



**University of  
Zurich**<sup>UZH</sup>

# Differenzierte Gradienten der Niederschlagsverteilung und deren Auswirkungen auf Abflusssimulationen mit dem Modell HBV

GEO 511 Master's Thesis

**Author**

Angela Huber  
18-781-500

**Supervised by**

PD Dr. Daniel Viviroli  
Dr. Maria Staudinger

**Faculty representative**

Prof. Dr. Jan Seibert

26.01.2025

Department of Geography, University of Zurich

## Abstract

This study examines the spatial and temporal distribution of precipitation in the Swiss (pre-)Alps and its impact on hydrological modeling. Precipitation in the Alpine region is complex and influenced by various meteorological processes. Precipitation is a key input to hydrological models, which play an important role in different hydrological studies like water resource management and flood risk assessment. The focus of this study is the altitudinal distribution of precipitation in 18 selected catchments of Switzerland. The analysis employed data from the *CombiPrecip* dataset, which was examined through the implementation of segmented linear regressions. These differentiated precipitation gradients were then integrated into the HBV hydrological model, a model developed in Sweden, to investigate the impact of high-resolution precipitation data on runoff simulations.

The results show that segmented gradients provide a more accurate representation of precipitation patterns. However, the distribution of precipitation is only to a limited extent dependent on the topographical altitude. Other factors, such as wind, exposure, and weather patterns, also influence precipitation. Regional differences were also observed; for example, the connection between altitude and precipitation is stronger in the western central Alps than in the southern Alps of Switzerland. The integration of these gradients into the hydrological model HBV confirmed their impact on runoff simulations. A recalibration of the model could further improve its efficiency. Future research could focus on recalibration, investigating other time-related changes, or exploring additional factors like exposure, wind, or weather systems.

This study highlights the importance of precipitation data for hydrological models and shows a possibility to integrate differentiated precipitation data in hydrological models, while also showing that altitude alone cannot explain precipitation patterns in a given catchment.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die räumliche Verteilung des Niederschlags in den Schweizer (Vor-)Alpen und deren Auswirkungen auf hydrologische Modellierungen für unterschiedliche Zeitspannen. Die Niederschlagsverteilung im Alpenraum ist komplex und wird durch unterschiedliche meteorologische Prozesse beeinflusst. Zudem ist Niederschlag ein wichtiger Eingabeparameter für hydrologische Modelle, welche wiederum eine Schlüsselrolle bei der Wasserressourcenbewirtschaftung und der Risikobewertung von Extremereignissen spielen. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf der Untersuchung der Höhenverteilung des Niederschlags in 18 ausgewählten Untersuchungsgebieten der Schweiz. Für die Analyse wurden Rasterdaten aus dem CombiPrecip-Datensatz herangezogen und durch lineare segmentierte Regressionen bearbeitet. Die herausgearbeiteten differenzierten Niederschlagsgradienten wurden in das – in Schweden entwickelte – hydrologische Modell HBV integriert, um den Einfluss der hochaufgelösten Niederschlagseingabe auf die Simulation von Abflussverhalten zu beobachten.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass segmentierte Gradienten eine präzisere Darstellung der räumlichen Niederschlagsverteilung ermöglichen, jedoch die topografische Höhe allgemein nur bedingt die Niederschlagsverteilung in den Untersuchungsgebieten darstellt. Weitere Faktoren wie Wind, Exposition oder Wetterlagen scheinen ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Niederschlagsverteilung in den untersuchten Gebieten zu haben. Durch die Untersuchungen wurden regionale Unterschiede erkennbar. In den westlichen Zentralalpen ist die Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe beispielsweise grösser als in den Südalpen. Die Integration dieser Gradienten in das HBV-Modell haben bestätigt, dass differenzierte Gradienten der Niederschlagsverteilung einen Einfluss auf die Abflusssimulationen haben. Durch eine Neukalibrierung des Modells für die unterschiedlichen Untersuchungsgebiete könnten differenzierte Niederschlagsgradienten zu einer Verbesserung der Modellgüte führen. Weitere Forschungen könnten sich dabei auf eine Neukalibrierung des Modells, die Untersuchung weiterer zeitlichen Unterschiede oder der Untersuchung von weiteren beeinflussenden Faktoren wie Exposition, Wetterlagen oder Winde konzentrieren.

Die vorliegende Arbeit verdeutlicht die Relevanz der Berücksichtigung differenzierter Niederschlagsverteilungen in hydrologischen Modellen, zeigt jedoch auch, dass die Niederschlagsverteilung in einem Untersuchungsgebiet nicht ausschliesslich durch die topografische Höhe bestimmt werden kann.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein grösster Dank gilt meinen Betreuenden, Dr. Maria Staudinger und PD Dr. Daniel Viviroli, für ihre wertvolle Unterstützung, ihr konstruktives Feedback und ihre stetige Begleitung während dieser Arbeit. Besonders danke ich Dr. Maria Staudinger für ihre große Hilfe und ihre Geduld bei den Fragen und Unklarheiten in R. Ein weiterer Dank geht an Heinz Meier, Chiara Walt und Annika Gebhardt, die sich die Zeit genommen haben, meine Arbeit sorgfältig gegenzulesen, und durch ihre Anmerkungen zur Verbesserung beigetragen haben. Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und meinen engen Freund/-innen bedanken, die mich durch ihre Unterstützung, ihr Verständnis und ihr offenes Ohr in dieser Zeit sehr geholfen haben.

# Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	I
ZUSAMMENFASSUNG	II
DANKSAGUNG	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	XI
1 EINLEITUNG	1
1.1 DIE BEDEUTUNG VON HYDROLOGISCHEN MODELLIERUNGEN	1
1.2 NIEDERSCHLAG IN DEN ALPEN	2
1.3 LITERATURÜBERSICHT	3
1.4 FRAGESTELLUNG UND HYPOTHESEN	5
2 DATEN UND METHODEN	8
2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIETE	8
2.2 NIEDERSCHLAGSDATEN	12
2.3 ABFLUSSDATEN	12
2.4 DIGITALES HÖHENMODELL	13
2.5 MODELLEINSTELLUNGEN IM HBV	13
2.5.1 <i>Das hydrologische Modell HBV</i>	13

2.5.2	<i>Einstellungen für die Einzugsgebiete</i>	15
2.5.3	<i>Eingabedaten</i>	16
2.5.4	<i>Kalibrierung, Validierung, Warm-Up Periode</i>	18
2.6	DATENAUFBEREITUNG UND -ANALYSE	18
2.6.1	<i>Niederschlagsgradienten</i>	18
2.6.2	<i>Abflussmodellierungen in HBV</i>	20
2.7	AUSGEWÄHLTE HOCHWASSEREREIGNISSE ZWISCHEN 2005 UND 2023	21
2.7.1	<i>August 2007</i>	21
2.7.2	<i>Juli 2011</i>	22
2.7.3	<i>Mai-Juni und Juli 2013</i>	23
3	ERGEBNISSE	26
3.1	ABHÄNGIGKEIT DES NIEDERSCHLAGS VON DER HÖHE	26
3.1.1	<i>Linearität der mittleren Jahresniederschlagssummen</i>	26
3.1.2	<i>Linearität der mittleren Monatsniederschlagssummen</i>	29
3.1.3	<i>Linearität der mittleren saisonalen Niederschlagssummen</i>	33
3.1.4	<i>Linearitäten der Ereignisse</i>	34
3.2	LINEARITÄT MIT SEGMENTEN	36
3.2.1	<i>Segmente der mittleren Jahresniederschlagssummen</i>	36
3.2.2	<i>Segmente der mittleren Monatsniederschlagssummen</i>	38
3.2.3	<i>Segmente der mittleren saisonalen Niederschlagssummen</i>	42

3.2.4	<i>Segmente der Ereignisse</i>	43
3.3	ABFLUSSMODELLIERUNGEN MIT DEN NIEDERSCHLAGSGRADIENTEN	44
4	DISKUSSION	56
4.1	ABHÄNGIGKEIT VON NIEDERSCHLAG UND HÖHE	56
4.1.1	<i>Beantwortung der Fragestellungen</i>	56
4.1.2	<i>Höhenprofile und Bruchpunkte</i>	57
4.1.3	<i>Faktoren, die Niederschlagsverteilung beeinflussen</i>	57
4.1.4	<i>Faktoren, die Modellgüte beeinflussen</i>	58
4.2	BEDEUTUNG DER NIEDERSCHLAGSGRADIENTEN	59
4.3	UNSICHERHEITEN UND GRENZEN	60
4.3.1	<i>Datengenauigkeit in höheren Lagen</i>	60
4.3.2	<i>Räumliche Auflösung</i>	61
4.3.3	<i>Generalisierbarkeit der Ergebnisse</i>	61
4.4	AUSBlick	61
5	FAZIT	63
	ANHANG	XII
	ANHANG A: R <sup>2</sup> -WERTE DER ALLGEMEINEN LINEAREN REGRESSION	XII
	ANHANG B: R <sup>2</sup> -WERTE DER SEGMENTIERTEN LINEAREN REGRESSION	XIII
	ANHANG C: KLING-GUPTA-WERTE DER SIMULATIONEN	XIV

ANHANG D: ABFLUSSSUMMEN DER SIMULATIONEN	XV
ANHANG E: KLING-GUPTA-WERTE UND ABFLUSSSUMMEN DER EREIGNISSE	XVI
LITERATURVERZEICHNIS	XVII
EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	XXIV

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Karte mit den Untersuchungsgebieten in pink markiert (Quelle: Swisstopo, 2005).  
\_\_\_\_\_ 8
- Abbildung 2: Meteorologische Grafiken der Schweiz. a) jährliche Durchschnittstemperaturen in Grad Celsius. b) Durchschnittliche Jahresniederschlagssummen in mm. c) Niederschlagssummen von Extremereignissen in mm. d) Saisonale Unterschiede der Starkniederschlagsereignisse (Anteil der Jahre mit 5-Tagesmaximum) (Quelle: MeteoSchweiz, o. J.). \_\_\_\_\_ 9
- Abbildung 3: Anteil der Höhe an der Gesamtfläche der einzelnen Untersuchungsgebiete. \_\_\_\_ 11
- Abbildung 4: HBV-Modellbeschreibung mit den unterteilten Modulen/Routinen (Quelle: Seibert & Vis, 2012). \_\_\_\_\_ 14
- Abbildung 5: Karte der Niederschlagsverteilung vom Ereignis zwischen 06. und 10. August 2007 (Quelle: Bezzola & Ruf, 2007). \_\_\_\_\_ 22
- Abbildung 6: 2-Tagessumme der Niederschläge vom 14. Juli 2011 (Quelle: Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2011). \_\_\_\_\_ 23
- Abbildung 7: Grafik der monatlichen Niederschlagssumme vom Mai 2013 und deren Abweichung der Norm (Quelle: MeteoSchweiz, 2013c). \_\_\_\_\_ 24
- Abbildung 8: Heatmap der  $R^2$ -Werte der allgemeinen Regression für alle untersuchten Gebiete.  
\_\_\_\_\_ 27
- Abbildung 9: Mittlere Jahresniederschlagssummen der einzelnen Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit der topografischen Höhe. \_\_\_\_\_ 28
- Abbildung 10: Boxplot der  $R^2$ -Werte für die monatliche Niederschlagssumme in Abhängigkeit von der \_\_\_\_\_ 29
- Abbildung 11: Niederschlagsverteilung des Untersuchungsgebiets Thur\_6935. Die x-Achse zeigt die Höhe [m ü. M.] und die y-Achse den Niederschlag [mm]. Oben links erkennt man die zweite lineare Abhängigkeit. \_\_\_\_\_ 30
- Abbildung 12: Mittlere Monatsniederschlagssummen (Januar) der einzelnen Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit von der Höhe. \_\_\_\_\_ 31

Abbildung 13: Mittlere Monatsniederschlagssummen (Juni) der einzelnen Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit der Höhe. _____	32
Abbildung 14: Boxplot der $R^2$ -Werte für die saisonalen Niederschlagssummen in Abhängigkeit von der Höhe. _____	33
Abbildung 15: Höhenverteilung des Niederschlags der ausgewählten Niederschlagsereignisse für vier Untersuchungsgebiete. _____	34
Abbildung 16: Übersicht über die vier Thur-Einzugsgebiete und deren Niederschlagsverteilung. _____	35
Abbildung 17: Grafiken der mittleren Jahresniederschlagssumme von den Untersuchungsgebieten der Maggia_7031 und dem Riale di Calneggia_6849. _____	36
Abbildung 18: Darstellung der $R^2$ -Werte der segmentierten linearen Regression der Monatsniederschlagssummen. _____	38
Abbildung 19: Heatmap der $R^2$ -Werte der segmentierten linearen Regression. _____	39
Abbildung 20: Übersicht über die segmentierte lineare Regression, als Beispiel das Untersuchungsgebiet Lonza_6291. _____	40
Abbildung 21: Übersicht über die segmentierte lineare Regression als Beispiel das Untersuchungsgebiet Rosegbach_7888. _____	41
Abbildung 22: $R^2$ -Werte der segmentierten Regression für die saisonalen Niederschlagssummen _____	42
Abbildung 23: $R^2$ -Werte der allgemeinen und segmentierten linearen Regression für die jeweiligen Niederschlagsereignisse. _____	43
Abbildung 24: Segmentierte Regression der jeweiligen Ereignisse für die Untersuchungsgebiete Riale di Calneggia_6349 und Thur_7236. _____	44
Abbildung 25: Grafik der KGE der unterschiedlichen Simulationen. Die Standardeinstellungen bezeichnen die Einstellungen des Projektes mit der Niederschlagszunahme von 10%/100m. _	45
Abbildung 26: Darstellung der Differenz der Abflusssummen der beobachteten und der simulierten Daten. _____	47

Abbildung 27: Abflusssimulation des Untersuchungsgebiet a) Thur_6935 und b) Vorderrhein_7349 des Jahres 2014. Blau zeigt die beobachteten Abflüsse und rot die modellierten Abflüsse mit den differenzierten Jahresniederschlagsgradienten.	48
Abbildung 28: Kling-Gupta-Werte der durchgeführten Simulationen der ausgewählten Ereignisse mit der	48
Abbildung 29: Abflussganglinie des Untersuchungsgebietes Schwarze Lüttschine_6448 für das Niederschlagsereignis im August 2007.	49
Abbildung 30: Abflussganglinie für das Untersuchungsgebiet Weisse Lüttschine_6465.	50
Abbildung 31: Abflussganglinie für das Untersuchungsgebiet Rhone_6708.	51
Abbildung 32: Abflussganglinie für die Untersuchungsgebiete a) Thur_6935 und b) Thur_7236.	52
Abbildung 33: Abflussganglinie für die Untersuchungsgebiete a) Thur_7360 und b) Thur_7411.	53
Abbildung 34: Abflussganglinien für das Gebiet Lüttschine_6331.	54
Abbildung 35: Abflussganglinien für das Gebiet Maggia_7031.	55
Abbildung 36: Differenzen der beobachteten und simulierten Abflusssummen für die jeweiligen	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Metadaten zu den Teileinzugsgebieten mit Angaben zur Region (Quellen: Bundesamt für Umwelt, o. J.; Weingartner & Aschwanden, 1992).	10
Tabelle 2: Übersicht der Eingabedaten für jedes Einzugsgebiet in das HBV-Modell.	17
Tabelle 3: Übersicht der Warm-up- und Simulationsperiode für alle Untersuchungsgebiete.	18
Tabelle 4: Die genutzten Pakete in R mit Zwecks- und Quellenangabe.	20
Tabelle 5: Übersicht über die ausgewählten Ereignisse für die jeweiligen Untersuchungsgebiete.	25
Tabelle 6: Übersicht der bestimmten Werte der segmentierten Regression des mittleren Jahresniederschlags und der topografischen Höhe. Die Steigung wird in % pro 100m, die Bruchpunkte in m ü. M. dargestellt.	37
Tabelle 7: Liste der Untersuchungsgebiete, die für die weitere Auswertung ausgeschlossen werden.	44
Tabelle 8: Kling-Gupta-Werte (KGE) für die durchgeführten Simulationen mit den differenzierten Niederschlagsgradienten. Grün markiert sind die Simulationen mit differenzierten Gradienten, die höhere oder fast gleich hohe KGE wie die Standardeinstellung haben.	46

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Bedeutung von hydrologischen Modellierungen

Hydrologische Modellierungen sind Bestandteil vieler Themen der Wasserwirtschaft und spielen im Management von Wasserressourcen eine entscheidende Rolle. Zum einen können sie wichtige Daten für die Planung und Umsetzung von wasserwirtschaftlichen Massnahmen liefern, zum anderen sind sie von grosser Bedeutung für die Vorhersage und Bewältigung von zukünftigen Ereignissen. Durch langfristige Prognosen können Trends des Klimawandels modelliert werden, um dessen Auswirkungen respektive mögliche Szenarien zu erforschen und aufzuzeigen (Beven, 2012; Guse et al., 2019).

In der Praxis werden häufig die Modelltypen konzeptionelle und physikalisch-basierte Modelle verwendet. Konzeptionelle Modelle, wie beispielsweise das in Schweden entwickelte HBV-Modell (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*) und das in der Schweiz entwickelte PREVAH (*Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU*), basieren auf vereinfachten und abstrakten Annahmen über die Einzugsgebietseigenschaften (Guse et al., 2019). Bei physikalisch-basierten Modellierungen, wie dem HILLFLOW-Modell, sollen die hydrologischen Prozesse möglichst exakt, basierend auf einer physikalischen Gesetzmässigkeit, repräsentiert werden (Bronstert & Plate, 1997; Guse et al., 2019). Generell ist die Verlässlichkeit der Modellergebnisse jedoch in hohem Masse von der Qualität der Eingabedaten, insbesondere Temperatur- und Niederschlagsdaten, abhängig (Wang et al., 2018).

Jedes Modell ist eine vereinfachte Darstellung der realen Welt, was zu Abweichungen von tatsächlichen Messungen, welche wiederum fehlerbehaftet sein können, führt. Diese Unsicherheiten resultieren aus einer Vielzahl von Faktoren, darunter die Qualität und Auflösung der Eingangsdaten und die gewählte Modellstruktur. Weiter sind Einzugsgebiete natürliche Systeme, die divers und komplex sind (Fauresa et al., 1995). Eine der grössten Herausforderungen innerhalb der hydrologischen Modellierung stellt die genaue Repräsentation des Niederschlags dar, da diese einen massgeblichen Einfluss auf die Güte der Modellierung hat (Larson & Peck, 1974; Wang et al., 2018). Die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagsverteilung, insbesondere in gebirgigen Regionen wie den Schweizer Alpen, stellt eine zusätzliche Herausforderung bei der Modellierung dar (vgl. Fauresa et al., 1995; Loritz et al., 2021; Schneider-Carius & Essenwanger, 1955).

## 1.2 Niederschlag in den Alpen

Niederschlag und dessen Verteilung in alpinen Regionen ist für meteorologische und hydrologische Fragestellungen von zentraler Bedeutung, stellt aber auch eine grosse Herausforderung für Auswertungen und allgemeingültige Aussagen dar. In Gebirgsregionen sind meteorologische Prozesse komplex (Frei & Schmidli, 2006). Regionale Bedingungen wie topografische Gegebenheiten können unterschiedliche Auswirkungen auf die Niederschlagsmenge haben (Sevruk & Mieglistz, 2002).

Niederschlag in den Alpen wird als komplexes System verstanden (Frei & Schmidli, 2006). In den Alpen fällt meist deutlich mehr Niederschlag als im umliegenden Flachland. Besonders hohe Niederschlagssummen werden an den nördlichen und südlichen Alpenränder, beispielsweise am Lago Maggiore oder entlang der Berner Alpen, registriert. Die jährlichen Niederschlagssummen liegen in diesen Bereichen mehrheitlich über 1'500 mm (Frei & Schmidli, 2006). Inneralpine Täler, wie das Rhônetal liegen im Niederschlagsschatten der Staulagen und sind ganzjährig trockener als die direkte Umgebung. Die jährlichen Niederschlagssummen können dabei um 700 mm liegen (Wastl & Zängl, 2007).

Die Alpen stellen oft ein Hindernis für Luftmassen dar, was zu Stauwirkungen führt, die den Niederschlag verstärken (Frei & Schmidli, 2006). Besonders während der Wintermonate, bei westlichen und nördlichen Luftströmungen, intensivieren sich die Niederschläge durch orographische Hebung. Im Sommer hingegen führen vermehrt konvektive Prozesse zu Niederschlag in den Alpen (Isotta et al., 2013). So zeigen sich vielfältige Niederschlagsmuster, die die diversen und komplexen meteorologischen Prozesse einer Region widerspiegeln. Neben den saisonalen Faktoren spielen auch Höhe, Exposition und regionale Wetterlagen eine entscheidende Rolle, wodurch die Niederschlagsmengen auf kurzen Distanzen stark variieren können (Frei & Schmidli, 2006; Wastl & Zängl, 2007).

Insgesamt erkennt man im alpinen Niederschlagsklima eine grosse saisonale und räumliche Variabilität. Gemäss Frei und Schmidlin (2006) konzentrieren sich die Niederschläge im Winter vor allem entlang des Alpennordrands. Im Sommer hingegen dringt das Niederschlagsgeschehen in die zentralen und östlichen Bereiche der Alpen vor. An den Alpennord- und Alpensüdränder sind häufig Starkniederschläge möglich, während es in inneralpinen Tälern zu weniger häufigen, langanhaltenden Niederschlagsperioden kommen kann (Frei & Schmidli, 2006).

Die Alpen spielen aufgrund ihrer hohen Niederschlagsmengen und komplexen meteorologischen Prozessen eine besondere Rolle für die Meteorologie der Schweiz und angrenzenden Länder

respektive Regionen. Durch die gegebene Topografie und meteorologischen Bedingungen kommt es zu diversen, teils extremen Wetterphänomenen. Die Herausforderung, die Niederschläge in den Alpen zu prognostizieren oder zu vereinheitlichen, scheint gross bis unmöglich zu sein. Nichtsdestotrotz widmen sich zahlreiche Forschende der Meteorologie der Alpen dem Thema, um ein tieferes Verständnis darüber zu gewinnen. (Frei & Schmidli, 2006; Uttinger, 1951).

Niederschlag ist zweifellos ein zentraler Inputparameter für hydrologische Modellierungen, doch seine Vorhersage stellt eine grosse Herausforderung dar. Zudem muss der Niederschlag in einzelnen hydrologischen Modellen wie das HBV für das gesamte Einzugsgebiet interpoliert werden, um präzise Ergebnisse zu erzielen. Besonders in Gebirgsregionen, in denen der Niederschlag auf kleinen Flächen erheblich variieren kann, führt diese Interpolation zu Unsicherheiten und erschwert eine genaue Modellierung (Loritz et al., 2021).

### 1.3 Literaturübersicht

Die räumliche Niederschlagsverteilung wurde im Forschungsbereich der Hydrologie weltweit bereits mehrfach thematisiert. In Nordamerika haben Fauresa et al. (1995) untersucht, inwieweit Unsicherheiten der Niederschlagsmessung und deren räumlichen Verteilung Abflussmodelle beeinflussen. Mithilfe des Abflussmodells KINEROSR und Niederschlags- und Abflussdaten eines semi-ariden Einzugsgebietes in Arizona hat sich gezeigt, dass eine Annahme von gleichmässigem Niederschlag zu einer grossen Unsicherheit in Abflussmodellierungen führen kann. Die Variabilität innerhalb eines Einzugsgebietes muss untersucht und in das Modell integriert werden. Bereits bei kleinen Einzugsgebieten ist die räumliche Variabilität gross (Fauresa et al., 1995). Buytaert et al. (2006) bestätigen diese Ergebnisse durch ihre Untersuchungen in den ecuadorianischen Anden. Diese Untersuchungen zu räumlichen und zeitlichen Niederschlagsmustern haben gezeigt, dass der Niederschlag in dieser Region stark variabel ist. Dabei wurden Daten von 14 Niederschlagsmessstationen ausgewertet sowie Vergleiche von Interpolationsmethoden, wie zum Beispiel Thiessen-Polygonen oder Kriging, durchgeführt (Buytaert et al., 2006). Neben der räumlichen Variabilität weist die untersuchte Region der Anden auch eine starke zeitliche Variabilität auf. So beschäftigten sich auch Scaff et al. (2017) mit Niederschlagsgradienten im Andengebirge, indem sie untersuchten, wie meteorologische und topografische Faktoren die Niederschlagsmuster an der Westflanke der Anden in Chile beeinflussen. Mithilfe von Beobachtungsdaten und der Berechnung von Niederschlagsgradienten konnten Beziehungen zu Wetterbedingungen und der Froude-Zahl untersucht werden. Dadurch stellte sich heraus, dass der Gradient der Niederschlagsverteilung stark variiert und positive als auch negative Werte annehmen kann. Die Froude-Zahl korrelierte

positiv mit der Grösse der Niederschlagsgradienten (Scaff et al., 2017). Auf dem tibetischen Plateau haben sich Wang et al., (2018) mit dem Ziel der Verbesserung der hydrologischen Modellierungen durch intensive Niederschlagsbeobachtungen beschäftigt. Es wurde die Korrelation des Niederschlags mit der Höhe analysiert, um Niederschlagsgradienten zu definieren. Die Nutzung von den Niederschlagsgradienten in den Abflussmodellierungen ergaben eine bessere Simulation, sprich eine bessere Leistung des Modells. Wang et al. (2018) zogen durch ihre Analysen das Fazit, dass intensive und kurzzeitige Niederschlagsbeobachtungen in einer Region zu einer Verbesserung der hydrologischen Modellierung führen können.

Auch im europäischen Raum findet sich Fachliteratur zur räumlichen Niederschlagsverteilung. Johansson & Chen (2003) haben sich beispielsweise mit dem Einfluss von Windrichtung und Topografie auf die Niederschlagsverteilung in Schweden befasst. Es erfolgte eine Analyse von 370 Bodenstationen und deren langjährigen Daten. Durch eine Regressionsanalyse wurden die Variablen Windgeschwindigkeit, Hangneigung und Lage relativ zur Gebirgskette in Abhängigkeit von Niederschlag ermittelt. Somit konnte festgestellt werden, dass die Windgeschwindigkeit sowie die topografische Lage einen Einfluss auf die Niederschlagsmenge und -verteilung haben. Das erstellte Regressionsmodell ermöglicht eine optimierte räumliche Interpolation von Niederschlagsdaten (Johansson & Chen, 2003). Douguédroit & de Saintignon (1984) befassten sich mit der räumlichen Verteilung von Temperatur und Niederschlag in den Alpen. Mittels Regressionsmodellen und statistischen Modellen sollte die Abhängigkeit von Temperaturen und Niederschlägen von der Höhe untersucht werden. Wie auch in den bereits erläuterten Studien in Südamerika und Zentralasien hat sich in den Alpen gezeigt, dass die räumliche Verteilung von Niederschlag in den alpinen Bergregionen stark variabel ist (Douguédroit & de Saintignon, 1984). Sie hängt von der spezifischen Topografie ab, wobei einfache Modelle mit Gradienten unzureichend sein können. Auch Wastl (2008) befasste sich mit der räumlichen Niederschlagsverteilung in den Alpen, wobei der Fokus auf die orografischen Niederschlagsstrukturen gelegt wurde. Es wurden die Hauptmechanismen der orographischen Niederschlagsverstärkung – Steigungsregen, Seeder-Feeder-Mechanismus und orographisch bedingte Konvektion – analysiert. Wastl (2008) kommt zum Schluss, dass die Analyse von orographischen Effekten in hydrologischen Modellierungen berücksichtigt werden soll, um Verbesserungen der Modelle zu erzielen. Die Resultate von Wastl (2008) finden Unterstützung in der Studie von Masson & Frei (2014). Durch ihre Analyse zur räumlichen Interpolation von Niederschlagsdaten in einer hochalpinen Region konnte gezeigt werden, dass besonders das Verfahren *External Drift Kriging* (KED) zu weniger Interpolationsfehlern führen kann, als es bei reinen Regressionsmodellen der Fall wäre (Masson & Frei, 2014).

Alle genannten Studien und Forschungsthemen befassen sich mit Niederschlag und dessen räumlichen und zeitlichen Verteilung insbesondere in Bergregionen, wobei jedes dieser Themen auf Untersuchungsgebieten in einer bestimmten Region basiert. Dies führt zu einer begrenzten Generalisierbarkeit dieser Studien. Zudem wird in diesen Studien die lokale Topografie und die lokalen klimatischen Bedingungen betont, sodass die entwickelten Modelle oder Resultate in anderen Regionen nur bedingt anwendbar sind.

Für die Schweizer Alpen wurde die räumliche Niederschlagsverteilung ebenfalls untersucht. So beschäftigte sich Sevruck (1997) mit der Niederschlags-Höhen-Beziehung in den Schweizer Alpen. Mithilfe von Wasserbilanzmodellen und korrigierten Daten von 340 Niederschlagsstationen wurden lineare Regressionsanalysen zur Überprüfung durchgeführt. So konnten auch in den Schweizer Alpen keine klaren Abhängigkeiten abgeleitet werden. Die Niederschlagsdaten weisen eine hohe Heterogenität auf. Sevruck (1997) betont in seiner Auswertung die Wichtigkeit von Niederschlagsmessungen in höheren Lagen und die Notwendigkeit, die Niederschlagsverteilung in den Bergen genau zu betrachten (Sevruck, 1997). Während Sevruck (1997) diverse Regionen der Schweizer Alpen analysierte, beschäftigt sich Schächli (2013) in seiner Dissertation mit der Untersuchung von Niederschlagsgradienten entlang eines Hangs. Das Ziel der Arbeit war es, die Mechanismen zu verstehen, die zu den unterschiedlichen Niederschlagsmustern führen können. Bei einem experimentellen Ansatz wurden Wetterstationen entlang eines Hangs installiert und ausgewertet. Durch lineare Regressionsmodelle hat sich gezeigt, dass die Annahme eines linearen Anstieges des Niederschlags mit zunehmender Höhe nicht immer zutrifft. Die Muster sind von weiteren Faktoren wie beispielsweise meteorologischen Bedingungen abhängig (Schächli, 2013).

Allgemein hat sich gezeigt, dass die räumliche Niederschlagsverteilung ein zentrales Thema für Forschung in der Hydrologie und Meteorologie ist. Häufig wurden dafür Daten von Niederschlagsstationen genutzt, interpoliert und analysiert. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Analyse mithilfe von Rasterdaten, bei denen Radardaten mit Niederschlagsmessstationen kombiniert werden, durchzuführen. Dadurch kann die räumliche Niederschlagsverteilung hochaufgelöster untersucht werden.

## 1.4 Fragestellung und Hypothesen

Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgt eine detaillierte Untersuchung der Variable Niederschlag sowie dessen räumliche Verteilung in der Schweiz, respektive in den Schweizer (Vor-)Alpen. In unterschiedlichen hydrologischen Modellen wird davon ausgegangen, dass der Niederschlag mit

zunehmender Höhe linear ansteigt. Diese Annahme ist jedoch eine Vereinfachung, die in komplexen, gebirgigen Einzugsgebieten nicht immer zutreffend ist. Der Niederschlag ist nicht allein von der Höhe abhängig, sondern ebenso von weiteren Faktoren wie Windmustern und orografischen Effekten. Diese können die Verteilung des Niederschlags in einem Einzugsgebiet massgeblich beeinflussen (Uttinger, 1951). Die Nutzung räumlicher Niederschlagsdaten, wie sie beispielsweise im CombiPrecip-Datensatz (Gabella et al., 2017) verfügbar sind, ermöglicht die Entwicklung differenzierter Gradienten der räumlichen Niederschlagsverteilung innerhalb eines Untersuchungsgebietes. Im Rahmen dieser Arbeit werden mithilfe der CombiPrecip-Daten segmentierte lineare Gradienten herausgearbeitet, um dann in das HBV-Modell zu integrieren. Das Ziel besteht darin, die Modellgenauigkeit, insbesondere hinsichtlich der Simulation von Hochwasserereignissen, zu verbessern, wobei die vorliegende Arbeit aufzeigen soll, welchen Einfluss die Änderung des Gradienten des Niederschlags auf die Abflusssimulationen hat.

