Abbildung 6.12 zeigt die Jährlichkeiten der 10.000 Ereignisse der Monte-Carlo-Simulation. Auch hier wird deutlich sichtbar, dass die potentiellen Rückhaltebecken geringe Auswirkungen auf die Hochwasserscheitel haben. Für ein 50-jährliches Ereignis liegt die Scheitelreduktion in der Größenordnung von 1.5%, bei einem 100-jährlichen Ereignis sind es 2.0%, bei einem 500-jährlichen 1.9% und bei einem 1000-jährlichen 1.8%.



Abbildung 6.12: Jährlichkeiten der 10.000 Jahre Monte-Carlo-Simulation, Pegel Brixlegg. Rote Punkte ohne alpine Retention, grüne Punkte - mit alpiner Retention, blaue Punkte - HOWATI-Jährlichkeiten

6.3.3 Oberaudorf/Inn

In Abbildung 6.13 sind die größten Hochwässer der 10.000 Jahre der Monte-Carlo-Simulation für den Pegel Oberaudorf dargestellt. Die Scheitel der Jahreshöchsthochwässer liegen zwischen etwa 540 und 5160 m³/s.



Abbildung 6.13: Jahreshöchsthochwässer aus der Monte-Carlo-Simulation, Pegel Oberaudorf

Abbildung 6.14 zeigt die Jährlichkeiten der 10.000 Ereignisse der Monte-Carlo-Simulation für den Pegel Oberaudorf/Inn. Für ein 50-jährliches Ereignis liegt die Scheitelreduktion in der Größenordnung von 1.5%, bei einem 100-jährlichen Ereignis sind es 1.1%, bei einem 500-jährlichen 2.1% und bei einem 1000-jährlichen 2.0%.





6.3.4 Detailanalyse Oberaudorf/Inn - 10 größte Ereignisse

Die Ergebnisse in den Abbildungen 6.15 bis 6.20 beziehen sich auf den Pegel Oberaudorf. Grundlage für die in diesem Kapitel dargestellten Auswertungen sind die 10.000 Jahreshöchsthochwässer aus der Monte-Carlo-Simulation, wobei die 10 größten Abflussereignisse am Pegel Oberaudorf analysiert werden (1‰ aller Ereignisse). Die Jährlichkeiten der 10 größten Ereignisse liegen zwischen 1000 und 10000 Jahren.

Niederschlagsverteilungen

Für die 10 größten Abflussereignisse am Pegel Oberaudorf sind die dazugehörigen Muster des Niederschlags in den Abbildungen 6.15 bis 6.19 dargestellt. Dabei wurden für jedes Ereignis die Niederschlagssummen der drei Tage vor dem Scheitel in Oberaudorf durch die höchste bei diesem Ereignis aufgetretene Niederschlagssumme dividiert. Die höchsten Niederschlagssummen reichen dabei von 142 mm/72 Stunden bis zu 343 mm/72 Stunden. Dargestellt sind die Niederschlagssummen der 72 Stunden vor dem Auftreten des Scheitels in Oberaudorf, in der Bildunterschrift wird jeweils die maximale Niederschlagssumme genannt.



Abbildung 6.15: Niederschlagsverteilung für das größte (links) und 2.-größte (rechts) Ereignis aus der Monte-Carlo-Simulation. Maximaler Wert beim größten Ereignis - 343 mm/72 h, beim 2.-größten Ereignis - 266 mm/72 h



Abbildung 6.16: Niederschlagsverteilung für das 3.-größte (links) und 4.-größte (rechts) Ereignis aus der Monte-Carlo-Simulation. Maximaler Wert beim 3.-größten Ereignis - 189 mm/72 h, beim 4.-größten Ereignis - 143 mm/72 h



Abbildung 6.17: Niederschlagsverteilung für das 5.-größte (links) und 6.-größte (rechts) Ereignis aus der Monte-Carlo-Simulation. Maximaler Wert beim 5.-größten Ereignis - 308 mm/72 h, beim 6.-größten Ereignis - 234 mm/72 h



Abbildung 6.18: Niederschlagsverteilung für das 7.-größte (links) und 8.-größte (rechts) Ereignis aus der Monte-Carlo-Simulation. Maximaler Wert beim 7.-größten Ereignis - 170 mm/72 h, beim 8.-größten Ereignis - 151 mm/72 h

Es ist deutlich zu erkennen, dass die 10 größten Abflussereignisse in Oberaudorf durch großräumige Niederschläge entstehen, die aber je nach Ereignis sehr unterschiedlich verteilt sein könnnen. Der Schwerpunkt der größten Niederschläge liegt tendenziell in Tirol, im Schweizer Teil des Einzugsgebietes ist bei keinem der 10 Ereignisse der Niederschlagsschwerpunkt. Die größten Niederschlagssummen liegen zwischen 142 mm/72 Stunden und 343 mm/72 Stunden.



