

Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences Vienna

Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt (WAU)

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und
konstruktiven Wasserbau (IWHW)



Masterarbeit

Potentielle klimawandelbedingte Änderungen von Hochwasser- extremwerten im Einzugsgebiet der Raab

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Eingereicht von

Buttinger Florian, BSc

Betreuer: Univ.Prof. Dipl.Geoökol. Dr.rer.nat. Karsten Schulz

Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Mathew Herrnegger,

Dipl.-Ing. Johannes Wesemann

Wien, Oktober 2018

Eidesstaatliche Erklärung zur Masterarbeit

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher noch nicht im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht.

Wien, Oktober 2018

.....

<Name>

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während des Studiums unterstützt haben.

Ein großer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.Geoökol. Dr.rer.nat. Karsten Schulz für die Möglichkeit die vorliegende Masterarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau verfassen zu können, sowie für die freundliche und kompetente Betreuung während des gesamten Studiums.

Bei meinen beiden Mitbetreuern Herrn Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Mathew Herrnegger und Dipl.-Ing. Johannes Wesemann möchte ich mich herzlich für die angenehme, unkomplizierte und kompetente Betreuung während der Erstellung der Masterarbeit bedanken. Ohne deren Fachwissen und ihrer Unterstützung wäre diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Ebenso möchte ich mich bei ihnen bedanken, dass sie mir die Möglichkeit gaben meine Arbeit am Österreichischen Klimatag 2018 in Salzburg vorstellen zu dürfen.

Bei meinen Freunden, welche mich in den Jahren während meines Studiums unterstützt haben. Bei ihnen konnte ich in den ruhigen Momenten im Studium meine Energiereserven wieder auffüllen.

Ein großer Dank gilt auch Eva, die mir in schwierigen Zeiten im Studium immer Mut zugesprochen hat und mich nach Rückschlägen stets neu motiviert hat.

Meinen Eltern Josef und Maria gebührt der größte Dank. Sie haben mich auf meinem gesamten Lebensweg immer bedingungslos unterstützt.

Danke!

Zusammenfassung

Die Anwendung von pauschalen Klimawandelzuschlägen für die Anpassung von Hochwasserextremwerten ist in Europa relativ weit verbreitet. In Bayern werden beispielsweise Bemessungsabflüsse bis zum HQ_{100} pauschal mit einem Klimawandelzuschlag von 15% erhöht.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, mögliche klimawandelbedingte Änderungen der Hochwassercharakteristik für das Einzugsgebiet der Raab zu ermitteln, um nicht auf pauschale Klimawandelzuschläge angewiesen zu sein. Diese Trends sollen anschließend bei der Berechnung des zukünftigen Hochwasserrisikos im Rahmen des ACRP-finanzierten Projektes „RegioFlood“ zur Anwendung kommen.

Die Simulationen werden anhand des kontinuierlichen, konzeptionellen Niederschlags-Abflussmodells COSERO durchgeführt, welches für das Einzugsgebiet der Raab (ca. 1000 km²) aufgesetzt wurde. Das Gebiet wurde auf Basis von bestehenden Durchflussmessstationen, deren Daten für die Modellkalibrierung herangezogen werden, in neun Teilgebiete eingeteilt. Als Zielfunktion für die automatische Parameteroptimierung, die auf Basis des SPARTACUS-Datensatzes für die Periode 1963 – 2000 erfolgt, wird eine Kombination aus Kling-Gupta-Efficiency (KGE) und dem Kriterium „Peak-Difference“ (PDIFF) verwendet. Der KGE gewährleistet eine allgemein gute Simulation des hydrologischen Regimes und das PDIFF-Kriterium gewichtet in der Kalibrierung zusätzlich die Hochwasserspitzen, die im Rahmen dieser Arbeit besonders im Fokus stehen. Das kalibrierte hydrologische Modell wird in einem weiteren Schritt mit Daten von 11 unterschiedlichen regionalen Klimamodellen (RCMs) angetrieben. Neben den historischen Durchflussbeobachtungen stehen für die Vergangenheit die Simulationen des hydrologischen Modells auf Basis des SPARTACUS-Datensatzes (1961-2016) und der 11 RCMs (1971-2000) zur Verfügung. Für die Hochwasserstatistik werden drei Zeitperioden untersucht: historisch 1961/1971-2000, nahe Zukunft 2021-2050 (RCP4.5 / 8.5) und ferne Zukunft 2071-2100 (RCP4.5 / 8.5).

Die Ergebnisse aus dem relativen Vergleich der Hochwasserextremwerte weisen eine hohe Streuung in den verschiedenen Perioden auf. Diese Streuungen resultieren aus den Unsicherheiten aus der Klimamodellierung, aus der hydrologischen Modellierung sowie aus der Berechnung der Hochwasserstatistik. Aufgrund dieser unterschiedlichen Ergebnisse der einzelnen Klimamodelle ist es nicht möglich, einen zuverlässigen Klimawandelzuschlag für das Einzugsgebiet der Raab zu bestimmen.

Abstract

The application of a general climate change surcharges for the adaptation of flood extremes is relatively widespread in Europe. For example, in Bavaria, the design outflows of a HQ_{100} -event are increased by a factor of 15%.

The main objective of this thesis is to identify possible changes, induced by climate change, in the flood pattern for the Raab catchment in order not to rely on a global climate change surcharges. These trends will further then be applied in the calculation of the future flood risk in the framework of the ACRP-funded project "RegioFlood".

The simulations are based on the semi-continuous, conceptual rainfall-runoff model COSERO, which was set up for the catchment area of the Raab (approx. 1000 km²). The area was divided into nine subsections based on existing flowmeters whose data are used for the model calibration and validation. As an objective function for the automatic parameter optimization, which is based on the SPARTACUS data set for the period 1963 - 2000, a combination of Kling-Gupta-Efficiency (KGE) and the criterion "Peak-Difference" (PDIFF) is used. The KGE ensures a generally good simulation of the hydrological regime and the PDIFF criterion puts an additionally emphasis on the simulation behaviour of the peak discharge, for the thesis the peak discharges are an important key element for further calculations. The calibrated hydrological model is driven in a further step with data from eleven different regional climate models (RCMs). In addition to historical flow observations, simulations of the hydrological model based on the SPARTACUS dataset (1961-2016) and the 11 RCMs (1971-2000) are available for the past. For the flood statistics, three time periods are studied: historically 1961 / 1971-2000, near future 2021-2050 (RCP 4.5 / 8.5) and distant future 2071-2100 (RCP 4.5 / 8.5).

The results of the relative comparison of the flood extreme values show a high variability in the different periods. These variations result from the uncertainties of climate modelling, from hydrological modelling and from the calculation of flood statistics. Due to these different results of the individual climate models, it is not possible to determine a reliable climate change surcharge for the catchment area of the Raab.

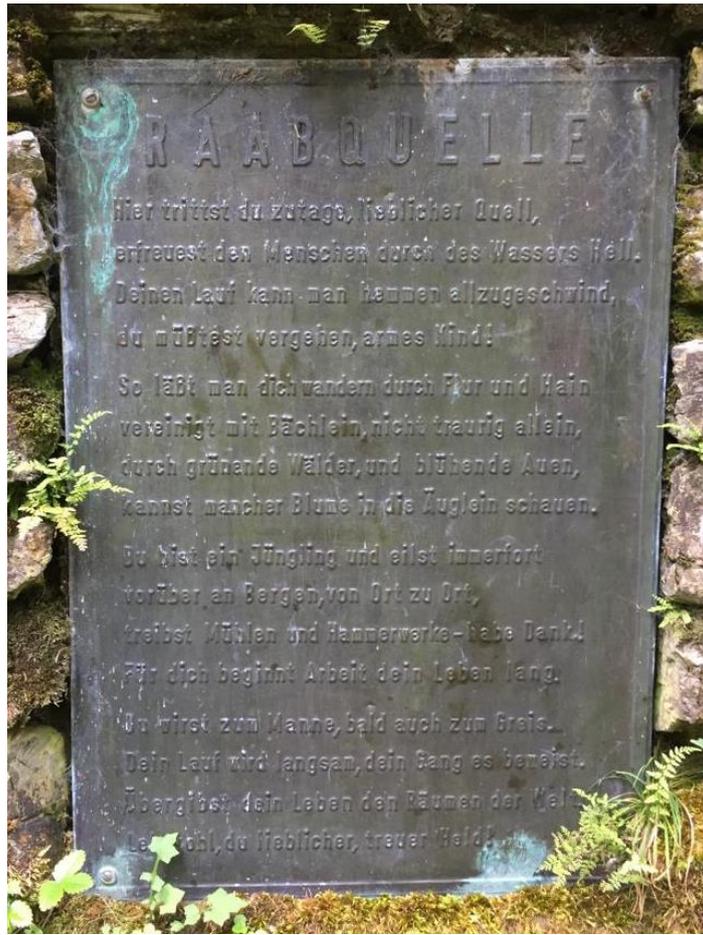


Abbildung 0-1: Hinweistafel Raabquelle

*Hier trittst du zutage, lieblicher Quell,
erfreuest den Menschen durch des Wassers Hell.
Deinem Lauf kann man hemmen allzugeschwind,
du müßtdest vergehen, armes Kind!*

*So läßt man dich wandern durch Flur und Hain
vereinigt mit Bächlein, nicht traurig allein,
durch grünenden Wälder, und blühenden Auen,
kannst mancher Blume in die Äuglein schauen.*

*Du bist ein Jüngling und eilst immerfort
vorüber an Bergen, von Ort zu Ort,
treibst Mühlen und Hammerwerke – hab Dank!
Für dich beginnt Arbeit dein Leben lang.*

*Du wirst zum Manne, bald auch zum Greis.
Dein Lauf wird langsam, dein Gang es beweist.
Übergibst dein Leben den Räumen der Welt.
Lebe wohl, du lieblicher, treuer Held!*

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Gebietsbeschreibung.....	6
2.1	Beschreibung der Wasserbilanz	6
2.2	Verteilung der Landnutzung.....	7
2.3	Verteilung der Bodentypen	7
2.4	Verteilung der Geologie	8
2.5	Räumliche Verteilung im Untersuchungsgebiet.....	8
3	Datengrundlagen.....	10
3.1	Geländemodell DHM	10
3.2	Daten Durchflusspegel	10
3.3	Meteorologische Daten.....	11
4	Methodik	14
4.1	Einleitung Modellierung Niederschlags Abflussmodellierung	14
4.1.1	Empirische Modelle „Blackbox“ Modelle	14
4.1.2	Konzeptionelle Modelle „Greybox“ Modelle	15
4.1.3	Physikalische Modelle „White box“ Modelle	15
4.2	COntinuous SEmidistributed RunOff Model (COSERO)	16
4.2.1	Räumliche Diskretisierung.....	17
4.2.2	Modellkonzept.....	17
4.3	Kalibrierung und Validierung.....	20
4.4	Klimamodelle.....	23
4.5	Beschreibung Hochwasserstatistik.....	30
4.5.1	Berechnung der Hochwasserabschätzung	30
4.5.2	Auswahl der Extremwerte	33
4.5.3	Auswahl der Verteilungsfunktion	34
4.5.4	Parameterschätzmethode	36
4.5.5	Konfidenzintervall.....	38

5	Anwendung des hydrologischen Modells	40
5.1	Räumliche Diskretisierung des Untersuchungsgebietes	40
5.2	Parameterschätzung.....	43
5.3	Kalibrierung und Validierung.....	44
6	Ergebnisse.....	46
6.1	Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells für die Vergangenheit.....	46
6.2	Hochwasserextremwerte für die Vergangenheit.....	55
6.3	Ergebnisse Hochwasserextremwerte.....	59
6.3.1	Auswertung für das Wiederkehrintervall von 30 Jahren	60
6.3.2	Auswertung für das Wiederkehrintervall von 100 Jahren	64
6.3.3	Auswertung für das Wiederkehrintervall von 300 Jahren	67
6.3.4	Änderungen der Hochwasserextremwerte im Vergleich zur Gegenwart	70
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	74
8	Literaturverzeichnis.....	77
9	Abbildungsverzeichnis.....	82
10	Tabellenverzeichnis	86
A	Anhang.....	89
A.1	COSERO Modellparameter	89
A.2	Ganglinien Kalibrierungsperiode.....	92
A.3	Ganglinien Validierungsperiode	97

1 Einleitung und Zielsetzung

Immer wieder liest man in verschiedenen Medienformaten von schwerwiegenden Naturkatastrophen. Seien es Murenabgänge, die ganze Dörfer unter sich begraben, Dürreperioden, welche die Ernte vernichten oder Starkniederschläge, die Bäche zu reißerischen Flüssen anschwellen lassen und deren zerstörerische Kräfte freilassen. Für viele ist klar, dass solche Ereignisse das Resultat des Klimawandels sind, doch ist diese Annahme auch berechtigt? In der vorliegenden Arbeit soll diese Fragestellung für das Einzugsgebiet der Raab genauer beleuchtet werden. Dabei werden mögliche zukünftige Entwicklungen der Hochwasserextremwerte untersucht. Anhand von Klimamodellen können mögliche Klimaentwicklungen berechnet und auf das Untersuchungsgebiet angewendet werden.

In dem letztveröffentlichten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurden die derzeitigen Erkenntnisse in Bezug auf Klimawandel auf globaler Betrachtungsebene zusammengefasst. Anhand dieser Informationen wurden mögliche Klimaentwicklungen für die Erde vorgestellt (IPCC, 2013). Das Austrian Panel on Climate Change (APCC) ist ähnlich zu dem IPCC, es dokumentiert die derzeitigen Erkenntnisse der Klimawandelforschung für Österreich und veröffentlichte ebenfalls einen umfassenden Sachstandsbericht, in dem die Auswirkungen und zukünftige Veränderungen des Klimas für Österreich beschrieben werden (APCC, 2014). In Abbildung 1-1 werden die Auswirkungen des Klimawandels anhand der Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur (global und österreichweit) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur im 20. Jahrhundert stark steigt, was einen erhöhten Energieeintrag bewirkt und einen großen Einfluss auf den Wasserkreislauf haben kann.

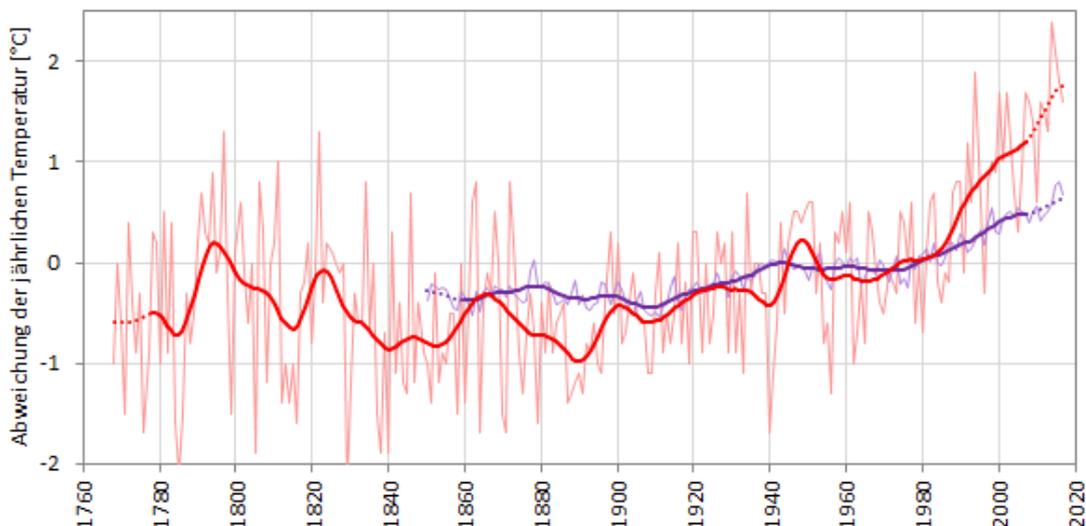


Abbildung 1-1: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur weltweit 1850–2017 (violett) und in Österreich 1767–2017 (rot) (Auer et al., 2007; Morice et al., 2012). Dargestellt sind jährliche Abweichungen vom Mittel der Jahre 1961–1990 (dünne Linien) und deren geglättete Trends (dicke Linien)

Mit dem Forschungsprojekt HISTALP, welches auch Bestandteil des APCC Sachstandsbericht ist, wurde für Österreich und den gesamten Alpenraum eine qualitativ hochwertige Klimadatenbasis angelegt. Die Grundlage dieser Datenbank sind langjährige Messbeobachtungen (längste stationäre Aufzeichnung, Kremsmünster ab 1760), die durch verschiedene Methoden homogenisiert, ausreißerkorrigiert und mit einer ausreichend hohen räumlichen Auflösung bereitgestellt werden (Auer et al., 2007). Mit den HISTALP-Daten konnten bereits einige klimarelevante Erkenntnisse für Österreich gewonnen werden. In einer Studie von BMLFUW (2011) wurde für die Temperaturentwicklung im Alpenraum festgestellt, dass sich die Temperatur seit dem 19. Jahrhundert um $+2^{\circ}\text{C}$ erhöht hat. Im Gegensatz dazu die globale Erwärmung, welche um $+1^{\circ}\text{C}$ stieg (Solomon et al., 2007) (siehe Abbildung 1-1). Weiters konnte für den Klimaparameter Niederschlag festgestellt werden, dass sich für die nordwestlichen und südöstlichen Regionen von Österreich gegenläufige Entwicklungen zeigen, im NW ist eine Erhöhung der Jahressummen des Niederschlages zu erkennen, hingegen im SO eine Verringerung der Niederschlagssummen (BMLFUW, 2011a). Für die Zukunft (Zeithorizont 2021-2050) geht aus der Studie des BMLFUW (2011) hervor, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit die Niederschläge im Norden steigen und im Süden abnehmen werden.

Mit diesen möglichen Änderungen im Klima müssen sich die Prozessabläufe, die im Wasserkreislauf stattfinden, auf die neuen Verhältnisse einstellen, was zur Folge haben kann, dass sich derzeitige Abflusscharakteristika von Fließgewässern ebenfalls auf die neuen Gegebenheiten einstellen müssen. Für den Menschen kann dies zu neuen wasserwirtschaftlichen Herausforderungen führen. Eine mögliche Veränderung des Abflussverhaltens kann Auswirkungen auf die Schutzwirkung von Wasserschutzbauten oder auf die gesamte Raumplanung bzw. Raumnutzung haben. Durch derzeitige Untersuchungen kann ein klimawandelbedingter Einfluss auf die Hochwasserextremwerte von Fließgewässern nicht ausgeschlossen werden (APCC, 2014). Mögliche Änderungen der Hochwasserbemessungswerte können das Risiko eines Hochwasserereignis für bestehende sowie für zukünftige geplante Hochwasserschutzmaßnahmen dramatisch erhöhen. Um diesem Verhalten entgegen zu wirken, wird in einigen Staaten der Ansatz eines Klimaanpassungsfaktors angewendet. In der Arbeit von Madsen et al. (2014) werden verschiedene Ansätze eines pauschalen Anpassungsfaktors für Niederschlags- und Hochwasserextremwerte, welche in europäischen Staaten Verwendung finden, angeführt. In Tabelle 1-1 sind verschiedene Anpassungsstrategien, welche bereits angewendet werden, aufgelistet.

Tabelle 1-1: Zusammenfassung von bereits bestehenden Rechtsnormen für Klimaanpassungsfaktoren für Bemessungshochwässer und Bemessungsniederschläge in verschiedenen Ländern (Madsen et al., 2014)

Land	Region	Variable	Anpassungsfaktor der Richtlinie
Belgien	Flanders	Hochwasser	Um 30% erhöht
Belgien	National	Niederschlag	Um 30% erhöht
Dänemark	National	Niederschlag	Um 20%, 30% bzw. 40% erhöht
Deutschland	Bayern	Hochwasser HQ ₁₀₀	Um 15% erhöht
Deutschland	Baden-Württemberg	Hochwasser	0% - 75% erhöht, je nach Lage und Wiederkehrintervall
Norwegen	National	Niederschlag	0%, 20% und 40% je nach Region und Einzugsgebietsgröße
Schweden	National	Niederschlag	5% - 30% Erhöht je nach Lage
Vereinigtes Königreich	National	Hochwasser	Um 20% erhöht bis 2085
Vereinigtes Königreich	National	Niederschlag	10%, 20% und 30% für 2055, 2085 und 2115 erhöht

Für die Erstellung eines Klimaanpassungsfaktors werden Informationen über das Klima der Zukunft benötigt. Anhand von komplexen Modellen wird versucht, das Klimageschehen auf der Erde zu simulieren. Dabei werden Prozesse, welche in der Atmosphäre, in den Ozeanen, in der Kryosphäre und auf der Landoberfläche stattfinden, anhand von mathematisch-physikalischen Beziehung nachgebildet. Berechnungen dieser Art sind von hoher Komplexität und benötigen eine große Rechenleistung, welche der limitierende Faktor für die räumliche und zeitliche Auflösung ist. Die Anwendung von passenden Skalierungsverfahren kann hierbei eine oftmals höher benötigte Auflösung von Teilgebieten ermöglichen (APCC, 2014). Durch Festlegung von Randbedingungen, die durch verschiedene demografische, soziale, ökonomische, technologische und ökologische Entwicklungsszenarien ein mögliches zukünftiges Emissionsszenario für das Klima darstellen, ist es Klimamodellen möglich, Klimaprojektionen für die Zukunft zu berechnen (BMLFUW, 2011a; ZAMG, 2018a). Für den 5. IPCC Sachstandsbericht wurden als Emissionsszenario die neu entwickelten Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) (Van Vuuren et al., 2011) verwendet.

Die RCPs beschreiben eine mögliche Entwicklung des Klimas bis zum Jahre 2100. Je nach Zusammenspiel der Randbedingungen entstehen verschiedene Szenarien, die den Strahlungsantrieb in der Atmosphäre beeinflussen. RCP 4.5 stellt dabei eine Erhöhung des Strahlungsantriebs auf 4,5 W/m², verglichen zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts. Für RCP 8.5 stellt sich der Strahlungsantrieb auf 8,5 W/m² ein. Das RCP 4.5-Szenario stellt eine Stabilisierung des Klimas dar. RCP 8.5 bildet hingegen ein Szenario ab, welches von einer Erhöhung der Treibhausgaskonzentration ausgeht. Die erwähnten Faktoren zur Erstellung der Randbedingungen sind schwer für die Zukunft abzuschätzen

und haben ebenfalls einen starken Einfluss auf mögliche Unsicherheiten in den Klimamodellen. Die Szenarien sind jedoch allgemein anerkannt (IPCC, 2013).

Die Ergebnisse aus den Klimamodellen sind mit Unsicherheiten behaftet, welche sich aus Unsicherheiten der Emissionsszenarien und den Modellierungsmethoden zusammensetzen. Bei den Emissionsszenarien ist die Entwicklung der Treibhausgas- und Aerosolkonzentration nicht vorhersagbar und stützt sich lediglich auf Annahmen. Bei der Modellierung entstehen die Unsicherheiten durch die grobe räumliche Auflösung der Rechengitter, durch Anwendung von Parametrisierungen, durch Wechselwirkungen- und Rückkopplungseffekte, die unzureichend erfasst werden (APCC, 2014). Mit den für zukünftige Klimaentwicklungen generierten Zeitreihen für Niederschlag und Temperatur können diese Zeitreihen in einem weiteren Schritt als Eingangsgrößen für Niederschlags-Abfluss Modelle verwendet werden, um ein mögliches zukünftiges Abflussverhalten für ein Einzugsgebiet zu simulieren.

Die erzeugten Abflussganglinien aus den Klimaprojektionen bilden die Grundlage für die Berechnung von Hochwassererwartungswerten für die Zukunft. Der abschließende Vergleich der Erwartungswerte für die Zukunftsperioden mit den Erwartungswerten aus den beobachteten Abflussdaten soll es ermöglichen, einen möglichen Trend der Hochwassersituation für die Zukunft feststellen zu können und anhand der relativen Änderung zwischen Zukunftsszenario und Beobachtung einen möglichen Klimaanpassungsfaktor zu bestimmen (Madsen et al., 2014).

Die Berechnung von Hochwasserschätzwerten mit einem bestimmten Wiederkehrintervall basiert dabei auf einem statistischen Verfahren, welches durch seinen methodischen Aufbau weitere Unsicherheitsfaktoren mit sich bringt. In der Arbeit von Schulz und Bernhardt (2016) wurde untersucht, wie sich die gewählte Zeitreihenlänge auf das Ergebnis der Extremwertanalyse auswirkt. Über eine künstliche Ganglinie von 2000 Jahren wurden unterschiedliche Zeitreihenlängen zur Berechnung von Hochwasserereignissen mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren verwendet. Trotz der Kenntnis über die statistischen Eigenschaften der verwendeten Verteilungsfunktion waren bei den Ergebnissen große Schwankungen erkennbar, welche auf die Unsicherheiten der methodischen Durchführung der Extremwertstatistik zurückzuführen sind.

Anhand dieser gesetzten Rahmenbedingungen wird für diese Arbeit folgende Forschungsfrage definiert:

„Ist es möglich, einen zuverlässigen Klimaänderungsanpassungsfaktor für die Hochwasserextremwerte des Einzugsgebietes der Raab zu erstellen?“

Zur Beantwortung dieser Fragestellung bedarf es mehrerer Arbeitsschritte bzw. Teilziele. Diese werden wie folgt definiert:

- Erstellung der Modelltopologie für das gewählte Niederschlags-Abfluss-Modell unter Verwendung der Gebietskenngrößen des Einzugsgebietes der Raab
- Definieren des Grundparameterfeldes für das Niederschlags-Abfluss-Modell
- Modellkalibrierung und -validierung basierend auf beobachteten Durchflüssen unter der Verwendung einer Zielfunktion
- Analyse der Modellierungsergebnisse durch Vergleich der langjährigen monatlichen Mittelabflusshöhen, berechnet aus den Beobachtungen und Simulationsläufen
- Bestätigtes Modell mit den Zeitreihen für Niederschlag und Temperatur, aus den Klimaprojektionen antreiben
- Simulierte Tagesmittelabflüsse aus den Klimaprojektionen auf deren Hochwasserextremwerte untersuchen
- Vergleich der Hochwasserextremwerte aus den verschiedenen Projektionen, auch mit Werten aus der Vergangenheit

Die Resultate aus dem Vergleich der Hochwasserextremwerte sollen es ermöglichen, eine objektive Abschätzung eines Klimaänderungsanpassungsfaktors für die Raab zu ermitteln.

Nach dieser Einführung in das Thema folgt in den weiteren Kapiteln eine kurze Beschreibung für die verwendeten Datensätze und Methoden. Die vorliegende Arbeit ist dabei folgendermaßen strukturiert.

In Kapitel 2 wird das Einzugsgebiet der Raab beschrieben. Dabei werden die räumliche Verteilung der Landnutzung, der Bodentypen und der Geologie angeführt, ebenfalls wird die Wasserbilanz für das Gebiet beschrieben. Kapitel 3 widmet sich der Datengrundlage und gibt jeweils eine Beschreibung der einzelnen Größen. Die verwendeten Methoden, die zur Umsetzung der Arbeit verwendet wurden, werden in Kapitel 4 beschrieben. Die Anwendung von COSERO auf das Untersuchungsgebiet kann aus Kapitel 5 entnommen werden. Die wichtigen Zwischenergebnisse und abschließenden Resultate aus der Untersuchung werden in Kapitel 6 präsentiert. Kapitel 7 fasst die durchgeführten Arbeitsschritte zusammen und leitet daraus eine Schlussfolgerung für das Untersuchungsgebiet ab.

2 Gebietsbeschreibung

Die Raab ist ein rechtsufriger Zubringer der Donau und hat eine Gesamtlänge von ca. 250 km. Der Raabursprung befindet sich am Fuße des Ossers auf einer Seehöhe von 1087 m ü. Adria. Das Quellgebiet der Raab ist durch kristalline Mittelgebirgsstrukturen zu charakterisieren. In der ungarischen Stadt Győr mündet die Raab in die Donau (Ruzicka et al., 2009). In dieser Arbeit wird der Abschnitt der Raab, welcher sich in Österreich befindet, untersucht. Das Einzugsgebiet liegt südöstlich in Österreich, der Großteil liegt dabei in der Steiermark und ein kleiner Teil befindet sich im Burgenland. Der Pegel Neumarkt an der Raab bildet die Begrenzung des Einzugsgebietes, somit ergeben sich für das untersuchte Einzugsgebiet der Raab eine Gesamtfläche von 989 km². In Abbildung 2-1 sind die Lage und die räumliche Ausdehnung des Raabeinzugsgebietes dargestellt. Neumarkt an der Raab ist der tiefste Punkt im Einzugsgebiet und weist eine Seehöhe von 240 m ü. Adria auf. Eine genaue Erläuterung betreffend der Landnutzung, der Bodentypverteilung und der Hydrogeologie ist in Kapitel 5 zu finden.

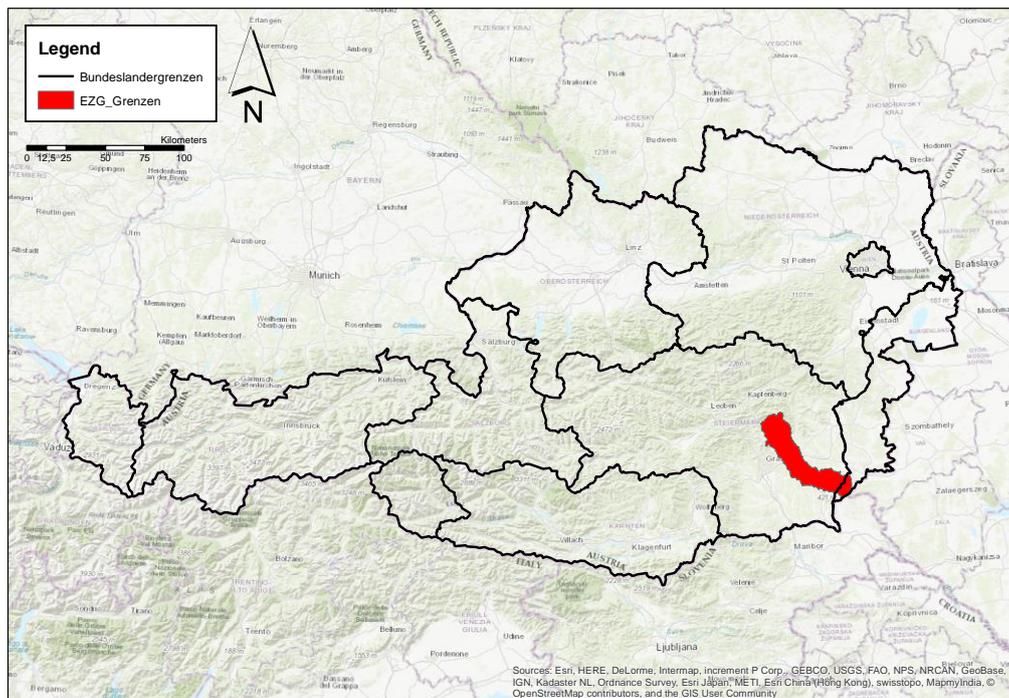


Abbildung 2-1: Lage des Einzugsgebietes der Raab in Österreich

2.1 Beschreibung der Wasserbilanz

Die Wasserbilanz für das Einzugsgebiet der Raab ist aus dem digitalen hydrologischen Atlas Österreichs (digHAÖ) entnommen und ist in Tabelle 2-1 angeführt. Der Berechnungszeitraum der Komponenten ist dabei von 1961 bis 1990. Für diese Periode ergibt sich dabei ein mittlerer Gebietsniederschlag von 837 mm pro Jahr. Die aktuelle Verdunstung für das Gebiet ergibt einen Wert von 602 mm. Die Differenz der beiden ergibt eine gemittelte Abflusshöhe von 234 mm. Die Verdunstung im Einzugsgebiet ist sehr hoch, über 71 % des Niederschlages verdunsten. Dies führt dazu, dass bei der Modellierung des

Niederschlag Abfluss-Modelles (N/A-Modell) die Verdunstungsprozesse besonders berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 2-1: Wasserbilanzkomponenten für die Raab aus BMLFUW (2005)

Komponente	Wert
Gebietsniederschlag [mm]	837
akt. Gebietsverdunstung [mm]	602
pot. Gebietsverdunstung [mm]	627
mittlere Abflusshöhe [mm]	234

2.2 Verteilung der Landnutzung

Zur Bestimmung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet wurde der Datensatz CORINE 2012 (Heymann, 1994) herangezogen. Die genaue Verteilung der einzelnen Landnutzungsklassen ist in Tabelle 2-2 dargestellt. Der Großteil des Gebiets ist als Waldfläche ausgewiesen (43,4 %), Ackerflächen bedecken ebenfalls große Teile (40,0 %) des Tieflandes. In höheren Lagen steigt der Anteil an Grünlandflächen (11,3 %).

Tabelle 2-2: Landnutzung im Einzugsgebiet Raab

Landnutzung	[km ²]	[%]
Ackerland	395	40,0
Bebaute Siedlungsflächen	51	5,1
Grünland	112	11,3
Laubwälder	159	16,1
Mischwälder	192	19,4
Nadelwälder	78	7,9
Vegetationsarme Flächen	1	0,1
Wasserflächen	1	0,1

2.3 Verteilung der Bodentypen

In Tabelle 2-3 ist die Verteilung der Bodentypen aufgelistet. Die angeführten Daten wurden ebenfalls aus dem digHAÖ entnommen. Braunerden und Pseudogleye Bodentypen sind am häufigsten im Raabeinzugsgebiet anzutreffen, wobei sich Braunerden in höheren Lagen befinden und Pseudogleye vermehrt in flacheren Lagen vorkommen. Neben den beiden Bodentypen sind noch kleinere Gebiete mit Gley (11,6 %), Rendsinen (7,7 %) und Auböden (4,8 %) vertreten.

Tabelle 2-3: Bodentypen im Einzugsgebiet der Raab

Bodenart	[km ²]	[%]
Auböden	47	4,8
Braunerden	358	36,2
Gley	114	11,6
Pseudogleye	393	39,7
Rendsinen	76	7,7

2.4 Verteilung der Geologie

Die Daten für die Verteilung der Hydrogeologie wurden ebenfalls aus dem digHAÖ entnommen. Der Großteil des Einzugsgebietes ist durch Mischformen (üw. T, Me, S, lokal Ki, Ko) geprägt, welche sich besonders in den tieferen Regionen konzentrieren. In den höheren Lagen, wo sich das Quellgebiet der Raab befindet, sind vermehrt Karbonatgesteine, Phyllit, Schiefer, Granit und Gneis Formationen zu finden. In Tabelle 2-4 ist eine genaue Aufteilung der einzelnen vorkommenden geologischen Gesteinstypen angeführt.

Tabelle 2-4: Hydrogeologie im Einzugsgebiet der Raab

Hydrogeologie	[km ²]	[%]
10 - üw. Phyllit u. Schiefer	97	9,82
11 - üw. Granit, Gneis, Schiefer	51	5,12
12 - Vulkanit	10	1,02
2 - üw. Kies und Sand, lokal	135	13,64
4 - üw. Karbonatgestein	95	9,58
7 - üw. T, Me, S, lokal Ki, K	602	60,82

2.5 Räumliche Verteilung im Untersuchungsgebiet

In Abbildung 2-2 ist die genaue Aufteilung der Teileinzugsgebiete sowie die Standorte der verwendeten Pegelmessstellen und der genaue Flussverlauf der Raab und ihrer Zubringer dargestellt. In dieser Abbildung ist ebenfalls die Verteilung der Höhenklassen abgebildet.

Die in Kapitel 2.2 bis 2.4 angeführte Verteilung Landnutzung, Bodentyp und Geologie werden in den Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-4 dargestellt und dienen als Basis zur Erstellung der Parametereinstellungen des N-A-Modelles.