Um die räumliche Niederschlagsverteilung und deren Auswirkung auf hydrologische Modellierungen zu untersuchen, wurden zwei Fragestellungen herausgearbeitet. Die Beantwortung der zweiten Frage setzt die Beantwortung der ersten Fragestellung voraus:

- 1. Wie gut stellen differenzierte Gradienten der räumlichen Niederschlagsverteilung bezüglich topografischer Höhe die räumliche Niederschlagsverteilung in ausgewählten Einzugsgebieten der Schweizer (Vor-)Alpen dar?*
- 2. Wie beeinflussen differenzierte Gradienten der räumlichen Niederschlagsverteilung die Simulation der Abflussganglinie im hydrologischen Modell HBV?*

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf den Gradienten der Niederschlagsverteilung und fokussiert dabei auf die erste Fragestellung. Für die Fragestellung zur räumlichen Niederschlagsverteilung wurde angenommen, dass der Niederschlag nicht in jedem Untersuchungsgebiet durch die Höhe zunimmt, respektive ein lineares Verhältnis zwischen Niederschlag und Höhe besteht. Die Niederschlagsverteilung in einem Einzugsgebiet kann auch durch andere Effekte, Prozesse oder Faktoren beeinflusst sein. Durch segmentierte, lokal angewendete lineare Gradienten kann der Niederschlag in ausgewählten Einzugsgebieten jedoch besser und genauer geschätzt werden (vgl. Frei et al. 2006; Uttinger 1951).

In einem weiteren Schritt werden die im ersten Teil erarbeiteten Niederschlagsgradienten in das hydrologische Modell HBV integriert. Zur Beantwortung der zweiten Fragestellung, wird angenommen, dass der Erfolg von Abflussmodellierungen durch genauere Angaben der

Niederschlagsverteilung in einzelnen Einzugsgebieten verbessert werden kann. Auf diese Weise kann die Güte des Modells verbessert werden, was insbesondere bei Hochwasserereignissen zu genaueren Vorhersagen führen kann (vgl. Ruelland 2020).

Die vorliegende Masterarbeit ist Bestandteil des Forschungsprojekts "*EXCH - Extremhochwasser in der Schweiz*". Das Ziel des Projekts besteht darin, eine Basis der Gefahrenbeurteilung von extremen Hochwasserereignissen zu bieten. Das Projekt EXCH wird in Zusammenarbeit der Universität Zürich, Universität Bern, Universität Graz und Universität von Grenoble bearbeitet. Die in dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung der Niederschlagsverteilung leistet einen Beitrag zum Gesamtprojekt. Die Betreuung der vorliegenden Arbeit erfolgt durch PD Dr. Daniel Viviroli und Dr. Maria Staudinger von der *Hydrology and Climate* Gruppe an der Universität Zürich.

## 2 Daten und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiete

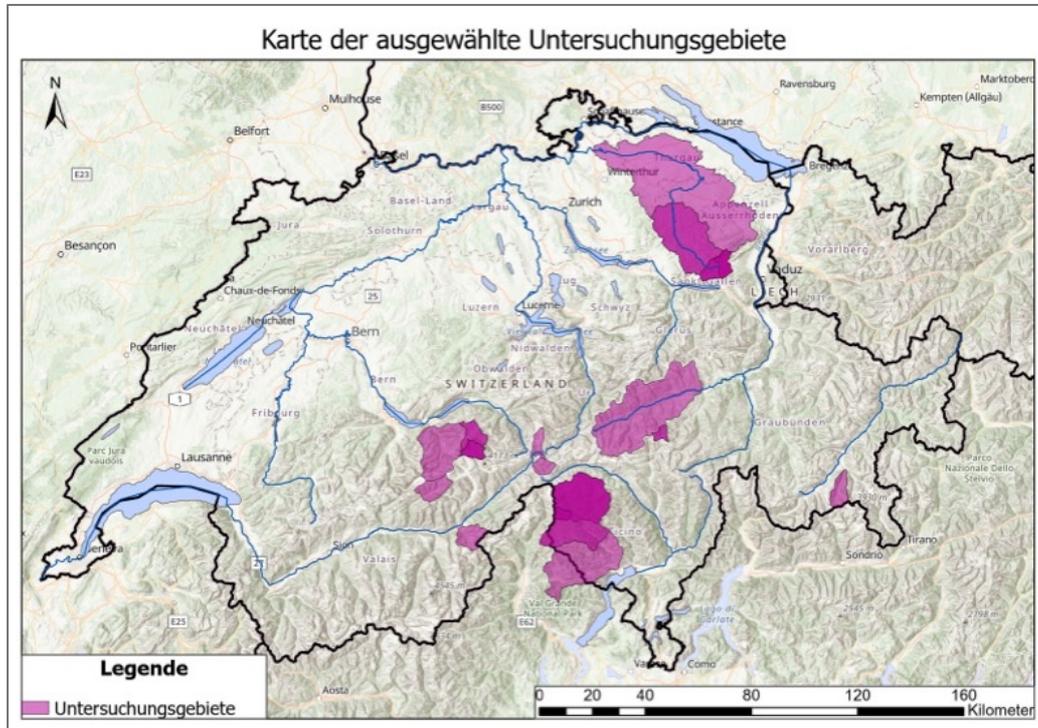


Abbildung 1: Karte mit den Untersuchungsgebieten in pink markiert (Quelle: Swisstopo, 2005).

Um die definierten Fragestellungen beantworten und somit den Effekt der Höhenverteilung auf den Niederschlag analysieren zu können, wurden Einzugsgebiete gewählt, die in Regionen höher als 2'000 m ü. M. entspringen und auf einer geringen Fläche einen grossen Höhenunterschied aufweisen. Ein Grossteil der Untersuchungsgebiete zählt zu den Untersuchungsgebieten des Hauptprojekts EXCH. Die Untersuchungsgebiete befinden sich nördlich und südlich der Schweizer Alpen. Dies, um mögliche Unterschiede innerhalb der Schweizer Alpen auf die Niederschlagsverteilung feststellen zu können. Es handelt sich dabei um Teileinzugsgebiete der Thur, Aare, Rhone, des Alpenrheins, Inn und Ticino Flusseinzugsgebiete (vgl. Abbildung 1, Tabelle 1).

Die Einzugsgebiete unterscheiden sich sowohl in ihrer Grösse als auch in ihrer Höhenverteilung (vgl. Tabelle 1, Abbildung 3). Während das Einzugsgebiet vom Rein da Sumvitg beispielsweise nur 22 km<sup>2</sup> misst, hat die Thur am Standort Jonschwil eine Einzugsgebietsfläche von 493 km<sup>2</sup> (vgl. Tabelle 1). Weiter zeigen sich Differenzen in den Abflussregime. In allen Teileinzugsgebieten kann in den kalten Monaten Niederschlag in Form von Schnee auftreten, wobei sich die Gletscheranteile unterscheiden. Das Einzugsgebiet der Thur weist keinen

Gletscheranteil auf, wohingegen bei der Weissen Lütchine und der Rhone mehr als 50% des Einzugsgebietes Gletscherflächen sind (vgl. Tabelle 1).

Neben den Abflussmengen und Einzugsgebietsinformationen weist auch das Klima in den Regionen Unterschiede auf. Um den Hauptkamm der Alpen sind die Durchschnittstemperaturen tiefer. Während sie im Mittelland bei etwa 10°C liegen, können sie in den Schweizer Alpen bis in den Minusbereich fallen (vgl. Tabelle 1).

Auch die Niederschlagssummen der Alpen und Voralpen unterscheidet sich von jenen des Mittellandes. Die höchsten Jahressummen werden in den Zentralalpen, den Voralpen und der Alpensüdseite gemessen. Dort sind Niederschlagssummen von 2'000 mm/a üblich (Frei & Schär, 1998). Die Region südlich der Alpen, vor allem das Tessin, ist am stärksten von Starkniederschlägen betroffen. Innerhalb von zehn Minuten kann 15 mm Niederschlag fallen. Die höchsten 1-Tagessummen liegen im Tessin bei 130 mm (Abbildung 2). Nördlich der Alpen konzentrieren sich die Starkniederschlagsereignisse auf die Sommermonate Juni, Juli, August. Im Tessin kommt es vermehrt in den Herbstmonaten September, Oktober und November zu Starkniederschlagsereignissen (Frei & Schär, 1998; Isotta et al., 2013; MeteoSchweiz, o. J.).

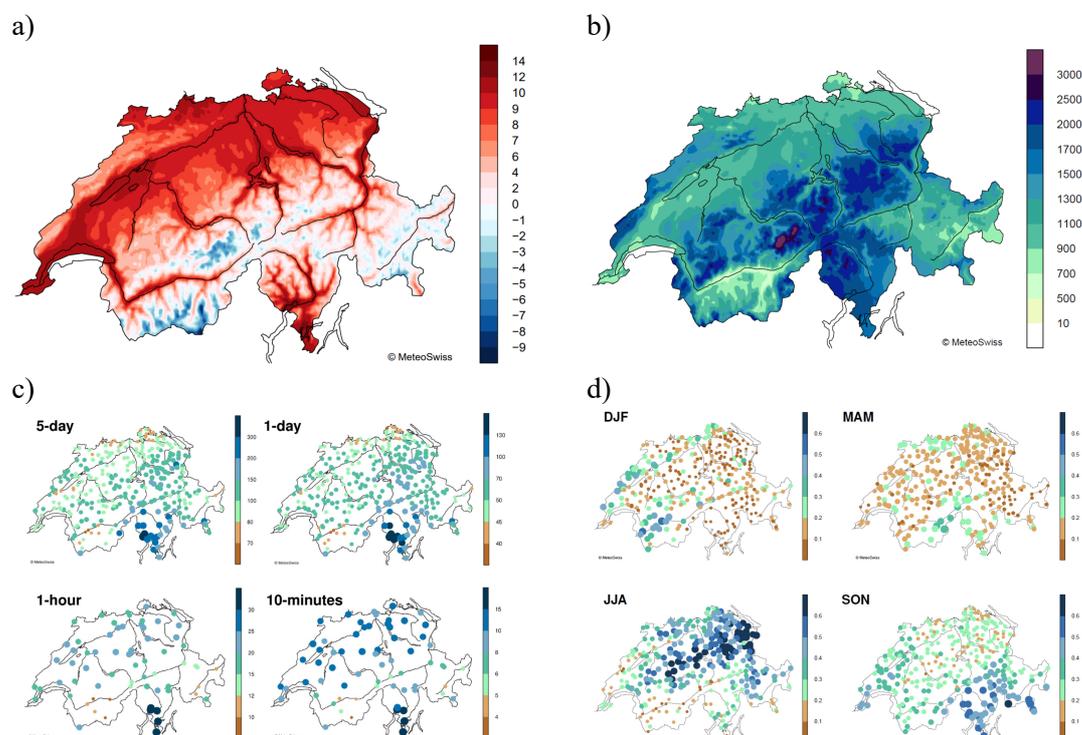


Abbildung 2: Meteorologische Grafiken der Schweiz. a) jährliche Durchschnittstemperaturen in Grad Celsius. b) Durchschnittliche Jahresniederschlagssummen in mm. c) Niederschlagssummen von Extremereignissen in mm. d) Saisonale Unterschiede der Starkniederschlagsereignisse (Anteil der Jahre mit 5-Tagesmaximum) (Quelle: MeteoSchweiz, o. J.).

Tabelle 1: Metadaten zu den Teileinzugsgebieten mit Angaben zur Region (Quellen: Bundesamt für Umwelt, o. J.; Weingartner &amp; Aschwanden, 1992).

<b>Einzugsgebiet</b> Flussbezeichnung + 4 Zahlen ID12	<b>Stationsbezeichnung</b>	<b>Stationshöhe</b> [m ü. M.]	<b>Quellhöhe</b> [m ü. M.]	<b>Mittlere Einzugsgebietshöhe</b> [m ü. M.]	<b>Fläche</b> [km <sup>2</sup> ]	<b>Mittlerer Abfluss</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>Regime</b>	<b>Gletscheranteil [%]</b>	<b>Betreibende</b>
Aare (Nordalpen)									
Schwarze Luetschine_6448	Grindelwald, Grund	977	3816	2360	110	9.2	02 b-glaciaire	36.4	Kanton BE
Luetschine_6331	Gsteig	600	3931	2035	378	19	03 a-glacio-nival	18.4	BAFU
Weisse Luetschine_6465	Grindelwald, Gletscherschlucht	1037	3816	2725	48	7.9	01 a-glaciaire	59.9	BAFU
Alpenrhein (östliche Zentralalpen)									
Rein da Sumvitg_7188	Sumvitg, Encardens	1774	2986	2421	19	1.5	04 b-glacio-nival	2.6	BAFU
Vorderrhein_7349	Ilanz	703	3512	2023	771	32	05 nivo-glaciaire	3.5	BAFU
Inn (Engadin)									
Rosegbach_7888	Pontresina	1812	3783	2690	63	2.8	02 b-glaciaire	28.5	BAFU
Rhone (Westliche Zentralalpen)									
Rhone_6708	Gletsch	1778	3345	2688	39	2.8	01 a-glaciaire	52.5	BAFU
Lonza_6291	Blatten	1606	3730	2634	80	4.7	01 a-glaciaire	38.6	BAFU
Goneri_6704	Oberwald	1523	3037	2393	38	2.4	04 b-glacio-nival	10.3	BAFU
Saltina_6422	Brig	785	3170	2009	77	2.3	04 b-glacio-nival	4.3	BAFU
Thur (Nordalpen / Östliches Mittelland)									
Thur_6935	Andelfingen	361	2353	769	1699	47	09 pluvial supérieur	0	BAFU
Thur_7236	Jonschwil, Mühlau	541	2353	1019	492	21	08 nivo-pluvial préalpin	0	BAFU
Thur_7360	Stein, Iltishag	889	2353	1454	82	4.05	07 nival de transition	0	Kanton SG
Thur_7411	Alt St. Johann, Chlostobel	962	2353	1481	42	1.31	06 nival alpin	0	Kanton SG
Ticino (Südalpen)									
Riale di Calneggia_6849	Caverno, Pontit	967	2547	1991	24	1.4	13 nival méridional	0	BAFU
Maggia_6900	Bignasco, Ponte nuovo	456	3082	1879	313	4.0	13 nival méridional	1.4	BAFU
Maggia_6964	Lodano	349	3082	1752	513	10.3	14 nivo-pluvial méridional	0.9	Kanton TI
Maggia_7031	Locarno, Solduno	210	3082	1550	867	22	14 nivo-pluvial méridional	<0.5	BAFU

### Verteilung der Höhen in den Untersuchungsgebieten

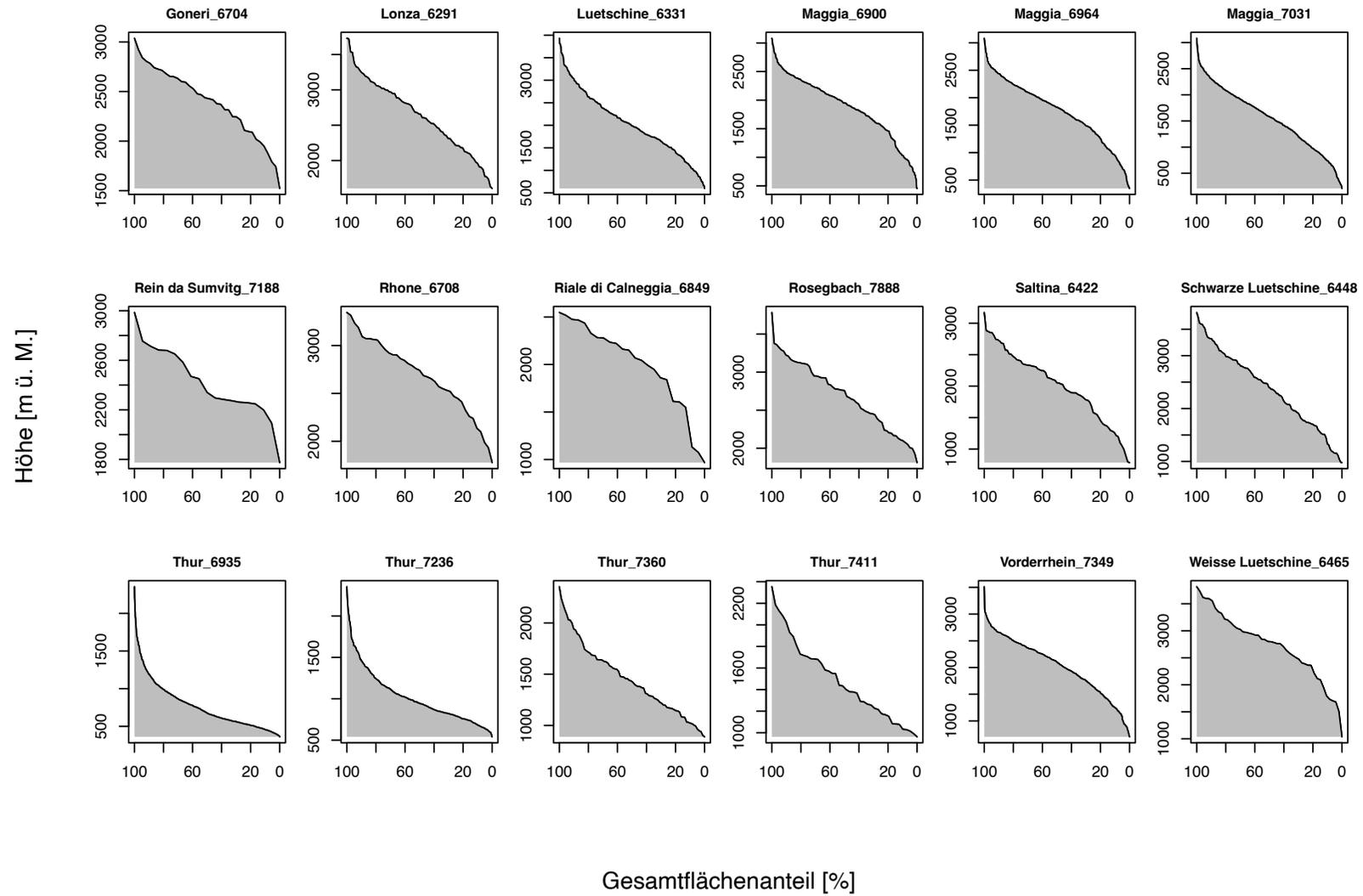


Abbildung 3: Anteil der Höhe an der Gesamtfläche der einzelnen Untersuchungsgebiete.

## 2.2 Niederschlagsdaten

Als Datengrundlage für die Definition von Gradienten der Niederschlagsverteilung in einem Einzugsgebiet dienen die CombiPrecip-Daten. CombiPrecip ist eine geostatistische Methode, die von MeteoSchweiz zur Abschätzung des Niederschlags mit Integration von Regenmessern und Niederschlagsradaren eingesetzt wird (Gabella et al., 2017). Die Rasterdaten der Niederschlagsradare wurden mit den Regenmesserdaten abgeglichen, wobei die Regenmesserdaten als primäre Niederschlagsdatenquelle dienen. Die Daten werden als stündliche Niederschlagssummen mit einer räumlichen Auflösung von 1 km<sup>2</sup> zur Verfügung gestellt (Gabella et al., 2017; Sideris et al., 2014).

Sowohl Niederschlagsradare als auch Regenmesser sind mit Unsicherheiten behaftet. Bei Regenmessern resultieren diese Unsicherheiten aus Messfehlern der Messtechnik oder der zeitlichen Auflösung. Die grösste Unsicherheit bei Regenmessern besteht jedoch in der Schätzung der flächenbezogenen Niederschlagsmenge (Villarini et al., 2008). Die Unsicherheiten von Radarmessungen ergeben sich unter anderem aus der Blockierung der Radarstrahlen, der räumlichen Variabilität oder den in Gebirgen vorkommenden komplexen meteorologischen Prozessen (Villarini & Krajewski, 2010). Die meisten Ungenauigkeiten beziehen sich dabei auf Gebirge. Durch das Gelände der Gebirge können Radarstrahlen behindert werden, was folglich zu Unterschätzungen oder Verzerrungen der Niederschlagsverteilung führt. In Gebirgen ist die räumliche Variabilität von Niederschlag hoch. Unter anderem ist diese Variabilität auf konvektive Prozesse, orografische Hebung oder mikrophysikalische Wechselwirkungen zurückzuführen. Zudem werden in den Gebirgen häufig dynamische atmosphärische Bedingungen, wie beispielsweise Hangauf- und abwinde oder lokale Konvektionen, registriert (Sideris et al., 2014; Villarini & Krajewski, 2010).

Die CombiPrecip-Daten sind ab 2005 verfügbar. Für diese Arbeit wurden die Daten von 2005 bis 2019 verwendet, um zu vermeiden, dass Rohdaten herangezogen werden müssen, die möglicherweise unvollständig oder ungenau sind.

## 2.3 Abflussdaten

Als Beobachtungsdaten für die Abflussmodellierungen im HBV-Modell wurden Daten der Abflussmessstellen der Kantone St. Gallen, Bern und Tessin und des Bundesamtes für Umwelt (kurz: BAFU) eingesetzt (vgl. Tabelle 1).

Im Rahmen des Projekts EXCH wurden die Abflussdaten von  $\text{m}^3/\text{s}$  bereits in  $\text{mm}/\text{h}$  umgerechnet. Die Daten liegen als stündliches Mittel vor. Die Abflussmessstationen weisen unterschiedliche Messperioden auf, wobei die ältesten Daten von 1974 sind. Alle Abflussdaten sind bis und mit 2019 verfügbar.

Es ist festzuhalten, dass auch Abflussdaten mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten sind und Unsicherheiten bestehen, die sich aus einer Vielzahl von Faktoren ergeben. Dazu gehören beispielsweise Unsicherheiten der verwendeten Messinstrumente, der Pegel-Abfluss-Beziehungen oder der angewandten Messmethoden (Horner et al., 2018; Landeshydrologie und -geologie, 1998). Die Unsicherheiten in diesem Bereich können im Rahmen dieser Arbeit nicht umgangen werden und sollen deshalb in der Auswertung berücksichtigt werden.

## 2.4 Digitales Höhenmodell

Zur Bestimmung der topografischen Höhe in den Einzugsgebieten wurde das DHM25 von Swisstopo eingesetzt. Die Rastergrösse beträgt 200 m. Es wurde aus der Landeskarte 1:25'000 mit einer Genauigkeit von 1.5 m im Mittelland und Jura, 2 m in den Voralpen und im Tessin sowie 3 m in den Alpen abgeleitet. Dabei wird das schweizerische Projektionssystem - winkeltreue schiefachsige Zylinderprojektion - verwendet (Swisstopo, 2005).

Die Rasterdaten des Digitalen Höhenmodells von Swisstopo wurden mit den Niederschlagsdaten der MeteoSchweiz verknüpft und in ein gleiches Referenzsystem gebracht, sodass für jede Zelle in der Auflösung  $1 \text{ km}^2$  die Niederschlagssummen als auch die Höhe gemäss dem DHM25 vorliegen.

## 2.5 Modelleinstellungen im HBV

### 2.5.1 Das hydrologische Modell HBV

Die Abflusssimulationen wurden mit dem am Schwedischen Institut für Meteorologie und Hydrologie entwickelten Modell HBV (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*) durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Semi-Distributionsmodell. Dies bedeutet, dass das Einzugsgebiet in verschiedene Höhen- und Vegetationszonen und Teileinzugsgebiete unterteilt werden kann (Seibert & Vis, 2012). Die Idee des Modells ist es, hydrologische Vorhersagen zu

ermöglichen, während die Modellstruktur einfach gehalten wird, um die Komplexität gering zu halten (Bergström, 1992).

In dieser Arbeit wurde mit dem Modell HBV-light gearbeitet. Dabei handelt es sich um eine an der Universität Zürich entwickelte Version, bei der Zeitintervalle und Teileinzugsgebiete verändert und bestimmt werden können (Seibert & Vis, 2012).

Als Eingabedaten dienen Zeitreihen des Niederschlags, der Lufttemperatur für Regionen mit Schneefall und der potenziellen Verdunstung. Die klimatischen Eingangsdaten werden im Modell zusätzlich höhenkorrigiert, so dass die Werte auf das gesamte (Teil-)Einzugsgebiet angepasst sind. Für die Temperatur wird angenommen, dass diese pro 100 m Höhenanstieg um 0,6 °C abnimmt. Die Höhenkorrektur des Niederschlags muss regional bestimmt werden. Für die Schweiz wird angenommen, dass der Niederschlag pro 100 m Höhenanstieg um 10% zunimmt (Bergström, 1992; Seibert & Vis, 2012).

Das HBV besteht aus drei Hauptmodulen mit unterschiedlichen Parametern: einem Modul für Schneeakkumulation und -schmelze, einem Modul für Bodenfeuchte und Feuchteberechnungen und einem Modul für Reaktion und Fließverhalten (vgl. Abbildung 4). Zusätzlich wurde in der HBV-light Version ein Gletschermodul für die Simulation ergänzt (Seibert & Vis, 2012).

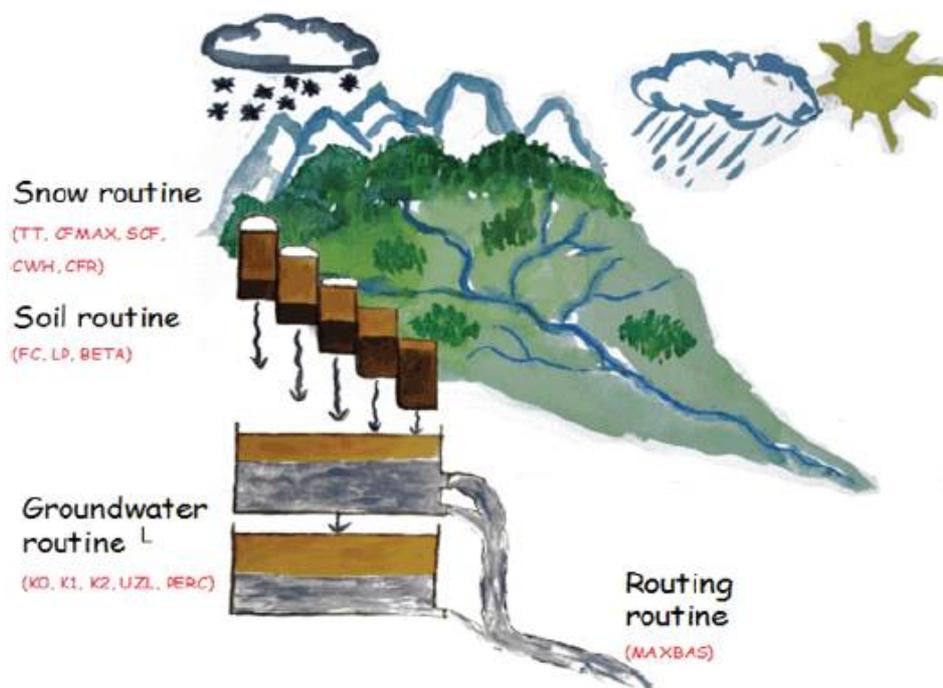


Abbildung 4: HBV-Modellbeschreibung mit den unterteilten Modulen/Routinen (Quelle: Seibert & Vis, 2012).

Das Modul Schneeakkumulation und -schmelze benötigt Niederschlags- und Temperaturdaten, um Schneemengen und -änderungen zu berechnen. Die verschiedenen Höhenzonen werden einzeln berechnet, wobei die Temperatur mit TCALT und der Niederschlag mit PCALT korrigiert wird, wie bereits erläutert. Bei Unterschreitung des Schwellenwertes TT wird angenommen, dass der Niederschlag in Form von Schnee gefallen ist. Die Schneeschmelze beginnt, wenn die Temperatur über dem Schwellenwert liegt. Im Allgemeinen müssen drei freie Parameter für die Schneeakkumulation und -schmelze bestimmt werden (Bergström, 1992).

Im Modul zur Bodenfeuchte im HBV-Modell werden die Neubildung des Grundwassers und die tatsächliche Verdunstung abhängig vom aktuellen Wasserspeicher bestimmt. Das in den Boden gelangende Wasser aus Regen oder Schmelzwasser wird in Grundwasserneubildung und zusätzliches Wasser für den Bodenspeicher unterteilt (Bergström, 1992). Um den Anteil an den resultierenden Grundwasserfluss zu erhalten, braucht es Angaben zum bestehenden Wasserspeicher im Boden und der maximalen Wasseraufnahmekapazität des Bodens (FC). Weiter wird der Formparameter ( $\beta$ ) als Exponent benötigt. Der im Boden bleibende Teil trägt zum Wasserspeicher im Boden bei. Um die mögliche Verdunstung von Bodenwasser zu berücksichtigen, werden die langfristigen Mittelwerte der potenziellen Verdunstung durch die Abweichung der Temperatur in einem definierten Zeitschritt durch einen Korrekturfaktor (CET) korrigiert. Wenn die Bodenfeuchte höher als ein bestimmter Anteil (LP) von FC ist, wird der Wert der potenziellen Verdunstung angenommen. Da die Verdunstung des Bodenwassers abhängig von der Trockenheit der Böden ist, wird bei einer geringeren Bodenfeuchte die tatsächliche Verdunstung im HBV linear reduziert (Bergström, 1992; Lindström et al., 1997).

Für die vorliegende Arbeit wurden die Modelleinstellungen vom Gesamtprojekt EXCH angewendet und durch die notwendigen Informationen und Eingabedaten ergänzt. Nachfolgend werden sowohl Version und Aufbau des Modells als auch die angewendeten Modelleinstellungen erläutert.

### 2.5.2 Einstellungen für die Einzugsgebiete

Für die Definition der Einzugsgebiete wurden Shapefiles verwendet, die im Rahmen des Hauptprojektes EXCH manuell in ArcMap erstellt wurden. Die Datenquellen umfassen vorrangig Daten von EZGGCH (Swisstopo, 2005). Wenn in EZGGCH keine Daten vorhanden sind, wurde der hydrologische Atlas der Schweiz zur Einzugsgebietsbestimmung verwendet. Einzugsgebiete, die grenzübergreifend sind, wurden mit CCM2.1 (Commission's Joint Research Centre, 2008) zusammengestellt. Die Unklarheiten wurden mit Unterstützung des Datensatzes MERIT\_hydro (Yamazaki et al., 2019) geklärt.

Die Höhen-Flächen-Tabelle (clarea.xml) wurde basierend auf dem 25 m-EU-DEM (V1.1) definiert. Es wurden ausschliesslich Rasterzellen berücksichtigt, die vollständig innerhalb eines Einzugsgebietspolygon liegen. Weiter wurden Höhenbänder mit einer vertikalen Ausdehnung von 100 m zur Analyse beigezogen. Die Referenzhöhe wird aus dem DEM-Datensatz (Swisstopo, 2005) berechnet. Wenn Zonen weniger als ein Prozent der gesamten Einzugsgebietsfläche ausmachen, werden diese zu den benachbarten Zonen zugezählt.

Die Seen wurden anhand der Swisstopo Vector200-Karte (2014) identifiziert. Dabei wurden alle Seen in einem Einzugsgebiet zu einem See zusammengefasst. Die Höhe des Sees entspricht dem flächengewichteten Mittel der Höhen aller identifizierten Seen im Einzugsgebiet.

Die Bodenbedeckung, sowie Gletscherflächen eines Einzugsgebietes wurden aus dem CORINE-Datensatz (European Environment Agency, 2018) übernommen. Es wird die Bodenbedeckung quantifiziert, um den möglichen Einfluss auf die potenzielle Verdunstung zu berücksichtigen. Die Kategorien umfassen unter anderem Gletscher, Wald, Weide und Seen. Die Bodenbedeckungsinformationen werden zur Berechnung des empirischen Koeffizienten in der Harmon-Gleichung zur potenziellen Verdunstungsschätzung verwendet.

