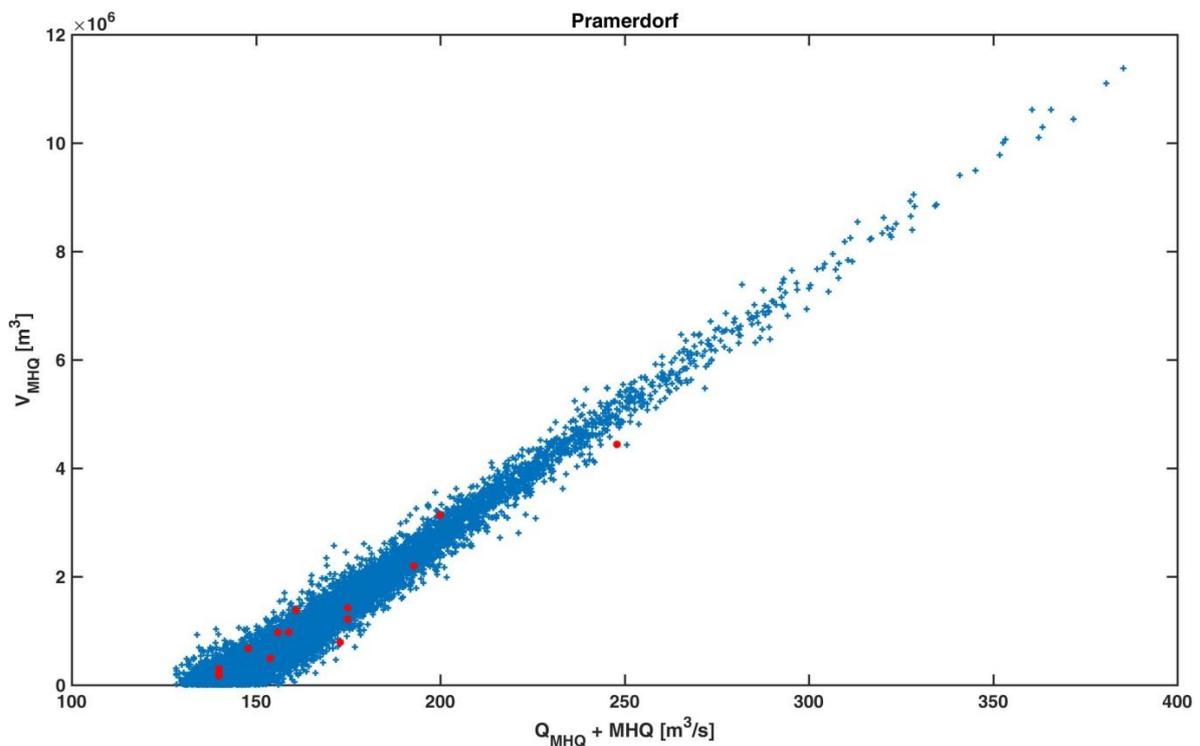


Abbildung 38: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Pramerdorf

Rosenheim

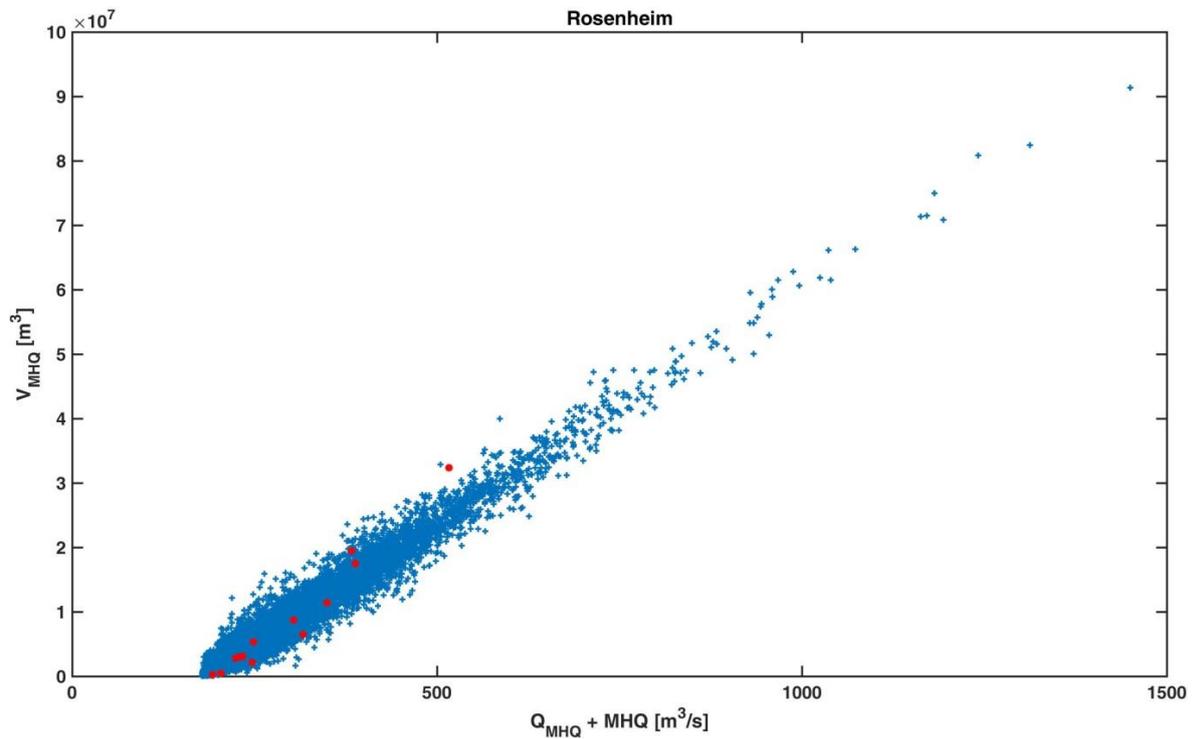


Abbildung 39: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Rosenheim

Rosenheim o.d. Mangfall

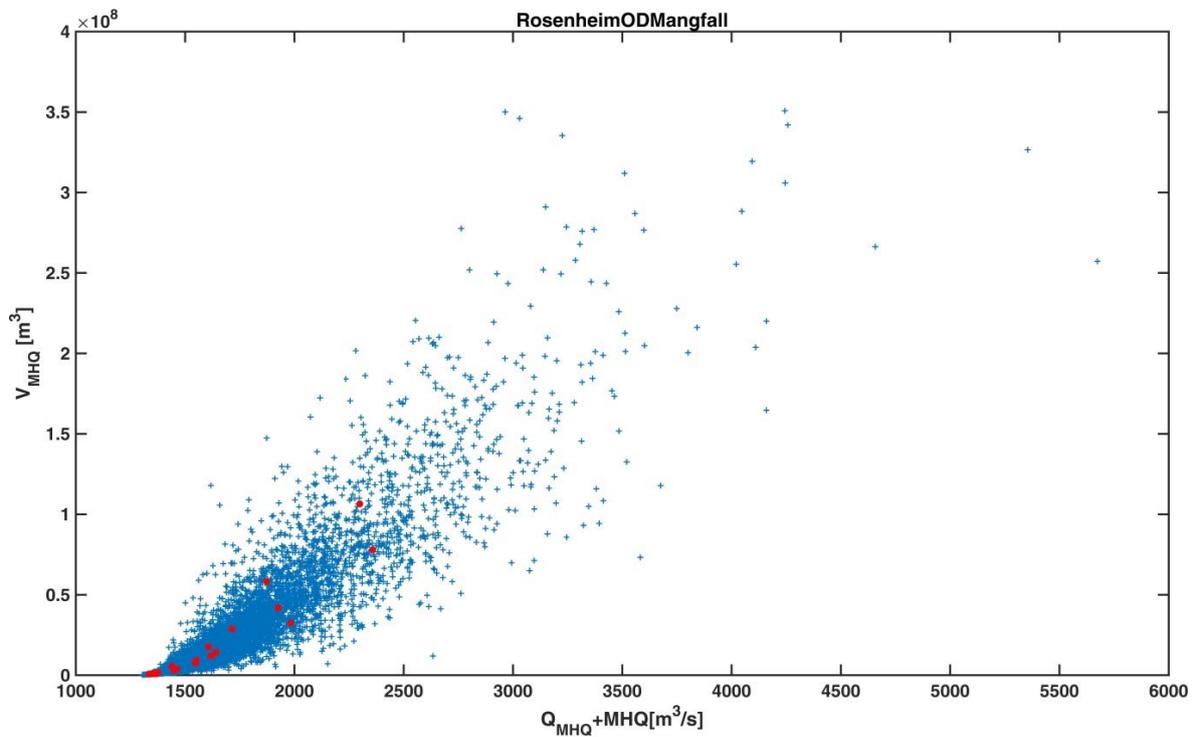


Abbildung 40: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Rosenheim o.d. Mangfall

Ruhstorf

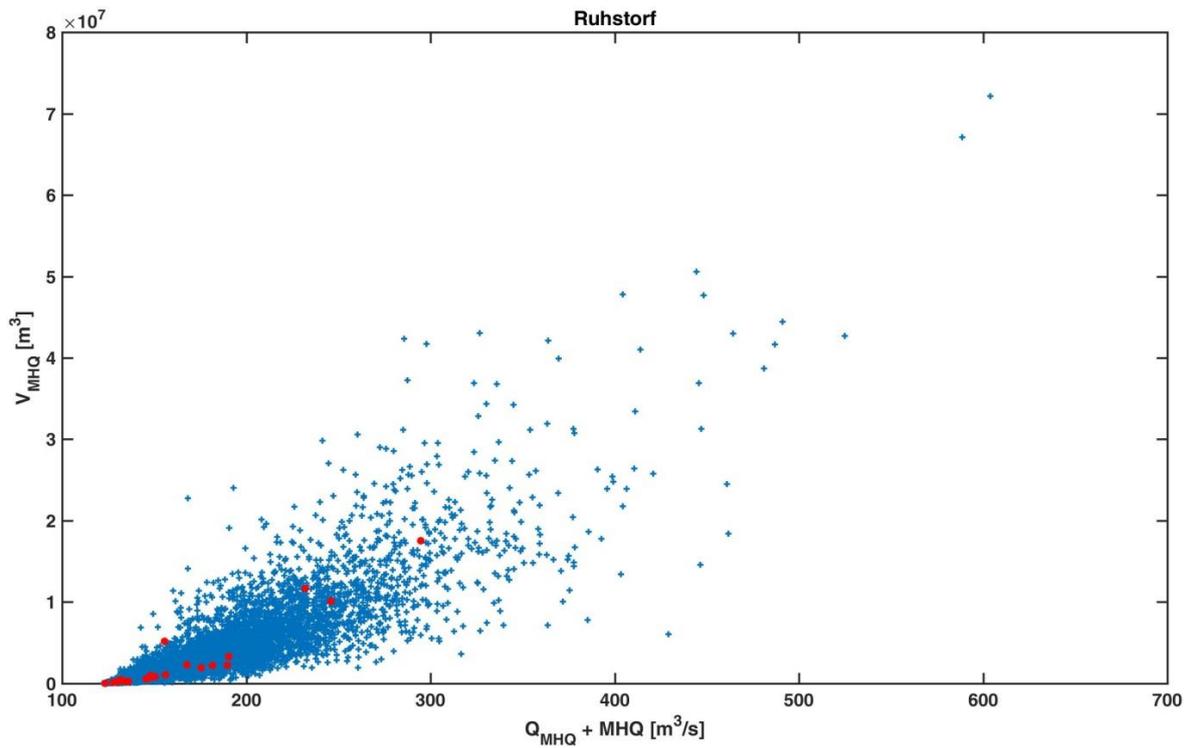


Abbildung 41: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Ruhstorf

Schärding

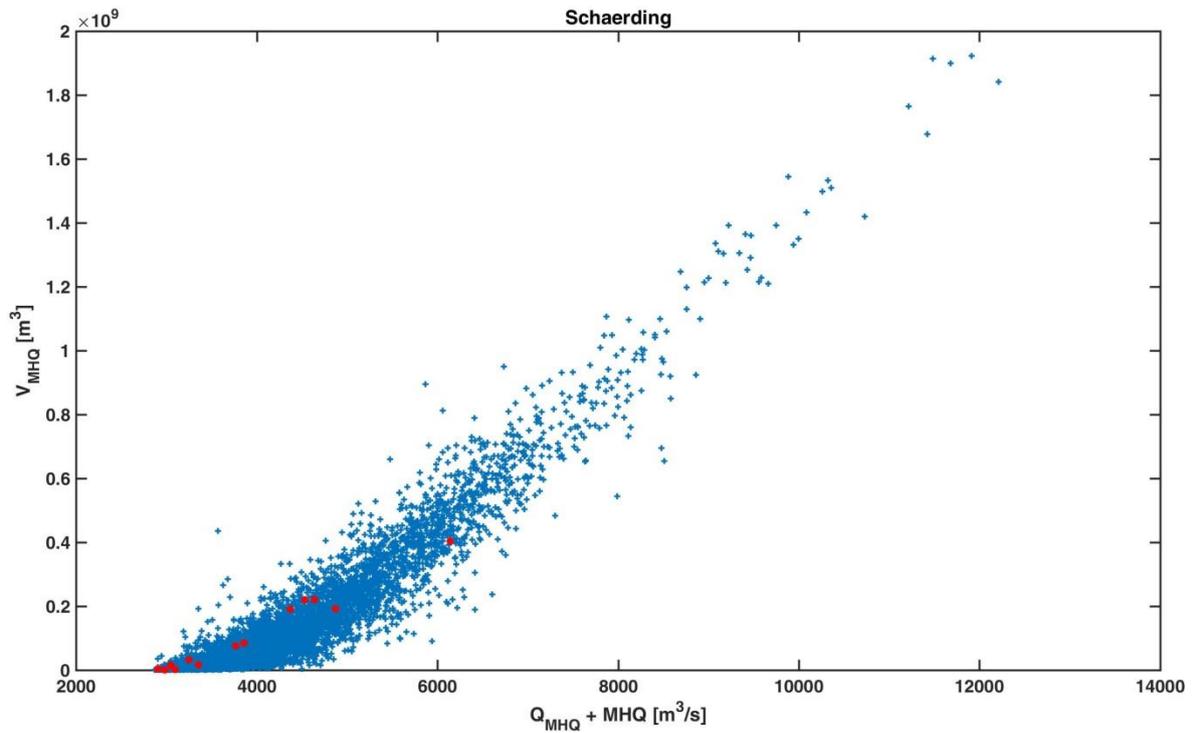


Abbildung 42: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Schärding

Siezenheim

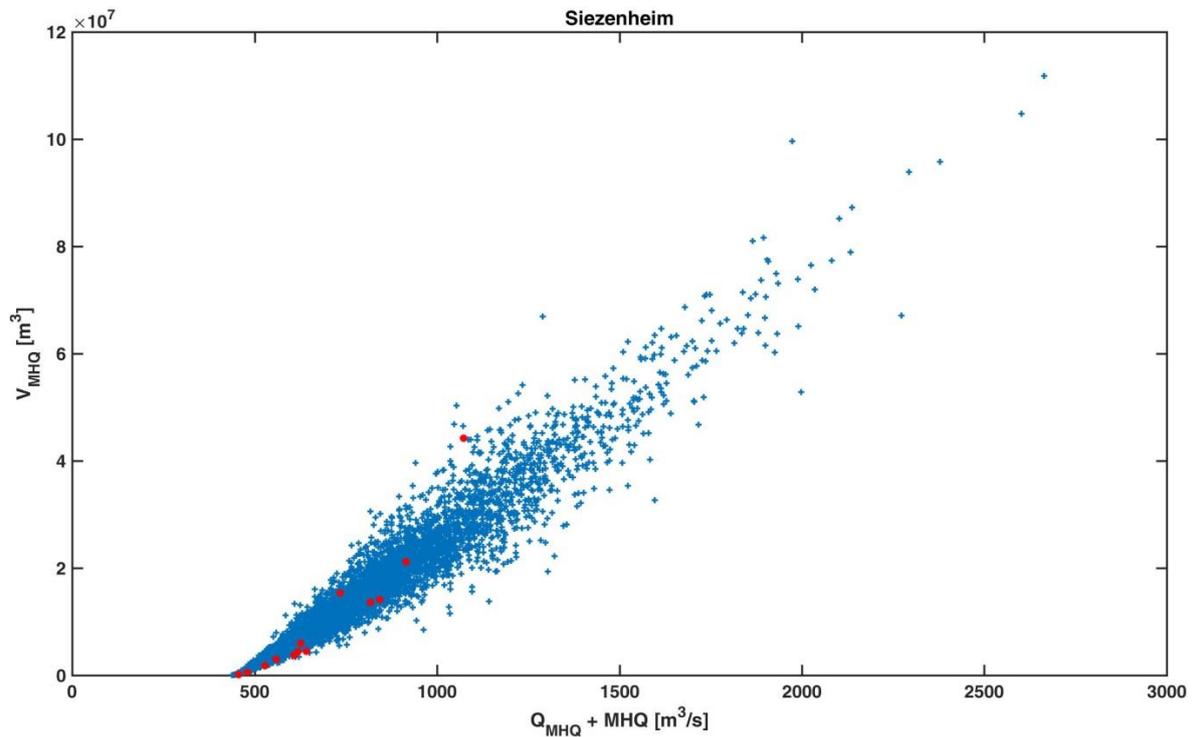


Abbildung 43: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Siezenheim

Wasserburg

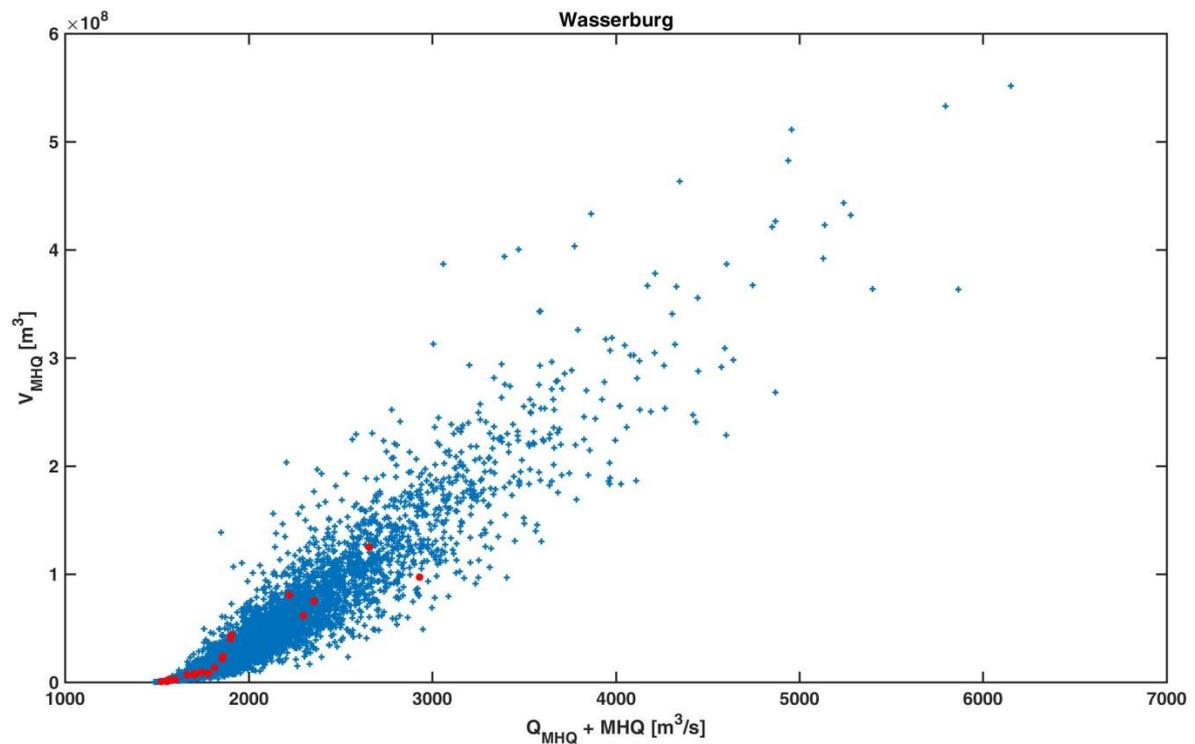


Abbildung 44: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Wasserburg

Weichselbaum

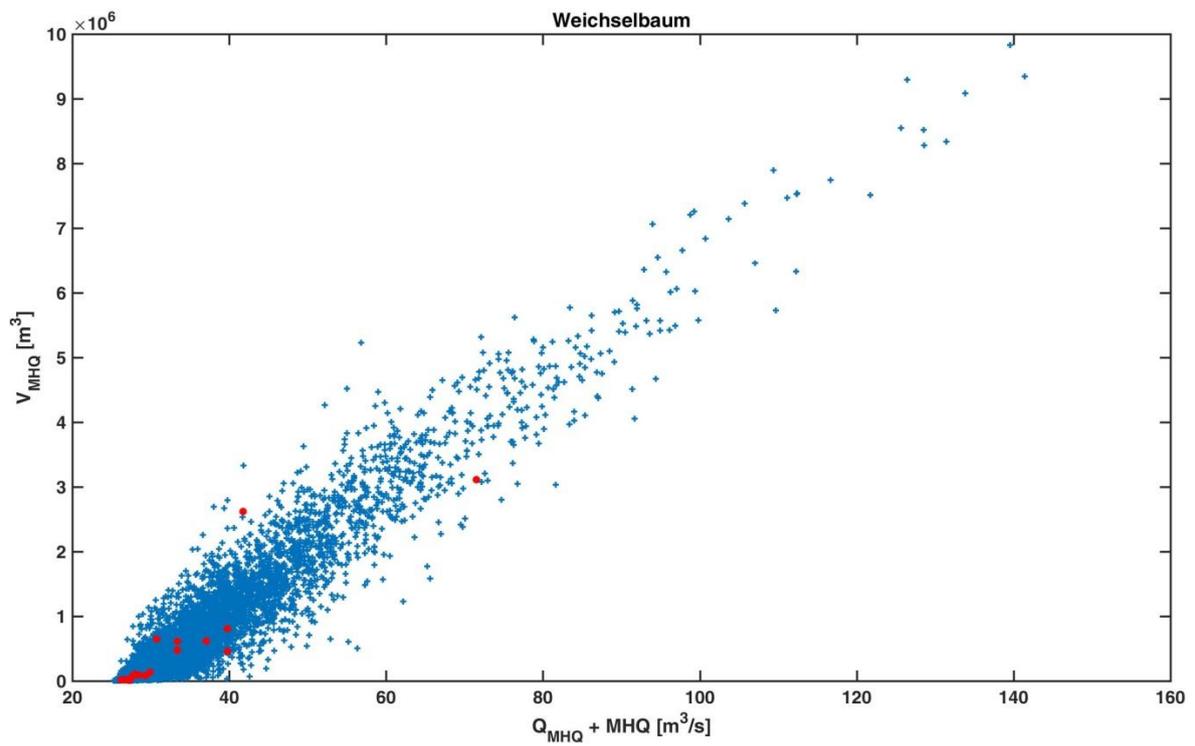


Abbildung 45: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Weichselbaum

5.2. Anwendung der Vine-Copula: QVTB-Modellierung

Das QVTB-Modell, beschrieben im Abschnitt 4.2, erfasst Variablen, die meist nicht stark miteinander korrelieren. Dies zeigt sich in Tabelle 8 und Tabelle 9. Insbesondere der Basisabfluss Q_B korreliert sehr schwach mit den anderen Variablen. Aus diesem Grund wird das QVTS-Modell bevorzugt, dessen Ergebnisse im Abschnitt 5.3 präsentiert werden.