Abbildung 6.19: Niederschlagsverteilung für das 9.-größte (links) und 10.-größte (rechts) Ereignis aus der Monte-Carlo-Simulation. Maximaler Wert beim 9.-größten Ereignis - 180 mm/72 h, beim 10.-größten Ereignis - 142 mm/72 h

Wirkung der potentiellen Rückhaltebecken

Um die Auswirkung jedes einzelnen Beckens auf die Scheitelreduktion zu analysieren, wurde zunächst eine Referenzrechnung ohne Berücksichtigung der Retentionsbecken durchgeführt, wobei der Hochwasserscheitel in Oberaudorf Q_0 sei. Anschließend wurden 130 Simulationsläufe mit jeweils nur einem Rückhaltebecken durchgeführt mit den Hochwasserscheiteln Q_i mit i =1, 2, ..., 130. Die Auswirkungen eines einzelnen Beckens red_i auf den Scheitelabfluss in Oberaudorf wurde bestimmt durch

$$red_i = Q_0 - Q_i \tag{6.1}$$

Die Gesamtwirkung der Rückhaltebecken am Pegel Oberaudorf ergibt sich aus der Summe der Einzelwirkungen der Becken

$$red_{ges} = \sum_{i=1}^{130} Q_0 - Q_i$$
 (6.2)

In Abbildung 6.20 ist die Wirkung der potentiellen Rückhaltebecken für die 10 größten Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation in einem logarithmischen Massstab dargestellt. Die in der Abbildung rot dargestellten Becken reduzieren den Scheitel am Pegel Oberaudorf bei den 10 größten Ereignissen im Mittel um 0.0001%, die grün dargestellten Becken um 0.1% und mehr. Das Becken mit der größten Wirkung reduziert den Scheitel in Oberaudorf im Mittel über die 10 Ereignisse um 0.24%. Im Mittel beträgt die Scheitelreduktion am Pegel Oberaudorf für die 10 größten Ereignisse 2.38%.

Es ist deutlich zu erkennen, dass v. a. die Becken in den Einzugsgebieten der Brandenberger Ache, des Brixenbaches, der Kundler Ache, der Thierseer Ache, des Wattenbaches, des Weerbaches und im Sellrain bei den 10 größten Ereignissen der Monte-Carlo-Simulation nicht zur Scheitelreduktion beitragen. Die Becken an der Brandenberger Ache, am Brixenbach sowie im Sellrain hätten zum großen Teil auch bei den Ereignissen 1985, 1987 und 2005 nicht wirksam zur Scheitelreduktion in Oberaudorf beigetragen. Das kann im Wesentlichen auf drei Punkte zurückgeführt werden:

- Die Retentionswirkung der Becken tritt vor oder nach dem Hochwasserscheitel in Oberaudorf auf und trägt daher nicht zur Scheitelreduktion bei.
- Der Grundablass der Becken ist so groß gewählt, so dass der Zufluss zum Becken ungehindert durch den Grundablass abfließen kann.



Abbildung 6.20: Wirksamkeit der Becken für die 10 größten Ereignisse der Monte-Carlo-Simulation - Wirkung der einzelnen Becken auf die Scheitelreduktion in Oberaudorf (gesamt 2.38%).

 Die Becken im Sellrain liegen praktisch alle unterhalb einer Uberleitung zum Speicher Längental, sodass das Zwischeneinzugsgebiet zwischen Überleitung und Rückhaltebecken sehr klein wird.

6.3.5 Detailanalyse Oberaudorf/Inn - HQ₁₀₀

Statistisch gesehen, tritt ein HQ_{100} im Mittel alle 100 Jahre auf. Aus der Monte-Carlo-Simulation mit 10.000 Jahren ergeben sich somit 100 Ereignisse in der Größenordnung eines HQ_{100} . Für die Auswertung in diesem Kapitel wurden die HQ_{100} -Ereignisse folgendermaßen gewählt: ausgehend vom HQ_{100} -Wert am Pegel Oberaudorf (2371 m³/s) wurden Ereignisse mit bis zu 5% kleineren und 5% größeren Scheiteln gewählt. 150 Ereignisse liegen zwischen diesen gewählten Grenzwerten; für diese Ereignisse wurden die Analysen analog zu den Analysen für die 10 größten Ereignisse durchgeführt.

Niederschlagsverteilungen

Über die 150 Ereignisse in der Größenordnung eines HQ_{100} gemittelt, ergibt sich eine Niederschlagsverteilung wie in Abbildung 6.21 dargestellt. Dargestellt sind die Niederschläge im Zeitraum von 72 Stunden vor dem Scheitel bis zum Zeitpunkt des Scheitels in Oberaudorf. Die geringsten Niederschlagsmengen treten mit etwa 45 mm/72 h in der Schweiz auf, die größten Niederschlagsmengen mit etwa 75 mm/72 h im Oberlauf der Ruetz, im hinteren Zillertal und im Bereich des Karwendels.



Abbildung 6.21: Mittlerer Niederschlag für HQ_{100} -Ereignisse

Wirkung der potentiellen Rückhaltebecken

Für die Wirkung der Becken ergibt sich ein etwas anderes Bild als für die 10 größten Ereignisse (Abbildung 6.22).



Abbildung 6.22: Wirksamkeit der Becken für Ereignisse in der Größenordnung HQ_{100} . Wirkung der einzelnen Becken auf die Scheitelreduktion in Oberaudorf (gesamt 1.74%).