Die Schneeverteilung wurde für alle Einzugsgebiete konstant gehalten. Folgende Parameter wurden verwendet:

- Untergrenze = 1'900 m. ü. M
- Obergrenze = 2'600 m. ü. M
- Rest = Schneewasseräquivalent von 500 mm

Das ergänzte Gletschermodule arbeitet mit vier zusätzlichen Parametern für Gletscher (Stahl et al., 2008). Die Gletscherparameter im HBV-Modell umfassen den Schnee-Eis-Umrechnungsfaktor (KSI), den minimalen Abflusskoeffizienten (KGmin), den zusätzlichen zeitabhängigen Abflusskoeffizienten (dKG), einen Kalibrierungsparameter (AG) und einen Korrekturfaktor (CFGlacier). Während KSI, dKG und AG konstant gehalten wurden, wurden KGmin und CFGlacier kalibriert. Auch die Gletscherfläche der Untersuchungsgebiete wurde während der Simulationen konstant gehalten.

### 2.5.3 Eingabedaten

Als Eingabedaten dient eine PTQ.txt-Datei. Diese beinhaltet Informationen zu Niederschlag, Lufttemperatur und Abfluss. Die Niederschlags- und Temperaturdaten resultieren aus

disaggregierten täglichen Beobachtungen, in denen die Variabilität stündlicher Messungen berücksichtigt wurde. Bei Abflusszeitreihen mit starken 24-Stunden-Schwankungen wurde ein Durchschnittsfilter angewendet, ohne die Hochwasserspitzen zu glätten. Es konnte kein signifikantes Muster in den Einzugsgebieten definiert werden.

Die potenzielle Evapotranspiration wurde mittels Hamon-Gleichung geschätzt. Der empirische Faktor basiert dabei auf den Bodenbedeckungsklassen des jeweiligen Untersuchungsgebiets (Farinotti et al., 2012; Hamon, 1963).

Die PTCALT.txt-Datei enthält den Temperaturgradienten TCALT. Für diese Arbeit wurde die HBV-Version weiterentwickelt, sodass für den Niederschlag nicht nur ein Wert angenommen wird, sondern die Niederschlagszunahme frei gesetzt werden kann. So kann für jede Höhenzone ebenfalls der Niederschlag in das Modell gegeben werden. Mit den herausgearbeiteten Bruchpunkten und der berechneten Steigung wurden so die Niederschläge für die bereits existierenden Höhenzonen definiert. Als Ausgangslage diente der Niederschlag der mittleren Höhe. Es wurde die Höhenzunahme respektive -abnahme berechnet, um dann mittels Steigung den Niederschlag auf den jeweiligen Höhenzonen zu bestimmen. Mit dieser zusätzlichen Information wird der PCALT von 10% pro 100m ignoriert.

Tabelle 2: Übersicht der Eingabedaten für jedes Einzugsgebiet in das HBV-Modell.

Eingabedaten	Inhalt	Erklärung
PTQ.txt	Niederschlags-, Temperatur-, Abflussdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disaggregierte, tägliche Beobachtungen, Niederschlag in mm/h, Temperatur in °C und Abfluss in mm/h</li> </ul>
Evap.txt	Potenzielle Evapotranspiration	<ul style="list-style-type: none"> <li>Empirischer Faktor</li> </ul>
PTCALT.txt	Temperaturgradienten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperaturabnahme auf die Höhe</li> </ul>
SnowRedistribution.txt	Untergrenze, Obergrenze und restliche Schneeeumverteilung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Für alle Einzugsgebiete gleicher Parameter</li> </ul>
Precipitation_Series.txt	Niederschlag nach Höhenzonen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weiterentwicklung für die vorliegende Arbeit</li> <li>Niederschlag vorgängig auf Höhe angewendet und so ins Modell eingegeben</li> </ul>

## 2.5.4 Kalibrierung, Validierung, Warm-Up Periode

Jedes Untersuchungsgebiet wurde 100-mal durch den GAP-Algorithmus kalibriert, verteilt auf 25 Durchläufe für jeden der vier Kalibrierungszeiträume. Es wurde das modifizierte KGE-Effizienzkriterium verwendet, das neben Korrelation, Verzerrung und Variabilität auch die Verzerrung im hohen bis sehr hohen Abflussbereich bewertet. Dies ermöglicht eine umfassende Bewertung der Ganglinie unter besonderer Berücksichtigung von Spitzenabflüssen.

Für alle untersuchten Einzugsgebiete wurde die gleiche *Warm-up*- und Simulationsperiode gewählt (vgl. Tabelle 3). Bei der Analyse der einzelnen Starkniederschlagsereignissen dient das vorherige hydrologische Jahr als Warm-Up Periode und das hydrologische Jahr, in welchem das Ereignis vorkam, als Simulationsperiode.

*Tabelle 3: Übersicht der Warm-up- und Simulationsperiode für alle Untersuchungsgebiete.*

Start Trainingsperiode	Start der Simulationsperiode	Ende der Simulationsperiode
2009-10-01 T00:00:00	2010-10-01 T00:00:00	2019-09-30 T00:00:00

## 2.6 Datenaufbereitung und -analyse

### 2.6.1 Niederschlagsgradienten

Um neben den räumlichen auch die zeitlichen Unterschiede herausfinden zu können, wurden unterschiedliche zeitliche Auflösungen analysiert. Mit den zur Verfügung gestellten CombiPrecip Rasterdaten konnten mittlere Monats-, mittlere Saisons- und mittlere Jahresniederschlagssummen berechnet werden, mit den berechneten Summen wiederum wurden Niederschlagsgradienten auf die Höhenverteilung definiert. Zusätzlich sollte für jedes Einzugsgebiet ein Niederschlagsereignis mit resultierendem Hochwasser analysiert werden. Durch die räumliche Verteilung der Einzugsgebiete handelt es sich dabei um unterschiedliche Ereignisse (vgl. Kapitel 2.7), wobei Einzugsgebiete mit Teileinzugsgebieten – beispielsweise die Thur oder Maggia – an einem Ereignis analysiert wurden. Die unterschiedlichen Ereignisse konnten mithilfe der publizierten Jahrbücher des Bundesamtes für Umwelt, der einzelnen Kantone und einzelner Berichte zu Extremwertanalysen der MeteoSchweiz definiert werden. Kriterien für die Auswahl waren in erster Linie dokumentierte Hochwasser in den Untersuchungsgebieten zwischen 2005 und 2019. Weiter wurden Ereignisse fokussiert, bei welchen hohe Niederschlagssummen registriert wurden.

Um Gradienten der Niederschlagsverteilung herausarbeiten zu können, wurde die Abhängigkeit des Niederschlags und der topografischen Höhe mittels linearer Regression untersucht. Bei der linearen Regression wird eine lineare Beziehung zwischen den beiden Variablen angenommen (Rogerson, 2011):

$$\hat{y} = a + bx$$

Dabei entspricht  $y$  dem vorausgesetzten Wert des Niederschlags,  $x$  ist die vorgegebene Höhe,  $a$  ist der vertikale Achsenschnittpunkt und  $b$  entspricht der Steigung (Rogerson, 2011).

In einem weiteren Schritt wurden Bruchpunkte definiert, um eine lineare Regression mit Segmenten durchführen zu können. Durch Berechnungen in R wurde die beste segmentierte Regression berechnet. Dabei wurde das höchste  $R^2$  für das gesamte segmentierte Modell gesucht, mit maximal drei Segmenten. Innerhalb der Segmente wurde jeweils eine lineare Regression berechnet. Dabei konnte ebenfalls das  $R^2$  der einzelnen Segmente bestimmt werden. Die lineare Regression mit Segmenten setzt sich aus mehreren Regressionsgleichungen zusammen:

$$Y = \begin{cases} \hat{y}_1 = a_1 + b_1x \\ \hat{y}_2 = a_2 + b_2x \\ \dots \end{cases}$$

Zur Beurteilung der Güte der linearen und segmentierten linearen Regression wurde das Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) angewendet.  $R^2$  setzt sich aus der Summe der Regressionsquadrate geteilt durch die Gesamtsumme der Quadrate (Rogerson, 2011) zusammen:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Der Wert von  $R^2$  variiert zwischen 0 und 1. Je näher der berechnete Wert an 1 ist, desto besser passen die beobachteten Werte zur Regressionsgerade. Ein Wert von Null bedeutet, dass keine Variabilität vorliegt (Piepho, 2019; Rogerson, 2011).

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begriffe *Linearität*, *lineare Regression* und *lineare Abhängigkeit* synonym zur soeben definierten linearen Regression verwendet. Dies bedeutet, dass sich diese Begriffe in der vorliegenden Arbeit ausschliesslich auf die lineare Beziehung zwischen den Variablen Niederschlagssumme und topografische Höhe beziehen.

Die gesamte Verarbeitung, Analyse und Auswertung der CombiPrecip-Daten wurden in R Studio durchgeführt. In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten genutzten R-Pakete alphabetisch aufgelistet.

Tabelle 4: Die genutzten Pakete in R mit Zwecks- und Quellenangabe.

Paketname	Zweck	Quelle
dplyr	Umgang mit Daten/Tabellen	Wickham et al., 2023
ggplot2	Erstellung von Grafiken	Wilkinson, 2011
lubridate	Umgang mit Datums- und Zeitangaben	Grolemund & Wickham, 2011
ncdf4	Lesen und Schreiben von NetCDF-Dateien	Pierce, 2024
raster	Arbeiten mit Rasterdaten	Hijmans et al., 2015
segmented	Anwendung der segmentierten linearen Regression	Muggeo, 2003
sf	Arbeiten mit Vektordaten/Shapefiles	Pebesma & Bivand, 2023
sp	Arbeiten mit räumlichen Objekten, Ergänzung zu raster-Paket	Pebesma & Bivand, 2005

## 2.6.2 Abflussmodellierungen in HBV

Wie in Kapitel 2.5.4 beschrieben, wurde die Kalibration der einzelnen Untersuchungsgebiete vom Gesamtprojekt EXCH übernommen. Die herausgearbeiteten Gradienten zur räumlichen Niederschlagsverteilung mussten integriert werden. Dazu wurde das benutzte HBV-light erweitert, sodass als Eingabedaten nicht nur ein einzelner Gradient der Niederschlagsverteilung angewendet wird, sondern für die Höhenverteilung unterschiedliche lineare Gradienten eingegeben werden können. Vom Gesamtprojekt EXCH standen die Niederschlagsdaten der mittleren Höhe des Einzugsgebiets zur Verfügung. Von diesem gemittelten Wert wurden die Niederschlagswerte für jede Höhenzone berechnet.

Die durchgeführten Modellierungen mit der differenzierten räumlichen Niederschlagsverteilung wurden einerseits den standardisierten Abflussmodellierungen und andererseits den gemessenen Abflussdaten der Stationen gegenübergestellt. Im Vergleich mit den modellierten Daten konnte die Sensitivität der resultierenden Abflüsse auf die differenzierten Niederschlagsgradienten analysiert werden. Durch den Vergleich mit den gemessenen Abflüssen an den Stationen wurde die allgemeine Repräsentativität der Modellierungen analysiert. Die modellierten und beobachteten Daten wurden mithilfe des Kling-Gupta Gütemasses beurteilt (Kling et al., 2012). Diese Methode beinhaltet Komponenten des Nash-Sutcliffe Gütemasses (NSE) und des mittleren quadratischen Fehlers (MSE).

Das Kling-Gupta Gütemass (Kling et al., 2012; Knoben et al., 2019) wird folgendermassen definiert:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (s - 1)^2 + (b - 1)^2}$$

Es beinhaltet:

- den Pearson-Korrelationskoeffizient ( $r$ ) der beobachteten und modellierten Daten,
- das Verhältnis der Standardabweichung der beobachteten und jenem der simulierten Werten ( $s$ ) und
- das Verhältnis des Durchschnitts der simulierten Werten zum Durchschnitt der beobachteten Daten ( $b$ ).

Wenn das KGE dem Maximalwert =1 entspricht, bedeutet dies eine exakte Übereinstimmung von den beobachteten und den simulierten Daten (Knoben et al., 2019).

Das Kling-Gupta Gütemass wird neben den Eingabedaten auch durch die Modellparameter beeinflusst. Somit wird in der vorliegenden Arbeit allgemein nicht die Qualität oder Güte der Modellierung abschliessend beurteilt, da wie in Kapitel 2.5.4 die Kalibrierung durch das Gesamtprojekt übernommen und keine Neukalibrierung anhand der erarbeiteten Daten gemacht wurde.

Zusätzlich zum Kling-Gupta Gütemass wurde die Abflusssumme der Simulation und der beobachteten Daten verglichen, um über- und unterschätzte Simulationen herauszufiltern.

## 2.7 Ausgewählte Hochwasserereignisse zwischen 2005 und 2019

### 2.7.1 August 2007

Anfangs August kam es in der Schweiz durch ein 4-tägiges Niederschlagsereignis zu Hochwasser an teils alpinen teils mittelländischen Flüssen. Zwischen dem 6. und 9. August 2007 sind während drei Phasen intensive Niederschläge gefallen, betroffen war hauptsächlich die Zentral- und Westschweiz. Lokal fiel über diese Zeit mehr als 150 mm Niederschlag. Am 8. August folgten zwei intensive Niederschlagsphasen innerhalb von ungefähr 12 Stunden aufeinander. Allein bei diesem Ereignis fielen in einigen Regionen mehr als 100 mm Niederschlag (Bezzola & Ruf, 2007).

*Links: 48-Stunden Summe 7.–9. August 06–06 UTC. Rechts: 96-Stunden Summe 6.–10. August 06–06 UTC. Die Farbskala unterscheidet sich von derjenigen in den Abb. 2.3, 2.4 und 2.5.*

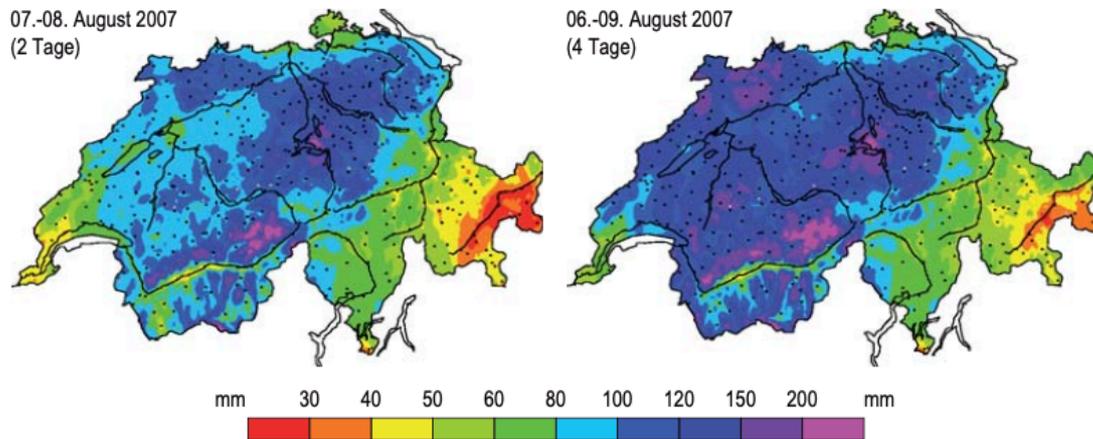


Abbildung 5: Karte der Niederschlagsverteilung vom Ereignis zwischen 06. und 10. August 2007 (Quelle: Bezzola & Ruf, 2007).

Durch die erheblichen Niederschläge führten viele Schweizer Flüsse Hochwasser. Im Lütchinental führten sowohl die Weisse als auch Schwarze Lütchine viel Wasser. An der Lütchine in Gsteig wurde ein Hochwasser mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von 40 Jahren gemessen. An der Lonza bei Blatten erreichte die Hochwasserspitze knapp  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  (Bezzola & Ruf, 2007; Zbinden et al., 2008).

## 2.7.2 Juli 2011

Die erste Hälfte vom Juli 2011 war schweizweit sehr gewitterhaft. Am 10. Juli führten intensive Gewitter in der Ostschweiz zu massiven Überschwemmungen. In der Nacht vom 12. auf den 13. Juli trafen erneut schwere Gewitter die gesamte Schweiz. Im Tessin wurden Tagessummen von bis zu 70 mm oder Stundensummen von 42 mm gemessen, was einer Wiederkehrperiode von fünf Jahren entspricht (MeteoSchweiz, 2012).

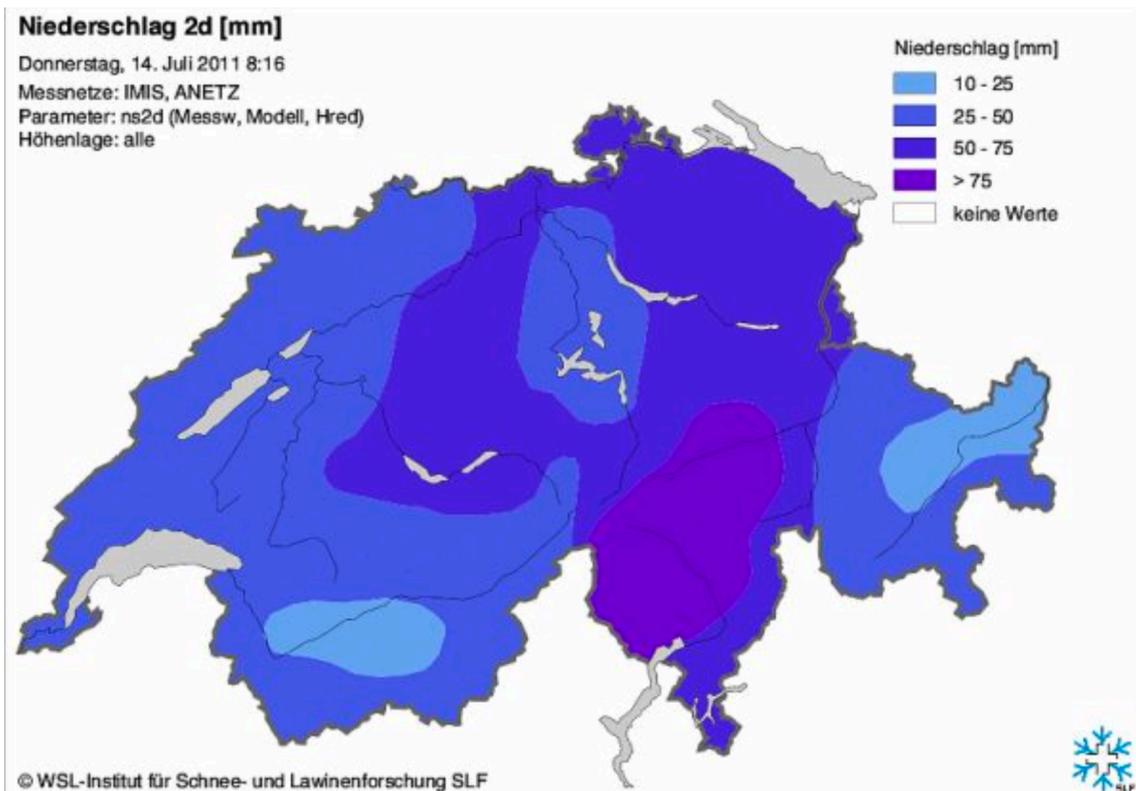


Abbildung 6: 2-Tagessumme der Niederschläge vom 14. Juli 2011 (Quelle: Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2011).

Durch das Niederschlagszentrum in den Südalpen und dem Einzugsgebiet des Rheins führten die Maggia, der Riale di Calneggia und der Vorderrhein bei diesem Ereignis Hochwasser (vgl. Abbildung 6). Die Maggia am an der Messstelle in Locarno, Solduno führte über  $1'500 \text{ m}^3/\text{s}$  (Bundesamt für Umwelt BAFU, o. J.).

### 2.7.3 Mai-Juni und Juli 2013

Nach einem nassen Frühling in der Schweiz, zog zum Monatswechsel Mai zu Juni ein Tiefdruckgebiet über die Ostschweiz. Durch ein Tief mit Zentrum östlich der Schweiz kam es in der Region St. Gallen zu einem Niederschlagsereignis der Jährlichkeit 50 bis 100 Jahre. In der Region zwischen dem Walensee und Bodensee gab es 2-Tagessummen von bis zu 250 mm. An mehreren Stationen wurde die höchste 2-Tages-Niederschlagssumme seit Messbeginn registriert (MeteoSchweiz, 2013c, 2013a, 2014).

## Monatliche Niederschlagssumme in % der Norm

(Ref. 1981–2010)

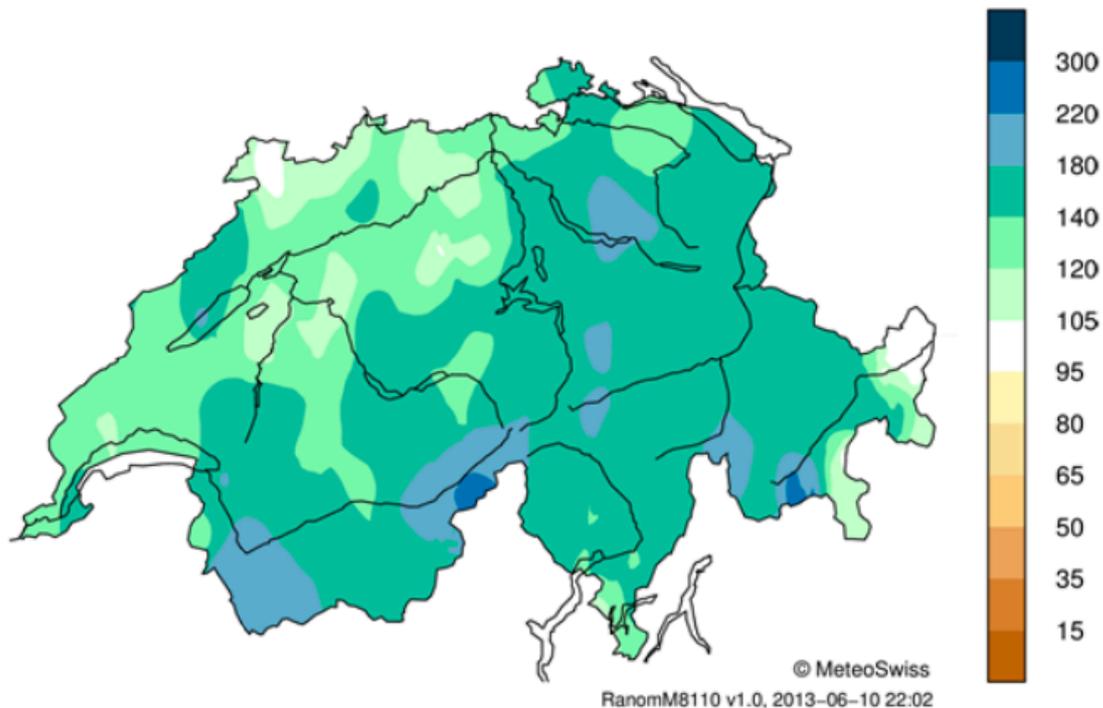


Abbildung 7: Grafik der monatlichen Niederschlagssumme vom Mai 2013 und deren Abweichung der Norm (Quelle: MeteoSchweiz, 2013c).

Zu den extremen Niederschlägen kam hinzu, dass in der vorhergehenden Woche die Schneefallgrenze tief war und die Schneeschmelze durch die Niederschläge beschleunigt wurde. Dieses Extremniederschlagsereignis und die zusätzliche Schneeschmelze führten zu Hochwasser an der Thur (MeteoSchweiz, 2013d).

Ende Juli 2013 kam es erneut zu Hochwasser in einigen Regionen. Durch eine Südwestströmung vom 25. bis 28. Juli, wurde heisse Luft von Südostspanien nach Osten getragen. Bereits am 28. Juli kam es durch eine «*Störung*» (MeteoSchweiz, 2013b) zu heftigen Gewittern. Nachdem diese Gewitter vorbeigezogen sind, setzte der Dauerregen ein. Im Wallis wurden Niederschlagssummen über 100 mm in weniger als 48 Stunden gemessen (MeteoSchweiz, 2013b).

Während dieses Niederschlagsereignisses kam es am Goneri, an der Rhone, am Rein da Sumvitg, am Rosegbach und an der Saltina zu Hochwasser (vgl. Bundesamt für Umwelt BAFU, o. J.).

Zusammengefasst wird für vier Untersuchungsgebiete das Ereignis im August 2007, für fünf Untersuchungsgebiete das Ereignis im Juli 2011 und für neun Untersuchungsgebiete die Ereignisse entweder im Juli oder Juli 2013 analysiert (Tabelle 5).

*Tabelle 5: Übersicht über die ausgewählten Ereignisse für die jeweiligen Untersuchungsgebiete.*

<b>August 2007</b>	<b>Juli 2011</b>	<b>Juni 2013</b>	<b>Juli 2013</b>
Luetschine_6331	Riale di Calneggia_6849	Thur_6935	Goneri_6704
Weisse Luetschine_6465	Vorderrhein_7349	Thur_7236	Rhone_6708
Schwarze Luetschine_6448	Maggia_6900	Thur_7360	Rein da Sumvitg_
Lonza_6291	Maggia_6964	Thur_7411	Rosegbach_7888
	Maggia_7031		Saltina_

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe

#### 3.1.1 Linearität der mittleren Jahresniederschlagssummen

Die räumliche Verteilung der Niederschlagsmengen in den einzelnen Einzugsgebieten weist eine hohe Variabilität auf. Die Analyse der mittleren Jahressummen aller Untersuchungsgebiete hat ergeben, dass einige der untersuchten Einzugsgebiete eine nicht-lineare Zunahme der Niederschlagssummen mit der topografischen Höhe aufweisen. Während das Einzugsgebiet Thur\_7411 eine hohe lineare Korrelation zwischen mittlerer jährlicher Niederschlagssumme und Höhe mit einem  $R^2$ -Wert von 0.78 aufweist, zeigt die räumliche Verteilung des Niederschlags im Einzugsgebiet der Maggia bei allen untersuchten Einzugsgebietsgrössen eine geringe lineare Abhängigkeit (vgl. Abbildung 9). Die höchste Linearität an der Maggia zeigt sich im Teileinzugsgebiet Maggia\_6900, wobei das Bestimmtheitsmass  $R^2$  lediglich 0.18 beträgt. Für die Einzugsgebiete Goneri, Lonza, Rhone, Saltina und Vorderrhein wurden nur mittlere bis schwache lineare Korrelationen gefunden (Abbildung 8, Abbildung 9).

Beim Einzugsgebiet der Thur lässt sich ein grösserer Unterschied zwischen den einzelnen Grafiken (Abbildung 9) beobachten. Die Güte der linearen Regression des Niederschlags und der topografischen Höhe nimmt mit der Einzugsgebietsgrösse, respektive der Datenmenge, zu. Das Einzugsgebiet Thur\_7411 weist einen  $R^2$ -Wert von lediglich 0.2 auf, wobei das Einzugsgebiet Thur\_7360 noch einen tieferen  $R^2$ -Wert hat. Die Untersuchungsgebiete Thur\_7236 und Thur\_6935 weisen eine deutlich höhere Abhängigkeit mit  $R^2$ -Werten über 0.5 auf.

Abgesehen von der Güte der linearen Regression zwischen Niederschlagsmenge und Höhe zeigt sich, dass der Niederschlag in verschiedenen Gebieten mit der Höhe unterschiedlich stark steigt. Während der Niederschlag im Einzugsgebiet Rhone\_6708 innerhalb von 1'000 Höhenmetern knapp 500 mm zunimmt, was etwa 20% des Gesamtniederschlags entspricht, beträgt die Zunahme der Niederschlagssumme im Einzugsgebiet Saltina\_6422 zwischen 1'000 m ü. M. und 3'000 m ü. M. nur etwa 400 mm, was 30% des Gesamtniederschlags ausmacht. Die Unterschiede der einzelnen Untersuchungsgebiete sind sehr gross. Bei allen ausgewerteten mittleren Jahresniederschlagssummen der Einzugsgebiete ist die Steigung der Regression positiv, was tendenziell mehr Niederschlag in höheren Lagen bedeutet.

Die Güte der Regression ist in kleinen Einzugsgebieten durch eine grosse Streuung der Daten häufig schlechter (Abbildung 9). Die Einzugsgebiete Rein da Sumvitg\_7188 und Riale di Calneggia\_6849 haben eine grosse Variabilität der Niederschlagswerte, sodass sich kaum eine Abhängigkeit der Niederschlagssummen von der Höhe feststellen lässt. Die  $R^2$ -Werten liegen für beide Untersuchungsgebiete unter 0.3.

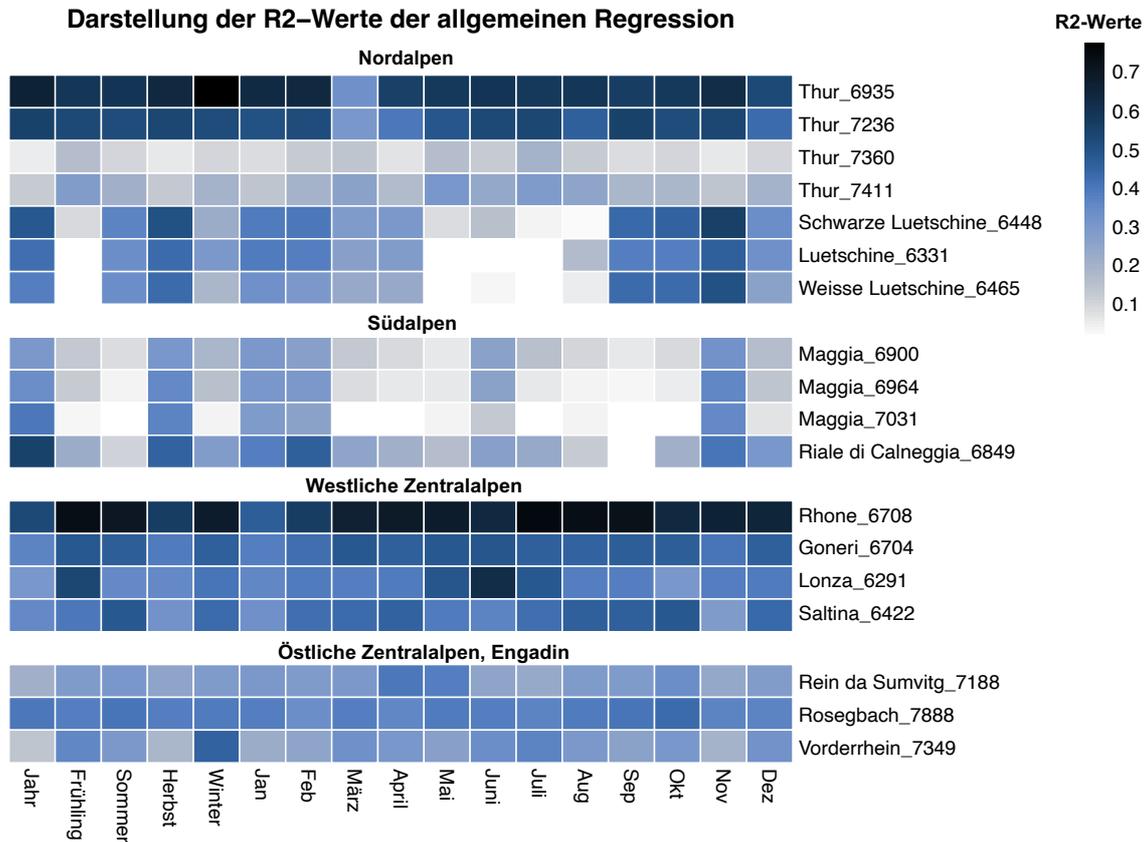


Abbildung 8: Heatmap der  $R^2$ -Werte der allgemeinen Regression für alle untersuchten Gebiete.