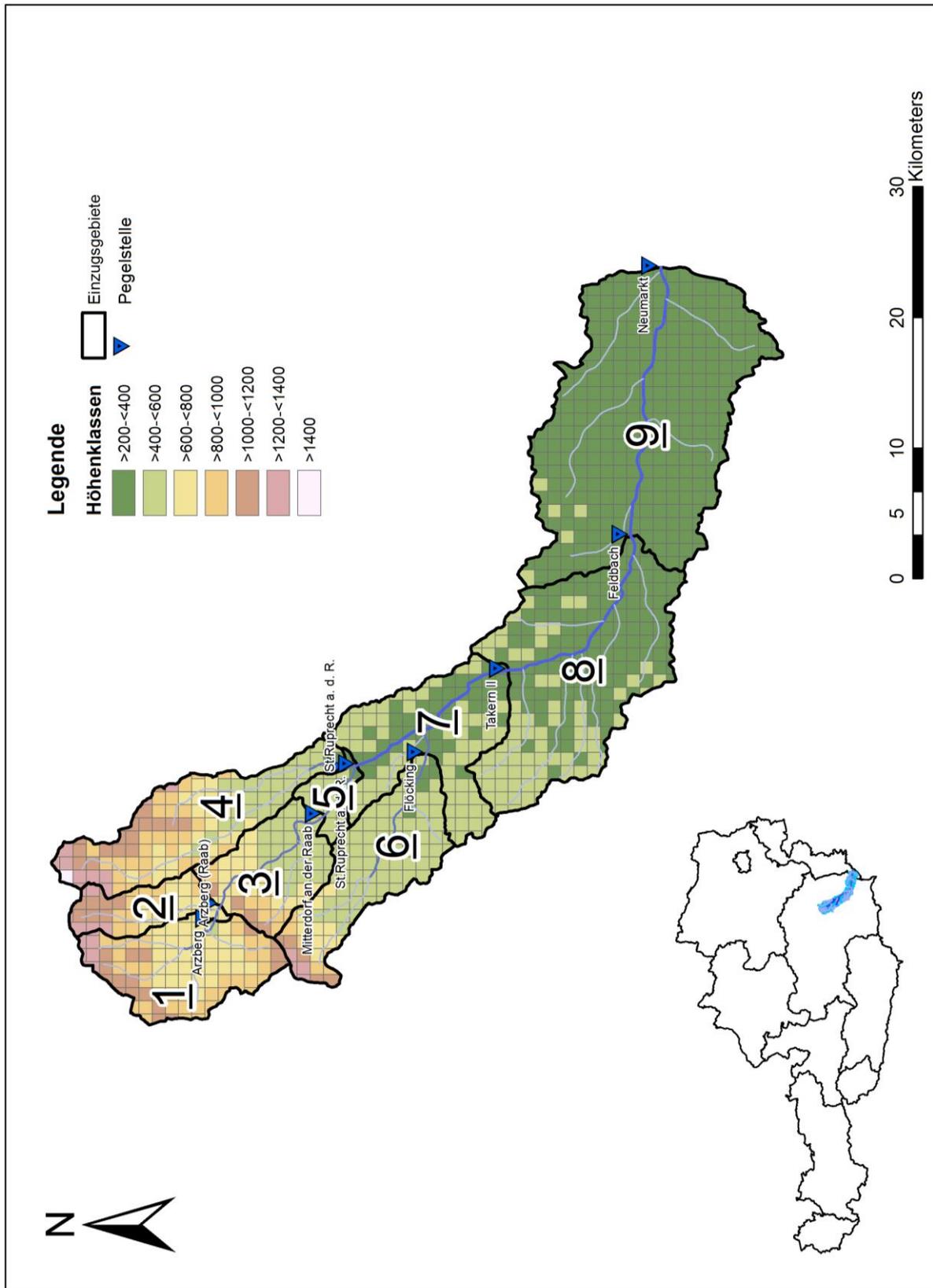


Abbildung 2-2: Einzugsgebietgliederung, Lage der Pegel und Höhenklassen des Einzugsgebietes Raab

3 Datengrundlagen

Zur Erstellung des hydrologischen Modells für das Einzugsgebiet der Raab und die damit verbundene Kalibrierung und Validierung werden folgende Eingangsdaten verwendet.

- Geländemodell
- Pegelmessdaten
- Niederschlag
- Temperatur
- Landnutzungskarten
- Bodenkarten
- Hydrogeologie Karten

Die genauen Erläuterungen der Landnutzungsverteilung, Bodenverteilung und der hydrogeologischen Verteilung sind in den Kapiteln 2.2, 2.3 und 2.4 beschrieben.

3.1 Geländemodell DHM

Die Informationen über die Topographie und das daraus resultierenden Fließgewässernetz werden aus einem digitalen Höhenmodell (DHM) mit einer räumlichen Auflösung von 75x75 m gewonnen. Das verwendete DHM stand am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau (IWHW) zur Verfügung.

3.2 Daten Durchflusspegel

Eine Auflistung der verwendeten Pegelmessdaten zur Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells ist in Tabelle 3-1 angeführt. Die Daten wurden vom BMLFUW (Aktualitätsstand: April 2017) in einer zeitlichen Auflösung von 24 Stunden (Tagesmittelwert) bereitgestellt. Die genaue Lage der Pegelmessstellen ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Die ältesten Messaufzeichnungen sind im Pegel „Feldbach“ festgehalten, mit einem Aufzeichnungsbeginn im Jahre 1951. Die Aufzeichnungen des Pegels „Takern II“ weisen für das gesamte Jahr 1972 eine Lücke auf. Das Kopfeinzugsgebiet Unterfladnitz weist in der Ganglinie der Tagesmittelabflüsse ein schwer zu interpretierendes Verhalten auf, teilweise bilden sich plateauartige Verläufe, lange zeitliche gleichbleibende Abflüsse oder sprunghafte extreme Abflüsse. Die restlichen Stationen haben eine kontinuierliche Messaufzeichnung, wie in der Tabelle beschrieben.

Tabelle 3-1: Verwendete Pegel

Gebiet	HZB-Nummer	Pegel	Kum. Fläche [km ²]	Periode
1	210955	Arzberg (Moderbach)	82,40	1972-2014
2	211698	Arzberg (Raab)	119,10	1982-2014
3	211599	Mitterdorf an der Raab	183,00	1980-2014
4	210963	Unterfladnitz	93,70	1966-2014
5	211706	St. Ruprecht a. d. R. (Raab)	300,80	1984-2014
6	211888	Flöcking	94,00	1991-2014
7	210971	Takern II	498,90	1968-2014
8	210989	Feldbach	689,40	1951-2014
9	210468	Neumarkt	986,50	1991-2014

3.3 Meteorologische Daten

Als Eingangsgrößen für die Kalibrierung des N-A-Modells werden Niederschlags- und Temperaturzeitreihen des SPARTACUS (Spatiotemporal Reanalysis Dataset for Climate in Austria) Datensatzes von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet. Der SPARTACUS Datensatz für Niederschlag (Hiebl und Frei, 2017) nimmt dabei die mittleren, monatlichen Niederschlagssummen, die täglichen Niederschlagssummen und Informationen aus der Topographie als Interpolationsgrundlage. Das dabei verwendete Netz an Messstationen beläuft sich auf 2614 Stationen, welche in Abbildung 3-1 dargestellt sind.

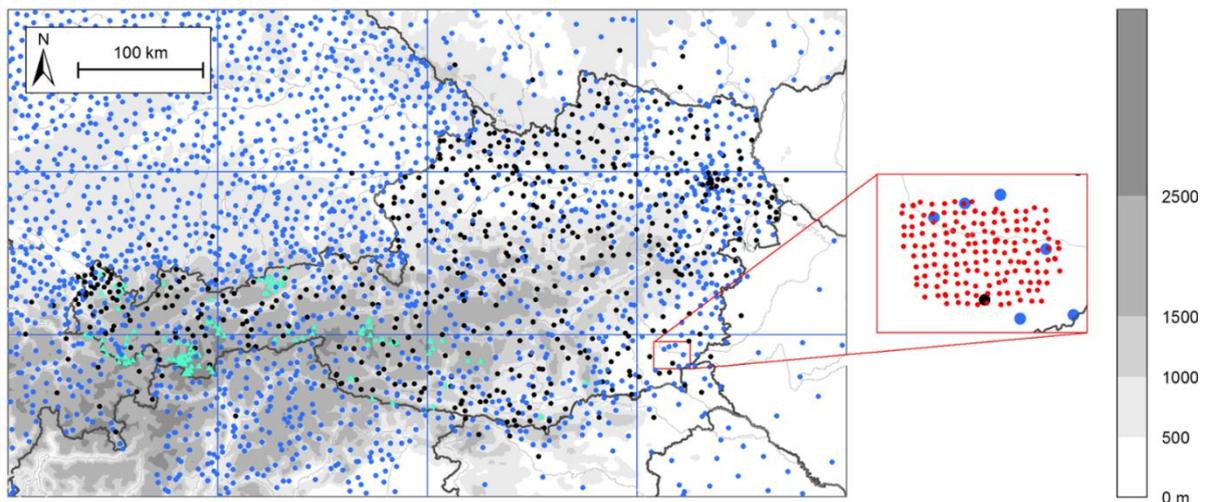


Abbildung 3-1: SPARTACUS-Messnetz für Niederschlag (Hiebl und Frei, 2017). Blaue und schwarze Punkte und türkise Dreiecke bilden dabei die Interpolationsgrundlage für die mittleren monatlichen Niederschlagssummen. Schwarze Punkte alleine werden als Interpolationsgrundlage für die täglichen Niederschlagssummen verwendet. Punktesymbole sind konventionelle Niederschlagsmessgeräte und Dreiecksymbole sind Totalisatoren. Rote Punkte bilden das Messnetz des Wegenernetzes, welches zur Evaluierung des SPARTACUS-Datensatz dient

Der SPARTACUS -Datensatz für die Temperatur verwendet als Interpolationsgrundlage den gemessenen Tagesminimum Wert, den gemessenen Tagesmaximum Wert und Informationen über die Lage der Messstation. Das Messnetz für die Temperaturbeobachtungen sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

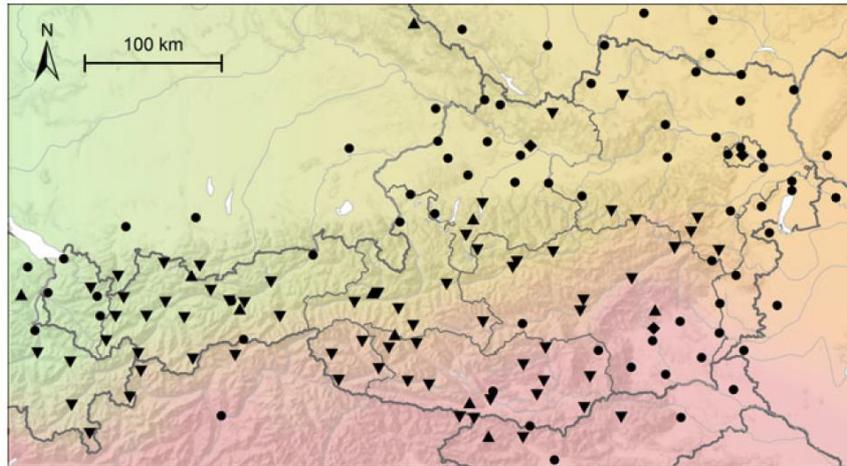


Abbildung 3-2.SPARTACUS-Messnetz für Temperatur (Hiebl und Frei, 2016). Nach unten gerichtete Dreiecke zeigen Stationen in Tallage an, nach oben gerichtete Dreiecke zeigen Stationen in hohen Lagen (Gipfel) an, Diamantsymbole zeigen Stationen in innerstädtischer Lage an. Punkte repräsentieren alle restlichen verwendeten Stationen.

Beide SPARTACUS Datensätze liefern dabei Informationen in einer räumlichen Auflösung von 1x1 km und in einer zeitlichen Auflösung von 24h. Für das hydrologische Modell der Raab standen Daten (Niederschlag und Temperatur) für den Zeitraum von Jänner 1961 bis Dezember 2016 zur Verfügung.

Zur Abbildung einer möglichen Entwicklung des Klimas werden ebenfalls meteorologische Daten für die Zukunft benötigt. Als Grundlage dienen der Datensatz aus der UnLoadC³ Studie (Schulz et al., 2017). Für diese Studie wurden für das Einzugsgebiet der Raab sowie der Schwechat mögliche Klimadaten generiert. In Summe handelt es sich dabei um elf verschiedene Klimamodell-Ensembles, welche in Tabelle 3-2 aufgelistet sind. Jedes einzelne Modell wurde mit zwei verschiedenen RCP (RCP 4.5 & RCP 8.5) Szenarien berechnet, des Weiteren sind die Modelle in drei zeitliche Perioden gegliedert, eine historische Periode 1971-2000, eine nahe Zukunft Periode 2021-2050 und eine ferne Zukunft Periode 2071-2100. In Summe ergeben sich 55 verschiedene Modellläufe, welche jeweils für eine zeitliche Periode von 30 Jahren Informationen über die mittlere Temperatur und den Niederschlag liefern. Der methodische Ablauf, wie ein regionales Klimamodell erzeugt wird, ist in Kapitel 4.4 beschrieben.

Tabelle 3-2: Verwendete regionale Klimamodelle aus Schulz et al. (2017). Dabei bedeutet EUR-11, dass die Daten aus dem EURO-CORDEX Projekt entstammen. Sie bilden einen Ausschnitt von Europa ab. CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, ICHEC-EC-EARTH, IPSL-IPSL-CM5A-MR, MOHC - HadGEM2-ES und MPI-M-MPI-ESM-LR sind Bezeichnungen für die verwendeten Antriebsmodelle (e.g. globale Zirkulationsmodelle). CLMcom-CCLM4-8-17, SMHI-RCA4, KNMI-RACMO22E, DMI-HIRHAM5 und IPSL-INERIS-WRF331F sind Abkürzungen für das jeweilige RCM und beinhalten ebenfalls den jeweiligen Institutionsnamen.

Modelle
EUR-11_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
EUR-11_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_*_SMHI-RCA4
EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
EUR-11_IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
EUR-11_IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
EUR-11_MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
EUR-11_MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
EUR-11_MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17

Die angeführten Modelle wurden neben der Bias-Korrektur zusätzlich auf eine feinere räumliche Auflösung skaliert, ausgehend von den 12,5x12,5 km des EURO-CORDEX auf eine Auflösung von 1x1 km. Die zeitliche Auflösung der Daten beträgt 24h.

4 Methodik

In den folgenden Kapiteln werden die verwendeten Methoden vorgestellt. Dabei werden Niederschlags-Abfluss Modelle (N-A-Modelle) allgemein (Kapitel 4.1) und im speziellen COSERO (Kapitel 4.2) beschrieben. In Kapitel 4.3 wird der methodische Vorgang der Kalibrierung und Validierung erläutert. Das nachfolgende Kapitel 4.4 befasst sich mit dem Aufbau von Klimamodellen. Abschließend erfolgt in Kapitel 4.5 eine Beschreibung der Extremwertstatistik zur Ermittlung der Hochwasserabschätzung.

4.1 Einleitung Modellierung Niederschlags Abflussmodellierung

Modelle im Allgemeinen dienen dazu, die Realität nachzubilden, um neue Erkenntnisse aus den damit durchgeführten Untersuchungen zu gewinnen oder um bereits dokumentierte Ereignisse zu reproduzieren und daraus neue Zusammenhänge zu erkennen (Haußer und Luchko, 2011). Grundlegend besitzt jedes Modell eine Eingangsgröße, die durch eine Systemfunktion eine Ausgangsgröße erzeugt. Je nach der zugrunde liegenden Systemfunktion können Modelle unterschieden werden (Liebscher und Mendel, 2010).

Dabei können Modelle je nach Systemfunktion in mathematische, physikalische oder analoge Modelle gegliedert werden (Becsi, 2014). Bei physikalischer und analoger Modellierung, werden reale Gegebenheiten physisch in einem verkleinerten Maßstab nachgebildet und analysiert. Für diese Arbeit ist diese Art von Modellen nicht von Bedeutung und wird nicht genauer behandelt. Mathematische Modelle hingegen können in stochastische und deterministische Modelltypen weiter klassifiziert werden. Stochastische Modelle verwenden statistische ausgewertete Parameter aus den Inputdaten und versuchen damit, Aussagen über den Output zu tätigen. Beispiele dafür sind Korrelations- und Regressionsanalysen (Beven, 2012; Refsgaard und Knudsen, 1996).

Deterministische Modelle bilden einen kausalen Zusammenhang zwischen Ursache und dessen Wirkung. Dabei können die Modelle weiters zwischen Blackbox Modelle und konzeptionelle und physikalische Modelle unterschieden werden. Bei manchen Modellansätzen kann nicht immer klar unterschieden werden, da auch die Möglichkeit besteht, verschiedenen Modellansätze zu kombinieren (Beven, 2012). Im Folgendem, erfolgt eine kurze Beschreibung der deterministischen Modelle. In Abbildung 4-1 ist eine Einteilung der verschiedenen Modellstrukturen, wie es in der Arbeit von Becsi (2014) präsentiert wurde, abgebildet.

4.1.1 Empirische Modelle „Blackbox“ Modelle

Der Zusammenhang zwischen der beobachteten Eingangsgröße und der beobachteten Ausgangsgröße wird bei diesen Modellen durch empirische Erkenntnis erklärt. Dabei sind physikalisch basierte For-

meln nicht von Bedeutung. In einem gewissen Wertebereich liefern die Modelle akzeptable Ergebnisse. Bei Extrapolationen außerhalb dieses Wertebereiches kann es zu fehlerhaften Ergebnissen kommen.

4.1.2 Konzeptionelle Modelle „Greybox“ Modelle

Konzeptionelle Modelle verwenden für ihre Berechnungen eine Kombination aus Formeln mit vereinfachten physikalischen Gesetzen und empirischen Zusammenhängen. Dies wird durch eine Berechnungskaskade von linearen und nichtlinearen Speicherelementen mit verschiedenen spezifischen Eigenschaften ermöglicht. Die benötigten Parameter bzw. Variablen sind dabei arithmetische Mittel vom Untersuchungsgebiet. Je nach Berechnungsmaßstab wird dabei der Mittelwert aus dem ganzen Gebiet (lumped model) oder aus Teilgebieten bzw. Zonen (modelling zones) berechnet. Durch Kalibrierung werden die empirischen Parameter bestimmt.

4.1.3 Physikalische Modelle „White box“ Modelle

Diese Modelle basieren auf die komplexen physikalischen Naturgesetze. Im Falle der hydrologischen Modellierung werden die Bewegungsgleichungen für Wasser angewendet, um den genauen Energie- und Wasserfluss in einem Gebiet zu beschreiben. Dabei dienen die Formeln der Kontinuitätsgleichungen (z.B. St. Venant und Richard) als Grundlage. Ebenso wird die räumliche Variabilität von Prozessen, Eingangs-, Anfangs- und Grenzbedingungen und Eigenschaften des Einzugsgebietes mit einbezogen. Dadurch ist es dieser Art von Modellen möglich, die hydrologischen Prozesse detaillierter und mit höherer Genauigkeit nachzubilden als im Vergleich zu Blackbox und Greybox Modellen. Aufgrund der hohen Genauigkeit benötigen solche Modelle eine große Menge an Daten, was sich negativ auf die Berechnungszeit auswirkt. Als Vertreter der physikalischen Modelle kann das MIKE-SHE Modell (Refsgaard und Storm, 1995) angeführt werden.

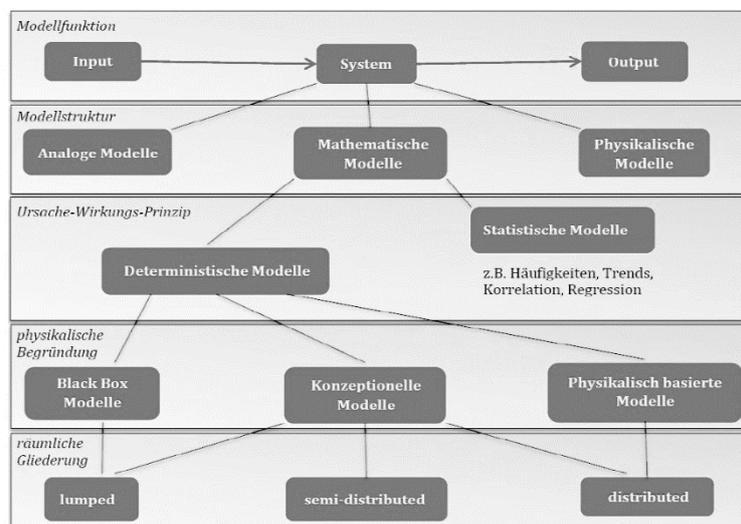


Abbildung 4-1: Einteilung Niederschlags-Abfluss Modelle (Becsi, 2014)

4.2 COntinuous SEMidistributed RunOff Model (COSERO)

COSERO wurde am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau an der Universität für Bodenkultur Wien entwickelt. Das Modell kann als konzeptionelles, kontinuierliches, vollverteiltes Modell klassifiziert werden. Erstmalige wissenschaftliche Verwendung fand es in den Arbeiten von Nachtnebel in den 1990er Jahren, dabei wurde COSERO verwendet, um eine Prognose für den Abfluss der Enns zu erstellen (Nachtnebel et al., 1993). Viele verschiedene Projekte wurden mit Hilfe von COSERO durchgeführt. Es wurden dabei Studien durchgeführt, die sich mit den Wasserbilanzen verschiedener Einzugsgebiete auseinandersetzen (Eder et al., 2001). Ebenfalls wurden Untersuchungen betreffend die Auswirkungen des Klimawandels auf Abflussregime verschiedener Gerinne durchgeführt (Hebenstreit, 2000).

COSERO ist angelehnt an das HBV-Modell (Bergström, 1992, 1976) und weist eine ähnliche Modellstruktur auf. Dabei werden die einzelnen Teilprozesse der AbflusSENTstehung durch die Akkumulation und das Schmelzen von Schnee, die aktuelle Evapotranspiration, die Bodenwasserspeicherfähigkeit, die Aufteilung von raschem Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss und das Routing durch Verwendung einer Kaskade von linearen und nicht-linearen Speichermodulen berücksichtigt. COSERO erwies sich in der Abbildung der räumlichen sowie auch der zeitlichen Auflösung als sehr flexibel. Projekte mit mehreren tausend Quadratkilometern als Einzugsgebiete konnten bereits mit einer hohen Simulationsgüte erfolgreich angewendet werden (Enzinger, 2009; Herrnegger et al., 2012; Kling et al., 2015; Wesemann et al., 2018), ebenso wurden Anwendungen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Monat, für Untersuchungen der Wasserbilanz, mit einer bis zu 15-minütigen Auflösung, zur Erstellung von Prognosen, durchgeführt.

Bei all den Anwendungen mit COSERO wurden auch immer wieder Verbesserungen bzw. Erweiterungen hinzugefügt. Große Meilensteine bei der Entwicklung sind dabei die Verbesserung des Schneemodules durch Fuchs (1998) oder die automatische Parameterkalibrierung von Kling (2002). Nicht nur an den Modellstrukturen, die die einzelnen Abflussbildungsprozesse beschreiben, wurden Verbesserungen vorgenommen, auch der Programmcode selbst wurde optimiert. Zum Beispiel um die Übersichtlichkeit des Codes zu verbessern, die Ansprache von Dateien zu optimieren, um größere Einzugsgebiete mit höherer zeitlicher Auflösung zu simulieren, um neu entwickelte Erweiterungen einfacher zu implementieren und die benötigten Berechnungszeiten zu verringern.

Durch die Anwendung von COSERO in verschiedenen Studien (Kling et al., 2015) sowie die Verwendung des Modells in operationalen Anwendungen zur Bestimmung von Abflussprognosen zur Optimierung der Wasserkraftenergieerzeugung an der Mur (Schulz et al., 2016) konnte viel Erfahrung mit dem Modell gesammelt werden. Aufgrund dieser Tatsache wurde beschlossen, COSERO auch für diese vorliegende Arbeit zu verwenden.

4.2.1 Räumliche Diskretisierung

In diesem Unterkapitel soll kurz erklärt werden, mit welcher räumlichen Systematik COSERO arbeitet. Zur Berechnung des Abflusses verwendet COSERO verschieden große, räumliche Modellierungseinheiten, welche miteinander verbunden sind und dem Modell Informationen über den Aufbau des Einzugsgebietes geben. Dabei bildet das untersuchte Einzugsgebiet die größte Einheit, in weiterer Folge kann dieses in Unter-/Teileinzugsgebiete gegliedert werden. In dieser Studie werden die Teileinzugsgebiete so gewählt, dass sich deren jeweilige Auslasspunkt an der Position der neun Pegelmessstellen befindet. Für die Abflussberechnung wird eine weitere feinere räumliche Auflösung benötigt, dies wird durch Erstellen von Zonen ermöglicht. Eine Zone entspricht der kleinsten Berechnungseinheit für COSERO und hat eine räumliche Ausdehnung von 1x 1 km. Für jede einzelne Zone werden die abflussrelevanten Komponenten, basierend auf den COSERO-Modellaufbau, berechnet. Durch die Zonen wird die Heterogenität des Untersuchungsgebietes berücksichtigt, sie beinhalten Informationen über die Höhe, den Boden, der Landbedeckung und die Geologie. Diese Informationen werden in weiterer Folge zur Parameterkalibrierung benötigt, welche für jede Zone passende Parameterwerte berechnet. Mit den Eingangsgrößen und Parametern werden für jede Zone die verschiedenen Ausgangsgrößen geschätzt. Diese werden dann von Zone zu Zone bis zum Teileinzugsgebietsauslass und anschließend weiter zum Gebietsauslass geroutet. Anhand der Abbildung 4-2 wird am Beispiel der Raab die räumliche Diskretisierung dargestellt, wie es bei COSERO angewendet wird.

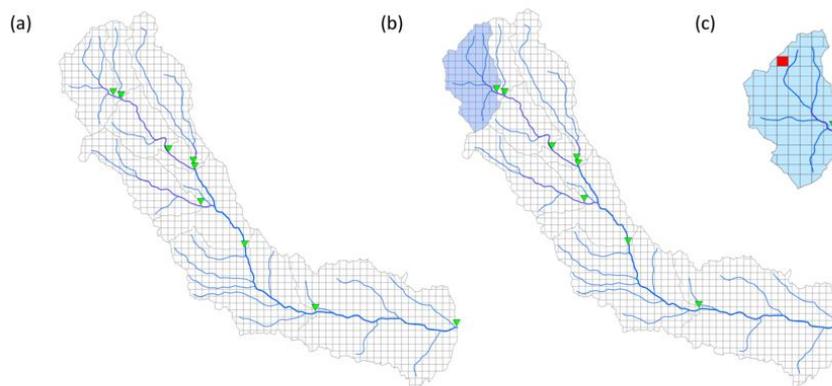


Abbildung 4-2: Räumliche Diskretisierung in COSERO. (a) Einzugsgebiet der Raab (b) Darstellung eines Untereinzugsgebietes in blau (c) Teileinzugsgebiet mit Berechnungszone in rot

4.2.2 Modellkonzept

COSERO bedient sich zwei grundlegenden mathematischen Formeln, um die Zustandsgrößen, der Füllgrade der einzelnen linearen bzw. nichtlinearen Speicher und die Ausgangsgrößen für jeden Zeitschritt und für jede Berechnungszone zu berechnen. Die räumliche Indexierung der Formel wurde aufgrund

der Übersichtlichkeit weggelassen. Anhand der Zustandsübertragungsfunktion $f()$ und der Ausgangsgrößenfunktion $g()$ erfolgt die Zustandsraumdarstellung für das Modell (Herrnegger et al., 2015).

Dabei sind:

$\dot{S}_{(t)}$	Zustandsgrößen (mm)
$\dot{O}_{(t)}$	Ausgangsgrößen (mm/ Δt)
$\dot{I}_{(t)}$	Eingangsgrößen (mm/ Δt)
Δt	Modellzeitschritt

In (1) erfolgt die Beschreibung der Zustandsgrößen

$$\dot{S}_{(t)} = f(\dot{S}_{(t-1)}, \dot{I}_{(t)}) \quad (1)$$

Und in (2) werden die Ausgangsgrößen beschrieben

$$\dot{O}_{(t)} = g(\dot{S}_{(t-1)}, \dot{I}_{(t)}) \quad (2)$$

In Abbildung 4-3 soll anhand eines Zeitstrahls das Berechnungsprinzip verdeutlicht werden. Der aktuelle Zustand ist dabei abhängig von dem vorhergehenden Zustand und den Inputgrößen. Die Ausgangsgrößen für einen Zeitschritt werden durch den vorhergehenden Zustand und den Eingangsgrößen beschrieben.

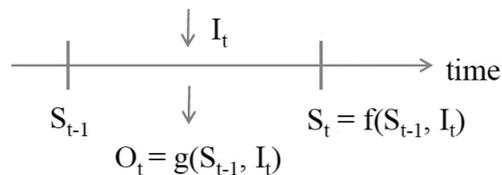


Abbildung 4-3: Berechnungsprinzip COSERO für Zustandsgröße S , Eingangsgröße I , Ausgangsgröße O und Zeitschritt t . (Herrnegger et al., 2015)

Ein schematischer Aufbau des Modelles kann aus Abbildung 4-4 entnommen werden. Die genauen mathematischen Zusammenhänge der einzelnen Module wurden bereits in vielen Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten beschrieben. Aus den Arbeiten von Burgholzer (2017), Feiel (2018) und Herrnegger et al. (2015) können die genaue Beschreibung des Modelles entnommen werden.

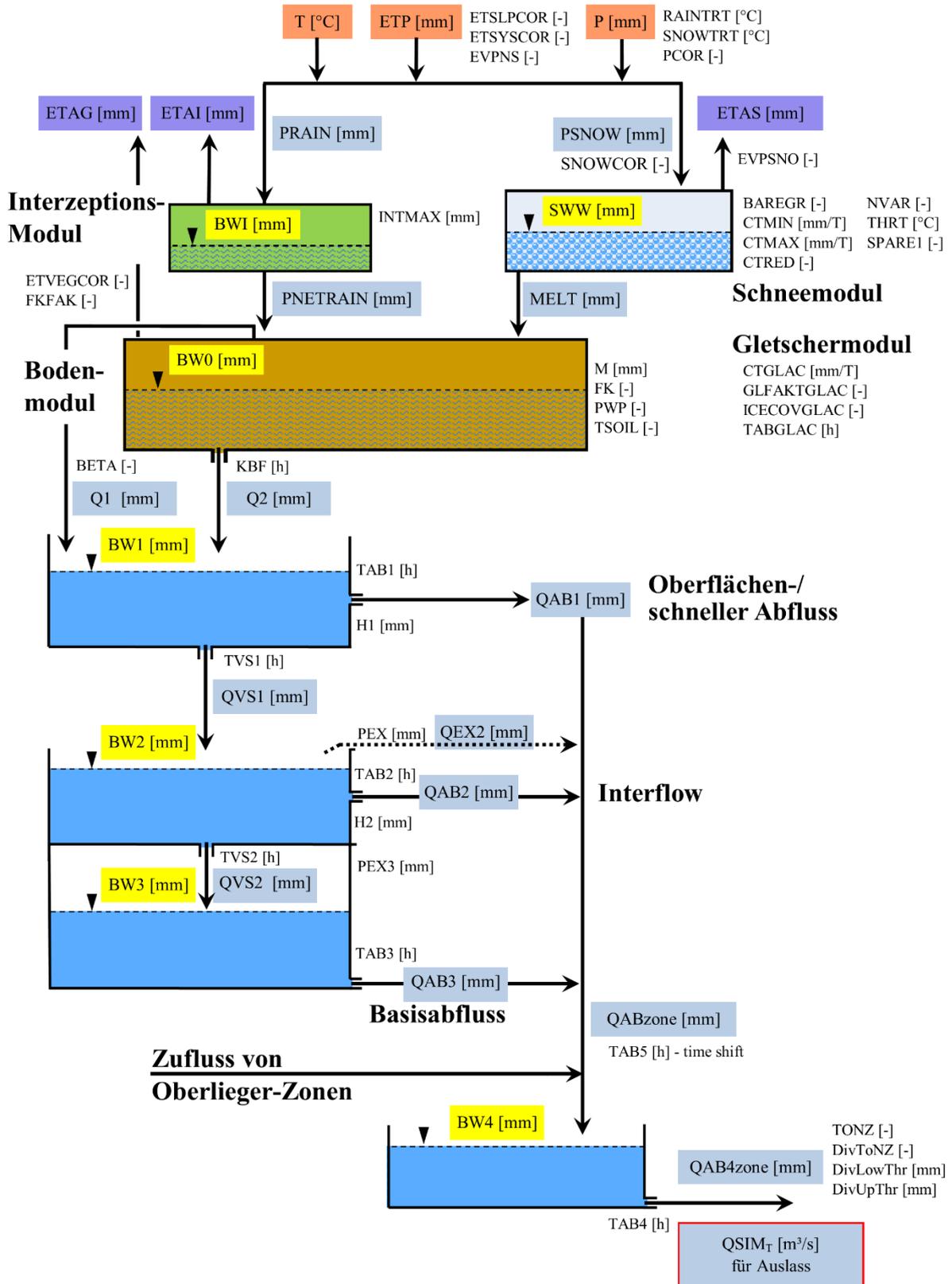


Abbildung 4-4: Schematischer Aufbau der Modellkomponenten (Herrnegger et al., 2015). Eine genaue Erläuterung der Parameter befindet sich im Anhang A.1

4.3 Kalibrierung und Validierung

Zur Bestimmung der optimalen Modellparametereinstellungen können mehrere Verfahren angewendet werden. Grundsätzlich wird durch Definition von Gütekriterien das Verhalten und das daraus resultierende Ergebnis eines Modells bewertet. In der hydrologischen Modellierung haben sich einige Gütekriterien etabliert und finden eine häufige Anwendung in den verschiedensten Untersuchungen. Nachfolgend werden einige Gütekriterien vorgestellt:

Nash Sutcliffe Efficiency NSE (Nash und Sutcliffe, 1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

$Q_{obs,i}/Q_{sim,i}$	beobachteter und simulierter Abfluss [m ³ /s]
\bar{Q}_{obs}	Mittelwert aus den beobachteten Abflüssen [m ³ /s]
i	Zeitschritt [-]
n	Anzahl der auszuwertenden Zeitschritte [-]

Das Ergebnis des NSE kann im Bereich zwischen $-\infty$ und +1 liegen, wobei +1 ein optimales Simulationsergebnis darstellt. Optimal heißt in diesem Kontext, dass die Simulation im Stande ist, die Beobachtung exakt nachzubilden.

Kling Gupta Efficiency KGE (Gupta et al., 2009)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{Qsim}}{\sigma_{Qobs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}} - 1\right)^2} \quad (4)$$

$\bar{Q}_{obs}/\bar{Q}_{sim}$	Mittelwert aus den beobachteten und simulierten Abflüssen [m ³ /s]
$\sigma_{Qobs}/\sigma_{Qsim}$	Standardabweichung der beobachteten und simulierten Abflüsse [m ³ /s]
r	Korrelation

Ähnlich wie beim NSE liegt auch der Wertebereich, den der KGE einnehmen kann, zwischen $-\infty$ und +1. Hierbei stellt der Wert +1 ebenfalls ein optimales Simulationsverhalten dar. Der Unterschied zum

NSE ist, dass der KGE die Korrelation, relative Variabilität und den Bias zur Bestimmung der Güte berücksichtigt und dadurch die einzelnen Teilverhalten der Simulation bewertet.

Korrelation

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim}) * \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5)$$

$Q_{obs,i}/Q_{sim,i}$	beobachteter und simulierter Abfluss [m ³ /s]
$\bar{Q}_{obs}/\bar{Q}_{sim}$	Mittelwert aus den beobachteten und simulierten Abflüssen [m ³ /s]
i	Zeitschritt [-]
n	Anzahl der auszuwertenden Zeitschritte [-]

Die Korrelation kann Werte zwischen -1 und +1 einnehmen, dabei ist der Wert +1 das Optimum.