Es wirken deutlich mehr Becken als für die extremen Ereignisse, die Wirkung der Becken ist aber geringer. Die Rückhaltebecken in den Einzugsgebieten des Brixenbaches, der Kundler Ache, des

Wattenbaches und des Weerbaches tragen zur Scheitelreduktion in Oberaudorf bei, nicht wirksame Becken liegen im Einzugsgebiet der Brandenberger Ache und des Sellrain. Im Mittel über die 150 Ereignisse ergibt sich für Oberaudorf eine Scheitelreduktion von etwa 1.74%.

6.3.6 Zusammenfassung Monte-Carlo-Simulationen

Analog zur Wirkung der Becken bei den realen Hochwässern 1985, 1987 und 2005 haben die potentiellen Rückhaltebecken auch für die Ereignisse, die sich bei der Monte-Carlo-Simulation ergeben, nur eine geringe Auswirkung auf die Hochwasserscheitel am Inn. Für die Pegel Innsbruck, Brixlegg und Oberaudorf ergeben sich für ein 100-jährliches Hochwasser Scheitelreduktionen von 2.0%, 1.5% sowie 1.1%. Das Reduktionspotential steigt zwar für Jährlichkeiten von 1 bis 10 für die Pegel Innsbruck, Brixlegg und Oberaudorf an, ab einer Jährlichkeit von 10 bis etwa 100 ist das Potential relativ konstant mit einer kleinen Streuung und auch vergleichbar hoch. Für größere Jährlichkeiten ist die Streuung deutlich größer (Abbildung 6.23).



Abbildung 6.23: Scheitelreduktion als Funktion der Jährlichkeit für Innsbruck (gelb), Brixlegg (hellgrün) und Oberaudorf (dunkelgrün) bei Berücksichtigung der alpinen Retentionsmaßnahmen.

Betrachtet man den Einfluss der Rückhaltebecken in kleineren Einzugsgebieten, so ist erkennbar, dass der lokale Einfluss der Rückhaltebecken deutlich größer als der regionale Einfluss ist (Abbildung 6.24). In der Abbildung sind Einzugsgebiete mit 98 km², 727 km² sowie 9713 km² dargestellt. Der lokale Einfluss (blaue Punkte) steigt ab einer Jährlichkeit von etwa 10 Jahren deutlich an, für eine Jährlichkeit von 100 Jahren kann der Scheitel um etwa 17% reduziert werden.



Abbildung 6.24: Scheitelreduktion in Prozent für verschiedene räumliche Skalen

6.4 Auswirkung einer geänderten Landnutzung auf die Hochwasserabflüsse des Inns

Landnutzungsänderungen können vielfältige Auswirkungen auf Hochwässer haben (Rogger et al. 2017). Um die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Hochwasserscheitel zu analyiseren, wurden weitere Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Dabei wurde das hydrologische Modell ohne Berücksichtigung der potentiellen Rückhaltebecken verwendet, allerdings wurden in den Rasterelementen mit der Landnutzung "Natürliches Grasland" ein mittlerer Parameter der Landnutzungsklassen Laub-, Nadel- und Mischwald verwendet.

Alle Rasterelemente, die als Landnutzung "Natürliches Grasland" eingestuft sind und deren Meereshöhe unter 2000 m (Waldgrenze) liegt, werden "aufgeforstet", d. h., diese Elemente werden als "Wald" klassifiziert. Wesentliche Unterschiede bei den Parametern sind (1) die maximale Bodenfeuchte (Parameter FC - Aufnahmefähigkeit des Bodens), die für Wald größer als für natürliches Grasland ist und (2) der Grenzwert L_S für das Anspringen des Überlaufes, der im Wald größer als für natürliches Grasland ist.

Insgesamt wird in diesem Szenario die Landnutzungsklasse von 1026 Rasterelementen geändert. Die entspricht knapp 11% des Gesamteinzugsgebietes oder rund 102.600 Hektar, die in diesem Szenario im gesamten Einzugsgebiet aufgeforstet werden. In Abbildung 6.25 werden die tatsächliche Landnutzung und das Szenario gegenüber gestellt. Waldflächen sind dunkelgrün dargestellt, die Unterschiede zur tatsächlichen Landnutzung sind deutlich erkennbar.



Abbildung 6.25: Vergleich tatsächliche Landnutzung (links) vs. Szenario (rechts): alle Rasterlemente unter 2000 m Meereshöhe mit Landnutzungsklasse "Natürliches Grasland" werden als "Wald" klassifiziert

Die Abbildung 6.26 zeigt die Scheitelreduktion als Funktion der Jährlichkeit für die Pegel Innsbruck (gelb), Brixlegg (hellgrün) und Oberaudorf (dunkelgrün) für das Landnutzung-Szenario. Es zeigt sich, dass die Scheitelreduktionen für alle Jährlichkeiten relativ konstant sind. Am Pegel Innsbruck reduzieren sich bei der Aufforstung die Hochwasserscheitel eines 50-jährliches Hochwassers um etwa 2.4%, das 100-jährliche Hochwasser um 2.7%, das 500-jährliche um 2.3% und das 1000-jährliche um 3.4%. Am Pegel Brixlegg ist eine Scheitelreduktion in der Größenordnung von 2.9%, 3.0%, 2.8% und 3.6% für ein HQ_{50} , HQ_{100} , HQ_{500} und HQ_{1000} zu erwarten. Am Pegel Oberaudorf reduzieren sich die Hochwasserscheitel eines HQ_{50} , HQ_{100} , HQ_{500} und HQ_{1000} um 3.9%, 3.9%, 3.9% und 3.9%.