Mittlerer Jahresniederschlag (2005–2022) nach Höhenlage und Einzugsgebiet

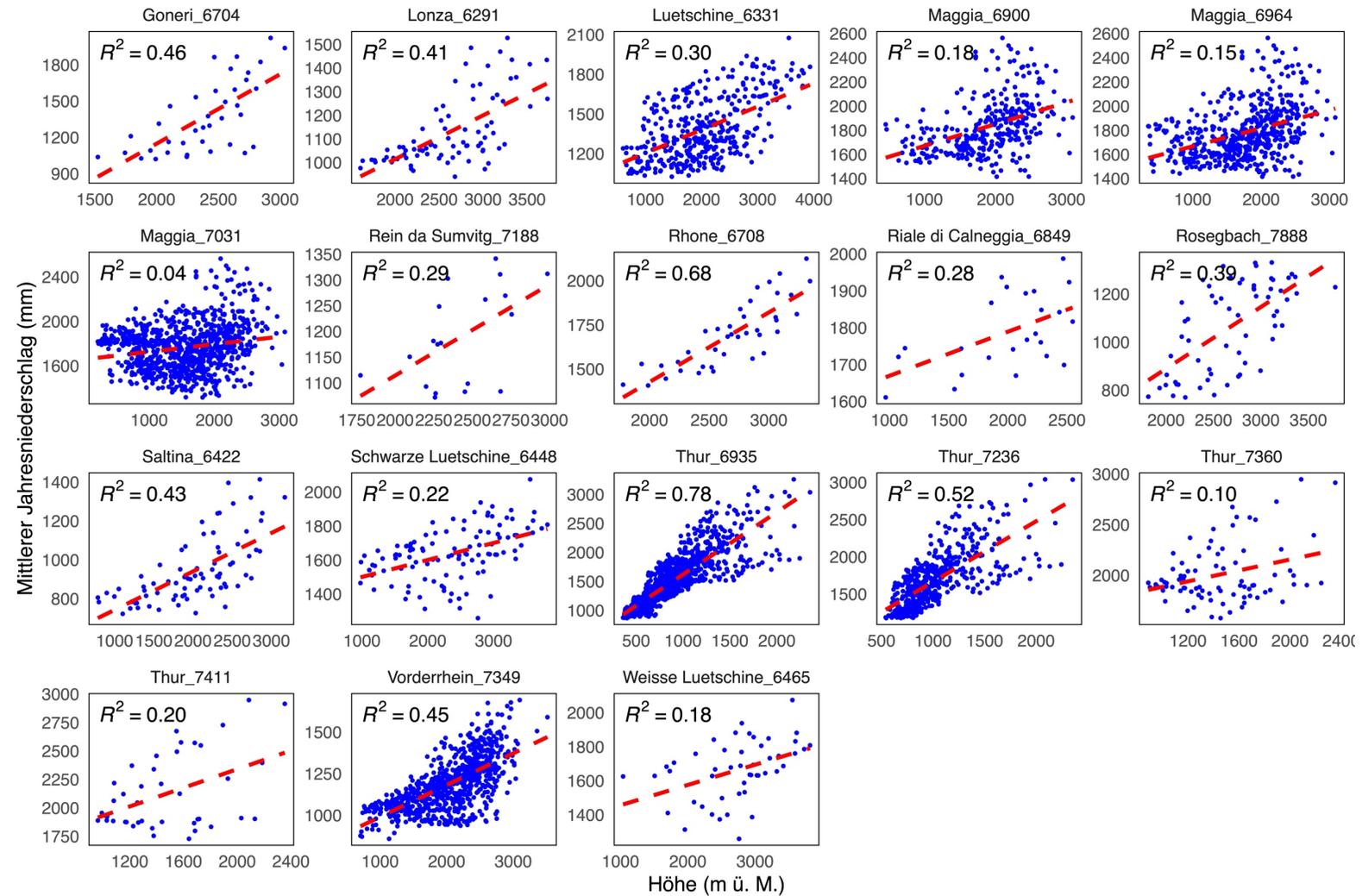


Abbildung 9: Mittlere Jahresniederschlagssummen der einzelnen Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit der topografischen Höhe.

### 3.1.2 Linearität der mittleren Monatsniederschlagssummen

Auch bei der Regression unter der Verwendung der mittleren Monatsniederschlagssummen ist die Streuung der  $R^2$ -Werte für die einzelnen Monate – sowohl der unterschiedlichen Einzugsgebiete als auch innerhalb der einzelnen Untersuchungsgebiete – gross (Abbildung 8). Während der Sommermonate ist die Streuung grösser als während der Wintermonate. Somit können keine allgemein gültigen Aussagen zur Abhängigkeit des durchschnittlichen Monatsniederschlags von der topografischen Höhe gemacht werden (Abbildung 10).

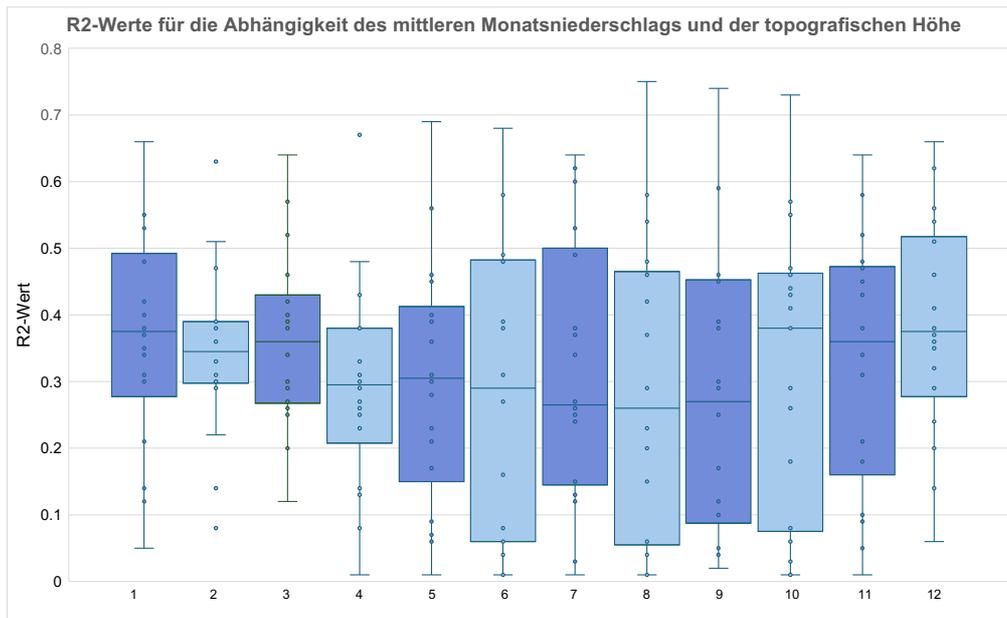


Abbildung 10: Boxplot der  $R^2$ -Werte für die monatliche Niederschlagssumme in Abhängigkeit von der topografischen Höhe.

Zusätzlich unterscheidet sich die Stärke der Linearitäten des Zusammenhangs zwischen Höhe und Niederschlagsmenge eines Untersuchungsgebietes von Monat zu Monat. Jedoch ist erkennbar, dass über alle Einzugsgebiete eine stärkere Linearität der Regression bei den Jahresniederschlagssummen auch eine stärkere Linearität der einzelnen Monate bedeutet (Abbildung 8). Bei den Einzugsgebieten mit einer geringeren Linearität, wie beispielsweise Thur\_7360, wurde die Regression durch die mittlere Monatsniederschlagssumme im Vergleich zur Regression unter der Verwendung der Jahresniederschlagssummen nicht verbessert. Allgemein ist die Abhängigkeit von Niederschlag von der Höhe im Untersuchungsgebiet der Rhone gut erkennbar. Der  $R^2$ -Wert liegt dabei zwischen 0.47 und 0.75 während aller Monate.

Auch die Steigung der Regressionsgeraden weist bei den monatlichen Niederschlagssummen eine hohe Varianz auf. Einzelne Untersuchungsgebiete, wie beispielsweise Lutschine\_6331, haben während einzelner Monate negative Steigungen, was auf eine Niederschlagsabnahme mit der Höhe für die jeweiligen Monate hindeutet.

Bei den Teileinzugsgebieten der Maggia und jenen der Lütshine fällt in Abbildung 8 auf, dass während den Wintermonaten eine stärkere Abhängigkeit von Niederschlag und Höhe erkennbar ist. Während den Frühlings- und Sommermonaten sind die  $R^2$ -Werte kleiner und somit ist die Abhängigkeit von Niederschlag und der Höhe geringer. Die Werte befinden sich dabei jedoch unter  $R^2 = 0.5$ . Somit ist in den Untersuchungsgebieten der Maggia auch bei den mittleren Monatsniederschlagssummen die Abhängigkeit vom Niederschlag von der Höhe gering. Im Untersuchungsgebiet Goneri sind die höchsten  $R^2$ -Werte hingegen während der Sommermonate und die tiefsten  $R^2$ -Werte während der Wintermonate. Dabei liegt der  $R^2$ -Wert im Januar bei 0.37. Obschon das Untersuchungsgebiet Goneri eine geringe Datenmenge hat, ist eine Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe erkennbar. Die  $R^2$ -Werte liegen dabei zwischen 0.37 und 0.49.

Rein visuell erhält man in Abbildung 11 beim Untersuchungsgebiet Thur\_6935 den Eindruck, dass es dort zwei lineare Abhängigkeiten zwischen Niederschlagsmenge und Höhe gibt, welche parallel verlaufen. Eine dieser Abhängigkeiten könnte sich aus dem Teileinzugsgebiet Sitter ergeben. Die Sitter entspringt in Weissbad im Kanton Appenzell Innerrhoden und mündet in Bischofszell in die Thur. Die Sitter verläuft nördlich des Säntis und die Thur zwischen Säntis und der Bergkette Churfirten. Durch den Einfluss der Berge und unterschiedlicher Wetterlagen kann es zu den unterschiedliche Niederschlagssummen für die beiden Teileinzugsgebiete kommen.

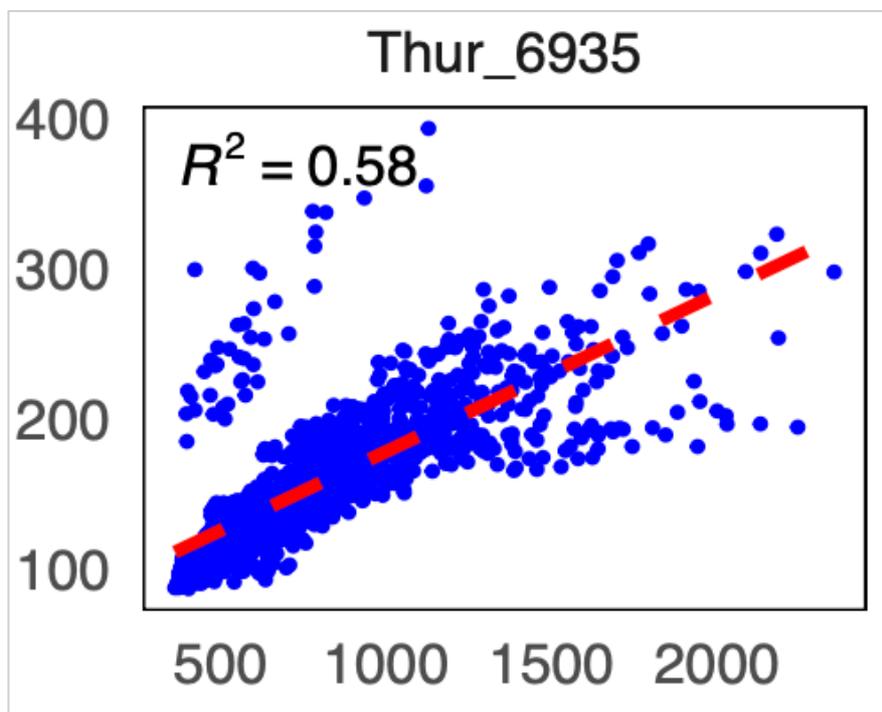


Abbildung 11: Niederschlagsverteilung des Untersuchungsgebiets Thur\_6935. Die x-Achse zeigt die Höhe [m ü. M.] und die y-Achse den Niederschlag [mm]. Oben links erkennt man die zweite lineare Abhängigkeit.

Monatlicher Niederschlag für 1 (2005–2022) nach Höhenlage und Einzugsgebiet

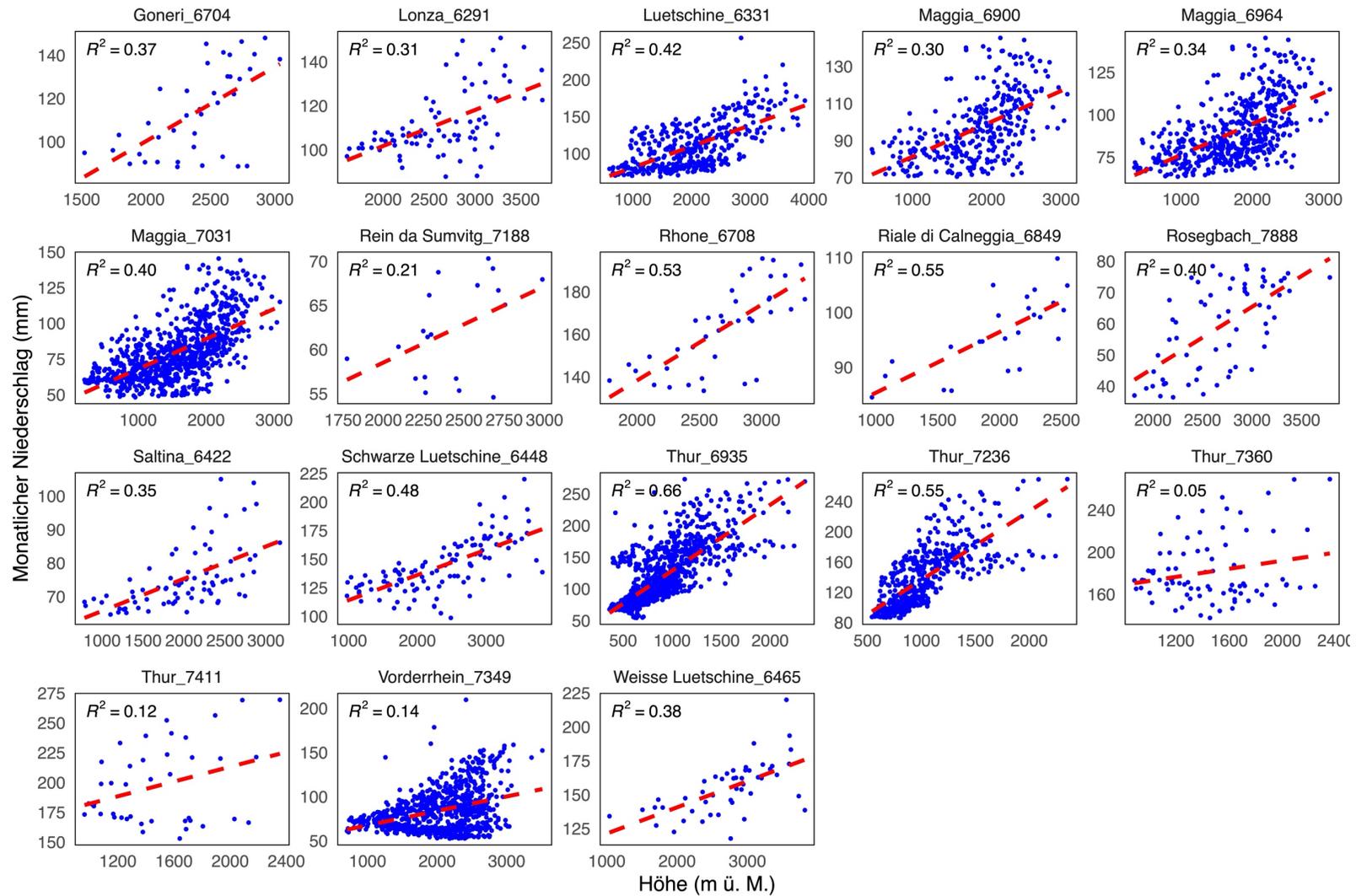


Abbildung 12: Mittlere Monatsniederschlagssummen (Januar) der einzelnen Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit von der Höhe.

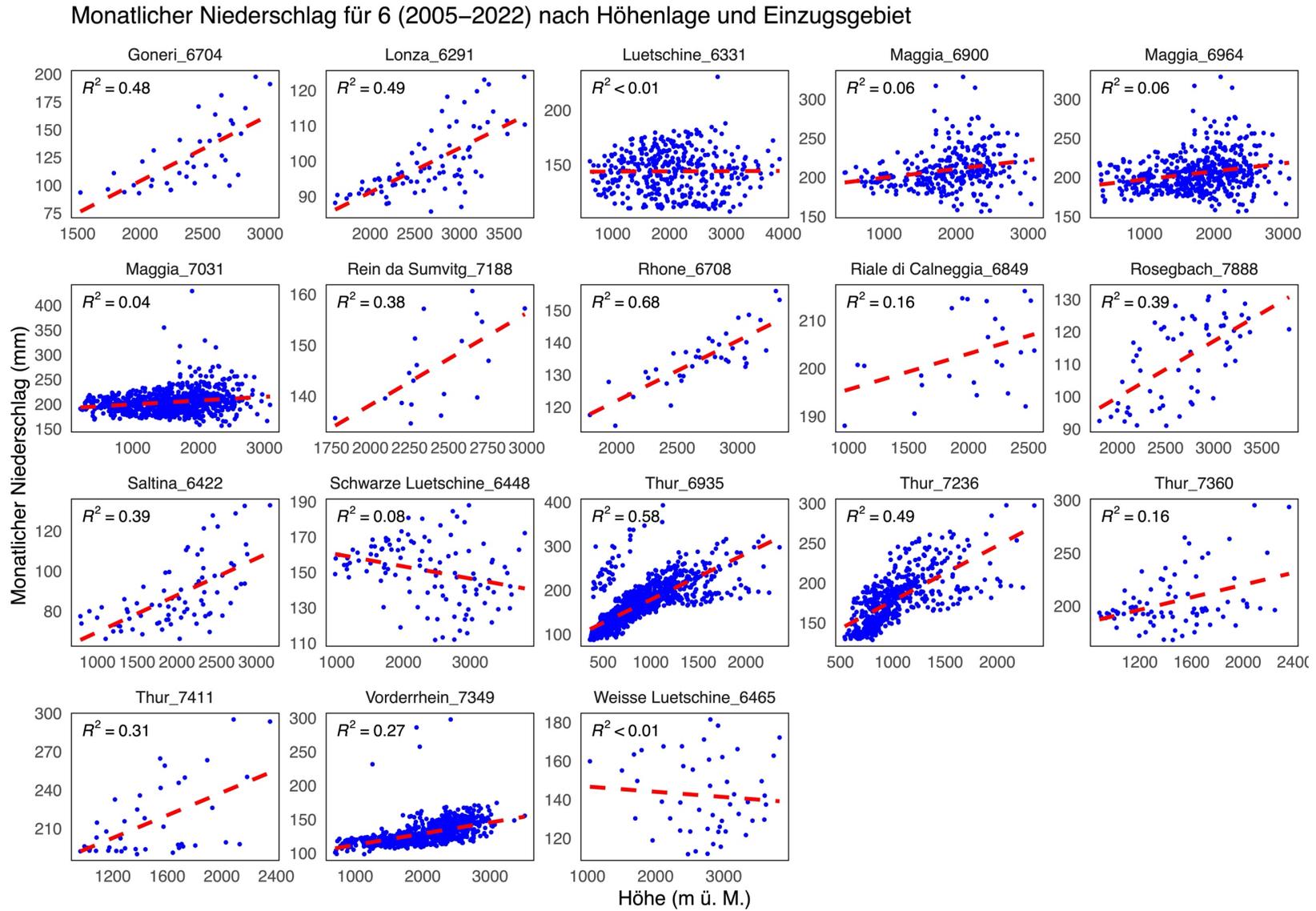


Abbildung 13: Mittlere Monatsniederschlagssummen (Juni) der einzelnen Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit der Höhe.

### 3.1.3 Linearität der mittleren saisonalen Niederschlagssummen

Auch bei der Analyse der mittleren Saisonniederschlagssummen fällt auf, dass die Streuung der  $R^2$ -Werte zwischen den einzelnen Saisons aber auch den einzelnen Einzugsgebieten gross ist (Abbildung 8). Durch die Aufteilung in die Saisons wird verdeutlicht, dass während der Wintermonate die lineare Regression verhältnismässig höhere  $R^2$ -Werte mit einer kleineren Streuung erzielt, was eine grössere Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe bedeuten würde. Die Streuung während der Sommersaison ist am grössten (vgl. Abbildung 14).

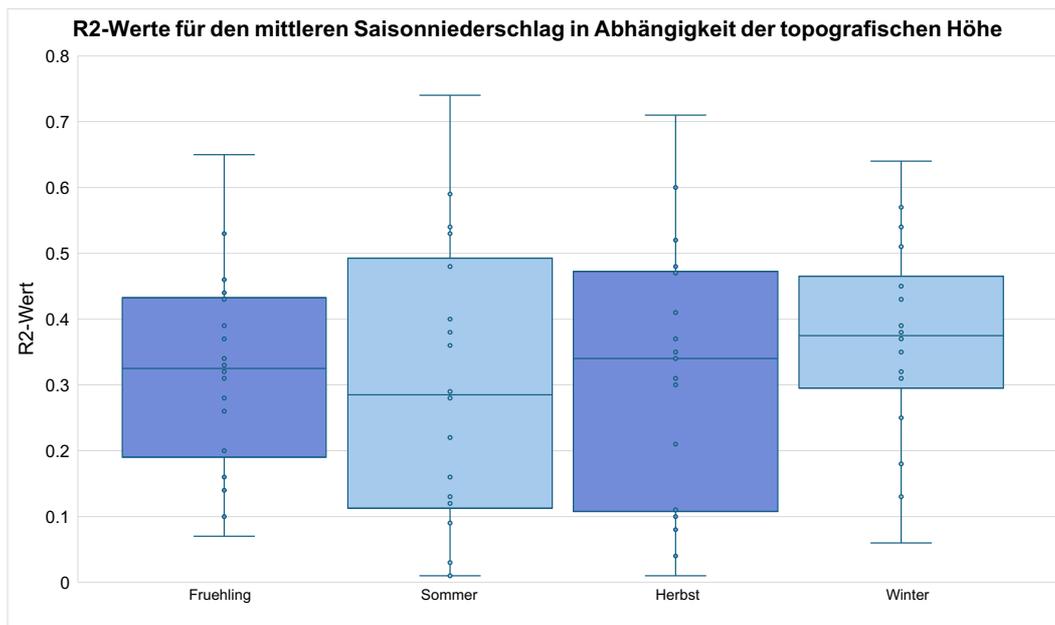


Abbildung 14: Boxplot der  $R^2$ -Werte für die saisonalen Niederschlagssummen in Abhängigkeit von der Höhe.

Die Streuung der einzelnen Untersuchungsgebiete über die diversen Saisons ist auffallend. Beim Untersuchungsgebiet *Maggia\_6900* wurde für die Wintersaison ein  $R^2$ -Wert von 0.38 berechnet. Während der Sommer- und Herbstsaison ist die Abhängigkeit vom Niederschlag von der Höhe geringer und so wurde lediglich eine Linearität von 0.1 bestimmt (Abbildung 8). Das Untersuchungsgebiet *Rhone\_6708* erreicht während allen vier Saisons  $R^2$ -Werte über 0.5, somit besteht eine Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe.

Zusammenfassend wird deutlich, dass in den Untersuchungsgebieten der Niederschlag unterschiedlich abhängig von der Höhe ist. Die Mehrheit der Einzugsgebiete weisen  $R^2$ -Werte unter 0.5 auf, was eine geringe lineare Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe bedeutet. Die Untersuchungsgebiete *Goneri\_6704*, *Rhone\_6708*, *Thur\_6935* und *Thur\_7236* haben allgemein die höchste Linearität. Die Einzugsgebiete *Maggia\_6900*, *Maggia\_6964*, *Maggia\_7031* und *Thur\_7360* weisen hingegen die tiefsten  $R^2$ -Werte auf.

### 3.1.4 Linearitäten der Ereignisse

Wie auch bei den linearen Regressionen der mittleren Jahres-, Monats- und Saisonsumme zeigen die linearen Regressionen der ausgewählten Ereignisse ein sehr unterschiedliches Ergebnis. In einigen Untersuchungsgebieten lässt sich eine eindeutige Beziehung zwischen Niederschlagsmenge und Höhe erkennen. Das Einzugsgebiet der Thur zeigt eine Niederschlagszunahme mit zunehmender Höhe. Das Untersuchungsgebiet der Rhone zeigt ebenfalls eine gute lineare Regression, wobei der Niederschlag mit der Höhe für dieses Ereignis hingegen abnimmt (Abbildung 15).

Bei einigen Untersuchungsgebieten wie beispielsweise Thur\_7411, Maggia\_6900 oder Schwarze Lutschine\_6448 sind die Streuungen der Niederschlagssummen gross, sodass weder statistisch – durch tiefe  $R^2$ -Werte – noch optisch eine lineare Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe bestimmt werden kann (Abbildung 15).

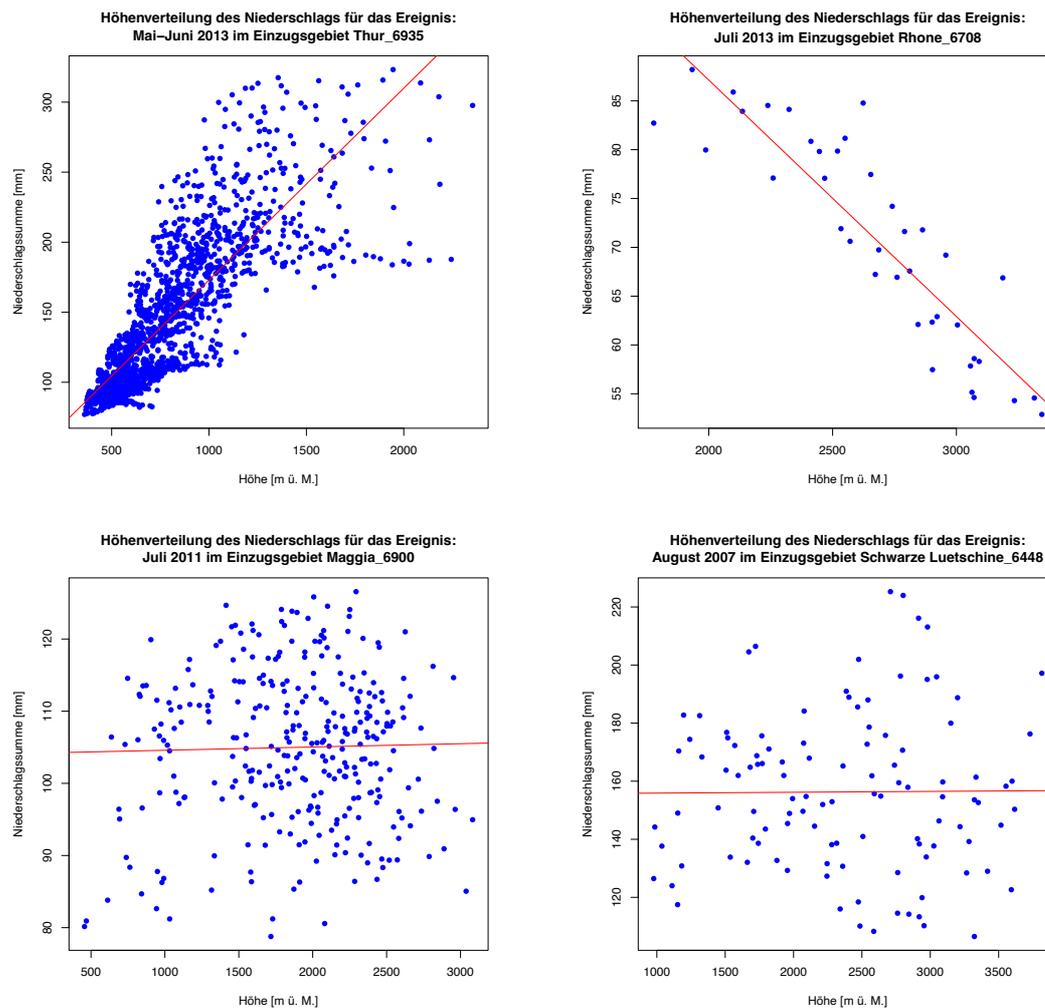


Abbildung 15: Höhenverteilung des Niederschlags der ausgewählten Niederschlagsereignisse für vier Untersuchungsgebiete.

Das Beispiel des Einzugsgebiets der Thur zeigt, wie schon vorher erwähnt, dass durch die Grösse des Untersuchungsgebiet die lineare Abhängigkeit grösser werden kann. So sind in den Untersuchungsgebieten Thur\_7411 und Thur\_7360, welche auch kleinere Einzugsgebietsflächen und somit weniger Datenpunkte haben, die lineare Abhängigkeiten des Niederschlags von der Höhe sehr gering, wohingegen die Untersuchungsgebiete Thur\_7236 und Thur\_6935 höhere lineare Abhängigkeiten erkennbar sind (Abbildung 16). Allgemein zeigt sich eine zunehmende Streuung der Niederschlagssummen mit zunehmender Höhe.

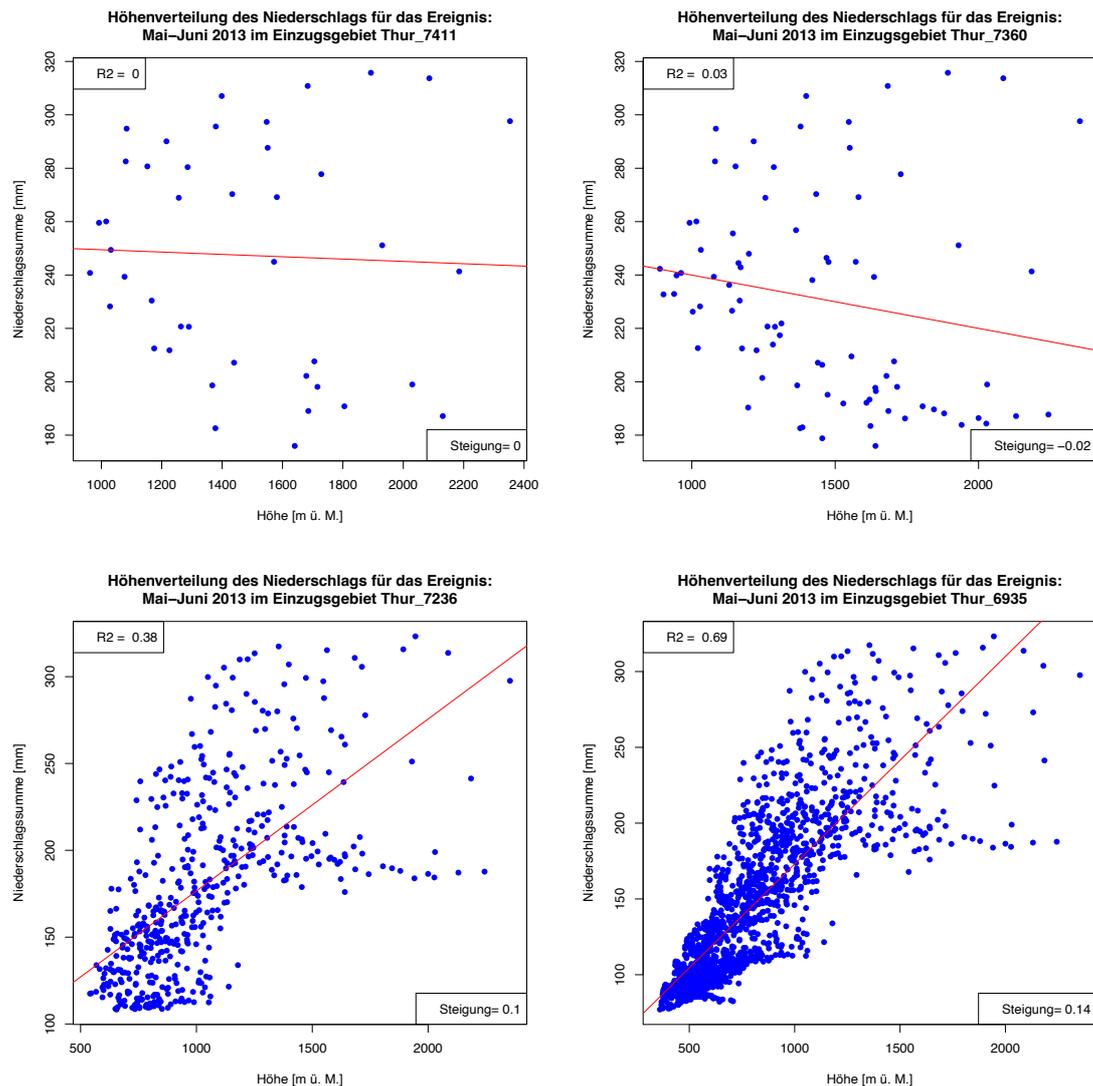


Abbildung 16: Übersicht über die vier Thur-Einzugsgebiete und deren Niederschlagsverteilung.