Peak difference coefficient PDIFF

$$PDIFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^x (Q_{sim,i,h} - Q_{obs,i,h})^2}{\sum_{i=1}^x (Q_{obs,i,h} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (6)$$

$Q_{obs,i,h}/Q_{sim,i,h}$	Maximum des beobachteten und simulierten Abflusses zum Zeitpunkt t innerhalb des Betrachtungsradius
\bar{Q}_{obs}	Mittelwert aus den beobachteten Abflüssen [m ³ /s]
x	Anzahl der auszuwertenden Ereignisse [-]
i	Zeitschritt [-]
h	Betrachtungsradius [d]

Der PDIFF ist ein recht junger Ansatz zur Bewertung einer Simulationsgüte. Er wurde entwickelt, um die Spitzenabflüsse einer Simulation besser nachzubilden (Burgholzer, 2017). Für manche Anwendungen ist es nötig, ein gutes Abflussverhalten der Simulation für die Spitzenabflüsse zu erreichen. In der vorliegenden Arbeit findet eine Auswertung von Hochwasserscheitelwerten statt, daraus ergibt sich

ein großes Interesse, dass die Scheitelwerte von der Simulation gut wiedergegeben werden. Die Vorgehensweise des PDIFF ist dabei, dass der höchste beobachtete Abfluss gewählt wird und ausgehend von diesem Zeitpunkt in einem vorab definierten Zeitraum der korrespondierende simulierte Spitzenabfluss gesucht wird. Je nach Anzahl x werden Wertepaare für die nächstgrößten Abflussspitzen gesucht. Auf Basis der gewählten Anzahl an Wertepaaren wird der NSE berechnet. Aufgrund der Tatsache, dass der PDIFF nur kurze zeitliche Informationen aus einer Abflussgangline extrahiert, ist es nicht zielführend, den PDIFF zur vollständigen Bewertung einer Simulation zu verwenden. Aus einer Kombination mit anderen Gütekriterien kann trotzdem eine zusätzliche Gewichtung der Abflussspitzen gewährleistet werden.

Der Vorgang zur Findung des optimalen Parameterdatensatzes kann auf manuelle oder automatische Weise erfolgen. Bei der manuellen Ermittlung wird ein hohes Maß an Kenntnissen für die einzelnen Modellprozesse vorausgesetzt und erfordert Fachwissen von Experten. Die manuelle Bestimmung ist ein arbeitsintensiver Vorgang und durch den menschlichen Einfluss ein inkonsistenter Prozess. Im Gegensatz dazu steht die automatische Kalibrierung. Durch die Anwendung von Optimierungsalgorithmen kann der Einfluss von subjektiven Beurteilungen eliminiert werden und die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung sind konsistent.

In dieser Arbeit wurde für den Optimierungsalgorithmus der Dynamically Dimensioned Search Algorithm (DDS) angewendet. Der DDS ist ein stochastischer globaler Suchalgorithmus. Durch Definieren von spezifischen Modellbewertungsgrenzen ist der DDS in der Lage, je nach Anzahl der gewählten Iterationsschritte, eine globale Lösung innerhalb des Suchbereiches zu finden. Dabei dienen die Iterationsschritte auch als Abbruchkriterium des Algorithmus. Zu Beginn des Algorithmus sucht dieser global nach Lösungen und anhand seiner Zwischenergebnisse aus den Iterationsschritten schränkt sich der eingangs gewählte Suchbereich ein und der Suchvorgang wird zu einer lokaleren Suche. Dieser Übergang von globaler zu lokaler Suche wird dadurch ermöglicht, dass das Set von Entscheidungsvariablen oder das Set von Parametern immer von deren besten Wert modifiziert wird (Tolson and Shoemaker, 2007). Für den Optimierungsvorgang der Raab wurden 2000 Iterationsschritte verwendet.

In der Arbeit von Burgholzer (2017) wurde durch den Vergleich von Shuffle complex evolution (SCE) und DDS gezeigt, dass die Ergebnisse aus der Optimierung der Modellparameter bei der Anwendung von DDS besser Resultate liefert.

Zielfunktion

Die Zielfunktion besteht aus einer oder mehreren mathematischen Funktionen (e.g. Gütekriterium). Das Ergebnis aus dem jeweils gewählten Gütekriterium liefert Informationen über die Qualität einer

Simulation mit einer bestimmten Parametereinstellung. Durch Definieren einer Zielfunktion, in Kombination mit einem Optimierungsalgorithmus, können die Ergebnisse aus den Gütekriterien maximiert oder minimiert werden und somit eine optimale Einstellung der Parameter für den jeweiligen Verwendungszweck gefunden werden. Bei hydrologischen Modellen finden die oben angeführten Gütekriterien (NSE, KGE und PDIFF) oftmals Verwendung. Dabei kann die Zielfunktion aus einer zu optimierenden Funktion (Einzelkriterium) bestehen oder es werden mehrere Funktionen (Mehrzielkriterium) kombiniert und das Ergebnis aus beiden Kriterien wird zur Bewertung verwendet. Für die Bewertung der Raab wurde eine Mehrzielfunktion durch prozentuelle Gewichtung der einzelnen Kriterien folgendermaßen definiert:

- 85% Kling Gupta Efficiency KGE
- 15% Peak Difference coefficient PDIFF

Ziel ist es, das Ergebnis der definierten Mehrzielfunktion durch Anpassen der Modellparameter zu maximieren und eine optimale Parametereinstellung zu finden.

4.4 Klimamodelle

In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung in das Thema Klimamodellierung und deren Anwendungen gezeigt.

Wie alle Modelle sind auch Klimamodelle vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit. Aufgrund der Komplexität und der Wechselwirkungen innerhalb des Klimasystems ist es schwierig, alle auftretenden Prozesse vollständig zu reproduzieren. Daraus resultieren auch oftmals diverse Unsicherheiten in den Modellen. Nichtsdestotrotz sind Klimamodelle ein wichtiges Werkzeug in der Klimaforschung und können einen großen Beitrag dazu leisten, die Vorgänge im Klimasystem der Erde besser zu verstehen und neue Zusammenhänge zu erkennen. Durch die Anwendung von validierten Klimamodellen war es möglich, den wissenschaftlichen Beweis zu führen, dass durch das Handeln der Menschheit die globale mittlere Temperatur gestiegen ist. Durch Modellberechnungen mit und ohne anthropogene Treibhausgaskonzentrationserhöhung und anschließendem Vergleich der daraus resultierenden Temperaturverläufe (siehe Abbildung 4-5) und deren korrespondierenden räumlichen Verteilung war es nur möglich, die gewünschte Übereinstimmung des bereits beobachteten Temperaturverlauf zu erreichen, wenn neben den natürlichen Einflussfaktoren auch der anthropogene Anstieg der Treibhausgase berücksichtigt wurde (IPCC, 2013; Kromp-Kolb und Formayer, 2005).

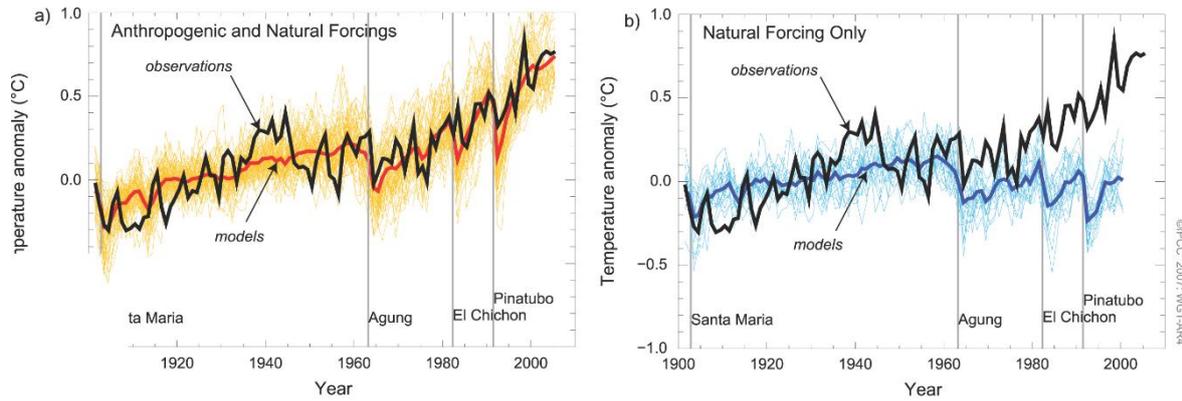


Abbildung 4-5: Nachbildung der beobachteten globalen mittleren Temperatur mit anthropogenem und natürlichem Einfluss (links) und Simulationsergebnisse mit nur natürlichem Einfluss (rechts). Schwarze Linie zeigt die Beobachtung, rote Linie entspricht Simulation mit anthropogenem und natürlichem Einfluss und blaue Linie entspricht Simulation mit nur natürlichem Einfluss. Grafik aus IPCC (2013)

Aufbau Klimamodelle

Bei Klimamodellen wird ein virtuelles dreidimensionales Gitternetz um den gesamten Globus aufgespannt. Die dabei entstehenden Gitternetzstellen dienen als Berechnungseinheiten. In diesen Berechnungseinheiten werden für einen vorab definierten Zeitschritt die Zustandsgrößen (e.g. Temperatur und Strömungen) in der Atmosphäre bzw. in den Ozeanen berechnet. Das komplexe Klimasystem wird dabei durch mehrere unabhängige Teilmodule beschrieben, wobei jedes Teilmodul gewisse Einzelkomponenten des gesamten Klimasystems repräsentiert. Die Gliederung der Module erfolgt in fünf Gruppen (ZAMG, 2018b):

Atmosphäre	Hier werden Komponenten wie Lufttemperatur, ein- und ausgehende Strahlung, Niederschlag, Luftdruck, Wind, relative Feuchte und Geopotenzial berücksichtigt.
Ozean	Berücksichtigt Meeresströmungen, ozeanische Sediment, Meeresorganismen und verschiedene Darstellung von Hochsee und Küstenregionen
Chemie	Simuliert chemische Reaktionen in der Atmosphäre und im Ozean (e.g. Kohlenstoff- und Schwefelkreislauf)
Kryosphäre	Berücksichtigen Aufbau- und Abschmelzprozesse des Meereseises und der Eisschilde.
Landoberfläche	Beschreibt Prozesse betreffend Vegetation, Bodeneigenschaften und Grundwasser

Erst durch die Koppelung der einzelnen Module spricht man von einem globalen Klimamodell oder von einem globalen Zirkulationsmodell (GCM). Die Koppelung ermöglicht es ebenfalls, die Wechselwirkun-

gen und Rückkoppelungen, welche im Klimasystem stattfinden, annähernd nachzubilden. Die verwendeten GCM für den 5. Sachstandsbericht des IPCC haben eine horizontale Auflösung von 100 bis 150 km und eine vertikale Auflösung von 100 m bis 10 km (IPCC, 2013; Solomon et al., 2007; Taylor et al., 2012), in neueren Forschungen werden bereits GCM mit einer horizontalen Auflösung von bis zu 25 km verwendet (Stanzel et al., 2018). In Abbildung 4-6 ist ein schematischer Aufbau des Berechnungsnetzes dargestellt. Die grauen Pfeile in der Abbildung symbolisieren den Austausch von Energie und Masse unter den benachbarten Gitterzellen.

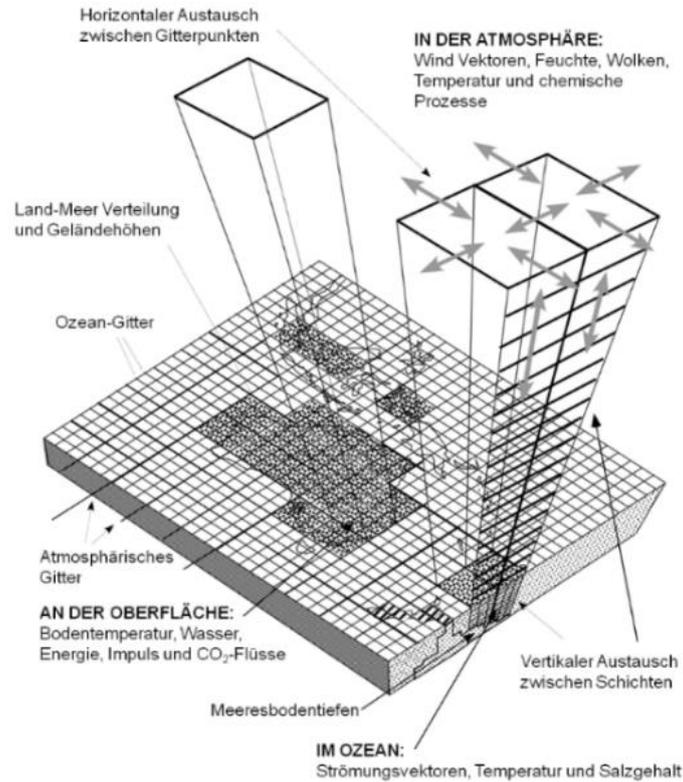


Abbildung 4-6: Schematischer Aufbau des Berechnungsgitters eines Klimamodells aus McGuffie und Henderson-Sellers (2013)

Diese Austauschvorgänge werden durch grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten wie der Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie mathematisch durch Differentialgleichungen beschrieben. Ausgehend von Randbedingungen werden die partiellen Differentialgleichungen von Zeitschritt zu Zeitschritt gelöst, dabei sind die Ergebnisse eines Zeitschrittes die neuen Startwerte für den nächsten Zeitschritt. Dieser Verbund in der Berechnungskette macht die Modelle dynamisch. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass manche Prozesse, die im Klimasystem stattfinden, noch nicht vollständig aufgelöst werden können. Dies ist der Fall bei Vorgängen, die aus heutiger Sicht noch nicht beschrieben werden können, oder wenn das zu beschreibende Ereignis zu klein ist und von der Auflösung des Rechengitters nicht erfasst werden kann. Durch Parametrisierung können diese Prozesse durch semi-empirische Beziehungen bekannten Größen festgeschrieben werden. Auch durch Anwendung der Parametrisierung

ist es nicht vermeidbar, dass manche Vorgänge im System derzeit noch gänzlich unberücksichtigt bleiben (Haimberger et al., 2014). Dieses Fehlen an Prozessverständnis wirkt sich als Unsicherheit in der Klimamodellierung aus.

Wie bereits erwähnt benötigen die GCMs für ihre Berechnungen Randbedingungen. Diese Randbedingungen werden durch Szenarien, die eine mögliche zukünftige Emissionsentwicklung beschreiben, definiert. Durch den festgestellten anthropogenen Einfluss auf das Klima ist es schwierig, die klimarelevanten Faktoren für ein Szenario zu definieren. Je nach Weltbevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsentwicklung, Einsatz und Entwicklung von emissionsmindernden Technologien, Rohstoffverfügbarkeit und politischem Handeln gibt es mehrere verschiedene Entwicklungspfade, die eintreten können. Hierzu dienen so genannte sozioökonomische Modelle, welche die Treibhausgasemissionen und andere relevante Parameter als Funktion der Zeit abschätzen. Diese Modellergebnisse dienen als Input für die Klimamodelle. In dem 5. IPCC-Sachstandsbericht wurden vier repräsentative Konzentrationspfade (representative Concentration Pathways RCP) (IPCC, 2013) entwickelt und dienen als Berechnungsgrundlage der verschiedenen GCMs. Im Unterschied zu den alten Emissionsszenarien (Special Report on Emission Scenarios SRES (Nakićenović und Swart, 2000)), welche bis zum 4. IPCC-Sachstandsbericht Verwendung fanden, sind bei dem RCP-Konzept auch Landnutzungsänderungen und politische Maßnahmen berücksichtigt. Die Idee der RCP ist es, unterschiedliche Emissionsverläufe vorzugeben, die bis zum Jahr 2100 Strahlungsantriebe im Wertebereich von 2,6-8,5 W/m² erzeugen. Aus der Idee entstanden vier verschiedene Szenarien. Ausgehend vom RCP 2.6 (Van Vuuren et al., 2011, 2007, 2006), das als „best case“ Szenario beschrieben werden kann, bis zum RCP 8.5, welches als der schlimmste einzutretende Fall bezeichnet werden kann. Tabelle 4-1 gibt eine Zusammenfassung der einzelnen Szenarien. Dabei ist zu erkennen, dass die Konzentration an Treibhausgasen bei RCP 8.5 um fast das Dreifache höher ist als im RCP 2.6. Die Szenarien RCP 4.5 und RCP 6.0 sind zwischen RCP 8.5 und RCP 2.6 angesiedelt.

Tabelle 4-1: Die vier Konzentrationspfade (IPCC, 2013)

Name	Strahlungsantrieb	THG-Konzentration im Jahr 2100	Pfad	Modell zur Berechnung des RCP
RCP8.5	8.5 W/m ² im Jahr 2100	1370 ppm CO ₂ -Äq.	Ansteigend	MESSAGE
RCP6.0	6.0 W/m ² im Jahr 2100, danach stabil	850 ppm CO ₂ -Äq.	Stabilisierend	AIM
RCP4.5	4.5 W/m ² im Jahr 2100, danach stabil	650 ppm CO ₂ -Äq.	Stabilisierend	GCAM
RCP2.6	3.0 W/m ² vor Jahr 2100, dann Abnahme auf 2.6 W/m ² bis 2100	490 ppm CO ₂ -Äq.	Erst ansteigend, dann Abnahme	IMAGE

In Abbildung 4-7 ist die Änderung der globalen mittleren Oberflächentemperatur für die vier Szenarien dargestellt. Die unterschiedlichen THG Konzentrationen erzeugen dabei die verschiedenen Temperaturentwicklungen.

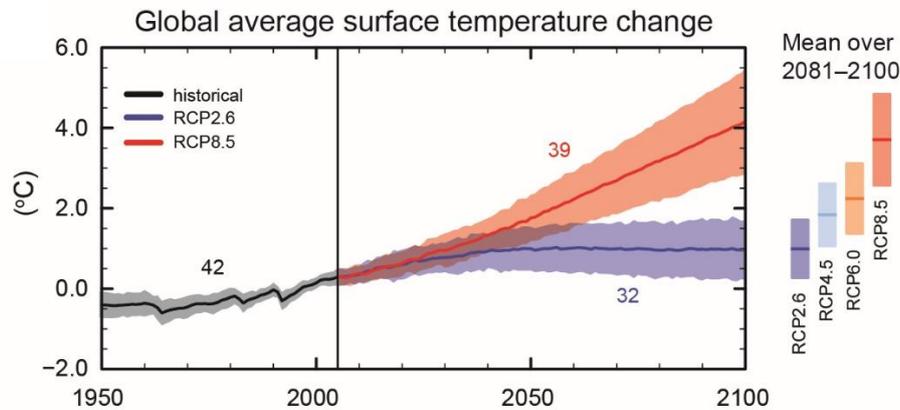


Abbildung 4-7: Änderung der globalen Oberflächentemperatur für die einzelnen RCPs bis zum Jahr 2100 aus IPCC (2013)

Mit aus den SRES neuen weiterentwickelten RCP-Szenarien können nun Randbedingungen für die GCM definiert werden und mögliche Klimaprojektionen für die Erde simuliert werden. Weltweit gibt es zahlreiche Forschungsgruppen, die ein Klimamodell betreiben. Die physikalische Grundstruktur der verschiedenen Modelle ist dabei gleich. Die im Detail getroffenen Annahmen für einen Prozess im Klimasystem können dabei variieren. Als Resultat daraus gibt es weltweit viele verschiedene Simulationen für das Klima der Erde. Das CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), eine von der World Climate Research Project (WCRP) ins Leben gerufene Initiative, hat sich das Ziel gesetzt, die unterschiedlichen Modelle untereinander zu vergleichen. Anhand von Modell-Ensembles, welche mehrere Modelle beinhalten, können Vergleiche der verschiedenen Simulationsergebnisse erstellt werden und daraus ein mögliches Entwicklungsspektrum von klimarelevanten Variablen abgeleitet werden. Ebenfalls können Unsicherheiten der einzelnen Modelle abgeschätzt werden (APCC, 2014).

Für die Fragestellung dieser Arbeit sind die Simulationsergebnisse der GCM in ihrer räumlichen Auflösung nicht direkt verwendbar. Aufgrund der niedrigen räumlichen Auflösung von ca. 100x100 km würde das gesamte Einzugsgebiet der Raab in nur einer Gitterzelle abgebildet werden und es wäre nicht sinnvoll Analysen für das Gebiet durchzuführen. Dieses Problem wird durch verschiedene Regionalisierungs- bzw. Downscaling- Methoden gelöst. Diese Downscaling Verfahren können in dynamische Downscaling und empirisch/statistische Downscaling untergliedert werden.

Dynamical Downscaling (DD)

Hierbei wird ebenfalls ein physikalisches Modell erstellt, welches ähnlich oder gleich einem GCM zu setzen ist. Der Unterschied ist, dass die räumliche Ausdehnung des Modellaufbaus sich auf einen kleineren Bereich konzentriert (e.g. Europa, Australien). Aufgrund der geringeren räumlichen Ausdehnung ist es möglich, durch Einsatz derselben Rechenleistung die räumliche Auflösung zu erhöhen und genauere Informationen über die Heterogenität in einem Gebiet zu erlangen. Die Anfangsbedingungen bzw. Randbedingungen an den Modellgrenzen werden aus den jeweiligen verwendeten GCM übernommen. Der Vorgang lässt sich bildlich so vorstellen, dass in das GCM Berechnungsnetz ein feineres Berechnungsnetz „eingenistet“ wird (BMLFUW, 2011a). Durch diese Verschachtelung der Modelle (Wang et al., 2004) ist man, zum jetzigen Zeitpunkt, im Stande, einen Klimaprojektionsdatensatz mit einer Auflösung von bis zu 10x10 km zu erstellen.

Empirisches/statistisches Downscaling

Dieses Verfahren versucht, über empirische Modelle großräumige klimarelevante Variablen auf eine kleinere regionalere Größenordnung zu skalieren. Dabei wird eine statistische Beziehung zwischen regionalen Klimafaktoren (e.g. Temperatur) und beobachteten großräumigen Wetterbedingungen abgeleitet. Diese Erkenntnisse aus der berechneten Korrelation werden ausgewertet und auf die Ergebnisse von den globalen Klimamodellen angewendet. Im Vergleich zum DD -Verfahren ist der Rechenaufwand um ein Vielfaches geringer, was sich auf die Berechnungszeit auswirkt (BMLFUW, 2011a).

Die neu erzeugten und skalierten Klimaprojektionen werden als regionale Klimamodelle (RCM) bezeichnet. Derzeitige RCM haben eine Berechnungsnetzauflösung von 10x10 km und sind in der Lage, die regionalen Klimaverhältnisse für Klimaprojektionen besser abzubilden. In welchen räumlichen und zeitlichen Maßstäben die Klimaprozesse in der Atmosphäre stattfinden, wird in Abbildung 4-8 dargestellt. Ebenfalls sind die Bereiche, in welchen globale bzw. regionale Klimamodelle arbeiten, abgebildet.

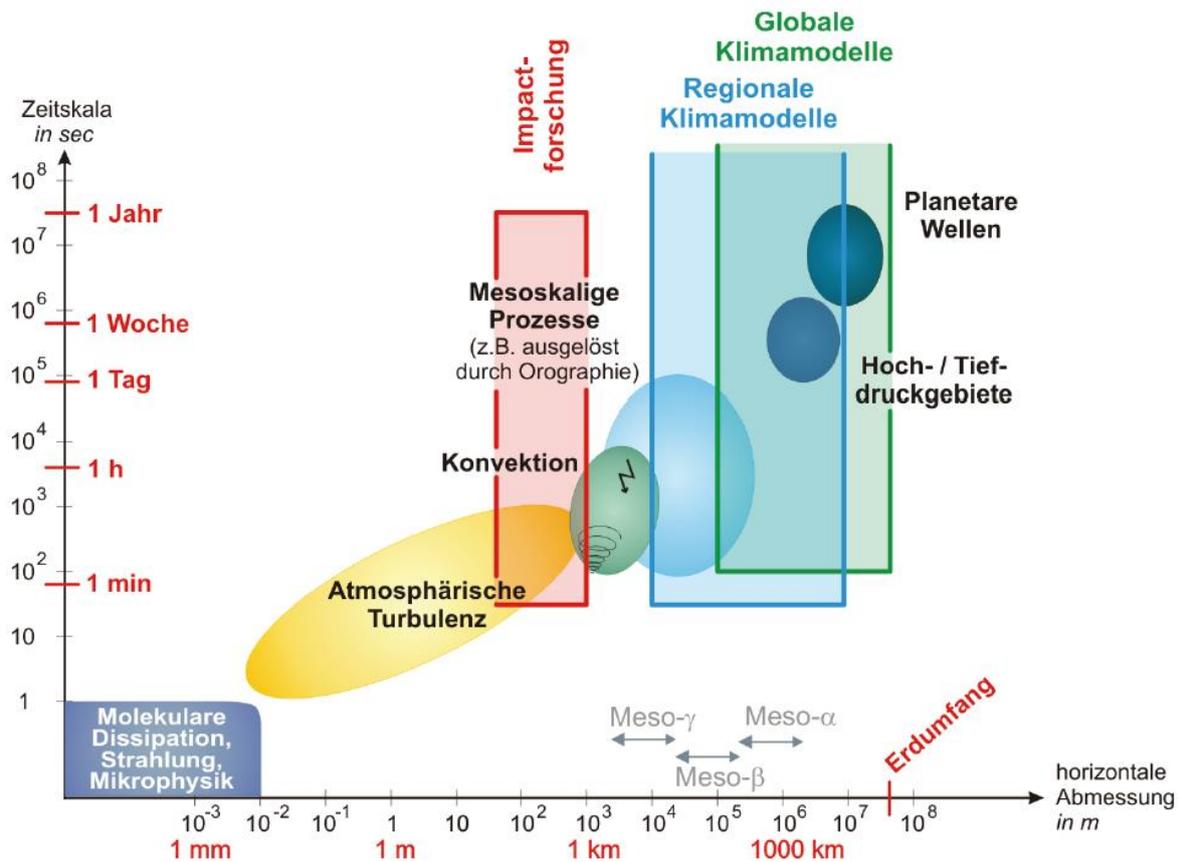


Abbildung 4-8: Darstellung von verschiedenen klimaspezifischen Prozessen in Bezug auf deren zeitliche sowie räumliche Einteilung. Dazu abgebildet der mögliche Bereich, welcher von modernen globalen (grünes Kästchen) bzw. regionalen (rotes Kästchen) Klimamodellen simuliert werden kann. Abbildung aus Deutscher Wetterdienst DWD (2018)

Die EURO-CORDEX Initiative hat durch Anwendung von Downscaling-Methoden eine Vielzahl von RCMs für ganz Europa zusammengetragen. Viele Forschungsinstitute haben sich das Ziel gesetzt, Klimaprojektionen mit den verschiedenen RCP-Szenarien für Europa zu erstellen und der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. Das UnLoadC³-Projekt (Schulz et al., 2017) bezieht ebenfalls ihre Klimaprojektionen aus dieser Datenbank. Im Rahmen des Projektes wurde eine weitere Skalierung der RCMs vorgenommen, um eine räumliche Auflösung von 1x1 km zu erlangen. Durch die statistische Downscaling Methode kombiniert mit einer Bias-Korrektur wurden Klimaprojektionen mit den Szenarien RCP 4.5 und 8.5 für die Einzugsgebiete der Schwechat sowie der Raab generiert. Der erstellte Datensatz hat eine räumliche Verteilung, welche der räumlichen Verteilung des SPARTACUS Datensatz entspricht. Eine Übersicht der verwendeten RCMs befinden sich in Tabelle 3-2 in Kapitel 3.3.

4.5 Beschreibung Hochwasserstatistik

Zur Berechnung und Darstellung von Hochwasserabflussräumen und in weiterer Folge der nötigen Projektierung von Maßnahmen zum Schutz vor Hochwasser werden Informationen über mögliche auftretende Hochwasser benötigt. Dabei werden Analysen von beobachteten Abflussdaten durchgeführt, um hochwasserspezifische Kennwerte festzustellen. In den „Technischen Richtlinien für den Schutzwasserbau“ (RIWA-T, 2015) werden dabei die Größenordnung des Schutzgrades für Siedlungsflächen und bedeutenden Wirtschafts- und Verkehrsanlagen festgehalten. Hierbei wird eine Unterscheidung von drei Bemessungshochwasser ausgewiesen. Es wird zwischen HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300} unterschieden. Als Sonderfall kann noch ein HQ_{5000} angeführt werden, welches als Bemessungshochwasser von Speichern dient. Das Bemessungshochwasser ergibt sich dabei aus Hochwasserabschätzungen kombiniert mit Überlegungen bezüglich Schadens- bzw. Risikopotential und Sicherheitszuschlägen. Abbildung 4-9 zeigt die Vorgangsweise zur Bestimmung des Hochwasserbemessungswertes. Dabei sind Hydrographie und Wasserbau gefordert, eng zusammen zu arbeiten. In dieser Arbeit wird nur der hydrologische Fachbereich (Hochwasserabschätzung) behandelt, wobei die Terminologie HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300} beibehalten wird.

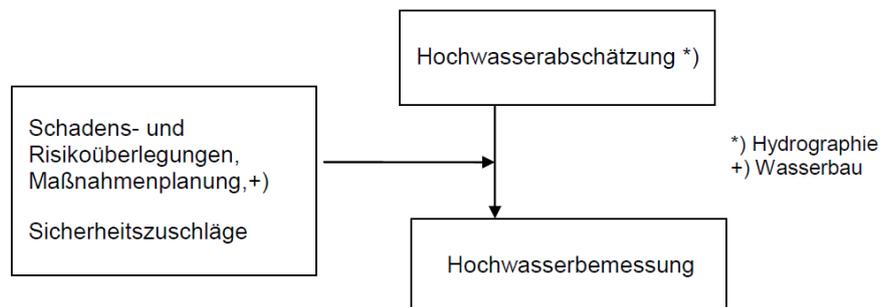


Abbildung 4-9: Zusammenhang Hochwasserabschätzung und Hochwasserbemessung (BMLFUW, 2011b)

4.5.1 Berechnung der Hochwasserabschätzung

Hydrologische Daten sind in ihrer Rohform oft mit Fehlern behaftet und müssen durch Korrekturverfahren bereinigt werden. Des Weiteren müssen für die Extremwertstatistik nötige Annahmen der Verteilung getroffen werden. Das BMLFUW (2011) gibt dabei eine Übersicht über die markantesten Fehler, die in einem hydrologischen Datensatz auftreten können, und beschreibt dazu Möglichkeiten zur Erkennung und zur Bereinigung dieser festgestellten Fehler. Nach BMLFUW (2011) wird im Folgendem aufgelistet, welche Eigenschaften die Daten haben müssen:

- Fehlerfrei: Die Stichprobe muss frei von Fehlern sein
- Unabhängig: Die Stichprobe muss unabhängig sein
- Homogen: Die Messstelle sollte bei der Aufzeichnung nicht durch natürliche oder anthropogene Störungen beeinflusst werden
- Repräsentativität: Das langfristige Abflussverhalten soll wiedergegeben werden

Nach BMLFUW 2011 können einige dieser Annahmen mit folgenden Untersuchungen getestet werden:

- Unabhängigkeit: Wald-Wolfowitz (Wald und Wolfowitz, 1940)
- Trend: Mann-Kendall, Spermanns Rho, Sneyers (Kendall, 1975; Mann, 1945)
- Homogenität: Wilcoxon (Wilcoxon, 1945)

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die zur Verfügung gestellten Daten frei von Fehlern sind und den oben angeführten Bedingungen entsprechen. Durch Plotten der Ganglinie der täglichen mittleren Abflüsse wurden die Daten auf Plausibilität überprüft. Außerdem wurde die Wasserbilanz abgeleitet aus den Abflussdaten mit der Wasserbilanz aus dem digHAÖ (BMLFUW, 2005) verglichen.

Je nach Datenbasis können verschiedene Verfahren angewendet werden. Für das Einzugsgebiet der Raab liegen repräsentative Durchflussbeobachtungen vor, dadurch ist es möglich, ein extremwertstatistisches Verfahren anzuwenden (lokale Statistik). Liegen für ein Gebiet keine Beobachtungen vor, kann die Methode der Regionalisierung angewendet werden, um hochwasserspezifische Kennwerte zu ermitteln (regionale Statistik) (Blöschl und Merz, 2000).

Der Umfang der Stichprobe beeinflusst die Qualität der statistischen Berechnung. Um ausreichend genaue Wahrscheinlichkeitsaussagen zu treffen, bedarf es einer bestimmten Anzahl von Beobachtungsjahren. Tabelle 4-2 zeigt eine Empfehlung des BMLFUW, ab welcher Beobachtungsdauer es zulässig ist, statistische Aussagen, betreffend die Hochwasserextremwerte, zu treffen. Schulz und Bernhardt (2016) haben mit ihren Untersuchungen gezeigt, dass die verwendete Zeitreihenlänge der Beobachtung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Extremwertberechnung hat und eine gewählte Zeitreihenlänge von 30 Jahren je nach Beobachtung zu unterschiedlich stark abweichenden Ergebnissen führen kann.

Tabelle 4-2: Erforderliche repräsentative Beobachtungsdauer für extremwertstatistische Analysen (BMLFUW, 2011b)

Beobachtungsdauer	Statistische Eignung
<10	nein
10-20	schwach
20-30	bedingt
>30	ja

Wie bereits erwähnt werden in dieser Arbeit die Hochwasserschätzwerte mit einem Wiederkehrintervall (T_n) von 30, 100 und 300 Jahren berechnet. Dabei kann zwischen Überschreitungswahrscheinlichkeit ($P_{\bar{U}}$), der Unterschreitungswahrscheinlichkeit (P_U) und der Eintrittswahrscheinlichkeit (P) unterschieden werden. Das BMLFUW (2011) beschreibt diese mit folgenden Formeln:

$$P_{\bar{U}} = P(X \geq x_1) \tag{7}$$

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

$$P_U = P(X < x_2) \tag{8}$$

Wahrscheinlichkeit, dass der Wert $X < x_2$ auftritt

$$P(x_1 < X < x_2) = P_{U,x_2} - P_{U,x_1} \tag{9}$$

Wahrscheinlichkeit, dass der Wert X im Bereich $x_1 < X < x_2$ auftritt

Dabei besteht ein einfacher Zusammenhang zwischen Überschreitungswahrscheinlichkeit und Unterschreitungswahrscheinlichkeit:

$$P_{\bar{U}} + P_U = 1 \tag{10}$$

Der Begriff Wiederkehrintervall beschreibt die Anzahl von Jahren für ein bestimmtes Ereignis, in denen das gewählte Ereignis im Durchschnitt einmal erreicht oder überschritten wird. Die Wahrscheinlichkeit des Erreichens oder Überschreitens des $HQ(T_n)$ - Wertes ist in jedem diskreten Zeitintervall dieselbe. Das heißt, ein 30-jährliches Ereignis kann in jedem Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,033 eintreten. Das Wiederkehrintervall (T_n) wird als Kehrwert der Überschreitungswahrscheinlichkeit

$$P_{\bar{U}} = P(X \geq x_i) = \frac{1}{T_n} \tag{11}$$

bzw.

$$P_U = P(X < x_i) = 1 - \frac{1}{T_n} \tag{12}$$

definiert.

4.5.2 Auswahl der Extremwerte

Eine weitere wichtige Rolle bei der Berechnung von Hochwasserschätzwerten ist die Auswahl der Extremwerte aus einer Zeitreihe. Der Leitfaden des BMLUFW sowie der deutsche Leitfaden aus der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, kurz DWA (2012) schlagen dafür zwei verschiedenen Ansätze vor. Es gibt den Ansatz der jährlichen Serie (annual maximum series AMS) und den Ansatz der partiellen Serie (partial duration series PDS). Bei der AMS Methode werden nur die Maximalwerte der einzelnen Jahre betrachtet. Hingegen bei der PDS Methode werden alle Ereignisse ausgewählt, die einen zuvor bestimmten Grenzwert (ξ_0) überschreiten. Dabei haben beide Methoden ihre Vor- und Nachteile. Es gibt mehrere Verfahren, um ξ_0 zu berechnen, eine Methode verwendet dabei die Anpassung der Überschreitungverteilung (Ben-Zvi, 1994). Hier werden beginnend mit den fünf größten beobachteten Werten die nächst kleineren Beobachtungen hinzugefügt, bis sich bei einem geeigneten Anpassungstest zeigt, dass sich die ausgewählte Teilmenge der beobachteten Abflüsse nicht mehr angemessen beschreiben lässt. Den Grenzwert bildet dabei der zuletzt aufgenommene Wert. Eine weitere im Leitfaden beschriebene Methode ist das Auswählen von ungefähr zwei Extremwerten pro Jahr, dabei ist darauf zu achten, dass die gewählten Proben voneinander unabhängig sind. Bei der AMS Methode gehen aufgrund der Auswahl von nur einem Ereignis pro Jahr Information verloren und es werden möglicherweise nicht alle Extremereignisse miteinbezogen oder es werden Ereignisse aufgenommen, die gar keine Extreme darstellen.