Tabelle 8: Kendall's Tau zwischen Direktabflussscheitel (QSD), Direktabflussvolumen (VD), Anstiegszeit (TS) und Basisabfluss (QB)

Kendall's Tau (τ_K)						
Pegel	$Q_{SD}-V_D$	$Q_{SD}-T_S$	$Q_{SD}-Q_B$	V_D-T_S	V_D-Q_B	T_S-Q_B
Engfurt	0.63	0.11	0.11	0.32	0.02	-0.20
Rosenheim	0.54	-0.08	0.04	0.22	0.00	-0.01
Ruhstorf	0.69	0.15	-0.09	0.36	0.05	0.10

Tabelle 9: Spearman's Rho zwischen Direktabflussscheitel (QSD), Direktabflussvolumen (VD), Anstiegszeit (TS) und Basisabfluss (QB)

Spearman's Rho (ρ_S)						
Pegel	$Q_{SD}-V_D$	$Q_{SD}-T_S$	$Q_{SD}-Q_B$	V_D-T_S	V_D-Q_B	T_S-Q_B
Engfurt	0.81	0.17	0.16	0.49	0.03	-0.29
Rosenheim	0.71	-0.14	0.06	0.30	0.01	-0.01
Ruhstorf	0.86	0.22	-0.13	0.52	0.06	0.15

5.3. Anwendung der Vine-Copula: QVTS-Modellierung

Die QVTS-Modellierung wird für die Pegel Burghausen, Passau-Ingling und Wasserburg durchgeführt. In Tabelle 10 werden die Korrelationskoeffizienten der beobachteten und der simulierten Werte verglichen. Durch die hohe Ähnlichkeit der Korrelationskoeffizienten kann festgestellt werden, dass die simulierten Werte die Abhängigkeitsstruktur der beobachteten Werte gut widerspiegeln.

Tabelle 10: Korrelationskoeffizienten (Kendall's Tau τ_K und Spearmans Rho ρ_S) der beobachteten und der simulierten Werte

Pegel	Paar	Korrelation der beobachteten Daten		Korrelation der simulierten Daten	
		τ_K	ρ_S	τ_K	ρ_S
Burghausen	Q _D -V _D	0.64	0.83	0.65	0.84
	Q _D -T _S	0.27	0.39	0.26	0.38
	Q _D -Q _S	-0.20	-0.29	-0.21	-0.30
	V _D -T _S	0.50	0.70	0.48	0.66
	V _D -Q _S	-0.31	-0.46	-0.33	-0.47
	T _S -Q _S	-0.22	-0.34	-0.19	-0.27
Passau Ingling	Q _D -V _D	0.75	0.92	0.76	0.92
	Q _D -T _S	0.43	0.59	0.42	0.59
	Q _D -Q _S	-0.20	-0.28	-0.17	-0.25
	V _D -T _S	0.58	0.77	0.57	0.75
	V _D -Q _S	-0.23	-0.33	-0.19	-0.27
	T _S -Q _S	-0.14	-0.20	-0.14	-0.21
Wasserburg	Q _D -V _D	0.82	0.94	0.80	0.94
	Q _D -T _S	0.61	0.81	0.59	0.80
	Q _D -Q _S	-0.46	-0.66	-0.45	-0.64
	V _D -T _S	0.76	0.93	0.75	0.92
	V _D -Q _S	-0.50	-0.69	-0.52	-0.72
	T _S -Q _S	-0.49	-0.66	-0.54	-0.74

Aus Tabelle 10 kann man schließen, dass das Einsetzen der mobilen Schwellen die Korrelation zwischen direktem Scheitelabfluss, direktem Volumen, Anstiegszeit und Schwelle deutlich verbessert.

Die Vine Copulas, die für die verschiedenen Pegel ausgewählt werden, sind in Tabelle 11 bis Tabelle 13 aufgeführt. Die Auswahl der Vine-Copula basiert auf dem Bayesschen Informationskriterium.

Tabelle 11: Vine Copula für Burghausen - QVTS Modell

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3
V_D-T_S : Clayton (1.83)	Gaussian (-0.49)	Clayton (0.44)
V_D-Q_D : Gaussian (0.85)		
Q_S-V_D : Rotated Clayton 90° (-0.96)	Joe (1.28)	

Tabelle 12: Vine Copula für Passau-Ingling - QVTS Modell

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3
V_D-Q_D : Gaussian (0.93)	Gaussian (-0.44)	Independence
V_D-T_S : Calyton (2.58)		
Q_S-V_D : Rotated Tawn t1 90° (-2.67,0.23)	Independence	

Tabelle 13: Vine Copula für Wasserburg - QVTS Modell

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3
V_D-Q_D : t (0.95,3.59)	Frank (-4.7)	Independence
V_D-T_S : Frank (13.69)		
Q_S-V_D : Frank (-6.09)	Rotated Joe 90° (-1.44)	

In den Abbildung 46 bis Abbildung 48 werden die simulierten (schwarze Kreise) und die beobachteten Werte (Pseudobeobachtungen, rote Punkte) verglichen. Man erkennt, dass die

simulierten Daten die Verteilungsstrukturen der beobachteten gut widerspiegeln. Insbesondere die positive Korrelation zwischen dem Direktabflussscheitel (Q_D) und dem Direktabflussvolumen (V_D) wird von den simulierten Daten gut erfasst. Interessant ist auch, dass das Direktabflussvolumen (V_D) und die Anstiegszeit (T_S) bei Burghausen und Passau-Ingling für kleinere Werte stärker korreliert sind als für große Werte. Diese Asymmetrie findet man bei Wasserburg nicht.

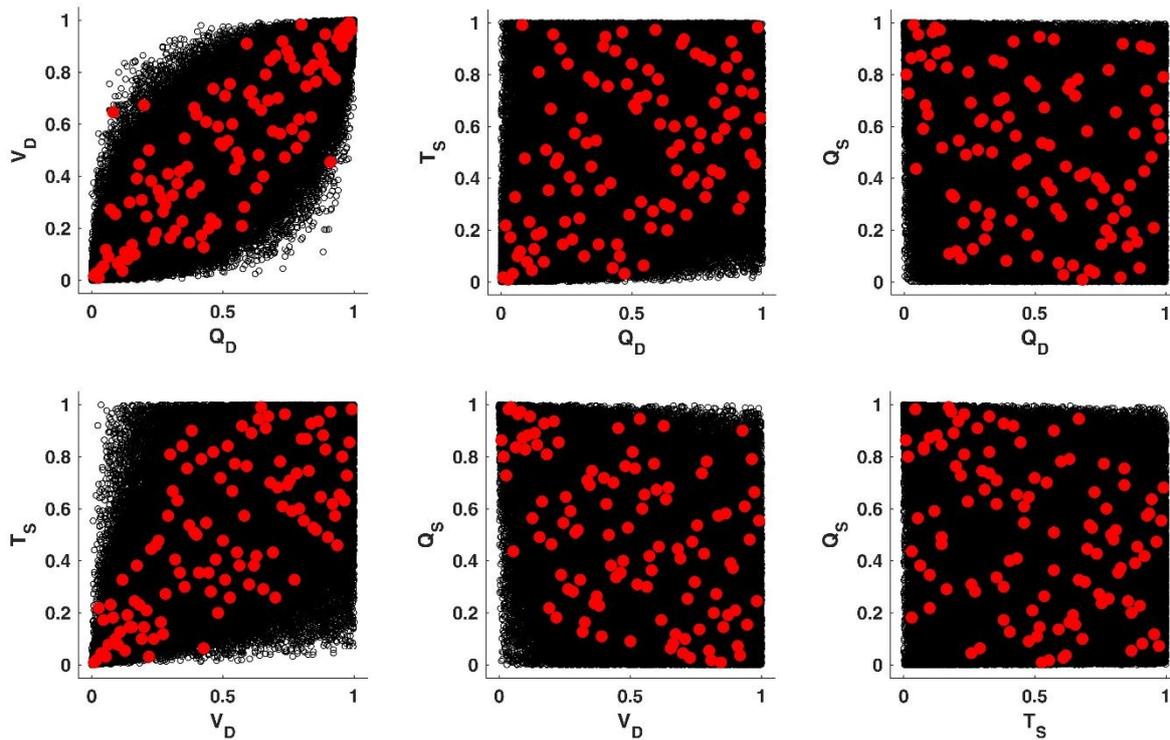


Abbildung 46: Vergleich der Pseudobeobachtungen der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise), Daten für Burghausen

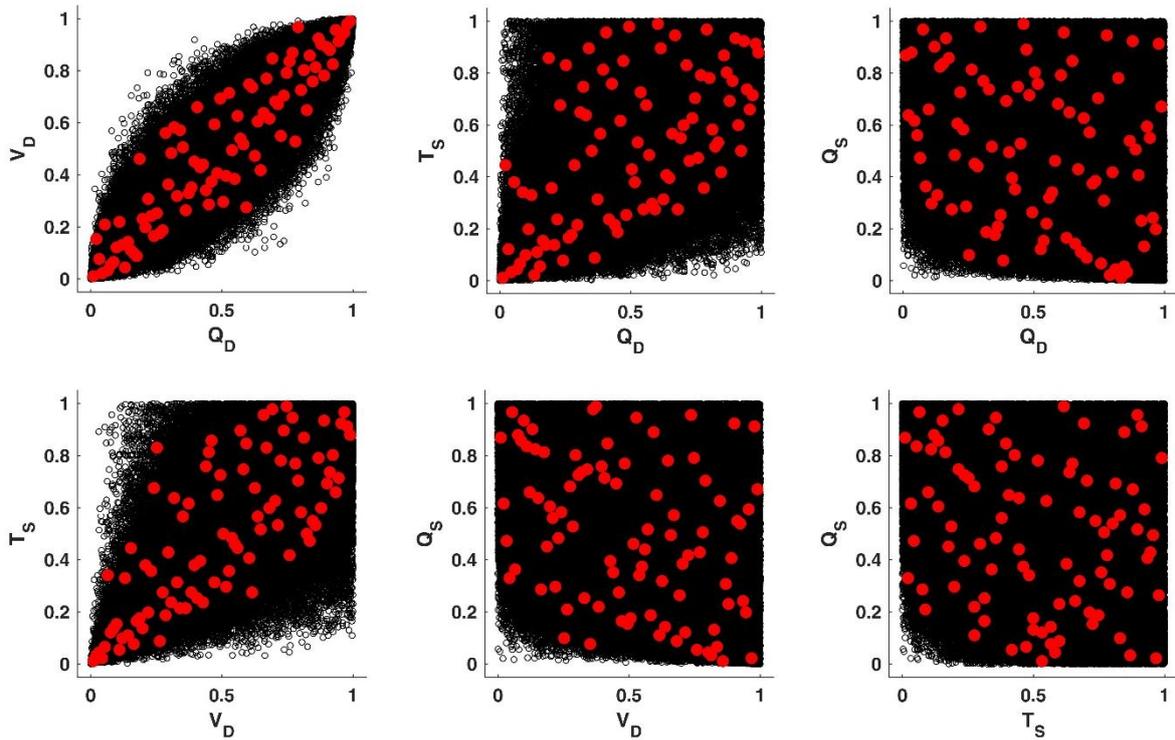


Abbildung 47: Vergleich der Pseudobeobachtungen der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise), Daten für Passau-Ingling

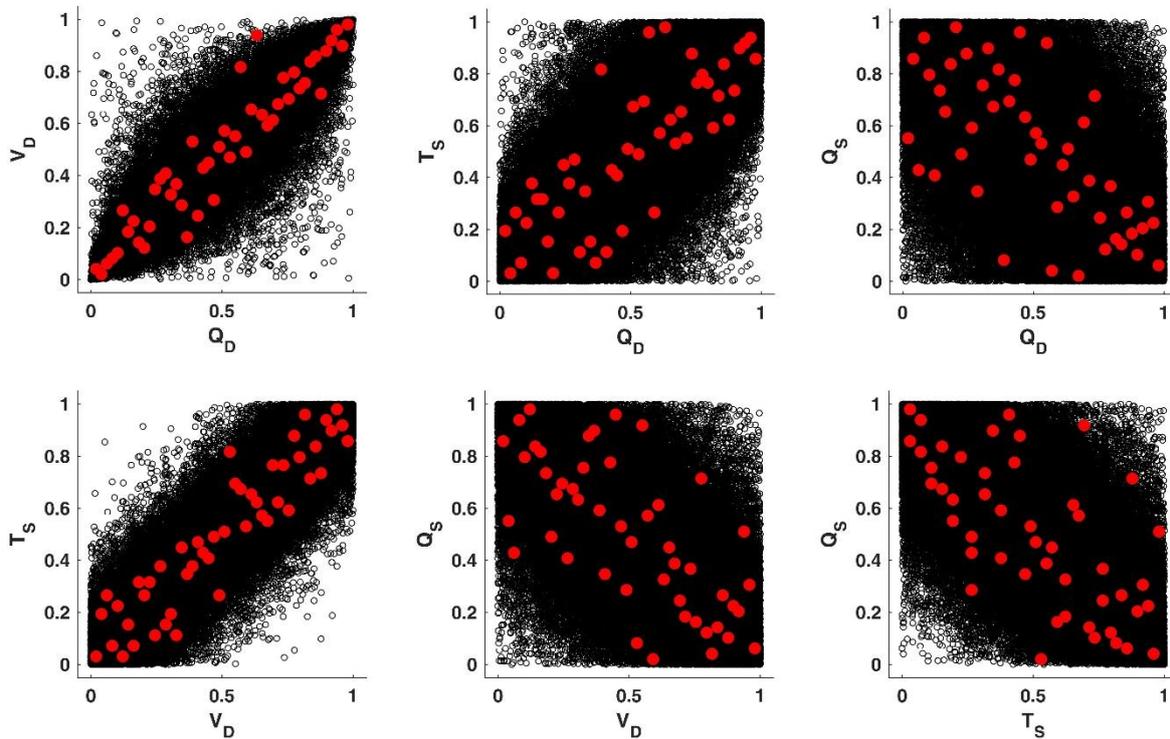


Abbildung 48: Vergleich der Pseudobeobachtungen der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise), Daten für Wasserburg

Die simulierten Daten, die in Abbildung 46 bis Abbildung 48 dargestellt sind, befinden sich noch im „Copula-Raum“. Um Werte im originären Werteraum zu erhalten, müssen wiederum Rücktransformationen angewendet werden, die auf den an die beobachteten Daten ange-

passten Randverteilungen beruhen. In Abbildung 49 bis Abbildung 51 werden beobachtete (rote Punkte) und simulierte (blaue Pluszeichen) Daten im originären Wertebereich dargestellt. Auch in diesem Fall spiegeln die simulierten Daten die Strukturen der beobachteten Daten plausibel wider.

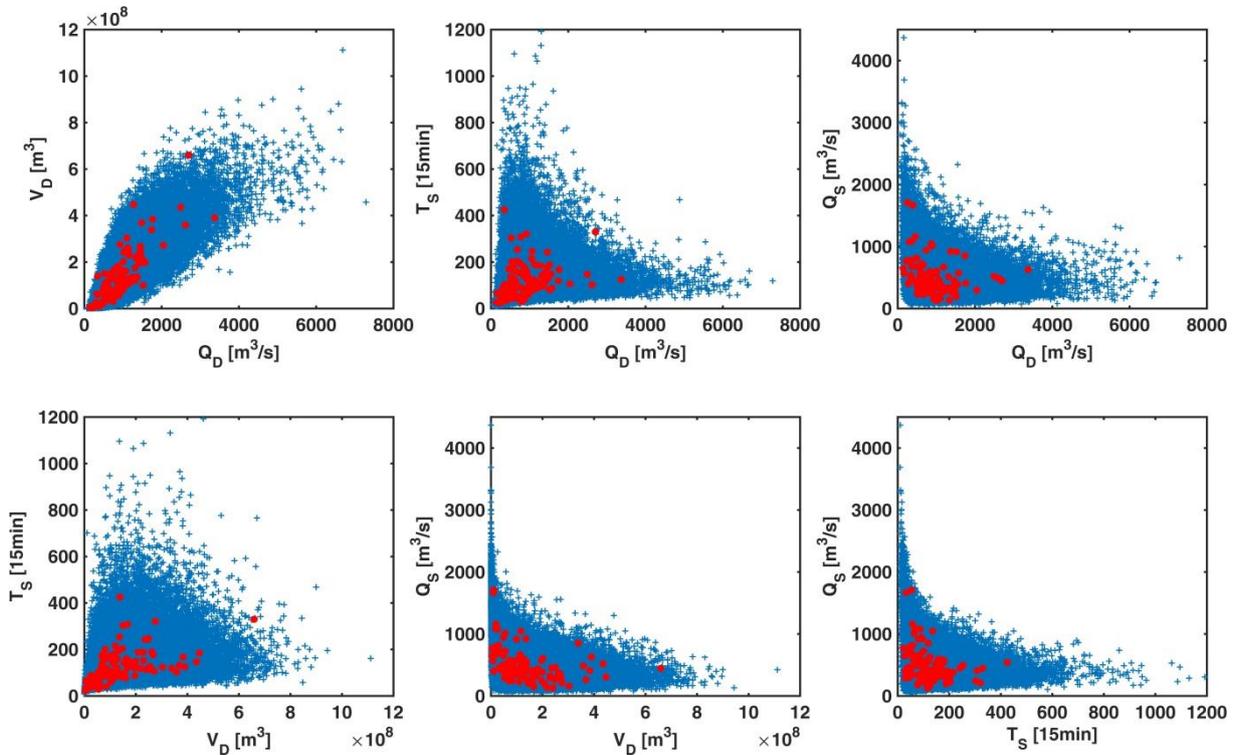


Abbildung 49: Vergleich der beobachteten (rote Punkte) und simulierten (blaue Pluszeichen) Daten für Burghausen

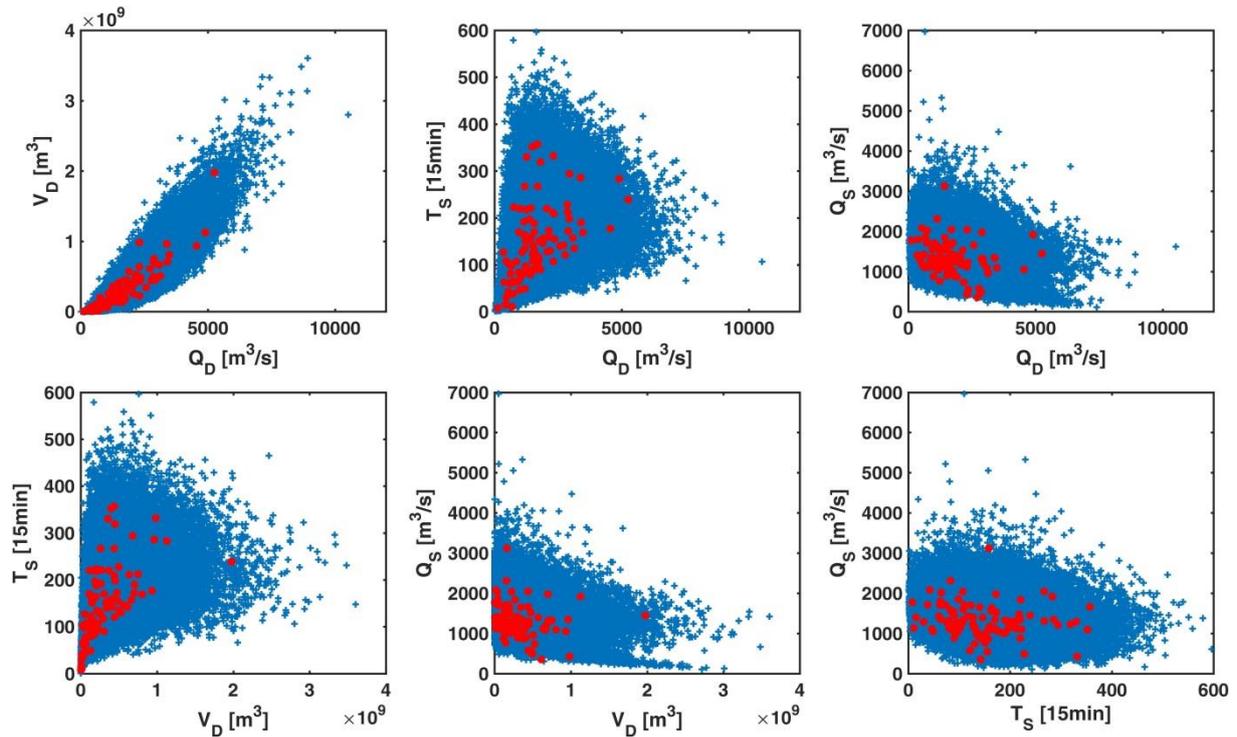


Abbildung 50: Vergleich der beobachteten (rote Punkte) und simulierten (blaue Pluszeichen) Daten für Passau-Ingling

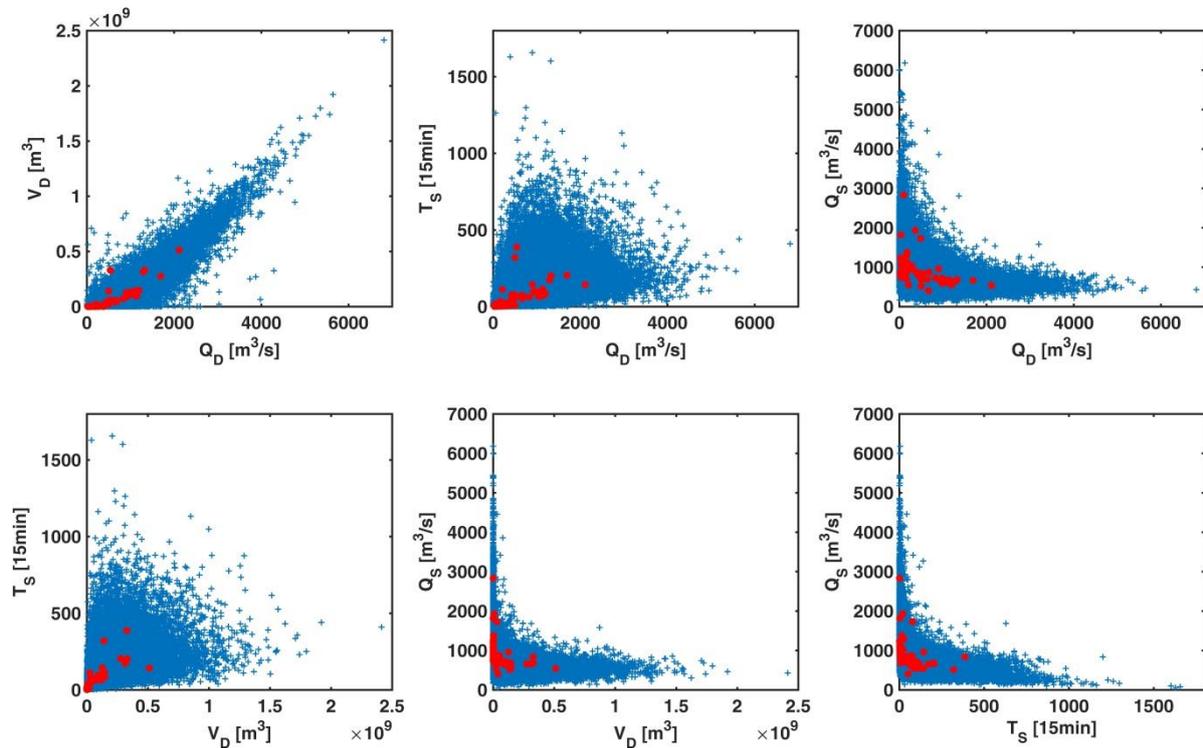


Abbildung 51: Vergleich der beobachteten (rote Punkte) und simulierten (blaue Pluszeichen) Daten für Wasserburg

