

Retentionspotentialstudie am Inn

Endbericht für Teilprojekt A:

Stochastische Niederschlag-Abflussmodellierung zur Ermittlung des
räumlichen Zusammenwirkens der Zubringerwellen

Wien, im März 2018

Technische Universität Wien
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Blöschl
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Komma
Dipl.-Ing Dr.techn. Thomas Nester
Karlsplatz 13/222
A-1040 Wien

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	2
2. Modellgebiet und Daten.....	2
2.1. Modellgebiet	2
2.2. Datengrundlage für die Kalibrierung des stochastischen Niederschlagsmodells und des hydrologischen Modells	3
3. Parameterbestimmung für ein räumliches stochastisches Niederschlagsmodell (AP A.1)	5
4. Stochastische Generierung von räumlichen Niederschlagszeitreihen (AP A.2)	8
5. Niederschlag-Abflussmodellierung zur Umlegung der Niederschläge auf den Hochwasserabfluss in den Teilgebieten (AP A.3)	9
5.1. Kalibrierung des hydrologischen Modells.....	10
5.2. Generierung von langen Zeitreihen mittels Monte-Carlo-Simulationen	14
6. Testen der simulierten Hochwasserzeitreihen mittels Pegelstatistik (AP A.4)	14
7. Generieren repräsentativer Hochwasserwellen für die Zubringer des Inn (AP A.5).....	16
7.1. Jahreshöchsthochwässer in Wasserburg, Burghausen und Passau-Ingling	17
7.2. Auswahl repräsentativer Wellen	17
7.3. Umfang des Datenaustausches mit den Projektpartnern	27
8. Zusammenfassung / Schlussfolgerung / Ausblick.....	29
9. Literatur	29

1. Einführung

Das räumliche Zusammenwirken der Zubringer zum Inn wurde in Teilprojekt A mittels stochastischer Niederschlag-Abflussmodellierung numerisch simuliert. Damit war es möglich, auch das raum-zeitliche Verhalten der Zubringerwellen und deren Wahrscheinlichkeiten in realistischer Weise zu beschreiben, um als Eingangsgrößen für die anderen Teilprojekte der Studie Retentionspotential Inn zu dienen.

Die räumliche Verteilung der Zubringerwellen ist bestimmt durch die räumliche Verteilung des Niederschlages. So kann sich z. B. ein hundertjährliches Hochwasser (HQ_{100}) am Inn aus dem Zusammenwirken der Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten ergeben, die sich je nach Ereignis in Hinblick auf Größe und zeitlichen Versatz unterscheiden. Um diese komplexe Fragestellung methodisch sauber zu lösen, sind in diesem Teilprojekt Monte-Carlo-Simulationen mit einer Modellkette durchgeführt worden.

2. Modellgebiet und Daten

2.1. Modellgebiet

Die Größe des gesamten Einzugsgebietes des Inns und der Donau in Passau beträgt rund 75.000 km². Das Einzugsgebiet wurde in rund 570 Teileinzugsgebiete unterteilt, wobei die Größe der Einzugsgebiete zwischen 1 und 9.713 km² beträgt. Die Teileinzugsgebiete orientieren sich an Pegeln, die für die Kalibrierung des Modells verwendet wurden, sowie internen Berechnungsknoten (z. B. Zusammenfluss von mehreren Flüssen). Zwischen den Berechnungsknoten wurden insgesamt 520 Wellenablaufmodelle definiert, die mit einer Nash-Kaskade (Szolgay, 2004) abgebildet werden.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Modellgebiet. Die im Modell verwendeten Pegel sind als blaue Dreiecke dargestellt, interne Berechnungsknoten mit grünen Punkten, Überleitungen (sofern Informationen vorhanden) mit hellblauen Punkten und meteorologische Stationen mit roten Punkten.

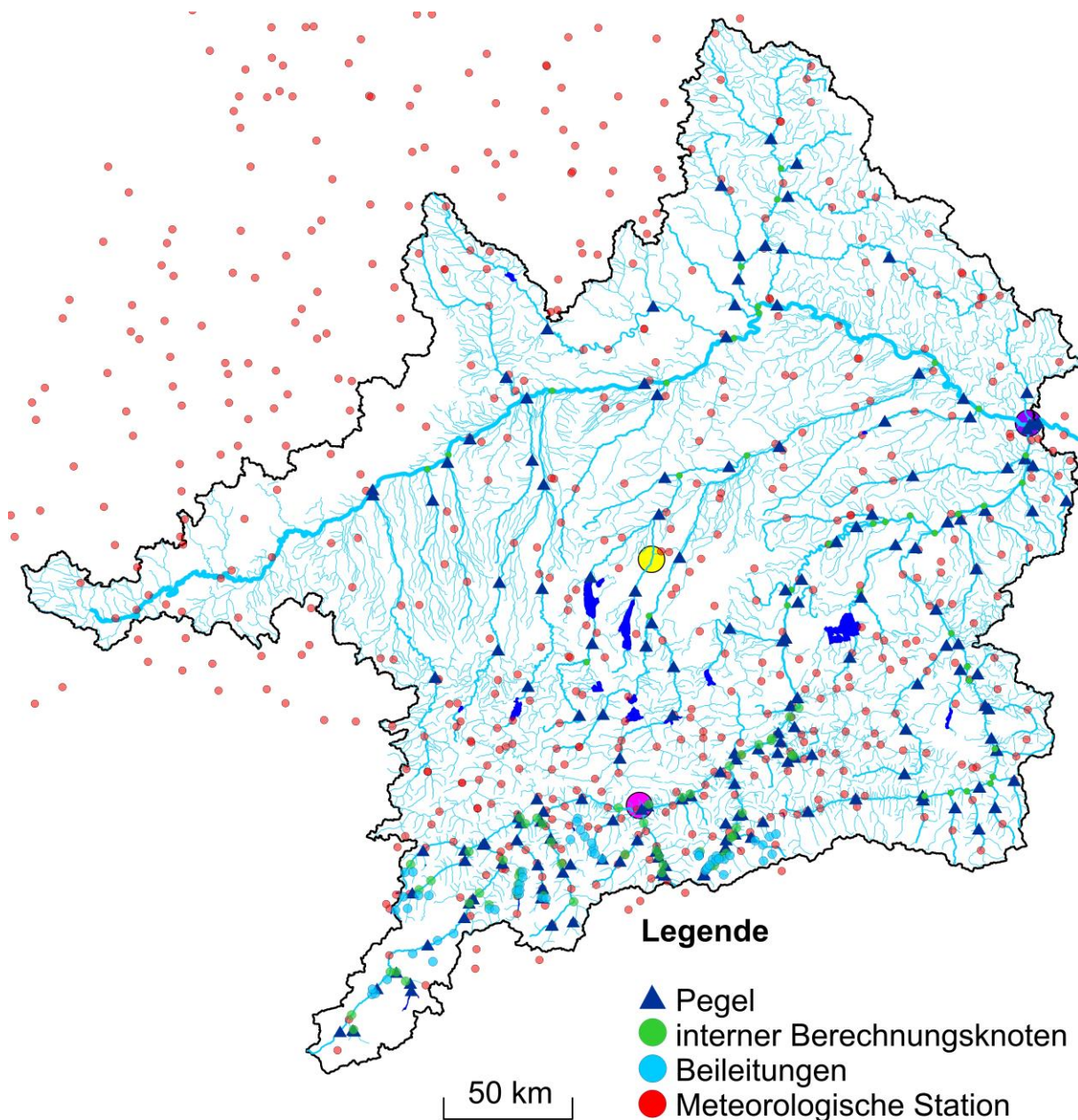


Abbildung 1: Überblick über Modellgebiet. Der gelbe Kreis kennzeichnet München, der rosa Kreis Innsbruck und der violette Kreis Passau

2.2. Datengrundlage für die Kalibrierung des stochastischen Niederschlagsmodells und des hydrologischen Modells

Insgesamt werden im Einzugsgebiet Abflussdaten Q von 170 Pegeln aus Bayern, Baden-Württemberg, Tirol, Salzburg, Oberösterreich und der Schweiz verwendet. Für rund 800 Stationen lagen meteorologische Daten (Niederschlag N und Lufttemperatur LT) in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen (stündlich, täglich) vor. Um für die Modellkalibrierung einen möglichst homogenen Datensatz zur Verfügung zu haben, wurden die Daten der Jahre 1980 bis 2015 für die Kalibrierung des hydrologischen Modells herangezogen.

Die für das Projekt notwendigen hydrologischen und meteorologischen Daten wurden von den verschiedenen Datenlieferanten (Landesamt für Umwelt Bayern (LfU), Hydrographische Dienste Salzburg, Oberösterreich, Tirol; Download aus dem Internet über www.gkd.bayern.de) übernommen. Aufgrund der unterschiedlichen Datenquellen lagen die Datenreihen in unterschiedlichen Formaten vor (unterschiedliche Zeitintervalle, unterschiedliches Datumsformat). In einem ersten Bearbeitungsschritt wurden alle Daten (LT, N, Q) in ein einheitliches Datumsformat überführt, wobei als zeitliche Auflösung 1 Stunde für hochaufgelöste Datenreihen (LT, N, Q) gewählt wurde sowie 1 Tag für die Niederschlagsstationen auf Tagesbasis.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurden die Daten auf Plausibilität überprüft. Für die Niederschlagsstationen wurden Anzahl sowie die Niederschlagssumme der größten Ereignisse identifiziert; Perioden ohne Niederschlag wurden identifiziert (Abbildung 2).

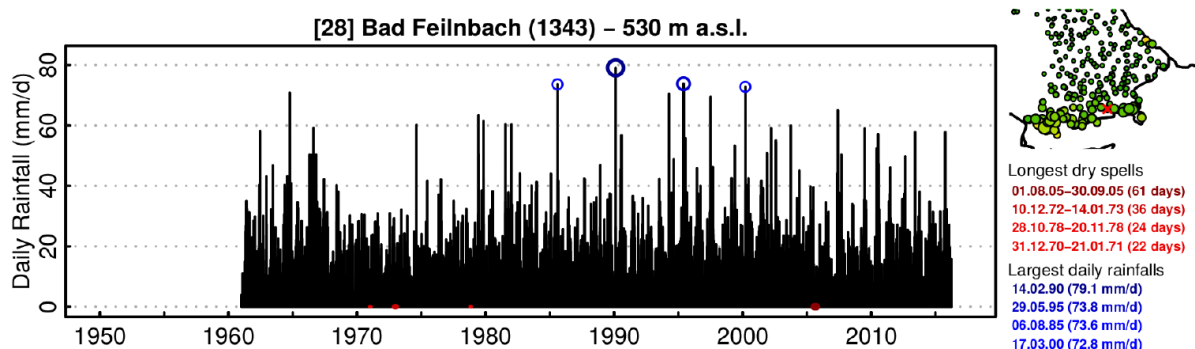


Abbildung 2: Plausibilitätsanalyse der Niederschlagsdaten am Beispiel der Station Bad Feilnbach in Bayern

In einem dritten Arbeitsschritt wurde die Qualität der Stundenwerte analysiert. Dazu wurden Stunden- und Tageswerte der Niederschlagsstationen verglichen (Abbildung 3). Die Tage mit den größten Abweichungen wurden identifiziert. Es zeigt sich, dass bei extremen Niederschlagsereignissen nur kleine relative Fehler auftreten; große relative Fehler treten dagegen bei kleinen und mittleren Ereignissen auf. Alle Stationen weisen einen sehr geringen systematischen Fehler auf, die Niederschlagssummen aus den täglichen und stündlichen Werten sind konsistent.

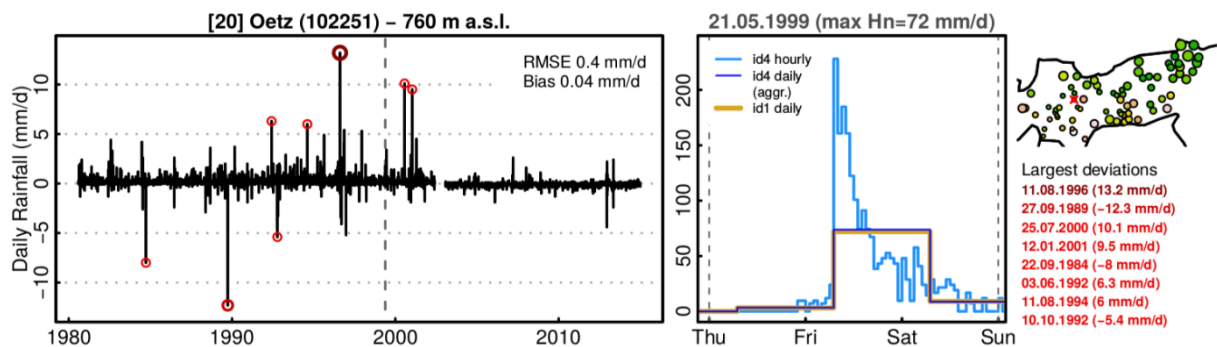


Abbildung 3: Qualitätsanalyse von Stundenwerte am Beispiel der Station Ötz in Tirol

In einem vierten Arbeitsschritt wurden Niederschlagsdaten auf Tagesbasis auf Stundenwerte disaggregiert, um ein dichteres Stationsnetz für die Kalibrierung des hydrologischen Modelles zur Verfügung zu haben.

3. Parameterbestimmung für ein räumliches stochastisches Niederschlagsmodell (AP A.1)

In Arbeitspaket (AP) A.1 wurden lange Niederschlagszeitreihen (10.000 Jahre) mittels stochastischer Niederschlagsmodellierung generiert. Das Ziel war es, synthetische kontinuierliche Niederschlagszeitreihen zu erzeugen, sodass die jährlichen Niederschläge, die Saisonalität der Niederschläge sowie die Extremniederschläge, die an Stationen im Einzugsgebiet gemessen wurden, wiedergegeben werden.

Dazu wurde ein modifiziertes Modell von Bardossy und Plate (1992) verwendet, in dem der Niederschlag auf Stationsbasis als multivariater autoregressiver Prozess (mAr) im Normalraum modelliert wurde und anschließend in einen Gamma-verteilten Raum transformiert wurde. Im Gegensatz zum Modell von Bardossy und Plate (1992), mit dem die Niederschläge auf Tagesbasis modelliert werden, wurde für das Projekt Retentionspotentialstudie am Inn eine zeitliche Auflösung von 6 Stunden verwendet. Der Vorteil des geringeren Zeitschrittes war, dass auch in kleinen Einzugsgebieten die Charakteristik von hochwasserbildenden Niederschlägen besser abgebildet werden kann.

Das Niederschlagsmodell wurde durch zwei Parameter der Gamma-Verteilung beschrieben, die anhand der täglichen Niederschlagsmenge und der Beziehung zwischen 6-Stunden- und 24-Stunden-Niederschlagssummen für eine gegebene zeitliche Korrelation an jeder Station definiert wurden. Die Parameter variierten monatlich über das Jahr, wobei die Variation durch eine Sinus-Funktion beschrieben wurde.