## 3.2 Linearität mit Segmenten

### 3.2.1 Segmente der mittleren Jahresniederschlagssummen

Durch das Unterteilen der linearen Regression in zwei oder drei Segmente hat sich das Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) verändert. Die segmentierte lineare Regression der mittleren Jahresniederschlagssummen führte zu einer geringen Verbesserung der Beschreibung der Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe. Dennoch weisen Untersuchungsgebiete mit einer niedrigen Linearität auch mit Segmenten eine geringe Linearität auf. So konnte beispielsweise beim Einzugsgebiet *Maggia\_7031* der  $R^2$ -Wert lediglich von 0.04 auf 0.11 verbessert werden (vgl. Abbildung 17). Für Untersuchungsgebiete mit einer grossen Streuung konnte ebenfalls durch die Segmente keine sinnvolle lineare Regression erstellt werden, wie sich beim Einzugsgebiet *Riale di Calneggia\_6849* zeigt.

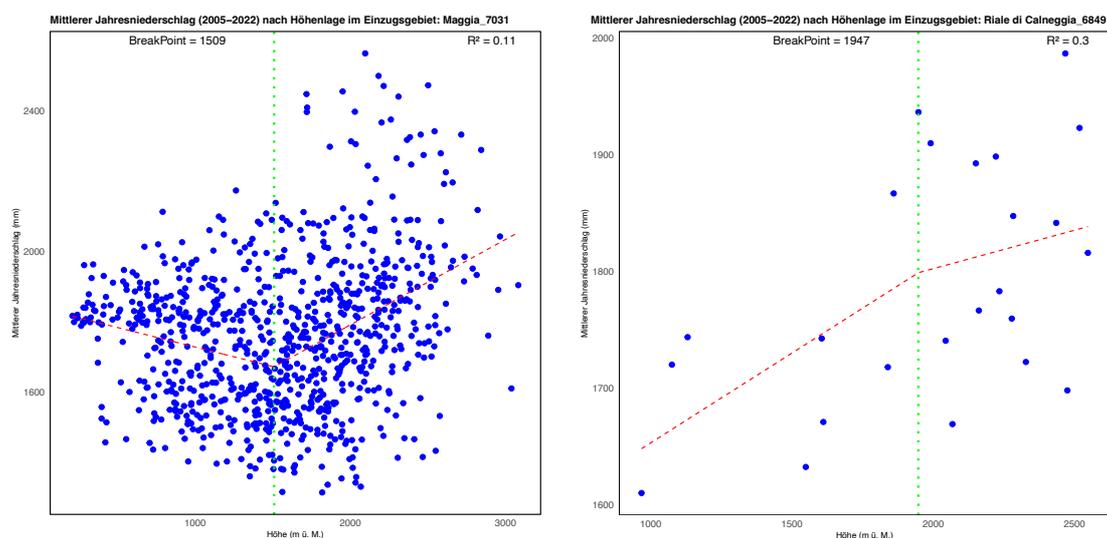


Abbildung 17: Grafiken der mittleren Jahresniederschlagssumme von den Untersuchungsgebieten der *Maggia\_7031* und dem *Riale di Calneggia\_6849*.

Wie bereits im Kapitel 3.1 erwähnt, war für Untersuchungsgebiete mit wenig Datenpunkten, d. h. kleine Untersuchungsgebiete, die lineare Regression bereits sehr unsicher. Folglich ist eine segmentierte lineare Regression ebenfalls wenig aussagekräftig. Die Streuung innerhalb der Segmente kann sehr gross sein, sodass das die Güte der Regression tief ist (vgl. Abbildung 17).

Während die gesamte Modellgüte der Regression für das segmentierte Modell, verhältnismässig verbessert wurde, sind die  $R^2$ -Werte der einzelnen Segmente, wie beispielsweise bei den Untersuchungsgebieten *Thur\_7360*, *Thur\_7411* und *Weisse Luetschine\_6465*, teilweise sehr tief (vgl. Tabelle 6). Bei einem Grossteil der Einzugsgebiete wurden zwei Segmente erstellt. Einzig

bei den Untersuchungsgebieten Luetschine\_6331 und Thur\_6935 wurden drei Segmente erstellt. Das Untersuchungsgebiet Thur\_6935 weist die höchste Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe auf (vgl. Tabelle 6).

Weiter zu betrachten, ist die Steigung der unterschiedlichen Segmente. Im 1. Segment wurden vermehrt negative Steigungen bestimmt, die  $R^2$ -Werte weisen auf eine geringe Abhängigkeit und somit eine sehr grosse Streuung der jeweiligen Datenpunkte. Einzelne Segmente der Untersuchungsgebiete zeigen eine Steigung von über 100%/100m Höhenzunahme.

Tabelle 6: Übersicht der bestimmten Werte der segmentierten Regression des mittleren Jahresniederschlags und der topografischen Höhe. Die Steigung wird in % pro 100m, die Bruchpunkte in m ü. M. dargestellt.

Einzugsgebiet	R <sup>2</sup> Gesamt	R <sup>2</sup> 1. Segment	R <sup>2</sup> 2. Segment	R <sup>2</sup> 3. Segment	Steigung 1. Segment	Steigung 2. Segment	Steigung 3. Segment	Bruchpunkt 1	Bruchpunkt 2
Goneri 6704	0.5	0.17	0.29	-	19.14	83.21	-	2243	-
Lonza 6291	0.44	0.21	0.25	-	14.49	35.45	-	3019	-
Luetschine 6331	0.36	0.17	0	0.32	39.55	2.6	33.2	1152	2258
Maggia 6900	0.2	0.32	0.18	-	-45.64	20.26	-	874	-
Maggia 6964	0.18	0	0.13	-	-2.71	22.19	-	1344	-
Maggia 7031	0.11	0.05	0.11	-	-11.1	24.3	-	1509	-
Rein da Sumvitg 7188	0.32	0.01	0.03	-	8.08	30.34	-	2470	-
Rhone 6708	0.7	0.44	0.54	-	18.16	48.39	-	2412	-
Riale di Calneggia 6849	0.3	0.22	0	-	15.39	6.58	-	1947	-
Rosegbach 7888	0.41	0.26	0.01	-	31.02	10.55	-	2939	-
Saltina 6422	0.47	0.21	0.2	-	10.41	31.42	-	2010	-
Schwarze Luetschine 6448	0.28	0	0.21	-	1.82	21.31	-	2474	-
Thur 6935	0.8	0.43	0.55	0.06	96.23	134.06	48.04	668	1259
Thur 7236	0.57	0.5	0.01	-	117.49	30.03	-	1251	-
Thur 7360	0.15	0.03	0.03	-	16.78	161.85	-	2027	-
Thur 7411	0.24	0.08	0.23	-	28.78	163.31	-	2030	-
Vorder- rhein 7349	0.46	0.24	0.2	-	13.71	28.54	-	2118	-
Weisse Luetschine 6465	0.25	0.07	0.21	-	-10.25	20.5	-	2213	-

Die Unterschiede der linearen Regression der mittleren Jahresniederschlagssummen und die Unterschiede der Güte der Regression sind gross. So lässt die mittlere Jahresniederschlagssumme keine allgemeingültige Aussage zur linearen Abhängigkeit des Niederschlags und der Höhe zu.

### 3.2.2 Segmente der mittleren Monatsniederschlagssummen

In den meisten Fällen wurde die mittlere Monatsniederschlagssumme in zwei oder drei Segmente unterteilt. Innerhalb eines Einzugsgebietes wurden die Bruchpunkte über die verschiedenen Monate hinweg mehrfach auf der gleichen Höhe definiert (vgl. Abbildung 20, Abbildung 21). Untersuchungsgebiete, in denen die Niederschlagsmenge stark von der topografischen Höhe abhängt, weisen auch für die monatlichen Niederschlagssummen eine hohe lineare Beziehung auf, während in anderen Untersuchungsgebieten die Varianz der  $R^2$ -Werte gross ist. Die  $R^2$ -Werte für das Untersuchungsgebiet Goneri weisen während acht Monaten über 0.5 auf (Abbildung 19). Im Gegensatz dazu liegen die  $R^2$ -Werte für das Untersuchungsgebiet Lutschine zwischen 0.53 und 0.01. Für das Untersuchungsgebiet Thur\_7360 werden maximale  $R^2$ -Werte von 0.22 beobachtet.

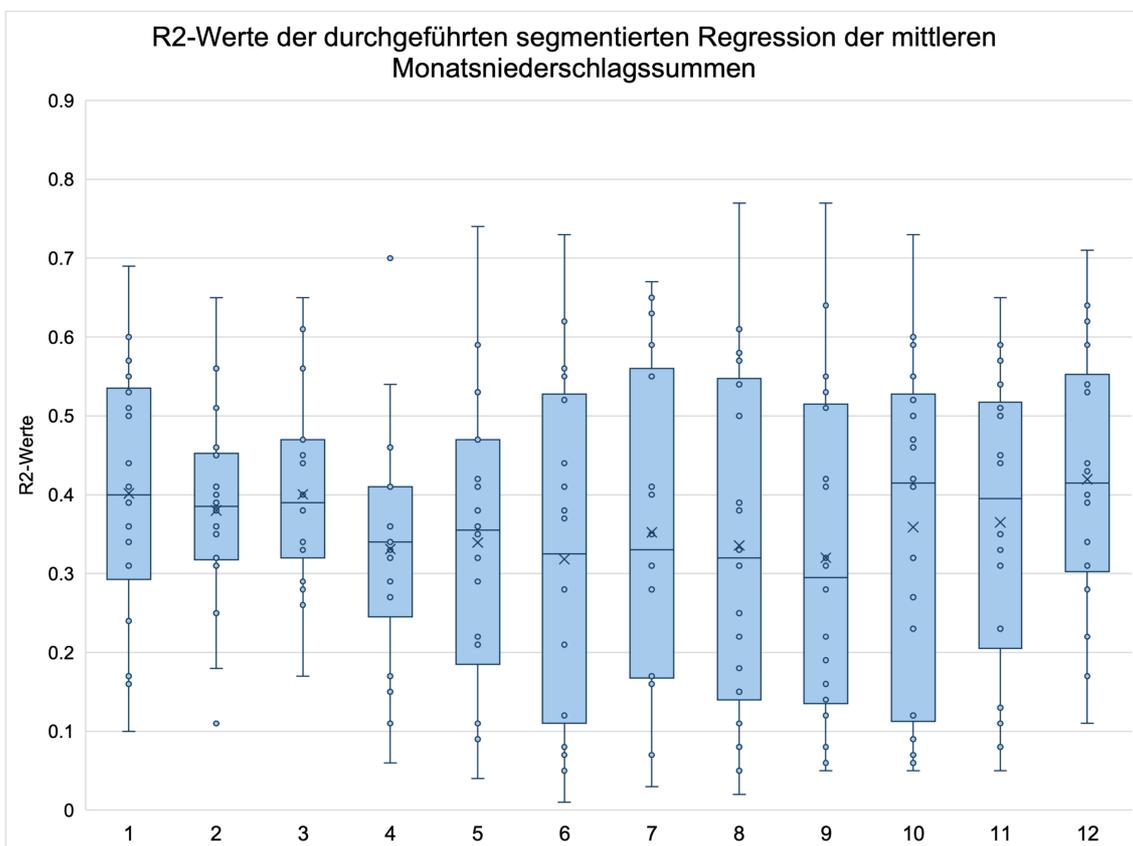


Abbildung 18: Darstellung der  $R^2$ -Werte der segmentierten linearen Regression der Monatsniederschlagssummen.

Wie durch die Resultate der allgemeinen lineare Regression zu erwarten, sind bei einigen Untersuchungsgebieten die  $R^2$ -Werte für Sommermonate besser, andere Testgebiete weisen in den Wintermonaten die höchsten  $R^2$ -Werte auf (Abbildung 19). Allgemein ist zu beobachten, dass während der Wintermonate die Varianz der  $R^2$ -Werte der unterschiedlichen Untersuchungsgebiete am geringsten war. Während der Sommermonate ist die Abhängigkeit des Niederschlags von der

Höhe in einzelnen Untersuchungsgebiete gross, die Varianz der einzelnen Untersuchungsgebieten ist jedoch auch hier nach wie vor gross (Abbildung 18). Ein Vergleich mit der allgemeinen linearen Regression der mittleren Monatsniederschlagssummen (Abbildung 10) zeigt, dass die  $R^2$ -Werte der segmentierten Regression grösser sind und somit die Linearität des Niederschlags und der Höhe durch die Segmente grundsätzlich verbessert werden konnten.

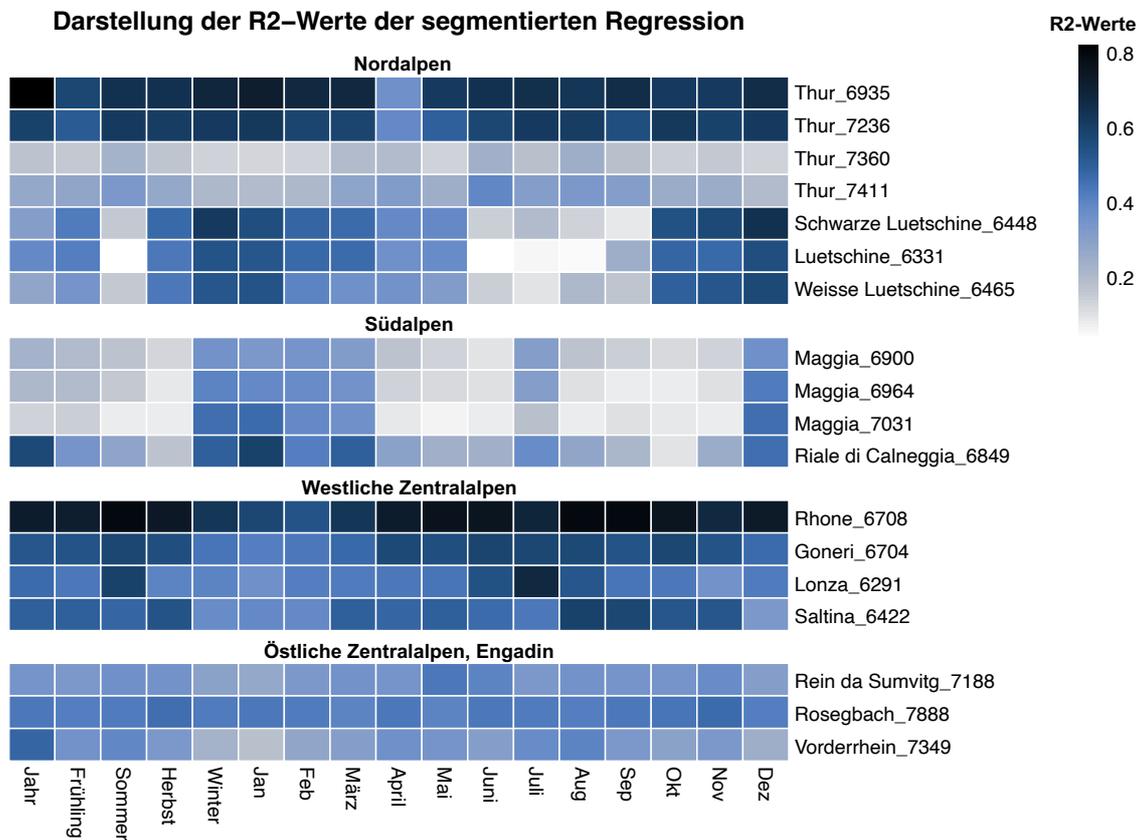


Abbildung 19: Heatmap der  $R^2$ -Werte der segmentierten linearen Regression.

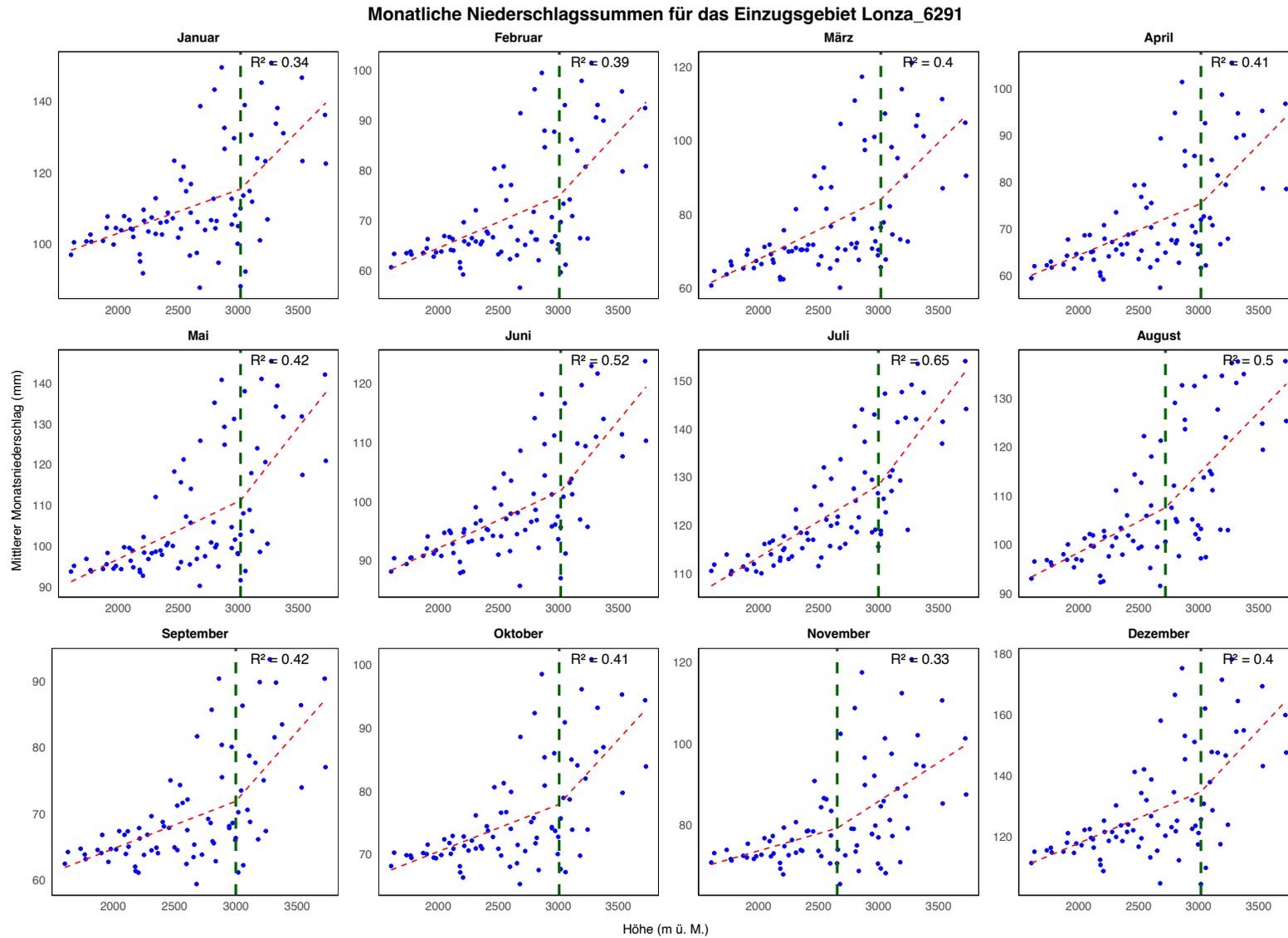


Abbildung 20: Übersicht über die segmentierte lineare Regression, als Beispiel das Untersuchungsgebiet Lonza\_6291.

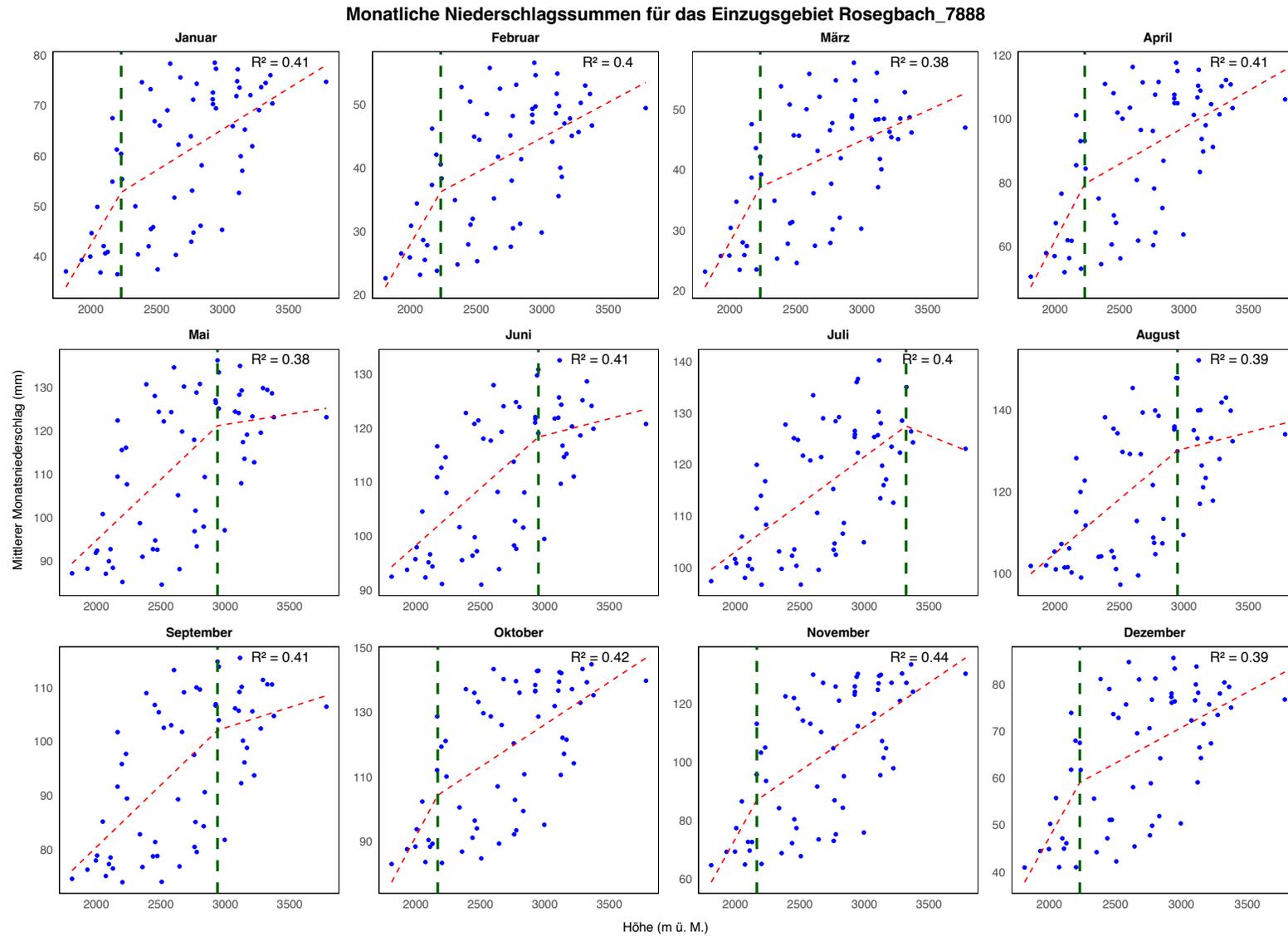


Abbildung 21: Übersicht über die segmentierte lineare Regression als Beispiel des Untersuchungsgebiet Rosegbach\_7888.

### 3.2.3 Segmente der mittleren saisonalen Niederschlagssummen

Auch bei der segmentierten linearen Regression wurden grösstenteils zwei oder drei Segmente für die Untersuchungsgebiete bestimmt. Für die unterschiedlichen Saisons wurden mehrfach die gleichen Bruchpunkte innerhalb eines Untersuchungsgebiet bestimmt.

Der Abbildung 22 ist zu entnehmen, dass die Varianz der  $R^2$ -Werte während der Wintersaison am kleinsten ist. Zusätzlich ist der Mittelwert der  $R^2$ -Werte für alle Untersuchungsgebiete im Winter am höchsten. Demnach lässt sich schliessen, dass während der Wintersaison die Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe am grössten ist und durch die Unterteilung in Segmente die Qualität der linearen Regression verbessert wurde (vgl. Abbildung 14). Im Sommer hingegen ist die Streuung der  $R^2$ -Werte ebenfalls bei der segmentierten linearen Regression sehr gross.

Die  $R^2$ -Werte sind allgemein wieder etwas höher als bei der allgemeinen linearen Regression. Die  $R^2$ -Werte der einzelnen Segmente sind teils hoch, teils tief. Durch die segmentierte lineare Regression konnte auch bei den saisonalen Niederschlagssummen die Güte etwas verbessert werden, wobei die Güte der segmentierten Regression, erkennbar in Abbildung 19, der einzelnen Untersuchungsgebiete sehr unterschiedlich sind.

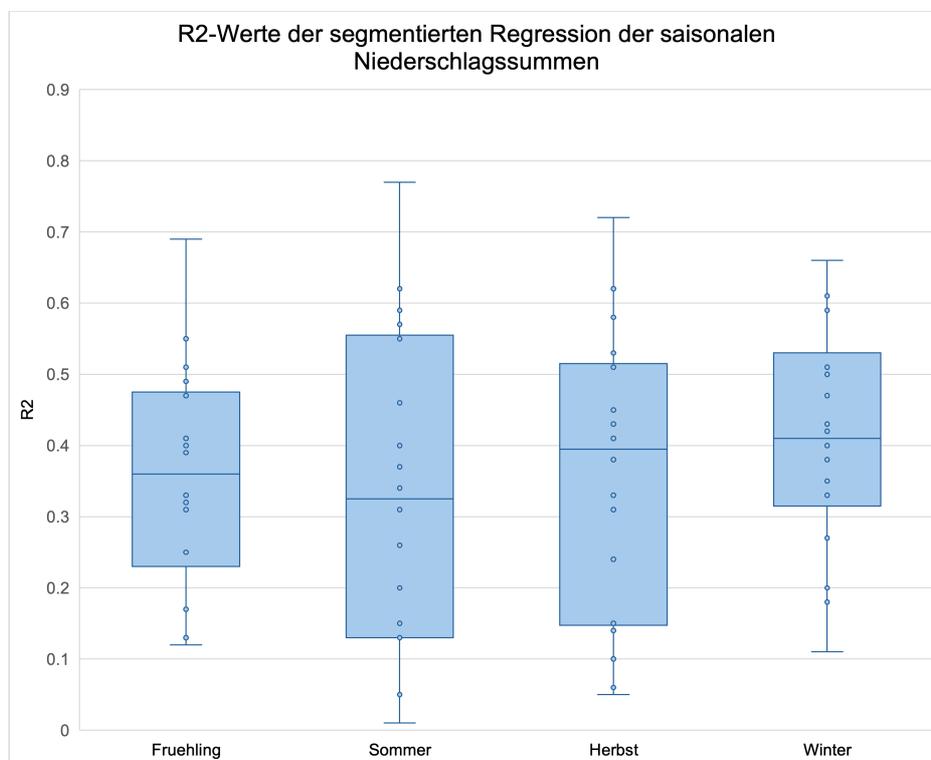


Abbildung 22:  $R^2$ -Werte der segmentierten Regression für die saisonalen Niederschlagssummen in Abhängigkeit von der Höhe.

### 3.2.4 Segmente der Ereignisse

Wie auch bei den Segmenten der mittleren Jahres-, Monats- und Saisonniederschlagssummen führte die Unterteilung der Regression in Segmente zu einer Verbesserung der linearen Regression. Das Bestimmtheitsmass  $R^2$  der gesamten Regression wurde bei allen verbessert. Durch die geringe lineare Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe wurde bei einzelnen Untersuchungsgebieten die lineare Regression nur minimal verbessert. Lediglich bei den Untersuchungsgebieten Thur\_6935, Thur\_7236 wurden zwei Bruchpunkte definiert. Bei den restlichen Gebieten wurde nur einen Bruchpunkt bestimmt.

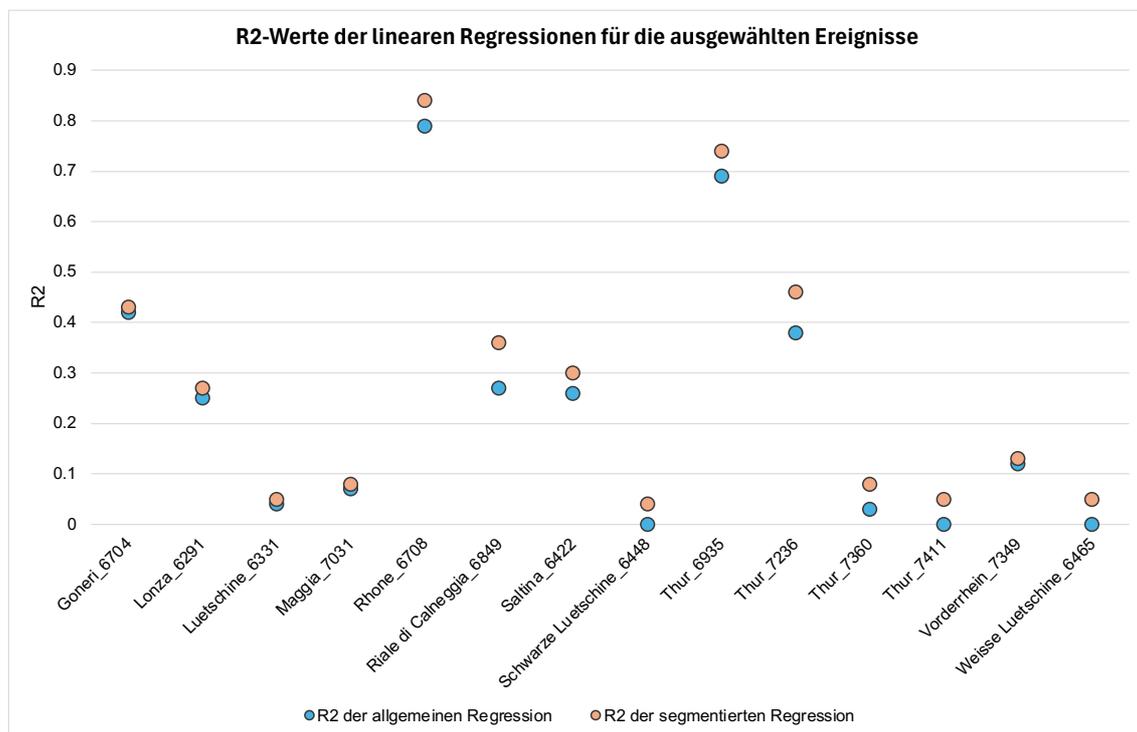


Abbildung 23:  $R^2$ -Werte der allgemeinen und segmentierten linearen Regression für die jeweiligen Niederschlagsereignisse.

Die Untersuchungsgebiete Riale di Calneggia\_6849 und Thur\_7236 fallen dabei auf, da sich der  $R^2$ -Wert deutlich verbessert hat. Dennoch sind die  $R^2$ -Werte kleiner als 0.5, was eine geringe lineare Abhängigkeit bedeutet. Die Untersuchungsgebiete, welche allgemein keine lineare Abhängigkeit aufwiesen, konnten minimal verbessert werden (vgl. Abbildung 23, Abbildung 24).