In folgender Tabelle 4-3 werden beide Verfahren gegenübergestellt und es ist erkennbar, dass sich in beiden Anwendungen im Bereich der hohen Wiederkehrintervalle kaum Unterschiede ausbilden. Die erwähnten Schwierigkeiten treten nur bei den sehr niedrigen Wiederkehrintervallen auf.

Tabelle 4-3: Vergleich der Wiederkehrintervalle aus einer AMS und einer PDS Auswertung

T _n in Jahren	
PDS	AMS
0.50	1.16
1.00	1.58
1.40	2.00
2.00	2.54
5.00	5.52
10.00	10.50
20.00	20.50
50.00	50.50
100.00	100.50

Für die Umrechnung der Wahrscheinlichkeiten P in die Wiederkehrintervalle können folgende Formeln verwendet werden (BMLFUW, 2011b):

AMS:

$$T_{AMS} = \frac{1}{1 - P_{U,AMS}} \quad (13)$$

$$P_{U,AMS} = 1 - \frac{1}{T_{AMS}} \quad (14)$$

PDS:

$$T_{PDS} = T_{AMS} * \frac{n}{j} \quad (15)$$

$$P_{U,PDS} = 1 - \frac{1}{T_{PDS}} = 1 - \frac{1}{T_{AMS}} * \frac{j}{n} \quad (16)$$

T_{AMS}/T_{PDS}	Jährlichkeit für Jahresreihe und partielle Serie
$P_{U,AMS}/P_{U,PDS}$	Unterschreitungswahrscheinlichkeiten für Jahresreihe und partielle Serie
j	Anzahl der Jahre
n	Anzahl der Stichprobenwerte

Bei der Analyse der Hochwasserschätzwerte für die Raab wurde nur das AMS Verfahren angewendet. Dies ist damit begründet, dass in der vorliegenden Arbeit die Werte HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300} von Interesse sind. In diesem Wertebereich weisen beide Verfahren nur sehr geringe Unterschiede auf und das AMS Verfahren benötigt keine Definition von bestimmten Grenzwerten.

4.5.3 Auswahl der Verteilungsfunktion

Die gewählte Jahreshochwasser-Reihe muss nun mit einer passenden Verteilungsfunktion beschrieben werden. Dabei gab es schon weltweit zahlreiche Untersuchungen, die verschiedene Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der Hochwasserextremwerte empfehlen. Es ist anzumerken, dass es keine mathematisch-physikalische Rechtfertigung gibt, um für ein Einzugsgebiet bzw. Gewässersystem eine Verteilungsfunktion gegenüber einer anderen zu bevorzugen (Benson, 1968). Allgemein können die

Verteilungsfunktionen in zwei-Parameter, drei-Parameter und höher dimensionale Funktionen gegliedert werden. Die Anzahl von Parametern gibt den Grad der Anpassungsfähigkeit einer Verteilungsfunktion an die Stichprobe an. Eine Funktion mit mehr Parametern ist in der Regel flexibler und besitzt mehr Möglichkeiten, eine gute Anpassung zur gewählten Reihe zu erhalten. Dabei ist aber zu beachten, dass es nicht zum Effekt des „Überbestimmen“ kommt. Dabei könnten mögliche Ausreißer einen zu großen Einfluss auf das Verhalten der Funktion haben und möglicherweise das Ergebnis verfälschen und zusätzliche Unsicherheiten entstehen lassen. Tabelle 4-4 zeigt die Vor- und Nachteile der beiden Verteilungsfunktionstypen.

Tabelle 4-4: Vergleich 2- und 3- parametrische Verteilungsfunktionen (Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.DWA, 2012)

Verteilungsfunktion	Vorteile	Nachteile
2- parametrisch	<ul style="list-style-type: none"> • Robust • Vorteilhaft bei wenig Information • Funktionstyp kann aus Erfahrung vorausgewählt werden, somit ist Vorinformation einbringbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechtere Anpassungseignung, da nicht so flexibel • Gibt möglicherweise Gebietsverhalten schlechter wieder als 3- parametrische Verteilungsfunktion
3- parametrisch	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Anpassungsmöglichkeit • Flexibel 	<ul style="list-style-type: none"> • Benötigt mehr Informationen • Hängt vom Schiefekoeffizient ab

Zwei der bekanntesten und oft verwendeten Verteilungsfunktionen sind die Allgemeine Extremwertverteilung (AEV) und die Allgemeine Pareto-Verteilung (APV). Dabei ist die AEV an die AMS-Methode angepasst und die APV an die PDS-Methode. In der Praxis gibt es noch weitere Verteilungsfunktionen, zum Beispiel die zweiparametrische Extremwertverteilung (Gumbel-Verteilung), die Weibull-Verteilung, die log-Normal-Verteilung und die Log-Pearson-Typ-III-Verteilung, um nur einige zu erwähnen. Es gibt noch viele weitere Ansätze, eine Zusammenfassung können zum Beispiel aus Chow et al. (1988) oder Mendel (1993) entnommen werden. In dieser Arbeit wurde die Log-Pearson-Typ-III (LP3) mit drei Parametern als Verteilungsfunktion gewählt. Dieser Ansatz wird von der U.S Geological Science seit 1967 verwendet und wurde in vielen Untersuchungen erfolgreich umgesetzt (England et al., 2017). Zum Vergleich dazu wird in Österreich die Gumbel-Methode in Form eines modifizierten „Kleinste-Quad-

rate-Verfahrens“ angewendet (BMLFUW, 2011b). Die LP3, auch Gammaverteilung, verwendet den Ansatz der Pearson Type III Verteilungsfunktion, nur werden dabei die Eingangsdaten mit dem Logarithmus der Basis 10 modifiziert. Dabei erhält man die Verteilungsfunktionen:

$$F(x) = \frac{\Gamma\left(a, \frac{\log x - \tau}{\beta}\right)}{\Gamma(a)} \quad \text{für } \beta > 0 \quad (17)$$

$$F(x) = 1 - \frac{\Gamma\left(a, \frac{\log x - \tau}{\beta}\right)}{\Gamma(a)} \quad \text{für } \beta < 0 \quad (18)$$

daraus ergibt sich die dazugehörige Dichtefunktion wie folgt:

$$f(x|\tau, \alpha, \beta) = \frac{\left(\frac{\log x - \tau}{\beta}\right)^{\alpha-1} * \exp\left(-\frac{\log x - \tau}{\beta}\right)}{x * |\beta| * \Gamma(a)} \quad (19)$$

α	Gestaltungsparameter
β	Skalierungsparameter
τ	Lageparameter
$\Gamma(a)$	Gamma Funktion, welche sich wie folgt beschreiben lässt:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} * \exp(-t) dt \quad (20)$$

Der Lageparameter beschreibt dabei eine mögliche Verschiebung der gesamten Verteilung in eine bestimmte Richtung auf der horizontalen Achse. Mit dem Gestaltungs- bzw. Skalierungsparameter können ebenfalls die Form der Verteilung beeinflusst werden.

4.5.4 Parameterschätzmethode

Nach der Wahl der Extremwerte-Verteilung müssen die dazugehörigen Parameter bestimmt werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten die Parameter zu schätzen. Im Leitfaden des BMLFUW (2011) werden einige dieser Möglichkeiten beschrieben. Angeführt ist die Methode nach Kreps, die Gumbel-Methode,

die Momentenmethode (MOM), die Wahrscheinlichkeitsgewichtete Methode (PWM), die L-Momente Methode (LMOM) und die Maximum-Likelihood Methode (MLM). Diese angeführten Methoden gehen davon aus, dass die Parameter der jeweilig gewählten Verteilung fixe Werte sind und aus der gewählten Stichprobe berechnet werden können. Für die Parameterschätzverfahren gelten folgende Anforderungen:

- Konsistenz: Je größer die Stichprobe ist, desto näher liegt der Parameterschätzwert an dem wahren Wert
- Erwartungstreue: Es werden keine systematischen Fehler durch die Schätzmethode gemacht, mögliche Abweichungen vom wahren Wert sind zufällig
- Effizient: Die Streuung der Schätzwerte um den wahren Wert ist minimal

In dieser Arbeit wurde die L-Momente Methode zur Parameterschätzung angewendet und wird im Folgenden kurz beschrieben.

L-Moment Methode (LMOM)

Beschrieben durch Hosking (1990), das LMOM Verfahren hat gegenüber den herkömmlichen Verfahren, wie der Momentenmethode oder der wahrscheinlichkeitsgewichteten Methode, Vorteile darin, dass es kleinere Fehler sowie höhere Stabilität auch für kleine Stichproben aufweist. Ebenfalls sind die Schätzer für die Lage, Skalierung und Form nahezu erwartungstreu. Das r_{te} L-Moment der Verteilung einer Stichprobe wird wie folgt definiert:

$$\lambda_r = \frac{1}{r} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} EX_{r-k:r} \quad r = 1, 2, \dots \tag{21}$$

$$EX_{k:r} = \frac{r!}{(k-1)!(r-k)} \int x \{F(x)\}^{k-1} \{1-F(x)\}^{r-k} dF(x) \tag{22}$$

$F(x)$ Verteilungsfunktion von x

Ein weiterer Vorteil der L-Momente Methode ist die leichte Interpretierbarkeit (BMLFUW, 2011b). Die ersten vier L-Momente ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$) dienen dabei als Information über die Lage, die Streuung, die

Schiefe und die Wölbung der zugrundeliegenden Verteilung. Diese vier L-Momente können anhand der folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$\lambda_1 = E(X_{1:1}) = \int_0^1 x(F)dF \quad (23)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2}E(X_{2:2} - X_{1:2}) = \int_0^1 x(F)(2F - 1)dF \quad (24)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{3}E(X_{3:3} - 2X_{2:3} + X_{1:3}) = \int_0^1 x(F)(6F^2 - 6F + 1)dF \quad (25)$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{4}E(X_{4:4} - 3X_{3:4} + 3X_{2:4} - X_{1:4}) = \int_0^1 x(F)(20F^3 - 30F^2 + 12F - 1)dF \quad (26)$$

$x(F)$ Quantilfunktion von x

Weiters können aus diesen vier Momenten dimensionslose Größen gebildet werden, wie die L-Skewness $\tau_3 = \lambda_3/\lambda_4$ und die L-Kurtosis $\tau_4 = \lambda_4/\lambda_2$. Diese L-Momentenverhältnisse können ebenfalls zur Anpassung der Verteilung verwendet werden. Auch hierbei gilt je nach Art der Verteilung bzw. Anzahl der benötigten Parameter richtet sich die Anzahl der benötigten Momente, um die gewünschte Verteilung zu berechnen.

4.5.5 Konfidenzintervall

Bei den Berechnungen von hydrologischen Extremwerten und der damit verbundenen Parameterermittlung der jeweils gewählten Verteilungsfunktion ist es nicht möglich, den wahren Parameterwert zu bestimmen, da keine vollkommene Kenntnis über die Grundgesamtheit vorhanden ist. Es werden immer nur Aussagen, welche die Stichprobe betreffen, getätigt, die als Teil der Grundgesamtheit angenommen werden kann. Anhand dieser Stichproben ist es möglich, einen Wertebereich einzugrenzen, in dem der gesuchte Wert erwartet wird. Dieser Bereich wird als Vertrauensbereich oder Konfidenzintervall bezeichnet. Der Vertrauensbereich wird laut BMLFUW (2011b) durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Größe der Stichprobe
- Varianz der gewählten Stichprobe
- Extrapolationsspannweite der statistischen Aussage
- Gewählte Verteilungsfunktion
- Verwendete Parameterschätzverfahren

In der vorliegenden Arbeit wurde für die Berechnung der Konfidenzintervalle der Hochwasserschätzwerte die Methode des Bootstrap-Verfahren (Efron, 1982) verwendet.

Bootstrap-Verfahren

Bei dem Bootstrap-Verfahren handelt es sich um ein nichtparametrisches Verfahren, welches durch Ziehen und anschließendes Zurücklegen von Werten aus der beobachteten Stichprobe eine Vielzahl von neuen Bootstrap-Stichproben erzeugt. Die Größe der Bootstrap-Stichproben ist dabei dieselbe wie bei der Basisstichprobe. In der Bootstrap-Stichprobe können Werte aus der beobachteten Basisstichprobe 0 bis n -mal enthalten sein. Je nach Anzahl der Wiederholungsrate werden verschieden viele Bootstrap-Stichproben erzeugt (Efron, 1982). Für diese erzeugten Stichproben wird ebenfalls eine Parameterschätzung anhand der L-Momenten durchgeführt und eine Verteilung nach Log-Pearson Typ III angepasst. Daraus resultiert eine Fülle an Hochwasserextremwertverteilungen basierend auf den verschiedenen Bootstrap-Stichproben. Je nach gewähltem Signifikanzniveau α werden das untere und obere Quantil aus den verschiedenen Verteilungsfunktionen berechnet. Diese berechneten Quantile dienen als Grenzen des Konfidenzintervalls.

Für die vorliegende Arbeit wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.10$ und eine Wiederholungsrate von 2500 angewendet.

5 Anwendung des hydrologischen Modells

In diesem Kapitel wird der Modellaufbau von COSERO für das Einzugsgebiet der Raab behandelt. Die durchgeführten Arbeitsschritte wurden mit der GIS-Software ArcMap (ESRI, 2018) durchgeführt. Das erstellte Modellskelett dient als Grundlage zur Parameterabschätzung und in weiterer Folge als Ausgangszustand für die automatische Kalibrierung des Modelles.

5.1 Räumliche Diskretisierung des Untersuchungsgebietes

Anhand des Höhenmodells und der verwendeten Pegelmessstellen wurde eine Einteilung des Einzugsgebietes bzw. der Teileinzugsgebiete vorgenommen (siehe Abbildung 2-2). In Summe wurden neun Teileinzugsgebiete definiert, dabei sind an den Auslässen der Teileinzugsgebiete Abflusspegel positioniert. Wie bereits in Kapitel 4.2.1 Räumliche Diskretisierung erwähnt, arbeitet COSERO mit 1x1 km großen Berechnungszellen. An den Grenzen des Einzugsgebietes bzw. an den Teileinzugsgebieten kam es bei der Diskretisierung zur Erstellung von kleinen Berechnungszellen. Durch Definieren einer Mindestgröße der Zellen von 0,25 km² wurden Elemente, die dieses Kriterium nicht erfüllen, mit der benachbarten Zone, mit der sie die größte gemeinsame Grenze besitzen, vereint. Als Ergebnis der Diskretisierung ergaben sich somit für das Untersuchungsgebiet eine Anzahl von 1083 Berechnungseinheiten, die sich mit den Spartacus-Datensätzen decken. Jeder dieser Zellen wurden Informationen zur Geländehöhe, Hydrogeologie, Landnutzung und dem Boden hinterlegt. Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-4 zeigen die genaue Verteilung davon. Die daraus berechneten Flächenanteile der einzelnen Attribute können aus Tabelle 2-2 bis Tabelle 2-4 in Kapitel 2 entnommen werden.

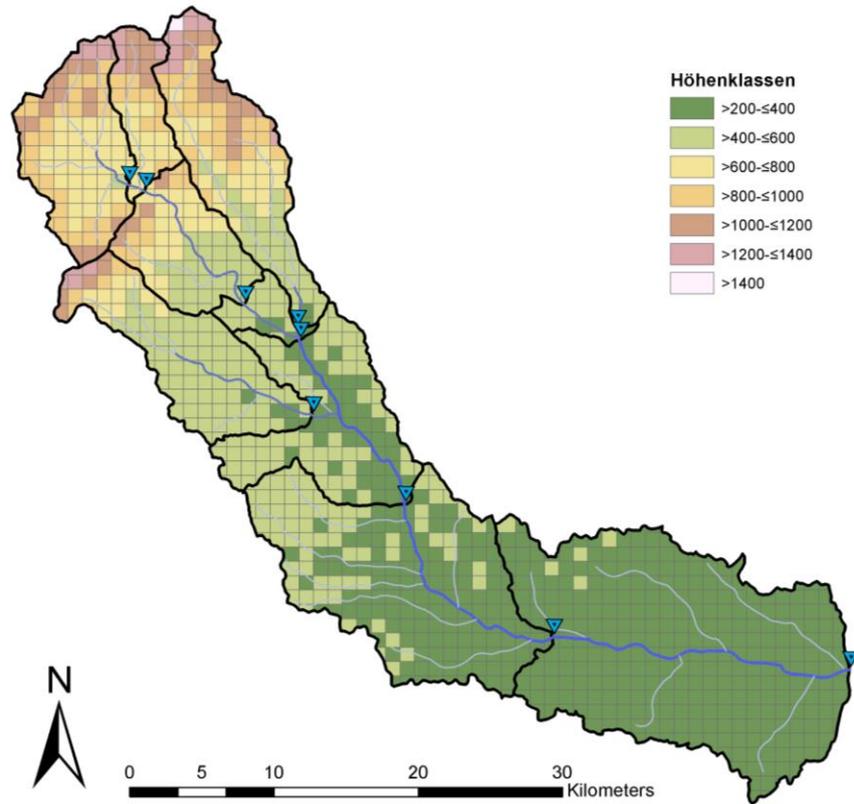


Abbildung 5-1: Darstellung der Höhenverteilung im Einzugsgebiet der Raab

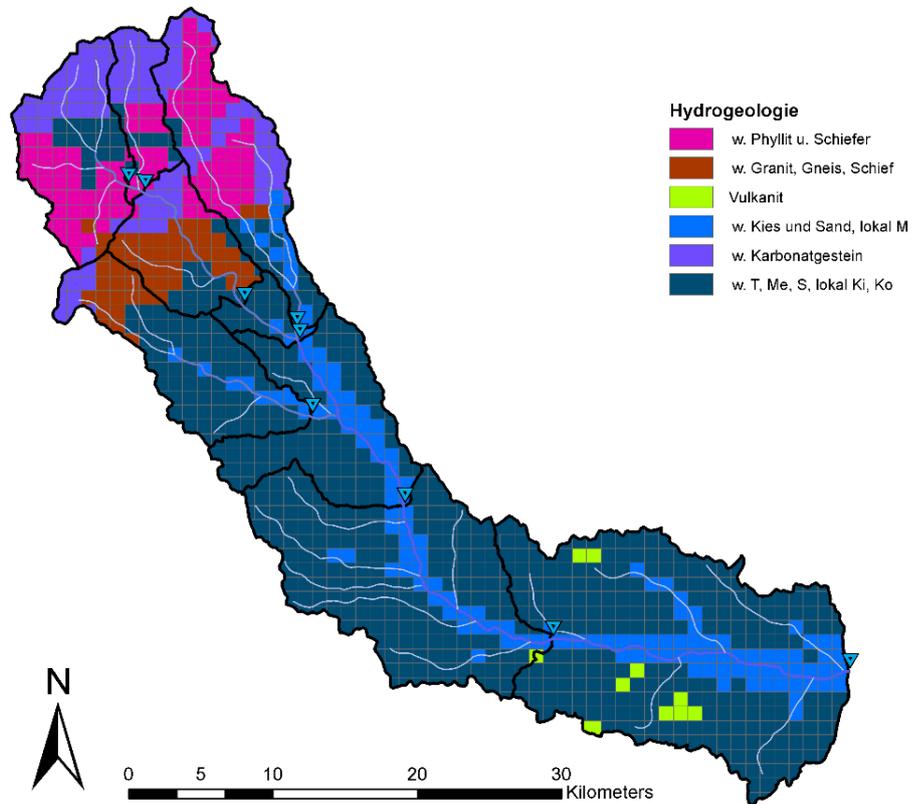


Abbildung 5-2: Darstellung der Hydrogeologieverteilung im Einzugsgebiet der Raab

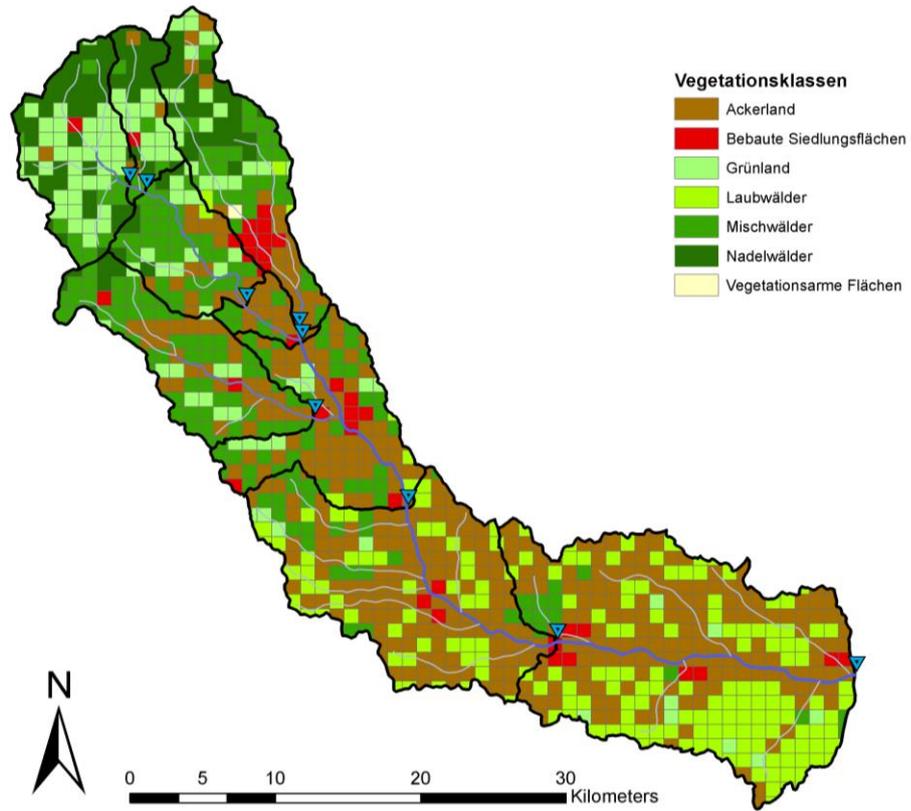


Abbildung 5-3: Darstellung der Landbedeckungsverteilung im Einzugsgebiet der Raab

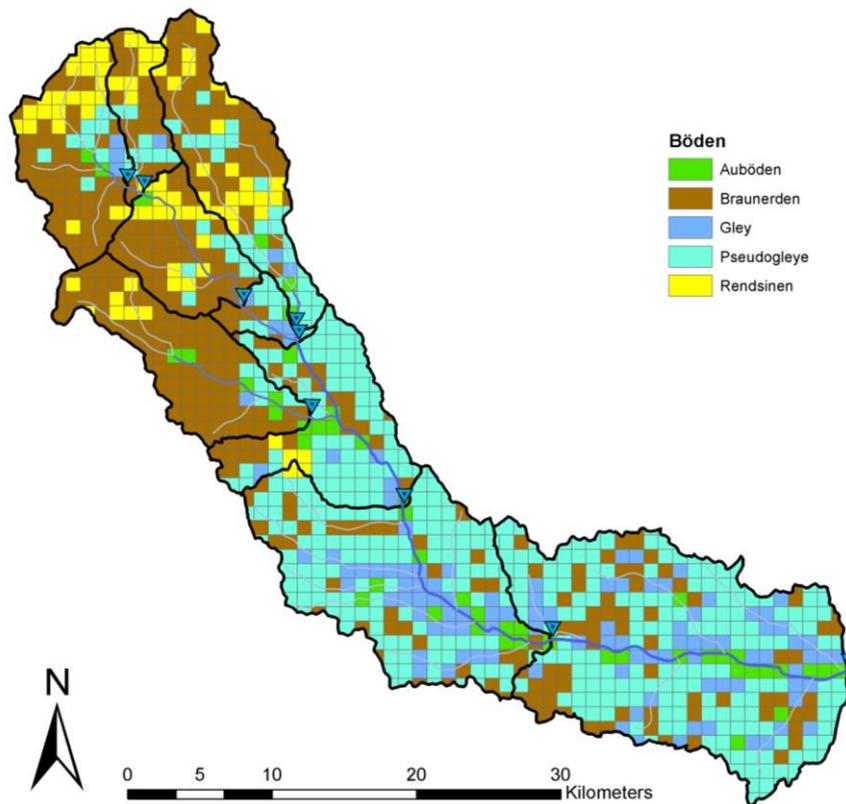


Abbildung 5-4: Darstellung der Bodenverteilung im Einzugsgebiet der Raab

5.2 Parameterschätzung

Zur Berechnung des simulierten Abflusses durch COSERO werden Ausgangswerte für die verschiedenen Modellparameter benötigt (im Anhang A.1 befindet sich eine vollständige Auflistung der Modellparameter). Für jede der 1083 erstellten Zellen wird ein Parametergrundwert vorausgesetzt. Basierend auf den Gebietseigenschaften (Landbedeckung, Höhenklassen, Bodenart und Hydrogeologie), Erfahrungswerten aus vorhergehenden COSERO Anwendungen (Schulz et al., 2016; Stanzel et al., 2008) und aus der Literatur entnommenen Werten erfolgt die Definition des Grundparameterdatensatzes (Herrnegger et al., 2012; Hiebl et al., 2009; Wesemann et al., 2018). Diese Grundparameter dienen als Ausgangspunkt für die automatische Kalibrierung des Modelles. Dabei wird durch Festlegung einer Zielfunktion versucht, das Grundparameterfeld so zu ändern, dass das neu gefundene Parameterfeld in der Lage ist, den beobachteten Abflusspegel besser zu simulieren als die Ausgangsparametereinstellungen. Gütekriterien helfen dabei, zu bestimmen, welche Parameterwerte bessere Simulationsergebnisse liefern.

Für einige Parameter ist es nicht sinnvoll, eine automatische Kalibrierung durchzuführen, da diese Parameter oftmals einen Zustand aus der Landnutzung oder einen Zustand für eine Jahreszeit wiedergeben. Diese Parameter (e.g. INTMAX, TMOM) werden a priori festgelegt und werden keiner weiteren Veränderung unterzogen. In Summe werden für den Kalibrierungsvorgang 15 verschiedene Werte optimiert. Diese 15 Parameter haben sich aus vorherigen Untersuchungen mit COSERO herauskristallisiert (Burgholzer, 2017; Schulz et al., 2016). Tabelle 5-1 beinhaltet die verwendeten Parameter mit den jeweils zugehörigen unteren bzw. oberen Grenzwerten. Innerhalb dieser Grenzen ist es der automatischen Kalibrierung möglich, Werte zu vergeben.

Tabelle 5-1: Verwendete Parameter für die automatische Kalibrierung mit unterer bzw. oberer Grenze. Erläuterungen der Parameter sind im Anhang A.1 angeführt. Die Einheiten der Parameter entsprechen der zeitlichen Auflösung der Eingangsgrößen.

	Parameter	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Einheit
1	CTMIN	1	7	[mm/°C/d]
2	CTMAX	1	7	[mm/°C/d]
3	NVAR	0	5	[-]
4	BETA	0.1	7	[-]
5	H1	1	20	[mm]
6	TAB1	1	50	[d]
7	M	40	1000	[mm]
8	TVS1	1	150	[d]
9	TVS2	50	1000	[d]
10	H2	1	50	[mm]
11	TAB2	1	500	[d]
12	TAB3	2500	10000	[d]
13	FKFAK	0.1	0.7	[-]
14	KBF	2000	10000	[d]
15	ETSLPCOR	0.8	1.5	[-]

5.3 Kalibrierung und Validierung

Der Kalibrierungsvorgang wurde mit den Pegel­daten der Station Feldbach durchgeführt, welche gewählt wurde, da sie die längste Reihe von Beobachtungsdaten besitzt (siehe Tabelle 3-1). Als Kalibrierungszeitraum wurden insgesamt 38 Jahre (01.01.1963 bis 31.12.2000) verwendet. Zur Validierung des Modelles wurden 14 Jahre (01.01.2001 bis 31.12.2014) herangezogen. Die Warmlaufphase von zwei Jahren dient dazu, dass die Modellkomponenten von COSERO (Speichermodule) einen plausiblen Startwert aufweisen. Die zwei Jahre der Warmlaufphase werden nicht zur Auswertung der Kalibrierung verwendet.

Tabelle 5-2: Einstellungen für Warmlaufphase, Kalibrierung und Validierung

Periode	Zeitraum
Warmlaufphase	01.01.1961 bis 31.12.1962
Kalibrierung	01.01.1963 bis 31.12.2000
Validierung	01.01.2001 bis 31.12.2014

Mit der gewählten Zielfunktion (Kapitel 4.3) bestehend aus einer Kombination aus dem KGE und dem PDIFF Kriterium und den definierten Rahmenbedingungen (Tabelle 5-1) für den Optimierungsalgorithmus kann das hydrologische Modell kalibriert werden. Ziel der Kalibrierung soll es sein, dass:

Das charakteristische hydrologische Verhalten der Raab wiedergeben wird

Die Hochwasserspitzenabflüsse gut abgebildet werden

Die Resultate aus dem automatischen Optimierungsvorgang waren bereits in der Lage, die hydrologische Charakteristik des Einzugsgebietes zu simulieren. In einem weiteren Schritt wurden die bereits optimierten Parameter einer manuellen Anpassung unterzogen. Die manuelle Anpassung der Parameter wurde vorgenommen, damit COSERO in der Lage ist, die simulierten Hochwasserspitzen noch besser an die beobachteten Hochwasserspitzen anzupassen. In Abbildung 6-1 werden die Simulationsergebnisse für die Kalibrierungsperiode dargestellt.

Die im folgenden Kapitel beschriebenen Ergebnisse wurden durch Anwendung der Modellparameter aus der manuellen Anpassung erstellt.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Resultate der durchgeführten Untersuchungen präsentiert. In Kapitel 6.1 wird die Auswertung der hydrologischen Modellierung vorgestellt und in Kapitel 6.2 werden die Ergebnisse der Hochwasserextremwertstatistik für die Modellläufe mit den Daten aus den regionalen Klimamodellen dargestellt. Abschließend wird in Kapitel 6.3 der Vergleich der Hochwasserextremwerte für die einzelnen Perioden und sozioökonomischen Szenarien beschrieben.

6.1 Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells für die Vergangenheit

Mit den definierten Parametereinstellungen für COSERO ergeben sich für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode des Pegels Feldbach folgende simulierten Ganglinien des Tagesmittelabflusses.

Abbildung 6-1 zeigt einen Ausschnitt der Kalibrierungsperiode (1963-1967) für den beobachteten und simulierten Hydrographen Feldbach. Es ist zu erkennen, dass COSERO mit den vorgenommenen Einstellungen in der Lage ist, das beobachtete Abflussverhalten (Saisonalität) der Raab zufriedenstellend wiederzugeben. Speziell die Hochwasserspitzen werden in ihrer Größe sowie ihrem Auftrittszeitpunkt gut simuliert. Bei den Niederwasserabflüssen ergibt sich ebenfalls größtenteils eine Übereinstimmung mit der Beobachtung, erst in den letzten Jahren (1998,1999 und 2000) der Kalibrierungsperiode wird der Niederwasserabfluss leicht überschätzt. Für die gesamte Kalibrierungsperiode ergibt sich ein KGE von 0.77. Im Anhang Kapitel A.2 befinden sich die restlichen Ausschnitte der Kalibrierungsperiode für den Pegel Feldbach.

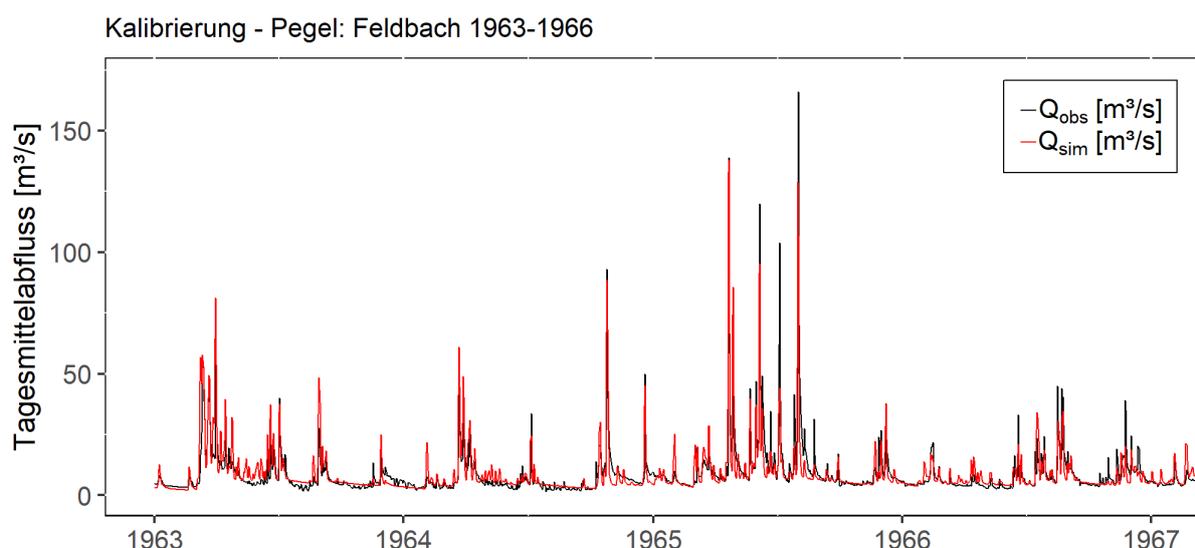


Abbildung 6-1: Gegenüberstellung des beobachteten und simulierten Hydrographen für einen Ausschnitt (1963-1966) der Kalibrierungsperiode für den Pegel Feldbach. Für die gesamte Kalibrierungsperiode ergibt sich ein KGE von 0.77.

Abbildung 6-2 zeigt einen Ausschnitt (2005-2008) aus der Validierungsperiode für die beobachtete und simulierte Ganglinie des Pegels Feldbach. Auch für diese Periode ergibt sich ein ähnliches Verhalten wie in der Kalibrierungsperiode. Dem Modell ist es möglich, den Auftrittszeitpunkt und den Durchfluss der beobachteten Hochwasserereignisse zufriedenstellend zu simulieren und nachzubilden. Der berechnete KGE für die gesamte Validierungsperiode beträgt 0.76. Im Anhang, Kapitel A.3 befinden sich die weiteren Ausschnitte der Validierungsperiode.

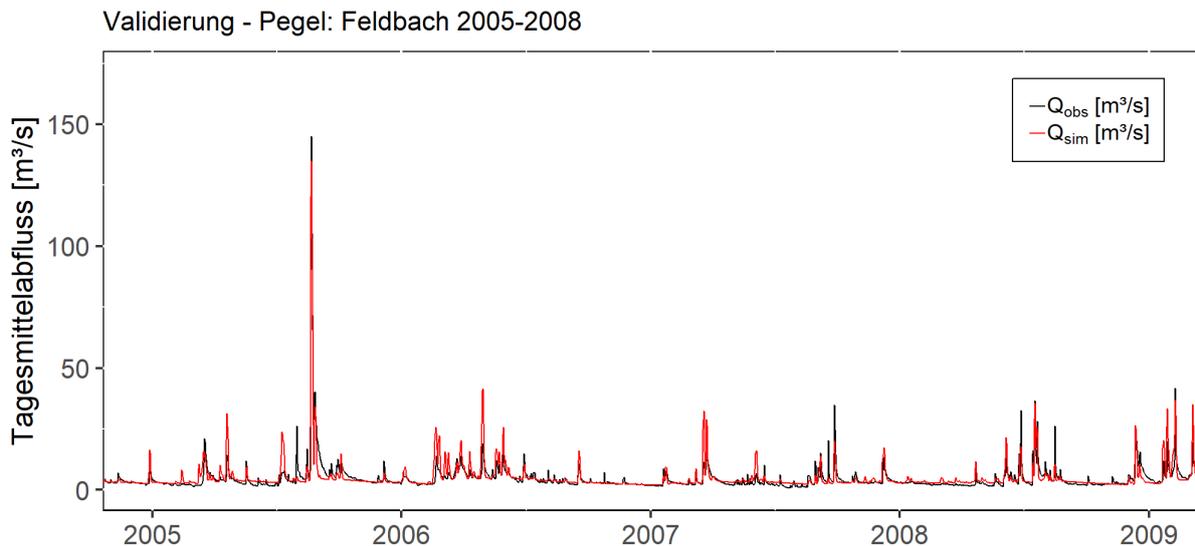


Abbildung 6-2: Gegenüberstellung des beobachteten und simulierten Hydrographen für die Validierungsperiode für den Pegel Feldbach. Für die gesamte Validierungsperiode ergibt sich ein KGE von 0.76.