Abbildung 4 bis Abbildung 7 zeigen Kalibrierungsergebnisse des Niederschlagsmodells für die Station Laufen. In grüner Farbe werden jeweils die Auswertungen für die beobachteten Niederschläge dargestellt, in lila die Auswertungen der simulierten Niederschläge. Abbildung 4 zeigt die Jährlichkeiten des 24-Stunden-Niederschlags für die beobachteten sowie die simulierten Tagesniederschläge. Abbildung 5 links zeigt die mittleren täglichen Niederschläge für jeden Monat, sowohl für die beobachteten Tagesniederschläge als auch die simulierten Tagesniederschläge. Der rechte Teil der Abbildung 5 zeigt die Standardabweichungen für die täglichen Niederschlagssummen. Abbildung 6 zeigt monatliche sowie jährliche Niederschlagssummen. Abbildung 7 zeigt schließlich die Saisonalität der Niederschläge. Jeder Punkt in dieser Abbildung repräsentiert einen extremen Niederschlag, die Farbe kennzeichnet den Tag des Jahres, an dem dieser Extremniederschlag fällt. Die Größe der Punkte ist proportional zur Niederschlagssumme, der Pfeil zeigt die mittlere Saisonalität. Aus allen Abbildungen ist ersichtlich, dass das Niederschlagsmodell die jährlichen Niederschläge, die Saisonalität der Niederschläge sowie die Extremniederschläge, die an den Stationen im Einzugsgebiet gemessen wurden, wiedergeben kann.

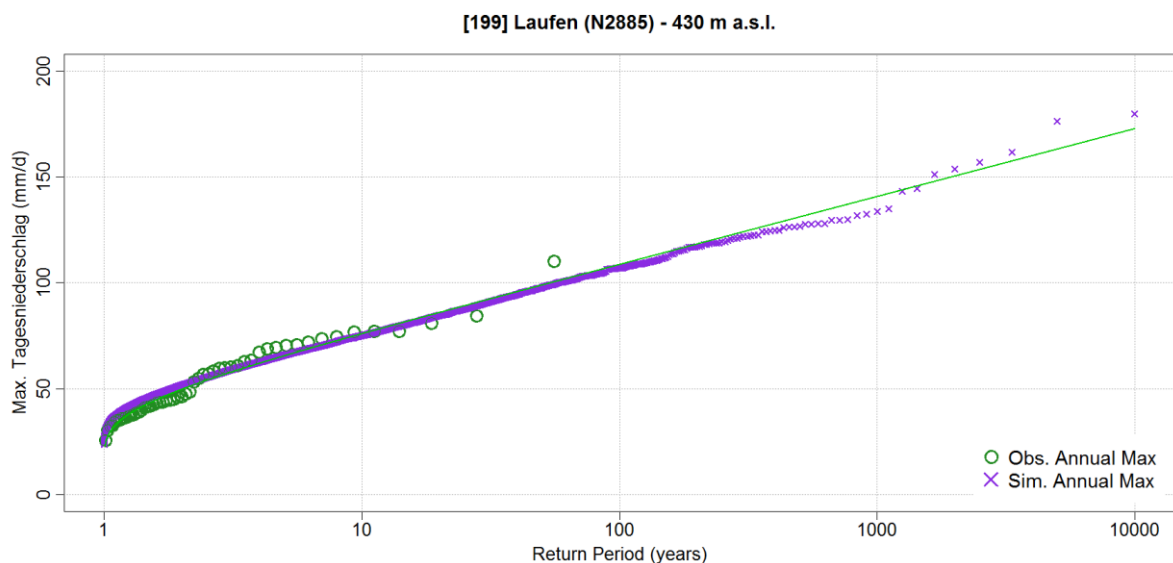


Abbildung 4: Beispiel für eine Jährlichkeitskurve für Niederschlagsdauer 24 Stunden. Grün – beobachtet, lila – simuliert. Die grüne Linie repräsentiert eine Gumbel-Verteilung an die beobachteten Daten

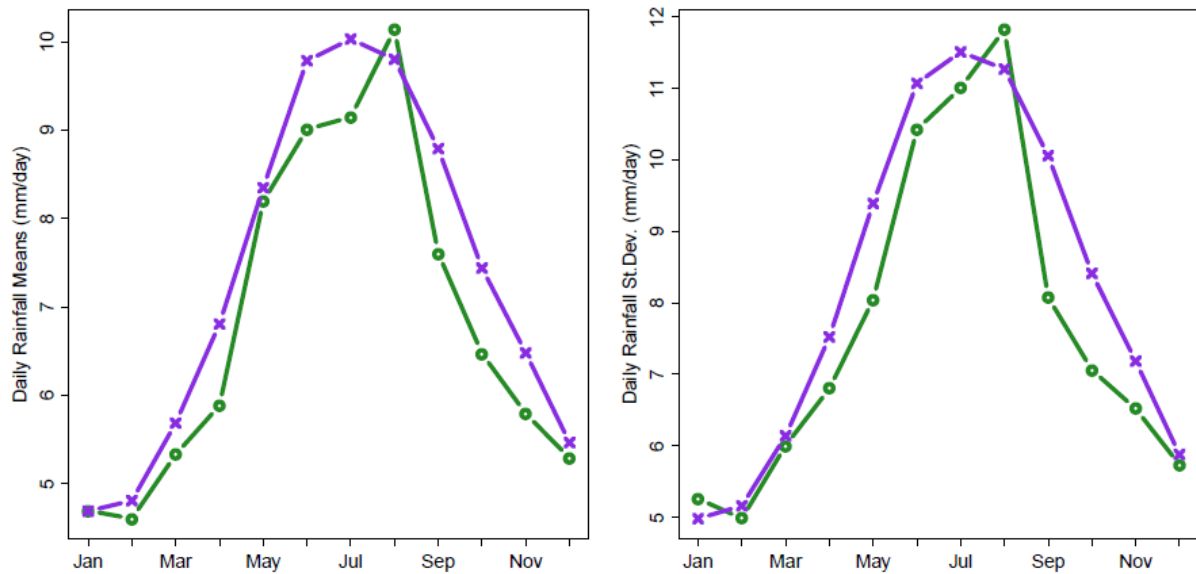


Abbildung 5: Beispiel für mittlere Tagesniederschläge (links) und Standardabweichung der Tagesniederschläge (rechts). Grün – beobachtet, lila – simuliert

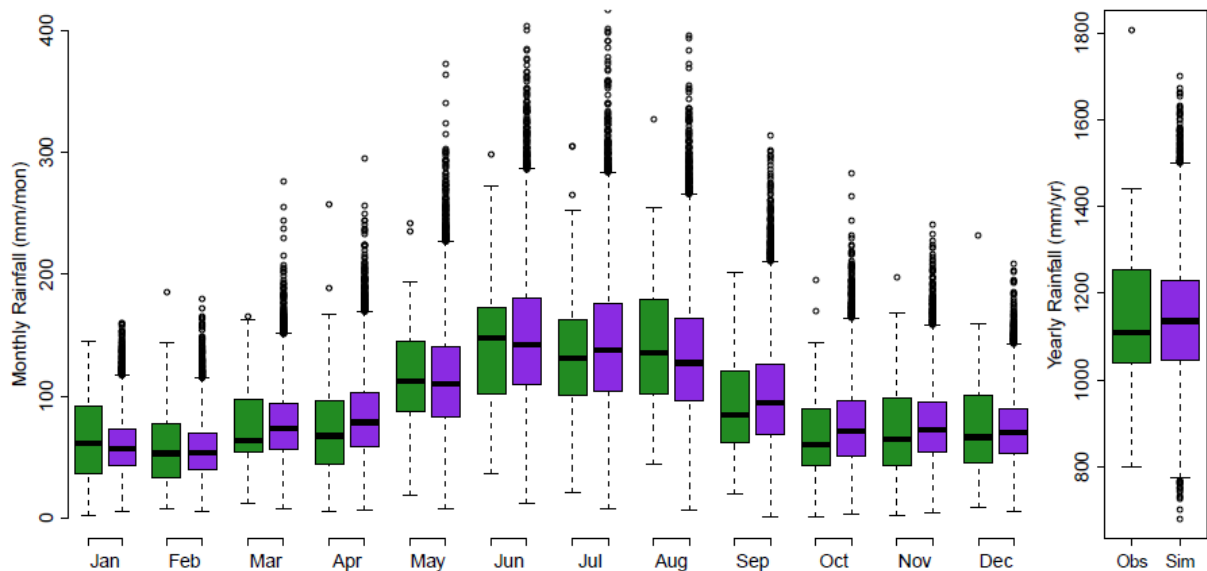


Abbildung 6: Beispiel für Monatssummen und Jahressummen der Niederschläge. Grün – beobachtet, lila – simuliert

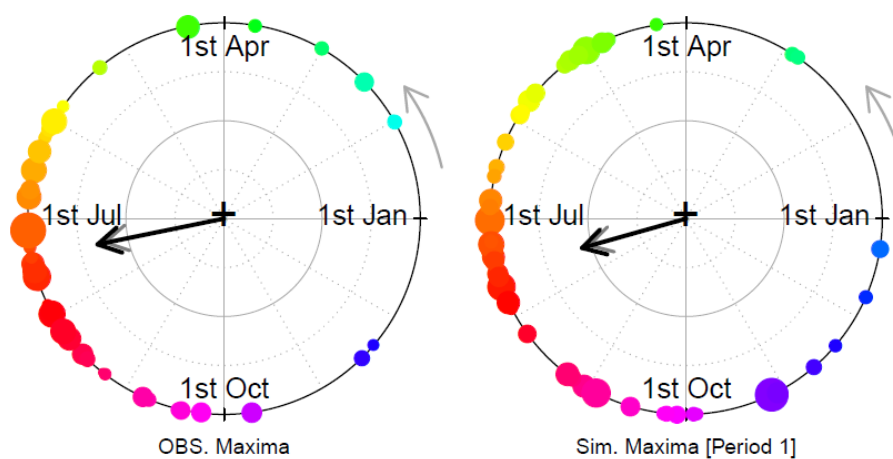


Abbildung 7: Beispiel für die Saisonalität der Extremniederschläge. Erklärung siehe Text

4. Stochastische Generierung von räumlichen Niederschlagszeitreihen (AP A.2)

Für die hydrologische Simulation ist neben der korrekten Abbildung der Niederschläge an den einzelnen Stationen auch die plausible Abbildung der räumlichen Muster des Niederschlags notwendig. Dazu wurde eine Analyse der raum-zeitlichen Verteilungen von relevanten Niederschlagsereignissen im Modellgebiet durchgeführt und die Variogramme verglichen.

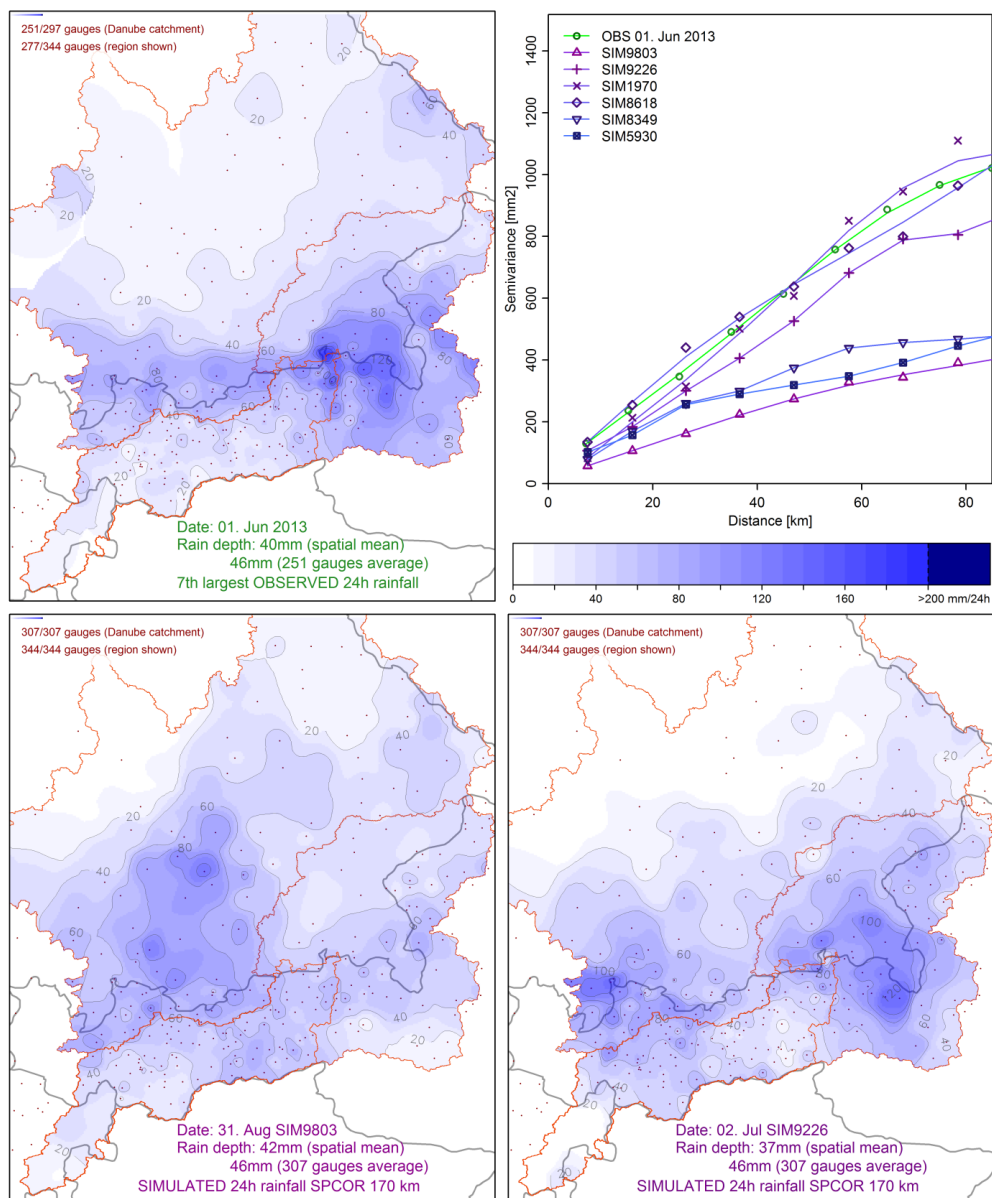


Abbildung 8: Beispiel der räumlichen Verteilung eines beobachteten Niederschlagsereignisses (oben links) im Vergleich zu simulierten Niederschlagsereignissen (unten links und rechts) mit einer ähnlichen Niederschlagssumme. Die Graphik oben rechts zeigt die Variogramme, die die räumliche Struktur des beobachteten Ereignisses beschreiben (grün) sowie die Variogramme der simulierten Ereignisse (blau und lila)

Abbildung 8 zeigt die räumliche Verteilung eines beobachteten Niederschlagsereignisses (oben links), in diesem Fall der Niederschlag am 1. Juni 2013, im Vergleich zu simulierten Niederschlagsereignissen (unten links und rechts) mit einer ähnlichen Niederschlagssumme. Die Graphik oben rechts zeigt die Variogramme, die die räumliche Struktur des beobachteten Ereignisses beschreiben (grün), sowie die Variogramme der simulierten Ereignisse (blau und lila). Die Abbildung zeigt, dass das Niederschlagsmodell die räumliche Struktur (Variogramme) für Extremereignisse in der Größenordnung des Hochwassers 2013 plausibel wiedergeben kann.