Nur die Untersuchungsgebiete Rhone\_6708 und Thur\_7236 erreichen  $R^2$ -Werte über 0.5, sowohl für die allgemeine als auch die segmentierte lineare Regression.

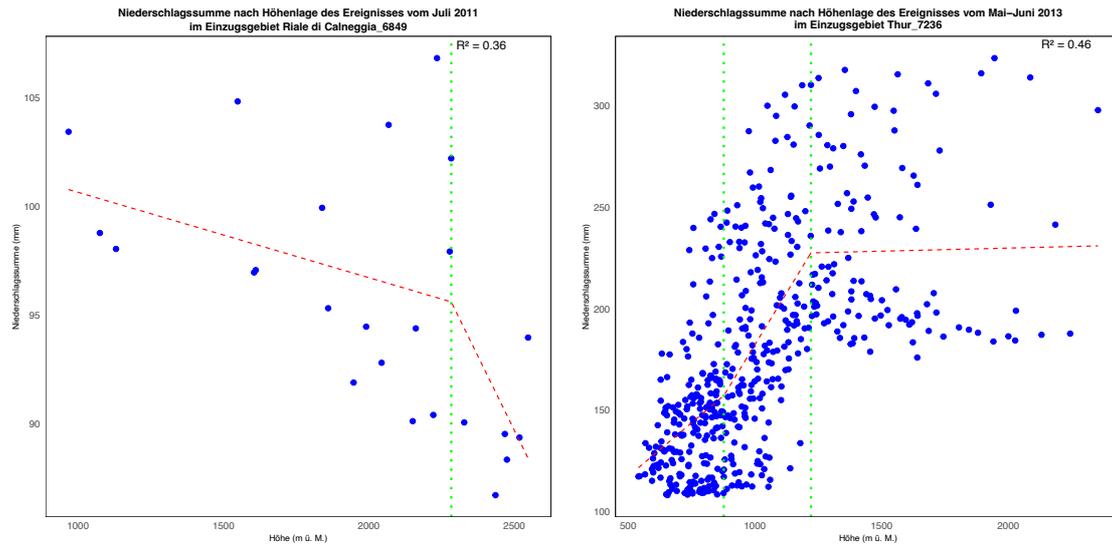


Abbildung 24: Segmentierte Regression der jeweiligen Ereignisse für die Untersuchungsgebiete Riale di Calneggia\_6349 und Thur\_7236.

### 3.3 Abflussmodellierungen mit den Niederschlagsgradienten

Die ersten Modellläufe mit den Standardeinstellungen und der Kalibrierung des EXCH-Projekts haben gezeigt, dass einige Untersuchungsgebiete bereits in der Simulation schlechte Ergebnisse mit niedrigen Kling-Gupta-Werten aufweisen oder die Simulation fehlerhaft ist. Insgesamt vier Untersuchungsgebiete wurden in den folgenden Analysen und Auswertungen nicht berücksichtigt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Liste der Untersuchungsgebiete, die für die weitere Auswertung ausgeschlossen werden.

Stationsbezeichnung	Kling-Gupta der Standardsimulation
Maggia_6900	-0.9663
Rein da Sumvitg_7188	0.3704
Maggia_6964	0.4334
Rosegbach_7888	---

Wie anhand der Resultate in Kapitel 3.1 und 3.2 zu erwarten war, sind die Simulationen in HBV unterschiedlich erfolgreich. Die Berechnung der linearen Niederschlagsverteilung in Segmenten führte in einigen Fällen zu einer geringen Veränderung der Simulationsgüte, in anderen Fällen zu einer grösseren Veränderung (vgl. Abbildung 25, Tabelle 8).

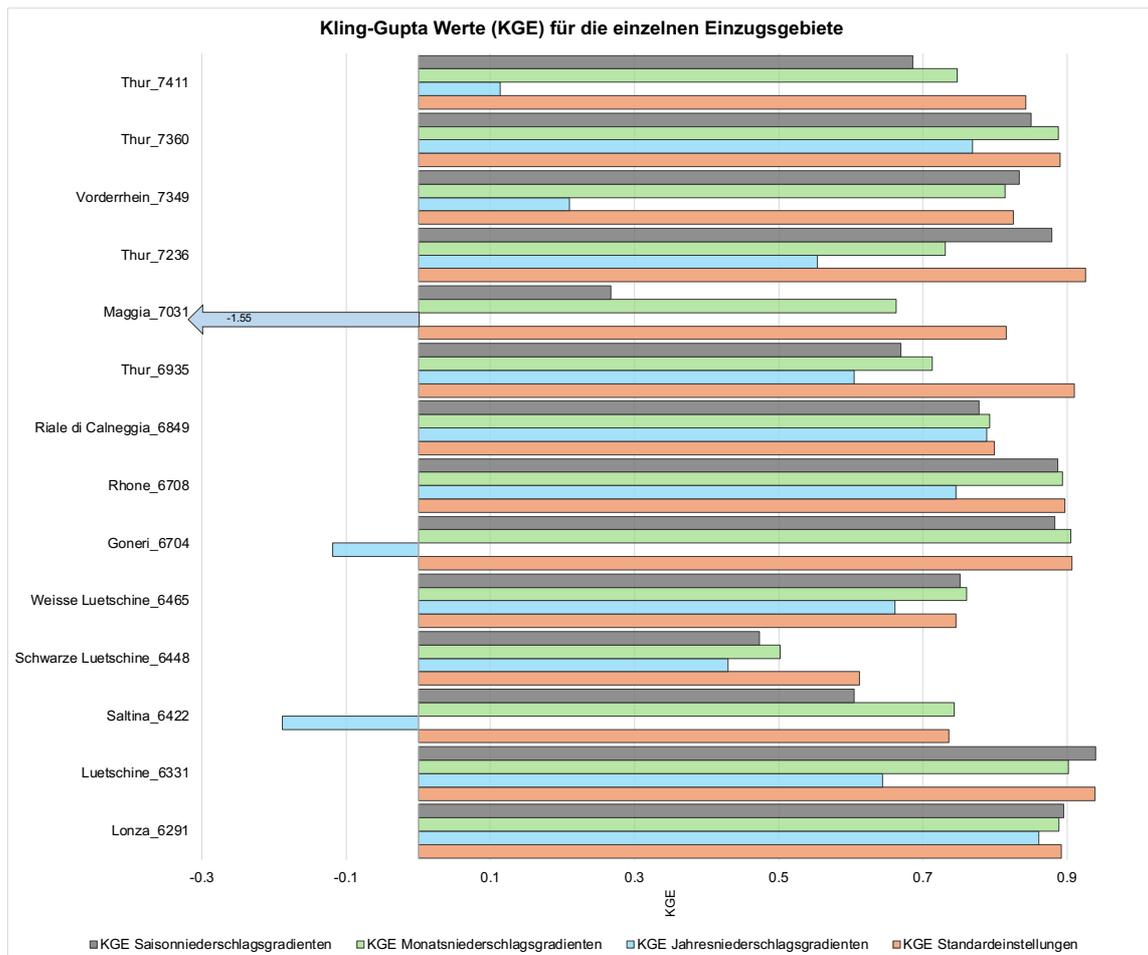


Abbildung 25: Grafik der KGE der unterschiedlichen Simulationen. Die Standardeinstellungen bezeichnen die Einstellungen des Projektes mit der Niederschlagszunahme von 10%/100m.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Kling-Gupta-Werte (kurz: KGE) der Simulationen mit den differenzierten Gradienten basierend auf den Jahresniederschlagssummen bei allen Untersuchungsgebieten tiefer als bei der Simulation mit der Standardeinstellung sind. Die Simulationsdurchgänge mit den mittleren Monatssummen und deren berechneten Gradienten führten bei einigen Untersuchungsgebieten zu höheren KGE der Abflusssimulationen. Allgemein sind die Unterschiede vom KGE der Standardeinstellungssimulation zum KGE der Monatsniederschlagsgradienten am kleinsten (Tabelle 8). Die durchgeführten Simulationen in HBV mit differenzierten Gradienten, basierend auf den mittleren saisonalen Niederschlagssummen, führten für ausgewählte Untersuchungsgebiete zu Modellierungen mit ähnlichen KGE-Werten wie jene der Modellierungen mit Standardeinstellung (Tabelle 8). Insgesamt sind die KGE-Werte der Simulationen mit den mittleren Monatsniederschlagssummen am höchsten, gefolgt von den KGE der Modellierungen basierend auf den Saisonniederschlagsgradienten. Einzelne Untersuchungsgebiete wie beispielsweise das Gebiet Riale di Calneggia oder die Weisse Lüttschine zeigen sowohl bei den Modellierungen mithilfe der Monatsniederschlags- als auch der Saisonniederschlagsgradienten ähnlich gute Werte, wie jene

der Standardeinstellungen. Bei Gebieten wie der Schwarzen Lutschine als auch der Thur\_7411 weisen alle Modellierungen mit den differenzierten Gradienten deutlich tiefere KGE als jene der Standardeinstellung auf.

Tabelle 8: Kling-Gupta-Werte (KGE) für die durchgeführten Simulationen mit den differenzierten Niederschlagsgradienten. Grün markiert sind die Simulationen mit differenzierten Gradienten, die höhere oder fast gleich hohe KGE wie die Standardeinstellung haben.

<b>Einzugsgebiet</b>	<b>KGE- Standardeinstellungen</b>	<b>KGE- Jahresniederschlagsgradienten</b>	<b>KGE- Monatsniederschlagsgradienten</b>	<b>KGE- Saisonniederschlagsgradienten</b>
Lonza_6291	0.8921	0.8608	0.889	0.8951
Luetschine_6331	0.9388	0.6438	0.9019	0.9399
Saltina_6422	0.7362	-0.1883	0.7435	0.6044
Schwarze Luetschine_6448	0.6119	0.4297	0.5018	0.4735
Weisse Luetschine_6465	0.7462	0.6616	0.7608	0.752
Goneri_6704	0.9068	-0.1189	0.905	0.8833
Rhone_6708	0.8968	0.7455	0.8938	0.8873
Riale di Calneggia_6849	0.7994	0.7882	0.7929	0.7778
Thur_6935	0.9104	0.6043	0.7131	0.6695
Maggia_7031	0.816	-1.5546	0.663	0.2676
Thur_7236	0.9254	0.5538	0.7315	0.8785
Vorderrhein_7349	0.8252	0.2101	0.8138	0.834
Thur_7360	0.8901	0.7686	0.8878	0.8503
Thur_7411	0.8427	0.1133	0.7476	0.6863

Abbildung 26 zeigt die Differenzen der beobachteten Abflussmengen zu den simulierten Abflussmengen. Zwei Simulationen haben den Abfluss um über 1'000 mm überschätzt. Die Jahresniederschlagsgradienten bringen in diesen Untersuchungsgebieten keine Verbesserung der Abflussmodellierungen. Allgemein ist erkennbar, dass die Simulationen mit den Standardeinstellungen die Abflusssummen tendenziell unterschätzen, bei den Modellierungen mit den Jahresniederschlagsgradienten hingegen wird die Abflusssumme mehrheitlich überschätzt. Ein Grossteil der Simulationen sind jedoch bei +/-200 mm Differenz zu den beobachteten Abflussmengen. Es fällt auf, dass die Differenz bei den Simulationen der Monatsniederschlagsgradienten bei der Mehrheit der Einzugsgebiete sehr klein ist. Dies betont wiederum die Güte der Durchführung der Abflussmodellierungen mit den Monatsniederschlagsgradienten.

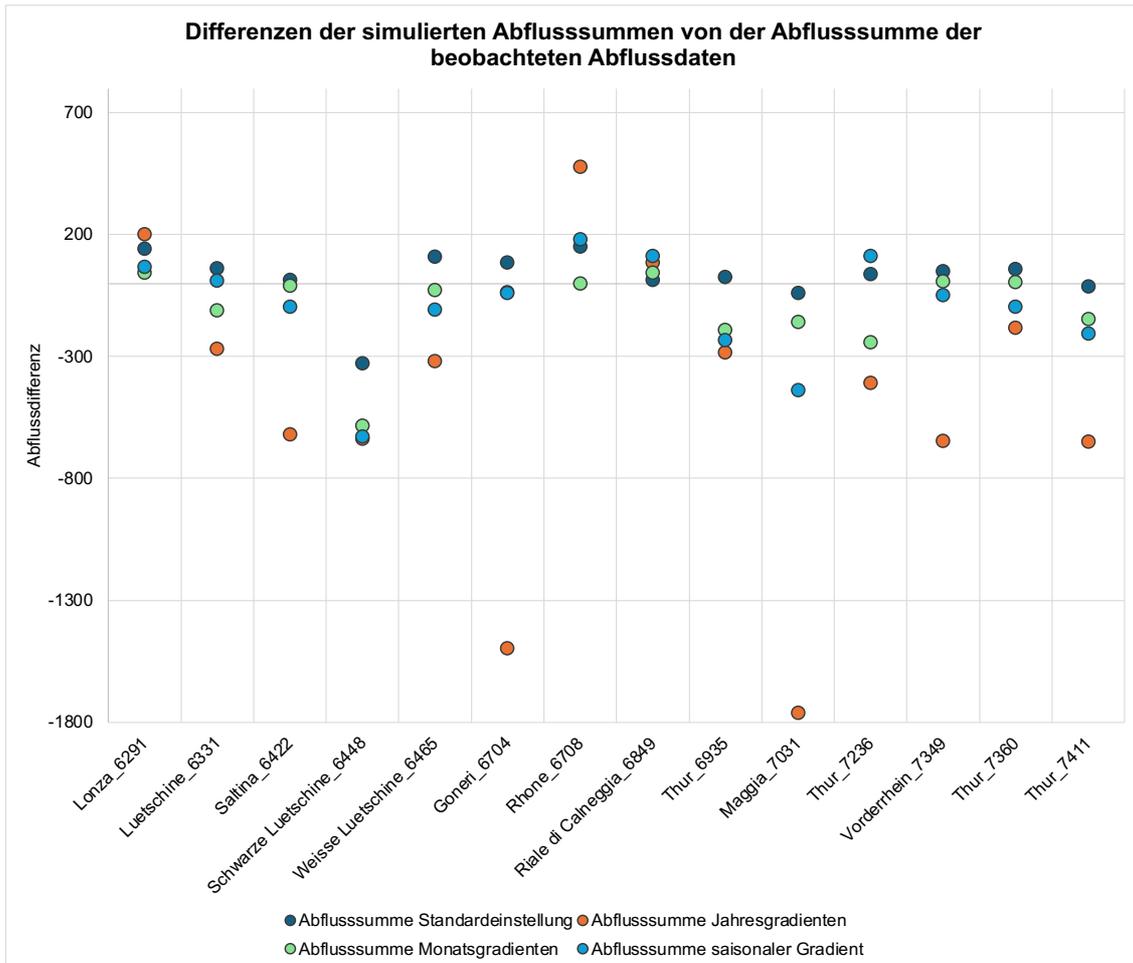


Abbildung 26: Darstellung der Differenz der Abflusssummen der beobachteten und der simulierten Daten.

Abbildung 27a zeigt die Abflusssimulation im Untersuchungsgebiet Thur\_6935 für das Jahr 2014. Die Abflusssimulation zeigt übereinstimmende Schwankungen und die Differenzen der beobachteten und der simulierten Abflusssummen sind gering. Während den Frühjahrsmonaten wurde der Abfluss in der Modellierung überschätzt. Die Hochwasser wurden in der Simulation unterschätzt. Bei Abbildung 27b fällt auf, dass bereits das Niedrigwasser und teils Mittelwasser grössere Unterschiede zu den beobachteten Abflusswerten zeigt. Während den Frühjahrsmonaten wurde der Abfluss teils unterschätzt. Gegen Sommer und Herbst wurde der Abfluss durchgehend überschätzt.

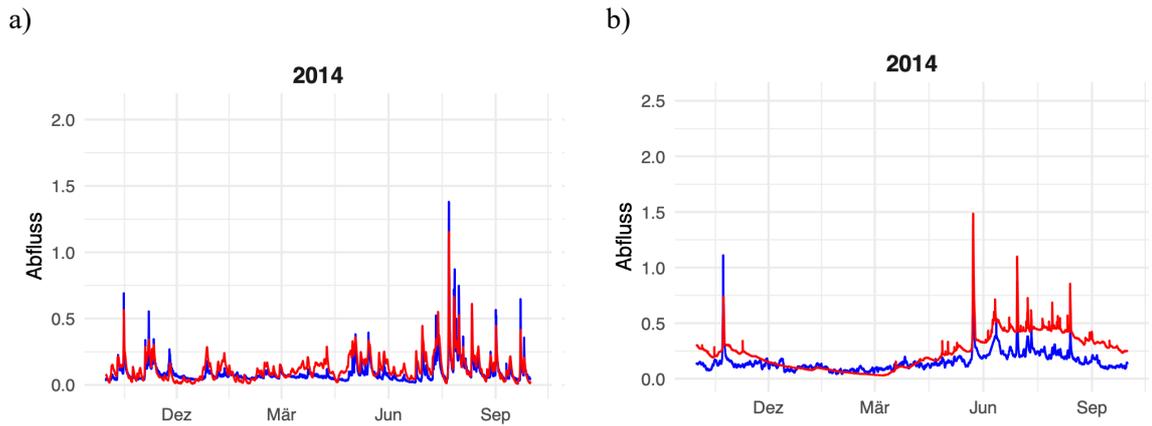


Abbildung 27: Abflusssimulation des Untersuchungsgebiet a) Thur\_6935 und b) Vorderrhein\_7349 des Jahres 2014. Blau zeigt die beobachteten Abflüsse und rot die modellierten Abflüsse mit den differenzierten Jahresniederschlagsgradienten.

Bei den Abflusssimulationen der ausgewählten Ereignisse hat sich gezeigt, dass die Untersuchungsgebiete mit einer guten linearen Regression für das Ereignis ebenfalls zu einer guten Modellierung führen kann. Umgekehrt haben Untersuchungsgebiete mit einer geringen linearen Abhängigkeit eine schlechtere Modelleistung erbracht. Die Untersuchungsgebiete der Schwarzen und Weissen Lutschine konnten keine Verbesserung der Modellierung durch die differenzierten Niederschlagsgradienten erbringen. Allgemein war die Simulation des ausgewählten Ereignisses für die genannten Gebiete ohne grossen Erfolg (vgl. Abbildung 28).

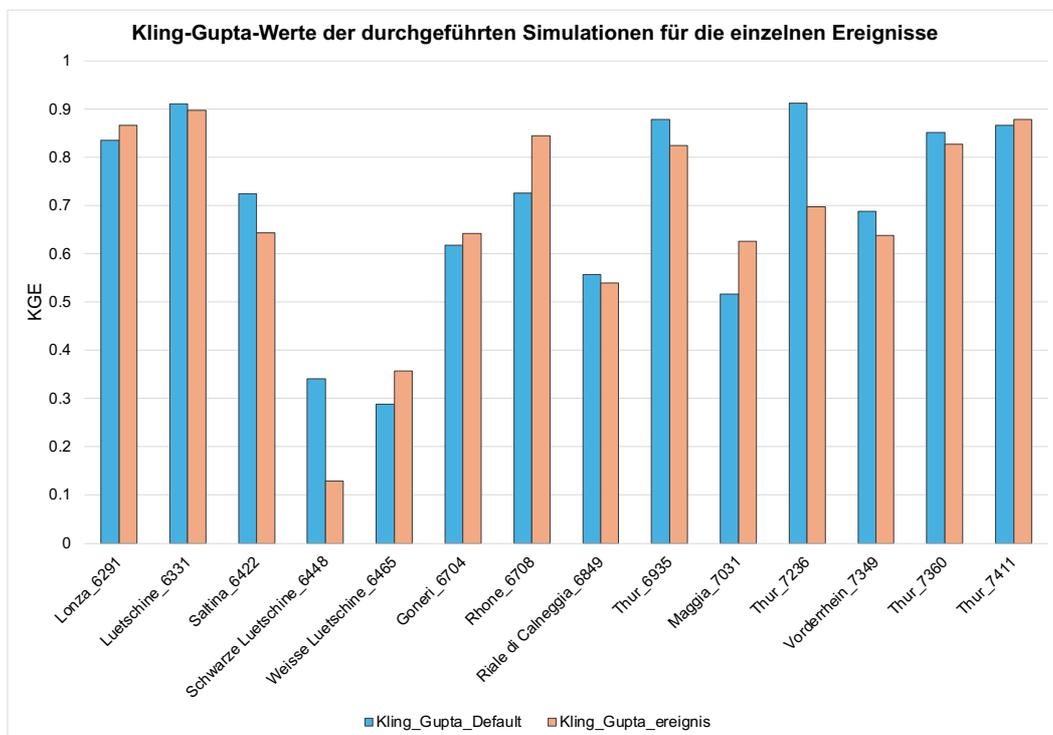


Abbildung 28: Kling-Gupta-Werte der durchgeführten Simulationen der ausgewählten Ereignisse mit der Standardeinstellung und den differenzierten Niederschlagsgradienten.

Beim Vergleich der Simulationen der Schwarzen Lüttschine fällt auf, dass der Abfluss tendenziell überschätzt wurde, besonders auch während dem Hochwasserereignis im August 2007. Die Simulation mit den differenzierten Niederschlagsgradienten hat das Ereignis mehr überschätzt als die Simulation mit den Standardeinstellungen (vgl. Abbildung 29).

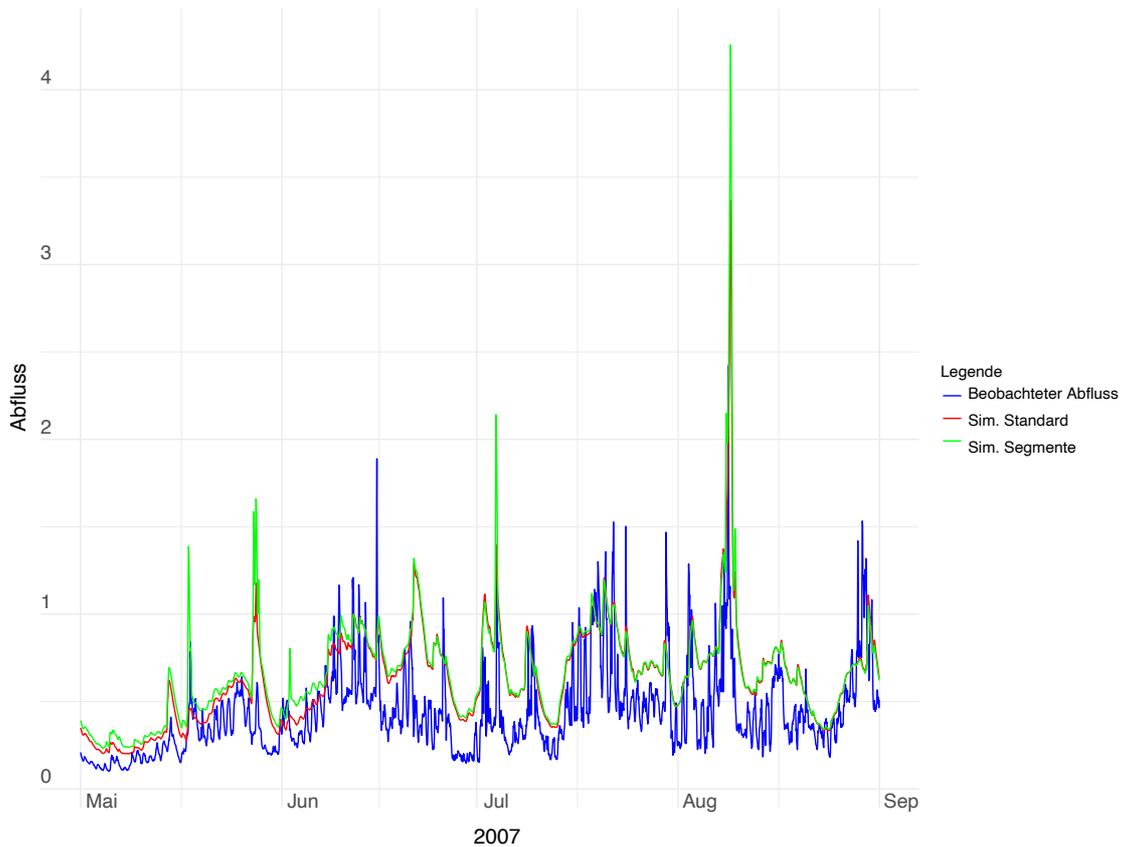


Abbildung 29: Abflussganglinie des Untersuchungsgebietes Schwarze Lüttschine\_6448 für das Niederschlagsereignis im August 2007.

Wenn die Simulationen der Weissen Lüttschine genauer betrachtet werden, fällt auf, dass der Abfluss der Simulationen im HBV in allen Bereichen – Niedrigwasser, Mittelwasser und Hochwasser – unterschätzt wird. Das Ereignis im August 2007 mit erhöhtem Abfluss wurde bei den beiden Simulationsdurchgängen ebenfalls unterschätzt, wobei sich die Simulationen bei dem Ereignis kaum unterscheiden.

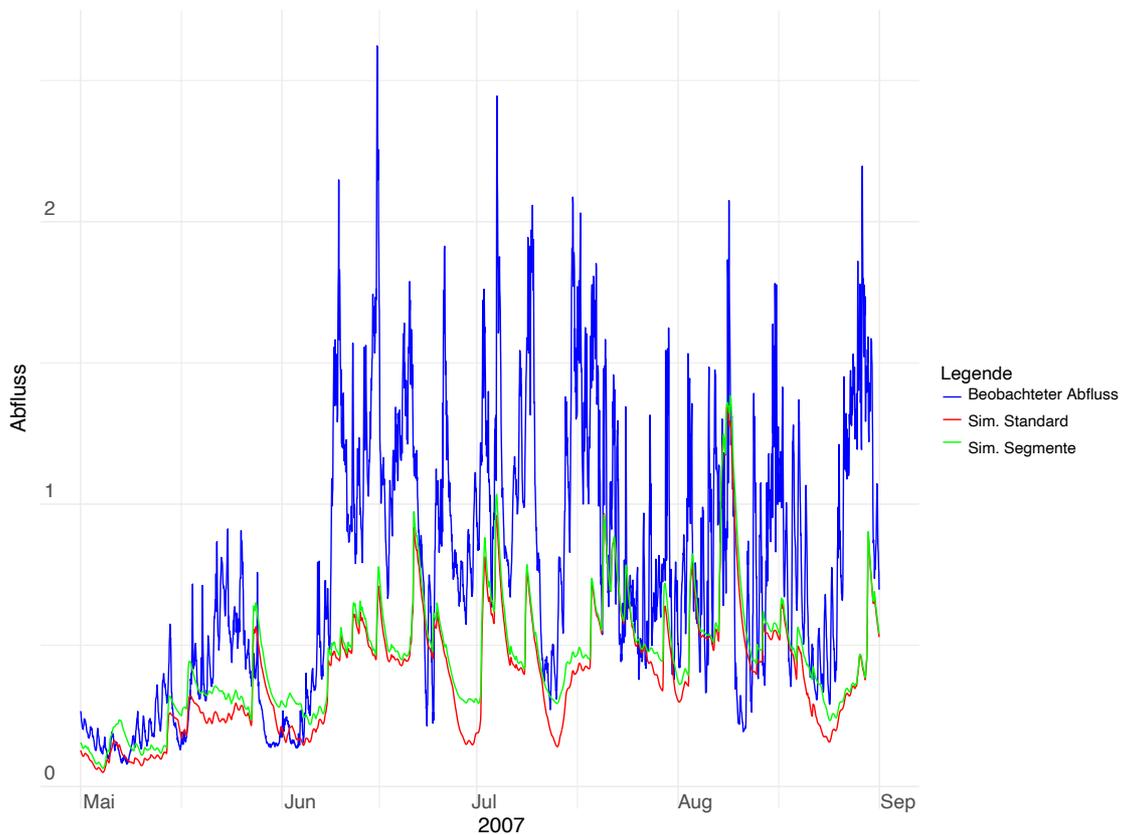


Abbildung 30: Abflussganglinie für das Untersuchungsgebiet Weisse Lüttschine\_6465.

Insgesamt wurde bei sechs von vierzehn Simulationen die Modelleistung gesteigert. So zeigt beispielsweise die Rhone eine klare lineare Abhängigkeit und gut definierte Segmente, welche zu einer erfolgreichen Abflussmodellierung führen (vgl. Abbildung 28). Bei der Simulation mit den differenzierten Niederschlagsgradienten wurde der Kling-Gupta-Wert um 0.1 verbessert.

Wenn die Abflussganglinie der Rhone betrachtet wird (Abbildung 31), wird ersichtlich, dass der Abfluss der Simulationen den Abfluss unterschätzen, sowohl im Niedrigwasserbereich als auch im Mittel- und Hochwasserbereich. Die Abflusssimulation mit den differenzierten Gradienten kommt insgesamt dem beobachteten Abfluss jedoch näher. Das Niederschlagsereignis Ende Juli 2013 wurde durch beide Simulationen deutlich unterschätzt, wobei die Simulation mit der Standardeinstellung die Hochwasserspitze stärker unterschätzt hat (vgl. Abbildung 31). Die segmentierte Regression führte dabei zu einer Verbesserung der Simulation des Ereignisses.

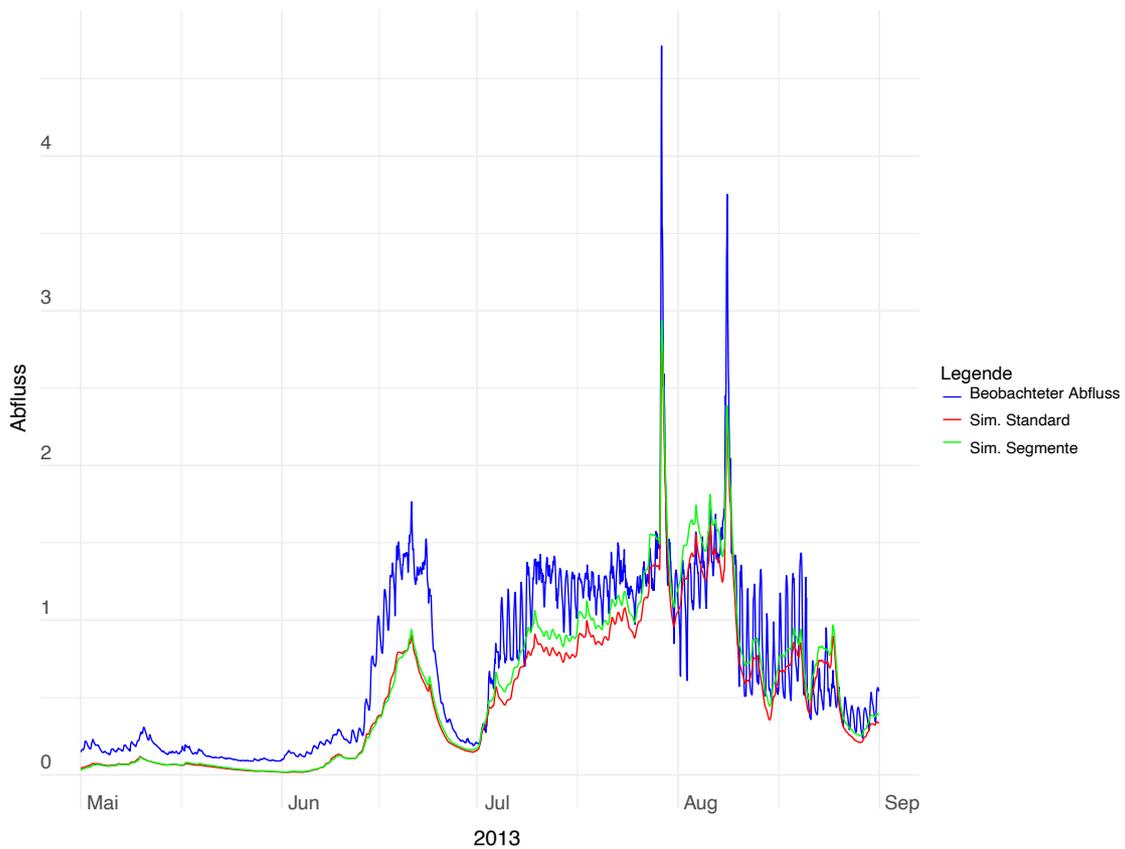
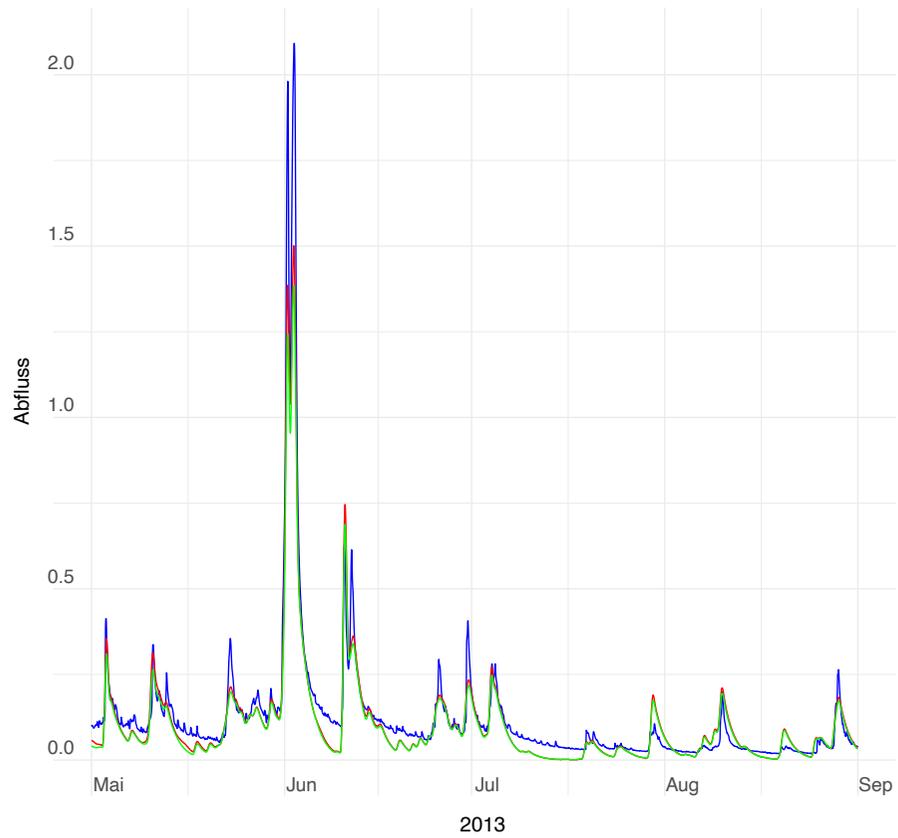


Abbildung 31: Abflussganglinie für das Untersuchungsgebiet Rhone\_6708.