Abbildung 6.26: Scheitelreduktion als Funktion der Jährlichkeit für die Innpegel Innsbruck (gelb), Brixlegg (hellgrün) und Oberaudorf (dunkelgrün) bei Aufforstung aller Rasterelemente mit Landnutzung "Natürliches Grasland" unter 2000 m Meereshöhe

6.4.1 Zusammenfassung Änderung der Landnutzung

Für die Beurteilung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf Hochwasserscheitel wurde im hydrologischen Modell davon ausgegangen, dass die Rasterelemente mit "Natürliches Grasland" aufgeforstet werden. Dabei wurden alle Rasterelelemente "Natürliches Grasland" unter einer Meereshöhe von 2000 m (Waldgrenze) aufgeforstet - dies betrifft rund 11% des Gesamteinzugsgebietes.

Der Vergleich des Potential der potentiellen Rückhaltebecken im alpinen Raum und einer geänderten Landnutzung (Aufforstung) zeigt, dass die Scheitelreduktion am Pegel Oberaudorf durch eine geänderte Landnutzung stärker ausfällt. Während durch die potentiellen Rückhaltebecken eine Reduktion von etwa 1.1% erreicht werden könnte, könnte der Scheitel bei einer Aufforstung von 100.000 Hektar um 3.9% reduziert werden.

7 Zusammenfassung

Um den Hochwasserdurchfluss einer bestimmten Jährlichkeit, z. B. das HQ_{100} , zu reduzieren, sind Retentionsräume bzw. Retentionsbecken sinnvoll. In Tirol liegt der Großteil der bestehenden Retentionsmaßnahmen für den Inn im Dauersiedlungsraum im Inntal, der allerdings nur einen kleinen Prozentsatz der gesamten Fläche Tirols darstellt. Der flächenmäßig bei weitem größere alpine Raum wird - mit Ausnahme der alpinen Kraftwerksspeicher - kaum für die Hochwasserretention genutzt. Es bietet sich deshalb an, alpine Räume in Tirol zur Reduktion der Hochwässer am Inn heranzuziehen.

Das Ziel der Studie AlpRetInn (Auswirkung Alpiner Retention auf die Hochwasserabflüsse des Inn) war, das Potential von Hochwasserrückhaltebecken im alpinen Raum auf die Scheitelreduktion von T-jährlichen Hochwasserabflüssen am Inn zu untersuchen. Die Wirksamkeit wird für Jährlichkeiten von 10-1000 Jahren ausgedrückt als prozentmäßige Reduktion des Hochwasserabflüsses des Inn. Auf diese Art kann abgeschätzt werden, in welchem Ausmaß potentielle Retentionsräume im Inntal und anderen Tallagen durch Retentionsräume im alpinen Raum ersetzt werden können.

Die in der Studie verwendeten Standorte für Rückhaltebecken wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Kriterien für die Standorte der Becken waren: Wildbacheinzugsgebiete größer 9 km², spezifisches Volumen größer 5 mm, Stauhöhe generell 10 m und Neigungsklasse für Tallängenschnitt 0 bis 15°. Bei der Auswahl der potentiellen Standorte wurde keine Rücksicht auf sozioökonomische Bedingungen, Erschließung der Gebiete und Geologie genommen, ausgenommen wurden lediglich dauerbesiedelte Flächen. Insgesamt wurden 130 potentielle Standorte für Rückhaltebecken mit einem Gesamtvolumen von 21.2 Millionen Kubikmetern bestimmt. Die Einzugsgebietsfläche der nicht gesteuerten Rückhaltebecken umfasst ein Viertel der gesamten Einzugsgebietsfläche des Pegels Oberaudorf. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde auf eine Implementierung der kleineren Rückhaltemaßnahmen (AP4.2) verzichtet.

Um den Einfluss der alpinen Rückhaltemaßnahmen auf das HQ_T am Inn zu bestimmen, musste das Zusammenwirken von Zubringern in Hinblick auf die Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu berücksichtigt werden. Für das Zusammenfließen zweier Zubringer existieren zwei Grenzfälle: (1) die Hochwasserwellen treten bei einem Ereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit gleichzeitig auf, sodass sich die Scheitel maximal überlagern; oder (2) sie treten mit hoher Wahrscheinlichkeit so verschoben auf, dass keine Überlagerung stattfindet. Im ersten Fall addieren sich die Durchflüsse der Zubringer beim Zusammenfluss, im zweiten Fall ist nur der größere Abfluss maßgebend. Die Fälle der Realität liegen dazwischen. Um die räumlichen Abhängigkeiten zu berücksichtigen, war ein stochastischer Ansatz erforderlich.

Ein stochastisches Niederschlagsmodell (Kapitel 3.1) wurde mit Niederschlagsdaten aus dem Einzugsgebiet (Datenreihen länger als 30 Jahre) kalibriert. Dabei wurde darauf geachtet, dass sowohl die Statistik an den Niederschlagsstationen (Mittelwert und Standardabweichung des Tagesniederschlags, Monats- und Jahresniederschlagssummen sowie 24-Stunden-Niederschlagsspenden) als auch räumliche Niederschlagsmuster statistisch korrekt wiedergeben werden.