Für eine weitere Beurteilung der Simulation der Hochwasserspitzen werden nachfolgend Ausschnitte mit einer Dauer von einem Jahr aus der Kalibrierungsperiode dargestellt. In Abbildung 6-3 ist für das Jahr 1965 die Ganglinie des simulierten und beobachteten Abflusses dargestellt. In diesem Jahr befindet sich das größte beobachtete Hochwasserereignis, ebenfalls befinden sich drei weitere Ereignisse in diesem Zeitraum. Anhand des Hydrographen ist erkennbar, dass COSERO auch hier den Auftrittszeitpunkt sowie den Hochwasserscheitelwert zufriedenstellend nachbilden kann. Für den höchsten Abflusswert ergibt sich eine Abweichung von 22% und für den zweithöchsten Wert ergibt sich eine Abweichung von 0,8%. Der berechnete KGE für den vorliegenden Ausschnitt von 0,84 bestätigt das gute Simulationsverhalten des Modelles.

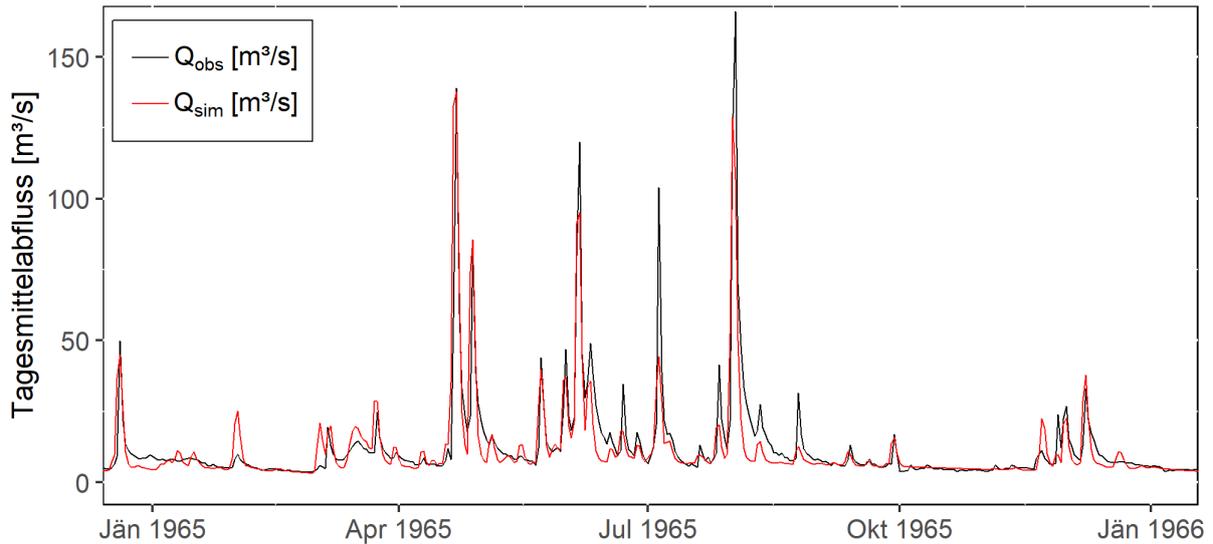


Abbildung 6-3: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Kalibrierungsperiode für das Jahr 1965. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,84.

In Abbildung 6-4 ist der Ausschnitt des Hydrographen aus dem Jahr 1972 dargestellt. Auch hier werden das beobachtete Abflussverhalten, die Schneeschmelze in den Frühlingsmonaten und niederschlagsintensive Ereignisse in den Sommermonaten von der Simulation zufriedenstellend nachgebildet. Für den gezeigten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,88.

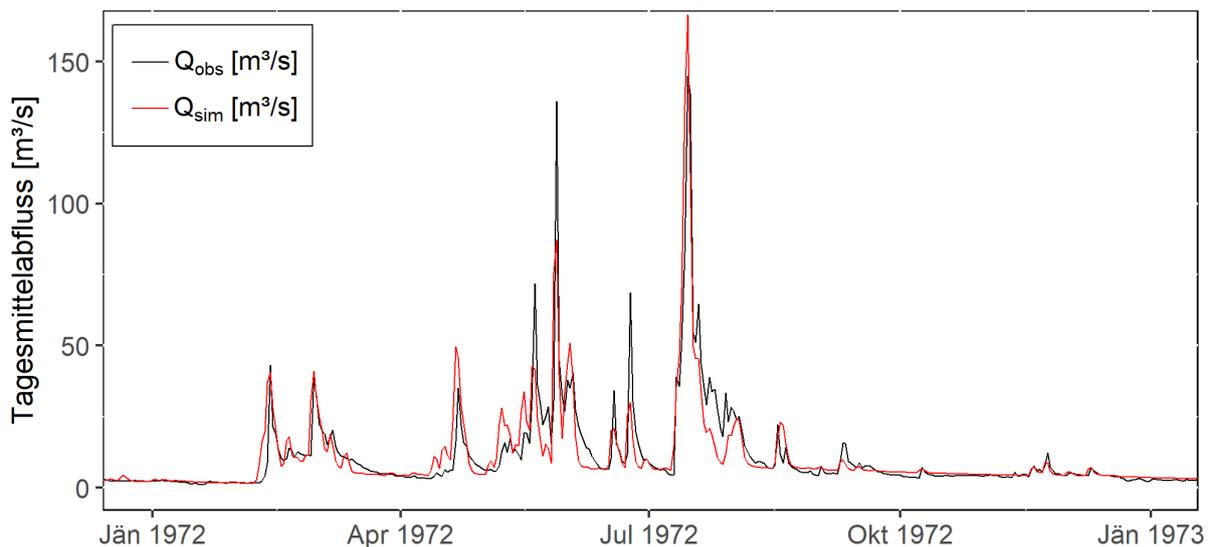


Abbildung 6-4: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Kalibrierungsperiode für das Jahr 1972. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,88.

Die Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 zeigen Ausschnitte des Hydrographen aus der Validierungsperiode. Für das größte aufgetretene Hochwasser im Jahr 2005 erzielt die Simulation eine Abweichung von -7 % gegenüber dem beobachteten Scheitelabfluss. Für diesen Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,91.

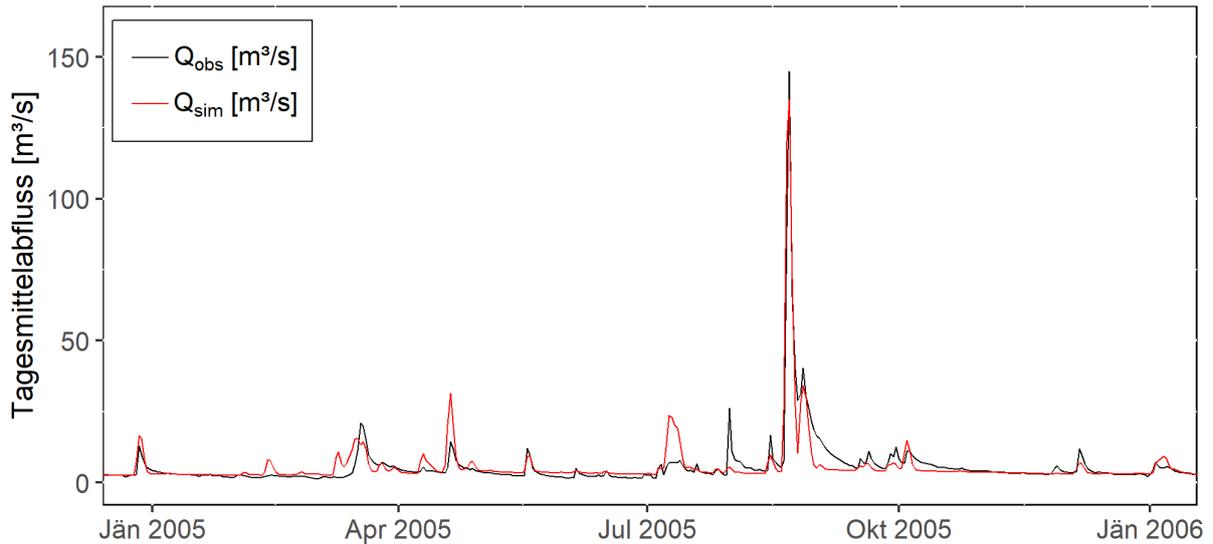


Abbildung 6-5: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Validierungsperiode für das Jahr 2006. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,84.

Auch für das Jahr 2009 (Abbildung 6-6) erzielt das aufgesetzte hydrologische Modell akzeptable Ergebnisse, der resultierende KGE für diesen Ausschnitt ergibt 0,82.

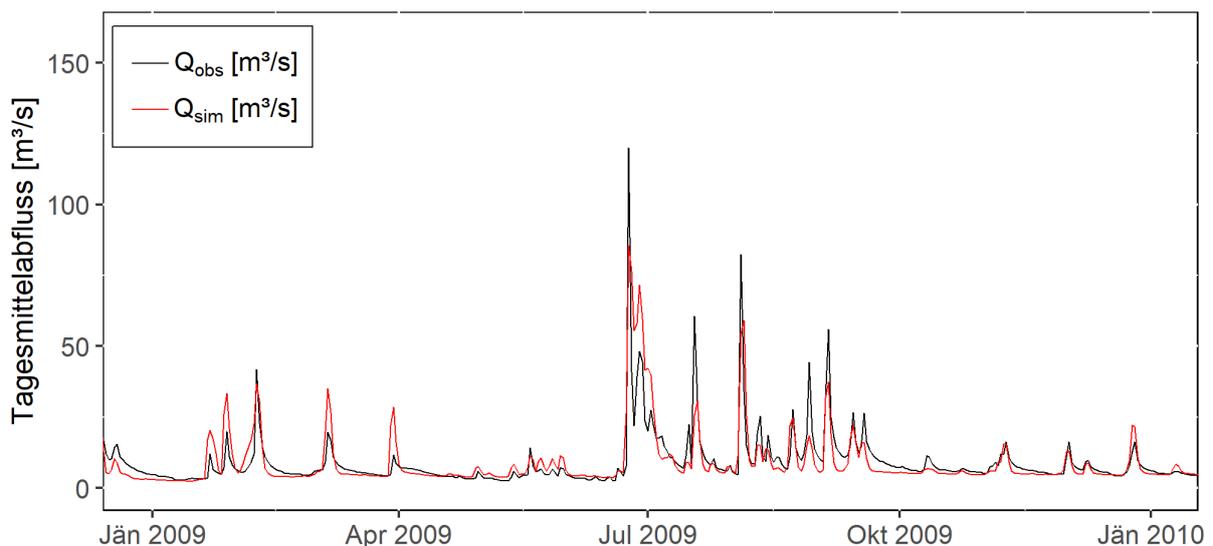


Abbildung 6-6: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Validierungsperiode für das Jahr 2010. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,82.

In einem weiteren Schritt werden die langjährigen monatlichen Mittelabflusshöhen der Beobachtung und der Simulation verglichen. In Abbildung 6-7 sind die Simulationsergebnisse dieser Betrachtung für den Pegel Feldbach und für die Kalibrierungsperiode dargestellt. Der berechnete KGE für die Kalibrierungsperiode beträgt 0,77. In den Frühlingsmonaten wird der Abfluss von der Simulation stark überschätzt (20%), in den Monaten Juni bis Dezember wird das beobachtete Abflussverhalten der Raab gut abgebildet.

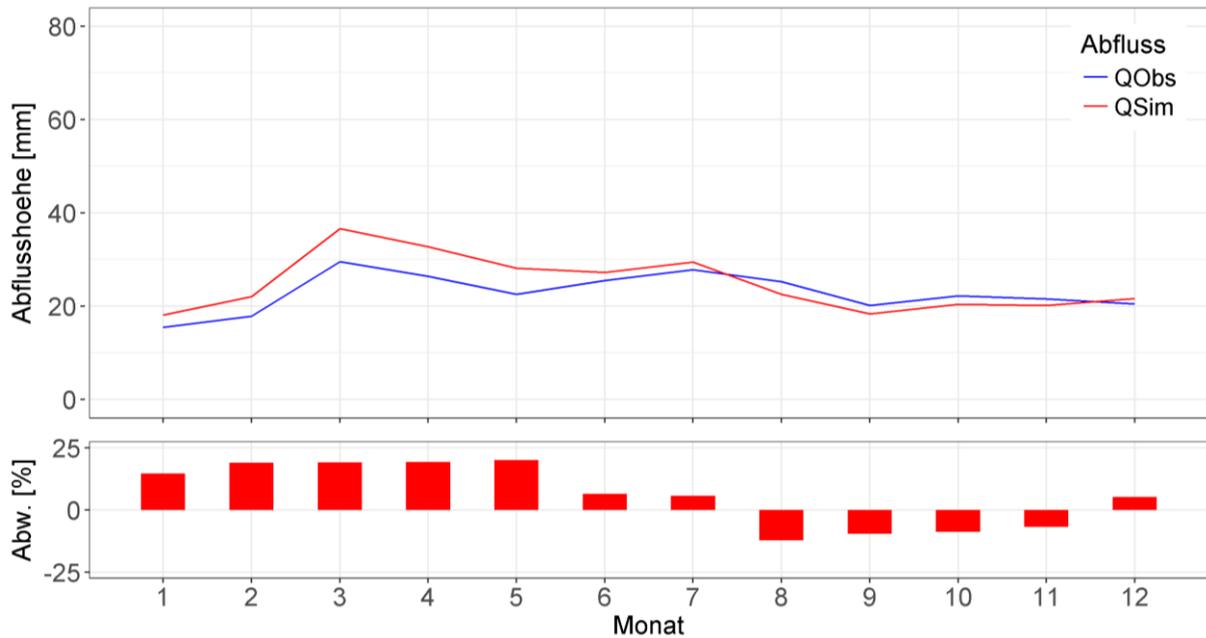


Abbildung 6-7: Langjährige monatliche Mittelabflusshöhe für den Pegel Feldbach Kalibrierungsperiode (1963-2000), blaue Linie Q_{obs} und rote Linie Q_{sim} . Untere Abbildung zeigt die prozentuelle Abweichung der Simulation zur Beobachtung.

Abbildung 6-8 zeigt die Ergebnisse für die Validierungsperiode, der berechnete KGE ergibt einen Wert von 0,76. Die Abweichungen in den einzelnen Monaten weisen ein ähnliches Verhalten auf wie in der Kalibrierungsperiode. Das installierte hydrologische Modell erzeugt mit der definierten Zielfunktion ein zufriedenstellendes Simulationsergebnis und ist in der Lage, die beobachtete hydrologische Abflusscharakteristik der Raab wiederzugeben. Das validierte Modell kann in weiterer Folge zur Hochwasserextremwertbestimmung verwendet werden.

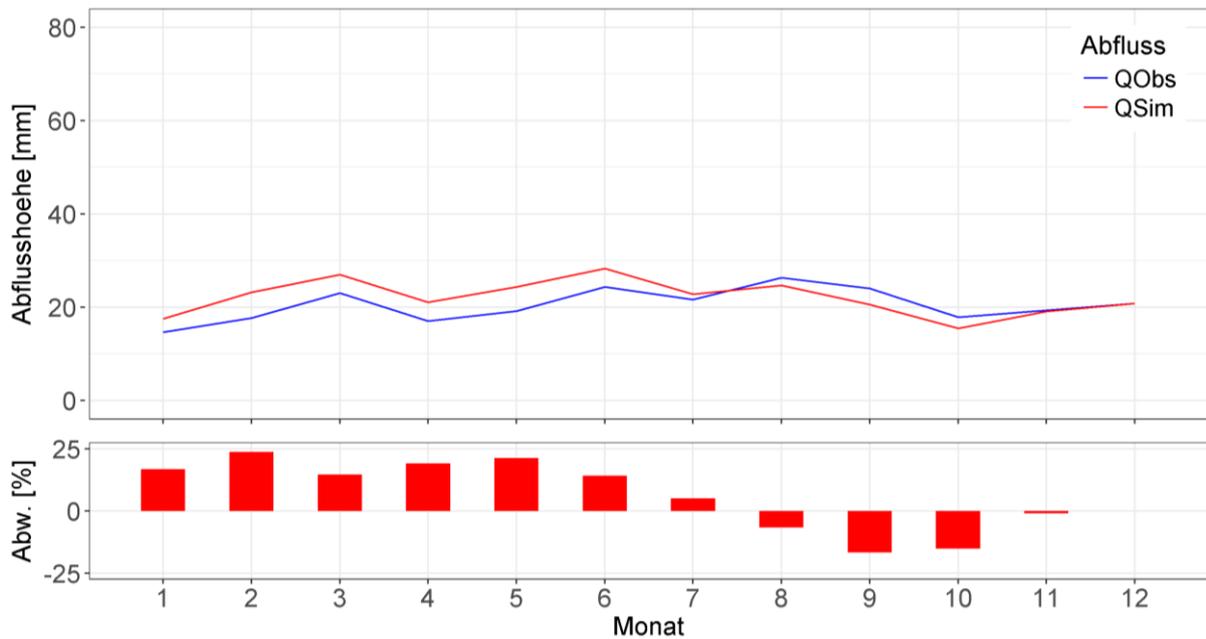


Abbildung 6-8: Langjährige monatliche Mittelabflusshöhen für den Pegel Feldbach Validierungsperiode (2001-2014), blaue Linie Q_{obs} und rote Linie Q_{sim} . Untere Abbildung zeigt die prozentuelle Abweichung der Simulation zur Beobachtung.

Die angeführten Ergebnisse für die Ganglinien mit Tagesmittelabflüssen und die langjährigen monatlichen Mittelabflusshöhen wurden mit den Parametereinstellungen aus der manuellen Anpassung durchgeführt. Die manuelle Anpassung basiert dabei auf den erstellten Modellparametern aus der automatischen Kalibrierung mit der Zielfunktion KGE 85% und PDIFF 15%. Aus diesen Einstellungen wurden die Modellparameter H1 und TAB1, welche die Eigenschaften des Speichermoduls für die Bildung des Oberflächenabflusses beschreiben (siehe Anhang A.1), um 20% verringert, wodurch zusätzlich zum PDIFF-Einfluss eine weitere Verbesserung bei der Abbildung von Hochwasserspitzen erreicht werden konnte. Der Einfluss von PDIFF auf das N-A-Modell wird im Unterpunkt *Einfluss PDIFF* beschrieben. In Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 werden die Ergebnisse für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Simulationsgüte in Form des KGE, sowohl in der Kalibrierungsperiode als auch in der Validierungsperiode, durch die Anwendung des PDIFF verringert. Beim Vergleich von der Optimierungsstrategie KGE 100% und der Strategie mit Anwendung des PDIFF verringert sich der KGE um 0.01, hingegen erhöht sich die PDIFF-Güte um 1.33 Einheiten. Für die Validierung ergibt sich ein ähnliches Verhalten mit einem Unterschied für den KGE von - 0.02 und einer Steigerung des PDIFF um 0.46 Einheiten. Die manuelle Anpassung bewirkt ein ähnliches Verhalten, wobei die Güte des PDIFF Kriteriums unter Einbußen der KGE- Güte abermals erhöht werden kann.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Kalibrierungsperiode 1963-2000

	NSE	KGE	CORR	PDIFF
KGE 100%	0.68	0.83	0.84	-1.71
KGE 85% PDIFF 15%	0.65	0.82	0.84	-0.38
manuelle Anpassung	0.58	0.77	0.82	-0.09

Tabelle 6-2: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Validierungsperiode 2001-2014

	NSE	KGE	CORR	PDIFF
KGE 100%	0.71	0.84	0.85	0.13
KGE 85% PDIFF 15%	0.67	0.82	0.85	0.59
manuelle Anpassung	0.60	0.76	0.84	0.60

Einfluss PDIFF

Der Einfluss des PDIFF-Kriteriums kann anhand einer Gegenüberstellung der beobachteten und der simulierten Spitzenabflüsse grafisch dargestellt werden. Abbildung 6-9 zeigt für den Pegel Feldbach die 33 gewählten Hochwasserereignisse, die zur Berechnung des PDIFF-Kriteriums verwendet wurden. Ausgehend von einer automatischen Kalibrierung mit einer Zielfunktion mit KGE 100% (schwarze Punkte) und einer automatischen Kalibrierung mit einer Kombination aus KGE 85% und PDIFF 15% (rote Punkte) als Zielfunktion ist erkennbar, dass sich bei den Ergebnissen mit der Zielfunktion KGE 85% und PDIFF 15% eine geringere Unterschätzung der HQ-Spitzen ergibt. Speziell bei den sechs Werten $Q_{\text{obs}} > 110 \text{ m}^3/\text{s}$ stellt sich eine deutliche Verbesserung der HQ-Simulationsergebnisse ein.

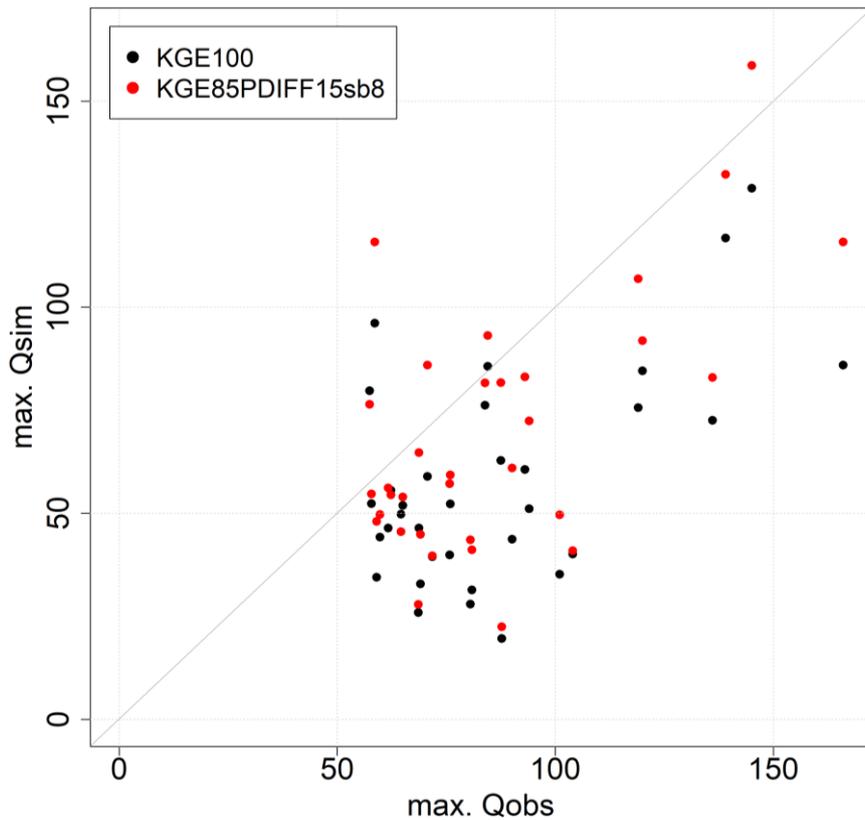


Abbildung 6-9: Vergleich der Ergebnisse der HQ-Spitzen mit PDIFF (rote Punkte) und ohne PDIFF (schwarze Punkte) Kriterium

In Abbildung 6-10 werden die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung mit der Zielfunktion KGE 85% und PDIFF 15% und der zusätzlichen manuellen Anpassung der Modellparameter aus der Kalibrierung mit KGE 85% und PDIFF 15% verglichen. Durch die manuelle Anpassung konnte eine weitere Verbesserung der simulierten Hochwasserscheitelwerte für den Pegel Feldbach erreicht werden. In beiden Grafiken ist die 1:1 Linie dargestellt, wobei Werte, die sich auf der Linie befinden, als exakte Wiedergabe der gemessenen Werte betrachtet werden können. Die Anwendung einer Zielfunktion mit einer gewichteten Kombination aus KGE und PDIFF erzielt bereits eine erhebliche positive Entwicklung bei der Simulation der Hochwasserspitzen. Das zusätzliche Einbringen der IWHW-Expertise in Form der manuellen Anpassung der Modellparameter konnte eine weitere Steigerung bei der Abbildung von Hochwasserspitzen bewirken.

Das PDIFF Kriterium hat aber nicht nur positiven Einfluss. Bei manchen Werten, die bereits ein gutes Verhalten aufweisen, wird durch den Einsatz von PDIFF das Ergebnis verschlechtert. In diesem Fall wird das Verhalten von Werten, die bereits eine Überschätzung der Hochwasserspitze simulieren, zusätzlich verstärkt. Dieser Effekt hat beim Anwenden der manuellen Anpassung ebenfalls einen negativen Einfluss. Betrachtet man die sechs höchsten Werte in Abbildung 6-10, findet eine starke Steigerung der

Abbildungsgüte für fünf Werte statt, nur bei einem Wert wird eine Überschätzung des Scheitelwertes gefördert.

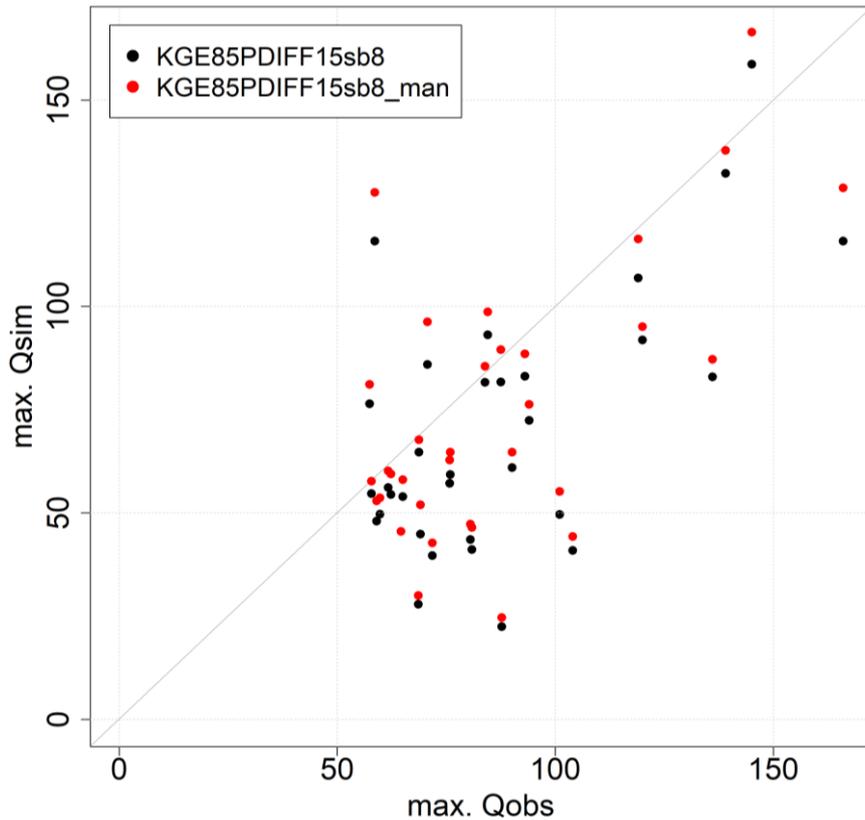


Abbildung 6-10: Vergleich der Ergebnisse der HQ-Spitzen mit PDIFF-Kriterium (schwarze Punkte) und mit zusätzlicher manueller Anpassung (rote Punkte)

Das N-A-Modell dient in weiterer Folge als Werkzeug für die Simulation der Abflussganglinie der verschiedenen RCMs, aus denen die größten Hochwasserereignisse aus jedem Jahr extrahiert werden und die als Grundlage für die Berechnung der Extremwertstatistik dienen. Aufgrund der Tatsache, dass für die weiteren Analysen nur die Hochwasserscheitelwerte benötigt werden, war es nötig, Einstellungen für die Modellparameter zu finden, die es ermöglichen, eine Simulation zu erstellen, die in der Lage ist, das beobachtete Abflussverhalten bezogen auf Hochwasserspitzen zufriedenstellend zu reproduzieren. Der Einsatz einer Mehrzielfunktion und die anschließende manuelle Anpassung führten zu einem befriedigenden Ergebnis. Somit wurden die Einstellungen für die weiteren Analysen angewendet.

6.2 Hochwasserextremwerte für die Vergangenheit

Die verwendeten Pegelmessdaten für das hydrologische Modell haben eine zeitliche Auflösung von 24 Stunden. Mit Hilfe eines linearen Regressionsmodells soll der Zusammenhang von Tagesmittelabflüssen und Stundenmittelabflüssen beschrieben werden. In Abbildung 6-11 sind die beiden zeitlich unterschiedlichen aufgelösten Durchflussdaten für den Pegel Feldbach in Form eines Streudiagrammes dargestellt.

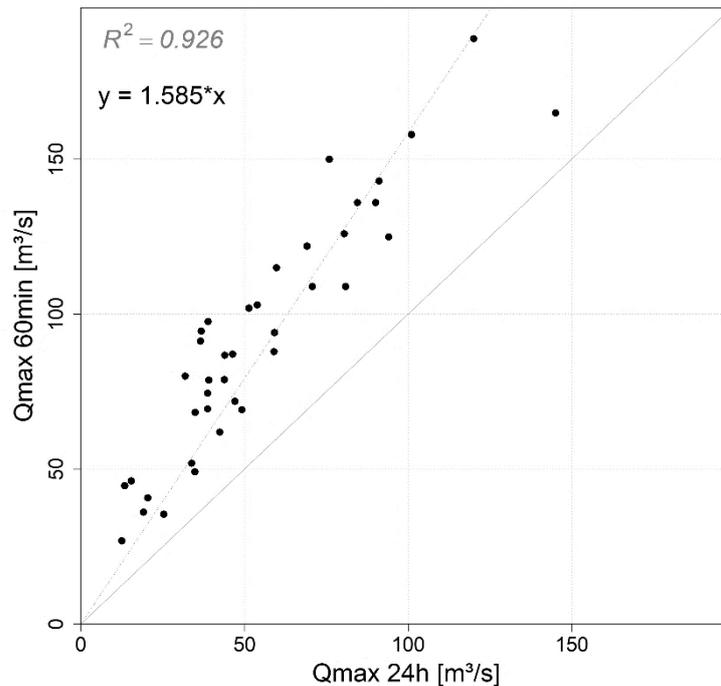


Abbildung 6-11: Streudiagramm der Daten aus den Tagesmittelabflüssen und den Stundenmittelabflüssen

Die durchgeführten Analysen ergeben dabei ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,926$ und für die Regressionsgerade ergibt sich eine Steigung von 1,585. Anhand der gefundenen Gerade kann der stündliche Datensatz mit der Funktion

$$Q_{max\ 60min} = 1,585 * Q_{max\ 24h} \quad (27)$$

beschrieben werden.

Das validierte hydrologische Modell wird im nächsten Schritt mit den verschiedenen regionalen Klimamodelldaten (Niederschlag und Temperatur) angetrieben, anschließend werden die dabei simulierten Ganglinien des Tagesmittelabflusses für die Berechnung der drei vorab definierten Hochwasserschätzwerte HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300} verwendet. Zur Auswertung werden die Methoden, welche in Kapitel 4.5 beschrieben sind, angewendet. Eine Überprüfung des Verhaltens der berechneten Schätzwerte aus den verschiedenen RCMs erfolgt anhand eines Vergleiches der historischen Periode (1971-

2000) mit den Werten aus den Beobachtungen. Diese Gegenüberstellung ist in Abbildung 6-12 dargestellt.

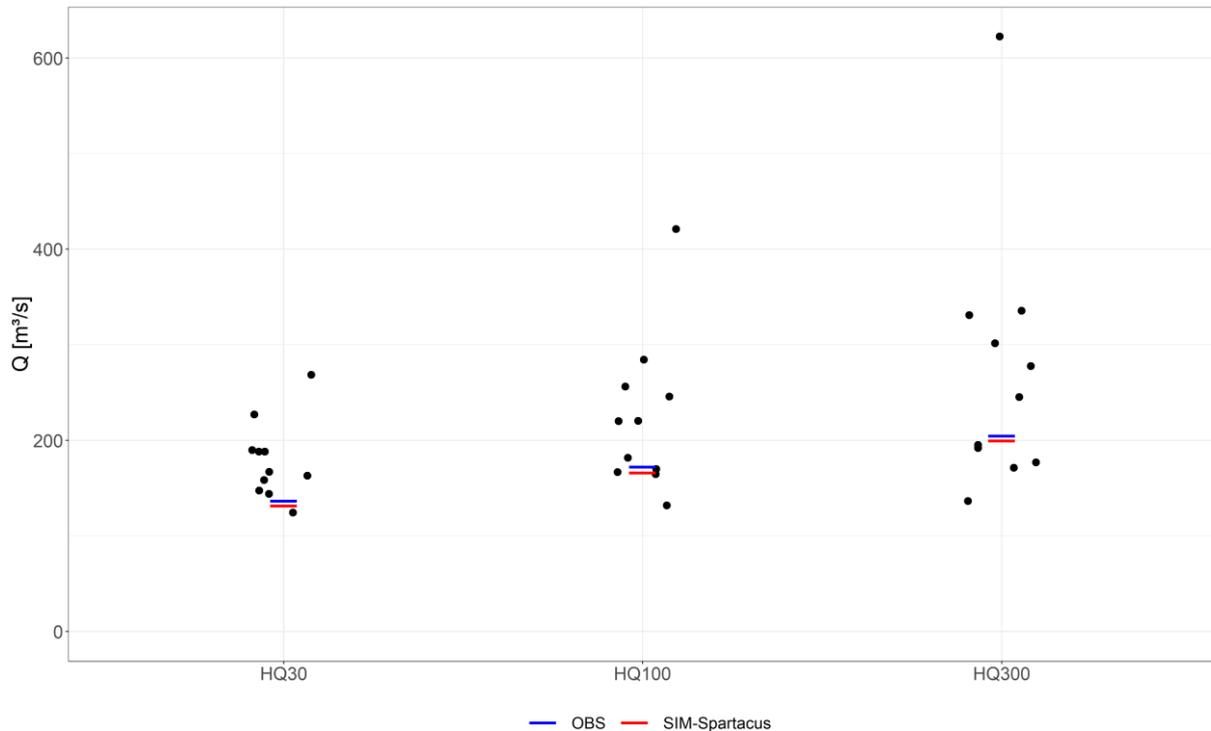


Abbildung 6-12: Vergleich der historischen (1971-2000) Hochwasserextremwertstatistik für beobachtete (blauer Balken) und simulierte Werte aus SPARTACUS Datensatz (roter Balken) und abgeleitete Hochwasserextremwerte aus den regionalen Klimamodellen (schwarze Punkte)

Betrachtet man die Schätzwerte für das Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall von 30 Jahren, überschätzen zehn der elf Schätzwerte aus den RCM-Modellen den berechneten Schätzwert aus der Beobachtung, wohingegen ein Modell geringfügig unterhalb des Schätzwertes der Beobachtung liegt. Der höchste Wert liegt dabei bei $268 \text{ m}^3/\text{s}$, der niedrigste bei $124 \text{ m}^3/\text{s}$ und die Beobachtung liegt bei $137 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Schätzwerte für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren weisen eine noch größere Streuung als die Schätzwerte für das HQ₃₀ auf. Der höchste Wert liegt dabei bei $421 \text{ m}^3/\text{s}$ und der niedrigste Wert bei $132 \text{ m}^3/\text{s}$, für die Beobachtung ergibt sich ein Wert von $172 \text{ m}^3/\text{s}$.