Nach der Validierung des Niederschlagsmodells wurden mit dem stochastischen Niederschlagsmodell 10.000 Jahre stündliche Daten generiert, die anschließend im hydrologischen Modell als Eingangsdaten verwendet wurden.

5. Niederschlag-Abflussmodellierung zur Umlegung der Niederschläge auf den Hochwasserabfluss in den Teilgebieten (AP A.3)

Für das gesamte Einzugsgebiet wurde ein Niederschlag-Abflussmodell an die jeweiligen Verhältnisse angepasst. Das Modell basierte auf dem weit verbreiteten HBV-Modell (Bergström, 1995), das an der TU Wien adaptiert wurde (z. B. Blöschl, 2008). Für das Gebiet wurde ein flächendetailliertes kontinuierlich rechnendes Niederschlag-Abflussmodell erstellt. Die zeitliche Auflösung des Modells betrug 1 Stunde, die räumliche Auflösung 1x1 km.

Das Untersuchungsgebiet wurde in kleinere Teileinzugsgebiete aufgeteilt, um in diesen dann die Ist-Situation möglichst genau abzubilden. Während das Inneinzugsgebiet im Detail abgebildet wurde, wurde für das Donaueinzugsgebiet eine vereinfachte Darstellung gewählt. Die Parameter in den Teileinzugsgebieten wurden so gewählt, dass das Modell sowohl die jährlichen und saisonalen Abflüsse als auch große Einzelereignisse korrekt abbildete.

Anhand des Corine Land Cover Datensatzes wurde in jedem 1x1 km Rasterelement die dominierende Landnutzung bestimmt; für jede der verwendeten Landnutzungsklassen wurden zunächst a priori Parameter als Ausgangspunkt für die Kalibrierung des hydrologischen Modells angesetzt. Diese a priori Parameter wurden analog zu bestehenden operationellen Modellen gewählt.

5.1. Kalibrierung des hydrologischen Modells

In einem ersten Schritt wurden die Wellenablaufparameter kalibriert. Dazu wurden – wo vorhanden – die beobachteten Abflüsse im Wellenablaufmodell eingesetzt und eine Simulation gestartet. Fällt im Zwischeneinzugsgebiet kein oder nur wenig Niederschlag, so können die Parameter der im Wellenablaufmodell verwendeten Nash-Kaskade gut bestimmt werden.

Für die Kalibrierung des hydrologischen Modells war es notwendig, die meteorologischen Stationsdaten räumlich zu interpolieren. Dazu wurden verschiedene Interpolationsmethoden im Modell implementiert: Inverse Distance, Nearest Neighbour, Regionale Regression mit Höhenabhängigkeit, Lokale Regression mit Höhenabhängigkeit.

In einem zweiten Schritt wurden anschließend die Parameter des hydrologischen Modells kalibriert. Ausgehend von den a priori Parametern wurden Simulationsläufe mit geänderten Parametern gestartet und die Ergebnisse der Modellsimulation graphisch dargestellt und beurteilt. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Modell sowohl die jährlichen und saisonalen Abflüsse als auch große Einzelereignisse korrekt abbildet. Bei der Kalibrierung zeigte sich, dass für die räumliche Interpolation der Niederschlagsdaten die Inverse Distance Methode am besten geeignet ist, bei der räumlichen Interpolation der Temperaturdaten hingegen die Lokale Regression mit Höhenabhängigkeit.

Abbildung 9 zeigt ein Simulationsergebnis am Pegel Wasserburg am Inn für das Jahr 2005. In der untersten Teilgraphik ist die simulierte (schwarz) und beobachtete (rot) Ganglinie dargestellt, in den oberen 3 Teilgraphiken sind von oben nach unten Schneewasserwert (cyan), Bodenfeuchte (grün) und Temperatur (rot), sowie der Niederschlag, Niederschlagssumme und Abflusshöhe dargestellt.

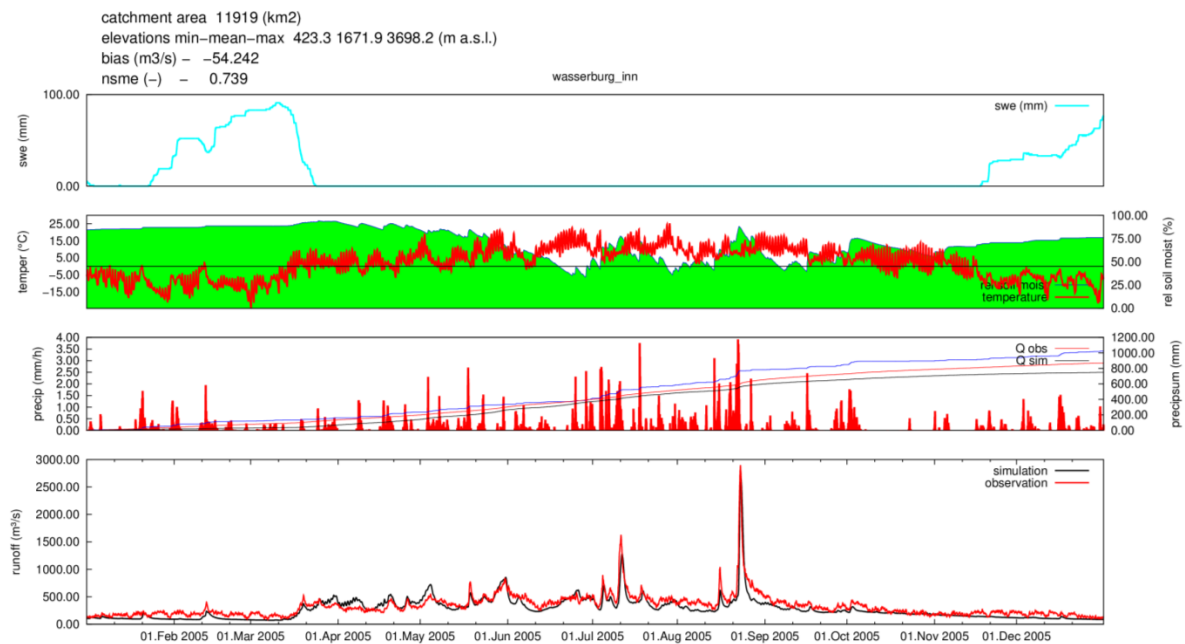


Abbildung 9: Modellsimulation am Pegel Wasserburg/Inn, 2005

Die Abbildung 10 bis Abbildung 12 zeigen für jene Pegel, für die Daten aus der Monte-Carlo-Simulation an die Projektpartner geliefert wurden, eine Auswertung der statistischen Gütemaße R^2 , Nash-Sutcliffe-Koeffizient (nsme, für ein perfektes Modell ist der Wert 1), sowie als Maß für den systematischen Fehler den normierten mittleren Fehler nme (für ein perfektes Modell ist der Wert 0). Zusätzlich sind die Werte in Tabelle 1 angeführt. Aufgrund lückenhafter Abflusszeitreihen in den Jahren 1980-1989 wurde nur der Zeitraum 1990-2014 ausgewertet. Auf der x-Achse ist die Größe des Einzugsgebietes dargestellt, auf der y-Achse das jeweilige Gütemaß.

Es zeigt sich auch, dass das Modell in größeren Gebieten, in denen eine höhere Dichte an Niederschlagsstationen zu finden ist, bessere Ergebnisse liefert. Gebiete, die nicht oder nur wenig durch Seen, Speicher und Wasserkraftwerke beeinflusst sind, können besser modelliert werden als Gebiete, in denen die Beeinflussung höher ist. Alle Auswertungen basieren auf den in stündlichen Zeitschritten simulierten Abflüssen.

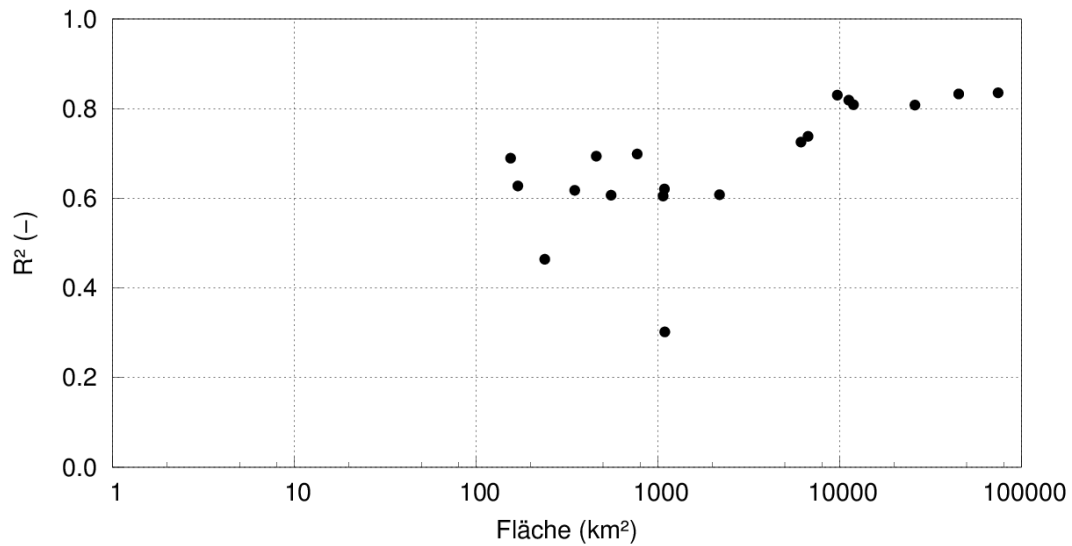


Abbildung 10: Auswertung des hydrologischen Modells (R^2) für die in Tabelle 2 angeführten Knoten mit beobachteten Abflussdaten

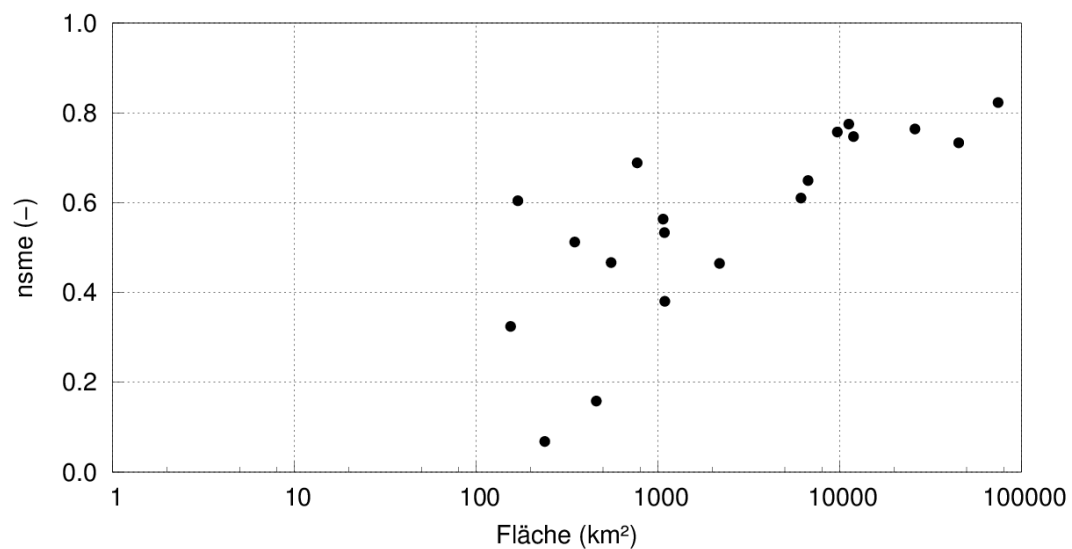


Abbildung 11: Auswertung des hydrologischen Modells (Nash-Sutcliffe-Koeffizient) für die in Tabelle 2 angeführten Knoten mit beobachteten Abflussdaten

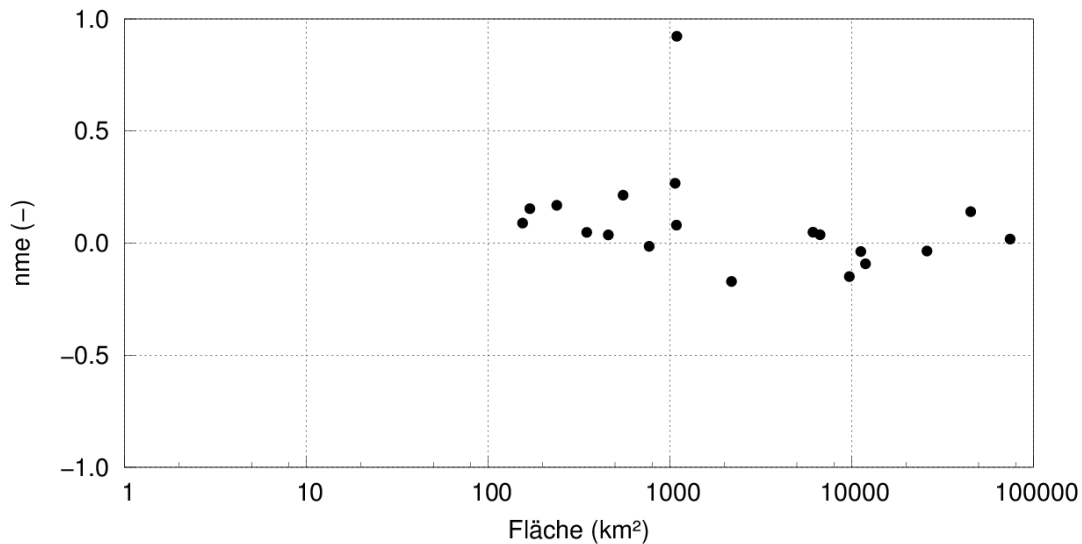


Abbildung 12: Auswertung des hydrologischen Modells (normierter mittlerer Fehler als Maß für den systematischen Fehler) für die in Tabelle 2 angeführten Knoten mit beobachteten Abflussdaten

Tabelle 1: Statistische Gütemaße – R^2 , Nash-Sutcliffe-Koeffizient nsme und nme (normierter mittlerer Fehler) als Maß für den systematischen Fehler

Pegel	R^2	Nsme	nme
Weichselbaum	0.69	0.32	0.09
Haging	0.63	0.60	0.15
Attel	0.46	0.07	0.17
Mamling	0.62	0.51	0.05
Jahrsdorf	0.69	0.16	0.04
Engfurt	0.61	0.47	0.21
Kalteneck	0.70	0.69	-0.01
Ruhstorf	0.61	0.56	0.27
Siezenheim	0.62	0.53	0.08
Rosenheim/Mangfall	0.30	0.38	0.92
Burgkirchen+Gufflham	0.61	0.46	-0.01
Oberndorf	0.73	0.61	0.05
Burghausen	0.74	0.65	0.04
Oberaudorf	0.83	0.76	-0.15
Rosenheim	0.82	0.78	-0.04
Wasserburg	0.81	0.75	-0.09
Passau	0.81	0.76	-0.04
Hofkirchen	0.83	0.73	0.14
Passau-Ilzstadt	0.84	0.82	0.02

5.2. Generierung von langen Zeitreihen mittels Monte-Carlo-Simulationen

Die stochastischen Niederschlagszeitreihen wurden im kalibrierten hydrologischen Modell als Eingangsdaten für die Generierung von langen Durchflusszeitreihen (10.000 Jahre) verwendet. Dazu wurden 3 Rechner verwendet, wobei auf jedem Rechner mehrere Modellläufe parallel gerechnet wurden. Je nach verfügbarem Arbeitsspeicher wurden bis zu 10 Modellläufe parallel gerechnet, wobei die Simulation eines Jahres aufgrund der Größe des Einzugsgebietes etwa eine halbe Stunde dauerte.