5.4. Erzeugung von Wellen und Rückhaltewirkungslinien

Anhand der simulierten QVTS-Werte werden synthetische Hochwasserwellen für die Pegel Burghausen/Salzach, Wasserburg/Inn und Passau-Ingling/Inn mittels der Kozeny-Funktion erzeugt. Um die optimale Welle zu finden, werden zwei verschiedene Formfaktoren (m) für den ansteigenden Teil und für den absteigenden Teil der Welle genutzt ($0,1 < m < 10$). Für jeden Pegel werden 200 Wellen erzeugt, deren Scheitel sich im Intervall $HQ_{50} \pm 5\%$ oder im Intervall $HQ_{100} \pm 5\%$ befinden. Die HQ_x -Werte sind hierbei die in dieser Studie berechneten Hochwasserscheitel (vgl. Tabelle 6). Aus den so erzeugten Wellen werden Rückhaltewirkungslinien berechnet. Dazu wird eine Integrationsschwelle vom Wellenscheitel (Maximalwert) bis auf einen festgelegten Minimalwert variiert. Für jeden Schwellwert wird das oberhalb der Schwelle liegende Volumen integriert. Für Schwellen unterhalb des Direktabflusses werden als Integrationsgrenzen Anfangs- und Endzeit des Direktabflusses gewählt. Die Ergebnisse werden in Abbildung 52 bis Abbildung 57 gezeigt. Hierbei wurden die Abflüsse der einzelnen Wellen auf den jeweiligen Scheitelabfluss normiert, d.h. der Scheitelabfluss erhält den normierten Wert 1. Für jede der 200 Wellen werden die Abflussvolumina zwischen den Schwellwerten 0,8 (= 80 % des Scheitelabflusses) bis 1,0 berechnet und die entsprechenden Wertepaare aufgetragen (y-Achse: normierter Abfluss; x-Achse: zugehöriges Wellenvolumen). Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass große Abweichungen hinsichtlich des Wellenvolumens zwischen den einzelnen Wellen existieren und unplausible große oder kleine Volumina generiert werden können. Aufgrund der begrenzten Stichprobe können durch das Copula-Verfahren extreme Beziehungen zwischen Wellenvolumen und Wellenscheitel erzeugt werden. Sowohl die zu kleinen oder zu großen Abflussvolumina als auch möglicherweise zu extreme Abhängigkeiten sind keine dem Copula-Ansatz inhärent innewohnenden Charakteristika, sondern sind grundsätzlich steuerbar. Anhand von physikalischen Überlegungen abgeleitetes Vorwissen über mögliche oder sinnvolle Wertebereiche könnte durch die Wahl der Randverteilungen und die Art ihrer Parametrisierung einbezogen werden. Ebenso kann die Abhängigkeitsmodellierung anhand der Vielfalt von bestehenden Copulamodellen sehr umfassend gesteuert werden. Da dieses Vorwissen hier nicht berücksichtigt wurde, sollten Ausreißer-Rückhaltewirkungslinien jenseits zu kleiner oder zu großer Perzentile nicht berücksichtigt werden. Eine gute Abschätzung von plausiblen erforderlichen Rückhaltevolumina ist durch die 25 %- und 75 %-Perzentile gegeben. In Abbildung 52 bis Abbildung 57 sind die 10 %-, 25 %-, 50 %-, 75 %- und 90 %-Perzentile angegeben und stellen damit Anhaltswerte für die Bemessung der erforderlichen Polderrückhaltevolumina dar. Diese Werte gelten zunächst für die Pegelstandorte. Möglichkeiten zur Übertragung auf beliebige Punkte entlang des Inns sind durch Übergang zu den in Abschnitt 6 erläuterten, pegelübergreifenden Copulaverfahren in Kombination mit der im Ausblick formulierten möglichen

Ersetzung der einfachen durch komplexere Wellenablauf-Algorithmen grundsätzlich umsetzbar.

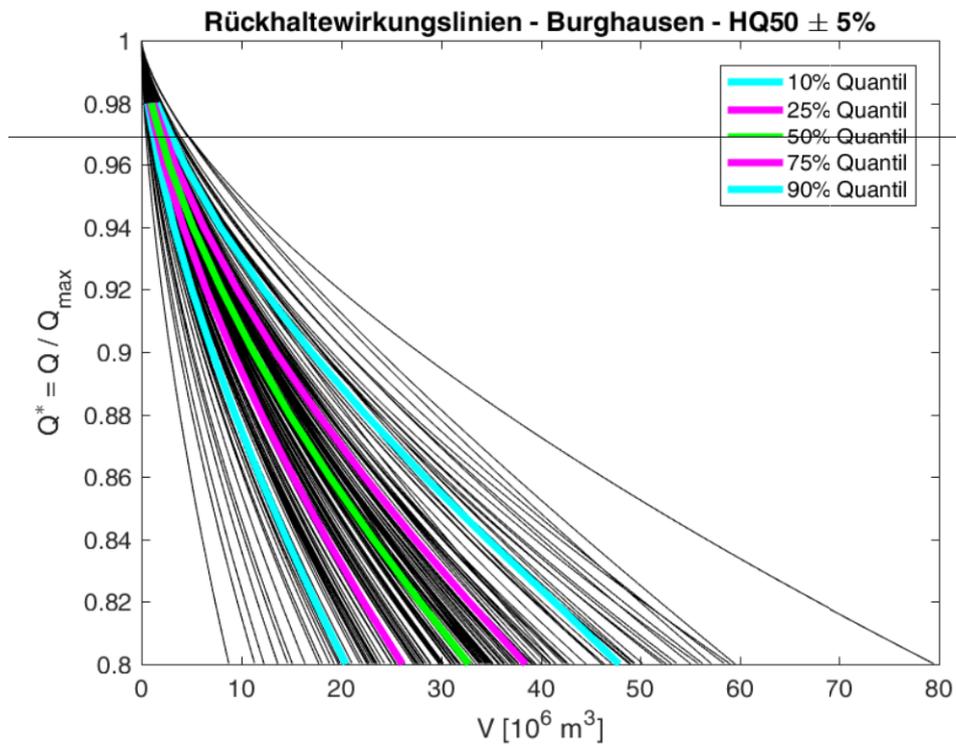


Abbildung 52: Rückhaltewirkungslinien für Burghausen im Intervall HQ₅₀ ±5%

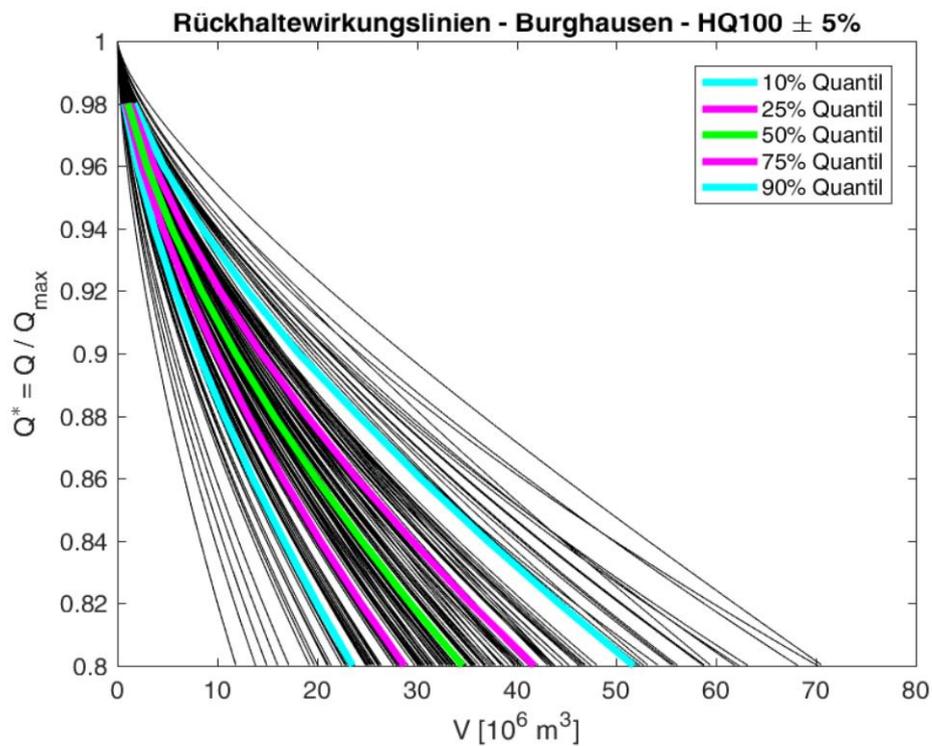


Abbildung 53: Rückhaltewirkungslinien für Burghausen im Intervall HQ₁₀₀ ±5%

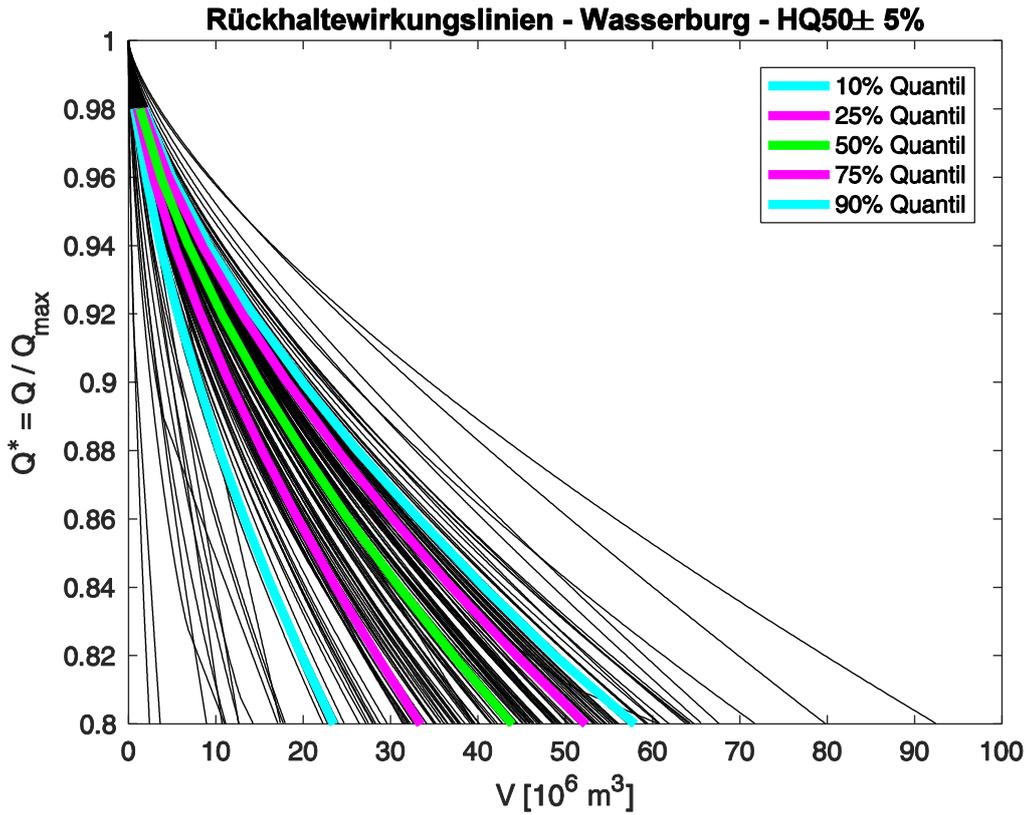


Abbildung 54: Rückhaltewirkungslinien für Wasserburg im Intervall HQ₅₀ ±5%

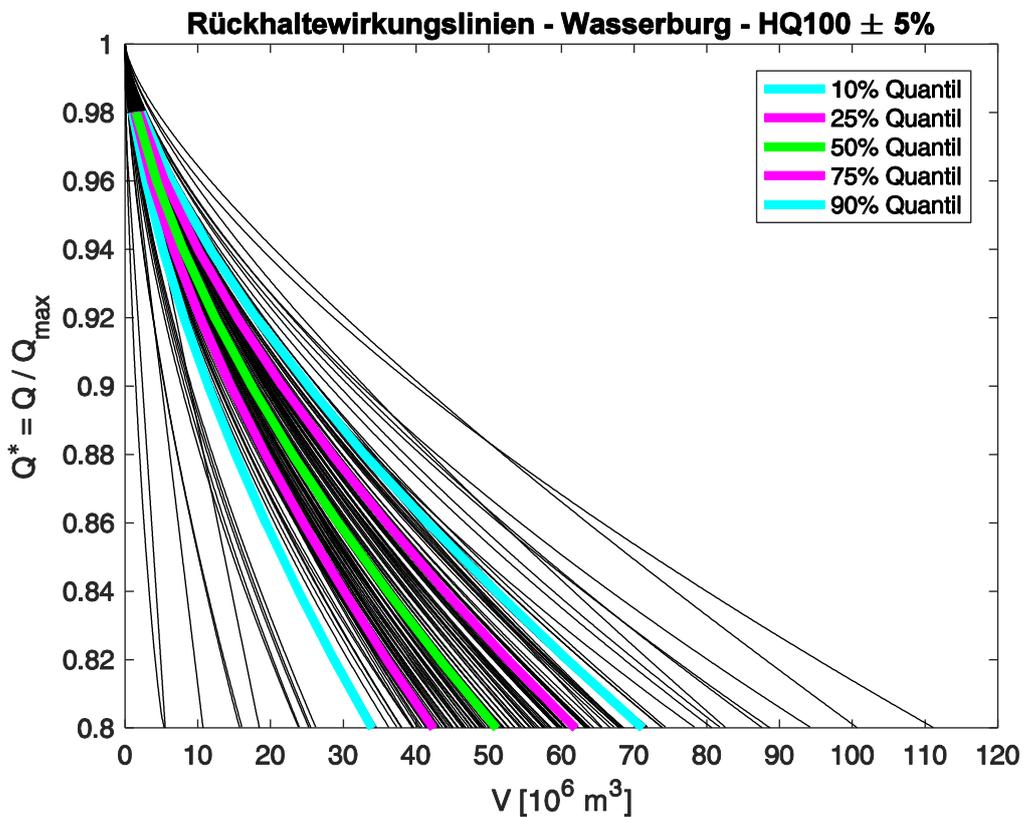


Abbildung 55: Rückhaltewirkungslinien für Wasserburg im Intervall HQ₁₀₀ ±5%

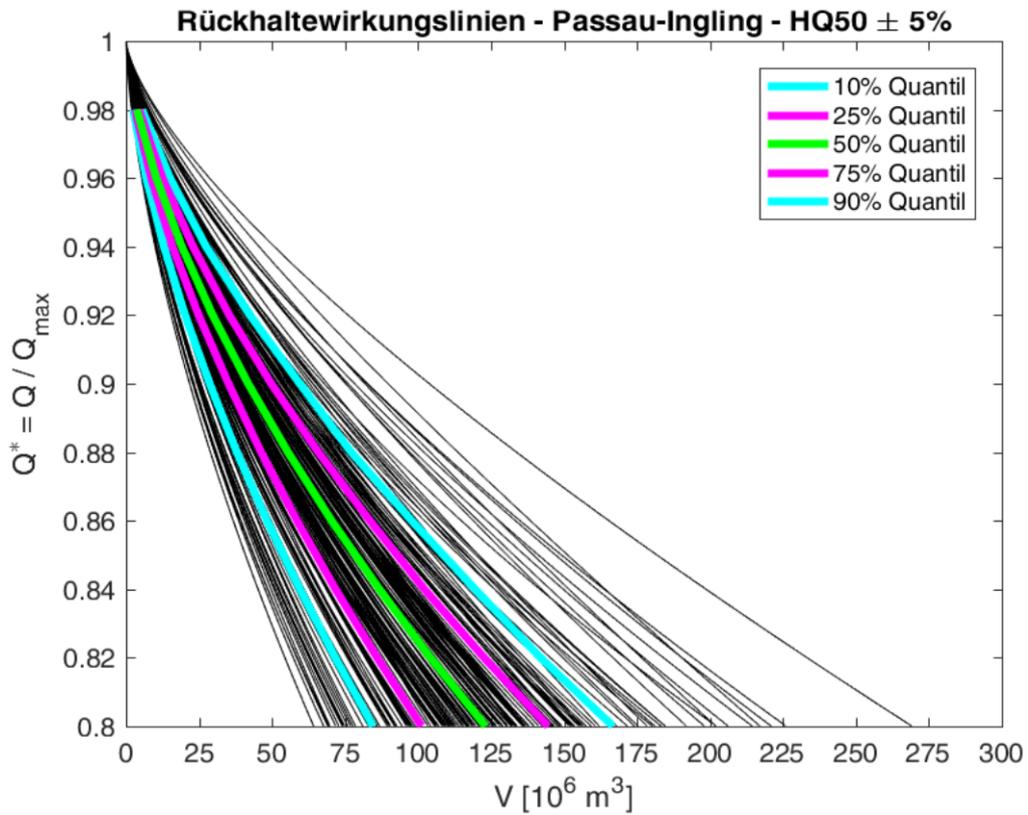


Abbildung 56: Rückhaltewirkungslinien für Passau-Ingling im Intervall HQ₅₀ ±5%

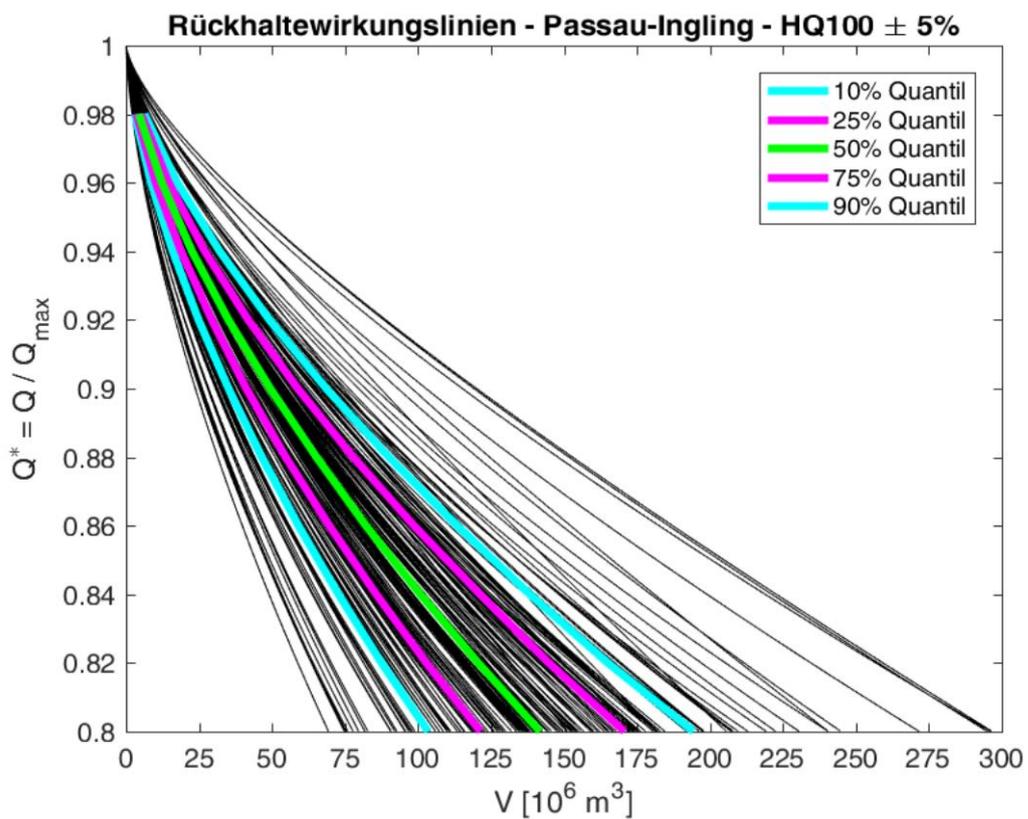


Abbildung 57: Rückhaltewirkungslinien für Passau-Ingling im Intervall HQ₁₀₀ ±5%

6. Mehrgipfligkeit und pegelübergreifende Abhängigkeitsmodelle

Am IAWG werden die dargestellten Arbeiten im Hinblick auf zwei Punkte erweitert:

- Mögliche Mehrgipfligkeit synthetischer Hochwasserwellen
- Betrachtungen unter Erhaltung pegelübergreifender Abhängigkeiten

Für die Umsetzung dieser Erweiterungen werden drei „Modellbausteine“ implementiert, die nachfolgend näher erläutert werden, nämlich

- Kozeny-Wellenzerlegung zur Erfassung mehrgipfliger Wellen
- R-Vine-Copula mit Flussnetz-Struktur
- Multitributäres Muskingum-Modell zur deterministisch-konzeptionellen Erfassung des Wellenablaufs

Die beiden erstgenannten Modellbausteine wurden dabei nicht der Literatur entnommen, sondern hier im Rahmen der Projektbearbeitung neu eingeführt.

6.1. Mehrgipflige Wellen mit Modellbaustein „Kozeny-Wellenzerlegung“

Schaut man sich Hochwasserereignisse am Inn an, dann erkennt man oft eingipflige Hochwasserganglinien, die sich in guter Näherung mit Ansätzen wie demjenigen von Kozeny beschreiben lassen (Abbildung 58, oben). Auf der anderen Seite treten aber auch Ereignisse auf, bei denen zwei oder mehr lokale Maxima zu erkennen sind und deren Nachbildung durch die Kozeny-Funktion nur schwer möglich ist (Abbildung 58, unten). In Abbildung 58 sind auch Nachbildungen der Messwerte anhand einer oder mehrerer, sich überlagernder Kozeny-Funktionen zu sehen. Dem liegt ein hier entwickelter Algorithmus zur Kozeny-Wellenzerlegung einer Ganglinie zugrunde, der nachfolgend kurz beschrieben wird.