Für den Vergleich der Schätzwerte mit einem Wiederkehrintervall von 300 Jahren ergibt sich ein Höchstwert von $622 \text{ m}^3/\text{s}$ und ein Minimum von $136 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Ergebnis für die beobachteten Abflüsse beträgt $205 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Höchstwerte für die drei Wiederkehrintervalle entstammen alle aus demselben RCM. Für dieses, mit der Modellkennung SMHI-RCA4 und dem Antriebsmodell ICHEC-EC-EARTH im Hintergrund, wurde beschlossen, es nicht für die weiteren Analysen zu verwenden, da eine zu große Abweichung zur Beobachtung vorhanden ist. Diese Abweichungen können als Resultat aus der Anpas-

sung der Verteilungsfunktion an die vorhandene Stichprobe entstanden sein. Ebenfalls ein entscheidender Faktor für diese Abweichungen ist die Größe der Stichprobe. Im Falle der Raab besitzen die RCMs eine Länge von 30 Jahren, was für die Berechnung der Extremwertstatistik (AMS Ansatz) eine Stichprobe von $30 HQ_{\max}$ ergibt. Laut Leitfaden BMLFUW (2011) sind 30 Jahre die unterste Grenze, um aussagekräftige Ergebnisse aus der Extremwertstatistik zu beziehen. Besonders bei der Berechnung von HQ_{100} und HQ_{300} treten große Unsicherheiten auf, da sich auch diese Werte auf die 30-jährige Periode stützen. Nur durch Extrapolation aus dieser kurzen Periode ist es möglich, Aussagen für ein 100- bzw. 300-jährliches Ereignis zu treffen. Wie in Abbildung 6-12 ersichtlich ist, wird der Wertebereich, den die RCMs für die unterschiedlichen Wiederkehrintervalle einnehmen, schrittweise größer, was als indirektes Signal der Unsicherheiten gedeutet werden kann. Als Resultat der Extremwertstatistik können zehn von den elf analysierten RCMs für die weiteren Arbeitsschritte verwendet werden. In Tabelle 16-3 sind die Ergebnisse sowie deren dazugehörige Ober- und Untergrenze des Konfidenzbereiches aufgelistet.

6.3 Ergebnisse Hochwasserextremwerte

Für die gewählten zehn Modelle wurden Auswertungen für die Extremwerte für die drei Perioden historisch, nahe Zukunft und ferne Zukunft mit jeweils den beiden sozioökonomischen Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 durchgeführt. Die Resultate der einzelnen RCMs beinhalten dabei immer den berechneten Schätzwert und das dazugehörige Konfidenzintervall mit einem Konfidenzniveau von $\alpha = 0.1$. Zusätzlich zu den einzelnen Modellen wurde die Annahme getroffen, dass die Auftrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Modelle gleich ist. Das bedeutet, dass jeder Modelllauf eine mögliche Realisierung des zukünftigen Klimas darstellt, welche mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten kann. Basierend auf dieser Annahme wurden die simulierten Ganglinien zu einer künstlich generierten Ganglinie zusammengesetzt. Somit konnte aus den einzelnen 30-jährigen Zeitreihen der Modelle eine synthetische Zeitreihe mit einer Aufzeichnungsdauer von 300 Jahren gewonnen werden. Aus der neu erstellten Ganglinie war es möglich, konsistentere Schätzwerte bzw. engere Konfidenzintervalle durch Anwendung der Extremwertstatistik zu berechnen. Hintergrund ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass die Stichprobenanzahl durch die Zeitreihe von 300 Jahren signifikant ansteigt.

In den folgenden Grafiken (Abbildung 6-13, Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15) werden die Ergebnisse für die drei Wiederkehrintervalle dargestellt. Es erfolgt eine Aufteilung in die drei Perioden (historisch, nahe Zukunft und ferne Zukunft). Für die nahe und ferne Zukunft erfolgt eine zusätzliche Untergliederung in die beiden Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Insgesamt entstehen somit fünf Untergliederungen, welche jeweils Informationen aus den einzelnen RCMs und der künstlich erstellten Ganglinie besitzen. Für die historische Periode werden ebenfalls die Schätzwerte, welche sich aus den Beobachtungen und Simulationsläufen ergeben, dargestellt (blauer bzw. roter Balken). Die abgebildeten Boxplots basieren auf den jeweils zehn berechneten Schätzwerten aus den RCM-Modellen, welche zusätzlich als schwarze Punkte mit deren dazugehörigen Vertrauensbereichen abgebildet sind. Die violette Markierung repräsentiert die Ergebnisse für die Schätzwerte und die dazugehörigen Vertrauensbereiche für die synthetisch erstellten 300-jährige Zeitreihen. In den Abbildungen ist gut zu erkennen, wie sich die einzelnen RCM-Modelle für die jeweilige Periode und das jeweilige Szenario unterschiedlich verhalten.

6.3.1 Auswertung für das Wiederkehrintervall von 30 Jahren

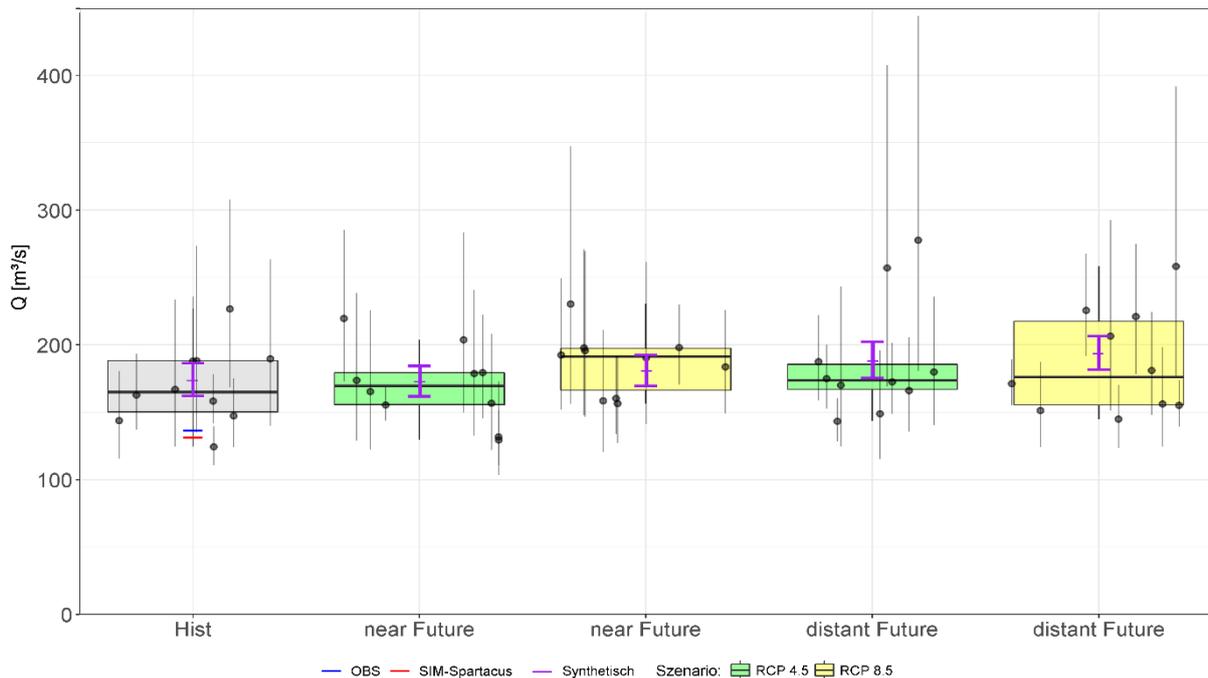


Abbildung 6-13: Vergleich der einzelnen Perioden und sozioökonomischen Szenarien für die berechneten HQ_{30} Schätzwerte. Schwarze Punkte: Schätzwerte und Vertrauensbereich abgeleitet aus den einzelnen RCM-Modellen, violette Markierung: berechnete Schätzwerte aus der künstlich erstellten Ganglinie, roter Balken: Schätzwert aus der Simulation des SPARTACUS-Datensatzes und blauer Balken: Ergebnis aus der Beobachtung. Die Boxplots basieren auf den zehn einzelnen Schätzwerten, abgeleitet aus den RCM-Modellen und zeigen für jede Periode und jedes Szenario die Verteilung der Schätzwerte innerhalb einer Betrachtung.

In Kapitel 6.2 wurde bereits festgehalten, dass die Resultate aus den Extremwertberechnungen der einzelnen RCMs die Resultate aus den Beobachtungen überschätzen. Betrachtet man den Unterschied zwischen dem Schätzwert aus der Beobachtung und dem Median aus den zehn RCMs, beträgt der Unterschied $28 \text{ m}^3/\text{s}$, was einer relativen Abweichung von 20 % entspricht. Für die Schätzwerte aus den Projektionen für die Zukunft kann es ebenfalls möglich sein, dass diese Überschätzung, zusätzlich zu den Unsicherheiten aus den Klimamodellen, die berechneten Werte beeinflusst. Betrachtet man den Interquartilsabstand des Boxplots, (Bereich zwischen unterem (25 %) und oberem (75 %) Quartil) können Rückschlüsse auf die Fähigkeit des Modells, ähnliche Ergebnisse zu produzieren, gezogen werden. Je größer dieser Bereich ist, desto unterschiedlicher verhalten sich die einzelnen Modelle. Die Schätzwerte selbst weisen eine hohe Streuung auf, es treten Werte im Bereich zwischen 124 und $227 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Betrachtet man zusätzlich die Konfidenzintervalle, erhöht sich diese bereits hohe Streuung nochmals und deckt einen Wertebereich von 111 - $308 \text{ m}^3/\text{s}$ ab. Die angeführten Werte beziehen sich nur auf die historische Periode, in Tabelle 6-4 werden die Werte aus den anderen Perioden bzw. Szenarien aufgelistet. Die Auswertungen aus der künstlich erstellten Ganglinie zeigen eine Verringerung der Spannweite des Vertrauensbereiches und grenzen den möglich aufzutretenden Schätzwert stark ein.

Vergleicht man den Schätzwert aus der 300-jährigen Ganglinie mit der Beobachtung, überschätzt dieser ebenfalls die Beobachtung um $37 \text{ m}^3/\text{s}$, was einer prozentuellen Abweichung von 27 % entspricht.

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Schätzwerte (RCM, Q_{obs} , künstliche Q) mit einem Wiederkehrintervall von 30 Jahren für die verschiedenen Perioden und Szenarien. Schätzwerte und Konfidenzgrenzen in m^3/s . Umrahmte Zahlen zeigen die kleinste untere und die größte obere Konfidenzgrenze der jeweiligen Einteilung an und zeigen auf, in welcher möglichen Bandbreite die abgeleiteten Schätzwerte aus den RCM-Modellen liegen können.

	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Periode: historisch				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 165	124	167	234	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	150	188	236	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	140	190	264	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	111	124	140	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	135	188	274	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	137	163	194	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	124	148	175	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	142	158	178	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	168	227	308	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	116	144	181	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	162	174	187	Werte aus künstliche Ganglinie
	112	137	168	Werte aus der Beobachtung
Periode: Nahe Zukunft; Szenario: RCP4.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 170	150	204	284	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	122	157	208	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	103	132	173	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	122	166	226	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	132	179	241	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	129	174	239	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	145	179	223	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	144	155	169	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	173	220	286	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	111	130	152	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	162	173	185	Werte aus künstlicher Ganglinie

Ergebnisse

Periode: Nahe Zukunft; Szenario: RCP 8.5				
	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Median aus den Schätzwerten der RCM: 192	127	156	192	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	148	198	271	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	141	190	261	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	156	230	347	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	149	184	226	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	134	160	192	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	147	196	270	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	152	193	250	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	171	198	230	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	121	159	211	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
170	181	193	Werte aus künstlicher Ganglinie	
Periode: Ferne Zukunft; RCP 4.5				
	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Median aus den Schätzwerten der RCM: 174	141	180	236	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	149	173	202	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	169	257	408	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	115	149	196	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	129	143	160	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	181	278	444	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	136	166	206	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	158	188	222	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	153	175	200	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	125	170	243	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
176	188	202	Werte aus künstlicher Ganglinie	
Periode: Ferne Zukunft; Szenario: RCP8.5				
	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Median aus den Schätzwerten der RCM: 176	124	151	187	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	139	155	174	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	151	207	293	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	124	156	199	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	177	258	392	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	155	171	189	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	148	181	225	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	178	221	275	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	192	226	268	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	123	145	170	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
182	194	207	Werte aus künstlicher Ganglinie	

6.3.2 Auswertung für das Wiederkehrintervall von 100 Jahren

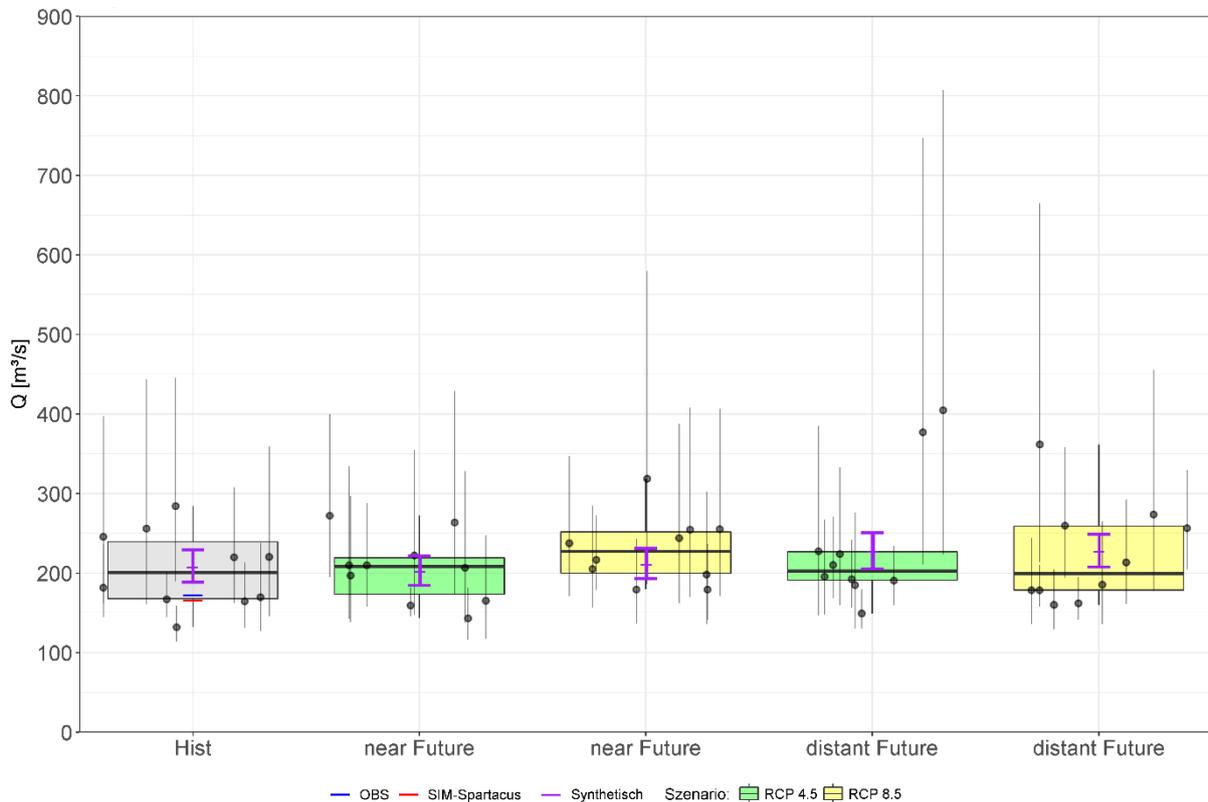


Abbildung 6-14: Vergleich der einzelnen Perioden und sozioökonomischen Szenarien für die berechneten HQ_{100} Schätzwerte. Schwarze Punkte: Schätzwerte und Vertrauensbereich, abgeleitet aus den einzelnen RCM-Modellen, violette Markierung: berechnete Schätzwerte aus der künstlich erstellten Ganglinie, roter Balken: Schätzwert aus der Simulation des SPARTACUS-Datensatzes und blauer Balken: Ergebnis aus der Beobachtung. Die Boxplots basieren auf die zehn einzelnen Schätzwerte abgeleitet aus den RCM-Modellen und zeigen für jede Periode und jedes Szenario die Verteilung der Schätzwerte innerhalb einer Betrachtung.

Der aus den zehn RCMs berechnete Median für das Wiederkehrintervall von 100 Jahren weist ein ähnliches Verhalten wie der für das Wiederkehrintervall von 30 Jahren auf, wobei die Beobachtung in der Vergangenheit um $29 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. um 16% überschätzt wird. Diese Überschätzung kann ebenfalls eine mögliche Beeinflussung der Schätzwerte für die weiteren Projektionen haben. Die Streuung der einzelnen Werte für die historische Periode bewegt sich zwischen 132 und $284 \text{ m}^3/\text{s}$. Wird zusätzlich der Vertrauensbereich in diese Betrachtung mit einbezogen, ergeben sich für die Streuung Werte zwischen 114 und $445 \text{ m}^3/\text{s}$. Es ist erkennbar, dass die Vertrauensbereiche im Vergleich zu jenen des 30-jährigen Wiederkehrintervalls steigen. Dieses Verhalten ist auf die Unsicherheiten, welche bei der Anpassung der Verteilungsfunktion für die Extremwertstatistik und der zusätzlichen Extrapolation aus dem 30-jährigen Stichprobenumfang entstehen, zurückzuführen. Dieser Effekt konnte durch den generierten 300-jährigen Datensatz verringert werden. Dabei ergeben sich für die historische Periode ein Schätzwert von $208 \text{ m}^3/\text{s}$ und für das dazugehörige Konfidenzintervall Werte von 189 und $229 \text{ m}^3/\text{s}$. Die restlichen Ergebnisse können aus der Tabelle 6-5 entnommen werden.

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Schätzwerte (RCM, Q_{obs} , künstliche Q) mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren für die verschiedenen Perioden und Szenarien. Schätzwerte und Konfidenzgrenzen in m^3/s . Umrahmte Zahlen zeigen die kleinste untere und die größte obere Konfidenzgrenze der jeweiligen Einteilung an und zeigen auf, in welcher möglichen Bandbreite die abgeleiteten Schätzwerte aus den RCM-Modellen liegen können.

	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Periode: historisch				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 201	146	220	360	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	162	220	308	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	162	246	397	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	<u>114</u>	132	158	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	160	256	443	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	145	182	236	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	131	165	213	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	145	167	201	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	190	284	<u>445</u>	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	127	170	238	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
		189	208	229
	131	172	231	Werte aus der Beobachtung
Periode: Nahe Zukunft; Szenario: RCP4.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 208	173	264	<u>429</u>	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	138	197	297	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	117	165	247	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	137	207	328	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	143	210	335	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	147	222	355	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	158	210	288	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	145	159	182	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	<u>195</u>	272	400	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	<u>116</u>	143	182	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	184	202	222	Werte aus künstliche Ganglinie
Periode: Nahe Zukunft; Szenario: RCP8.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 227	<u>136</u>	179	243	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	170	256	407	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	162	244	387	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	186	319	<u>580</u>	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	156	205	285	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	141	179	236	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	170	254	408	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	171	238	347	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	178	217	273	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	<u>136</u>	198	302	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	193	211	231	Werte aus künstliche Ganglinie

Ergebnisse

	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Periode: Ferne Zukunft; Szenario: RCP4.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 203	159	224	333	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	157	192	242	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_ _SMHI-RCA4
	211	377	747	ICHEC-EC-EARTH_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	130	185	276	ICHEC-EC-EARTH_ _KNMI-RACMO22E
	131	149	179	ICHEC-EC-EARTH_ _DMI-HIRHAM5
	223	405	807	IPSL-IPSL-CM5A-MR_ _IPSL-INERIS-WRF331F
	148	195	267	IPSL-IPSL-CM5A-MR_ _SMHI-RCA4
	168	210	271	MOHC-HadGEM2-ES_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	159	191	234	MOHC-HadGEM2-ES_ _SMHI-RCA4
	147	228	385	MPI-M-MPI-ESM-LR_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	206	227	251	Werte aus künstliche Ganglinie

	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Periode: Ferne Zukunft; Szenario: RCP8.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 199	136	179	244	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	141	162	194	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_ _SMHI-RCA4
	177	274	456	ICHEC-EC-EARTH_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	136	186	265	ICHEC-EC-EARTH_ _KNMI-RACMO22E
	214	362	665	ICHEC-EC-EARTH_ _DMI-HIRHAM5
	157	179	210	IPSL-IPSL-CM5A-MR_ _IPSL-INERIS-WRF331F
	162	213	292	IPSL-IPSL-CM5A-MR_ _SMHI-RCA4
	194	260	358	MOHC-HadGEM2-ES_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	205	257	330	MOHC-HadGEM2-ES_ _SMHI-RCA4
	129	160	205	MPI-M-MPI-ESM-LR_ _CLMcom-CCLM4-8-17
	208	227	249	Werte aus künstliche Ganglinie

6.3.3 Auswertung für das Wiederkehrintervall von 300 Jahren

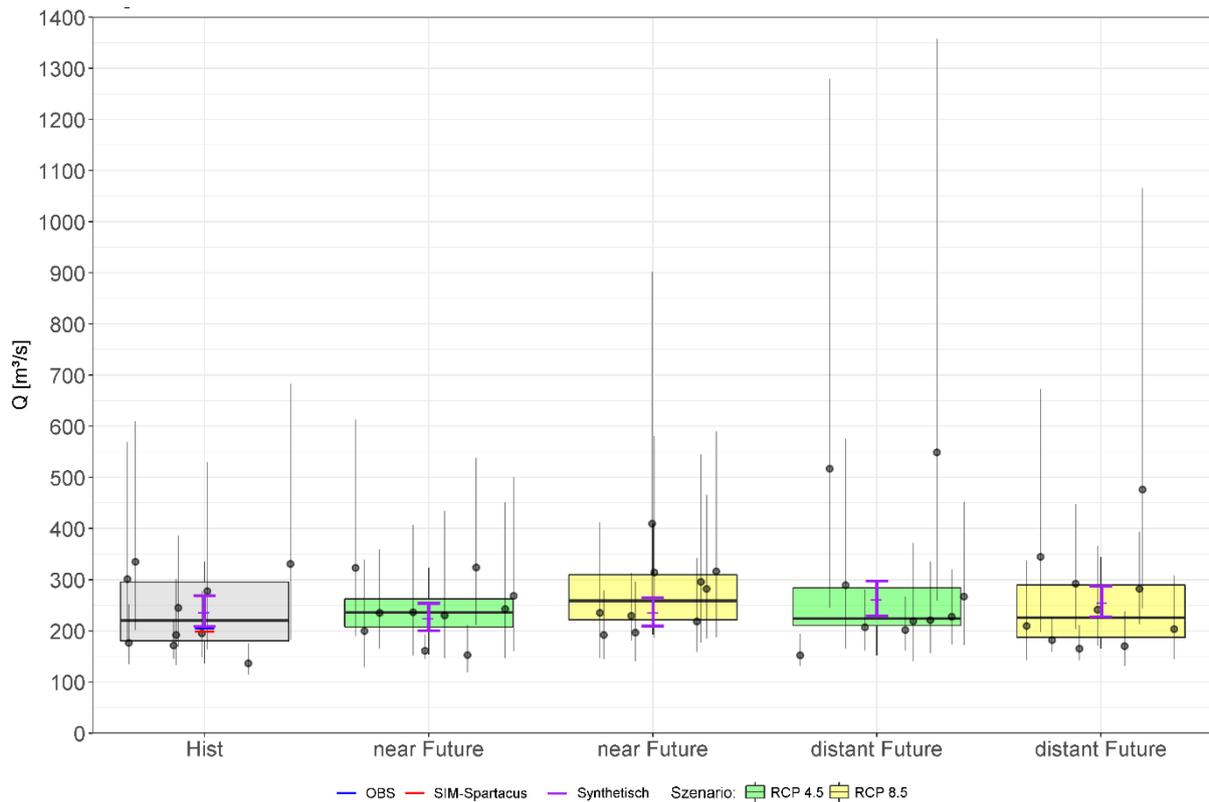


Abbildung 6-15: Vergleich der einzelnen Perioden und sozioökonomischen Szenarien für die berechneten HQ_{300} Schätzwerte. Schwarze Punkte: Schätzwerte und Vertrauensbereich, abgeleitet aus den einzelnen RCM-Modellen, violette Markierung: berechnete Schätzwerte aus der künstlich erstellten Ganglinie, roter Balken: Schätzwert aus der Simulation des SPARTACUS-Datensatzes und blauer Balken: Ergebnis aus der Beobachtung. Die Boxplots basieren auf die zehn einzelnen Schätzwerte, abgeleitet aus den RCM-Modellen und zeigen für jede Periode und jedes Szenario die Verteilung der Schätzwerte innerhalb einer Betrachtung.

Der Median der HQ_{300} -Werte, abgeleitet aus den RCM-Modellen, liegt um $15 \text{ m}^3/\text{s}$ höher als die Abschätzung aus den beobachteten Werten. Relativ betrachtet ist dies eine Abweichung von 7 %. Für die historische Periode ergeben sich für die einzelnen Schätzwerte Werte im Bereich von $137\text{-}335 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Minimum bzw. Maximum aus den einzelnen Vertrauensbereichen für diese Periode beträgt 115 bzw. $683 \text{ m}^3/\text{s}$. Wie bereits erwähnt, werden die Unsicherheiten durch die Extrapolation von hohen Jährlichkeiten, basierend auf einem kleinen Stichprobenumfang, erhöht. Für einige Modelle entstehen dadurch Wertebereiche, die ein extremes Verhalten aufweisen. Betrachtet man die kleinste untere und größte obere Konfidenzgrenze aus allen Perioden und Szenarien, ergibt sich eine mögliche Bandbreite von Werten zwischen $115\text{-}1358 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Vergleich dazu zeigt sich für die synthetisch generierte, 300 Jahre lange Zeitreihe ein deutlich robusteres Ergebnis. Dies verdeutlicht, dass die Stichprobenlänge einen nennenswerten Einfluss auf die geschätzten HQ -Werte hat. In Tabelle 6-6 sind die Ergebnisse der Schätzwerte sowie für die Vertrauensbereiche für die einzelnen Modelle aufgelistet.

Tabelle 6-6: Ergebnisse der Schätzwerte (RCM, Q_{obs} , künstliche Q) mit einem Wiederkehrintervall von 300 Jahren für die verschiedenen Perioden und Szenarien. Schätzwerte und Konfidenzgrenzen in m^3/s . Umrahmte Zahlen zeigen die kleinste untere und die größte obere Konfidenzgrenze der jeweiligen Einteilung an und zeigen auf, in welcher möglichen Bandbreite die abgeleiteten Schätzwerte aus den RCM-Modellen liegen.

	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Periode: historisch				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 220	164	278	531	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	168	245	386	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	178	301	569	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	<u>115</u>	137	175	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	182	331	<u>683</u>	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	148	195	278	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	134	177	251	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	146	171	221	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	201	335	610	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	133	192	301	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
		209	236	269
	145	205	299	Werte aus der Beobachtung
Periode: Nahe Zukunft; Szenario: RCP4.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 236	190	323	<u>613</u>	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	151	237	407	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	128	200	340	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	146	243	452	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	146	230	434	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	160	269	500	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	165	235	359	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	146	161	192	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	<u>211</u>	324	538	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	<u>118</u>	153	212	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	200	225	254	Werte aus künstlicher Ganglinie
Periode: Nahe Zukunft; Szenario: RCP8.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 259	<u>141</u>	197	296	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	187	314	581	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	177	296	545	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	207	410	<u>902</u>	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	159	219	342	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	144	192	279	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	188	316	591	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	185	282	466	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	181	230	313	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	147	235	412	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	210	235	265	Werte aus künstlicher Ganglinie

Ergebnisse

	Untere Konfidenzgrenze	Schätzwert	Obere Konfidenzgrenze	
Periode: Ferne Zukunft; Szenario: RCP4.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 224	172	267	452	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	161	207	282	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	246	517	1280	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	140	219	372	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	131	152	195	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	258	549	1358	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	156	221	336	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	173	228	320	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	162	202	267	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	165	290	576	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	230	261	297	Werte aus künstlicher Ganglinie
Periode: Ferne Zukunft; Szenario: RCP8.5				
Median aus den Schätzwerten der RCM: 226	144	203	308	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	142	166	211	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_*_SMHI-RCA4
	198	345	673	ICHEC-EC-EARTH_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	142	210	338	ICHEC-EC-EARTH_*_KNMI-RACMO22E
	244	476	1065	ICHEC-EC-EARTH_*_DMI-HIRHAM5
	158	182	227	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_IPSL-INERIS-WRF331F
	170	242	367	IPSL-IPSL-CM5A-MR_*_SMHI-RCA4
	204	292	448	MOHC-HadGEM2-ES_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	213	282	394	MOHC-HadGEM2-ES_*_SMHI-RCA4
	132	170	238	MPI-M-MPI-ESM-LR_*_CLMcom-CCLM4-8-17
	228	255	288	Werte aus künstlicher Ganglinie

6.3.4 Änderungen der Hochwasserextremwerte im Vergleich zur Gegenwart

Zur Beantwortung der gestellten Forschungsfrage dieser Arbeit werden die absoluten Werte aus den verschiedenen Perioden und Szenarien mit den Ergebnissen aus der Referenzperiode (historische Periode) in Bezug gesetzt. Dieser Vergleich soll dazu dienen, einen möglichen Klimaänderungsanpassungsfaktor für die jeweiligen Jährlichkeiten zu bestimmen. In Summe entstehen somit für die drei definierten Jährlichkeiten jeweils vier Vergleiche. Es wird dabei wieder in eine nahe Zukunft (2021-2050) und eine ferne Zukunft (2071-2100) unterschieden. Die beiden Zeiträume sind in die beiden RCP- Szenarien untergliedert. Der durchgeführte Vergleich wird anhand der Schätzwerte der einzelnen bzw. zusammengeführten RCM Daten berechnet und ist in Abbildung 6-16 dargestellt. Die Konfidenzintervalle aus der Hochwasserschätzung werden nicht evaluiert. Als Indikatoren für ein mögliches Verhalten in der Zukunft (Entwicklung, Trend) werden die prozentuelle Änderung des Medians aus den zehn RCMs und die prozentuelle Änderung der zusammengeführten RCM-Zeitreihe herangezogen. Der Vergleich aus den einzelnen RCMs dient als zusätzliche Information zur Abschätzung, in welchem Bereich die einzelnen Klimaprojektionen Resultate liefern.

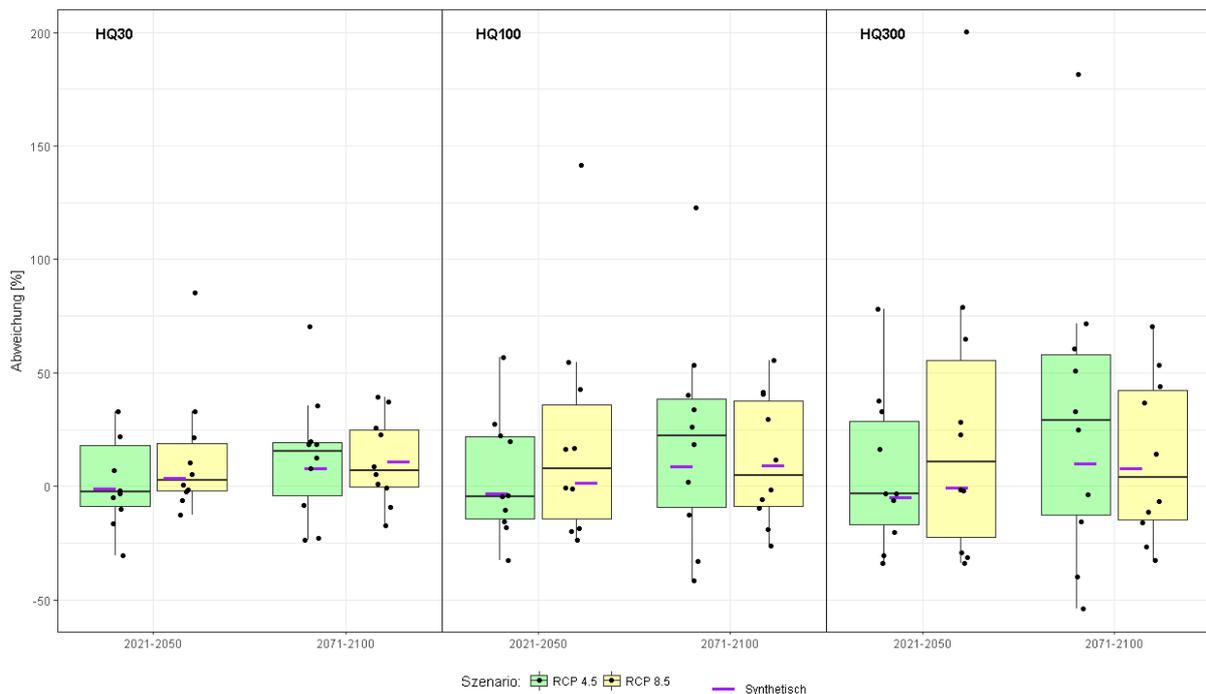


Abbildung 6-16: Vergleich der relativen Änderung der Hochwasserschätzwerte in Bezug auf die Ergebnisse aus der Referenzperiode (1971-2000)

Bei einer Jährlichkeit von 30 Jahren ergeben sich für die nahe Zukunft und RCP-Szenario 4.5 eine Änderung des Medians von -2,5 % und für die künstliche Zeitreihe -0,7 %, das Schwankungsintervall aus den einzelnen Modellen ist 63,5 % groß, mit einem Minimum von -30,5 und Maximum von +33,0 %. Die Ergebnisse für RCP 8.5 sind für den Median +2,8 % und für die künstliche Zeitreihe +3,9 %. Die

einzelnen RCMs ergeben eine Schwankungsbreite von 97,9 % mit einem Minimum von -12,7 und einem Maximum von +85,2 %.

Für die Periode ferne Zukunft kombiniert mit dem RCP 4.5 ergibt sich für den Median ein Wert von +15,5 % und für die künstliche Zeitreihe ein Wert von +8,3 %. Das Minimum und Maximum für den Schwankungsbereich beträgt -23,9 % und +70,5 %, die mögliche Schwankungsbreite beträgt somit 94,4 %. Für das Szenario mit RCP 8.5 beträgt die Änderung des Medians +7,0 % und der langen Zeitreihe +11,3 %. Die Schwankungsbreite beträgt 56,9 % mit einer Untergrenze von -17,4 % und einer Obergrenze von +39,5 %.

Für die nahe Zukunft ergeben sich bei beiden Szenarien für den Median und die künstliche Zeitreihe nur geringe Änderungen. Die einzelnen Schätzwerte aus den Modellen weisen große Abweichungen in positiver sowie negativer Richtung auf, speziell ein Wert für das RCP 8.5 Szenario weist einen sehr großen Anstieg in positiver Richtung auf. Aufgrund der Schwankungen ist es schwierig, mögliche Entwicklungen, bezugnehmend auf den Hochwasserschätzwert, zu erkennen. Für die ferne Zukunft weisen der Median und die künstliche Zeitreihe unterschiedliche Ergebnisse auf. Die Änderungen für den Median erzeugen für das RCP 4.5 eine Erhöhung und für das RCP 8.5 stellt sich eine nur halb so große Änderung wie bei RCP 4.5 ein. Für die künstliche Zeitreihe ergeben sich für beide RCP-Szenarien eine positive Änderung. Auch für diese Periode weisen die einzelnen Modelle hohe Schwankungen auf und erschweren es, eine mögliche Entwicklung festzustellen.

Für die Jährlichkeiten 100 und 300 Jahre werden keine so detaillierten Beschreibungen des Verhaltens der einzelnen RCMs für die verschiedenen Perioden und Szenarien durchgeführt. Eine genaue Auflistung der beschriebenen Werte für alle Wiederkehrintervalle kann aus der Tabelle 6-7 entnommen werden. Vielmehr soll in der folgenden Beschreibung der Blick auf die relativen Änderungen des Medians aus den RCMs bzw. der Schätzwerte aus der zusammengesetzten Zeitreihe für die jeweilige Jährlichkeit gerichtet werden.

Die Ergebnisse für die relativen Änderungen der Schätzwerte für die Periode nahe Zukunft (2021-2050) und RCP 4.5, bezogen auf die Referenzperiode 1971-2000, ergeben für den Median und das Wiederkehrintervall von 30 Jahren eine Änderung von -2,5 %, für das Wiederkehrintervall von 100 Jahren stellt sich eine prozentuelle Änderung von -4,4 % ein und bei einem Wiederkehrintervall von 300 Jahren berechnet sich eine Änderung von -3,4 %. Es ist zu erkennen, dass sich für die drei definierten Wiederkehrintervalle für die Periode nahe Zukunft eine leichte Reduktion der Schätzwerte einstellt. Die berechneten Änderungen der Schätzwerte aus der zusammengesetzten Zeitreihe ergeben für das HQ₃₀ eine Änderung von -0,7 %, für das HQ₁₀₀ eine Änderung von -2,8 % und für das HQ₃₀₀ eine Änderung von -4,8 %. Auch für die zusammengefügte Zeitreihe ergibt sich eine leichte Reduktion der Schätzwerte der verschiedenen Wiederkehrintervalle.