6. Testen der simulierten Hochwasserzeitreihen mittels Pegelstatistik (AP A.4)

Üblicherweise werden bei der Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells Einzelereignisse und/oder mehrjährige Abflussganglinien herangezogen (siehe Abbildung 9). In diesem Projekt war es zusätzlich erforderlich, dass das Modell auch die hochwasserstatistischen Kenngrößen gut abbildete. Deswegen wurden in diesem Schritt die simulierten Hochwasserkenngößen der Hochwasserstatistik an vielen Pegeln gegenübergestellt.

Abbildung 13 bis Abbildung 15 zeigen einen Vergleich der Hochwasserstatistik an den Pegeln Wasserburg/Inn, Burghausen/Salzach und Passau-Ingling/Inn (blaue Punkte; Hochwasserstatistik lt. www.hnd.bayern.de) sowie der Auswertung der Monte-Carlo-Simulation über 10.000 Jahre (rote Kreise). Für die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen wurde für jedes Ereignis die empirische Jährlichkeit ermittelt.

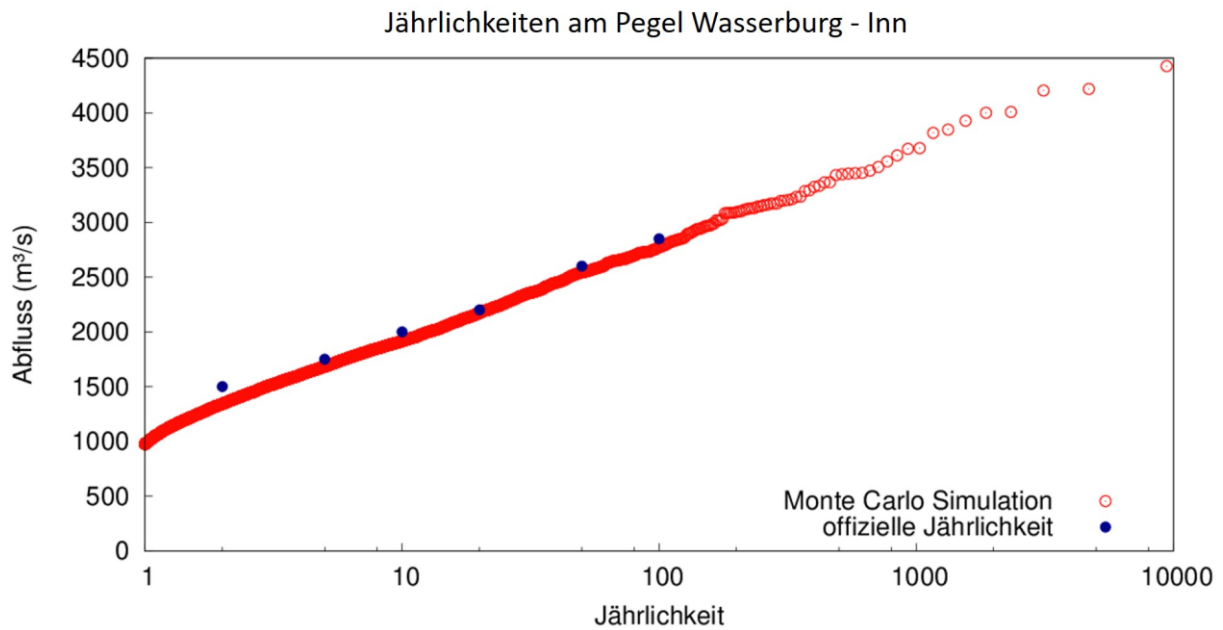


Abbildung 13: Testen der simulierten Hochwasserstatistik. Vergleich Monte-Carlo-Simulation und offizielle Werte des HND Bayern, Pegel Wasserburg/Inn

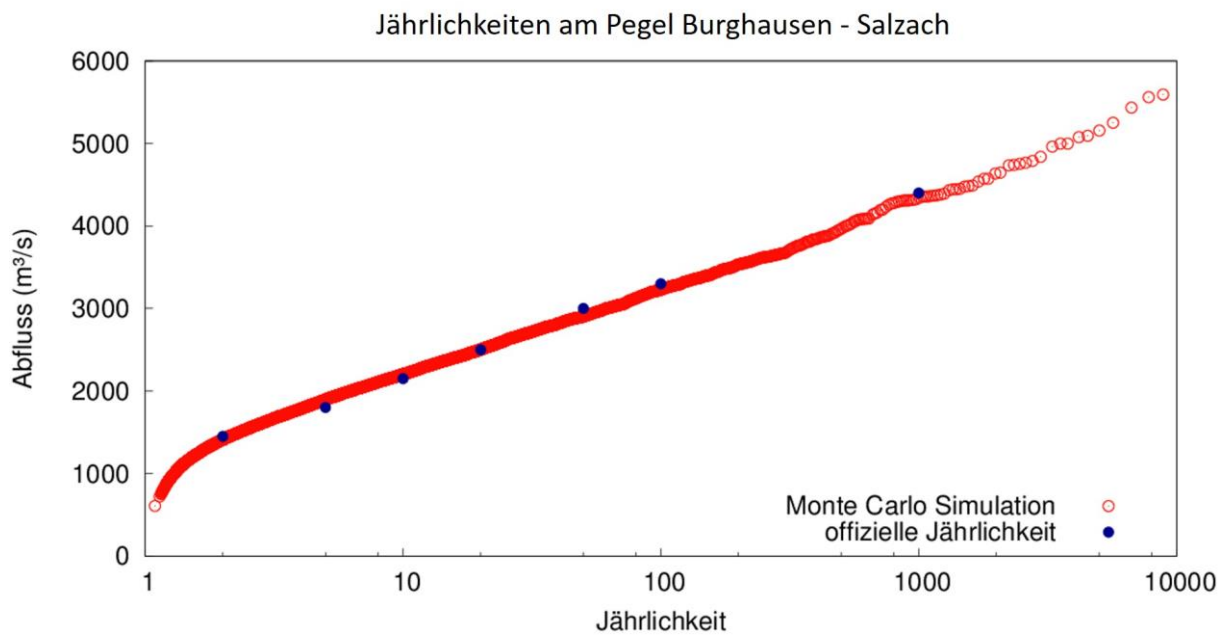


Abbildung 14: Testen der simulierten Hochwasserstatistik. Vergleich Monte-Carlo-Simulation und offizielle Werte des HND Bayern, Pegel Burghausen/Salzach

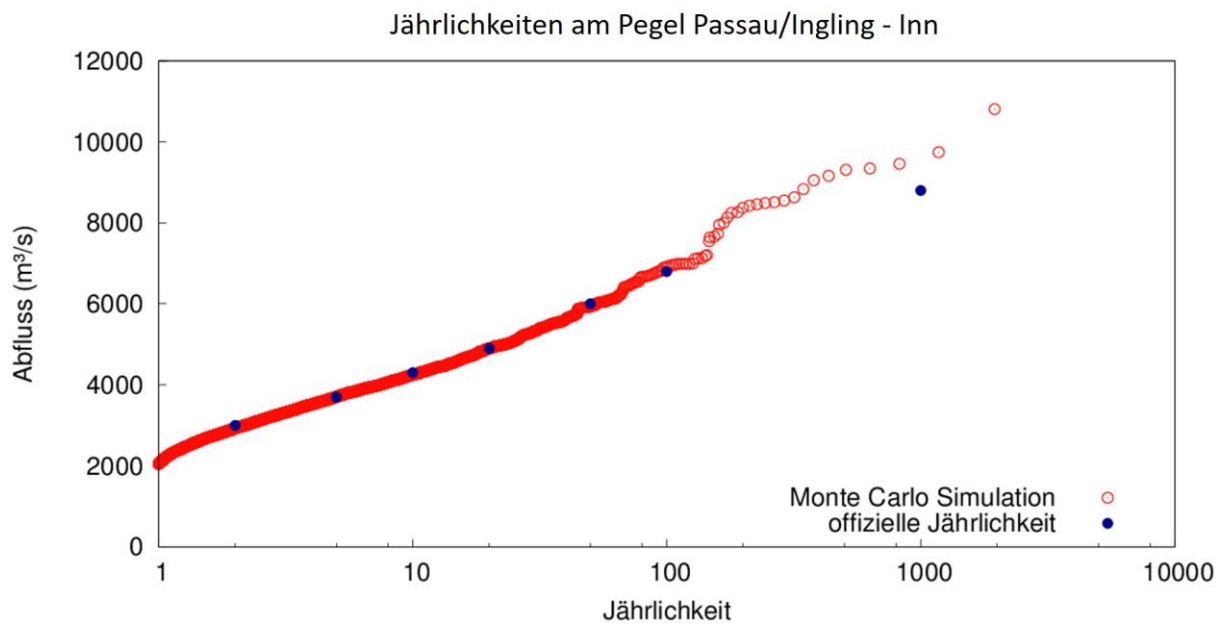


Abbildung 15: Testen der simulierten Hochwasserstatistik. Vergleich Monte-Carlo-Simulation und offizielle Werte des HND Bayern, Pegel Passau-Ingling/Inn

Es zeigt sich, dass die mit dem hydrologischen Niederschlags-Abfluss-Modell generierten Abflüsse gut mit den offiziellen Jährlichkeiten übereinstimmen. Bei sehr großen Jährlichkeiten zeigen die Simulationen mehr Struktur als die angepassten statistischen Verteilungen, da die Prozesse des Ausuferns im Modell durch einen vereinfachten hydrologischen Ansatz berücksichtigt werden.

7. Generieren repräsentativer Hochwasserwellen für die Zubringer des Inn (AP A.5)

In diesem Arbeitspaket wurden alle zuvor entwickelten Informationen und Modellteile zusammengeführt. Die grundsätzliche Vorgangsweise besteht darin, Monte-Carlo-Simulationen durchzuführen, um einen Satz von Hochwasserwellen zu erzeugen, die im Hinblick auf ihr räumliches Zusammenwirken realistisch sind. Mittels der stochastischen räumlichen Niederschlagszeitreihen und dem Niederschlag-Abflussmodell (einschließlich Wellenablaufmodell) wurden die Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die wesentlichen Zubringer sowie für den Inn selbst und die Donau bei Passau berechnet. Es wurden HQ_{100} und Durchflüsse mit anderen Jährlichkeiten ausgewiesen. Diese Durchflüsse setzten sich aus dem kombinierten Einfluss vieler Ereignisse zusammen, sowohl kleiner Ereignisse, als auch Ereignisse, die Durchflüsse größer als ein HQ_{100} besitzen. Sämtliche Ergebnisse wurden in Hinblick auf das Gesamtprojekt interpretiert.

7.1. Jahreshöchsthochwässer in Wasserburg, Burghausen und Passau-Ingling

Abbildung 16 bis Abbildung 18 zeigen für die Pegel Wasserburg/Inn, Burghausen/Salzach und Passau-Ingling/Inn die mit den Monte-Carlo-Simulationen erstellten Jahresmaxima des Abflusses sowie das an den Pegeln höchste beobachtete Ereignis im Simulationszeitraum von 1980 bis 2015 (Pegel Wasserburg 2005, Pegel Burghausen und Passau-Ingling 2013). Der Zeitraum ist jeweils so skaliert, dass der Scheitel bei 72 h auftritt, und 3 Tage vor dem Scheitel und 5 Tage nach dem Scheitel dargestellt sind.

7.2. Auswahl repräsentativer Wellen

Aus dem Kollektiv von 10.000 Jahren Abflusszeitreihen wurden für die Pegel Wasserburg/Inn, Burghausen/Salzach sowie Passau-Ingling/Inn repräsentative Wellen ausgewählt. Dabei sollen für jeden Pegel Abflüsse mit den Jährlichkeiten 30, 100, 300 und 1000 bestimmt werden. Tritt z. B. am Pegel Wasserburg/Inn ein HQ_{30} auf, so kann der Abfluss am Pegel Burghausen/Salzach beispielsweise ein HQ_{10} oder aber auch ein HQ_{50} sein.

Abbildung 19 bis Abbildung 21 zeigen die Scheitel-Volumen-Beziehung an den drei Pegeln. Als Volumen der Wellen wurde das Volumen über dem MHQ definiert. Mit roten Punkten sind beobachtete Ereignisse für ausgewählte Jahre dargestellt, mit blauen X sind die simulierten Ereignisse der Monte-Carlo-Simulation dargestellt. Bei der Auswahl der repräsentativen Wellen wurden aus den 10.000 Jahren Wellen mit einer mittleren Fülle gewählt. Diese sind mit etwas größeren und beschrifteten X gekennzeichnet. Die Auswahl der Wellen erfolgte in Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt.

In Abbildung 22 bis Abbildung 33 sind schließlich jeweils die für die Pegel Wasserburg, Burghausen und Passau ausgewählten Hochwasserwellen für die Jährlichkeiten 30, 100, 300 und 1.000 dargestellt. Dazu wurden die ausgewählten Wellen so skaliert, dass an den jeweiligen Pegeln die Hochwasserscheitel die Werte der Jährlichkeiten genau erreichen; die Wellen aller anderen Pegel wurden für dieses Ereignis mit demselben Faktor skaliert. In den Graphiken sind jeweils die Ganglinien der Pegel Hofkirchen/Donau, Passau-Ingling/Inn, Schärding/Inn (oberste Reihe von links nach rechts), Jahrsdorf/Mattig, Ruhstorf/Rott, Haging/Antiesen sowie Pramerdorf/Pram (zweite Reihe), Wasserburg/Inn und Burghausen/Salzach (dritte Reihe von links nach rechts), Attel/Anger und Weichselbaum/Murn sowie Siezenheim/Salzach (vierte Reihe von links nach rechts) und in der fünften Reihe die Pegel Rosenheim/Inn und Rosenheim/Mangfall sowie Burgkirchen/Alz und Engfurt/Isen dargestellt. In der Mitte der Graphiken sind die 7-Tage-Niederschlagssummen während des Ereignisses dargestellt. Für die drei Pegel Wasserburg (dunkelgrün), Burghausen (dunkelrot) und Passau-Ingling (dunkelblau) sind

jeweils die Jährlichkeiten 30, 100, 300 und 1000 mit verschiedenen gestrichelten Linien dargestellt.