Das hydrologische Modell wurde anhand von Abflusswerten an den zur Verfügung stehenden Pegeln und mit den im selben Zeitraum vorhandenen meteorologischen Daten kalibriert. Um das Modellgebiet möglichst detailliert abzubilden, wurden im hydrologischen Modell Daten wie Überleitungen und Wasserfassungen sowie Landnutzung und Geologie (Posch-Trözmüller et al. 2016) berücksichtigt. Das Modell wurde sowohl an jährlichen Abflüssen kalibriert, um die Wasserbilandz korrekt wiederzugeben, als auch einzelnen Ereignissen (v. a. 1985, 1987 und 2005). Im Anschluß wurde die Pegelstatistik überprüft und - sofern notwenig - eine *bias*-Korrektur durchgeführt. Mit dem Niederschlagsmodell wurden lange Zeitreihen (10.000 Jahre) von Niederschlagsdaten generiert, die im Niederschlag-Abfluss-Modell als Eingangsdaten zur Verwendung kamen, um lange Zeitreihen (10.000 Jahre) von Abflussdaten zu generieren.

In einer ersten Analyse wurde die Wirksamkeit der Becken für die realen Hochwasserrereignisse 1985, 1987 und 2005 bestimmt (Kapitel 6.2). Dabei zeigte sich, dass die Wirksamkeit der Rückhaltebecken maßgeblich von vier Faktoren abhängt: (1) Verteilung des Niederschlags, (2) Volumen der Becken, (3) Größe des Grundablasses und (4) Größe des Beckeneinzugsgebietes. Wird das Einzugsgebiet eines Becken überregnet, so kann ein Becken zur Scheitelreduktion am Inn beitragen. Das Volumen der Becken wurde durch die Stauhöhe der Rückhaltebecken von 10 Metern vorgegeben. Das Volumen des Beckens muss groß genug sein, um einen Teil des im Einzugsgebiet entstehenden Abflusses zurück zu halten; das Volumen darf aber nicht zu klein sein, da das Becken ansonsten vor Auftreten des Scheitels gefüllt ist und der folgende Abfluss direkt ohne Retention an das Gerinne abgegeben wird. Aufgrund von Verklausungsgefahr konnten die Grundablässe nicht beliebig klein gewählt werden. In Absprache mit den Auftraggebern wurde festgelegt, dass die Grundablässe ungehindert ein HQ_2 abführen sollen. Rückhaltebecken, die unterhalb der Wasserfassung einer Uberleitung liegen, tragen auch wenig zur Scheitelreduktion bei, da das Einzugsgebiet der Becken durch die Wasserfassungen verkleinert wird. Für das Hochwasser 1985 ergab sich am Pegel Oberaudorf eine Scheitelreduktion von 0.6%, für das Ereignis 1987 von 2.0% und für 2005 von 3.5%. Die regionalen Auswirkungen der potentiellen Becken waren deutlich geringer ist als die lokale Wirkung der Becken.

Die Analyse der mit der Modellkette generierten 10.000 Jahreshöchsthochwässer lieferte Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung (Kapitel 6.3). Für Ereignisse mit Jährlichkeiten von 10 bis etwa 100 Jahren ist das Potential relativ konstant mit einer kleinen Streuung. Für Ereignisse in der Größenordnung eines HQ_{100} ist am Pegel Oberaudorf eine Scheitelreduktion von etwa 1.5-1.7% zu erwarten. Für Ereignisse größer als HQ_{100} ist eine größere Streuung zu erwarten. Die Scheitelreduktion am Pegel Oberaudorf beträgt für die 10 größten Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation im Mittel 2.38%, wobei das Becken mit der größten Einzelwirkung den Scheitel in Oberaudorf um 0.24% reduziert. Bei einem HQ_{100} tragen deutlich mehr Becken zur Scheitelreduktion bei als bei größeren Ereignissen, allerdings ist die Wirkung der Becken auch geringer. In kleineren Einzugsgebieten ist der Einfluss der Becken deutlich größer: ein HQ_{100} kann z. B. in einem Einzugsgebiet mit knapp 100 km² um etwa 17% reduziert werden. Diese potentielle Scheitelreduktion hängt wiederum stark von der Niederschlagsverteilung ab. Die Analyse zeigte auch, dass einige der potentiellen Becken in keinem bis sehr wenigen Ereignissen zur Scheitelreduktion beitragen. Dies betrifft z. B. die Becken im Sellrain, die unterhalb der Wasserfassung einer Überleitung liegen.

In weiteren Analysen wurde untersucht, inwieweit sich eine Änderung der Landnutzung auf die Hochwasserscheitel auswirkt (Kapitel 6.4). Konkret wurde dabei eine großflächige Aufforstung von natürlichem Grasland ausgewertet, bei der das gesamte natürliche Grasland unterhalb der Waldgrenze (2000 m) aufgeforstet wurde. Im Vergleich zu den potentiellen Rückhaltebecken ist bei einer geänderten Landnutzung die Scheitelreduktion deutlich höher. Die Scheitelreduktion kann Werte von etwa 2.5 bis 4.0% erreichen.