Bei dem Vergleich der Schätzwerte für die Periode nahe Zukunft und RCP 8.5 mit der Referenzperiode, ergeben sich für den Median bei HQ₃₀ eine Änderung von + 2,8 %, bei HQ₁₀₀ ergibt sich eine Steigerung von + 7,7 % und bei HQ₃₀₀ erhöht sich der Schätzwert um + 10,6 %. Beim Vergleich der Schätzwerte aus der zusammengesetzten Zeitreihe mit den Werten aus der Referenzperiode ergibt sich für das HQ₃₀ ein Zuwachs von + 3,9 %, für das HQ₁₀₀ eine Änderung von + 1,7 % und für das HQ₃₀₀ eine minimale Verringerung des Schätzwertes um – 0,4 %.

Bei den Ergebnissen der Änderungen des Schätzwertes für die Periode ferne Zukunft (2071-2100) und RCP 4.5 ergeben sich für die Mediane des HQ₃₀-Ereignisses eine Änderung von + 15,5 % in Bezug auf die Referenzperiode 1971-2000, für das HQ₁₀₀-Ereignis eine Änderung von + 22,4 % und für das HQ₃₀₀- Ereignis eine Änderung von + 28,9 %. Die möglichen sich einzustellenden Schätzwerte aus der synthetischen Zeitreihe zeigen ebenfalls einen Anstieg der Änderungen, wobei der Änderungsgradient schwächer ausgeprägt ist als der des Medians. Für das HQ₃₀ ergibt sich ein Wert von + 8,3 %, für das HQ₁₀₀ ein Wert von + 9,3 % und die prozentuelle Änderung des HQ₃₀₀-Ereignisses liegt bei + 10,4 %.

Der Median für das Szenario RCP 8.5 in der Periode ferne Zukunft weist eine Reduktion der möglichen Änderungen der Schätzwerte über die drei definierten Jährlichkeiten auf, im Vergleich zur fernen Zukunft mit RCP 4.5. Für HQ₃₀ ergibt sich eine Änderung von + 7,0 %, für HQ₁₀₀ eine Änderung von + 4,8 % und für das HQ₃₀₀-Ereignis eine Änderung von + 3,9 %. Die Entwicklung der synthetischen Zeitreihe weist ebenfalls ein ähnliches Verhalten auf und zeigt eine Verringerung der Gesamtänderung für die einzelnen Jährlichkeiten. Dabei ergeben sich für das HQ₃₀, HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ Änderungen von + 11,3 %, + 9,5 % und + 8,1 %.

Die angeführten Ergebnisse für die gewählten Indikatoren (der Median aus den zehn RCM-Modellen und der Schätzwert aus der zusammengesetzten Zeitreihe) lassen je nach Betrachtungsperiode und Betrachtungsszenario eine mögliche Entwicklung der Hochwasserschätzwerte für die Zukunft zu. Bereits durch den Vergleich der beiden Indikatoren stellen sich unterschiedliche Entwicklungen in Richtung und Größenordnung ein. Werden zusätzlich zu dem bereits festgestellten heterogenen Verhalten die möglichen auftretenden prozentuellen Änderungen der einzelnen RCM-Modelle miteinbezogen, ergeben sich Schwankungsbreiten für die einzelnen Wiederkehrintervalle, die eine Bestimmung eines plausiblen Klimaänderungsanpassungsfaktors kaum sinnvoll erscheinen lassen. In Abbildung 6-16 ist die Erhöhung der Schwankungsbreite der Jährlichkeiten abgebildet. Ausgehend von HQ₃₀ erhöht sich die Schwankungsbreite beim Sprung zur jeweils nächsten Jährlichkeit sehr stark, wobei Werte von +100 % mehrmals in den verschiedenen Perioden bzw. Szenarien auftreten.

Tabelle 6-7: Änderung der Hochwasserschätzwerte im Vergleich zur Gegenwart (1971-2000)

	HQ ₃₀			einzelne RCMs HQ ₁₀₀			HQ ₃₀₀			Zusammengesetzte Zeitreihe Erwartungswert		
	Median	Schwankungsbreite	HQ ₃₀	Median	Schwankungsbreite	HQ ₁₀₀	Median	Schwankungsbreite	HQ ₃₀₀	HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀
Nahe Zukunft (2021-2050)	RCP 4.5	-2.5	-30.5	-4.4	-32.7	-32.7	-3.4	-33.8	-33.8	-0.7	-2.8	-4.8
	RCP 8.5	2.8	33.0	7.7	56.7	56.7	10.6	78.0	78.0	3.9	1.7	-0.4
Ferne Zukunft (2071-2100)	RCP 4.5	15.5	-23.9	22.4	-41.7	-41.7	28.9	-54.0	-54.0	8.3	9.3	10.4
	RCP 8.5	7.0	70.5	4.8	122.9	122.9	3.9	181.3	181.3	11.3	9.5	8.1

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, anhand von Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur aus verschiedenen Klimaszenarien eine mögliche zukünftige Entwicklung des Abflussverhaltens der Raab abzuschätzen. Es erfolgte dabei eine genauere Betrachtung der möglichen Änderung der Hochwasserextremwerte. Um qualitativ hochwertige Aussagen treffen zu können, waren mehrere Arbeitsschritte nötig. (I) Aufsetzen eines hydrologischen Modells für das Einzugsgebiet der Raab mit anschließender Kalibrierung und Validierung (II). Antreiben des erstellten Modells mit den verschiedenen Klimamodelldaten (III). Durchführen einer Hochwasserextremwertstatistik mit Überprüfung der Ergebnisse mit beobachteten Daten für die Referenzperiode (IV). Auswertung der relativen Änderungen der verschiedenen Klimamodelle und Feststellung eines möglichen Trends zur Erstellung eines möglichen Klimaänderungsanpassungsfaktors.

Für die Erstellung der benötigten Zeitreihen zur Darstellung eines möglichen zukünftigen hydrologischen Verhalten der Raab und um in weiterer Folge Aussagen über die möglichen Auswirkungen auf den Durchfluss mit einem bestimmten Wiederkehrintervalle treffen zu können, bedarf es der Anwendung eines Niederschlags-Abfluss-Modells, welches in der Lage ist, die gegenwärtigen hydrologischen Charakteristika des Einzugsgebiets nachzubilden. Das verwendete Modell dafür ist COSERO. In Kapitel 4.2 wird das Modellprinzip von COSERO erklärt und in Kapitel 5.1 wird die Anwendung auf das Gebiet beschrieben. Das Modell wurde mit Zeitreihen für Niederschlag und Temperatur mit jeweils einer zeitlichen Auflösung von 24 h kalibriert und validiert, wobei für die Kalibrierungsperiode 38 Jahre und für die Validierung 14 Jahre zur Verfügung standen. Dabei konnte mit der automatischen Optimierung der Zielfunktion, bestehend aus einer Kombination aus den Gütekriterien KGE und PDIFF und einer anschließenden manuellen Anpassung der Ergebnisse, eine zufriedenstellende Simulationsgüte des N- A- Modells erreicht werden. Für die Kalibrierungsperiode ergibt sich ein KGE von 0,77 und für die Validierungsperiode ein KGE von 0,76. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.1 in Form einer Gegenüberstellung der simulierten und beobachteten Tagesmittelabflüsse für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode dargestellt. Des Weiteren wird hier ein Vergleich der langjährigen monatlichen Mittelabflusshöhen der Beobachtung und der Simulation für die Kalibrierungs- und Validierungsperiode angeführt.

Um einen möglichen Einfluss von Klimaänderungen für das Einzugsgebiet der Raab darzustellen, werden die Resultate von verschiedenen Klimaprojektionen aus Klimamodellen angewendet. Die benötigten Daten werden aus dem UnLoadC³-Projekt bezogen. Dabei handelt es sich um bereits skalierte Datensätze, die Informationen für Temperatur und Niederschlag für drei zeitliche Perioden mit zwei sozioökonomischen Szenarien bereitstellen. Die zeitlichen Perioden weisen eine Einteilung in eine historische (1971-2000), nahe Zukunft (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) auf. Für die Zukunftspeioden werden die zwei RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 verwendet.

Für das zweite Teilziel wurde COSERO mit den Zeitreihen für Niederschlag und Temperatur aus den Klimaprojektionen angetrieben und erzeugte Ganglinien mit den Tagesmittelabflüssen für die vorab definierten Perioden und sozioökonomischen Szenarien der Raab. Diese Ganglinien wurden auf deren Hochwasserextremwerte für die Jährlichkeiten 30, 100 und 300 Jahre analysiert, die dabei angewendete Verteilungsfunktion ist die Log-Pearson Typ III Verteilung. Die Ergebnisse der Hochwasserextremwertanalyse für die verschiedenen Perioden und Szenarien zeigt, dass die Schätzwerte, abgeleitet aus den Klimaprojektionen, große Streuungen aufweisen. Dabei zeigen die Ergebnisse aus den einzelnen Projektionen für das HQ_{100} für die historische Periode Werte im Bereich von $114 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $445 \text{ m}^3/\text{s}$, im Vergleich dazu ergibt der Hochwasserschätzwert aus der Beobachtung einen Wert von $172 \text{ m}^3/\text{s}$. Für das HQ_{100} in der nahen Zukunft erzeugen die einzelnen Modelle Werte im Bereich von $116 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $429 \text{ m}^3/\text{s}$ für RCP 4.5 und für RCP 8.5 Werte im Bereich von $136 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $580 \text{ m}^3/\text{s}$. In der fernen Zukunft erhöht sich der Wertebereich, hier stellt sich für RCP 4.5 eine Schwankungsbreite von $130 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $807 \text{ m}^3/\text{s}$ ein, für RCP 8.5 ergibt sich ein Wertebereich von $129 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $665 \text{ m}^3/\text{s}$. Für das HQ_{30} und HQ_{300} stellen sich ebenfalls große Schwankungsbereiche ein. Durch Zusammenführen der einzelnen Zeitreihen der RCMs zu einer 300 Jahren langen Ganglinie kann eine Verringerung der Schwankungsbereiche für die jeweilige Einteilung erreicht werden. So ergibt sich für die historische Periode für das HQ_{100} ein Schwankungsbereich von $189 \text{ m}^3/\text{s}$ und $229 \text{ m}^3/\text{s}$. Diese Verringerung des Schwankungsbereiches für die lange Zeitreihe ist in allen Perioden und Szenarien zu beobachten.

Die absoluten Erwartungswerte aus der Hochwasserextremwertstatistik für die beiden Zukunftsperioden werden mit den korrespondierenden Modellergebnissen aus der historischen Periode in Relation gestellt. Die daraus resultierenden relativen Änderungen dienen als mögliche Abschätzung der Einwirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserextremwerte für das Untersuchungsgebiet. Der Median aus den zehn einzelnen Klimamodellen und die zusammengesetzte Zeitreihe dienen dabei als Indikatoren für eine mögliche klimawandelbedingte Entwicklung. Die Ergebnisse für das HQ_{100} zeigen in der nahen Zukunft mit RCP 4.5 eine leichte Verringerung des Medians ($-4,4 \%$), wobei die Schwankungsbreite zwischen $-32,7 \%$ und $+56,7 \%$ liegt. Für die künstliche Zeitreihe zeigt sich ebenfalls eine Reduktion des HQ_{100} Schätzwertes ($-2,8 \%$). Für RCP 8.5 berechnet sich eine Steigerung des Medians für das HQ_{100} ($+7,7 \%$) und die Schwankungsbreite erhöht sich ebenfalls stark ($-23,7 \%$ bis $+141,4 \%$). Die künstliche Zeitreihe zeigt ebenso eine leichte Erhöhung des HQ_{100} ($+1,7 \%$). Die Ergebnisse für das HQ_{300} in der fernen Zukunft und RCP 4.5 ergeben eine Änderung des Medians von $+28,9 \%$ bei einer Schwankung von $-54,0 \%$ bis zu $+181,3 \%$, bei RCP 8.5 zeigt die Änderung des Medians eine schwache Steigerung von $+3,9 \%$ bei einer Schwankung von $-32,5 \%$ bis $+70,4 \%$. Die angeführten Ergebnisse für die unterschiedlichen Perioden, Szenarien und Jährlichkeiten zeigen eine hohe Variabilität an möglichen Entwicklungen der Hochwassersituation an der Raab. Betrachtet man dazu die Ergebnisse aus einer

Studie des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), wird darin von einer möglichen klimawandelbedingten Änderung wird darin für die nahe Zukunft einer möglichen klimawandelbedingten Änderung des HQ₁₀₀ von - 5 % bis +8 % ausgegangen. Auf Basis dieser Ergebnisse ist es laut BMNT nicht erforderlich einen Klimazuschlag für Bemessungswerte einzuführen (BMNT, 2017).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es mit den durchgeführten Auswertungsmethoden möglich war, für die definierten Zeithorizonte und sozioökonomischen Szenarien eine mögliche Entwicklungsbandbreite der Hochwassersituation für die Raab zu erstellen. Die Bandbreite an möglichen Entwicklungen für die Zukunft wird durch die Verkettung an Unsicherheiten aus den Klimamodellen, aus den sozioökonomischen Modellen, aus der hydrologischen Modellierung und aus der Extremwertstatistik stark erhöht. Zusätzlich zu diesen hohen Schwankungsbreiten zeigen die beiden gewählten Indikatoren (Median/ künstliche Zeitreihe) kein eindeutiges Signal für die zukünftige Entwicklung der Hochwasserschätzwerte. Die unterschiedlichen Ergebnisse der Indikatoren, kombiniert mit der großen Streuung der relativen Änderungen der einzelnen Modelle, erschweren es, ein aussagekräftiges Urteil zu fällen. Anhand der Ergebnisse wird für das Einzugsgebiet der Raab keine Empfehlung für einen konkreten Klimaänderungsanpassungsfaktor abgegeben.

8 Literaturverzeichnis

- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), 2014. . Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplová, E., 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27, 17–46.
- Becsi, B., 2014. Modellierung von Schneetransportprozessen im hochalpinen Raum anhand orthorektifizierter terrestrischer Aufnahmen. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- Benson, M.A., 1968. Uniform Flood-Frequency Estimating Methods for Federal Agencies. *Water Resources Research* 4, 891–908.
- Ben-Zvi, A., 1994. Fit of probability distributions to upper sub-samples of partial duration series, in: *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, Extreme Values: Floods and Droughts*. K.W. Hipel, pp. 95–107.
- Bergström, S., 1992. The HBV Model: its structure and applications. Norrköping, Sweden, SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), 1992 35–35.
- Bergström, S., 1976. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. Norrköping: Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut.
- Beven, K.J., 2012. *Rainfall-runoff modelling: the primer*, 2nd ed. ed. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ.
- Blöschl, G., Merz, R., 2000. Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. *Wiener Mitteilungen Band 164*, Wien, Österreich.
- BMLFUW, 2011a. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft ZAMG/TU-Wien Studie Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft im Auftrag von Bund und Ländern. Wien, Österreich.
- BMLFUW, 2011b. Leitfaden - Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten. Wien.
- BMLFUW, 2005. Hydrologischer Atlas Österreichs (Bd. 2. Lieferung). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMNT, 2017. Klimawandel in der Wasserwirtschaft - Follow up zur ZAMG/TU-Wien Studie (2011) Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft im Auftrag von Bund und Ländern. Wien, Österreich.
- Burgholzer, R., 2017. Comparison of manual and automatic Parameter Calibration of the R-R-model COSERO for the Mur catchment. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, New York [u.a.].
- Deutscher Wetterdienst DWD, 2018. . Wetterdienst.de. URL https://www.wetterdienst.de:443/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/1833/das-problem-mit-der-gewittervorhersage (accessed 6.9.18).
- Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.DWA, 2012. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V, Hennef.
- Eder, G., Nachtnebel, H.P., Loibl, W., 2001. Raumzeitliche differenzierte Wasserbilanzmodellierung der Flusseinzugsgebiete Gurk und Gail. Austrian Research Center Seibersdorf.
- Efron, B., 1982. The jackknife, the bootstrap, and other resampling plans, CBMS-NSF Regional conference series in applied mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.
- England, J.F.J., Cohn, T.A., Faber, B.A., Stedinger, J.R., Thomas, W.O.J., Veilleux, A.G., Kiang, J.E., Mason, R.R., 2017. Guidelines for Determining Flood Flow Frequency Bulletin 17C. U.S. Geological Survey Techniques and Methods.
- Enzinger, P.A., 2009. Modelling the hydrological cycle in a siberian catchment: Application of the CO-SERO model. Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich.
- ESRI, 2018. ArcGIS Desktop: Release 10.6. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Feiel D., 2018. Anwendung des mHM-Modells auf das Einzugsgebiet der Mur. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- Fuchs, M., 1998. Modeling snowmelt-runoff in an alpine watershed. Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology 377, 80–91.
- Haimberger, L., Seibert, P., Hitzemberger, R., Steiner, A., Weihs, P., 2014. Das globale Klimasystem und Ursachen des Klimawandels. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, pp. 137–172.
- Haußer, F., Luchko, Y., 2011. Mathematische Modellierung mit MATLAB®: eine praxisorientierte Einführung. Spektrum, Akad.-Verl, Heidelberg.
- Hebenstreit, K., 2000. Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete. Inst. für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Univ. für Bodenkultur, Wien.
- Herrnegger, M., Nachtnebel, H.-P., Haiden, T., 2012. Evapotranspiration in high alpine catchments – an important part of the water balance! Hydrology Research 43, 460.

- Herrnegger, M., Senoner, T., Klotz, D., Wesemann, J., Nachtnebel, H.P., 2015. COSERO - Handbook 2015 Version 2.0. Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering, Wien.
- Heymann, Y. (Ed.), 1994. CORINE land cover: technical guide, EUR. Office for Official Publ. of the Eur. Communities, Luxembourg.
- Hiebl, J., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Maugeri, M., Lentini, G., Spinoni, J., Brunetti, M., Nanni, T., Tadić, M., Perčec Bihari, Z., Dolinar, M., Müller-Westermeier, G., 2009. A high-resolution 1961-1990 monthly temperature climatology for the greater Alpine region. *Meteorologische Zeitschrift* 18, 507–530.
- Hiebl, J., Frei, C., 2017. Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theoretical and Applied Climatology* 132, 327–345. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2093-x>
- Hiebl, J., Frei, C., 2016. Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability. *Theoretical and Applied Climatology* 124, 161–178. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4>
- Hosking, J.R.M., 1990. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society* 52, 105–124.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kendall, M.G., 1975. *Rank correlation methods.* C. Griffin, London.
- Kling, H., 2002. Development of tools for a semi-distributed runoff model.
- Kling, H., Stanzel, P., Fuchs, M., Nachtnebel, H.-P., 2015. Performance of the COSERO precipitation–runoff model under non-stationary conditions in basins with different climates. *Hydrological Sciences Journal* 60, 1374–1393. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.959956>
- Kromp-Kolb, H., Formayer, H., 2005. *Schwarzbuch Klimawandel: wieviel Zeit bleibt uns noch?*, 1. Aufl. ed. ecowin, Salzburg.
- Liebscher, H.-J., Mendel, H.G., 2010. *Vom empirischen Modell zum komplexen hydrologischen Flussgebietsmodell.* Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG, Koblenz.
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., Kjeldsen, T.R., 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology* 519, 3634–3650.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13, 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- McGuffie, K., Henderson-Sellers, A., 2013. *A Climate Modelling Primer.* Wiley, Somerset.

- Mendel, H.-G., 1993. Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. Sekretariat CHR, s'Gravenhage.
- Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A., Jones, P.D., 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set: THE HADCRUT4 DATASET. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117.
- Nachtnebel, H.-P., Baumung S., Lettl W., 1993. Abflußprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr (Handbuch). Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktivem Wasserbau (IWHW), Universität für Bodenkultur Wien.
- Nakićenović, N., Swart, R. (Eds.), 2000. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Refsgaard, J.C., Knudsen, J., 1996. Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. *Water Resources Research* 32, 2189–2202. <https://doi.org/10.1029/96WR00896>
- Refsgaard, J.C., Storm, B., 1995. Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications* 809–846.
- RIWA-T, 2015. TECHNISCHE RICHTLINIEN FÜR DIE BUNDESWASSERBAUVERWALTUNG RIWA-T GEMÄSS § 3 ABS 2 WBF G FASSUNG 2016. Wien.
- Ruzicka, K., Gabriel, O., Bletterie, U., Winkler, S., Zessner, M., 2009. Cause and effect relationship between foam formation and treated wastewater effluents in a transboundary river. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 34, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.01.002>
- Schulz, K., Bernhardt, M., 2016. The end of trend estimation for extreme floods under climate change? Invited Commentaries. *Hydrological Processes* 30, 1804–1808.
- Schulz, K., Herrnegger, M., Wesemann, J., Klotz, D., Senoner, T., 2016. Kalibrierung COSERO - Mur für ProVis (Abschlussbericht). Wien, Österreich.
- Schulz, K., Schürz, C., Mehdi, B., Matulla, C., Hollosi, B., Pressl, A., Ertl, T., 2017. Uncertainty assessment of water flow and nutrient loads under future climate change conditions. ACRP Project “Un-LoadC3”, KR13AC6K11021, Final Report.
- Solomon, S., Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.), 2007. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- Stanzel, P., Gonzalez, P., Kling, H., Brayshaw, D., 2018. Use of high-resolution GCM simulations for hydrological and hydropower impact research in the Upper Danube basin.

- Stanzel, P., Kahl, B., Haberl, U., Herrnegger, M., Nachtnebel, H.P., 2008. Continuous hydrological modelling in the context of real time flood forecasting in alpine Danube tributary catchments. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 4, 012005.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 485–498.
- Tolson, B.A., Shoemaker, C.A., 2007. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration: DYNAMICALLY DIMENSIONED SEARCH ALGORITHM. Water Resources Research 43.
- Van Vuuren, D.P., den Elzen, M.G.J., Lucas, P.L., Eickhout, B., Strengers, B.J., van Ruijven, B.J., info:eu-repo/dai/nl/304834521, Wonink, S.J., van den Houdt, R., 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. Climatic Change 81, 119–159.
- Van Vuuren, D.P., Eickhout, B., Lucas, P.L., Elzen, M.G.J. den, 2006. Long-Term Multi-Gas Scenarios to Stabilise Radiative Forcing — Exploring Costs and Benefits Within an Integrated Assessment Framework. The Energy Journal 27, 201–233.
- Van Vuuren, D.P., Stehfest, E., den Elzen, M.G.J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Klein Goldewijk, K., Hof, A., Mendoza Beltran, A., Oostenrijk, R., van Ruijven, B., 2011. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. Climatic Change 109, 95–116.
- Wald, A., Wolfowitz, J., 1940. On a Test Whether Two Samples are from the Same Population. The Annals of Mathematical Statistics 11, 147–162. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177731909>
- Wang, Y., Leung, L.R., McGregor, J.L., Lee, D.-K., Wang, W.-C., Ding, Y., Kimura, F., 2004. Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. 气象集誌. 第2輯 82, 1599–1628.
- Wesemann, J., Herrnegger, M., Schulz, K., 2018. Hydrological modelling in the anthroposphere: predicting local runoff in a heavily modified high-alpine catchment. Journal of Mountain Science 15, 921–938.
- Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bulletin 1, 80. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- ZAMG, 2018a. Emissionsszenarien [WWW Document]. Emissionsszenarien. URL <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/emissionsszenarien> (accessed 9.8.18).
- ZAMG, 2018b. Globale Klimamodelle [WWW Document]. Globale Klimamodelle. URL <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/globale-klimamodelle> (accessed 6.5.18).

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur weltweit 1850–2017 (violett) und in Österreich 1767–2017 (rot) (Auer et al., 2007; Morice et al., 2012). Dargestellt sind jährliche Abweichungen vom Mittel der Jahre 1961–1990 (dünne Linien) und deren geglättete Trends (dicke Linien).....	1
Abbildung 2-1: Lage des Einzugsgebietes der Raab in Österreich	6
Abbildung 2-2: Einzugsgebietsgliederung, Lage der Pegel und Höhenklassen des Einzugsgebietes Raab	9
Abbildung 3-1: SPARTACUS-Messnetz für Niederschlag (Hiebl und Frei, 2017). Blaue und schwarze Punkte und türkise Dreiecke bilden dabei die Interpolationsgrundlage für die mittleren monatlichen Niederschlagssummen. Schwarze Punkte alleine werden als Interpolationsgrundlage für die täglichen Niederschlagssummen verwendet. Punktesymbole sind konventionelle Niederschlagsmessgeräte und Dreiecksymbole sind Totalisatoren. Rote Punkte bilden das Messnetz des Wegenernetzes, welches zur Evaluierung des SPARTACUS-Datensatz dient.....	11
Abbildung 3-2.SPARTACUS-Messnetz für Temperatur (Hiebl und Frei, 2016). Nach unten gerichtete Dreiecke zeigen Stationen in Tallage an, nach oben gerichtete Dreiecke zeigen Stationen in hohen Lagen (Gipfel) an, Diamantsymbole zeigen Stationen in innerstädtischer Lage an. Punkte repräsentieren alle restlichen verwendeten Stationen.	12
Abbildung 4-1: Einteilung Niederschlags-Abfluss Modelle (Becsi, 2014).....	15
Abbildung 4-2:Räumliche Diskretisierung in COSERO. (a) Einzugsgebiet der Raab (b) Darstellung eines Untereinzugsgebietes in blau (c) Teileinzugsgebiet mit Berechnungszone in rot	17
Abbildung 4-3: Berechnungsprinzip COSERO für Zustandsgröße S, Eingangsgröße I, Ausgangsgröße O und Zeitschritt t. (Herrnegger et al., 2015)	18
Abbildung 4-4: Schematischer Aufbau der Modellkomponenten (Herrnegger et al., 2015). Eine genaue Erläuterung der Parameter befindet sich im Anhang A.1	19
Abbildung 4-5: Nachbildung der beobachteten globalen mittleren Temperatur mit anthropogenem und natürlichem Einfluss (links) und Simulationsergebnisse mit nur natürlichem Einfluss (rechts). Schwarze Linie zeigt die Beobachtung, rote Linie entspricht Simulation mit anthropogenem und natürlichem Einfluss und blaue Linie entspricht Simulation mit nur natürlichem Einfluss. Grafik aus IPCC (2013) .	24
Abbildung 4-6: Schematischer Aufbau des Berechnungsgitters eines Klimamodelles aus McGuffie und Henderson-Sellers (2013).....	25
Abbildung 4-7: Änderung der globalen Oberflächentemperatur für die einzelnen RCPs bis zum Jahr 2100 aus IPCC (2013).....	27
Abbildung 4-8: Darstellung von verschiedenen klimaspezifischen Prozessen in Bezug auf deren zeitliche sowie räumliche Einteilung. Dazu abgebildet der mögliche Bereich, welcher von modernen globalen	

(grünes Kästchen) bzw. regionalen (rotes Kästchen) Klimamodellen simuliert werden kann. Abbildung aus Deutscher Wetterdienst DWD (2018).....	29
Abbildung 4-9: Zusammenhang Hochwasserabschätzung und Hochwasserbemessung (BMLFUW, 2011b)	30
Abbildung 5-1: Darstellung der Höhenverteilung im Einzugsgebiet der Raab.....	41
Abbildung 5-2: Darstellung der Hydrogeologieverteilung im Einzugsgebiet der Raab.....	41
Abbildung 5-3: Darstellung der Landbedeckungsverteilung im Einzugsgebiet der Raab.....	42
Abbildung 5-4: Darstellung der Bodenverteilung im Einzugsgebiet der Raab	42
Abbildung 6-1: Gegenüberstellung des beobachteten und simulierten Hydrographen für einen Ausschnitt (1963-1966) der Kalibrierungsperiode für den Pegel Feldbach. Für die gesamte Kalibrierungsperiode ergibt sich ein KGE von 0.77.	46
Abbildung 6-2: Gegenüberstellung des beobachteten und simulierten Hydrographen für die Validierungsperiode für den Pegel Feldbach. Für die gesamte Validierungsperiode ergibt sich ein KGE von 0.76.....	47
Abbildung 6-3: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Kalibrierungsperiode für das Jahr 1965. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,84.....	48
Abbildung 6-4: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Kalibrierungsperiode für das Jahr 1972. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,88.....	48
Abbildung 6-5: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Validierungsperiode für das Jahr 2006. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,84.....	49
Abbildung 6-6: Ausschnitt aus dem Hydrographen der Validierungsperiode für das Jahr 2010. Für den dargestellten Ausschnitt ergibt sich ein KGE von 0,82.....	49
Abbildung 6-7: Langjährige monatliche Mittelabflusshöhe für den Pegel Feldbach Kalibrierungsperiode (1963-2000), blaue Linie Q_{obs} und rote Linie Q_{sim} . Untere Abbildung zeigt die prozentuelle Abweichung der Simulation zur Beobachtung.	50
Abbildung 6-8: Langjährige monatliche Mittelabflusshöhen für den Pegel Feldbach Validierungsperiode (2001-2014), blaue Linie Q_{obs} und rote Linie Q_{sim} . Untere Abbildung zeigt die prozentuelle Abweichung der Simulation zur Beobachtung.	51
Abbildung 6-9: Vergleich der Ergebnisse der HQ-Spitzen mit PDIFF (rote Punkte) und ohne PDIFF (schwarze Punkte) Kriterium	53
Abbildung 6-10: Vergleich der Ergebnisse der HQ-Spitzen mit PDIFF-Kriterium (schwarze Punkte) und mit zusätzlicher manueller Anpassung (rote Punkte)	54
Abbildung 6-11: Streudiagramm der Daten aus den Tagesmittelabflüssen und den Stundenmittelabflüssen	55

Abbildung 6-12: Vergleich der historischen (1971-2000) Hochwasserextremwertstatistik für beobachtete (blauer Balken) und simulierte Werte aus SPARTACUS Datensatz (roter Balken) und abgeleitete Hochwasserextremwerte aus den regionalen Klimamodellen (schwarze Punkte) 56

Abbildung 6-13: Vergleich der einzelnen Perioden und sozioökonomischen Szenarien für die berechneten HQ₃₀ Schätzwerte. Schwarze Punkte: Schätzwerte und Vertrauensbereich abgeleitet aus den einzelnen RCM-Modellen, violette Markierung: berechnete Schätzwerte aus der künstlich erstellten Ganglinie, roter Balken: Schätzwert aus der Simulation des SPARTACUS-Datensatzes und blauer Balken: Ergebnis aus der Beobachtung. Die Boxplots basieren auf den zehn einzelnen Schätzwerten, abgeleitet aus den RCM-Modellen und zeigen für jede Periode und jedes Szenario die Verteilung der Schätzwerte innerhalb einer Betrachtung. 60

Abbildung 6-14: Vergleich der einzelnen Perioden und sozioökonomischen Szenarien für die berechneten HQ₁₀₀ Schätzwerte. Schwarze Punkte: Schätzwerte und Vertrauensbereich, abgeleitet aus den einzelnen RCM-Modellen, violette Markierung: berechnete Schätzwerte aus der künstlich erstellten Ganglinie, roter Balken: Schätzwert aus der Simulation des SPARTACUS-Datensatzes und blauer Balken: Ergebnis aus der Beobachtung. Die Boxplots basieren auf die zehn einzelnen Schätzwerte abgeleitet aus den RCM-Modellen und zeigen für jede Periode und jedes Szenario die Verteilung der Schätzwerte innerhalb einer Betrachtung. 64

Abbildung 6-15: Vergleich der einzelnen Perioden und sozioökonomischen Szenarien für die berechneten HQ₃₀₀ Schätzwerte. Schwarze Punkte: Schätzwerte und Vertrauensbereich, abgeleitet aus den einzelnen RCM-Modellen, violette Markierung: berechnete Schätzwerte aus der künstlich erstellten Ganglinie, roter Balken: Schätzwert aus der Simulation des SPARTACUS-Datensatzes und blauer Balken: Ergebnis aus der Beobachtung. Die Boxplots basieren auf die zehn einzelnen Schätzwerte, abgeleitet aus den RCM-Modellen und zeigen für jede Periode und jedes Szenario die Verteilung der Schätzwerte innerhalb einer Betrachtung. 67

Abbildung 6-16: Vergleich der relativen Änderung der Hochwasserschätzwerte in Bezug auf die Ergebnisse aus der Referenzperiode (1971-2000) 70

Abbildung A2-1: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1963-1970 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung 92

Abbildung A2-2: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1971-1978 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung 93

Abbildung A2-3: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1979-1986 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung 94

Abbildung A2-4: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1987-1994 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung 95

Abbildung A210-5: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1995-2000 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung 96

Abbildung A3-6: Ausschnitt der Validierungsperiode 2001-2008 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,76. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung 97

Abbildung A3-7: Ausschnitt der Validierungsperiode 2009-2014 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,76. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung 98

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Zusammenfassung von bereits bestehenden Rechtsnormen für Klimaanpassungsfaktoren für Bemessungshochwässer und Bemessungsniederschläge in verschiedenen Ländern (Madsen et al., 2014).....	3
Tabelle 2-1: Wasserbilanzkomponenten für die Raab aus BMLFUW (2005)	7
Tabelle 2-2: Landnutzung im Einzugsgebiet Raab.....	7
Tabelle 2-3: Bodentypen im Einzugsgebiet der Raab.....	8
Tabelle 2-4: Hydrogeologie im Einzugsgebiet der Raab.....	8
Tabelle 3-1:Verwendete Pegel	11
Tabelle 3-2: Verwendete regionale Klimamodelle aus Schulz et al. (2017). Dabei bedeutet EUR-11, dass die Daten aus dem EURO-CORDEX Projekt entstammen. Sie bilden einen Ausschnitt von Europa ab. CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, ICHEC-EC-EARTH, IPSL-IPSL-CM5A-MR, MOHC - HadGEM2-ES und MPI-M-MPI-ESM-LR sind Bezeichnungen für die verwendeten Antriebsmodelle (e.g. globale Zirkulationsmodelle). CLMcom-CCLM4-8-17, SMHI-RCA4, KNMI-RACMO22E, DMI-HIRHAM5 und IPSL-INERIS-WRF331F sind Abkürzungen für das jeweilige RCM und beinhalten ebenfalls den jeweiligen Institutionsnamen.	13
Tabelle 4-1: Die vier Konzentrationspfade (IPCC, 2013)	26
Tabelle 4-2: Erforderliche repräsentative Beobachtungsdauer für extremwertstatistische Analysen (BMLFUW, 2011b)	32
Tabelle 4-3: Vergleich der Wiederkehrintervalle aus einer AMS und einer PDS Auswertung.....	33
Tabelle 4-4: Vergleich 2- und 3- parametrische Verteilungsfunktionen (Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.DWA, 2012)	35
Tabelle 5-1: Verwendete Parameter für die automatische Kalibrierung mit unterer bzw. oberer Grenze. Erläuterungen der Parameter sind im Anhang A.1 angeführt. Die Einheiten der Parameter entsprechen der zeitlichen Auflösung der Eingangsgrößen.....	44
Tabelle 5-2: Einstellungen für Warmlaufphase, Kalibrierung und Validierung.....	44
Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Kalibrierungsperiode 1963-2000.....	52
Tabelle 6-2: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Validierungsperiode 2001-2014.....	52
Tabelle 6-3: Ergebnisse aus der Hochwasserextremwertstatistik für HQ30, HQ100 und HQ300. Das kursiv und dick gekennzeichnete Modell wurde nicht für weitere Analysen verwendet.....	58
Tabelle 6-4: Ergebnisse der Schätzwerte (RCM, Q_{obs} , künstliche Q) mit einem Wiederkehrintervall von 30 Jahren für die verschiedenen Perioden und Szenarien. Schätzwerte und Konfidenzgrenzen in m^3/s . Umrahmte Zahlen zeigen die kleinste untere und die größte obere Konfidenzgrenze der jeweiligen Einteilung an und zeigen auf, in welcher möglichen Bandbreite die abgeleiteten Schätzwerte aus den RCM-Modellen liegen können.....	62

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Schätzwerte (RCM, Q_{obs} , künstliche Q) mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren für die verschiedenen Perioden und Szenarien. Schätzwerte und Konfidenzgrenzen in m^3/s . Umrahmte Zahlen zeigen die kleinste untere und die größte obere Konfidenzgrenze der jeweiligen Einteilung an und zeigen auf, in welcher möglichen Bandbreite die abgeleiteten Schätzwerte aus den RCM-Modellen liegen können..... 65