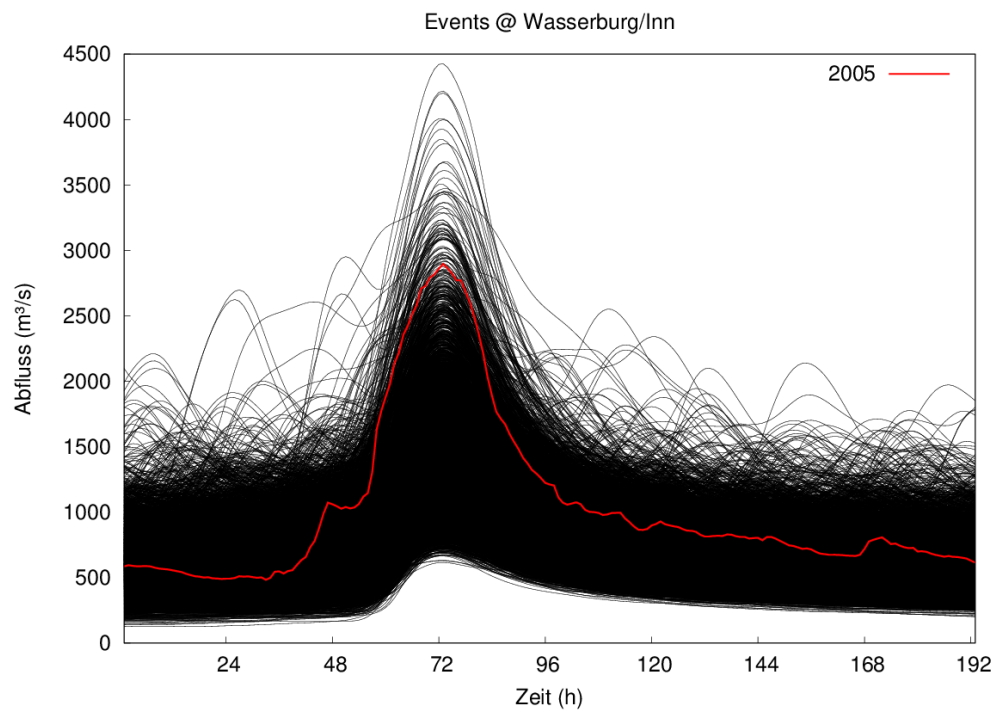


Abbildung 16: Jahresmaxima von 10.000 Jahren aus der Monte-Carlo-Simulation am Pegel Wasserburg/Inn. Farblich dargestellt ist das höchste beobachtete Hochwasserereignis 2005

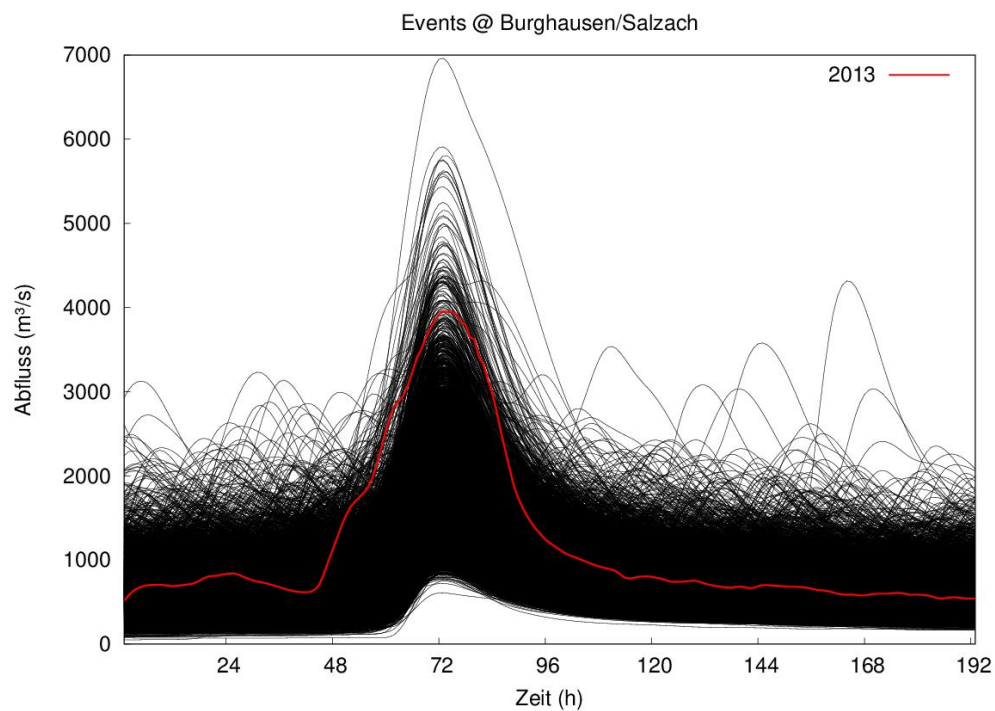


Abbildung 17: Jahresmaxima von 10.000 Jahren aus der Monte-Carlo-Simulation am Pegel Burghausen/Salzach. Farblich dargestellt ist das höchste beobachtete Hochwasserereignis 2013

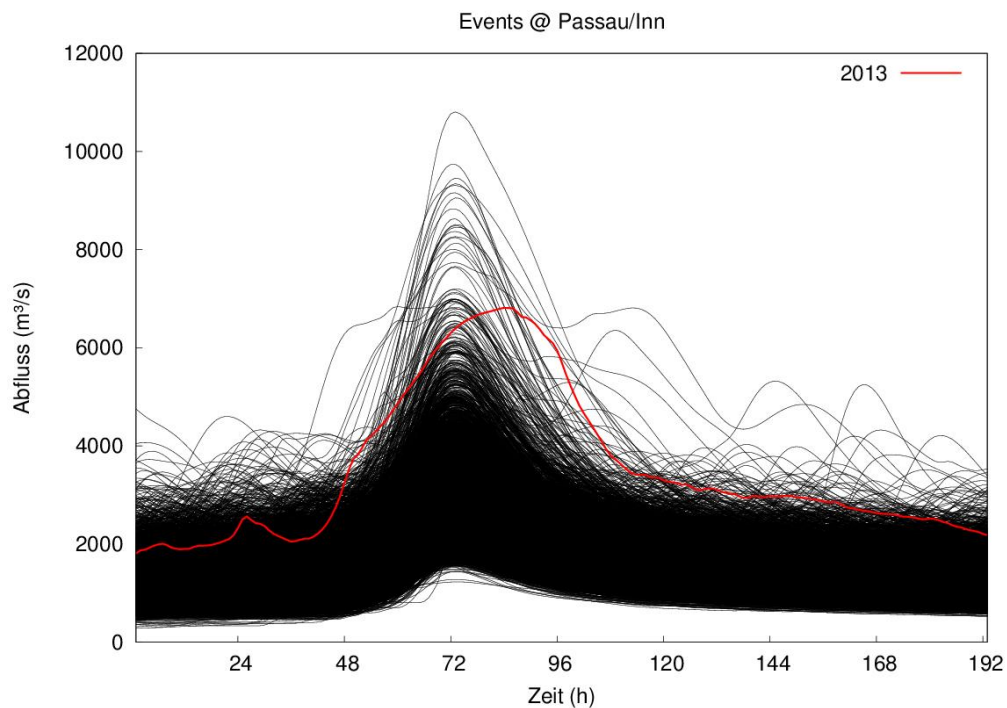


Abbildung 18: Jahresmaxima von 10.000 Jahren aus der Monte-Carlo-Simulation am Pegel Passau-Ingling/Inn (Flusskilometer (Fkm) 3,1). Farblich dargestellt ist das höchste beobachtete Hochwasserereignis 2013 am Pegel Passau-Ingling KW (Fkm 4,2), für den Pegel Passau-Ingling/Inn sind im Bereich des Abflussscheitels keine beobachteten Abflussdaten vorhanden

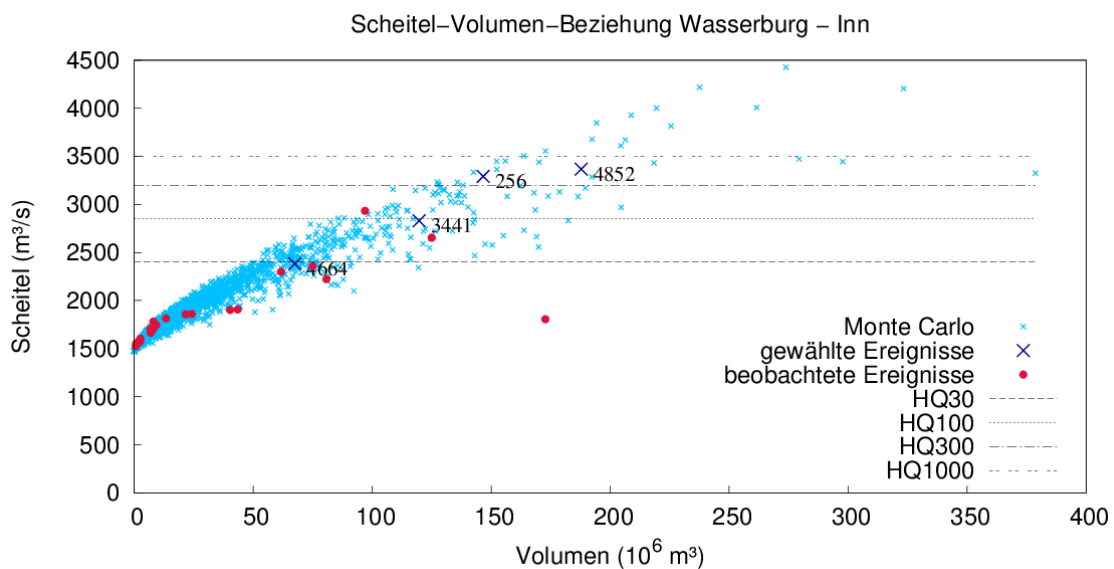


Abbildung 19: Scheitel-Volumen-Beziehung am Pegel Wasserburg/Inn. Rote Punkte kennzeichnen ausgewählte beobachtete Ereignisse, blaue Kreuze die Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation

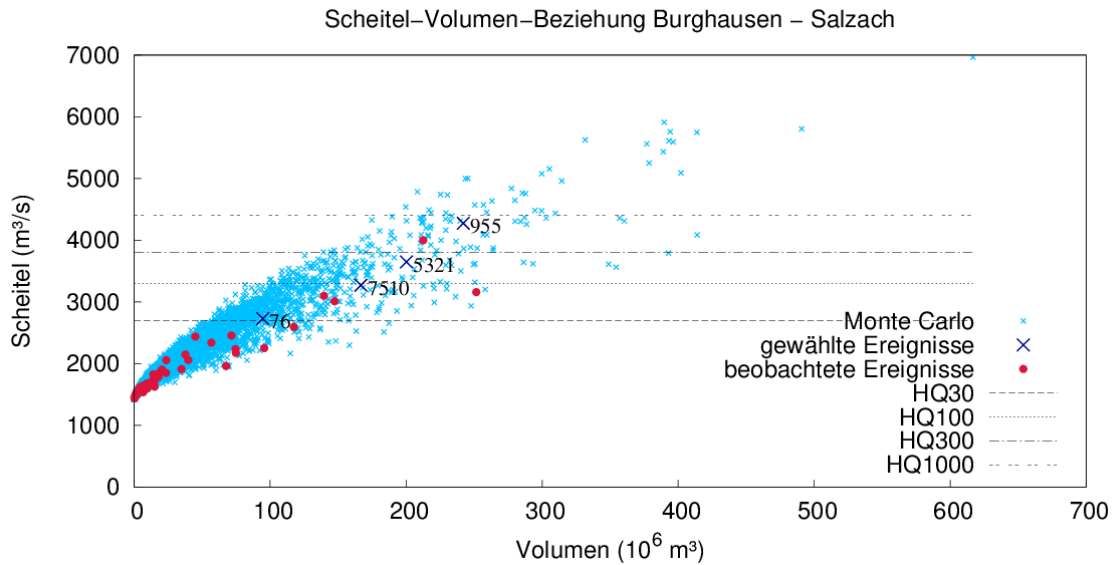


Abbildung 20: Scheitel-Volumen-Beziehung am Pegel Burghausen/Salzach. Rote Punkte kennzeichnen ausgewählte beobachtete Ereignisse, blaue Kreuze die Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation

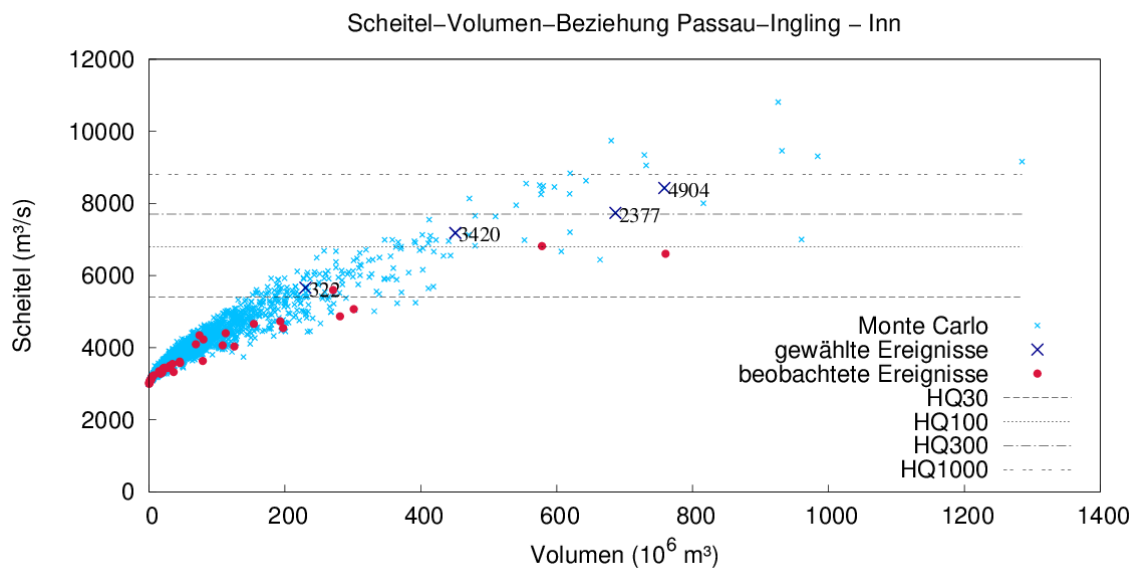


Abbildung 21: Scheitel-Volumen-Beziehung am Pegel Passau-Ingling/Inn. Rote Punkte kennzeichnen ausgewählte beobachtete Ereignisse, blaue Kreuze die Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation

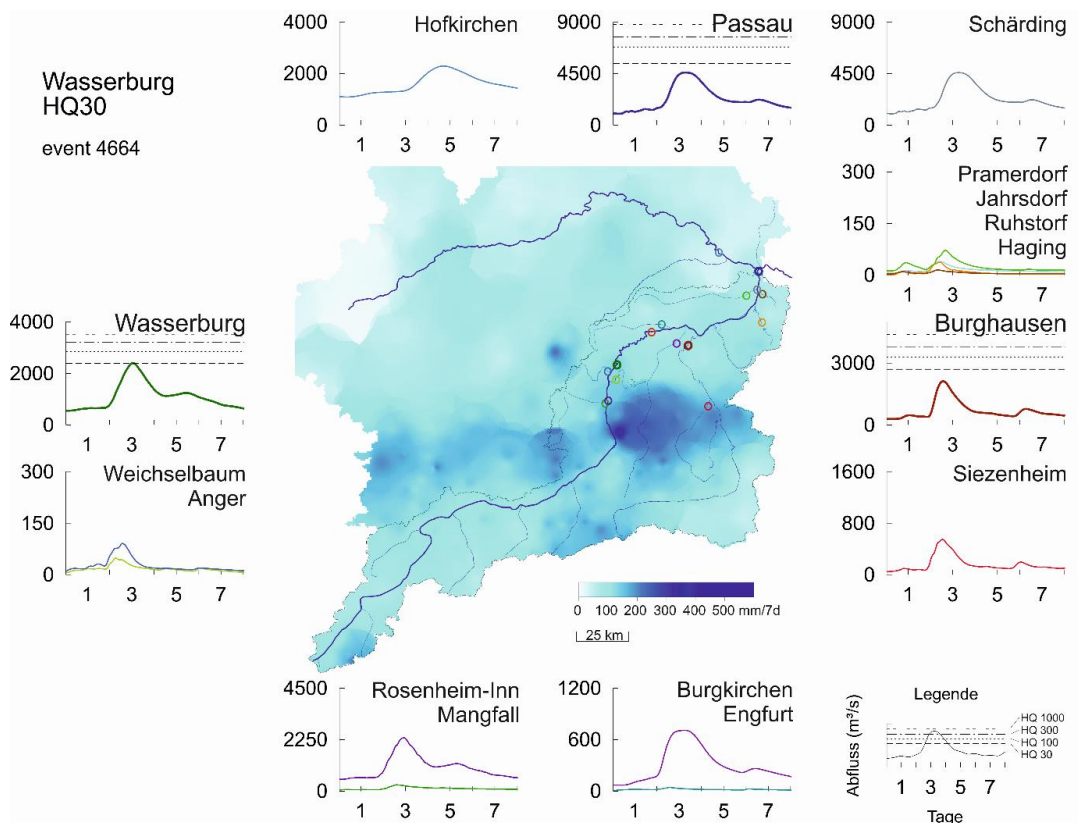


Abbildung 22: HQ₃₀ Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet.