Der vorliegende Bericht zur Studie AlpRetInn zeigt, dass auf der lokalen Skale Hochwasserscheitel durch alpine Retentionsmaßnahmen deutlich reduziert werden können, das Potential auf der regionalen Skale jedoch klein ist. Für den Inn ergeben sich für ein HQ_{100} Scheitelreduktion in der Größenordnung von 1.5-1.7%, für die größten Ereignisse aus der Monte-Carlo-Simulation ergibt sich ein etwas größeres Potential (2.4%).

Die Wirksamkeit der Becken wird wesentlich beeinflusst durch

- 1. die **Niederschlagsverteilung** als nicht beeinflussbarer Faktor. Wird ein Becken überregnet, ist theoretisch Potential vorhanden, zur Scheitelreduktion auf der lokalen und regionalen Basis beizutragen;
- das Beckenvolumen, das durch die Stauhöhe definiert wird. Das Becken muss groß genug sein, um Abfluss aus dem Einzugsgebiet zurückhalten zu können, darf aber gleichzeitig nicht zu klein sein, um ein Auffüllen des Beckens vor dem Scheitel zu verhindern;
- 3. die Größe des **Grundablasses**. Wird der Grundablass zu klein gewählt, besteht Verklausungsgefahr. Das Becken füllt sich und bei Erreichen des Gesamtvolumens kommt es zum Überströmen des Dammes und der überströmende Abfluss kommt unretentiert zum Abfluss. Wird der Grundablass zu groß gewählt, kann der im Einzugsgebiet des Beckens entstehende Abfluss ungehindert und unretentiert abfließen;
- 4. die Größe des Einzugsgebietes der Rückhaltebecken.

Eine größere Scheitelreduktion kann durch eine geänderte Landnutzung erreicht werden. Bei der Aufforstung von natürlichem Grasland unterhalb der Waldgrenze (11% des Gesamteinzugsgebietes) kann der Scheitel eines 100-jährlichen Ereignisses um etwa 2.5-4.0% reduziert werden.

A Statistische Gütemaße

Systematische Fehler (bias) stellen die Abweichungen der Ergebnisse vom wahren Wert dar und werden durch störende Einflüsse (nicht erwartete Komponenten) oder fehlerhafte Messtechnik (falsche Methode, fehlerhaftes Gerät) verursacht. Eine häufig benutzte Darstellung des Erwartungwerts eines Testergebnisses ist der Mittelwert. In diesem Fall stellt der bias die Abweichung zwischen dem Mittelwert der Simulation und dem Mittelwert der Beobachtungen dar. Die Einheit des *bias* ist in diesem Fall m^3/s .

$$bias = \overline{Q^*} - \overline{Q} \tag{A.1}$$

Mittelwert der simulierten/vorhergesagten Werte $\overline{Q^*}$ Mittelwert der Beobachtungen

Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient nsme ist ein kombiniertes Maß für zufällige und systematische Fehler. Ein Wert nsme = 1 bedeutet, dass der simulierte Durchfluss gleich dem beobachteten Durchfluss ist. Ein Wert nsme = 0 bedeutet, dass die Modellergebnisse dem Mittelwert des beobachteten Durchflusses entsprechen. nsme kann, wenn der Mittelwert der beobachteten Werte ein besserer Indikator für den Durchfluss ist als das Modellergebnis, auch negativ werden. Je näher der Wert bei 1 ist, desto genauer ist das Modell. Der nsme ist dimensionslos.

$$nsme = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_i^* - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_i - \overline{Q})^2}$$
(A.2)

nsme Nash-Sutcliffe model efficiency

- nAnzahl der Wertepaare
- Simulation/Vorhersage zum Zeitpunkt *i* Q_i^*
- $\frac{Q_i}{Q}$ Beobachtung zum Zeitpunkt i
- Mittelwert der Beobachtungen

B Kalibrierungsergebnisse 2005

Am Pegel Kajetansbrücke/Inn (Abbildung B.1) werden die Werte des *bias* und des *nsme* sehr stark durch den Einfluss des Kraftwerks beeinflusst. Die simulierte Ganglinie bildet den Verlauf der beobachteten Ganglinie gut ab, der Scheitel im August 2005 wird jedoch unterschätzt. Dies ist auf die geringe Stationsdichte im Schweizer Teil des Einzugsgebietes zurückzuführen.



Abbildung B.1: Hydrologische Simulation - Kajetansbrücke/Inn, 2005

Abbildung B.2 zeigt das Simulationsergebnis am Pegel WF Wenns an der Pitze. Deutlich sichtbar ist der Einfluss der Wasserfassungen im Oberlauf der Pitze. Durch die vereinfachte Abbildung der Wasserfassungen im hydrologischen Modell kommt es im Frühjahr/Frühsommer zu deutlichen Überschätzungen des Abflusses, auch am Ende des Jahres wird der Abfluss überschätzt.