Beim Einzugsgebiet der Thur konnte die Modellleistung der Untersuchungsgebiete Thur\_6935, Thur\_7236 und Thur\_7360 nicht verbessert werden. Der Kling-Gupta-Wert für das Untersuchungsgebiet Thur\_7411 wurde durch die differenzierten Niederschlagsgradienten jedoch minimal verbessert (vgl. Abbildung 28). Bei den Abflusssimulationen mit den höchsten Kling-Gupta-Werten wurde die Hochwasserspitze bei beiden Simulationdurchgängen unterschätzt. Beim Untersuchungsgebiet Thur\_6935 wurde die Hochwasserspitze bei den Simulationen überschätzt. Die simulierten Abflüsse unterscheiden sich teilweise kaum voneinander. Beim Einzugsgebiet Thur\_7236 wird der Niedrigwasserbereich durch die differenzierten Niederschlagsgradienten grundsätzlich überschätzt, wobei die Simulation mit den Standardeinstellungen mit den beobachteten Abflüssen besser übereinstimmt (vgl. Abbildung 32, Abbildung 33).

a)



b)

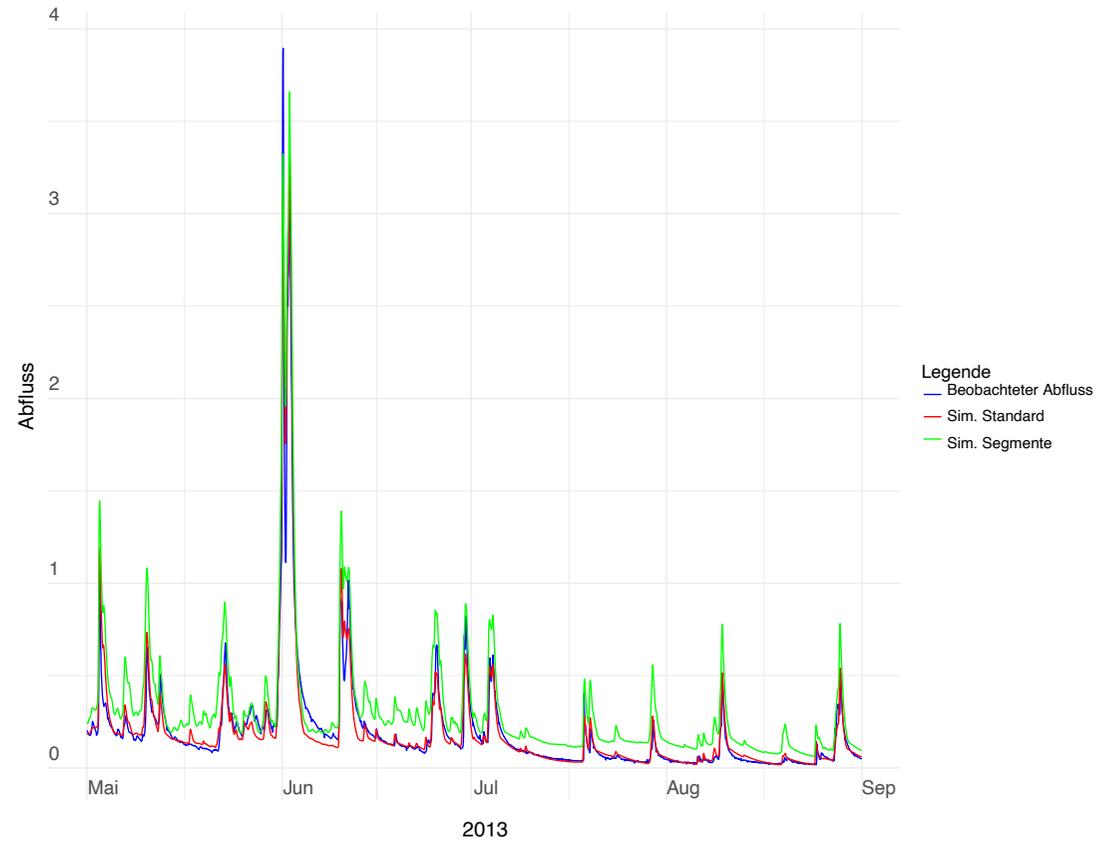
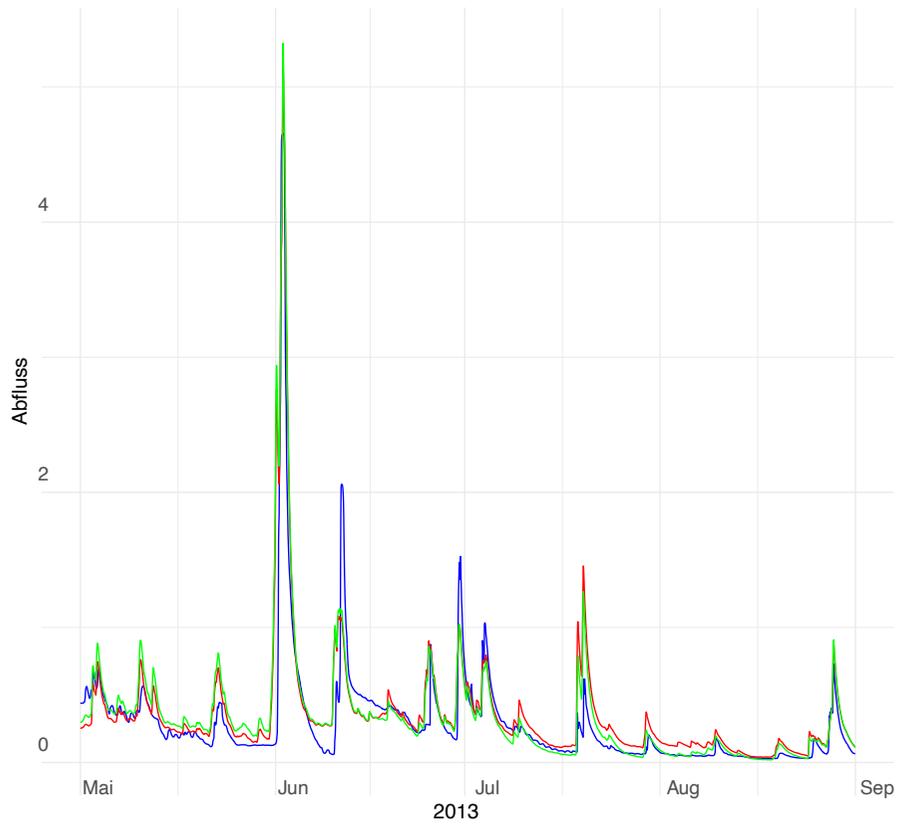


Abbildung 32: Abflussganglinie für die Untersuchungsgebiete a) Thur\_6935 und b) Thur\_7236.

a)



b)

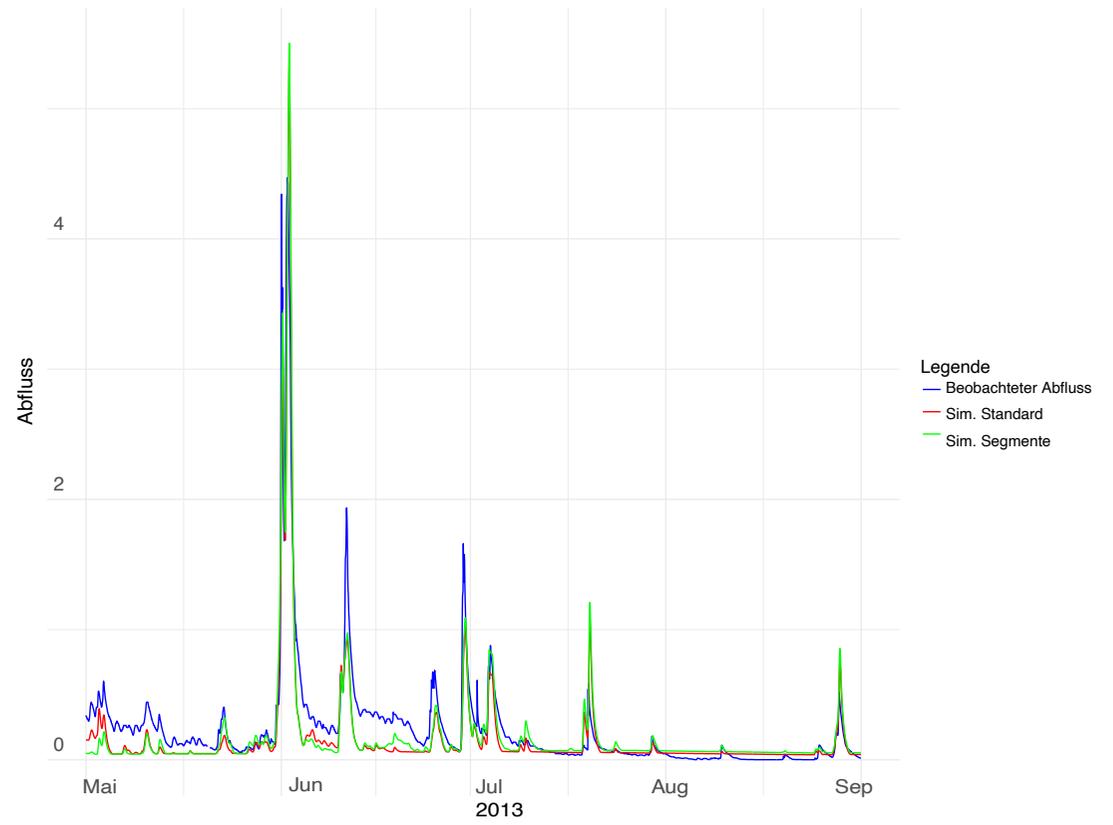


Abbildung 33: Abflussganglinie für die Untersuchungsgebiete a) Thur\_7360 und b) Thur\_7411.

Die höchsten KGE-Werte sowohl für die Simulation mit der Standardeinstellung als auch für die Simulation mit den differenzierten Niederschlagsgradienten zeigt das Untersuchungsgebiet der Lutschine. Der Verlauf der Simulationsganglinien stimmt gut mit den beobachteten Abflusswerten überein. Das Niederschlagsereignis im August 2007 wurde in der Simulation mit den differenzierten Niederschlagsgradienten genauer prognostiziert, aber doch noch unterschätzt.

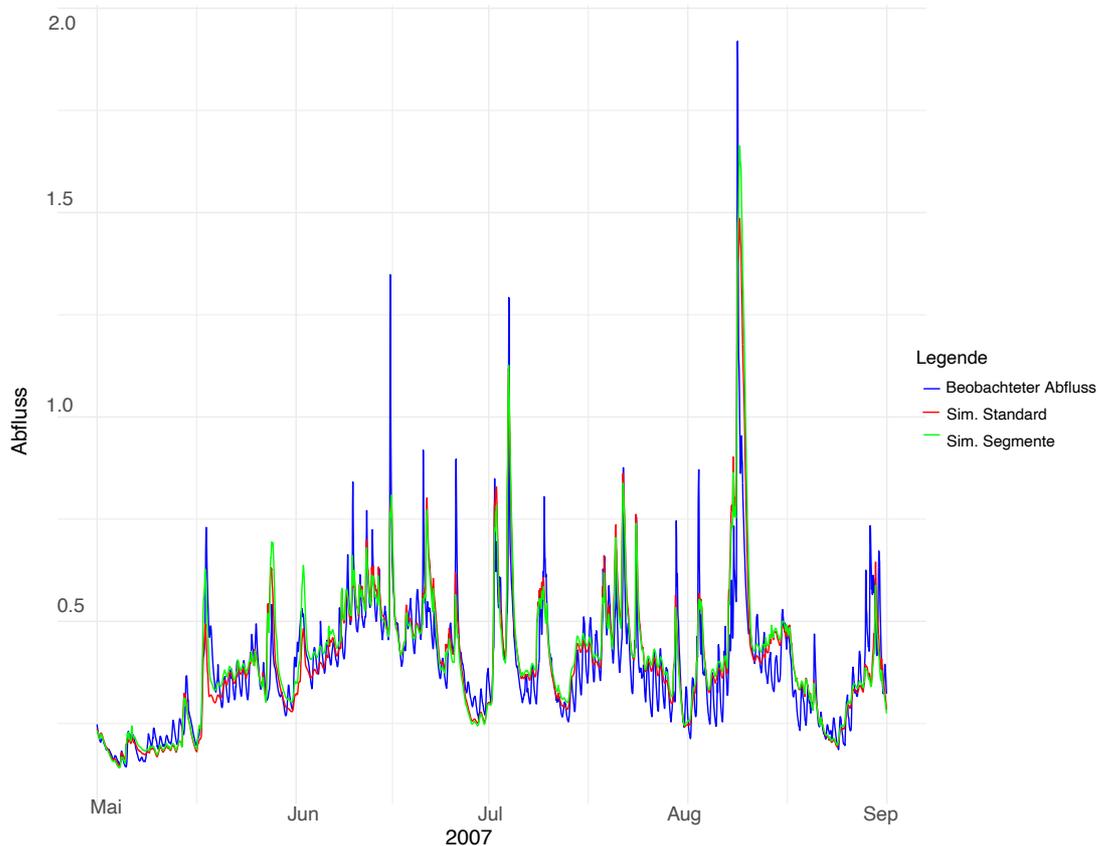


Abbildung 34: Abflussganglinien für das Gebiet Lutschine\_6331.

Beim Untersuchungsgebiet der Maggia wurde die Güte der Modelleistung gemessen am KGE um mehr als 0.1 gesteigert. Diese Veränderung des KGE zeigt sich jedoch nicht im Hochwasserbereich sondern wird optisch betrachtet auf den Niedrigwasserbereich fokussiert sein. Die Simulation mithilfe der differenzierten Niederschlagsgradienten konnte das Hochwasserereignis im Juli 2013 an der Maggia am wenigsten präzise simulieren.

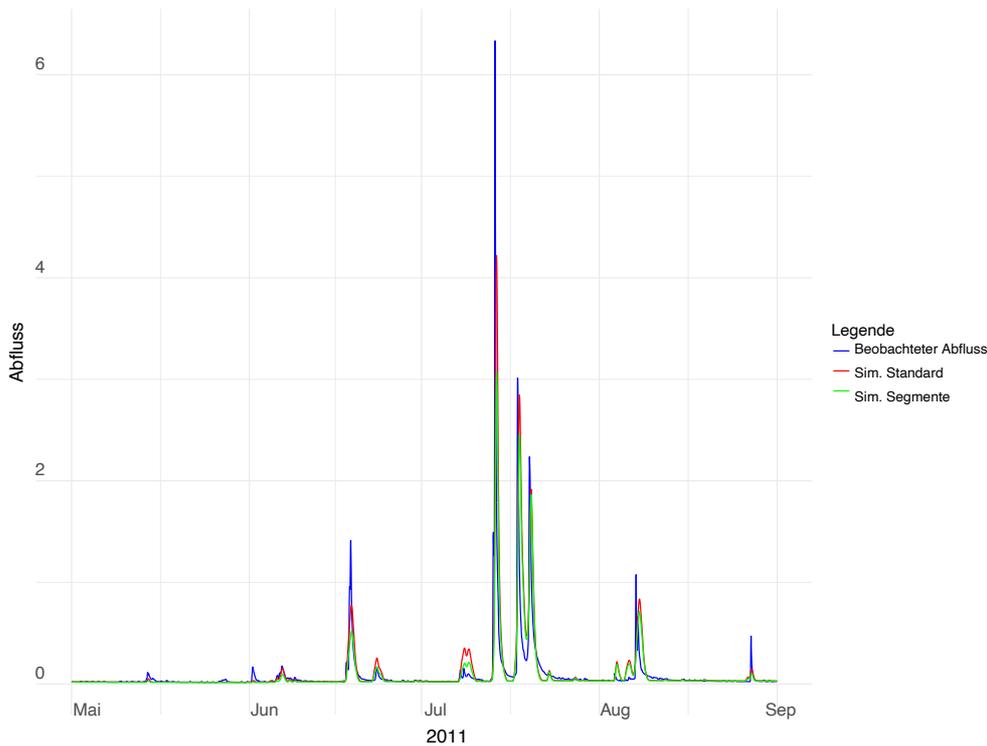


Abbildung 35: Abflussganglinien für das Gebiet Maggia\_7031.

Zusammenfassend zeigt sich, dass wie erwartet die Abflusssummen der Schwarzen und Weissen Lüttschine den Abfluss weit über- oder unterschätzt werden. Die Abflusssimulationen an der Lüttschine oder an der Saltina unterscheiden sich minimal von den beobachteten Abflusssummen. Tendenziell sind die Abflussdifferenzen bei den Modellläufen mit einem hohen KGE mit den segmentierten Niederschlagsgradienten geringer (vgl. Abbildung 36).

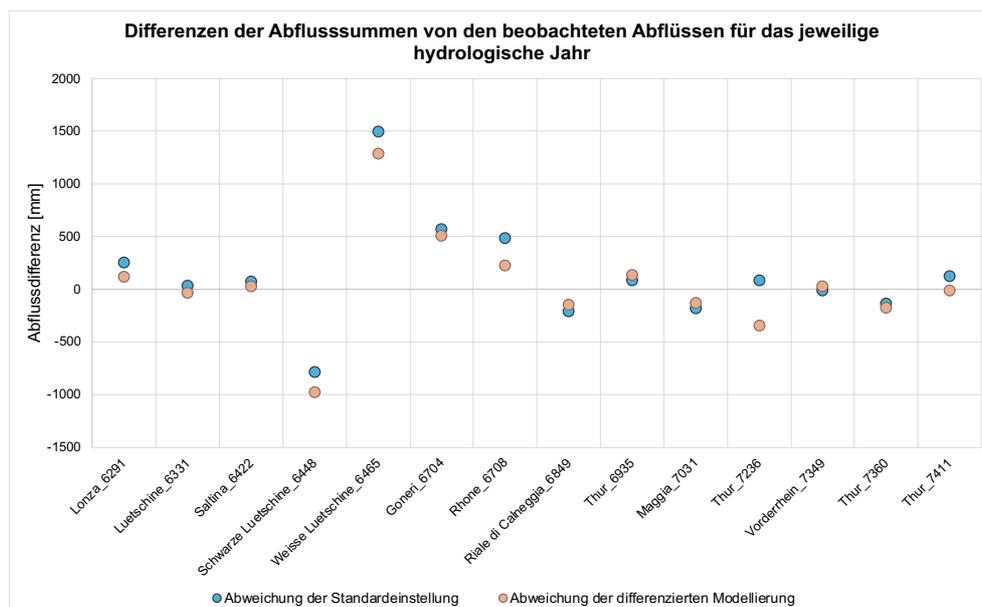


Abbildung 36: Differenzen der beobachteten und simulierten Abflusssummen für die jeweiligen Niederschlagsereignisse.

## 4 Diskussion

### 4.1 Abhängigkeit von Niederschlag und Höhe

#### 4.1.1 Beantwortung der Fragestellungen

Die durchgeführten Analysen und Modellierungen verdeutlichen, dass die Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe stark vom Untersuchungsgebiet abhängt. Einige Gebiete, wie Rhone\_6708 und Thur\_6935, zeigen eine deutliche lineare Beziehung zwischen Niederschlag und Höhe. Besonders bei den mittleren Monats- und Saisonniederschlagssummen konnten mithilfe der segmentierten Regression gering höhere  $R^2$ -Werte erreicht werden. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die räumliche Verteilung des Niederschlags durch die Höhenlage beschrieben werden kann und durch die Unterteilung in Segmente eine weitere Verbesserung besteht.

In anderen Untersuchungsgebieten, wie Lonza\_6291, liess sich jedoch keine klare lineare Abhängigkeit feststellen. Trotz dieser schwachen Korrelation konnten durch differenzierte Gradienten, und die Untersuchung spezifischer Ereignisse, Modellierungen mit ähnlichen KGE wie jene der Standardeinstellungen erreicht werden. Gebiete mit niedriger Bestimmtheitsgüte in der allgemeinen linearen Regression zeigten weiterhin schwache Ergebnisse, selbst bei Anwendung der segmentierten Niederschlagsgradienten. Ein Vergleich der verschiedenen Modellierungsansätze zeigt, dass mittlere Jahresniederschlagssummen weniger erfolgreich die Abhängigkeit vom Niederschlag erklären konnten, während detailliertere zeitliche Auflösungen, wie Gradienten für Monate und Jahreszeiten, bessere Ergebnisse lieferten. Gradienten für einzelne Niederschlagsereignisse können ebenfalls zu guten Resultaten führen, da keine Zusammenfassung der Niederschlagssummen über eine lange Zeitperiode geschieht und somit die lokale und momentane Aufnahme genauer widerspiegeln kann. Jedoch spielen auch hier weitere Faktoren mit, sodass die Abflussspitzen über- oder unterschätzt wurden.

Die untersuchten Gradienten der räumlichen Niederschlagsverteilung beeinflussen die Simulation der Abflussganglinien erheblich, insbesondere bei Hochwasserereignissen. Untersuchungsgebiete mit einer guten linearen Abhängigkeit zwischen Niederschlag und Höhe, wie Rhone\_6708, zeigten im hydrologischen Modell HBV erfolgreiche Modellleistungen. Dies deutet darauf hin, dass eine präzise Berücksichtigung der Niederschlagsverteilung nach Höhenlagen die Genauigkeit der Abflussvorhersagen bei Hochwasserereignissen steigern kann.

In Gebieten mit schwacher linearer Korrelation, wie Lonza\_6291, konnten trotz geringer Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe durch differenzierte Gradienten ebenfalls ähnliche KGE wie jene der Standardeinstellung erreicht werden. Hier zeigt sich, dass differenzierte Modellansätze auch bei unklarer Abhängigkeit von der Höhe nützliche Verbesserungen in der Simulation ermöglichen können.

Regional zusammengefasst zeigen sich sowohl bei der allgemeinen als auch bei der segmentierten linearen Regression Unterschiede. In den Südalpen sind bei allen Untersuchungsgebieten die  $R^2$ -Werte sehr tief. Somit ist die lineare Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe in dieser Region sehr gering. In den westlichen Zentralalpen hingegen weisen alle Untersuchungsgebiete tendenziell höhere  $R^2$ -Werte und somit eine grössere lineare Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe auf. Die Untersuchungsgebiete in den Nordalpen zeigen keine Tendenz. Einzelne Untersuchungsgebiete haben grössere lineare Abhängigkeiten des Niederschlags von der Höhe, bei anderen sind die  $R^2$ -Werte tief. Es fällt auf, dass im Einzugsgebiet der Lütshine mit den Teileinzugsgebieten der Schwarzen und Weissen Lütshine klare saisonale Unterschiede erkennbar sind. Während den Sommermonaten ist die lineare Abhängigkeit geringen als in den Herbst und Wintermonaten.

#### 4.1.2 Höhenprofile und Bruchpunkte

Die untersuchten Einzugsgebiete weisen unterschiedliche Topografien auf und unterscheiden sich teilweise in Grösse als auch Höhenverlauf. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die Bruchpunkte für eine segmentierte lineare Regression durch die Methode der bestmöglichen Unterteilung in einzelnen Untersuchungsgebieten oft an denselben oder ähnlichen Höhenpunkten gesetzt wurden, während bei anderen Einzugsgebieten die Bruchpunkte divers sind. Insgesamt ist keine allgemeine Tendenz eines Zusammenhangs zwischen den Höhenprofilen der einzelnen Untersuchungsgebieten und der gewählten Bruchpunkte durch die durchgeführten Untersuchungen erkennbar.

#### 4.1.3 Faktoren, die Niederschlagsverteilung beeinflussen

Die Diskrepanz zwischen den Erwartungen und den Ergebnissen der Analyse zur Niederschlagsverteilung lässt darauf schliessen, dass weitere klimatische und geografische Variablen einen wesentlichen Einfluss auf die Niederschlagsverteilung haben. Weitere zentrale Einflüsse müssen berücksichtigt werden, da einfache lineare Gradientenmodelle insbesondere in den Alpen unzureichend sind, um die komplexen hydrologischen Prozesse abzubilden (Douguédroit & de Saintignon, 1984). Dies wird besonders deutlich, wenn man Einzugsgebiete

wie die Schwarze und Weisse Lütshine betrachtet. Obwohl beide Einzugsgebiete in vergleichbaren Höhenlagen liegen, weichen ihre hydrologischen Eigenschaften stark voneinander ab. Dies deutet darauf hin, dass neben dem Niederschlag auch andere Elemente, wie die Art der Landbedeckung, die Beschaffenheit des Bodens oder die Zuflüsse aus Gletschern, eine erhebliche Rolle spielen (Douguédroit & de Saintignon, 1984). Der Grundabfluss respektive Niedrigwasserabfluss wird in diesen Regionen oft unter- oder überschätzt, was darauf hindeutet, dass Gletscherschmelze oder Schneeschmelze nicht präzise erfasst wurden. Modelle, die mehrere topografische Parameter einbeziehen, sind notwendig, um Niederschlagsprozesse in Bergregionen realistisch abzubilden (Douguédroit & de Saintignon, 1984).

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde deutlich, dass die geografische Lage einen Einfluss auf die Güte der Regression und auch der Abflussmodellierungen haben kann, jedoch nicht ausschlaggebend sein muss. Allgemein scheinen Wetterlagen für die unterschiedlichen Untersuchungsgebiete eine zentrale Rolle zu spielen, sodass regionale und zusätzlich die teilweise bestehenden saisonalen Unterschiede erkennbar sind (Dura et al., 2024). So bestätigen die Resultate der untersuchten Gebiete in den Südalpen, dass eine lineare Regression allein wenig ausschlaggebend und kaum eine Verbesserung der Modellierungen bringen kann. Dies kann auf die Nähe zu den mediterranen Tiefdruckgebieten zurückzuführen sein, welche zu intensiveren und schwieriger vorhersehbaren Niederschlagsverteilungen führen kann (Napoli et al., 2019). In den Untersuchungsgebieten der westlichen Zentralalpen konnten gute Regressionswerte und Abflussmodellierungen erzielt werden. In den Gebieten der Nordalpen und Voralpen sind die erhaltenen Regressionswerte und durchgeführten Modellierungen sehr unterschiedlich. Teils konnten gute respektive verbesserte Ergebnisse erzielt werden, teils führten die segmentierten Regressionen zu kaum brauchbaren Modellierungen. Dabei können besonders in den Voralpen orografische Barrieren und die Exposition eine starke Rolle spielen und die Niederschlagsverteilung beeinflussen (Napoli et al., 2019).

Allgemein zeigen die untersuchten geografischen Regionen unterschiedliche Ergebnisse und verdeutlichen somit, dass eine Berücksichtigung zusätzlicher klimatischer und geografischer Faktoren notwendig ist, um die räumliche Verteilung des Niederschlags und ihre Auswirkungen auf die hydrologische Modellierung präziser zu erfassen.

#### 4.1.4 Faktoren, die Modellgüte beeinflussen

Neben den Faktoren, die die räumliche Niederschlagsverteilung beeinflussen, hat sich gezeigt, dass auch weitere Faktoren, das heisst Modellparameter die Abflusssimulationen beeinflussen. Eine häufig auftretende Erscheinung in den durchgeführten Modellierungen ist die Über- oder

Unterschätzung des Grund- oder Niedrigwasserabflusses. Dies deutet darauf hin, dass zusätzliche Faktoren, wie beispielsweise die Schneeschmelze oder der Beitrag von Gletschern, oft falsch geschätzt werden. Insbesondere in den Südalpen und den Voralpen zeigen die Ergebnisse, dass die Schneeschmelze trotz verbesserter Modellansätze nicht immer korrekt abgebildet werden kann. Dies führt dazu, dass die Ergebnisse teilweise wenig erfolgreich sind, unabhängig von der Qualität der zugrunde liegenden Niederschlagsmodellierung (Seibert, 1997). Durch die Übernahme der Kalibrierung der Modellparameter der einzelnen Untersuchungsgebiete, welche mit den Niederschlagsdaten der mittleren Einzugsgebietshöhe und der Annahme von +10% Niederschlag/100m Höhenzunahme durchgeführt wurde, kann es Änderungen der gesamten Wasserbilanz für das Einzugsgebiet geben. So wird die Modellgüte nicht allein durch die Eingabedaten, sondern auch die kalibrierten Parameter – wie beispielsweise der Parameter des Schneeniederschlags – beeinflusst. Durch die fehlende Neukalibrierung des Modells kann somit nicht von einer Verbesserung der Simulation gesprochen werden, sondern viel mehr von einer Änderung der Modellgüte. Allgemein hat sich gezeigt, dass die eingegebenen Niederschlagsdaten einen Einfluss auf die Modellierungen haben, aber weitere Modellparameter die Modellgüte beeinflussen und für eine abschliessende Beurteilung der Qualität der Abflusssimulationen die Kalibrierung mit den angewendeten Niederschlagsdaten durchgeführt werden müsste (Seibert, 1997).