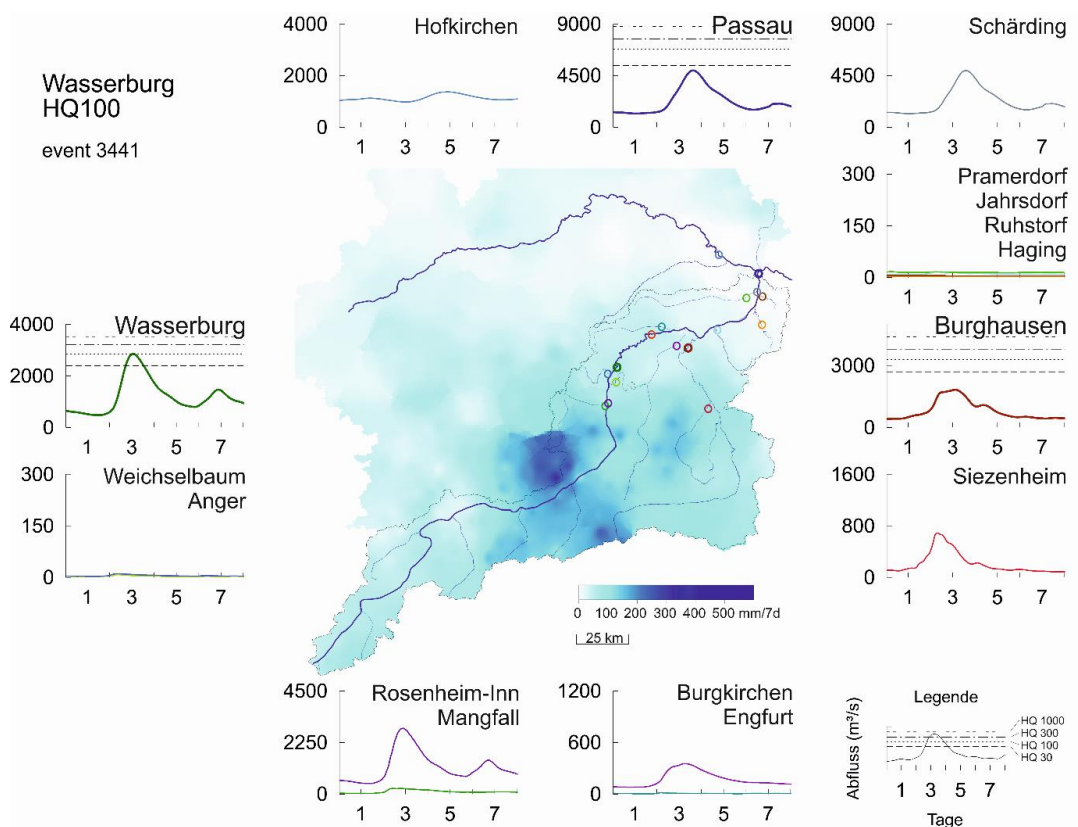


Abbildung 23: HQ₁₀₀ Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

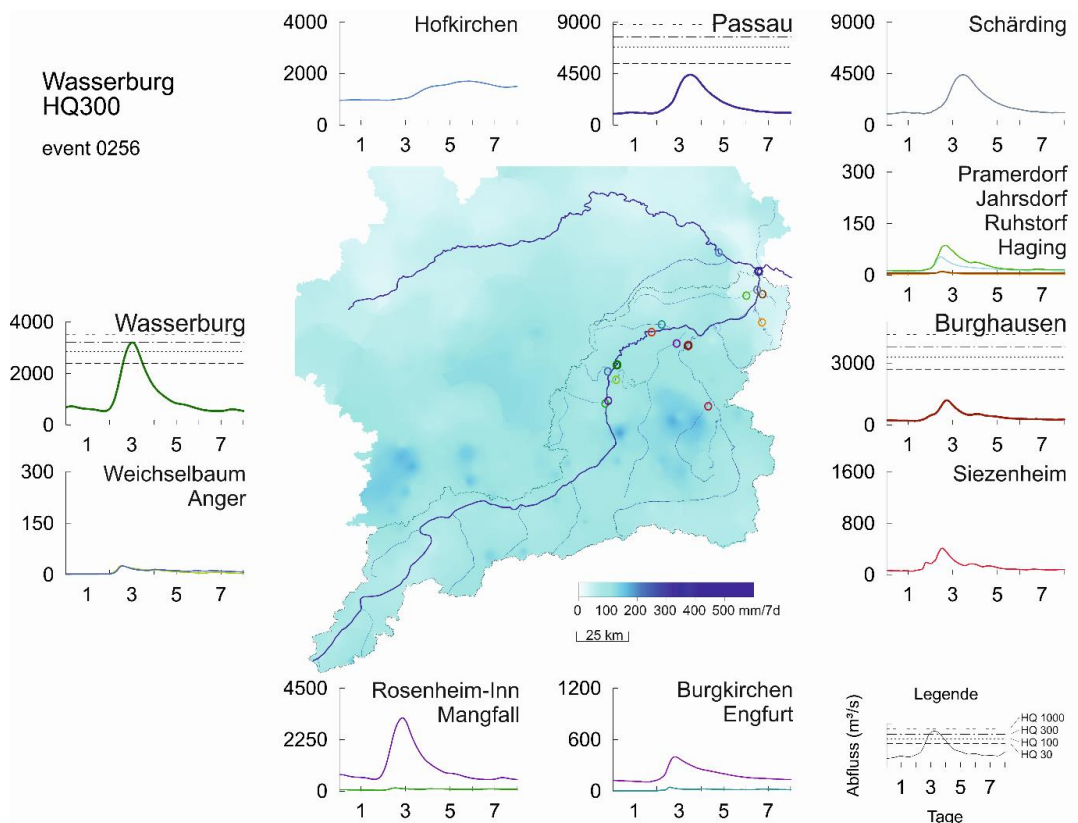


Abbildung 24: HQ₃₀₀ Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

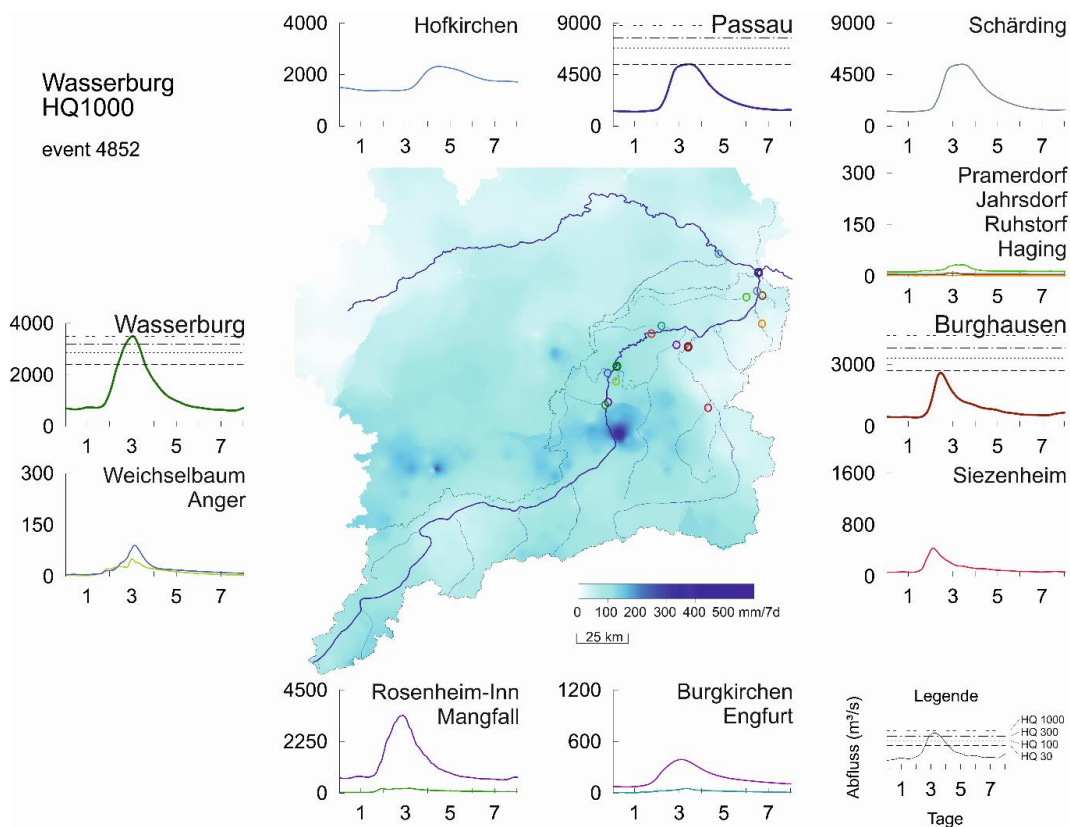


Abbildung 25: HQ_{1.000} Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

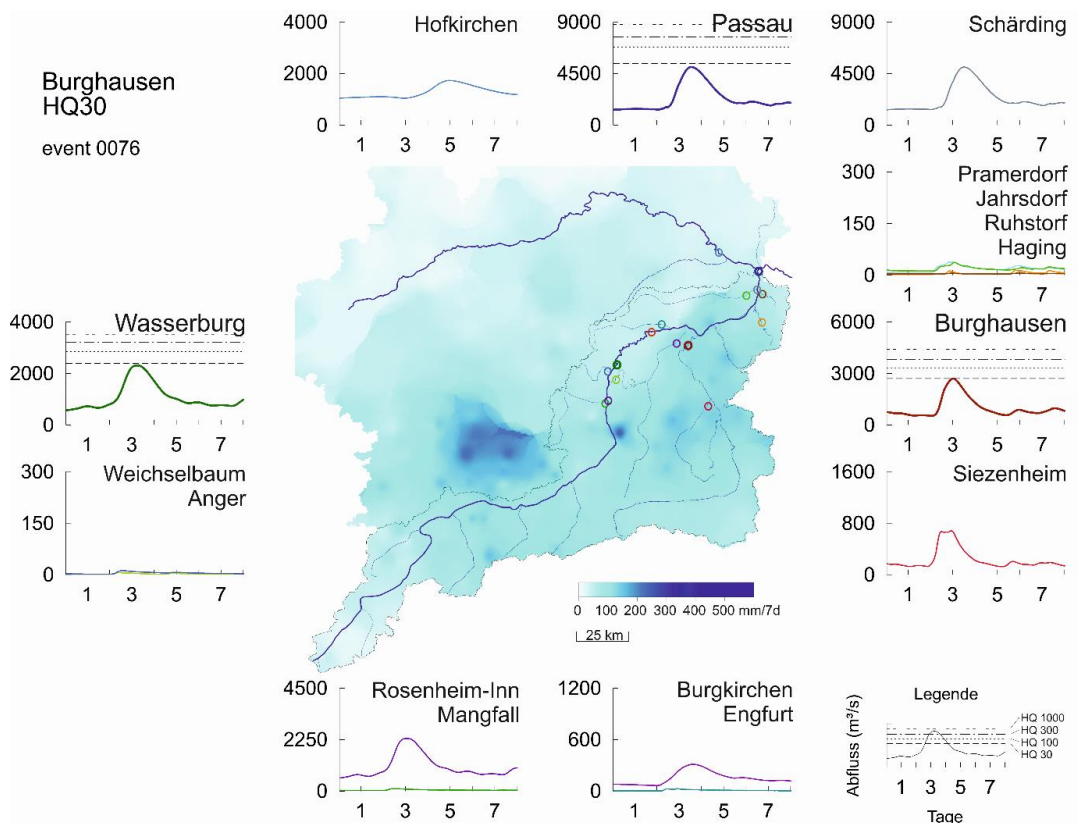


Abbildung 26: H_{Q30} Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

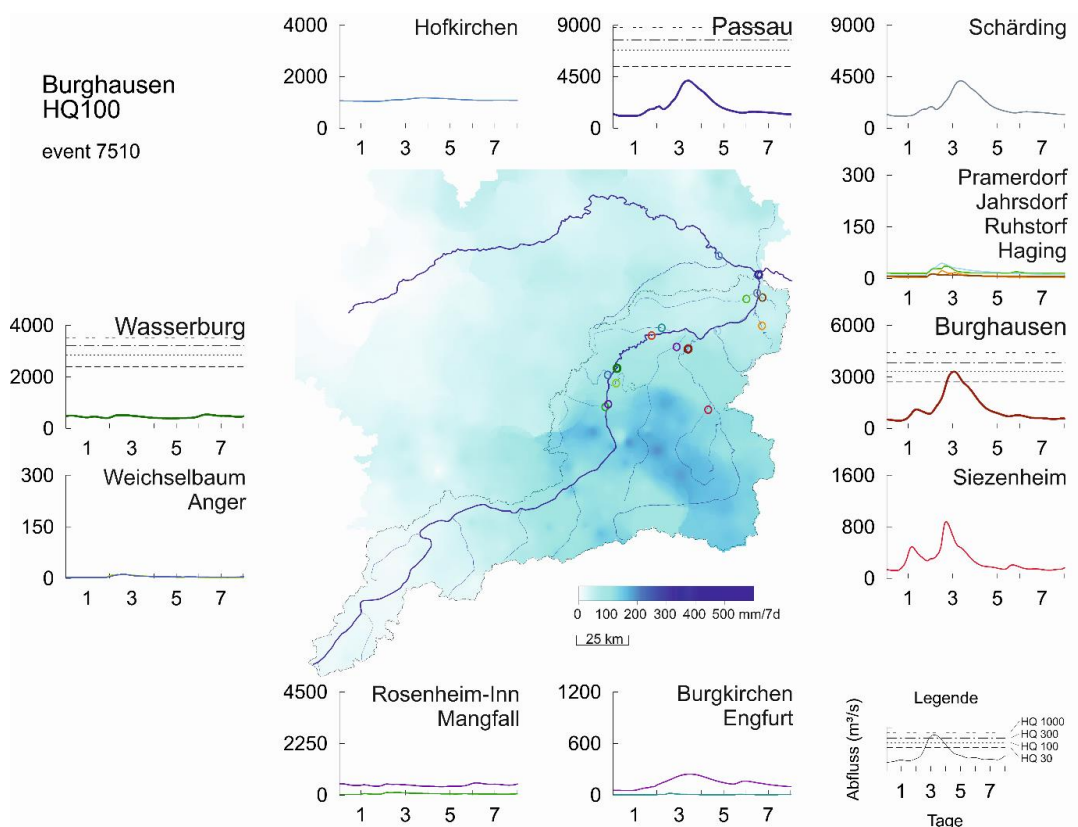


Abbildung 27: H_{Q100} Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

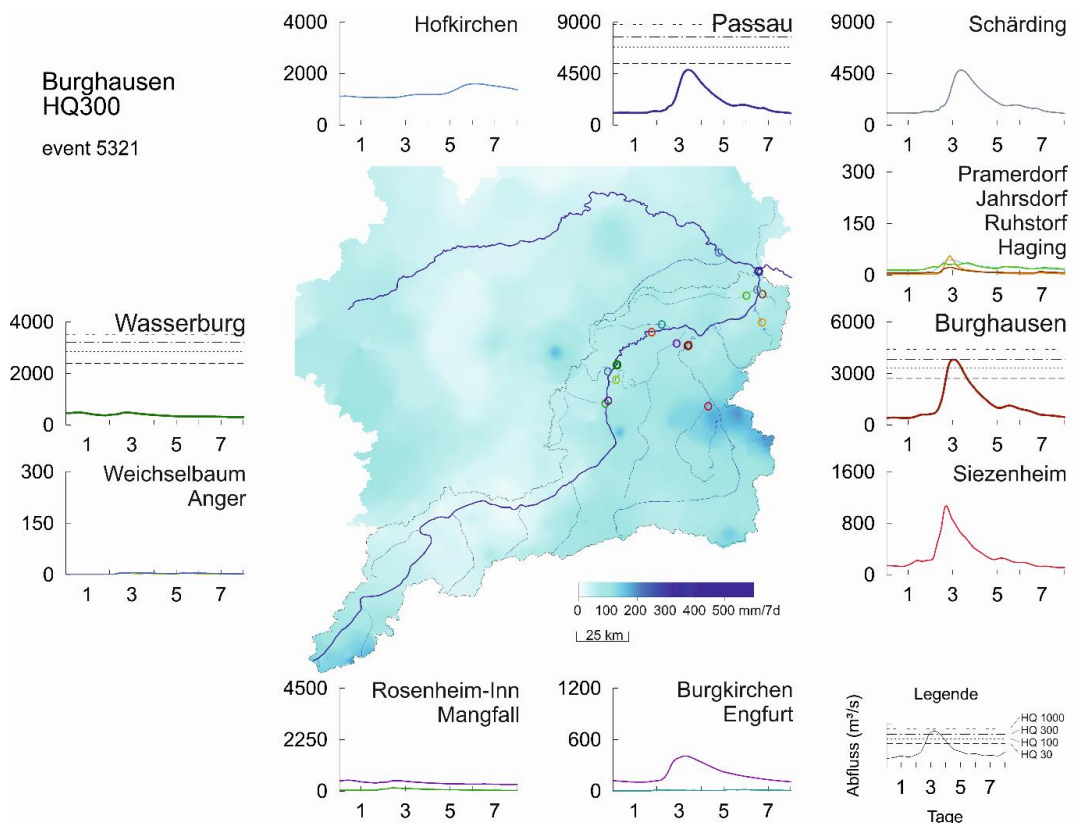


Abbildung 28: HQ₃₀₀ Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

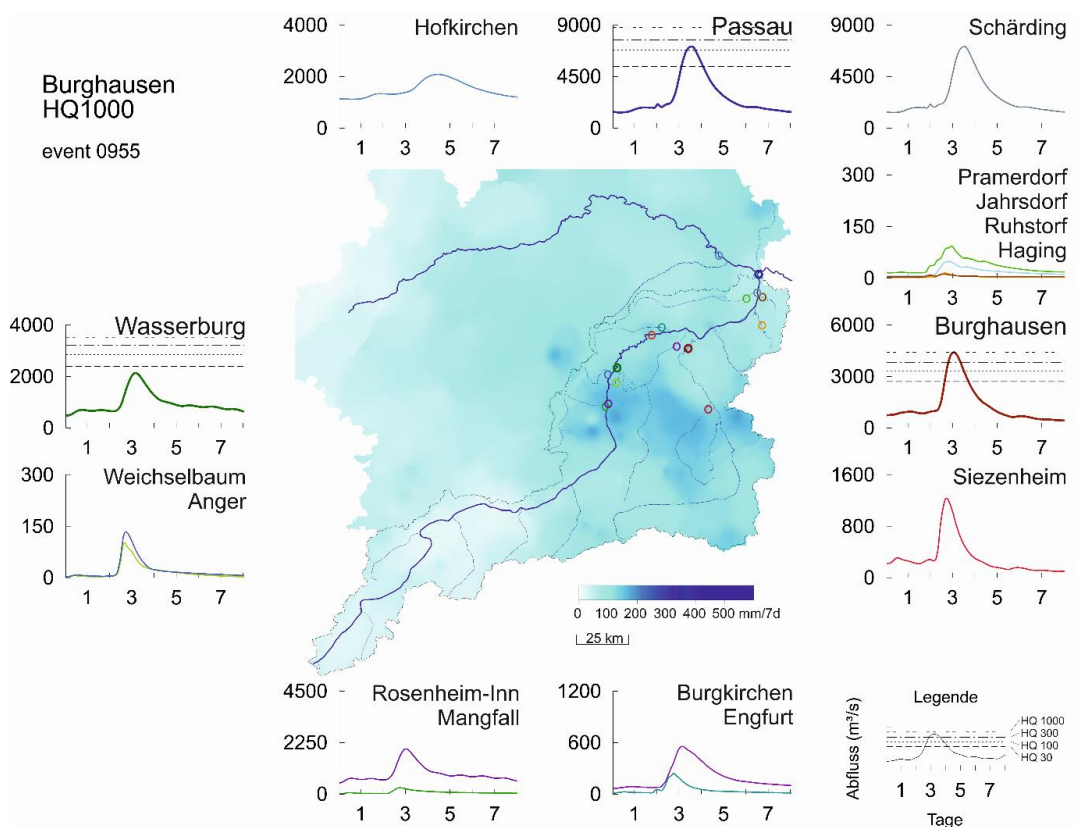


Abbildung 29: HQ_{1.000} Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

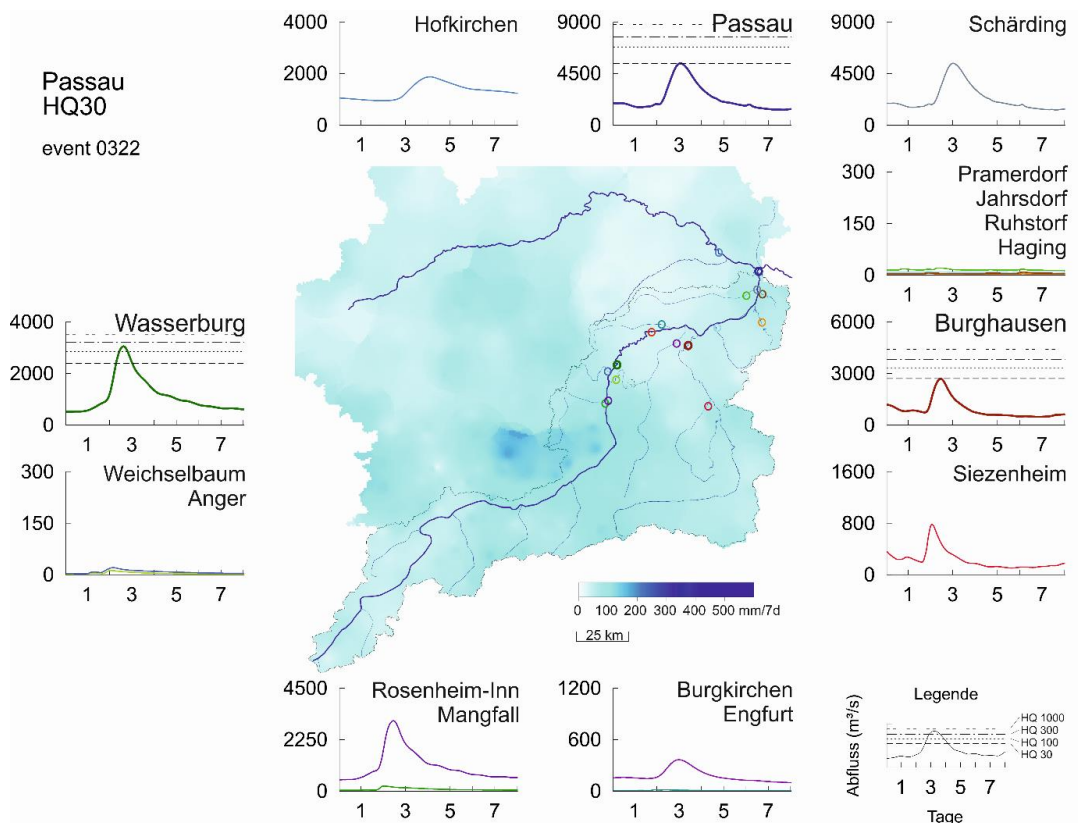


Abbildung 30: HQ₃₀ Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

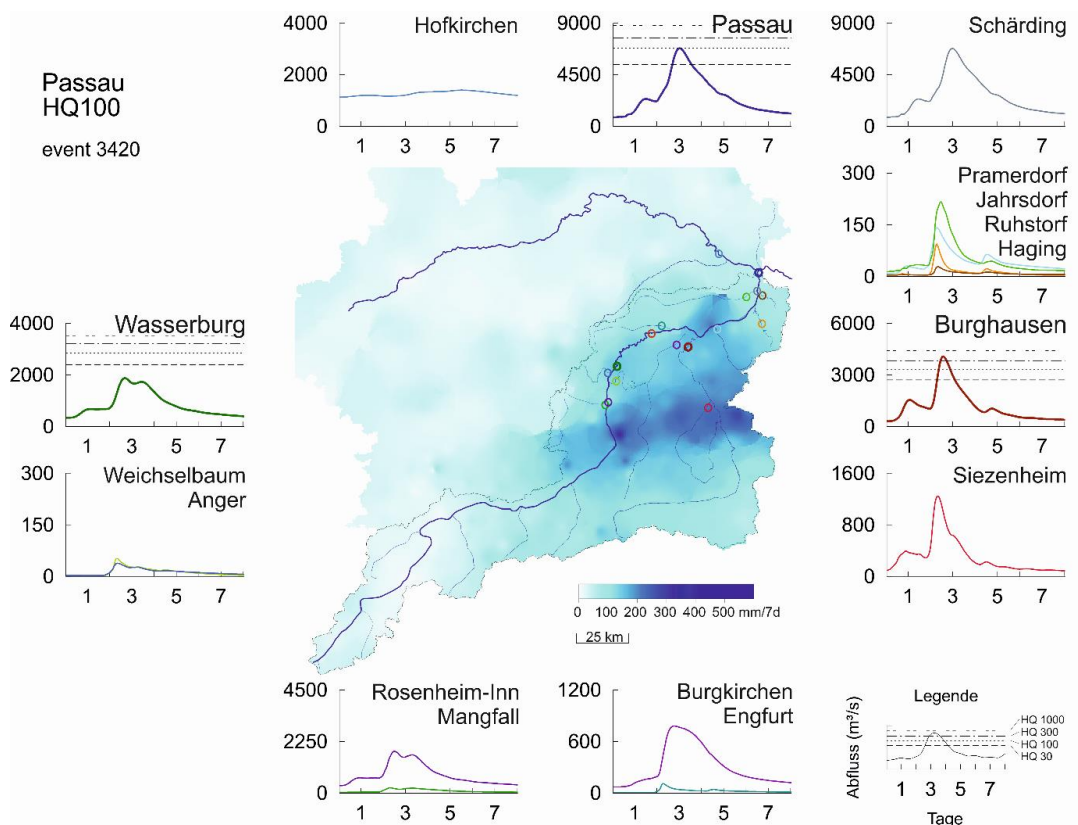


Abbildung 31: HQ₁₀₀ Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

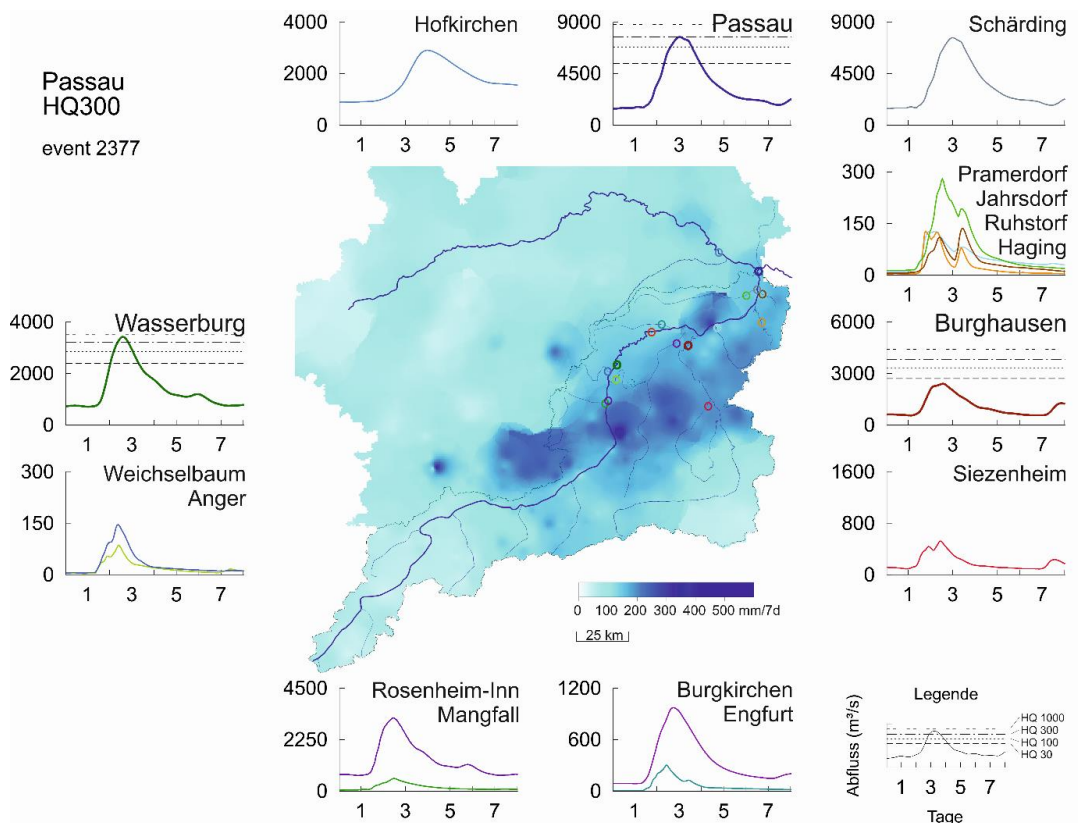


Abbildung 32: HQ₃₀₀ Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

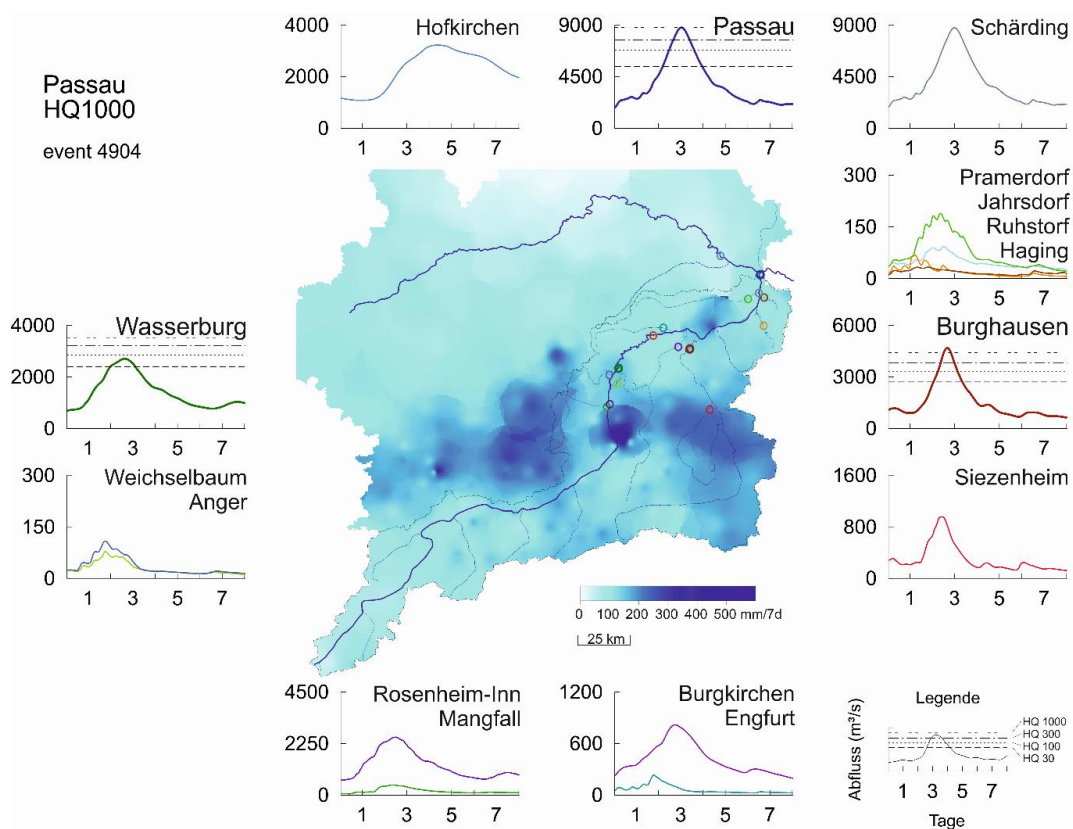


Abbildung 33: HQ_{1.000} Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet

7.3. Umfang des Datenaustausches mit den Projektpartnern

Grundsätzlich können für alle Berechnungsknoten des hydrologischen Modells Stundenwerte für 10.000 Jahre bereitgestellt werden. Aufgrund der Datenmenge und der Anforderungen in den Teilprojekten wurde mit den jeweiligen Projektpartnern der Teilprojekte B, C und D abgestimmt, welche Daten geliefert werden sollten.

An die Projektpartner in den Teilprojekten C und D (Uni Kassel, TU München) wurden für die in den Abbildung 22 bis Abbildung 33 dargestellten Ereignisse Abflusszeitreihen übermittelt. Dabei wurde für die Pegel Wasserburg/Inn, Burghausen/Salzach und Passau-Ingling/Inn für Wiederkehrwahrscheinlichkeiten von 30, 100, 300 und 1000 Jahren repräsentative Ereignisse gewählt. Für die repräsentativen Ereignisse wurden Abflusszeitreihen mit einer Reihenlänge von 193 Stunden (3 Tage vor dem Scheitel und 5 Tage nach dem Scheitel) für 24 Pegel an die Projektpartner übermittelt. Zuflüsse aus 15 Zwischeneinzugsgebieten (vom Pegel des Zubringers bis zum Inn) sowie Zubringer, die nicht direkt an den Modellknoten im hydrologischen Modell erfasst sind, wurden als Zwischeneinzugsgebietsabfluss übermittelt.

An die Projektpartner im Teilprojekt B (TU München, IAWG) wurden Scheitel-Volumen-Beziehungen für die 10.000 Jahreshöchsthochwässer an 17 Pegeln aus der Monte-Carlo-Simulation übermittelt, wobei bei der Berechnung des Volumens der Abfluss über MHQ herangezogen worden ist. Für die Analyse der Gleichzeitigkeit der Hochwässer wurden Abflusszeitreihen mit einer Länge von 8 Tagen für 10.000 Jahreshöchsthochwässer bezogen auf die Pegel Wasserburg/Inn, Burghausen/Salzach und Passau-Ingling/Inn für die Pegel Wasserburg/Inn, Rosenheim/Mangfall, Anger/Attel, Passau-Ingling/Inn, Burghausen/Salzach, Ruhstorf/Rott und Engfurt/Isen übermittelt.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die an die Projektpartner übermittelten Daten. ZR bedeutet, dass Zeitreihen für zwölf Ereignisse übermittelt worden sind, QV Scheitel-Volumen-Beziehung für 17 Pegel und GL 10.000 Zeitreihen für 7 Pegel.

Tabelle 2: Überblick über die an die Projektpartner übermittelten Daten (TP = Teilprojekt)

Pegel	TP B	TP C	TP D
Oberaudorf/Inn		ZR	ZR
Wasserburg/Inn	QV, GL	ZR	ZR
Rosenheim/Inn	QV	ZR	ZR
Zusammenfluss Inn+Innwerkskanal		ZR	ZR
Mühldorf/Inn	QV		