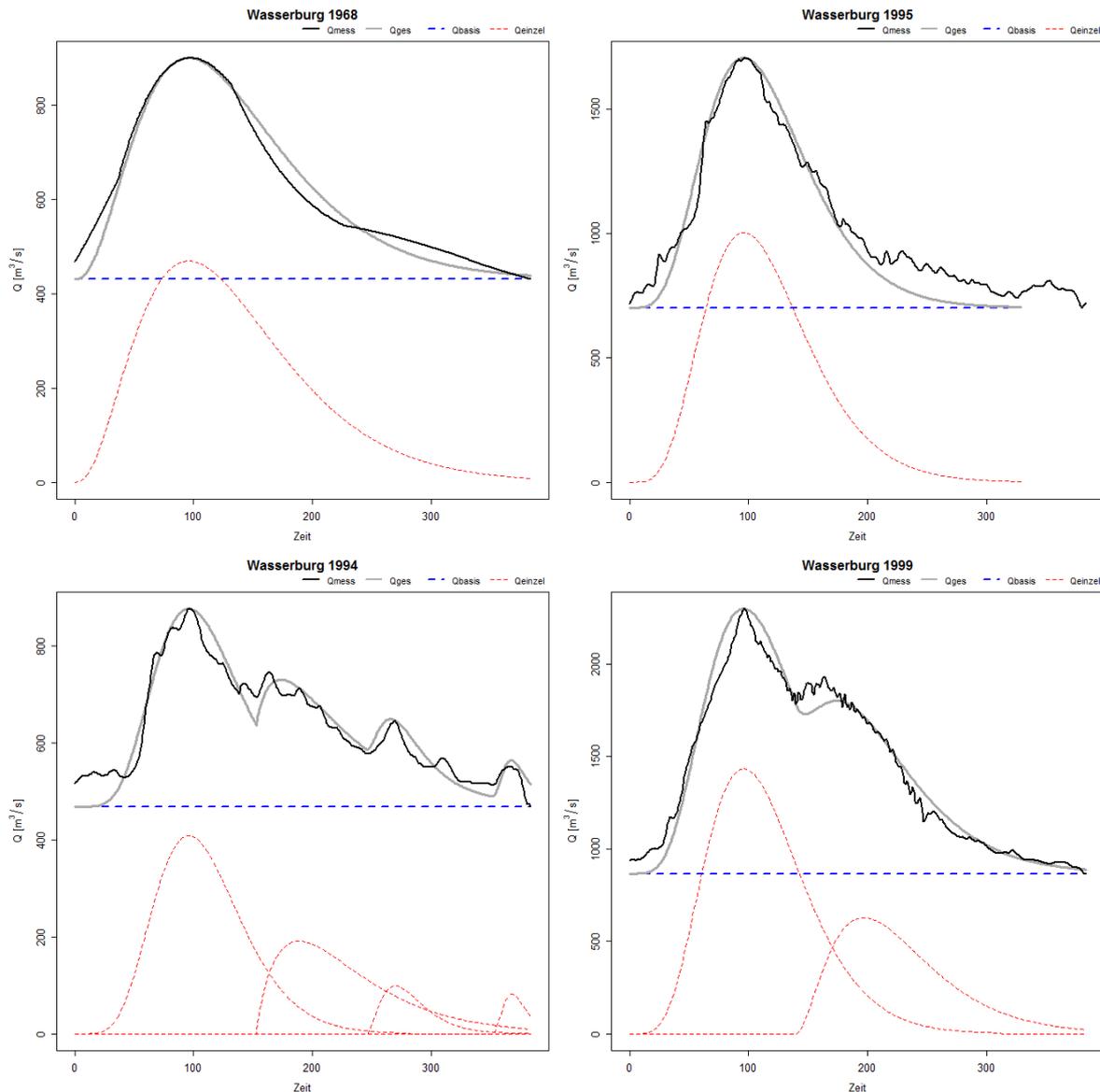


Abbildung 58: Hochwasserwellen zu Jahreshöchstabflüssen am Pegel Wasserburg und Nachbildung durch eine (oben) oder mehrere (unten) Kozeny-Funktionen, Zeit in 15-Minuten-Schrittweite

Ausgangspunkt sind die Überlegungen von Klein / Schumann (2006) sowie Klein (2009) zur Erweiterung des Kozeny-Ansatzes auf zweigipflige Wellen. Da jedoch auch Zweigipfligkeit eine nicht immer hinreichende Anpassung an reale Hochwasserwellen erlaubt, wurde hier ein Verfahren konzipiert und implementiert, das es erlaubt, vollständige Abflussganglinien in eine grundsätzlich beliebige Zahl von Kozeny-Einzelwellen zu zerlegen. Dazu werden lokale Maxima gesucht und einzelwellenbezogene Basisabflüsse, Anstiegszeiten, Scheitelabflüsse und Wellenform-Parameter so ermittelt, dass die parametrisierten Kozeny-Einzelwellen nach Superpositionierung zu den Gesamtwellen führen. Das Ergebnis des Verfahrens für das Kalenderjahr 2004 am Pegel Wasserburg zeigt Abbildung 59. Man erkennt, dass das Verfahren zu Wellencharakteristika führt, die den gemessenen Wellen sehr ähnlich sind. Direktabfluss-

füllen, Anstiegszeiten, Wellenformen und Scheitelabflüsse bleiben dabei einzelwellenspezifisch und wellenübergreifend erhalten.

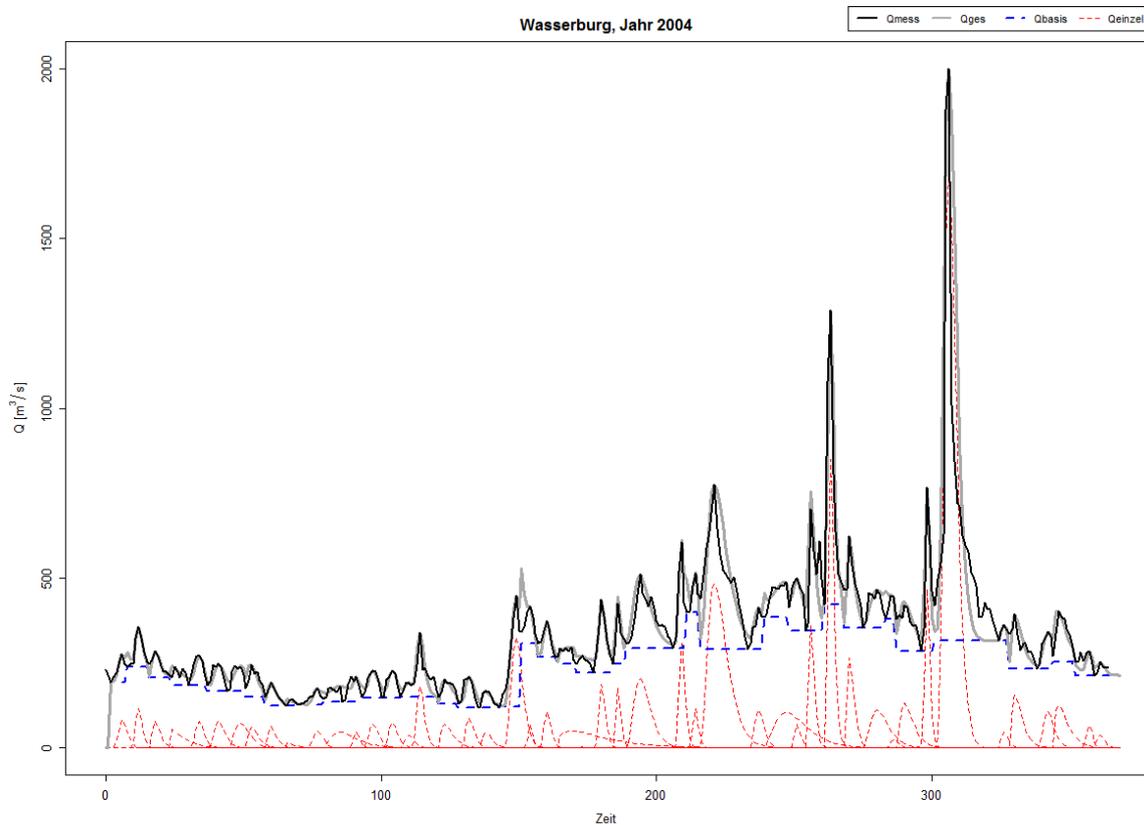


Abbildung 59: Kozeny-Wellenseparation der Abflussganglinie des Pegel Wasserburg / Inn, Jahr 2004

Um die mögliche Mehr Gipfligkeit von Hochwasserwellen in die synthetische Erzeugung von Hochwasserwellen zu integrieren, wird das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Konzept wie folgt erweitert:

1. Es werden jährliche Hochwasserabflussscheitel-Serien gebildet.
2. Die Ereigniszeiträume werden zunächst vorläufig als Datenfenster mit zwei Tagen vor und drei Tagen nach dem Scheitelzeitpunkt gebildet.
3. Der Kozeny-Wellenzerlegungsalgorithmus wird auf die Abflussdaten des Datenfensters angewandt. Alle Analysen werden mit Abflusszeitreihen in der Schrittweite von 15 Minuten umgesetzt. Hinsichtlich der bayerischen Daten werden dabei bezogen auf die Zeiträume vor 1971 die nach Wagner (2012) disaggregierten Daten zugrunde gelegt.
4. Der jeweilige Ereignisbeginn ist anhand der Wellenzerlegung unmittelbar erkennbar. Für das Ereignisende wird die DVWK-Unabhängigkeitsregel (s. DVWK 1999) auf den höchsten und den zweithöchsten Scheitel der Kozeny-Wellen angewandt, sofern der niedrigere der beiden nach dem höheren auftritt. Liegt nach diesem Test Unabhängigkeit zwischen

den Scheiteln laut DVWK vor, dann werden die Nachwellen entfernt, in allen anderen Fällen werden die im Datenfenster erfassten Wellen beibehalten. Ist nämlich die kleinere Welle vorgelagert, dann kann keine Unabhängigkeit vorliegen, weil aufgrund der Superpositionierung der Teilwellen die Vorwelle unweigerlich die Hauptwelle beeinflussen muss.

5. Anhand des Verfahrens liegen für jedes Hochwasserereignis die Hochwassermerkmale Direktabflussscheitel QSD, Anstiegszeit TS, Basisabfluss QB und Formparameter m für alle Kozeny-Teilwellen vor. Zusätzlich wird der Abstand zwischen dem Beginn der jeweiligen Teilwellen erfasst. Die Verwendung des Formparameters ist inhaltlich gleichwertig zur Verwendung des Volumens, weil die Beziehung zwischen beiden eindeutig ist, wenn Anstiegszeit und Scheitel gegeben sind.
6. Es werden geeignete Verteilungsfunktionen an die erfassten Hochwassermerkmale angepasst. Im Fall des Direktabfluss-Scheitels wird die Verallgemeinerte Extremwertverteilung zugrunde gelegt und anhand der L-Momente parametrisiert. Im Fall der anderen kontinuierlichen Merkmale, die keine Extremwerte darstellen, wird die jeweils geeignetste der Verteilungen Normal, Lognormal, Gamma, Weibull, Pareto und Logistische mittels Maximum-Likelihood parametrisiert und anhand der Kriterien Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-Van-Mises und BIC schließlich gewählt. Die Anzahl der Teilwellen eines Ereignisses wird mittels der diskreten Poisson- und der Abstand zwischen den Teilwellen mittels der diskreten Negativ-Binomial-Verteilung beschrieben.
7. Für die Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen dem Einfluss der Verteilungen bereinigten Pseudodaten werden die t-Copula sowie Vine-Copula-Ansätze mit den jeweils geeignetsten bivariaten Copula-Familien untersucht. Die Auswahl der jeweiligen Copula-Familien erfolgt auf der Grundlage des AIC-Kriteriums.
8. Synthese: Mit der Kenntnis der parametrisierten Randverteilungen und der parametrisierten Copulas werden die Hochwassermerkmale von 10000 Teilwellen generiert, auf der Grundlage der diskreten Verteilungen zu Ereignissen zusammengefasst und damit dann synthetische, ein- und mehrgipflige Hochwasserwellen ermittelt.

Abbildung 60 zeigt einige Beispiele synthetisch erzeugter Wellen für den Standort des Pegels Wasserburg. Man erkennt, dass das Verfahren eine große Schar unterschiedlicher, ein- und mehrgipfliger Wellenformen erzeugt.

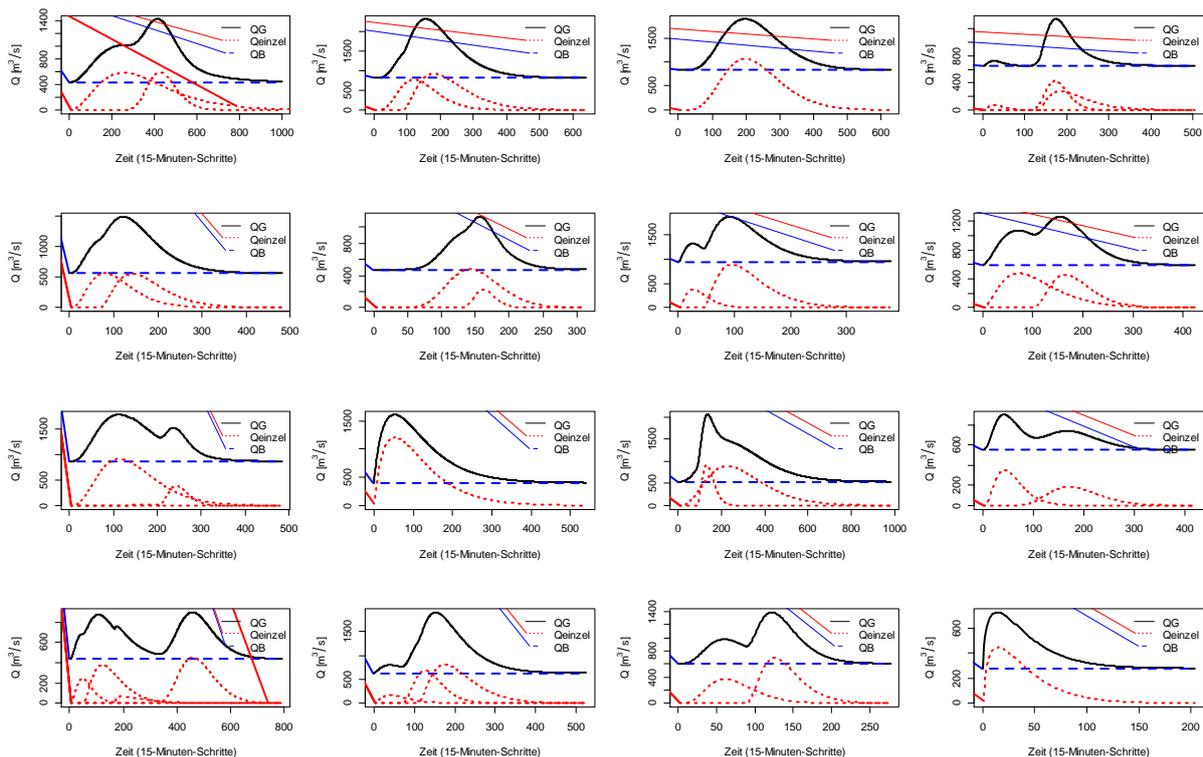


Abbildung 60: Beispiele synthetischer Hochwasserereignisse für den Pegel Wasserburg / Inn

Zur Prüfung der Plausibilität des Gesamtverfahrens wird die Verallgemeinerte Extremwertverteilung mittels der L-Momente an die Hochwasserabflussscheitel der synthetischen Hochwasserwellen angepasst und untersucht, inwieweit sich die aus den gemessenen und den synthetischen Daten ermittelten Hochwasserabflussquantile höherer Jährlichkeiten ähneln. Das Ergebnis für den Pegel Wasserburg zeigt Tabelle 14. Man erkennt, dass die Abweichungen in der Größenordnung der vom LfU zumeist angegebenen Quantilunsicherheiten liegen.

Tabelle 14: Hochwasserabflussquantile der Jährlichkeiten $T_n=20, 50$ und 100 für Pegel Wasserburg, gemessene und synthetisch erzeugte Scheitelabflüsse

Jährlichkeit	Gemessen [m³/s]		Synthetisch erzeugt [m³/s]	Abweichung %	
	GEV_LM_gem	amtlich	GEV_LM_syn	zu GEV_LM_gem	zu amtlich
$T_n = 20$	2361	2200	2187	-7 %	1 %
$T_n = 50$	2701	2600	2641	-2 %	2 %
$T_n = 100$	2958	2850	3036	2 %	7 %

6.2. Pegelübergreifende Abhängigkeitsmodellierung

Modellbaustein „R-Vine-Copula mit Flussnetz-Struktur“

Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Verfahren generieren die an verschiedenen Pegeln auftretenden Hochwasserwellen unabhängig voneinander. Für die Dimensio-

nierung von Einzelpoldern ist eine Berücksichtigung etwaiger Abhängigkeiten auch nicht erforderlich. Problematisch ist die Verwendung derartiger Daten allerdings zum Beispiel dann, wenn ereignisbezogene Steuerungsmaßnahmen entlang des Inns betrachtet werden sollen. In diesem Fall können zum Beispiel die Ergebnisse von Niederschlag-Abflussmodellen verwendet werden, weil dabei Hochwassergenese und Wellenablauf im Gewässernetz für das betrachtete Hochwasserereignis deterministisch nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten simuliert werden.

Pegelübergreifende Abhängigkeiten können aber auch auf der Grundlage eines copulabasierten Verfahrens umgesetzt werden, sofern die in die Copula eingebundenen Variablen die ereignisbezogen gleichzeitig auftretenden Hochwassermerkmale an verschiedenen Pegeln gemeinsam beschreiben. Die Copulas werden dadurch hochdimensionale Verteilungsfunktionen, denn ihre Dimension d entspricht dann dem Produkt aus der Anzahl der betrachteten Variablen n_V an einem Pegel und der Anzahl der betrachteten Pegel n_P , also $d = n_V * n_P$.

In Abschnitt 3 wurden C-Vines und D-Vines als die beiden klassischen Vine-Copula-Strukturen eingeführt. Beide sind Spezialfälle von R-Vines, die es erlauben, Vine-Copula-Strukturen sehr allgemein auf der Grundlage einer matrizenbasierten Strukturdefinition zu vereinbaren. Diese Notation muss dabei explizit für die oberste und alle weiteren Vine-Copula-Ebenen umgesetzt werden. Da ein d -dimensionales Problem die Schätzung von $d*(d-1)/2$ bivariaten Copulas erfordert, ist der Aufbau der R-Vine-Matrizen in der Regel eine vergleichsweise aufwändige Aufgabe und bei hochdimensionalen Problemen manuell kaum zu bewältigen. Automatisiert lässt sich dies nur für C- und D-Vine-Strukturen umsetzen, nicht jedoch für beliebige R-Vine-Strukturen.

In Abschnitt 4 wurde bereits erläutert, dass die Anordnung der Variablen in der ersten Ebene maßgeblichen Einfluss auf die Nachbildung der Abhängigkeitsstruktur hat und in der Regel gilt, dass hochkorrelierte Variablen in der ersten Ebene benachbart angeordnet sein sollten. Erweitert man nun die Copula-Ansätze pegelübergreifend, dann sollte diese Regel beim Aufbau der R-Vine-Struktur berücksichtigt werden.

Vor den genannten Hintergründen wurde hier ein neuer Algorithmus entwickelt, der es erlaubt, R-Vine-Strukturen unter Zugrundelegung einer gegebenen Gewässernetz-Topologie automatisch abzuleiten. Damit können R-Vine-Matrizen bei Vorgaben zu Ober-Unterge- und Nebengewässer-Pegel-Beziehungen so aufgebaut werden, dass die Hochwassermerkmale räumlich benachbarter Pegel in der obersten Ebene nebeneinander platziert werden. Ein Beispiel dazu zeigt Abbildung 61. Dabei wurde vorgegeben, dass fünf Pegel mit jeweils vier Merkmalen berücksichtigt werden sollen, dabei drei Pegel am Hauptgewässer (HP1 bis HP3) liegen und bezogen auf den zweiten Hauptgewässer-Pegel (also HP2) zwei seitliche

Zuflusspegel (NP1 und NP2) zu berücksichtigen sind. Die Hochwassermerkmale mit den Nummern 4, 8, 12, 16 und 20 sind dabei diejenigen Größen, für die eine hohe, pegelübergreifende Abhängigkeit erwartet wird (z. B. Scheitelabfluss), die Merkmale 1 bis 3 sind im Beispiel drei weitere Merkmale des ersten Pegels (HP1), 5 bis 7 diejenigen des zweiten (NP1) usw., wobei auch deren Anordnung wiederum der genannten Regel hoher Korrelation benachbart platzierter Variablen genügen sollte. Man erkennt in der Abbildung, dass sich die Hauptvariable des Hauptpegels HP2 (also die Variable mit der Nummer 16) in direkter Nachbarschaft zu den Hauptvariablen der Oberlieger-Pegel HP1, NP1 und NP2 und zur Hauptvariable des Unterliegerpegels HP3 befindet.

Unser Algorithmus ist dabei so aufgebaut, dass die einer Hauptvariable zugeordneten, weiteren Variablen sowohl als C-Vine- als auch als D-Vine-Strukturen abgebildet werden können.

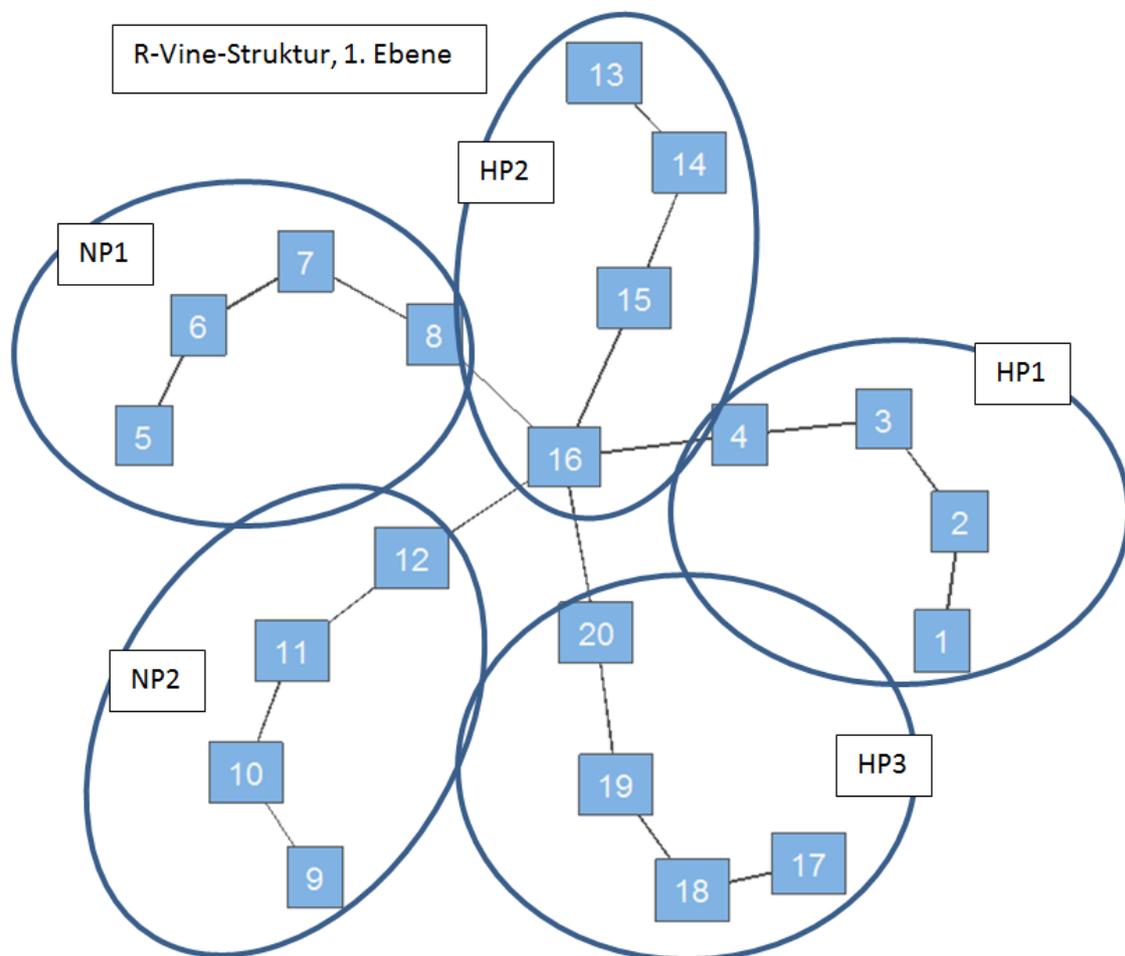


Abbildung 61: R-Vine-Struktur in der obersten Ebene, automatisch erzeugt auf der Grundlage vorgegebener topologischer Beziehungen

Modellbaustein „Multitributäres Muskingum-Flood-Routing“

Als weiterer Modellbaustein wird nachfolgend der Muskingum-Ansatz in einer erweiterten Form verwendet, um den Wellenablauf für Strecken zu modellieren, die durch mehrere Oberliegerpegel (also hier Pegel am Inn sowie ein oder mehr seitliche Zuflusspegel) und einen Unterliegerpegel (am Inn) geprägt sind. Grundsätzlich sollte dabei der zu verwendende Ansatz wegen der großen Zahl an zu routenden Wellen möglichst wenig Rechenzeit beanspruchen und gleichzeitig mit geringem Datenbedarf zu kalibrieren sein. Natürlich ist es dabei nicht das Ziel, die in anderen Projekten umgesetzten, komplexen hydrodynamischen Berechnungen zu ersetzen.