Im Otztal sind im Gegensatz zum Pitztal keine Wasserfassungen vorhanden. Das spiegelt sich auch bei den Simulationsergebnissen für den Pegel Brunau wider (Abbildung B.3). Der simulierte Abfluss stimmt deutlich besser mit dem simulierten Abfluss überein, der Abfluss wird zwar etwas unterschätzt (bias = -3.183), der Nash-Sutcliffe-Koeffizient ist mit 0.871 jedoch gut.

Am Pegel Imst/Inn (Abbildung B.4) ist der Einfluss von Kraftwerken ebenfalls deutlich zu erkennen. Die simulierte Ganglinie gibt den Verlauf der beobachteten Ganglinie gut wieder, auch das Ereignis im August wird gut wiedergegeben.

Im Sillgebiet bildet das Modell den Abfluss sehr gut ab, hier dargestellt am Pegel Innsbruck/Sill (Abbildung B.5). Der systematische Fehler *bias* ist klein, der *nsme* mit 0.876 gut.

Am Pegel Rotholz/Inn (Abbildung B.6) sind die Modellergebnisse ähnlich den Ergebnissen am Pegel Innsbruck/Inn. Im Frühjahr wird der Abfluss unterschätzt, der weitere Verlauf stimmt sehr gut mit der Beobachtung überein.



Abbildung B.2: Hydrologische Simulation - WF Wenns/Pitze, 2005



Abbildung B.3: Hydrologische Simulation - Brunau/Ötztaler Ache, 2005

Am Pegel Hart im Zillertal/Ziller ist wiederum der Einfluss der Speicherkraftwerke deutlich zu erkennen. Die Wirkungsweise der Speicher ist im hydrologischen Modell aufgrund fehlender Informationen über das Arbeitsverhalten der Speicher nicht im Detail abgebildet, daher kann nur der "natürliche" Abfluss im Zillertal abgebildet werden. Es ist aber zu erkennen, dass das Modell in der Lage ist, das Abflussverhalten im Gebiet gut zu simulieren.