Braunau/Inn		ZR	ZR
Schärding/Inn	QV	ZR	ZR
Passau-Ingling/Inn	QV, GL	ZR	ZR
Rosenheim/Mangfall	QV, GL	ZR	ZR
Weichselbaum/Murn	QV	ZR	ZR
Anger/Attel	QV, GL	ZR	ZR
Engfurt/Isen	QV, GL	ZR	ZR
Burgkirchen/Alz (inklusive Alzkanal)	QV	ZR	ZR
Siezenheim/Saalach	QV	ZR	ZR
Salzburg/Salzach		ZR	ZR
Oberndorf/Salzach		ZR	ZR
Burghausen/Salzach	QV, GL	ZR	ZR
Jahrsdorf/Mattig	QV	ZR	ZR
Mamling/Ach		ZR	ZR
Haging/Antiesen	QV	ZR	ZR
Ruhstorf/Rott	QV, GL	ZR	ZR
Pramerdorf/Pram	QV	ZR	ZR
Kalteneck/Ilz		ZR	ZR
Hofkirchen/Donau	QV	ZR	ZR
Passau-Ilzstadt/Donau		ZR	ZR

8. Zusammenfassung / Schlussfolgerung / Ausblick

Mit einer Modellkette aus stochastischem Niederschlagsmodell und einem hydrologischen Niederschlags-Abfluss-Modell wurden 10.000 Jahre an stündlichen Abflüssen generiert und so das Zusammenwirken der Zubringer des Inns numerisch simuliert. Damit war es möglich, auch das raum-zeitliche Verhalten der Zubringerwellen und deren Wahrscheinlichkeiten in realistischer Weise zu beschreiben.

Für die Wirkungsanalyse der Flutpolder am Inn wurden in Absprache mit dem Auftraggeber aus den 10.000 Jahren für die Pegel Wasserburg/Inn, Burghausen/Salzach und Passau-Ingling/Inn Ereignisse in der Größenordnung eines HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{300} und $HQ_{1.000}$ ausgewählt.

9. Literatur

Bardossy, A., & Plate, E. J. (1992): Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns, *Water Resour. Res.*, 28(5), 1247–1259, doi:10.1029/91WR02589.

Bergström, S. (1995): The HBV model. In Singh, V., editor, *Computer Models of Watershed Hydrology*, chapter 13, pages 443 { 476. Water Resources Publications.

Blöschl, G., Reszler, C. & Komma, J. (2008): A spatially distributed flood forecasting model. *Environ. Modell. Softw.*, 23(4):464 { 478. doi:10.1016/j.envsoft.2007.06.010.

Rogger, M., Kohl, B., Pirkel, H., Viglione, A., Komma, J., Kirnbauer, R., Merz, R. & Blöschl, G. (2012): Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria - Do they tell a consistent story?, *Journal of Hydrology*, 456-457, pp. 30-43, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.068.

Rogger, M., Kohl, B., Pirkel, H., Hofer, M., Kirnbauer, R., Merz, R., Komma, J., Viglione, A. & Blöschl, G. (2011): HOWATI – HochWasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, (7-8), 153-161.

Szolgay, J. (2004): Multilinear flood routing using variable travel-time discharge relationships on the Hron River. *J. Hydro. Hydromech.*, 52(4):303{316.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über Modellgebiet. Der gelbe Kreis kennzeichnet München, der rosa Kreis Innsbruck und der violette Kreis Passau.....	3
Abbildung 2: Plausibilitätsanalyse der Niederschlagsdaten am Beispiel der Station Bad Feilnbach in Bayern.....	4
Abbildung 3: Qualitätsanalyse von Stundenwerte am Beispiel der Station Ötz in Tirol.....	5
Abbildung 4: Beispiel für eine Jährlichkeitskurve für Niederschlagsdauer 24 Stunden. Grün – beobachtet, lila – simuliert. Die grüne Linie repräsentiert eine Gumbel-Verteilung an die beobachteten Daten	6
Abbildung 5: Beispiel für mittlere Tagesniederschläge (links) und Standardabweichung der Tagesniederschläge (rechts). Grün – beobachtet, lila – simuliert.....	7
Abbildung 6: Beispiel für Monatssummen und Jahressummen der Niederschläge. Grün – beobachtet, lila – simuliert	7
Abbildung 7: Beispiel für die Saisonalität der Extremniederschläge. Erklärung siehe Text	7
Abbildung 8: Beispiel der räumlichen Verteilung eines beobachteten Niederschlagsereignisses (oben links) im Vergleich zu simulierten Niederschlagsereignissen (unten links und rechts) mit einer ähnlichen Niederschlagssumme. Die Graphik oben rechts zeigt die Variogramme, die die räumliche Struktur des beobachteten Ereignisses beschreiben (grün) sowie die Variogramme der simulierten Ereignisse (blau und lila).....	8