Betrachtet man alleine die topologische Nachbarschaftsstruktur der im Rahmen des Projektes zu verwendenden Pegel, dann sind teilweise mehrere Eingangspiegel zu berücksichtigen, um die Wellen am jeweiligen Unterliegerpegel abzubilden (z. B. Oberlieger Rosenheim o.d.M. / Inn, Rosenheim / Mangfall, Anger / Attel und Weichselbaum / Murn für den Unterlieger-Pegel Wasserburg / Inn). Um die Erfordernisse nach hoher Rechengeschwindigkeit und einfacher Kalibrierbarkeit auch bei multiplen Eingangsstrukturen zu erfüllen, wird das multitributäre Muskingum-Modell („Extended Muskingum“) als Flood-Routing Ansatz zugrunde gelegt, dem nach Khan (1993) und Kumar et al. (2011) folgende Gleichung zugrunde liegt:

$$Q_{t+1} = C_0^1 I_t^1 + \dots + C_0^m I_t^m + C_1^1 I_{t+1}^1 + C_1^2 I_{t+1}^2 + \dots + C_1^m I_{t+1}^m + C_2 Q_t$$

Dabei ist Q_t der Unterlieger-Abfluss und I_t^j der Oberlieger-Abfluss des j-ten von insgesamt m Pegeln zum Zeitpunkt t . Die Ermittlung der $2m+1$ Parameter $C_0^j, C_1^j, C_2, j = 1, \dots, m$ erfolgt durch Optimierung (vgl. Kumar 2011). Abbildung 62 zeigt gemessene und anhand der Oberlieger Rosenheim o.d.M./Inn, Rosenheim / Mangfall, Anger / Atter und Weichselbaum / Murn mittels des erweiterten Muskingum-Modells berechnete Abflüsse für die erweiterte Hochwasserperiode des Jahres 1991 am Pegel Wasserburg / Inn. Da die Kalibrierung mit Daten des Kalenderjahres 1985 erfolgte, handelt es sich um eine Validierungsbetrachtung. Man erkennt, dass das einfache Routing-Verfahren in der Lage ist, die Abflüsse des Unterliegerpegels in hoher Genauigkeit nachzubilden.

Werden im Rahmen der Optimierung nur die Parameter C_0^j und C_1^j frei variiert und der Parameter C_2 ermittelt, indem die Werte der Parameter C_0 und C_1 aufaddiert (SMc01) und von 1 abgezogen werden, also $C_2=1-SMc01$, dann ist gewährleistet, dass das Modell massenerhaltend ist.

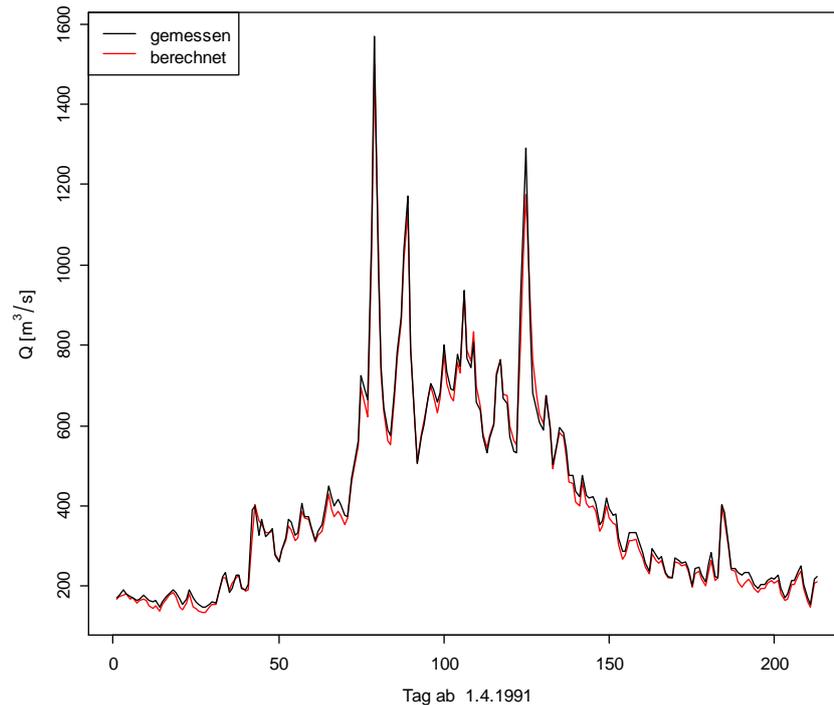


Abbildung 62: Gemessene und berechnete Abflüsse (erweitertes Muskingum-Verfahren) im Validierungsjahr 1991, Pegel Wasserburg / Inn

Umsetzung der pegelübergreifenden Copula-Ansätze

Für die konkrete Umsetzung des Ansatzes wird wie folgt vorgegangen:

- Die maßgeblichen Ereigniszeiträume sind ausschließlich die entlang des Inns anhand von Hochwasserjahresserien ermittelten. Bezogen auf die Nebengewässer werden nicht die mit den jeweiligen Jahreshöchstabflüssen einhergehenden Ereigniszeiträume betrachtet, sondern vielmehr werden die unter Beachtung von Laufzeiten innerhalb der Inn-Ereigniszeiträume auftretenden Abflussganglinien betrachtet, auch dann, wenn es sich nicht um Hochwassersituationen an den Nebengewässern handelt.
- Für die Ableitung der zu modellierenden Daten an den Unterliegerpegeln gibt es verschiedene Möglichkeiten:
 - Statistische Berücksichtigung pegelübergreifender Abhängigkeiten unter Verwendung der originären Messwerte an den Unterliegern (kein Flood-Routing): das Verfahren synthetisiert dann wiederum Daten im Werteraum der originären Messwerte und erhält dabei pegelübergreifende Abhängigkeiten zwischen den Variablen in einer statistischen Weise. Unter Beachtung der an jedem Pegel zu betrachtenden Variablen Scheitelabfluss, Kozeny-Formparameter, Anstiegszeit und Basisabfluss wird dieser Ansatz nachfolgend in Anlehnung an die Bezeichnung in Abschnitt 4 mit QmTB_spStat benannt.

- Statistisch-deterministische Berücksichtigung pegelübergreifender Abhängigkeiten durch Kombination mit hydrologischer Wellenablaufmodellierung, wobei wiederum zwei Modellformen möglich sind:
 - Zwischengebietsmodellierung: Ermittlung des Zwischengebietszuflusses als Differenzen zwischen den originären Messwerten und den mittels des Multitributären Muskingum-Modells von allen unmittelbaren Oberliegerpegeln (Oberlieger am Inn und etwaig auf der Strecke einmündender Nebengewässer) zum Unterliegerpegel gerouteter Abflüsse und Modellierung des Zwischengebietszuflusses mittels Kozeny-Wellenzerlegung. Der Gesamtabfluss am Unterliegerpegel ergibt sich dann als Summe aus dem modellierten Zwischengebietszufluss und dem von den Oberliegerpegeln gerouteten Abfluss ($Q_{mTB_spRout1}$). Diese Vorgehensweise gleicht vom Prinzip her der Vorgehensweise bei einem Niederschlag-Abfluss-Modell.
 - Zwischengebietszufluss mittels Faktor berücksichtigen: Routen der Abflüsse aller Oberliegerpegel mittels des Erweiterten Muskingum-Modells und Erfassung des Zwischengebietszuflusses in Form eines multiplikativen Faktors ($Q_{mTB_spRout2}$).

Alle drei genannten Ansätze Q_{mTB_spStat} , $Q_{mTB_spRout1}$ und $Q_{mTB_spRout2}$ erweitern die Copula-Modellierung pegelübergreifend. Massenerhaltende synthetische Wellen liefern dabei die beiden Ansätze, bei denen die Wellenablaufmodellierung angewendet wird, also $Q_{mTB_spRout1}$ und $Q_{mTB_spRout2}$.

Die pegelübergreifenden Verfahren werden auf die folgenden Pegel angewandt:

- der Inn-Pegel Wasserburg mit den Zuflusspegeln Rosenheim / Mangfall und Anger / Attel
- sowie der Inn-Pegel Passau-Ingling mit den seitlichen Zuflusspegeln Burghausen / Salzach, Ruhstorf / Rott und Engfurt / Isen

Das Routing im Inn erfolgt also für den Gewässerabschnitt Wasserburg nach Passau-Ingling. Als Betrachtungszeitraum wird dabei der durch den Pegel Wasserburg determinierten Zeitraum 1965 bis 2015 gewählt, wobei zu berücksichtigen ist, dass für die Umsetzung der Copula-Verfahren Fehlwerte nicht erlaubt sind. Bei der Auswahl der Inn- und der Zuflusspegel wurde daher auf eine möglichst gute Überdeckung des Betrachtungszeitraumes geachtet. Soweit bei den Zuflusspegeln nicht alle Jahre erfasst sind (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3), werden diese durch sog. multivariates Imputing (s. z. B. van Buren 2012) ersetzt.

Bei sieben Pegeln und vier Variablen ergibt sich damit eine $d=28$ -dimensionale Copula mit $d \cdot (d-1) / 2 = 378$ zu schätzenden Parametern (theoretisch ließe sich diese hohe Zahl von Parametern durch sogenanntes Trunkieren vermindern, also das Nullsetzen von Abhängigkeitskoeffizienten in höheren Ebenen). Die Copula-Struktur in der ersten Ebene, die mit Hilfe des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Verfahrens abgeleitet wurde, zeigt Abbildung 63. Jede Verbindungslinie entspricht dabei einem bivariat zu ermittelnden Abhängigkeitsmaß. Die Variablen 1 bis 4 bezeichnen beispielsweise die vier Kozeny-Parameter t_A , m , Q_B und Q_S am Pegel Anger / Attel. Diese Variablenreihenfolge gilt für alle Pegel, so dass die Variablen Q_S (also die Variablen mit den Nummern 4, 8, 12, 16, 20, 24 und 28) für alle Pegel unmittelbar benachbart auftreten und damit die Scheitelabfluss-Abhängigkeiten aller Pegel in der ersten Vine-Copula-Ebene erfasst werden.

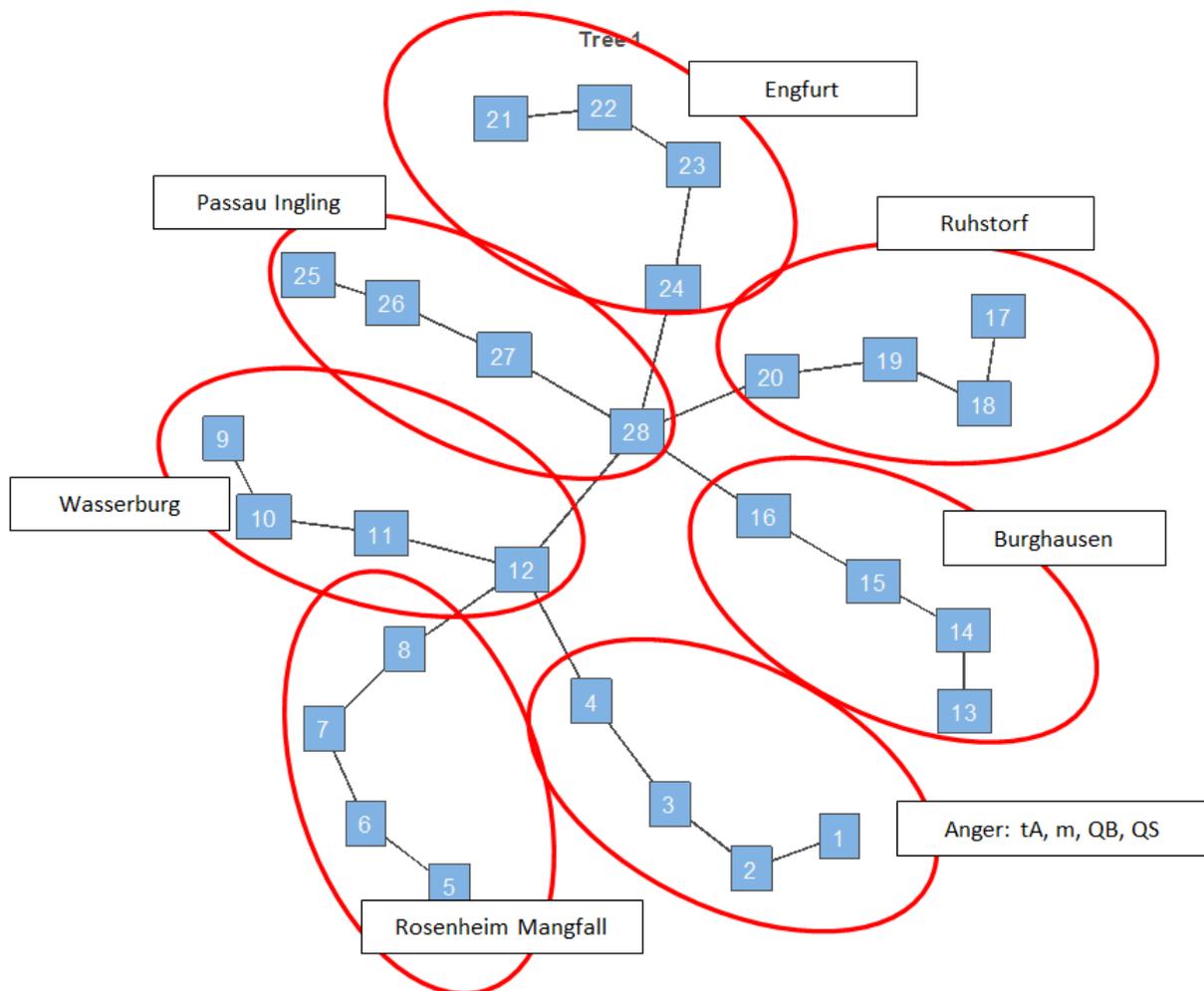


Abbildung 63: R-Vine-Struktur in der obersten Ebene, automatisch erzeugt auf der Grundlage vorgegebener topologischer Beziehungen

Zur Ermittlung des Modells QmTB_spStat werden die in Abschnitt 7.1 dargestellten acht Schritte erneut umgesetzt. Unterschiede zwischen dem dort dargestellten pegelspezifischen und dem hier nun umgesetzten, pegelübergreifenden Fall betreffen die folgenden Punkte:

1. Bei der Auswahl der Hochwasserereignis-Zeiträume sind alleine die Inn-Pegel maßgeblich, für die seitlichen Zuflusspegel werden die gleichen Zeiträume verwendet, auch wenn es sich dann dort nicht um Hochwassersituationen handelt.
2. Die zu parametrisierende Copula ist nicht mehr 4- sondern 28-dimensional und weist die in Abbildung 63 dargestellte R-Vine-Struktur auf. Auch bei der Generierung der synthetischen Datensätze wird eine 28-dimensionale Matrix erzeugt, anhand derer dann die Kozeny-Parameter für alle 10.000 Ereignisse und alle sieben Pegel ermittelt werden. Daraus wiederum werden 10.000 Hochwasserwellen an den Pegeln berechnet.

Zur Aufstellung der QmTB_spRout-Modelle wird für den Gewässerabschnitt von Wasserburg bis Passau-Ingling ein Flood-Routing-Ansatz aufgesetzt, der die Abflüsse an den vier Eingangspegeln Wasserburg sowie Burghausen / Salzach, Ruhstorf / Rott und Engfurt / Isen zum Unterlieger Passau-Ingling transferiert. Dazu wird das multitributäre Muskingum-Modell (s.o.) bezogen auf das gesamte Jahr 1965 kalibriert und dann bezogen auf den Gesamtzeitraum von 1965 bis 2015 validiert. Die Berechnungen erfolgen in 15-Minuten-Schrittweite unter Zugrundelegung der kontinuierlichen Zeitreihen (also nicht hochwasserereignisbezogen). Das Verfahren führt bezogen auf den Validierungszeitraum zu einem Nash-Sutcliffe-Koeffizienten von 0,93, also einer sehr hohen Nachbildungsgüte.

Bei der Ermittlung der Zwischeneinzugsgebietszeitreihen für die zu betrachtenden Hochwasserzeiträume (also der Differenz Messung minus massenerhaltendes Routingergebnis, Modell QmTB_spRout1) zeigen sich zum Teil plausible Wellenformen, teilweise erhält man aber auch artefaktartige Strukturen, was die Kozeny-Wellenzerlegung problematisch erscheinen lässt. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich daher ausschließlich auf das Modell QmTB_spRout2, weil die bei QmTB_spRout1 auftretenden Probleme dabei nicht anfallen und der Modellansatz im Vergleich zu gQmT_spStat physikalisch interpretierbare, massenerhaltende Wellen produziert.

Validierung des pegelübergreifenden Modells QmTB_spRout2

Die Validierung des pegelübergreifenden Modells QmTB_spRout2 im Gewässerabschnitt Wasserburg bis Passau-Ingling mit insgesamt fünf seitlichen Zuflüssen erfolgt hier anhand von folgenden Kriterien:

- Güte der Nachbildung der Hochwasserabfluss-Scheitel
- Güte der Nachbildung der Wellenvolumina
- Güte der Nachbildung der Abhängigkeiten zwischen den Scheitelabflüssen an den Inn- und den Zufluss-Pegeln.

Von Interesse sind dabei alleine die Wellen an den Inn-Pegeln Wasserburg und Passau-Ingling. Für beide Pegel liegen auf der Grundlage der vorangehend beschriebenen Vorgehensweisen insgesamt 10.000 synthetische Hochwasserereignisse in 15-minütiger Schrittweite vor.

Zunächst werden die 10.000 Höchstwerte extrahiert und die sich ergebenden Hochwasserquantile der Jährlichkeiten $T_n = 2, 5, 10, 20, 50$ und 100 ermittelt. In Abbildung 64 (Wasserburg) und Abbildung 65 (Passau-Ingling) werden diese den Hochwasserquantilen gegenübergestellt, die sich ergeben, wenn man die Verallgemeinerte Extremwertverteilung an gemessenen Scheitelabflüsse der beiden Pegel anpasst. Man erkennt in beiden Abbildungen, dass die Quantile eine gute Übereinstimmung zeigen.

In einem nächsten Schritt werden für alle erzeugten Wellen Volumina oberhalb von MHQ berechnet und mit den gemessenen sowie den mittels des „QV-Modells“ (s. Abschnitt 5) abgeleiteten Werten verglichen. Die Ergebnisse zeigen Abbildung 66 (Wasserburg) und Abbildung 67 (Passau-Ingling). Am Pegel Wasserburg zeigt das Modell QmTB_spRout2 eine Verteilung, die derjenigen des QV-Modells sehr ähnlich ist. Die Messungen liegen gut innerhalb der abgebildeten Spannweiten. Bezogen auf Passau-Ingling zeigt QmTB_spRout2 eine geringere Spreizung als das QV-Modell, wobei auch dabei der Vergleich mit den Messungen eine insgesamt plausible Verteilung erkennen lässt (s. dazu auch nachfolgenden Abschnitt mit den Ergebnissen des N-A-Modells am Pegel Passau-Ingling).

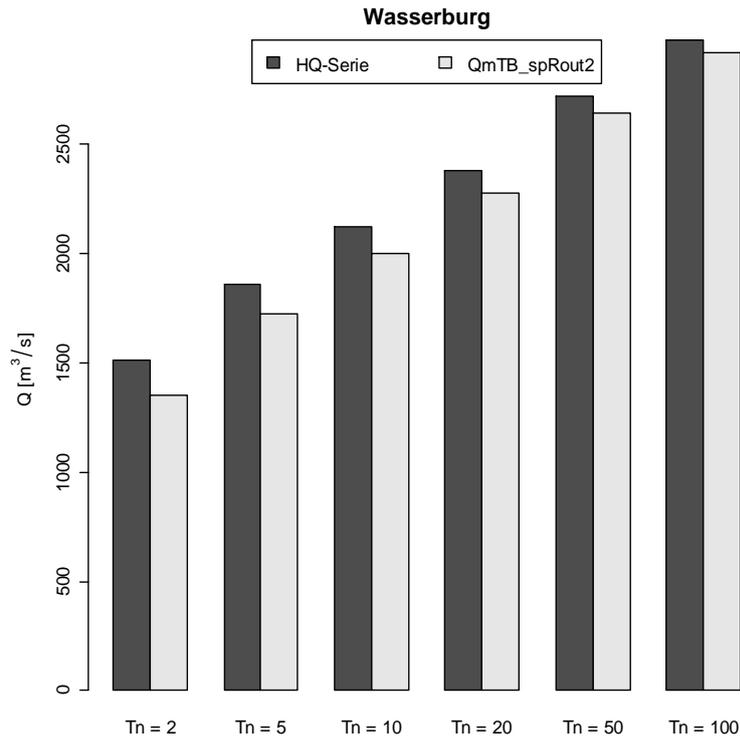


Abbildung 64: Vergleich von Hochwasserscheitelabflüssen der Jährlichkeiten Tn=2 bis Tn=100, Pegel Wasserburg

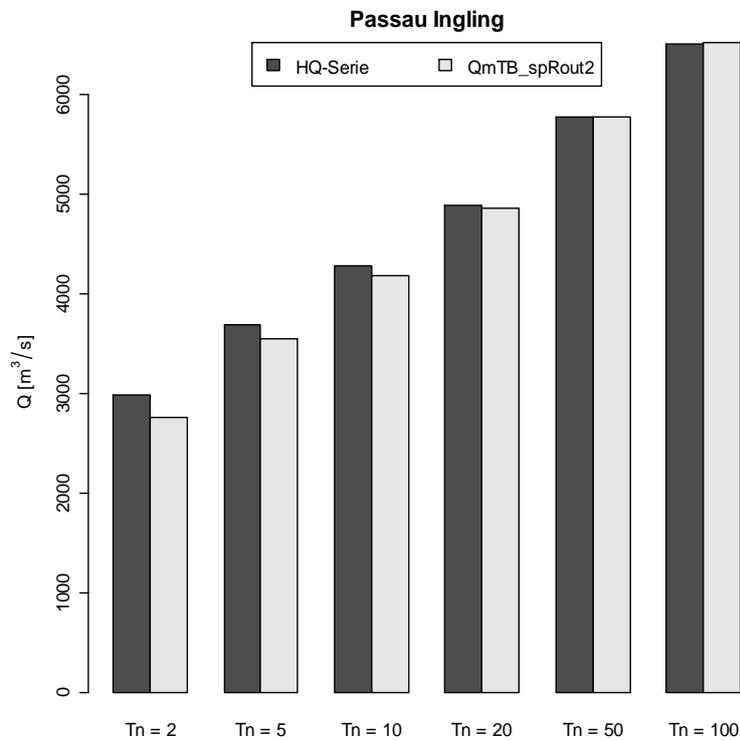


Abbildung 65: Vergleich von Hochwasserscheitelabflüssen der Jährlichkeiten Tn=2 bis Tn=100, Pegel Passau-Ingling