Tabelle 6-6: Ergebnisse der Schätzwerte (RCM, Q_{obs} , künstliche Q) mit einem Wiederkehrintervall von 300 Jahren für die verschiedenen Perioden und Szenarien. Schätzwerte und Konfidenzgrenzen in m^3/s . Umrahmte Zahlen zeigen die kleinste untere und die größte obere Konfidenzgrenze der jeweiligen Einteilung an und zeigen auf, in welcher möglichen Bandbreite die abgeleiteten Schätzwerte aus den RCM-Modellen liegen..... 68

Tabelle A1-1: Liste aller Parameter in COSERO 1/3..... 89

Tabelle A1-2: Liste aller Parameter in COSERO 2/3..... 90

Tabelle A1-3: Liste aller Parameter in COSERO 3/3..... 91

ANHANG

A Anhang

A.1 COSERO Modellparameter

Tabelle A1-1: Liste aller Parameter in COSERO 1/3

Parameter	Dimension	Type	Unit	Description	Default value	Typical values	Remarks	Frequently used
BAREGR	NB, IZ	float	/	fraction of ground that is never snow covered - use for steep rocky areas in high elevation	0	0		x
BETA	NB, IZ	float	/	parameter to compute runoff generation as a function of soil moisture	4.5	0.1 - 10		✓
BW0INI	NB, IZ	float	mm	initial soil moisture of the soil layer	0.7		insensitive with continuous simulation after spin-up time	x
BW1INI	NB, IZ	float	mm	initial water level in the surface flow reservoir (insensitive with continuous simulation)	0		insensitive with continuous simulation after spin-up time	x
BW2INI	NB, IZ	float	mm	initial water level in the inter flow reservoir	25		insensitive with continuous simulation after spin-up time	x
BW3INI	NB	float	mm	initial water level in the base flow reservoir, or observed runoff at the start of the simulation period	250		insensitive with continuous simulation after spin-up time	x
BW4INI	NB, IZ	float	mm	initial water level in the subbasin route reservoir (insensitive with continuous simulation)	0		insensitive with continuous simulation after spin-up time	x
BW5INI	NB	float	m ³	initial water volume in the route reservoir (insensitive with continuous simulation)	0		insensitive with continuous simulation after spin-up time	x
BWLAINI	NB	float	m ³	initial water volume in the linear reservoir for simulating retention of a lake	0		insensitive with continuous simulation after spin-up time	x
CTMAX	NB, IZ	float	mm/°C/d	maximum snow melt factor on June 21	5	2-7		✓
CTMIN	NB, IZ	float	mm/°C/d	minimum snow melt factor on Dec 21	2	0.2 - 5		✓
CTNEG	NB, IZ	float	mm/°C/d	negative melt factor to compute refreezing of melted water in the snow layer	1	1		x
CTRED	NB, IZ	float	/	factor to reduce the melt factor after snow fall because of higher albedo	0.7	0.7		x
DAYSDRY	NB, MON	float	d	length of dry spells (monthly timesteps)	0	0	not used for time steps ≤ 24 h	x
DAYSWET	NB, MON	float	d	length of wet spells (monthly timesteps)	1	0	not used for time steps ≤ 24 h	x
DFZON	NB, IZ	float	km ²	area of zone	1	-		✓
DWHCAP	NB	float	l/(g/cm ²)	decrease of the water holding capacity with increasing snow density	0	0		x
ELEV	NB, IZ	float	m	mean elevation of the zone	500	200 - 4000		✓
ETS LPCOR	NB, IZ	float	/	correction factor for potential evapotranspiration to account for slope and aspect	1	0.9 - 1.1		✓
ETS YSCOR	NB, MON	float	/	correction factor for ETP to account for systematic errors	1	0.9 - 1.1		✓
ETVEG COR	NC, MON	float	/	correction factor for potential evapotranspiration to account for vegetation type	1	0.4 - 1.1		✓
EVPNS	NB	float	mm/h	critical precipitation rate at which ETP is zero	0.7	0.7		x
EVPSNO	NB	float	/	correction factor for ETP to account for snow sublimation	0.3	0.3		x
EZEL	NB	float	km ²	area of the subbasin	1000	-		✓
FK	NB, IZ	float	/	field capacity	0.25	0.08 - 0.42 / 1	if FK=1 and PWP=0, M = conceptual soil storage	✓
FKFAK	NB, IZ	float	/	factor to compute ETA from ETP as a function of soil moisture	0.7	0.6 - 0.7		✓
H1	NB, IZ	float	mm	outlet level of reservoir for simulating surface flow	2	0 - 20		✓
H2	NB, IZ	float	mm	outlet level of reservoir for simulating inter flow	10	0 - 20		✓
INTMAX	NC, MON	float	mm	maximum storage capacity of interception module	0	0.5 - 4		✓

Tabelle A1-2: Liste aller Parameter in COSERO 2/3

Parameter	Dimension	Type	Unit	Description	Default value	Typical values	Remarks	Frequently used
KBF	NB, IZ	float	h	recession constant for simulating outflow from the soil module with a linear reservoir	3000	2000 - 12000		✓
KMELTRINI	NB, IZ	float	mm	initial amount of liquid water stored in the snow layer	0	0	insensitive with continuous simulation after spin-up time	✗
KSHINI	NB, IZ	float	mm	initial depth of the snow layer	0	0	insensitive with continuous simulation after spin-up time	✗
KSWINI	NB, IZ	float	mm	initial water equivalent of the snow layer	0	0	insensitive with continuous simulation after spin-up time	✗
M	NB, IZ	float	mm	storage capacity of the soil	1000	100 - 1700		✓
NZ_B	NB, IZ	integer		Index of zone in subbasin	-	-		✗
NC_B	NB, IZ	integer		Index of vegetation / land use class of zone	-	-		✗
NSRHOMAX	NB	float	g/cm ³	maximum density of newly fallen snow	0.3	0.3		✗
NVAR	NB, IZ	float	/	variance for distributing new snowfall with a log-normal distribution	1.5	0.1 - 2.5		✓
PCOR	NB, IZ, MON	float	/	correction factor for precipitation	1	0.9 - 1.5		✓
PEX2	NB, IZ	float	/	unused	0	-		✗
PEX3	NB	float	/	unused	0	-		✗
PWP	NB, IZ	float	/	permanent wilting point	0.08	0.03 - 0.12 / 0	if FK=1 and PWP=0, M = conceptual soil storage	✓
RAINTRT	NB, IZ	float	°C	transition temperature above which precipitation is pure rain	3	1 - 4		✓
SETCON	NB, IZ	float	/	settlement time constant as used in the settlement equation of Riley (1973)	0.2	0.2		✗
SNOWCOR	NB, IZ	float	/	correction factor of snow-fall to account for systematic errors	1	1 - 1.3		✓
SNOWDET	NB	integer	/	switch to decide if the form of precipitation shall be determined (1 = determine form of precipitation)	1	1		✗
SNOWTRT	NB, IZ	float	°C	transition temperature below which precipitation is pure snow	0	-1.25 - 0		✓
SRHOMAX	NB	float	g/cm ³	maximum density of the snow layer	0.3	0.45		✗
TAB1	NB, IZ	float	h	recession constant for simulating surface flow	50	1 - 50		✓
TAB2	NB, IZ	float	h	recession constant for simulating inter flow	500	25 - 300		✓
TAB3	NB	float	h	recession constant for simulating base flow	5000	500 - 5000		✓
TAB4	NB, IZ	float	h	recession constant for simulating routing within a subbasin	1	0.05 - 2		✓
TAB5	NB	float	h	recession constant for simulating routing of runoff	1	0.3 - 1.5		✓
TABLA	NB	float	h	recession constant for simulating retention of a lake	0	0		✓
TCOR	NB, IZ, MON	float	°C	correction constant for air temperature	0	0 - 3		✗
THRT	NB, IZ	float	°C	threshold temperature above which snow melt is simulated	0	0 - 1		✗
TM/MON	NB, IZ, MON	float	°C	long-term mean monthly temperature	10	-25 - 12		✓
TSOILINI	NB, IZ	float	°C	initial soil temperature	5	5	insensitive with continuous simulation after spin-up time	✗
TSOILMAX	NB	float	°C	maximum soil temperature	15	15		✗
TSOILMIN	NB	float	°C	minimum soil temperature	-5	-5		✗

Tabelle A1-3: Liste aller Parameter in COSERO 3/3

Parameter	Dimension	Type	Unit	Description	Default value	Typical values	Remarks	Frequently used
TVAR	NB	float	°C	standard deviation of air temperature within the modelling time step for simulating snow melt	0	0		x
TVS1	NB, IZ	float	h	recession constant for simulating percolation from the surface flow module	100	5 - 150		✓
TVS2	NB, IZ	float	h	recession constant for simulating percolation from the inter flow module	1000	45 - 1500		✓
UADJ	NB, IZ	float	mm/(mbar/d)	average daily wind function during rain on snow events	2	2		x
WATERBODY	NB, IZ	integer	/	switch to identify zones representing open water bodies (1 = open water body)	-	0/1		✓
WHCAP	NB	float	/	water holding capacity at the maximum snow density	0.05	0.05		x
XAB1	NB, IZ	float	/	unused	0	-		x

A.2 Ganglinien Kalibrierungsperiode

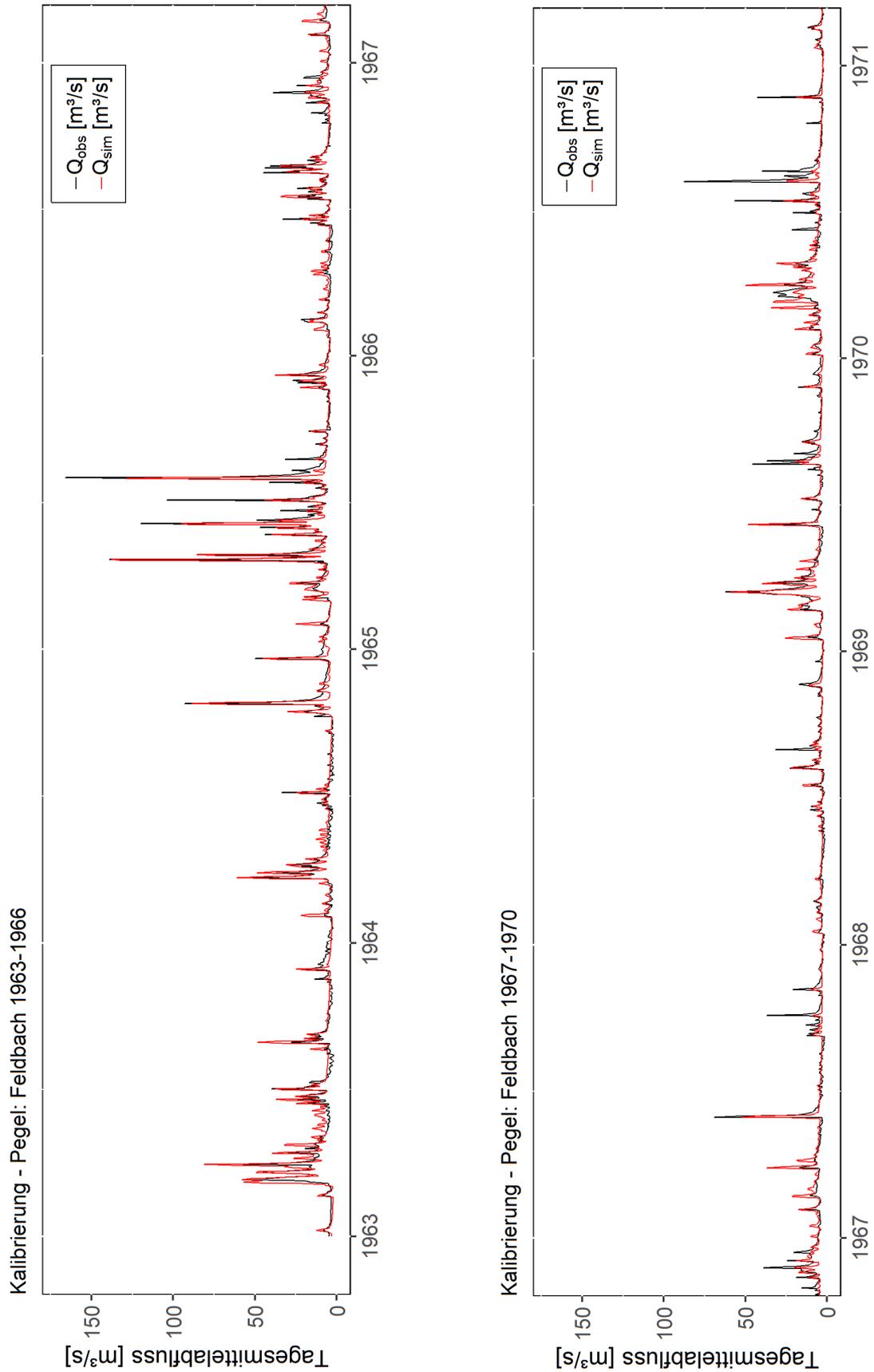


Abbildung A2-1: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1963-1970 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Linie: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung

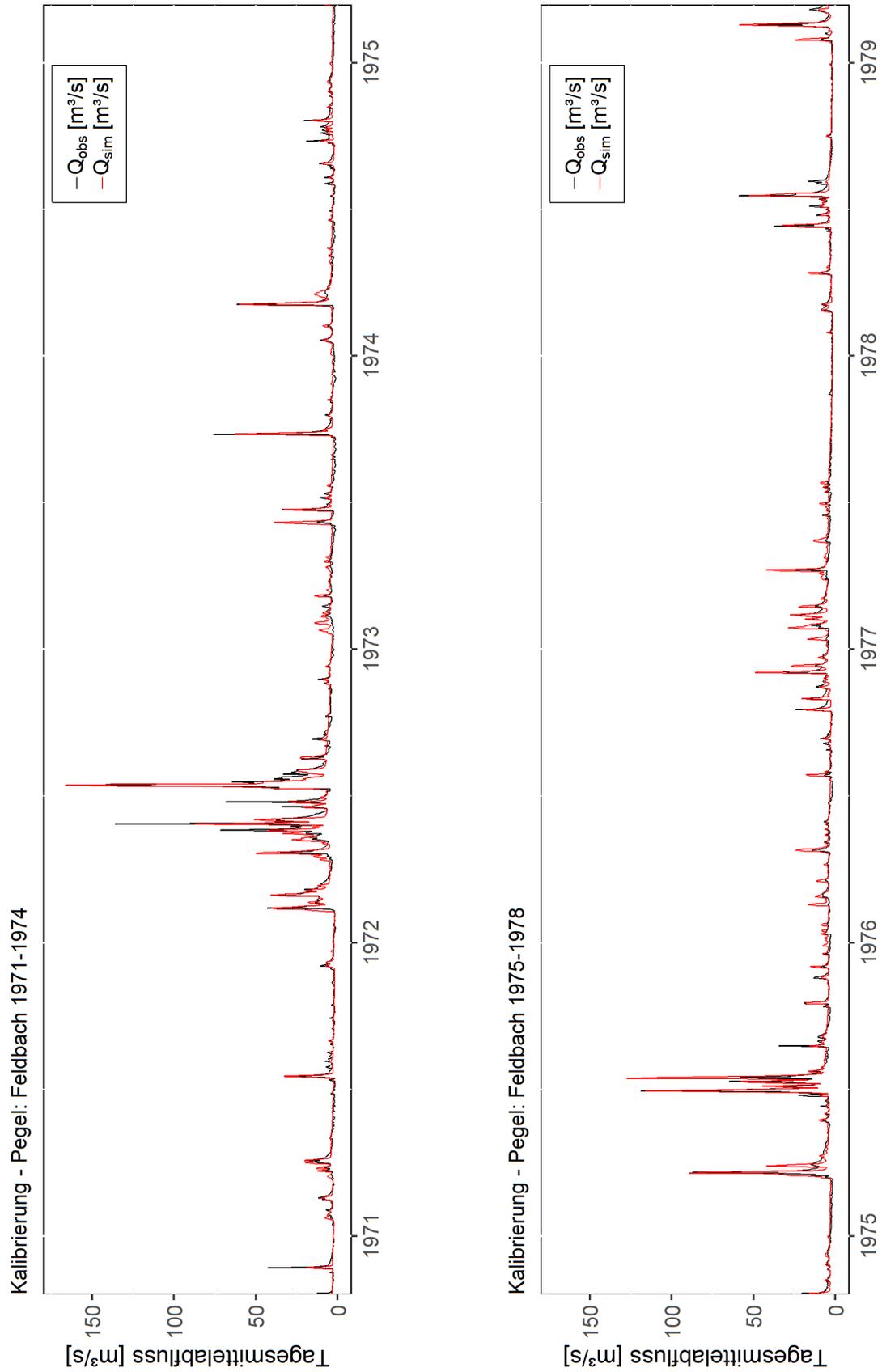


Abbildung A2-2: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1971-1978 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung

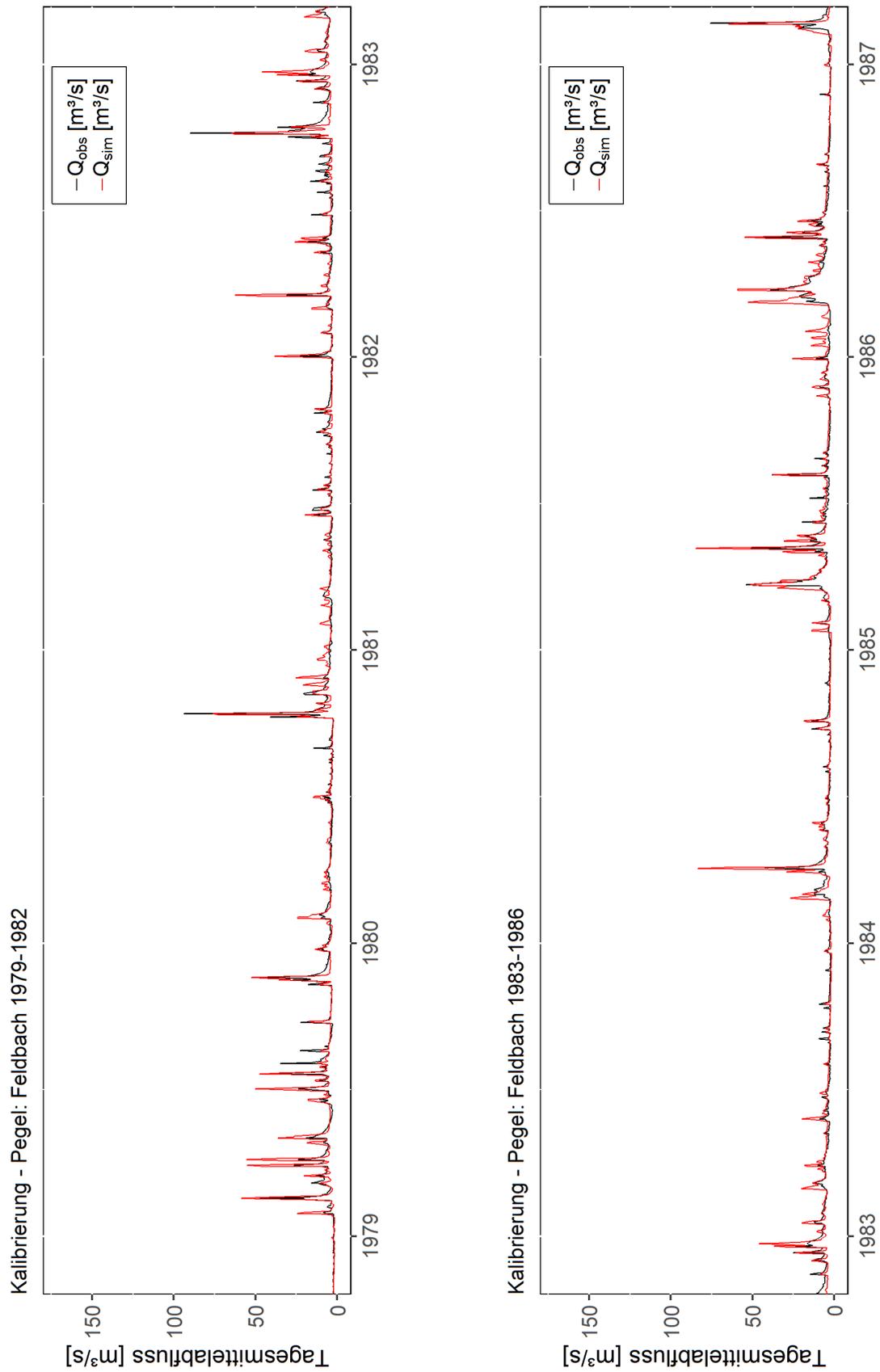


Abbildung A2-3: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1979-1986 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung

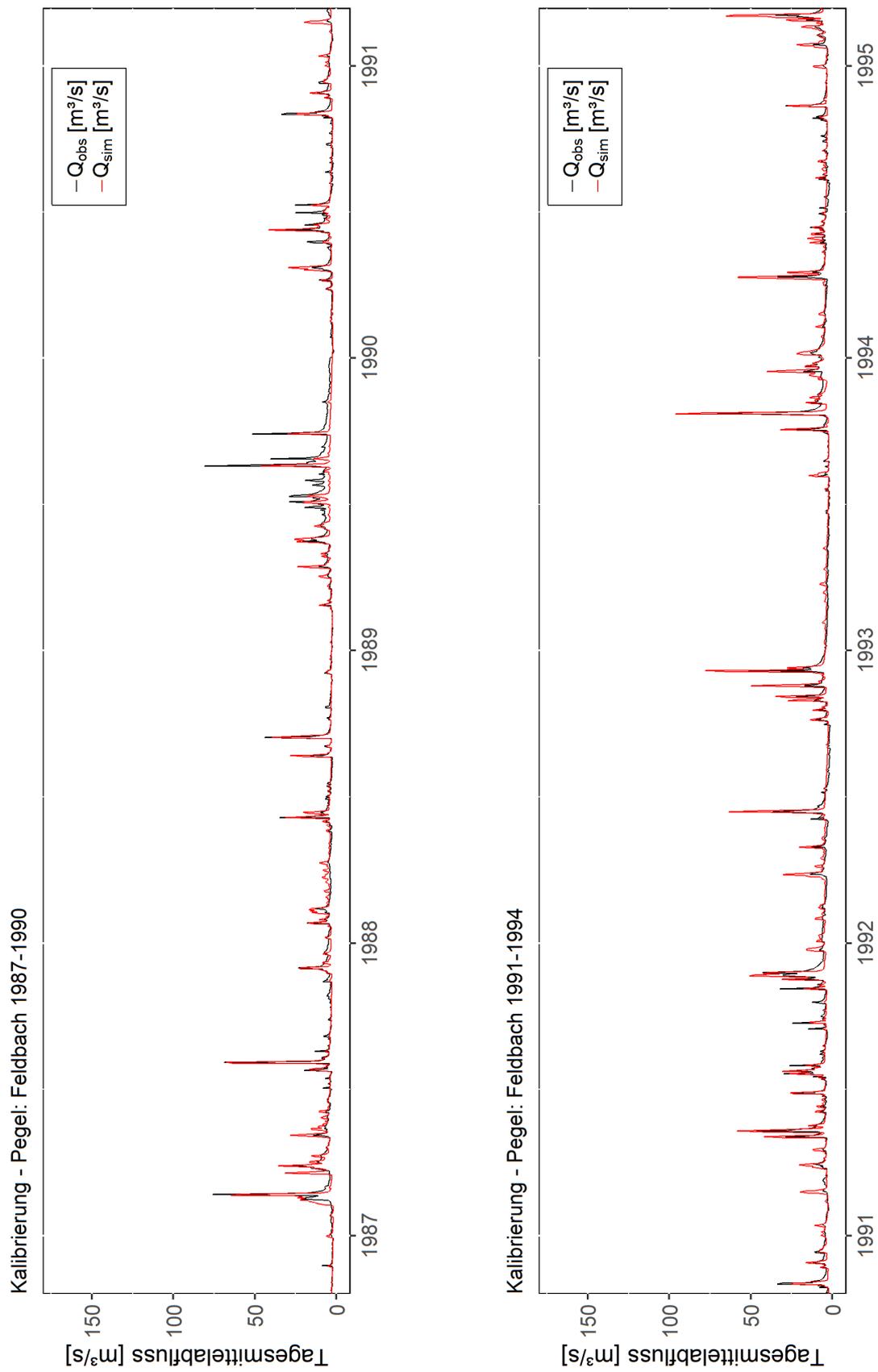


Abbildung A2-4: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1987-1994 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Linie: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung

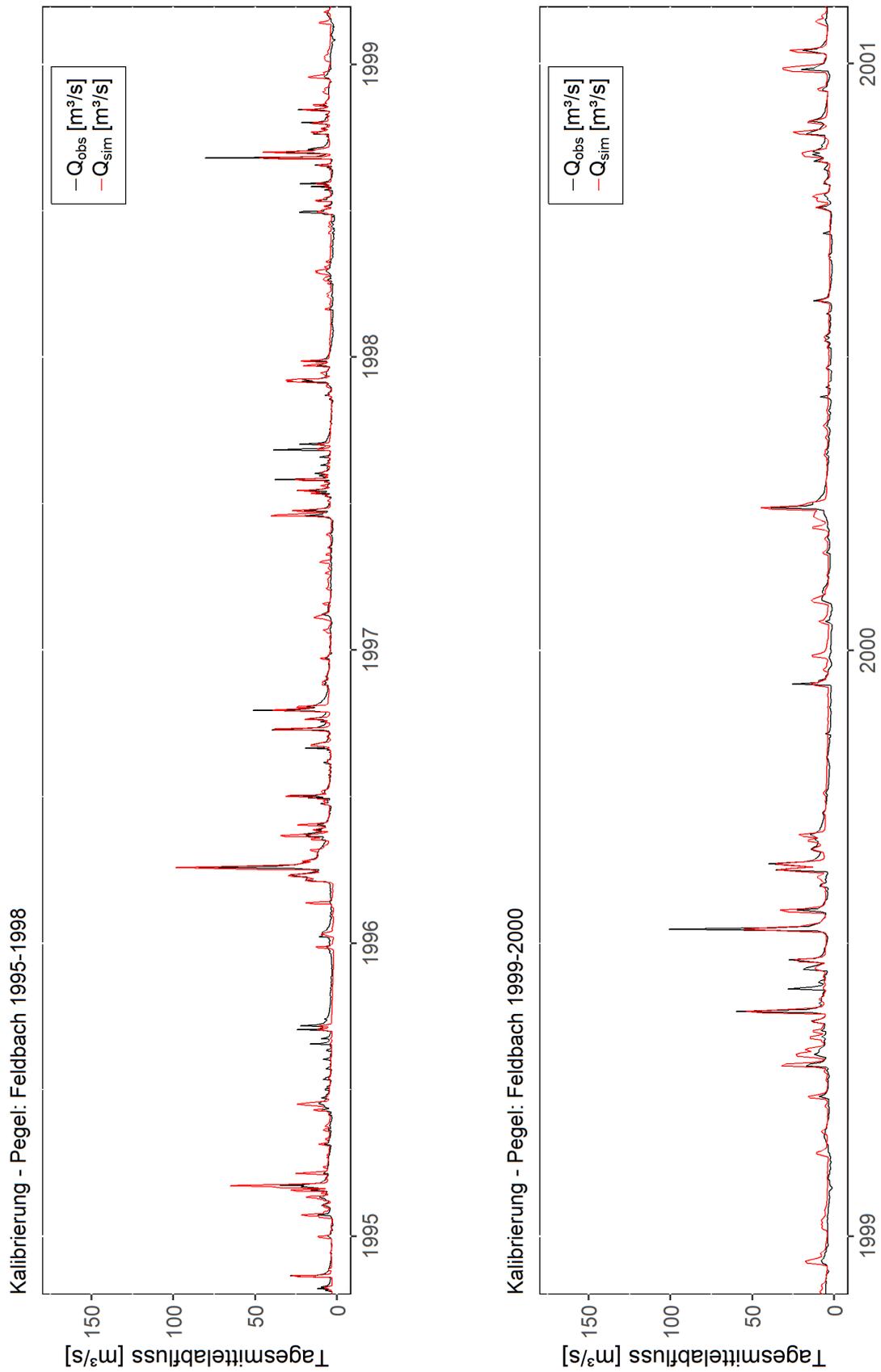


Abbildung A210-5: Ausschnitt der Kalibrierungsperiode 1995-2000 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,77. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung

A.3 Ganglinien Validierungsperiode

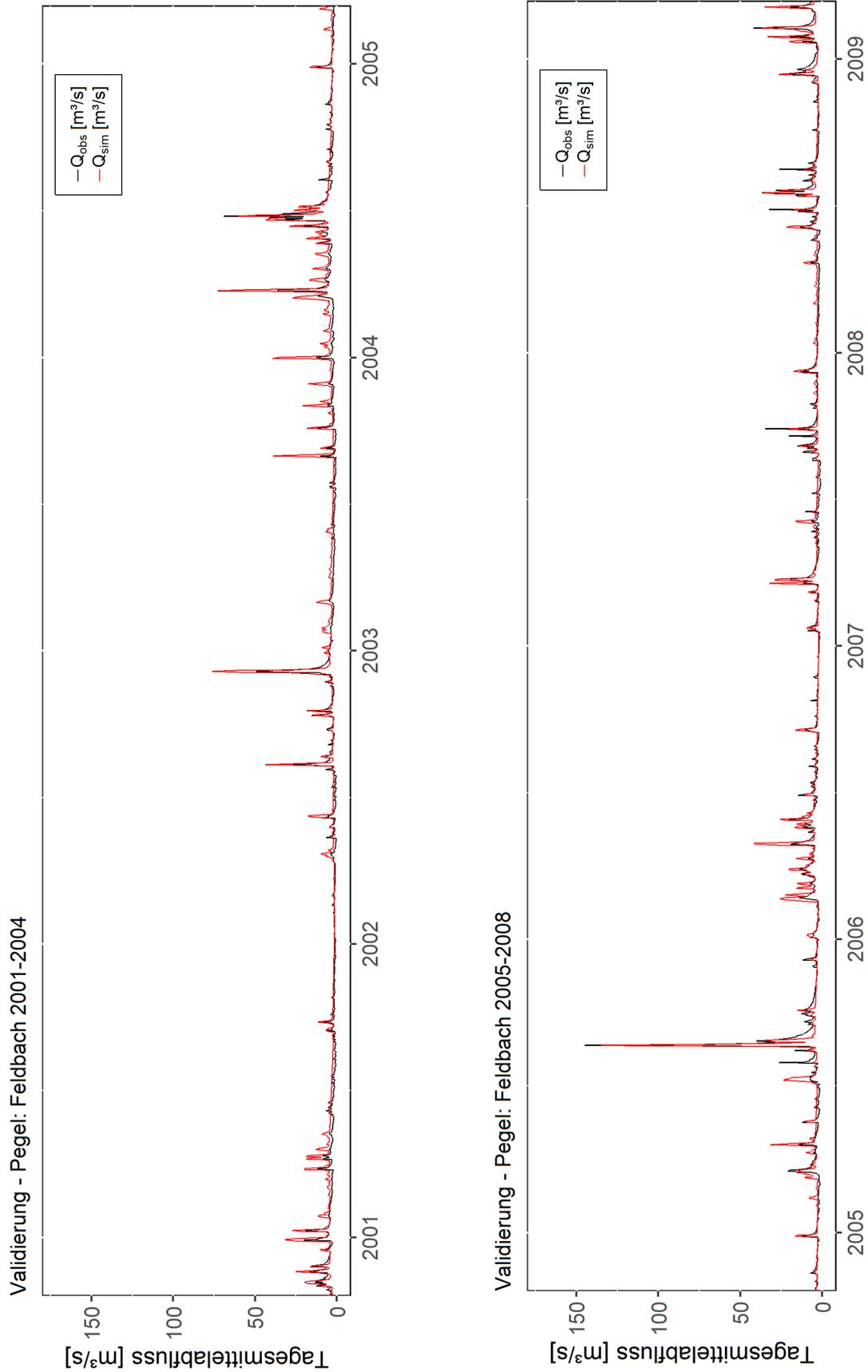


Abbildung A3-6: Ausschnitt der Validierungsperiode 2001-2008 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,76. Rote Linie: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung

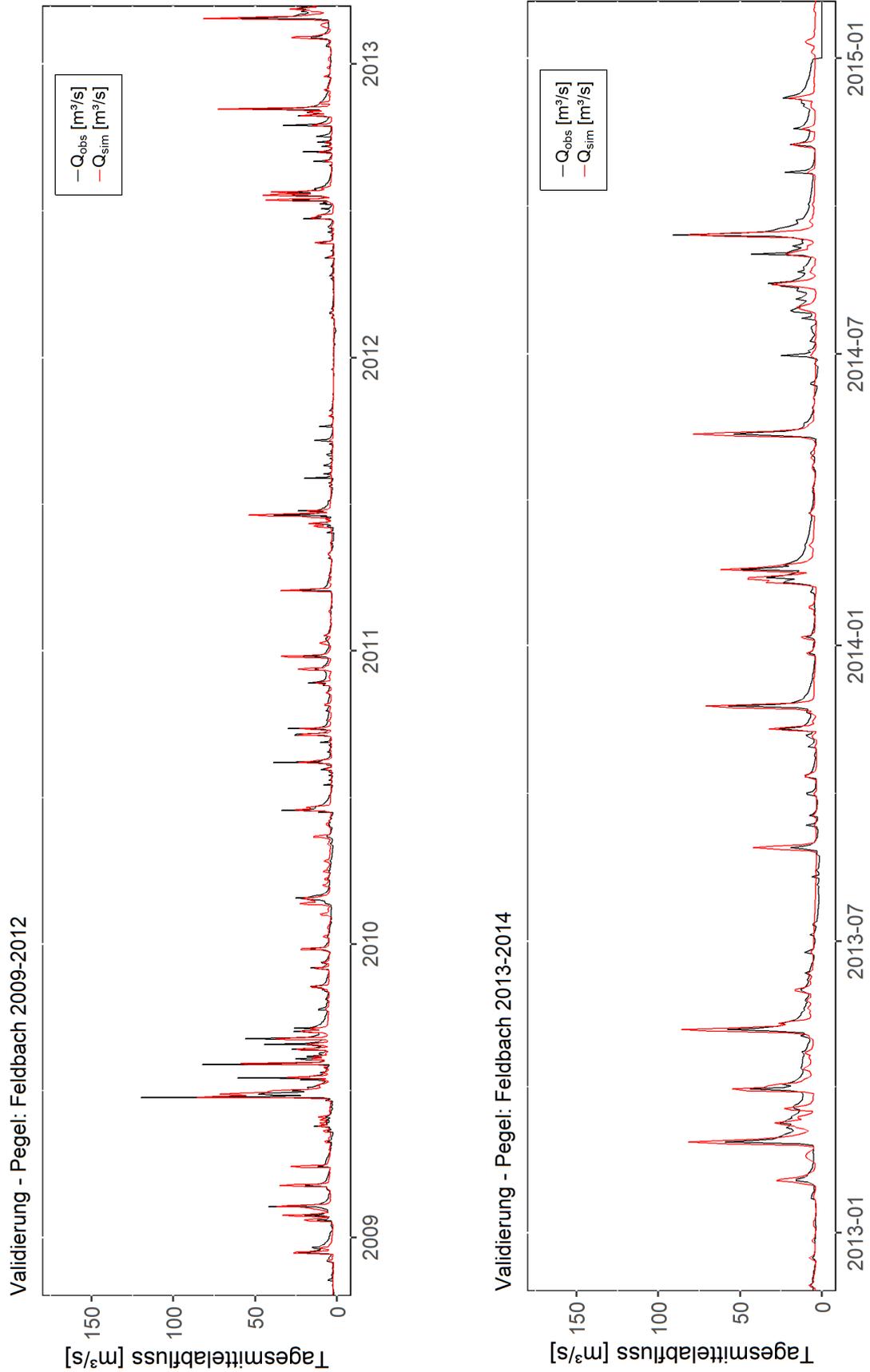


Abbildung A3-7: Ausschnitt der Validierungsperiode 2009-2014 für den Pegel Feldbach. KGE für die gesamte Periode 0,76. Rote Line: Tagesmittelabfluss aus der Simulation mit SPARTACUS, schwarze Linie: Tagesmittelabfluss aus der Beobachtung