Abbildung 9: Modellsimulation am Pegel Wasserburg/Inn, 2005	11
Abbildung 10: Auswertung des hydrologischen Modells (R^2) für die in Tabelle 2 angeführten Knoten mit beobachteten Abflussdaten	12
Abbildung 11: Auswertung des hydrologischen Modells (Nash-Sutcliffe-Koeffizient) für die in Tabelle 2 angeführten Knoten mit beobachteten Abflussdaten	12
Abbildung 12: Auswertung des hydrologischen Modells (normierter mittlerer Fehler als Maß für den systematischen Fehler) für die in Tabelle 2 angeführten Knoten mit beobachteten Abflussdaten	13
Abbildung 13: Testen der simulierten Hochwasserstatistik. Vergleich Monte-Carlo-Simulation und offizielle Werte des HND Bayern, Pegel Wasserburg/Inn.....	15
Abbildung 14: Testen der simulierten Hochwasserstatistik. Vergleich Monte-Carlo-Simulation und offizielle Werte des HND Bayern, Pegel Burghausen/Salzach	15

Abbildung 15: Testen der simulierten Hochwasserstatistik. Vergleich Monte-Carlo-Simulation und offizielle Werte des HND Bayern, Pegel Passau-Ingling/Inn	16
Abbildung 16: Jahresmaxima von 10.000 Jahren aus der Monte-Carlo-Simulation am Pegel Wasserburg/Inn. Farblich dargestellt ist das höchste beobachtete Hochwasserereignis 2005	18
Abbildung 17: Jahresmaxima von 10.000 Jahren aus der Monte-Carlo-Simulation am Pegel Burghausen/Salzach. Farblich dargestellt ist das höchste beobachtete Hochwasserereignis 2013	18
Abbildung 18: Jahresmaxima von 10.000 Jahren aus der Monte-Carlo-Simulation am Pegel Passau-Ingling/Inn (Flusskilometer (Fkm) 3,1). Farblich dargestellt ist das höchste beobachtete Hochwasserereignis 2013 am Pegel Passau-Ingling KW (Fkm 4,2), für den Pegel Passau-Ingling/Inn sind im Bereich des Abflussscheitels keine beobachteten Abflussdaten vorhanden	19
Abbildung 19: Scheitel-Volumen-Beziehung am Pegel Wasserburg/Inn. Rote Punkte kennzeichnen ausgewählte beobachtete Ereignisse, blaue Kreuze die Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation	19
Abbildung 20: Scheitel-Volumen-Beziehung am Pegel Burghausen/Salzach. Rote Punkte kennzeichnen ausgewählte beobachtete Ereignisse, blaue Kreuze die Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation	20
Abbildung 21: Scheitel-Volumen-Beziehung am Pegel Passau-Ingling/Inn. Rote Punkte kennzeichnen ausgewählte beobachtete Ereignisse, blaue Kreuze die Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation	20
Abbildung 22: HQ ₃₀ Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet.	21
Abbildung 23: HQ ₁₀₀ Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet	21
Abbildung 24: HQ ₃₀₀ Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet	22
Abbildung 25: HQ _{1.000} Pegel Wasserburg und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet	22
Abbildung 26: HQ ₃₀ Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet	23
Abbildung 27: HQ ₁₀₀ Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet	23

Abbildung 28: HQ ₃₀₀ Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet	24
Abbildung 29: HQ _{1.000} Pegel Burghausen und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet.....	24
Abbildung 30: HQ ₃₀ Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet.....	25
Abbildung 31: HQ ₁₀₀ Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet.....	25
Abbildung 32: HQ ₃₀₀ Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet.....	26
Abbildung 33: HQ _{1.000} Pegel Passau-Ingling und die zum selben Zeitpunkt auftretenden Abflüsse an den Pegeln im Einzugsgebiet.....	26