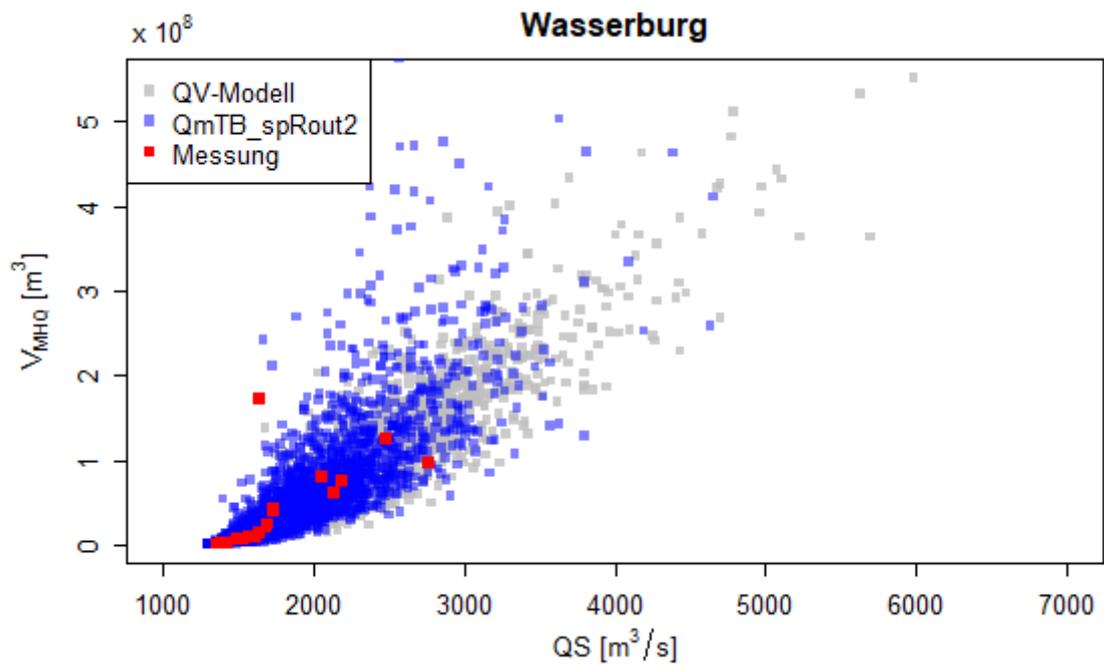


Abbildung 66: Scheitelabfluss und Volumen oberhalb MHQ für den Pegel Wasserburg, Modell QmTB_spRout2

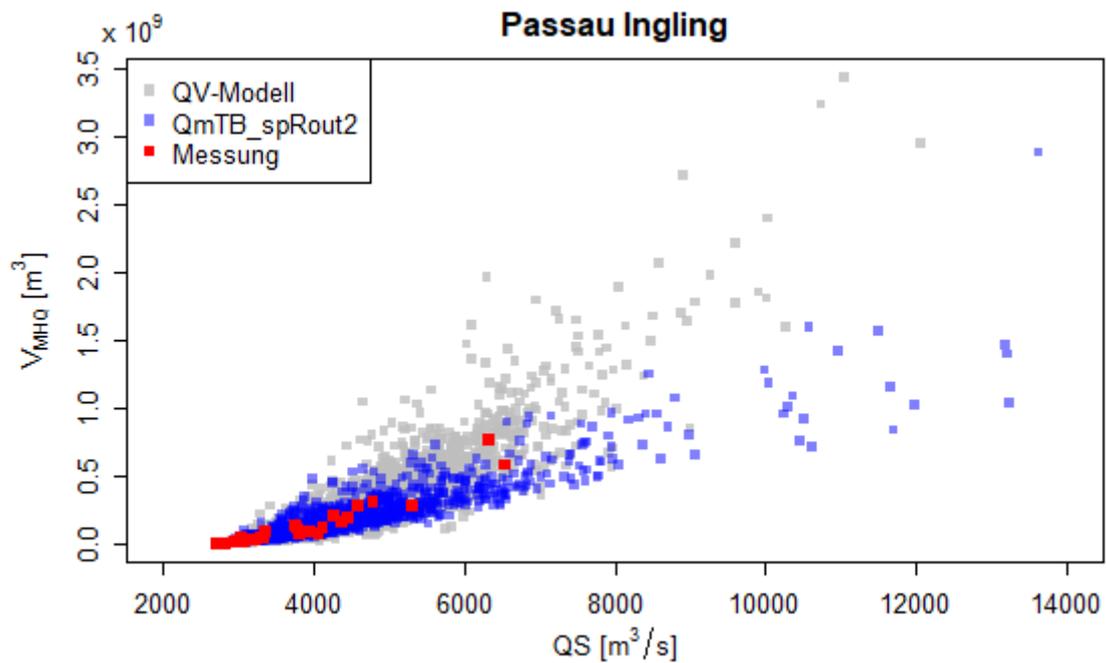


Abbildung 67: Scheitelabfluss und Volumen oberhalb MHQ für den Pegel Passau-Ingling, Modell QmTB_spRout2

7. Vergleich mit den Ergebnissen von Teilprojekt A

7.1. Vergleich der pegelbezogenen Copulas mit der NA-Modellierung

In diesem Abschnitt werden die Simulationen der QV-Beziehung von Teilprojekt B (diese Studie) und Teilprojekt A (TU Wien / Niederschlag-Abfluss-Modellierung) miteinander verglichen. Ziel ist es, Unterschiede und Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen der zwei Teilprojekte darzustellen. Es wird lediglich die Relation von Abflussscheitel zu Abflussvolumen (QV-Beziehung) betrachtet und keine Aussagen zu den Jährlichkeiten der Abflüsse und/oder Volumina getroffen.

Für die Analyse wird jeweils das höchste Hochwasserereignis pro Jahr der Teilprojekt A-Abflusssimulationen gewählt. Hieraus wird das direkte Volumen V_{MHQ} berechnet, wie im Abschnitt 4.1 beschrieben. In Abbildung 68 - Abbildung 84 werden die simulierten Werte aus Teilprojekt B (blaue Kreise), die simulierten Werte aus Teilprojekt A (grüne Rauten) und die Beobachtungen (rote Punkte) gezeigt.

Für die sechs Pegel Rosenheim o.d. Mangfall, Wasserburg, Mühldorf, Ruhstorf, Pramerdorf, und Hofkirchen zeigen die Abbildungen eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der zwei Arbeitspakete. Auch die gemessenen Ereignisse fügen sich sehr gut in die Streuung der Simulationen ein.

Bei insgesamt sieben Pegeln werden die Volumina aus Teilprojekt A im Vergleich zu Teilprojekt B unterschätzt. Dies betrifft die Pegel Anger, Weichselbaum, Engfurt, Burgkirchen, Burghausen, Schärding und Passau-Ingling. Speziell bezogen auf Passau-Ingling erkennt man aber auch, dass die vom pegelübergreifenden Copula-Modell erzeugten Simulationen eine ähnliche Struktur aufweisen wie diejenigen des N-A-Modells (vgl. Abbildung 67 und Abbildung 76).

Bei vier Pegeln werden die Volumina der pegelspezifischen Copula-Modelle im Vergleich zu Teilprojekt B überschätzt, nämlich bei Siezenheim, Rosenheim, Jahrsdorf und Haging.

Insbesondere bei dem Pegel Jahrsdorf, der nur ein kleines Einzugsgebiet besitzt, ist die Überschätzung und Streuung der Daten aus den Niederschlag-Abfluss-Simulationen erheblich. Ungewöhnliche Ereignisse (sogenannte Ausreißer) haben einen großen Einfluss auf die Ergebnisse des Copula-Verfahrens (z. B. Burgkirchen, Weichselbaum, Anger), weil die Simulationen mittels Copulas auf den Messwerten beruhen und diese zwingend einschließen müssen. Die Niederschlag-Abfluss-Simulationen hingegen sind weniger stark an die Mes-

sungen gebunden und können zum Beispiel durch unterschiedliche Vorfeuchtebedingungen stark streuende QV-Beziehungen generieren.

Insgesamt kann man schlussfolgern, dass keines der beiden Verfahren systematische Unter- oder Überschätzungen liefert. Die N-A-Modellierungen erzeugen manchmal eine höhere Bandbreite der QV-Beziehung und können auch außerhalb des erwarteten Extrapolationsbereichs der Messungen liegen. Die copulabasierten Ergebnisse orientieren sich naturgemäß stärker an den Messungen. Dadurch determinieren auch (vermeintliche) Ausreißer den Trend der generierten Extremereignisse.