Abbildung B.4: Hydrologische Simulation - Imst/Inn, 2005



Abbildung B.5: Hydrologische Simulation - Innsbruck-Reichenau/Sill, 2005



Abbildung B.6: Hydrologische Simulation - Rotholz/Inn, 2005



Abbildung B.7: Hydrologische Simulation - Hart i. Zillertal/Ziller, 2005

C Kalibrierungsergebnisse 1987



Abbildung C.1: Hydrologische Simulation - Landeck/Sanna, 1987



Abbildung C.2: Hydrologische Simulation - Kajetansbrücke/Inn, 1987



Abbildung C.3: Hydrologische Simulation - WF Wenns/Pitze, 1987



Abbildung C.4: Hydrologische Simulation - Brunau/Ötztaler Ache, 1987



Abbildung C.5: Hydrologische Simulation - Imst/Inn, 1987



Abbildung C.6: Hydrologische Simulation - Innsbruck/Inn, 1987



Abbildung C.7: Hydrologische Simulation - Innsbruck-Reichenau/Sill, 1987



Abbildung C.8: Hydrologische Simulation - Rotholz/Inn, 1987



Abbildung C.9: Hydrologische Simulation - Hart i. Zillertal/Ziller, 1987



Abbildung C.10: Hydrologische Simulation - Brixlegg/Inn, 1987



Abbildung C.11: Hydrologische Simulation - Oberaudorf/Inn, 1987

D Kalibrierungsergebnisse 1985



Abbildung D.1: Hydrologische Simulation - Landeck/Sanna, 1985



Abbildung D.2: Hydrologische Simulation - Kajetansbrücke/Inn, 1985



Abbildung D.3: Hydrologische Simulation - WF Wenns/Pitze, 1985



Abbildung D.4: Hydrologische Simulation - Brunau/Ötztaler Ache, 1985



Abbildung D.5: Hydrologische Simulation - Imst/Inn, 1985



Abbildung D.6: Hydrologische Simulation - Innsbruck/Inn, 1985



Abbildung D.7: Hydrologische Simulation - Innsbruck-Reichenau/Sill, 1985



Abbildung D.8: Hydrologische Simulation - Rotholz/Inn, 1985



Abbildung D.9: Hydrologische Simulation - Hart i. Zillertal/Ziller, 1985



Abbildung D.10: Hydrologische Simulation - Brixlegg/Inn, 1985



Abbildung D.11: Hydrologische Simulation - Oberaudorf/Inn, 1985

Literaturverzeichnis

- BAFU (2017). Inn Martina 2067. https://www.hydrodaten.admin.ch/de/2067.html, abgerufen am 16. Mai 2017.
- Bardossy, A. und Plate, E. (1992). Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns. *Water Resourc. Res.*, 28(5):1247–1259, doi:10.1029/91WR02589.
- Bergström, S. (1995). The HBV Model. In Singh, V., Herausgeber, Computer Models of Watershed Hydrology, Kapitel 13, Seiten 443 – 476. Water Resources Publications.
- Blöschl, G., Reszler, C., und Komma, J. (2008). A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environ. Modell. Softw.*, 23(4):464 – 478. doi:10.1016/j.envsoft.2007.06.010.
- BMLFUW (2006). Hochwasser 2005 Ereignisdokumentation. Technischer bericht, Hydrographischer Dienst, https://www.bmlfuw.gv.at/dam/jcr: 2c213262-9b0e-40db-a73a-ab5e333c38ad/Bericht_Hochwasser_August2005.pdf, abgerufen am 21. September 2017.
- Brunner, G. (2016). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0. US Army Corps Of Engineers, Hydraulic Engineering Center (USACE-HEC), version 5.0. Auflage.
- Burton, A., Kilsby, C., Fowler, H., Cowpertwait, P., und O'Connell, P. (2008). RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system. *Environmental Modelling & Software*, 23(12):1356–1369.
- Chow, V. (1964). Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company, New York.
- de Saint-Venant, A. J. C. B. (1871). Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 73:147–154 and 237–240.
- Duan, Q., Sorooshian, S., und Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, 28(4):1015–1031.
- European Environmental Agency (2000). CORINE Land Cover 2000. http://www.eea.europa. int.
- Gattermayr, W. (2006). Innsbruck und das Hochwasser. Technischer bericht. https: //www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/wasserkreislauf/wasserstand/ downloads/Tafeln_Inn_lo.pdf.
- Grebner, D. (1995). Klimatologie und Regionalisierung starker Gebietsniederschläge in der nordalpinen Schweiz. Zürcher Geographische Schriften 59, ETH Zürich.
- HND Bayern (2017). Statistik Oberaudorf / Inn. http://www.hnd.bayern.de/pegel/inn/ oberaudorf-18000403/statistik?, abgerufen am 16. Mai 2017.

- Hundecha, Y. und Merz, B. (2012). Exploring the relationship between changes in climate and floods using a model-based analysis. *Water Resour. Res.*, 48:W04512, doi:10.1029/2011WR010527.
- Matalas, N. (1967). Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resour. Res.*, 3(4):937–945, doi:10.1029/WR003i004p00937.
- Menabde, M. und Sivapalan, M. (2000). Modeling of rainfall time series and extremes using bounded random cascades and levy-stable distributions. *Water Resour. Res.*, 36(11):3293–3300, doi:10.1029/2000WR900197.
- Nash, J. (1957). The form of the instantaneous Unit Hydrograph. In *Surface Water (vol. 3, Toronto General Assembly)*, Band 45 in *IAHS Publ.*, Seiten 114–121. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Nester, T., Kirnbauer, R., Gutknecht, D., und Blöschl, G. (2011). Climate and catchment controls on the performance of regional flood simulations. J. Hydrol., 402(3-4):340–356. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.028.
- Parajka, J., Merz, R., und Blöschl, G. (2003). Estimation of daily potential evapotranspiration for regional water balance modeling in Austria. In 11th International Poster Day and Institute of Hydrology Open Day "Transport of Water, Chemicals and Energy in the Soil Crop Canopy Atmosphere System", Slovak Academy of Sciences, Bratislava, 299-306.
- Posch-Trözmüller, G., Lipiarska, I., Lipiarski, P., und Pirkl, H. (2016). AlpRetInn Auswirkung alpiner Retention auf die Hochwasserabflüsse des Inn: Adaptierung und Ergänzung der Lockergesteinskarte und erweiterte Interpretation zur Darstellung untergrundsabhängiger Abflusstypen in ausgewählten Einzugsgebieten Tirols. Technischer bericht, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Reszler, C., Komma, J., Blöschl, G., und Gutknecht, D. (2005). Ein Ansatz zur Idenfikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(5):220–232.
- Richardson, C. W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour. Res.*, 17(1):182–190, doi:10.1029/WR017i001p00182.
- Rogger, M., Agnoletti, M., Alaoui, A., Bathurst., J., Bodner, G., Borga, M., Chaplot, V., Gallart, F., Glatzel, G., Hall, J., Holden, J., Holko, L., Horn, R., Kiss, A., Kohnova, S., Leitinger, G., Lennartz, B., Parajka, J., Perdigão, R., Peth, S., Plavcová, L., Quinton, J., Robinson, M., Salinas, J., Santoro, A., Szolgay, J., Tron, S., van den Akker, J., Viglione, A., und Blöschl, G. (2017). Land-use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resour. Res.*, 53:5209–5219. doi:10.1002/2017WR020723.
- Rogger, M., Kohl, B., Pirkl, H., Hofer, M., Kirnbauer, R., Merz, R., Komma, J., Viglione, A., und Blöschl, G. (2011). HOWATI - HochWasser Tirol - Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 63(7-8):153–161.
- Rogger, M., Pirkl, H., Viglione, A., Komma, J., Kohl, B., Kirnbauer, R., Merz, R., und Blöschl, G. (2012). Step changes in the flood frequency curve: Process controls. *Water Resour. Res.*, 48:doi:10.1029/2011WR011187.
- Seger, M. (2001). Rauminformationssystem Österreich ein digitaler thematischer Datensatz des Staatsgebietes. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation Nr. 89.

- Szolgay, J. (2004). Multilinear flood routing using variable travel-time discharge relationships on the Hron River. *J. Hydro. Hydromech.*, 52(4):303–316.
- Viglione, A., Castellarin, A., Rogger, M., Merz, R., und Blöschl, G. (2012). Extreme rainstorms: Comparing regional envelope curves to stochastically generated events. *Water Resour. Res.*, 48:doi:10.1029/2011WR010515.