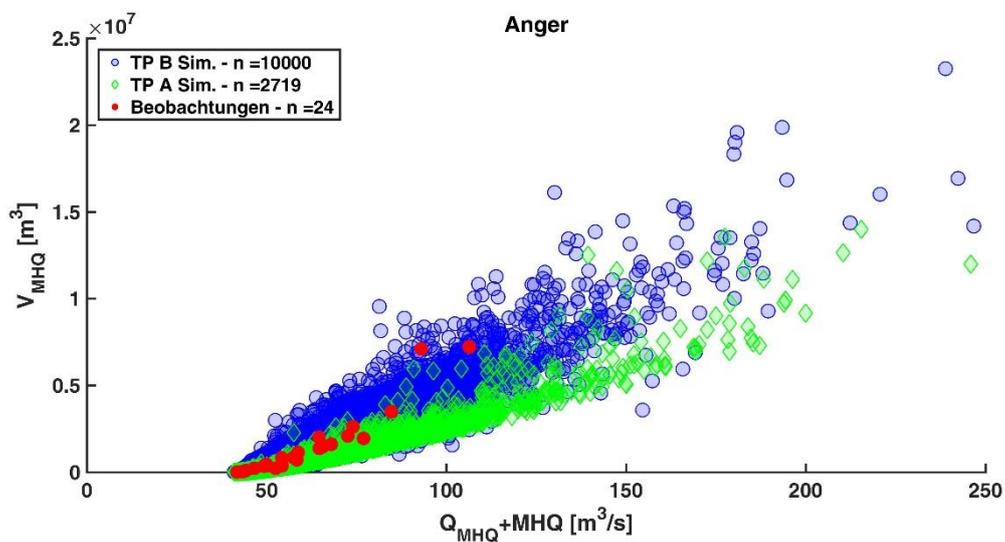


Abbildung 68: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Anger

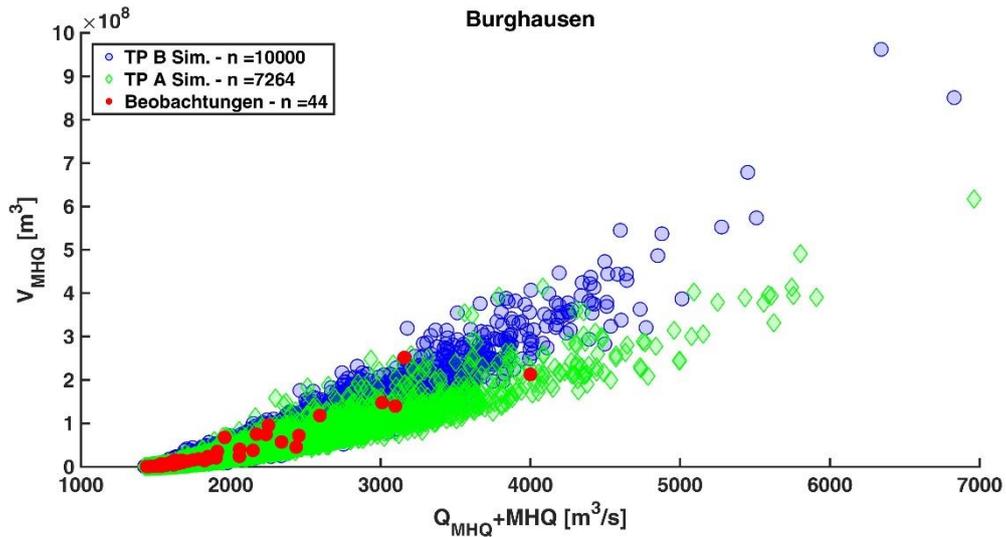


Abbildung 69: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Burghausen

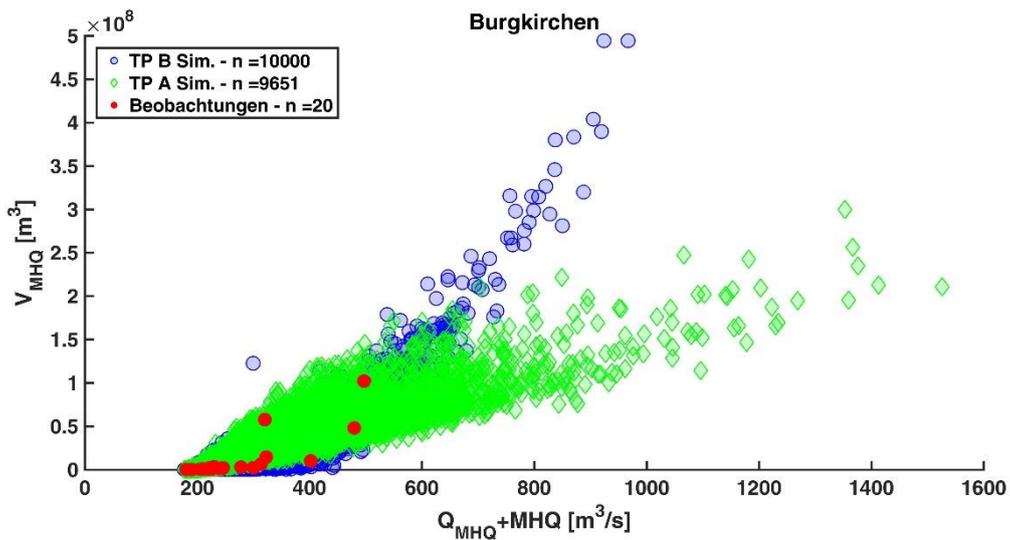


Abbildung 70: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Burgkirchen

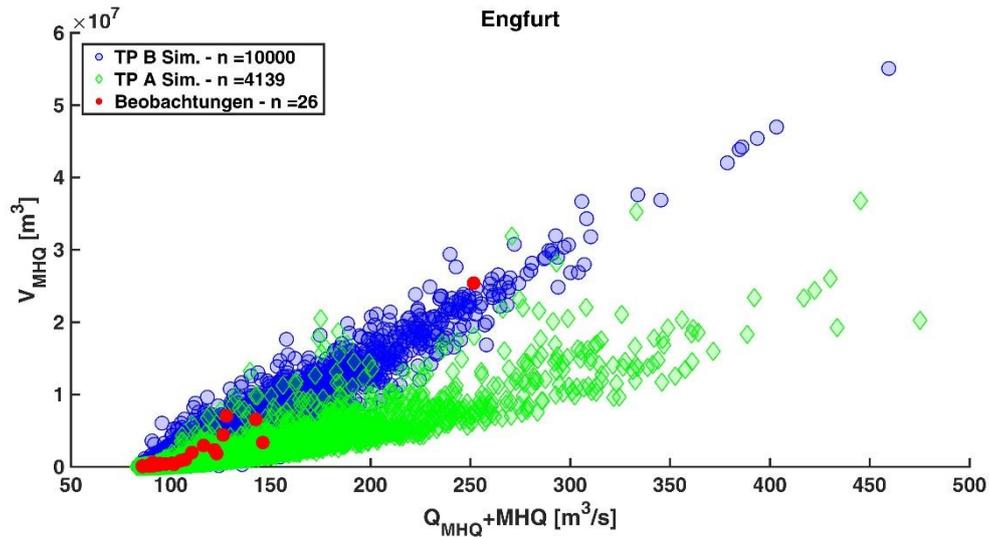


Abbildung 71: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Engfurt

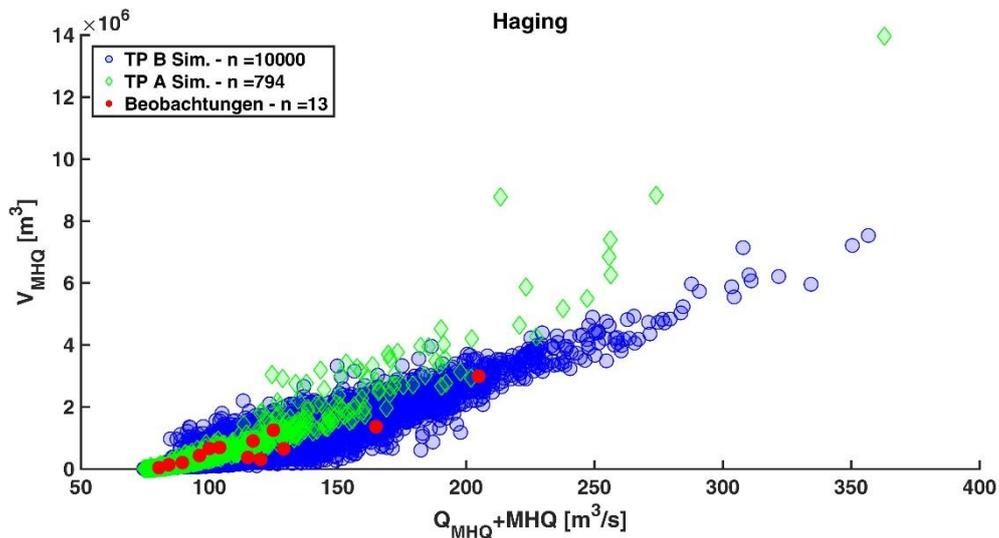


Abbildung 72: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Haging

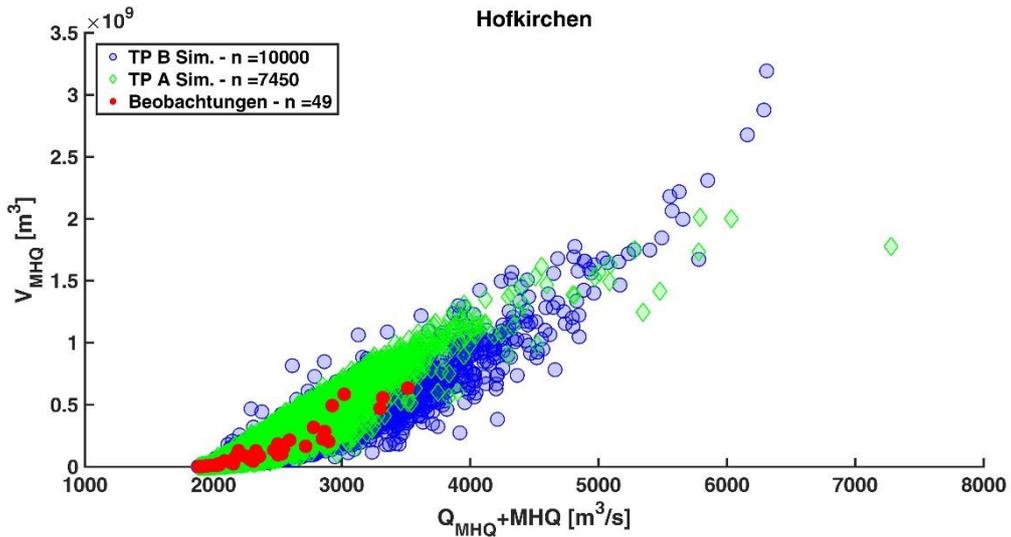


Abbildung 73: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Hofkirchen

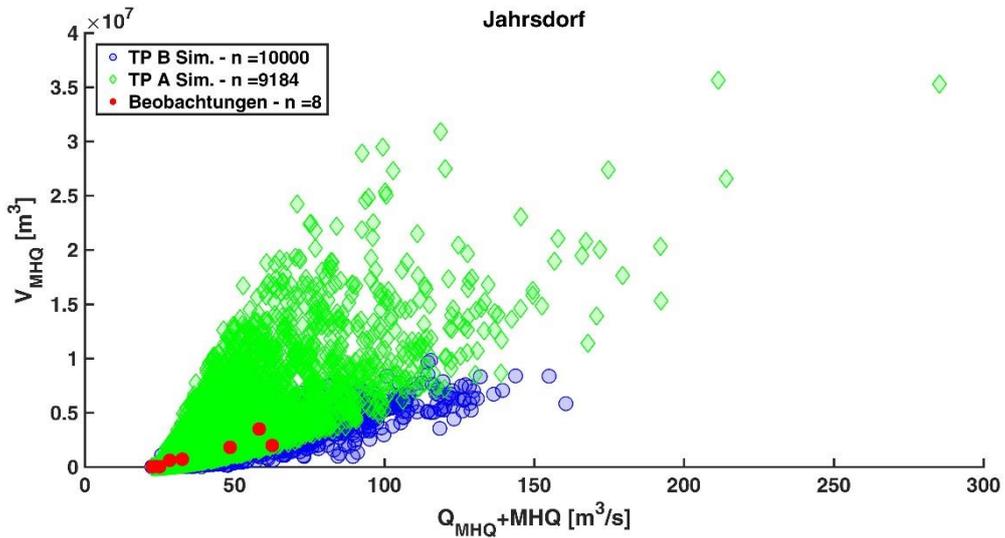


Abbildung 74: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Jahrsdorf

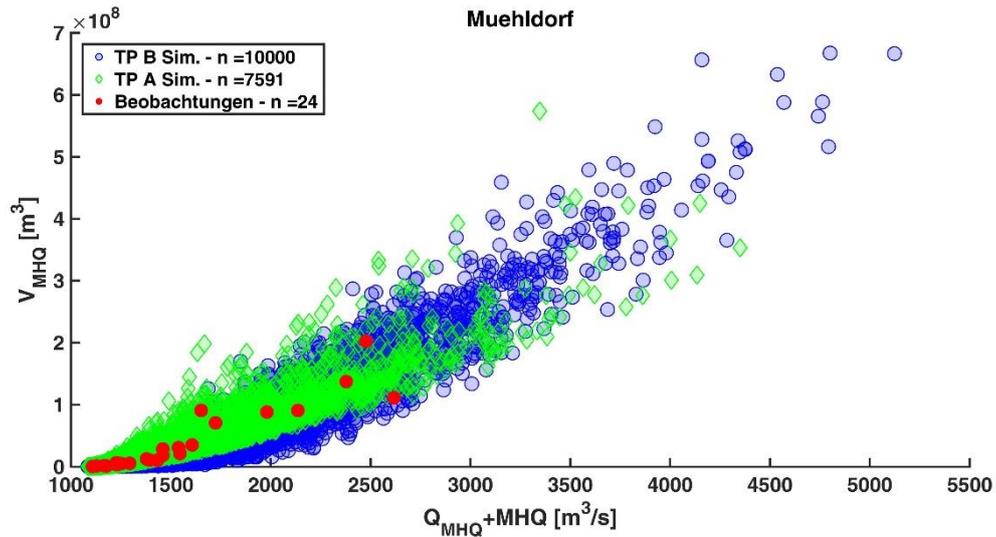


Abbildung 75: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Muehldorf

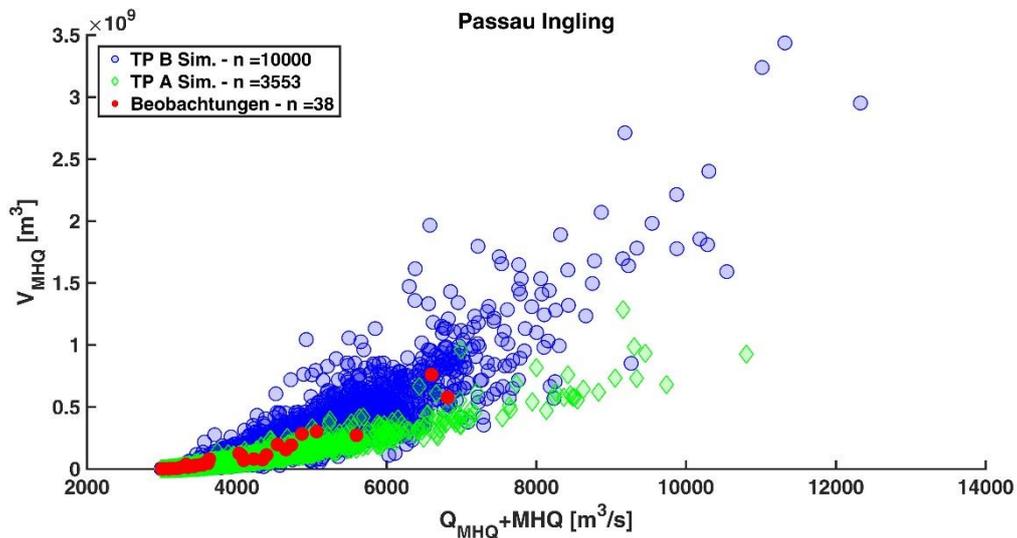


Abbildung 76: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Passau-Ingling

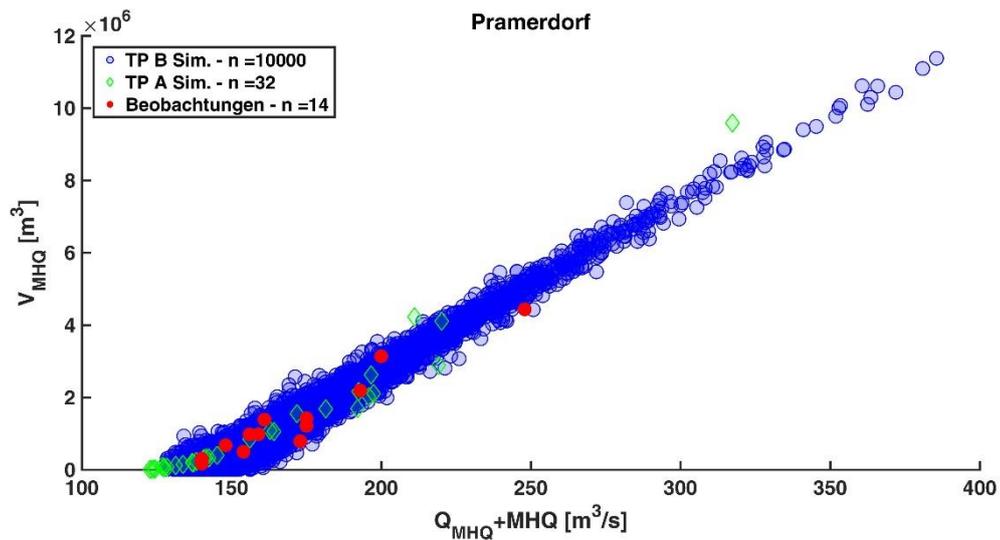


Abbildung 77: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Pramerdorf

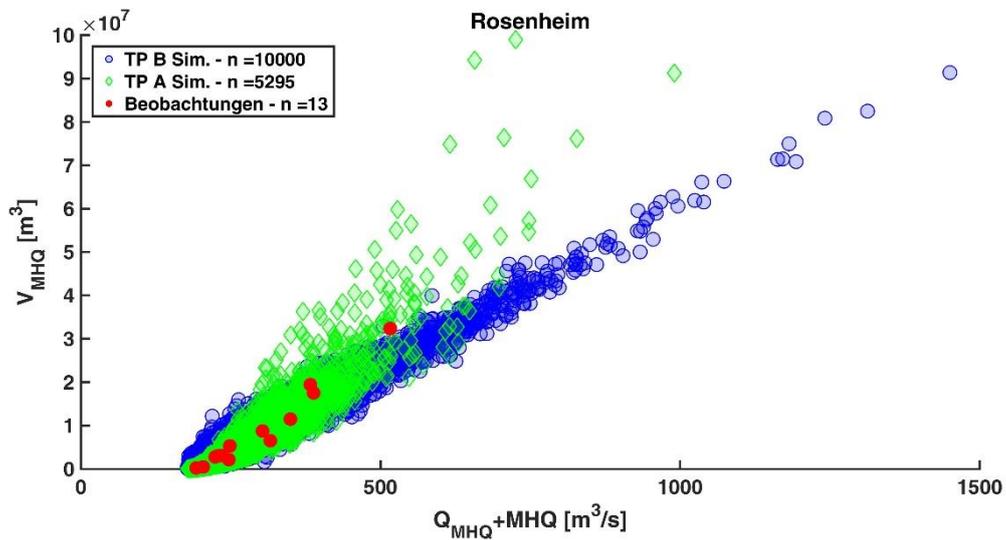


Abbildung 78: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Rosenheim

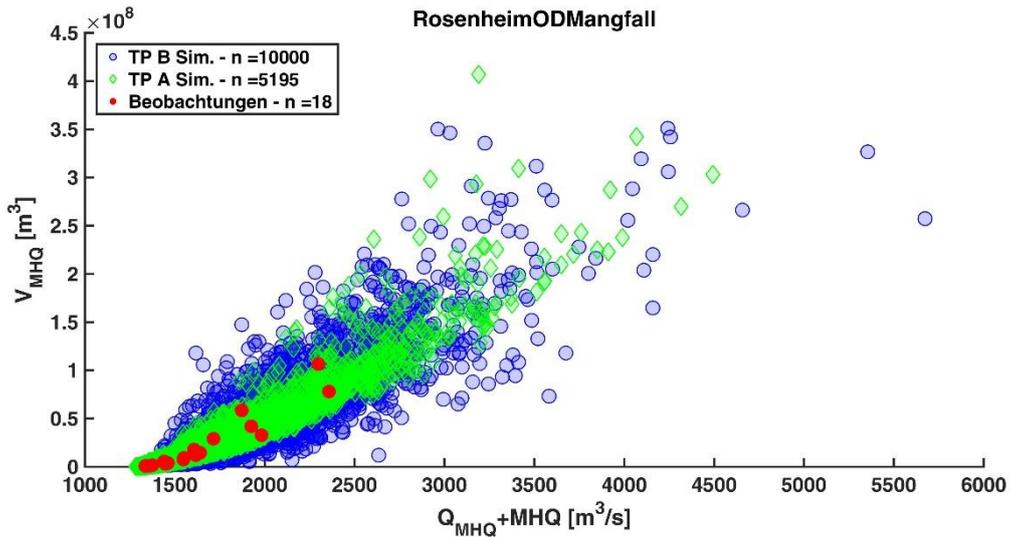


Abbildung 79: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Rosenheim o.d. Mangfall

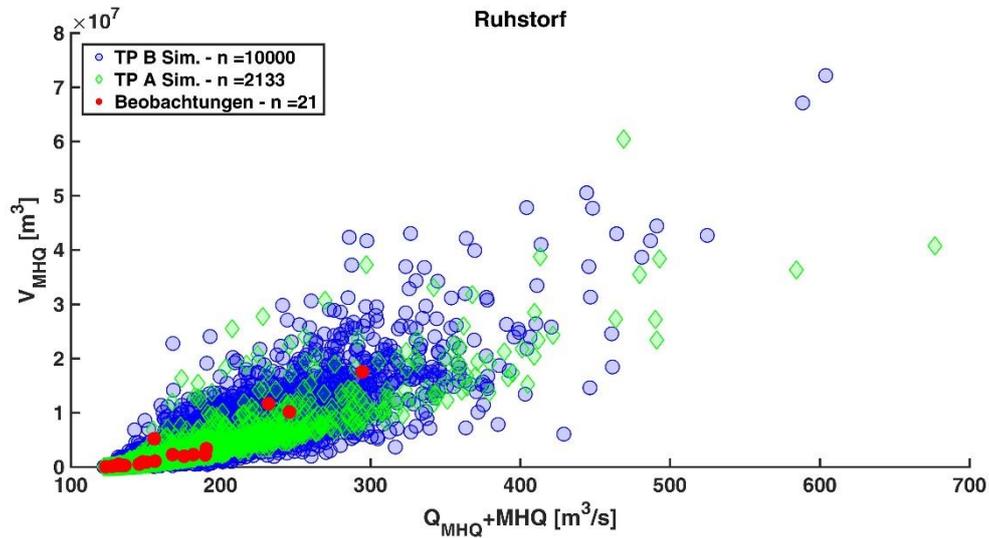


Abbildung 80: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Ruhstorf

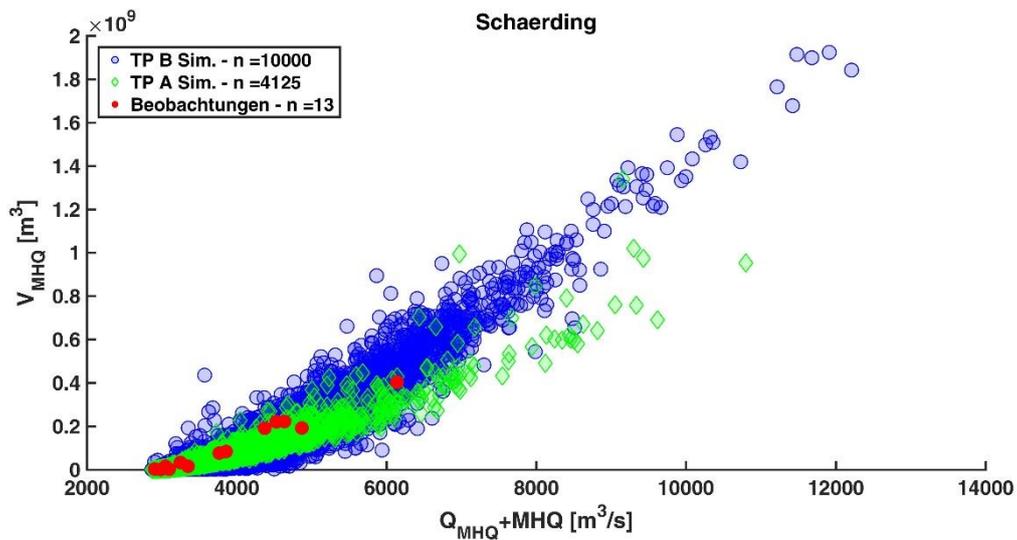


Abbildung 81: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Schärding

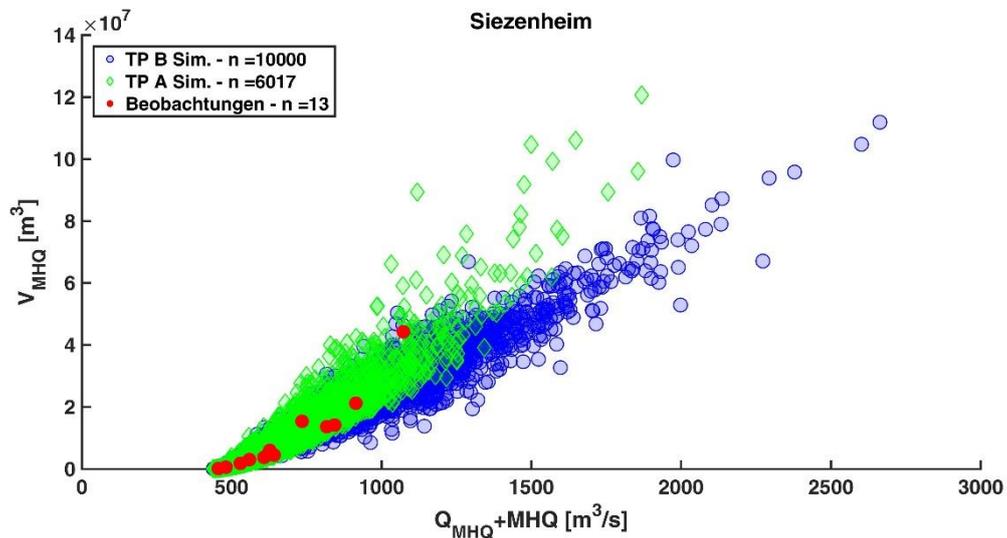


Abbildung 82: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Siezenheim

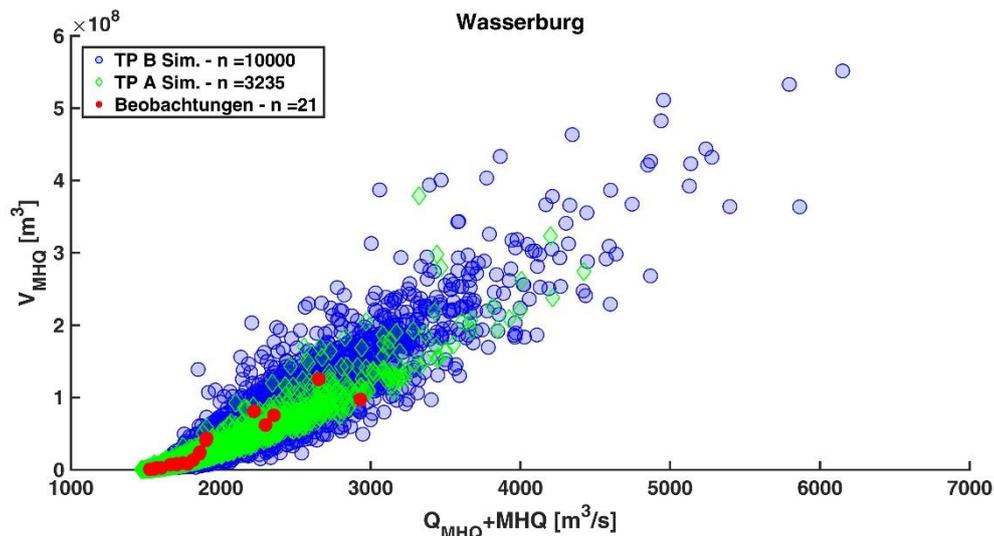


Abbildung 83: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Wasserburg

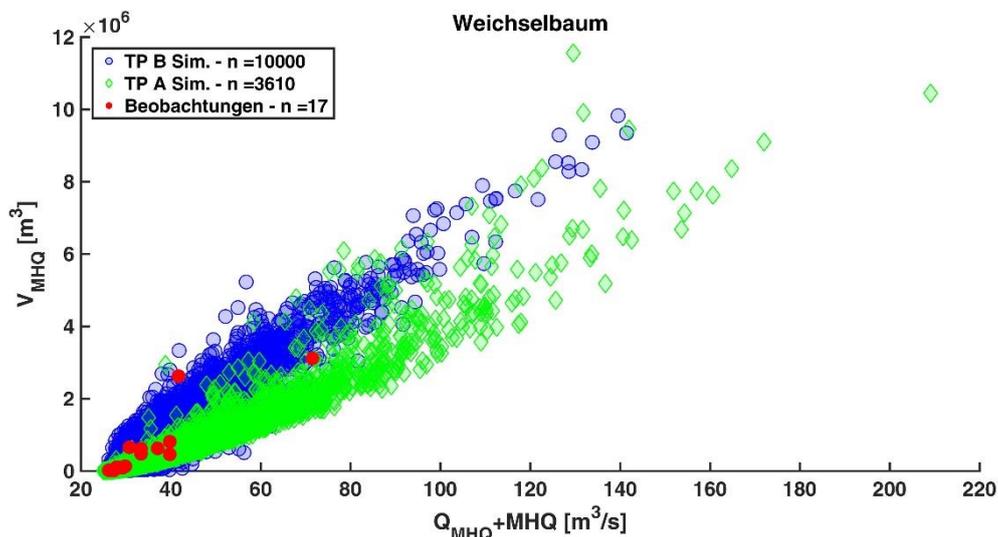


Abbildung 84: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Weichselbaum

7.2. Vergleich räumlicher Abhängigkeiten bei pegelübergreifender Copula und NA-Modellierung

Die Beurteilung der Nachbildung räumlicher Abhängigkeiten beim pegelübergreifenden Modell $Q_{mTB_spRout2}$ erfolgt hier durch Vergleiche mit den Messdaten und den Ergebnissen des N-A-Modells. Verglichen werden dabei die jeweils innerhalb eines Ereignisses auftretenden Scheitelabflüsse an den Pegeln Passau-Ingling und Burghausen (Abbildung 85 bis Abbildung 88) sowie Passau-Ingling und Wasserburg (Abbildung 89). In der linken oberen Ecke ist die jeweilige Spearman-Korrelation r_{sp} angegeben. Man erkennt in den Abbildungen, dass das Modell $Q_{mTB_spRout2}$ die betrachteten Korrelationen mindestens genauso gut (Pegelpaar Passau-Ingling vs. Burghausen) oder sogar besser (Pegelpaar Passau-Ingling vs. Was-

serburg) erfasst als das Niederschlag-Abfluss-Modell. Insgesamt lässt sich somit resümieren, dass QmTB_spRout2 massenerhaltende Wellen unter Erhaltung pegelübergreifender räumlicher Abhängigkeiten liefert, die physikalisch plausibel sind, weil der Strömungsprozess (in einfacher Weise mittels Erweitertem Muskingum-Verfahren) mit modelliert wird, dabei die lokalen Scheitelabfluss-Quantile vorgegebener Jährlichkeiten zu den aus der klassischen Extremwertstatistik ermittelten plausibel sind und auch Wellenvolumina zutreffend abgebildet werden.

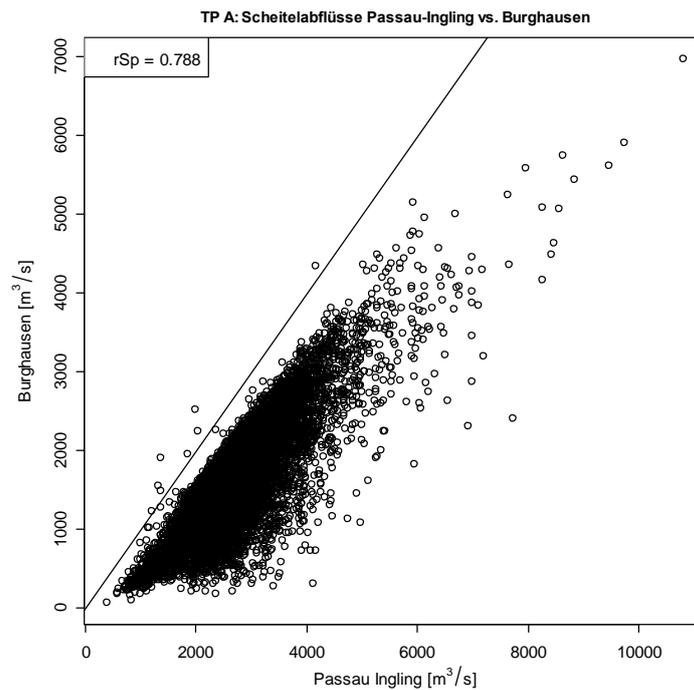


Abbildung 85: Gleichzeitig auftretende Scheitelabflüsse an den Pegeln Passau und Burghausen, ermittelt anhand der Ergebnisse des N-A-Modells (Teilprojekt A)

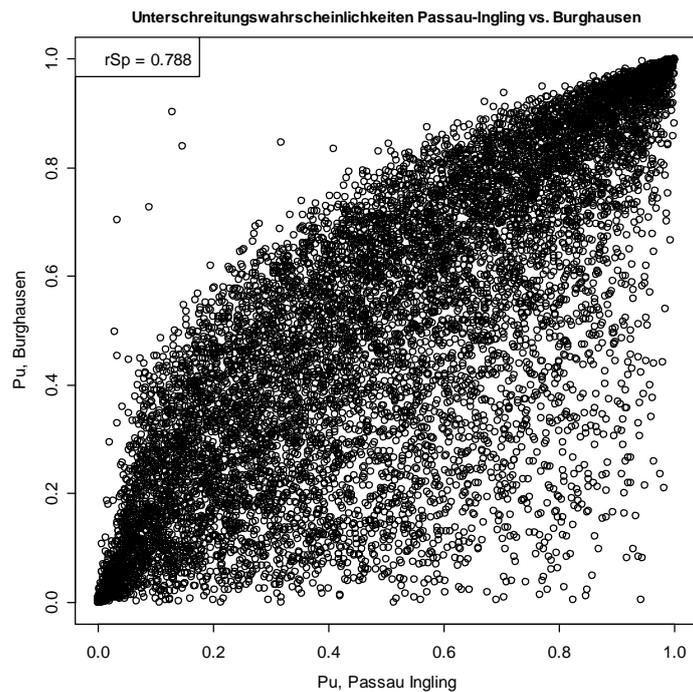


Abbildung 86: Gleichzeitig auftretende Scheitelabflüsse an den Pegeln Passau und Burghausen, ermittelt anhand der Ergebnisse des N-A-Modells, dargestellt in Form von Rängen

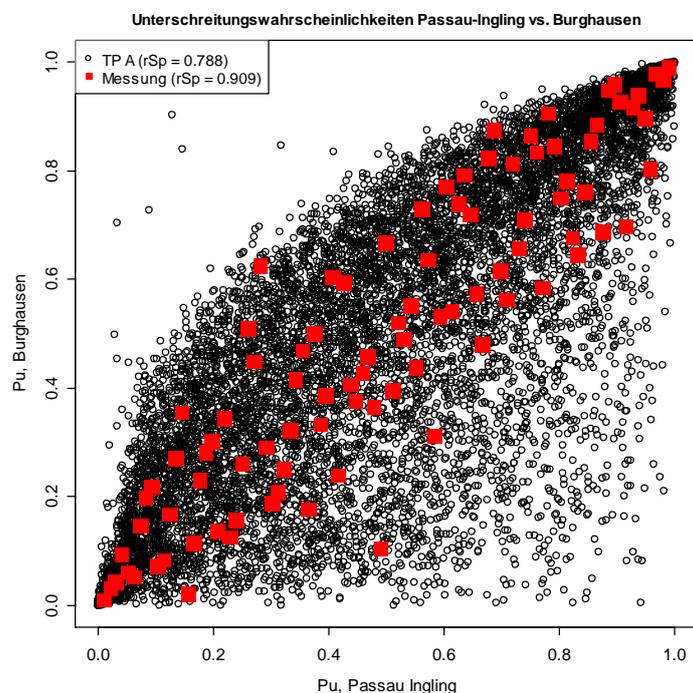


Abbildung 87: Gleichzeitig auftretende Scheitelabfluss-Ränge an den Pegeln Passau und Burghausen, ermittelt anhand der Ergebnisse des Niederschlag-Abfluss-Modells aus Arbeitspaket 5, rot: Messwerte

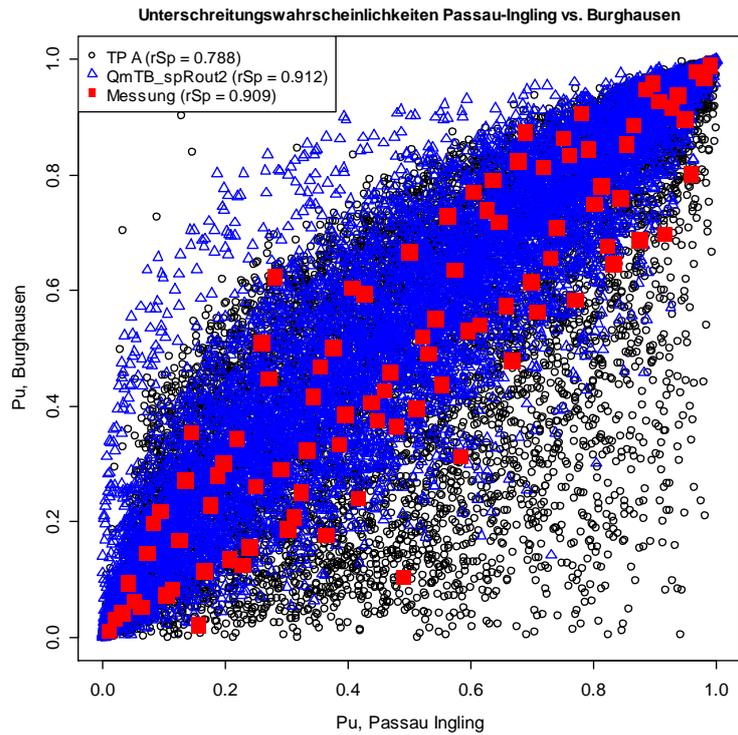


Abbildung 88: Gleichzeitig auftretende Scheitelabfluss-Unterschreitungswahrscheinlichkeiten an den Pegeln Passau und Burghausen, rot: Messwerte, schwarz: N-A-Modell, blau: Modell QmTB_spRout2

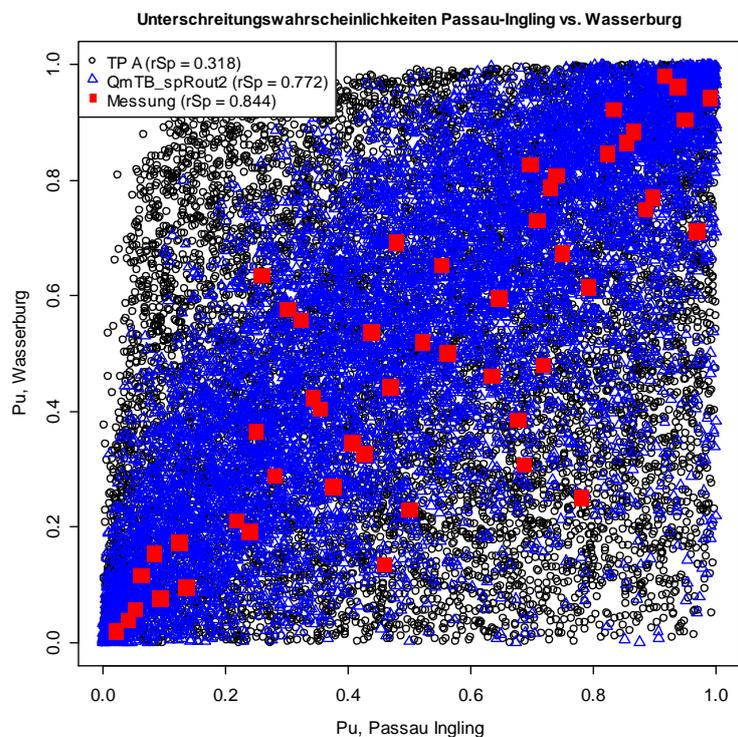


Abbildung 89: Gleichzeitig auftretende Scheitelabfluss-Unterschreitungswahrscheinlichkeiten an den Pegeln Passau und Wasserburg, rot: Messwerte, schwarz: N-A-Modell, blau: Modell QmTB_spRout2

8. Zusammenfassung / Schlussfolgerung / Ausblick

Ziel der Studie ist die statistisch basierte Ermittlung von synthetischen Bemessungsganglinien mit Scheiteln und Volumina, die den realen Wellen in Form, Scheitel, Fülle und Auftretenswahrscheinlichkeiten möglichst ähnlich sind. Es kann gezeigt werden, dass dies durch den Einsatz copulabasierter Modelle in hoher Qualität erreicht werden kann.

Der Einsatz statistischer Verfahren zur Erzeugung von synthetischen Hochwasserwellen ist nicht neu (s. z. B. LANUV 2004). Neu bei den copulabasierten Ansätzen ist allerdings, dass im Hinblick auf die Abhängigkeiten zwischen den eine Hochwasserwelle determinierenden Variablen keine einfachen Annahmen getroffen werden (z. B. in Form von Unabhängigkeitsannahmen), sondern diese explizit und detailliert modelliert werden. Die Erfassung der Abhängigkeiten geht dabei deutlich hinaus über den Ansatz, Korrelationskoeffizienten zu erhalten. So lässt sich beispielsweise leicht zeigen, dass es eine beliebig große Zahl von Abhängigkeitsstrukturen gibt, die alle den gleichen Korrelationskoeffizienten aufweisen, sich aber strukturell deutlich unterscheiden (z. B. symmetrische Strukturen, Asymmetrien mit stärkeren Abhängigkeiten im unteren Wertebereich oder Asymmetrien mit stärkeren Abhängigkeiten im oberen Wertebereich). Copulas, die ein Oberbegriff für eine Vielzahl von Familien mit unterschiedlichen Abhängigkeitsstrukturen darstellen, sind in der Lage, derartige Strukturen zu erfassen, so dass diese – sofern sie in den Messdaten enthalten sind – auch auf die synthetisch erzeugten Daten übertragen werden.

In der Studie werden zum einen zwei- und vierdimensionale pegelspezifische und zum anderen hochdimensionale, pegelübergreifende Copula-Modelle zur Erzeugung von Bemessungsabflüssen und -ganglinien aufgestellt.

Mit Hilfe der pegelspezifischen Copula-Ansätze werden zunächst Scheitel-Volumen-Beziehungen erarbeitet. Die in den Messungen sich abzeichnenden, oft asymmetrischen Abhängigkeitsstrukturen werden dabei zutreffend erfasst. Bei den vierdimensionalen Copulas werden neben Scheitel und Volumen auch Anstiegszeit und Basisabfluss erfasst. Damit werden dann synthetische Bemessungsganglinien erzeugt, weil alle Eingangsparameter für die dazu zugrunde gelegte Kozeny-Funktion vorliegen. Auch hier werden asymmetrische Abhängigkeitsstrukturen in den Messdaten erkennbar und folgerichtig auf der Grundlage der Copula-Modellierung in die synthetischen Daten übertragen.

Bei der pegelübergreifenden Modellierung werden die vier Variablen Scheitelabfluss, Formfaktor, Anstiegszeit und Basisabfluss nicht alleine an einem Pegel, sondern gleichzeitig an den beiden Innpegeln Wasserburg und Passau-Ingling sowie an insgesamt fünf Nebengewässerpegeln erfasst und modelliert, so dass eine 28-dimensionale Copula (vier Variablen

mal sieben Pegel) entsteht. Dazu wird eine in der Literatur bisher nicht beschriebene, anhand der Gewässernetztopologie abgeleitete R-Vine-Copula aufgebaut. Der Wellenablauf von allen Oberliegerpegeln zum Unterliegerpegel Passau-Ingling wird anhand eines multivariablen Muskingum-Modells abgebildet. Durch Kombination der deterministischen und stochastischen Komponenten liegt damit ein Gesamtansatz vor, der neben Scheitelabfluss, Fülle und Wellenform an den einzelnen Pegeln auch die pegelübergreifenden, räumlichen Abhängigkeiten zwischen diesen Parameter erhält. Darüber hinaus weist jede einzelne synthetische Welle aufgrund des zwischengeschalteten Wellenablaufs eine entlang des Fließweges physikalisch mögliche Form auf. Damit stellt dieses Verfahren eine Alternative zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung dar. Vergleiche mit den Ergebnissen der Modellierungen aus Teilprojekt A zeigen dabei, dass die anhand der Messdaten extremwertstatistisch ermittelten Kennwerte (Jährlichkeiten von Scheiteln, Füllen) ebenso gut wie oder besser als beim N-A-Modell erhalten werden und auch die räumlichen Abhängigkeiten zutreffend erfasst werden. Der Ansatz könnte grundsätzlich so erweitert werden, dass Abflussganglinien abseits von Pegeln abgeleitet werden können. Dazu müsste der hydrologische Wellenablaufbaustein durch ein etwas komplexeres Verfahren ersetzt werden, beispielsweise den Muskingum-Cunge-Ansatz.

Die Copula-Verfahren werden in der hier vorliegenden Studie im Wesentlichen zur Validierung des Niederschlag-Abfluss-Modells verwendet. Dabei zeigt sich, dass die Copula-Modelle in aller Regel eine höhere Variabilität in den synthetischen Wellen ausweisen als das N-A-Modell. Die generelle Struktur hinsichtlich der Abhängigkeit zwischen Abflussscheitel und Volumen sowie ereignisbezogenen Abflussscheiteln an verschiedenen Pegeln in den Messungen, den Copula-Simulationen und den N-A-Simulationen stimmt dabei in der Regel recht gut überein. Vor dem Hintergrund von gänzlich unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen und den generellen Unschärfen bei der Modellierung hydrologischer Extreme ist das ein überraschend konsistentes Ergebnis. Interessant ist dabei, dass der pegelübergreifende Copulaansatz bezogen auf den Unterliegerpegel Passau-Ingling Strukturen ausweist, die dem Ergebnis der N-A-Modellierung ähnlicher sind als dem Ergebnis der pegelspezifischen Copula, möglicherweise ausgelöst durch die zwischengeschaltete Wellenablaufmodellierung.

Grundsätzlich sind auch eigenständige, eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung ersetzende Anwendungen des Copula-Ansatzes denkbar. Die Vorteile bestünden in einem gegenüber der N-A-Modellierung deutlich reduzierten Aufwand bei der Modellerstellung und erwartungsgemäß sehr guten Nachbildungen pegelbezogener Messungen und der daraus extremwertstatistisch abgeleiteten Kennwerte. Die Messungen sollten dabei über hinreichend lange Zeiträume vorliegen und möglichst zuverlässig sein, da fehlerbehaftete Messungen bei

diesem Ansatz unmittelbarer auf die Modellierungsergebnisse wirken, als dies bei einer N-A-Modell der Fall ist.

Einen tabellarischen Vergleich weiterer ausgewählter Charakteristika von N-A-Modellierung und Copula-Modellierung zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15: Vergleich von Charakteristika der N-A- und der Copula-Modellierung

Charakteristikum	N-A-Modell	Copula-Ansatz
Konzeptionell-physikalisch begründet, etablierte Technik	Ja	Nein
Modelle für beliebige Anzahl von Pegeln beherrschbar	Ja	Nein
Hohe Abbildungsgüte bezogen auf Pegelstatistik	Bedingt	Ja
Anforderung an Güte der Niederschlagsmessung	Hoch	Entfällt
Anforderung an Güte der stochastischen Niederschlags-simulation	Sehr hoch	Entfällt
Anforderung an Güte der Modellkalibrierung / -validierung	Hoch	Keine Kalibrierung (ausgenommen Muskingum), sondern Maximum-Likelihood-basierte Parameterschätzung
Anforderung an Güte der Abflussmessung	Hoch	Sehr hoch
Anforderung an Länge der Beobachtungsreihen	Hoch	Sehr hoch
Aufwand für Modellentwicklung	Hoch	Gering bis mittel
Ergebnisse für pegelferne Standorte	Ja	Nein, aber bei Erweiterung des Wellenablaufverfahrens möglich

9. Literatur

DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen; Merkblätter zur Wasserwirtschaft; H. 251, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) Bonn, Wirtschafts- und Verl. Ges. Gas und Wasser

Fuka, D.R, Walter, M.T., Archibald, J.A., Steenhuis, T.S. & Easton, Z.M. (2014): EcoHydRology: A community modeling foundation for Eco-Hydrology. R package version 0.4.12. <https://CRAN.R-project.org/package=EcoHydRology>.

Genest, C. & Favre, A.-C. (2007): Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of hydrologic engineering* 12.4, p. 347-368.

Gilleland, E. & Katz, R.W. (2016): extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. *Journal of Statistical Software*, 72(8), 1-39.<doi:10.18637/jss.v072.i08>.

Gräler, B., van den Berg, M., Vandenberghe, S., Petroselli, A., Grimaldi, S., De Baets, B. & Verhoest, N. (2013): Multivariate Return Periods in Hydrology: a Critical and Practical Review Focusing on Synthetic Design Hydrograph Estimation. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, p. 1281–1296.

Hofert, M., Kojadinovic, I., Maechler, M. & Yan, J. (2016): Copula: Multivariate Dependence with Copulas. R package version 0.999-15 URL <http://CRAN.R-project.org/package=copula>.

Joe, H. (1997): *Multivariate Models and Multivariate Dependence Concepts*. CRC Press.

Klein, B. (2009): Ermittlung von Ganglinien für die risikoorientierte Hochwasserbemessung von Talsperren. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.

Klein, B. & Schumann, A. (2006): Generierung von mehrgipfligen Bemessungsganglinien für die Hochwasserbemessung von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken. Präsentation am Tag der Hydrologie 2006.

Khan, M.H. (1993): Muskingum flood routing model for multiple tributaries. *Water Resources Research* 29, p. 1057-1062.

Kumar, N. D., Baliarsingh, F. & Raju, S. (2011): Extended Muskingum method for flood routing. *Journal of Hydro-environment Research* 5, p. 127-135.

Koffler, D., Gauster, T. & Laaha, G. (2015): lfstat: Calculation of Low Flow Statistics for Daily Stream Flow Data. R package version 0.8.0. <https://CRAN.R-project.org/package=lfstat>.

LANUV (2004): Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen. Merkblätter, Band 46, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. Nathan, R. J. and McMahon, T. A. (1990): Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. *Water Resources Research* 26(7): p. 1465-1473.

LAWA (1997): Pegelvorschrift, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser und Bundesminister für Verkehr, Hannover und Bonn.

Lyne, V. D. & Hollick, M. (1979): Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. Hydrology and Water Resources Symposium, Perth, Institution of Engineers, Australia.

Nelsen, R. B. (2006): *An Introduction to Copulas*. Springer, New York.

Schepsmeier, U., Stoeber, J., Brechmann, E., Graeler, B., Nagler T. & Erhardt, T. (2016): VineCopula: Statistical Inference of Vine Copulas. R package version 2.0.5. <https://CRAN.R-project.org/package=VineCopula>.

Tallaksen, L. M. & Van Lanen, H. A. J. (2004): *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Science 48, Amsterdam: Elsevier.

van Buuren, S. (2012): *Flexible Imputation of Missing Data*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press.

Willems, W., Dick, T., Stricker, K. & Kasper, G. (2014): *HyStat Benutzerhandbuch*. IAWG Ottobrunn

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Karte der hier betrachteten Pegel	2
Abbildung 2: Zeitliche Verteilung der beobachteten Zeitreihen	3
Abbildung 3: Auflösung der LfU-Daten	4
Abbildung 4: Disaggregationsbeispiel bezüglich eines Zeitabschnitts des Pegels Wasserburg am Inn	4
Abbildung 5: Struktur einer 3-dimensionalen Vine-Copula. Die Vierecke zeigen Copulas (so wie z. B. c_{12} oder $c_{13 2}$) und die Kreise zeigen die Pseudo-Observationen, aus denen die Copulas erzeugt wurden (z. B. x_1 oder $F_1(x_1)$)	14
Abbildung 6: Struktur einer 4-dimensionalen kanonischen Vine-Copula. Die Vierecke zeigen Copulas (so wie z. B. c_{12} oder $c_{24 1}$) und die Kreise zeigen die Pseudo-Observationen, aus denen die Copulas erzeugt wurden (z. B. x_1 oder $F_1(x_1)$)	15
Abbildung 7: Struktur einer 4-dimensionalen drawable Vine-Copula. Die Vierecke zeigen Copulas (so wie z. B. c_{12} oder $c_{24 3}$) und die Kreise zeigen die Pseudo-Observations, auf denen die Copulas gebaut wurden (e.g. x_1 oder $F_1(x_1)$)	16
Abbildung 8: Schematischer Arbeitsablauf bei der Anwendung von Copulas	17
Abbildung 9: Schema der Auswahl der Variablen für das QV-Modell.....	19
Abbildung 10: Hochwasserwelle mit charakteristischen Parametern	20
Abbildung 11: Schema der Auswahl der Variablen für das QVTS-Modell	23
Abbildung 12: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Anger	29
Abbildung 13: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Burghausen.....	29
Abbildung 14: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Burgkirchen	29
Abbildung 15: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Engfurt	29
Abbildung 16: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Haging.....	30

Abbildung 17:: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Hofkirchen	30
Abbildung 18: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Jahrsdorf	30
Abbildung 19: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Mühldorf	30
Abbildung 20: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Passau-Ingling	31
Abbildung 21: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Pramerdorf	31
Abbildung 22: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Rosenheim	31
Abbildung 23: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Rosenheim o.d. Mangfall.....	31
Abbildung 24: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Ruhstorf	32
Abbildung 25: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Schärding	32
Abbildung 26: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Siezenheim	32
Abbildung 27: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Wasserburg.....	32
Abbildung 28: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise) Pseudobeobachtungen von Weichselbaum.....	33
Abbildung 29: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Anger	34
Abbildung 30: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Burghausen.....	34
Abbildung 31: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Burgkirchen.....	35
Abbildung 32: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Engfurt	35

Abbildung 33: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Haging	36
Abbildung 34: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Hofkirchen.....	36
Abbildung 35: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Jahrsdorf	37
Abbildung 36: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Mühldorf	37
Abbildung 37: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Passau-Ingling	38
Abbildung 38: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Pramerdorf	38
Abbildung 39: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Rosenheim.....	39
Abbildung 40: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Rosenheim o.d. Mangfall.....	39
Abbildung 41: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Ruhstorf	40
Abbildung 42: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Schärding.....	40
Abbildung 43: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Siezenheim	41
Abbildung 44: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Wasserburg.....	41
Abbildung 45: Streudiagramm der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (blaue Pluszeichen) Daten von Weichselbaum	42
Abbildung 46: Vergleich der Pseudobeobachtungen der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise), Daten für Burghausen	46
Abbildung 47: Vergleich der Pseudobeobachtungen der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise), Daten für Passau-Ingling.....	47
Abbildung 48: Vergleich der Pseudobeobachtungen der beobachteten (rote Punkte) und der simulierten (schwarze Kreise), Daten für Wasserburg	47

Abbildung 49: Vergleich der beobachteten (rote Punkte) und simulierten (blaue Pluszeichen) Daten für Burghausen	48
Abbildung 50: Vergleich der beobachteten (rote Punkte) und simulierten (blaue Pluszeichen) Daten für Passau-Ingling	49
Abbildung 51: Vergleich der beobachteten (rote Punkte) und simulierten (blaue Pluszeichen) Daten für Wasserburg	49
Abbildung 52: Rückhaltewirkungslinien für Burghausen im Intervall $HQ_{50} \pm 5\%$	51
Abbildung 53: Rückhaltewirkungslinien für Burghausen im Intervall $HQ_{100} \pm 5\%$	51
Abbildung 54: Rückhaltewirkungslinien für Wasserburg im Intervall $HQ_{50} \pm 5\%$	52
Abbildung 55: Rückhaltewirkungslinien für Wasserburg im Intervall $HQ_{100} \pm 5\%$	52
Abbildung 56: Rückhaltewirkungslinien für Passau-Ingling im Intervall $HQ_{50} \pm 5\%$	53
Abbildung 57: Rückhaltewirkungslinien für Passau-Ingling im Intervall $HQ_{100} \pm 5\%$	53
Abbildung 58: Hochwasserwellen zu Jahreshöchstabflüssen am Pegel Wasserburg und Nachbildung durch eine (oben) oder mehrere (unten) Kozeny-Funktionen, Zeit in 15-Minuten-Schrittweite.....	55
Abbildung 59: Kozeny-Wellenseparation der Abflussganglinie des Pegel Wasserburg / Inn, Jahr 2004	56
Abbildung 60: Beispiele synthetischer Hochwasserereignisse für den Pegel Wasserburg / Inn	58
Abbildung 61: R-Vine-Struktur in der obersten Ebene, automatisch erzeugt auf der Grundlage vorgegebener topologischer Beziehungen	60
Abbildung 62: Gemessene und berechnete Abflüsse (erweitertes Muskingum-Verfahren) im Validierungsjahr 1991, Pegel Wasserburg / Inn	62
Abbildung 63: R-Vine-Struktur in der obersten Ebene, automatisch erzeugt auf der Grundlage vorgegebener topologischer Beziehungen	64
Abbildung 64: Vergleich von Hochwasserscheitelabflüssen der Jährlichkeiten $T_n=2$ bis $T_n=100$, Pegel Wasserburg.....	67
Abbildung 65: Vergleich von Hochwasserscheitelabflüssen der Jährlichkeiten $T_n=2$ bis $T_n=100$, Pegel Passau-Ingling	67
Abbildung 66: Scheitelabfluss und Volumen oberhalb MHQ für den Pegel Wasserburg, Modell $Q_{mTB_spRout2}$	68

Abbildung 67: Scheitelabfluss und Volumen oberhalb MHQ für den Pegel Passau-Ingling, Modell QmTB_spRout2	68
Abbildung 68: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Anger	70
Abbildung 69: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Burghausen	71
Abbildung 70: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Burgkirchen	71
Abbildung 71: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Engfurt.....	72
Abbildung 72: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Haging	72
Abbildung 73: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Hofkirchen	73
Abbildung 74: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Jahrsdorf	73
Abbildung 75: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Mühldorf	74
Abbildung 76: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Passau-Ingling	74
Abbildung 77: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Pramerdorf.....	75
Abbildung 78: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Rosenheim	75
Abbildung 79: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Rosenheim o.d. Mangfall	76
Abbildung 80: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Ruhstorf.....	76
Abbildung 81: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Schärding	77

Abbildung 82: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Siezenheim	77
Abbildung 83: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Wasserburg	78
Abbildung 84: Vergleich zwischen den QV-Simulationen von Teilprojekt B (blaue Kreise), Teilprojekt A (grüne Raute) und den beobachteten Werten für den Pegel Weichselbaum	78
Abbildung 85: Gleichzeitig auftretende Scheitelabflüsse an den Pegeln Passau und Burghausen, ermittelt anhand der Ergebnisse des N-A-Modells (Teilprojekt A)	79
Abbildung 86: Gleichzeitig auftretende Scheitelabflüsse an den Pegeln Passau und Burghausen, ermittelt anhand der Ergebnisse des N-A-Modells, dargestellt in Form von Rängen	80
Abbildung 87: Gleichzeitig auftretende Scheitelabfluss-Ränge an den Pegeln Passau und Burghausen, ermittelt anhand der Ergebnisse des Niederschlag-Abfluss-Modells aus Arbeitspaket 5, rot: Messwerte	80
Abbildung 88: Gleichzeitig auftretende Scheitelabfluss-Unterschreitungswahrscheinlichkeiten an den Pegeln Passau und Burghausen, rot: Messwerte, schwarz: N-A-Modell, blau: Modell QmTB_spRout2.....	81
Abbildung 89: Gleichzeitig auftretende Scheitelabfluss-Unterschreitungswahrscheinlichkeiten an den Pegeln Passau und Wasserburg, rot: Messwerte, schwarz: N-A-Modell, blau: Modell QmTB_spRout2.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der statistischen Tests auf Homogenität für die Hochwasser (HQ) Zeitreihen	7
Tabelle 2: Ergebnisse der statistischen Tests auf Trends für die HQ-Zeitreihen	8
Tabelle 3: Ergebnisse der statistischen Tests auf Sprungpunkte für die HQ-Zeitreihen	9
Tabelle 4: Beispiel von bivariaten Copulas mit verschiedenen Parametern	11
Tabelle 5: Prozedur für die Auswahl und Bestimmung der HQ Ereignisse	22
Tabelle 6: T-jährliche Scheitelabflüsse der beobachteten Zeitreihen und deren prozentuale Abweichung im Vergleich mit amtlichen Jährlichkeiten (soweit vorhanden). Die ersten drei Buchstaben des Verteilungsnamens legen die Verteilung fest. GEV steht für generalisierte Extremwertverteilung, GUM für Gumbelverteilung, GPA für generalisierte Paretoverteilung. Die letzten zwei Buchstaben geben die Methode an, mit der die Parameter abgeschätzt wurden: LM steht für den L-Momente-Verfahren, MO steht für das Momente-Verfahren	25
Tabelle 7: Für die Modellierung der QV-Beziehung angewendete Copulas inklusive der Korrelationskoeffizienten von beobachteten und simulierten Daten	27
Tabelle 8: Kendall's Tau zwischen Direktabflussscheitel (QSD), Direktabflussvolumen (VD), Anstiegszeit (TS) und Basisabfluss (QB)	43
Tabelle 9: Spearman's Rho zwischen Direktabflussscheitel (QSD), Direktabflussvolumen (VD), Anstiegszeit (TS) und Basisabfluss (QB)	43
Tabelle 10: Korrelationskoeffizienten (Kendall's Tau τ_K und Spearmans Rho ρ_S) der beobachteten und der simulierten Werte	44
Tabelle 11: Vine Copula für Burghausen - QVTS Modell	45
Tabelle 12: Vine Copula für Passau-Ingling - QVTS Modell	45
Tabelle 13: Vine Copula für Wasserburg - QVTS Modell	45
Tabelle 14: Hochwasserabflussquantile der Jährlichkeiten $T_n=20, 50$ und 100 für Pegel Wasserburg, gemessene und synthetisch erzeugte Scheitelabflüsse	58
Tabelle 15: Vergleich von Charakteristika der N-A- und der Copula-Modellierung	84