## 4.2 Bedeutung der Niederschlagsgradienten

Durch Untersuchungen im Bereich der Meteorologie und Hydrologie hat sich bereits gezeigt, dass der Niederschlag und dessen Verteilung einen Einfluss auf hydrologische Modellierungen haben können. Dabei können Annahmen einer linearen Abhängigkeit für eine detaillierte Modellierung unzureichend sein. Die vorliegenden Resultate validieren dabei unter anderem die bereits bestehenden Untersuchungen von Douguédroit und de Saintignon (1984), die zum Schluss kommen, dass lineare Abhängigkeiten vom Niederschlag und der Höhe in alpinen Regionen unzureichend sind. Weiter hat sich durch die erhaltenen Resultate gezeigt, dass die räumliche Niederschlagsverteilung nicht allein durch die Höhe erklärt und rekonstruiert werden kann. Weitere Faktoren können einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Verteilung haben, so zum Beispiel die Windgeschwindigkeiten und -richtungen (Johansson & Chen, 2003).

Dass Niederschlag für viele hydrologische Modelle einen zentralen Eingabeparameter ist, hat sich durch die vorliegende Arbeit bestätigt. Durch Anpassungen der Gradienten respektive der Niederschlagseingabedaten wurde die Qualität und die Güte der Simulationen verändert. Somit reagiert das genutzte hydrologische Modell sensibel auf die Veränderungen der

Niederschlagseingabedaten. Durch weitere Verbesserungen der Niederschlagseingabedaten, respektive angepasster Niederschlagsgradienten und einer Neukalibrierung des Untersuchungsgebiete kann im besten Fall eine Verbesserung der Abflusssimulationen erzielt werden (Ruelland, 2020).

Insgesamt untermauert diese Arbeit die bereits bestehenden Forschungsergebnisse, bietet jedoch durch die Anwendung der Rasterdaten mit einer höheren räumlichen Auflösung die Möglichkeit, genauere und differenziertere Aussagen über die räumliche Verteilung des Niederschlags zu treffen (Ruelland, 2020). Dabei wird deutlich, dass Unsicherheiten in den Daten und Modellen sorgfältig berücksichtigt werden müssen, um die Aussagekraft und Verlässlichkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Arbeit zeigt damit nicht nur bestehende Herausforderungen auf, sondern liefert auch wertvolle Ansätze zur Verbesserung der hydrologischen Modellierung. So kann die Unsicherheit der zeitlichen Skalierung thematisiert und weiter untersucht werden (Bloschl & Sivapalan, 1995).

### 4.3 Unsicherheiten und Grenzen

#### 4.3.1 Datengenauigkeit in höheren Lagen

Ein bedeutender Unsicherheitsfaktor ergibt sich aus der Verfügbarkeit von akkuraten und validierten Niederschlagsdaten in Gebirgslagen. Die Dichte des Niederschlagsmessnetzes ist gering, was die Erfassung der Niederschlagsmengen und deren räumlichen Verteilung erschwert. Somit sind in der vorliegenden Arbeit besonders die Gradienten der höheren Gebirgslagen unsicher. Niederschlag wird in höheren Lagen häufig nicht vollständig registriert, was zu ungenauer Niederschlagsschätzung führen kann und somit die Genauigkeit der Niederschlagsgradienten beeinflusst (Frei et al., 1998). Als Ergänzung zu den Bodenmessstationen bieten Radardaten eine Möglichkeit, den Niederschlag grossflächig zu erfassen. Diese sind in Gebirgsregionen jedoch häufig durch Abschattung oder Signalverzerrungen beeinträchtigt (Germann et al., 2022; Villarini & Krajewski, 2010). Durch die gegebenen Beeinträchtigungen in höheren Gebirgslagen wird die genaue Modellierung unterschiedlicher Niederschlagseffekten, wie beispielsweise der orografische Effekt, erschwert und führte deshalb zu Unsicherheiten in der vorliegenden Arbeit. In Gebirgen kommt es auf kleinstem Raum zu unterschiedlichen Niederschlagsmustern, die beispielsweise durch die Topografie beeinflusst sein können (Frei & Schmidli, 2006; Wastl, 2008).

### 4.3.2 Räumliche Auflösung

In der vorliegenden Arbeit wurde sowohl bei den Niederschlagsdaten als auch beim Geländemodell mit einer räumlichen Auflösung von  $1 \text{ km}^2$  gearbeitet. Durch die räumliche Auflösung von  $1 \text{ km}^2$  können lokale Unterschiede nicht ausreichend erfasst werden. Durch diese räumliche Auflösung werden Niederschlagsmuster von hohen Gebirgslagen fälschlich interpretiert oder zusammengefasst, sodass lokale Unterschiede nicht dargestellt werden konnten (Fauresa et al., 1995). Besonders in kleinen Einzugsgebieten beeinträchtigte die räumliche Auflösung die Ergebnisse. Das Erkennen von Mustern oder Abhängigkeiten des Niederschlags von der Höhe wurde erschwert und für eine segmentierte lineare Regression konnten zu wenige Datenpunkte identifiziert werden. Wenn mindestens 15 Datenpunkte pro Segment bei einer räumlichen Auflösung von  $1 \text{ km}^2$  berücksichtigt werden sollen, müsste jedes untersuchte Gebiet mindestens eine Gebietsfläche von  $30 \text{ km}^2$  – bei welcher die Höhenverteilung gleichmässig ist – haben.

### 4.3.3 Generalisierbarkeit der Ergebnisse

Durch die vorliegenden Resultate ist erkennbar, dass in den Schweizer Alpen und Voralpen die Niederschlagsverteilung stark variiert und somit die Generalisierbarkeit eine grosse Herausforderung darstellt. Die klimatischen und topografischen Bedingungen der Alpen sind sehr unterschiedlich, weshalb generalisierbare Aussagen zur Beziehung von Niederschlag und Höhe oder der räumlichen und auch zeitlichen Niederschlagsverteilung schwierig zu treffen sind (Frei & Schär, 1998; Ruelland, 2020). So haben sich bereits bei den untersuchten Gebieten grosse Unterschiede gezeigt, welche kaum übertragbar und vergleichbar mit anderen Gebieten sind. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind durch die grosse Variabilität nur auf die untersuchten Gebiete anwendbar. Somit können keine allgemeingültigen Aussagen zur räumlichen Niederschlagsverteilung in den Alpen gemacht werden.

## 4.4 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die räumliche Niederschlagsverteilung in den Schweizer Alpen und Voralpen einen grossen Einfluss auf hydrologische Modellierungen haben kann. Die durchgeführten Untersuchungen bieten Ansätze für weitere Forschung, um die räumliche Niederschlagsverteilung und deren Einfluss auf hydrologische Modellierungen weiter zu untersuchen und verbessern.

Eine naheliegende Möglichkeit, um weiter die Güte der Modelleleistungen beurteilen zu können, besteht in der Neukalibration der Eingabeparameter für die Untersuchungsgebiete mit den differenzierten Niederschlagsdaten. Mit dieser zusätzlichen Forschung kann untersucht werden, welche Auswirkung die Niederschlagseingabe auf die Kalibration hat und ob durch eine Neukalibration die Modellgüte beeinflusst und möglicherweise verbessert werden kann.

Ein weiteres Forschungsthema, das weiterverfolgt werden kann, ist die weitere Untersuchung der Niederschlags-Höhen-Beziehung. In der vorliegenden Arbeit wurde ausschliesslich eine lineare Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe untersucht. Eine Möglichkeit für weitere Untersuchungen ist zu analysieren, ob der Zusammenhang durch andere Funktionen – wie beispielsweise eine exponentielle Niederschlagszunahme oder ein Kriging mit externer Drift (KED) – besser beschrieben werden kann (Masson & Frei, 2014).

In der vorliegenden Arbeit wurden mittlere Jahresniederschlagssummen, mittlere Monatsniederschlagssummen und mittlere saisonale Niederschlagssummen analysiert. In weiteren Untersuchungen könnten weitere zeitliche Unterschiede analysiert werden. So könnten beispielsweise Untersuchungen zu nassen und trockenen Jahren weitere Erkenntnisse über die Abhängigkeit von Niederschlag und Höhe liefern. Es besteht die Möglichkeit, dass extreme Witterungsbedingungen, wie beispielsweise Jahre mit langen Trockenperioden oder Jahre mit besonders hohem Niederschlag, den Einfluss der Höhe auf den Niederschlag verstärken oder abschwächen. Eine detaillierte Analyse von Niederschlagsmustern in extremen Jahren könnte Aufschluss darüber geben, ob erkennbare Unterschiede in der Verteilung zu beobachten sind und somit die Niederschlags-Höhen-Abhängigkeit beeinflussen.

## 5 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde die Wichtigkeit der räumlichen Niederschlagsverteilung in den Schweizer Voralpen und Alpen untersucht. Es hat sich bestätigt, dass die Niederschlagssummen auf kleinem Raum sehr unterschiedlich sind und schwer zusammengefasst werden können. Durch eine lineare Regression sollte die Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhe in unterschiedlichen Untersuchungsgebiete untersucht werden, wobei in einigen Gebieten eine gute lineare Abhängigkeit und in anderen keine lineare Abhängigkeit bestimmt werden konnte. Durch die Segmente konnte die Regression der einzelnen Untersuchungsgebiete allgemein minim verbessert werden. Regional lassen sich Unterschiede feststellen, so zeigen die westlichen Zentralalpen eine grössere lineare Abhängigkeit des Niederschlags von der topografischen Höhe als beispielsweise die Südalpen. Es wird jedoch klar, dass weitere Faktoren einen grossen Einfluss auf die Niederschlagsverteilung haben. Zukünftige Untersuchungen könnten sich dabei mit Faktoren wie Windrichtung, Geländeneigung oder Wetterlagen beschäftigen, um die Einflüsse auf die Niederschlagsverteilung weiter eingrenzen zu können.

Weiter hat sich gezeigt, dass Niederschlag als Einflussgrösse im verwendeten hydrologischen Modell HBV die Abflusssimulationen massgeblich beeinflussen. Durch angepasste Gradienten der Höhenverteilung des Niederschlags ist die Güte einzelner Simulationsdurchläufe bei einzelnen Untersuchungsgebiete gestiegen. Dabei erwiesen sich Gradienten der Jahresniederschlagssummen als wenig sinnvoll. Gradienten basierend auf den saisonalen und monatlichen Niederschlagssummen und jene der Ereignisse konnten in einzelnen Untersuchungsgebieten verbesserte Simulationsdurchläufe erzielen und gewissermassen einen positiven Beitrag zu realitätsnäheren Modellierungen leisten. Um die Güte der Simulationen abschliessend beurteilen zu können, müssten die Modelle jedoch neukalibriert werden.

Die vorliegenden Resultate legen den Schluss nahe, dass die Wichtigkeit von weiteren Faktoren jedoch zentral ist. Die Niederschlagsverteilung in einem Untersuchungsgebiet ist nicht allein von der Höhe abhängig. Weitere Faktoren wie Windrichtungen, -geschwindigkeiten oder Wetterlagen können einen Einfluss haben und sollen bezüglich Einflusses auf die Niederschlagsverteilung untersucht werden.

Die vorliegende Arbeit hat einen wertvollen Beitrag zu hydrologischen Untersuchungen in der Schweiz beigetragen. Es hat sich gezeigt, dass die Niederschlagsverteilung regional sehr unterschiedlich ist und einen grossen Einfluss auf die Modellierungen im HBV haben und somit deren Verteilung weiter untersucht werden kann.

## Anhang

Anhang A:  $R^2$ -Werte der allgemeinen linearen Regression

Einzugsgebiet	Jahr	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nordalpen																	
Thur_6935	0.66	0.59	0.6	0.64	0.78	0.63	0.64	0.33	0.56	0.58	0.6	0.58	0.59	0.57	0.58	0.62	0.53
Thur_7236	0.55	0.53	0.52	0.54	0.52	0.51	0.52	0.31	0.4	0.49	0.53	0.54	0.46	0.55	0.52	0.54	0.43
Thur_7360	0.05	0.16	0.1	0.06	0.1	0.08	0.12	0.14	0.07	0.16	0.12	0.2	0.12	0.08	0.1	0.06	0.1
Thur_7411	0.12	0.28	0.21	0.13	0.2	0.14	0.2	0.26	0.17	0.31	0.24	0.29	0.25	0.18	0.18	0.14	0.2
Schwarze Luetschine_6448	0.48	0.09	0.37	0.51	0.22	0.39	0.4	0.29	0.3	0.08	0.15	0.04	0.02	0.44	0.45	0.56	0.34
Luetschine_6331	0.42	0.01	0.34	0.43	0.3	0.39	0.38	0.27	0.28	0.01	0.01	0.01	0.17	0.38	0.38	0.46	0.33
Weisse Luetschine_6465	0.38	0.01	0.34	0.43	0.18	0.33	0.3	0.23	0.23	0.01	0.03	0.01	0.05	0.43	0.43	0.51	0.26
Südalpen																	
Maggia_6900	0.3	0.13	0.08	0.31	0.18	0.3	0.27	0.13	0.09	0.06	0.26	0.15	0.1	0.06	0.09	0.32	0.16
Maggia_6964	0.34	0.12	0.04	0.35	0.15	0.31	0.3	0.08	0.06	0.06	0.26	0.06	0.04	0.03	0.05	0.36	0.14
Maggia_7031	0.4	0.03	0.01	0.37	0.04	0.29	0.26	0.01	0.01	0.04	0.13	0.01	0.04	0.01	0.01	0.35	0.07
Riale di Calneggia_6849	0.55	0.22	0.11	0.45	0.28	0.38	0.46	0.25	0.21	0.16	0.27	0.23	0.12	0.01	0.21	0.41	0.31
Westliche Zentralalpen																	
Rhone_6708	0.53	0.74	0.71	0.57	0.68	0.47	0.57	0.67	0.69	0.68	0.64	0.75	0.74	0.73	0.64	0.66	0.65
Goneri_6704	0.37	0.48	0.47	0.39	0.46	0.38	0.42	0.48	0.46	0.48	0.49	0.46	0.45	0.47	0.47	0.41	0.46
Lonza_6291	0.31	0.54	0.35	0.35	0.41	0.36	0.39	0.38	0.39	0.49	0.62	0.48	0.38	0.38	0.31	0.38	0.39
Saltina_6422	0.35	0.4	0.48	0.32	0.43	0.33	0.42	0.43	0.45	0.39	0.37	0.42	0.46	0.46	0.48	0.29	0.44
Östliche Zentralalpen, Engadin																	
Rein da Sumvitg_7188	0.21	0.29	0.31	0.25	0.29	0.3	0.29	0.3	0.4	0.38	0.25	0.23	0.29	0.29	0.34	0.24	0.28
Rosegbach_7888	0.4	0.38	0.41	0.38	0.39	0.38	0.34	0.38	0.36	0.39	0.38	0.37	0.39	0.41	0.43	0.37	0.37
Vorderrhein_7349	0.14	0.36	0.3	0.18	0.45	0.22	0.25	0.33	0.31	0.27	0.34	0.37	0.3	0.26	0.31	0.2	0.32

Anhang B: R<sup>2</sup>-Werte der segmentierten linearen Regression

Einzugsgebiet	Jahr	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nordalpen																	
Thur_6935	0.8	0.55	0.62	0.62	0.66	0.69	0.65	0.65	0.34	0.59	0.62	0.63	0.61	0.64	0.59	0.59	0.64
Thur_7236	0.57	0.49	0.59	0.58	0.59	0.6	0.56	0.56	0.36	0.47	0.55	0.59	0.58	0.53	0.6	0.57	0.59
Thur_7360	0.15	0.13	0.2	0.14	0.11	0.1	0.11	0.17	0.17	0.11	0.21	0.16	0.22	0.16	0.12	0.13	0.11
Thur_7411	0.24	0.25	0.31	0.24	0.18	0.17	0.18	0.26	0.29	0.22	0.37	0.28	0.31	0.28	0.23	0.23	0.17
Schwarze Luetschine_6448																	
Luetschine_6331	0.36	0.39	0.01	0.41	0.51	0.5	0.45	0.44	0.34	0.35	0.01	0.03	0.02	0.22	0.46	0.45	0.53
Weisse Luetschine_6465	0.25	0.32	0.13	0.41	0.5	0.51	0.38	0.34	0.33	0.29	0.12	0.07	0.18	0.14	0.47	0.5	0.54
Südalpen																	
Maggia_6900	0.2	0.17	0.15	0.1	0.33	0.31	0.32	0.29	0.15	0.11	0.07	0.28	0.15	0.12	0.09	0.11	0.34
Maggia_6964	0.18	0.17	0.13	0.06	0.38	0.36	0.35	0.33	0.11	0.09	0.08	0.28	0.08	0.05	0.05	0.08	0.4
Maggia_7031	0.11	0.12	0.05	0.05	0.43	0.44	0.36	0.34	0.06	0.04	0.05	0.16	0.05	0.08	0.06	0.05	0.43
Riale di Calneggia_6849	0.54	0.32	0.26	0.15	0.47	0.57	0.39	0.47	0.27	0.21	0.21	0.35	0.25	0.19	0.07	0.23	0.43
Westliche Zentralalpen																	
Rhone_6708	0.7	0.69	0.77	0.72	0.61	0.55	0.51	0.61	0.7	0.74	0.73	0.67	0.77	0.77	0.73	0.65	0.71
Goneri_6704	0.5	0.51	0.55	0.53	0.42	0.39	0.41	0.45	0.54	0.53	0.56	0.55	0.54	0.51	0.55	0.51	0.44
Lonza_6291	0.44	0.41	0.57	0.38	0.38	0.34	0.39	0.4	0.41	0.42	0.52	0.65	0.5	0.42	0.41	0.33	0.4
Saltina_6422	0.47	0.47	0.46	0.51	0.35	0.36	0.36	0.47	0.46	0.47	0.44	0.41	0.57	0.55	0.5	0.5	0.31
Östliche Zentralalpen, Engadin																	
Rein da Sumvitg_7188	0.32	0.31	0.34	0.33	0.27	0.24	0.31	0.33	0.32	0.41	0.38	0.31	0.33	0.32	0.32	0.35	0.28
Rosegbach_7888	0.41	0.39	0.4	0.43	0.4	0.41	0.4	0.38	0.41	0.38	0.41	0.4	0.39	0.41	0.42	0.44	0.39
Vorderrhein_7349	0.46	0.33	0.37	0.31	0.2	0.16	0.25	0.28	0.34	0.32	0.28	0.35	0.38	0.31	0.27	0.31	0.22

## Anhang C: Kling-Gupta-Werte der Simulationen

Einzugsgebiet	KGE Standardeinstellungen	KGE Jahresniederschlagsgradienten	KGE Monatsniederschlagsgradienten	KGE Saisonniederschlagsgradienten	Differenz Jahr	Differenz Monat	Differenz Saison
Goneri_6704	0.9068	-0.1189	0.905	0.8833	1.0257	0.0018	0.0235
Lonza_6291	0.8921	0.8608	0.889	0.8951	0.0313	0.0031	-0.003
Luetschine_6331	0.9388	0.6438	0.9019	0.9399	0.295	0.0369	-0.0011
Maggia_7031	0.816	-1.5546	0.663	0.2676	2.3706	0.153	0.5484
Rhone_6708	0.8968	0.7455	0.8938	0.8873	0.1513	0.003	0.0095
Riale di Calneggia_6849	0.7994	0.7882	0.7929	0.7778	0.0112	0.0065	0.0216
Saltina_6422	0.7362	-0.1883	0.7435	0.6044	0.9245	-0.0073	0.1318
Schwarze Luetschine_6448	0.6119	0.4297	0.5018	0.4735	0.1822	0.1101	0.1384
Thur_6935	0.9104	0.6043	0.7131	0.6695	0.3061	0.1973	0.2409
Thur_7236	0.9254	0.5538	0.7315	0.8785	0.3716	0.1939	0.0469
Thur_7360	0.8901	0.7686	0.8878	0.8503	0.1215	0.0023	0.0398
Thur_7411	0.8427	0.1133	0.7476	0.6863	0.7294	0.0951	0.1564
Vorderrhein_7349	0.8252	0.2101	0.8138	0.834	0.6151	0.0114	-0.0088
Weisse Luetschine_6465	0.7462	0.6616	0.7608	0.752	0.0846	-0.0146	-0.0058

## Anhang D: Abflusssummen der Simulationen

Einzugsgebiet	Qobs	Qsim_default	Qsim_year	Qsim_month	Qsim_season	Abflusssumme Standardeinstellung	Abflusssumme Jahresgradienten	Abflusssumme Monatsgradienten	Abflusssumme saisonaler Gradient
Lonza_6291	1833.331	1691.713	1631.896	1788.546	1766.946	141.618	201.435	44.785	66.385
Luetschine_6331	1594.263	1532.568	1863.697	1704.134	1583.42	61.695	-269.434	-109.871	10.843
Saltina_6422	960.058	945.336	1579.737	969.833	1057.404	14.722	-619.679	-9.775	-97.346
Schwarze Luetschine_6448	2339.705	2668.423	2977.925	2923.032	2970.002	-328.718	-638.22	-583.327	-630.297
Weisse Luetschine_6465	1649.856	1541.687	1969.575	1678.423	1757.346	108.169	-319.719	-28.567	-107.49
Goneri_6704	1994.445	1909.238	3493.005	2031.875	2033.56	85.207	-1498.56	-37.43	-39.115
Rhone_6708	2344.038	2192.111	1866.537	2344.361	2163.786	151.927	477.501	-0.323	180.252
Riale di Calneggia_6849	1989.463	1976.522	1904.481	1947.557	1877.65	12.941	84.982	41.906	111.813
Thur_6935	812.227	785.943	1095.807	1003.82	1045.46	26.284	-283.58	-191.593	-233.233
Maggia_7031	749.462	789.905	2510.858	909.581	1187.746	-40.443	-1761.396	-160.119	-438.284
Thur_7236	1228.941	1190.803	1637.453	1469.773	1115.805	38.138	-408.512	-240.832	113.136
Vorderrhein_7349	1349.017	1298.272	1995.45	1342.029	1398.583	50.745	-646.433	6.988	-49.566
Thur_7360	1456.158	1399.189	1638.849	1451.785	1553.183	56.969	-182.691	4.373	-97.025
Thur_7411	818.825	832.692	1467.113	965.482	1024.475	-13.867	-648.288	-146.657	-205.65
Rosegbach_7888	1381.764	597.401	482.042	597.605	547.524	784.363	899.722	784.159	834.24

## Anhang E: Kling-Gupta-Werte und Abflusssummen der Ereignisse

EZG	Kling_Gupta_Default	Kling_Gupta_ereignis	Qobs	Qsim_default	Qsim_ereignis	AbweichungStandardeinstellung	Abweichung differenzierten Modellierung
Goneri_6704	0.6182	0.6417	2497.868	1925.306	1990.812	572.562	507.056
Lonza_6291	0.8353	0.8671	2041.899	1787.204	1922.896	254.695	119.003
Luetschine_6331	0.9113	0.8981	1627.63	1596.011	1661.267	31.619	-33.637
Maggia_7031	0.5162	0.6265	556.073	735.805	685.252	-179.732	-129.179
Rhone_6708	0.726	0.8447	2546.787	2062.465	2318.632	484.322	228.155
Riale di Calneggia_6849	0.5578	0.5391	1586.681	1795.993	1735.077	-209.312	-148.396
Saltina_6422	0.7243	0.6433	1134.947	1058.918	1105.368	76.029	29.579
Schwarze Luetschine_6448	0.3413	0.1295	1808.505	2591.541	2785.318	-783.036	-976.813
Thur_6935	0.8782	0.8246	1122.829	1039.297	986.637	83.532	136.192
Thur_7236	0.9118	0.6971	1603.739	1518.25	1947.857	85.489	-344.118
Thur_7360	0.8518	0.8271	1686.271	1821.939	1860.811	-135.668	-174.54
Thur_7411	0.8659	0.8785	1255.993	1128.954	1266.207	127.039	-10.214
Vorderrhein_7349	0.6885	0.6382	1062.839	1071.161	1034.12	-8.322	28.719
Weisse Luetschine_6465	0.2884	0.357	3004.864	1510.612	1718.38	1494.252	1286.484

## Literaturverzeichnis

- Bergström, S. (1992). *The HBV model: its structure and applications*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute.
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: the primer* (2. Aufl.). Wiley-Blackwell.
- Bezzola, G. R., & Ruf, W. (2007). *Ereignisanalyse Hochwasser August 2007*. [www.umwelt-schweiz.ch/uw-0927-d](http://www.umwelt-schweiz.ch/uw-0927-d)
- Bloschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review. In *Hydrological Processes* (Bd. 9).
- Bronstert, A., & Plate, E. J. (1997). Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. In *Journal of Hydrology* (Bd. 198).
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (o. J.). *Abfluss und Wasserstand, Hydrodaten*. Bundesamt für Umwelt, Hydrologische Daten und Vorhersagen. Abgerufen 30. August 2024, von <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/seen-und-fluesse/messstationen-zustand>.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Commission's Joint Research Centre. (2008). *Catchment Characterisation and Modelling (CCM)* (2.1). Commission's Joint Research Centre.
- Douguédroit, A., & de Saintignon, M.-F. (1984). Les gradients de températures et de précipitations en montagne. *Revue de géographie alpine*, 72(2), 225–240. <https://doi.org/10.3406/rga.1984.2566>
- Dura, V., Evin, G., Favre, A. C., & Penot, D. (2024). Spatial variability in the seasonal precipitation lapse rates in complex topographical regions - application in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(12), 2579–2601. <https://doi.org/10.5194/hess-28-2579-2024>

- European Environment Agency. (2018). *CORINE Land Cover 2018 (vector), Europe, 6-yearly - version 2020\_20u1, May 2020* (20.01). European Environment Agency.
- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A., & Funk, M. (2012). Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, 26(13), 1909–1924. <https://doi.org/10.1002/hyp.8276>
- Fauresa, J.-M., Goodrichat, D. C., Woolhisera, D. A., & Sorooshianb, S. (1995). Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. In *ELSEVIER Journal of Hydrology* (Bd. 173).
- Frei, C., & Schär, C. (1998). A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18(8), 873–900. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19980630\)18:8<873::AID-JOC255>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19980630)18:8<873::AID-JOC255>3.0.CO;2-9)
- Frei, C., & Schmidli, J. (2006). Das Niederschlagsklima der Alpen: wo sich extreme nahe kommen. *promet*, 32(1–2), 61–67.
- Gabella, M., Speirs, P., Hamann, U., Germann, U., & Berne, A. (2017). Measurement of precipitation in the alps using dual-polarization C-Band ground-based radars, the GPMspaceborne Ku-Band Radar, and rain gauges. *Remote Sensing*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/rs9111147>
- Germann, U., Boscacci, M., Clementi, L., Gabella, M., Hering, A., Sartori, M., Sideris, I. V., & Calpini, B. (2022). Weather Radar in Complex Orography. *Remote Sensing*, 14(3), 503. <https://doi.org/10.3390/rs14030503>
- Guse, B., Pilz, T., Stoelzle, M., & Bormann, H. (2019). Charakterisierung und Analyse hydrologischer Modelle im deutschsprachigen Raum. *Wasser und Abfall*, 5. [www.wasserundabfall.de](http://www.wasserundabfall.de)
- Hamon, W. R. (1963). Estimating Potential Evapotranspiration. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 128(1), 324–338. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0008673>
- Hijmans, R. J., Van Etten, J., Cheng, J., Mattiuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J. A., & ... (2015). Package «raster». *R package*, 734(473).

- Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H. K., & Pierrefeu, G. (2018). Impact of Stage Measurement Errors on Streamflow Uncertainty. *Water Resources Research*, *54*(3), 1952–1976. <https://doi.org/10.1002/2017WR022039>
- Isotta, F. A., Frei, C., Weilguni, V., Perčec Tadić, M., Lassègues, P., Rudolf, B., Pavan, V., Cacciamani, C., Antolini, G., Ratto, S. M., Munari, M., Micheletti, S., Bonati, V., Lussana, C., Ronchi, C., Panettieri, E., Marigo, G., & Vertačnik, G. (2013). The climate of daily precipitation in the Alps: Development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *International Journal of Climatology*, *34*(5), 1657–1675. <https://doi.org/10.1002/joc.3794>
- Johansson, B., & Chen, D. (2003). The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: statistical analysis and modelling. *International Journal of Climatology*, *23*(12), 1523–1535. <https://doi.org/10.1002/joc.951>
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, *424–425*, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-2019-327>
- Landeshydrologie und -geologie. (1998). *Handbuch der Pegelmessung*. Bern.
- Larson, L. W., & Peck, E. L. (1974). Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. *Water Resources Research*, *10*(4), 857–863. <https://doi.org/10.1029/WR010i004p00857>
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, *201*(1–4), 272–288. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00041-3)
- Loritz, R., Hrachowitz, M., Neuper, M., & Zehe, E. (2021). The role and value of distributed precipitation data in hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(1), 147–167. <https://doi.org/10.5194/hess-25-147-2021>

- Masson, D., & Frei, C. (2014). Spatial analysis of precipitation in a high-mountain region: exploring methods with multi-scale topographic predictors and circulation types. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11), 4543–4563. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4543-2014>
- MeteoSchweiz. (o. J.). *Starkniederschläge*. MeteoSchweiz. Abgerufen 26. August 2024, von <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/rekorde-und-extreme/starkniederschlaege.html>
- MeteoSchweiz. (2012). *Klimareport 2011*. Abgerufen 01. September 2024, von [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)
- MeteoSchweiz. (2013a). *Klimabulletin August 2013*. Zürich.
- MeteoSchweiz. (2013b). *Klimabulletin Juli 2013*. Zürich.
- MeteoSchweiz. (2013c). *Klimabulletin Juni 2013*. Zürich.
- MeteoSchweiz. (2013d). *Klimabulletin Mai 2013*. Zürich.
- MeteoSchweiz. (2014). *Jahresbericht 2013*. Zürich.
- Muggeo, V. M. R. (2003). Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*, 22(19), 3055–3071. <https://doi.org/10.1002/sim.1545>
- Napoli, A., Crespi, A., Ragone, F., Maugeri, M., & Pasquero, C. (2019). Variability of orographic enhancement of precipitation in the Alpine region. *Scientific Reports*, 9(1), 13352. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49974-5>
- Pebesma, E., & Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>
- Pebesma, E., & Bivand, R. S. (2005). S Classes and Methods for Spatial Data: the sp Package. *R news*, 9.2.
- Piepho, H. P. (2019). A coefficient of determination (R<sup>2</sup>) for generalized linear mixed models. *Biometrical Journal*, 61(4), 860–872. <https://doi.org/10.1002/bimj.201800270>

- Pierce, D. (2017). *Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files* (1). R Package. <https://www.vps.fmvz.usp.br/CRAN/web/packages/ncdf4/ncdf4.pdf>
- Rogerson, P. (2011). Statistical Methods for Geography. In *Statistical Methods for Geography*. SAGE Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4135/9781849209953>
- Ruelland, D. (2020). Should altitudinal gradients of temperature and precipitation inputs be inferred from key parameters in snow-hydrological models? *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2609–2632. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2609-2020>
- Scaff, L., Rutllant, J. A., Rahn, D., Gascoïn, S., & Rondanelli, R. (2017). Meteorological Interpretation of Orographic Precipitation Gradients along an Andes West Slope Basin at 30°S (Elqui Valley, Chile). *Journal of Hydrometeorology*, 18(3), 713–727. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0073.1>
- Schäppi, B. (2013). *Measurement and analysis of rainfall gradients along a hillslope transect in the Swiss Alps* [Dissertation]. ETH.
- Schneider-Carius, K., & Essenwanger, O. (1955). Eigentümlichkeiten der Niederschlagsverhältnisse im Norden und Süden der Schweizer Alpen, dargestellt durch die Niederschlagswahrscheinlichkeit von Basel, St. Gotthard und Lugano. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B*, 7(1), 32–48. <https://doi.org/10.1007/BF02243763>
- Seibert, J. (1997). Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model. *Hydrology Research*, 28(4–5), 247–262. <https://doi.org/10.2166/nh.1998.15>
- Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
- Sevruk, B. (1997). Regional dependency of precipitation-altitude relationship in the Swiss Alps. *Climatic Change*, 36(3/4), 355–369. <https://doi.org/10.1023/A:1005302626066>

- Sevruk, B., & Mieglistz, K. (2002). The effect of topography, season and weather situation on daily precipitation gradients in 60 Swiss valleys. *Water Science and Technology*, 45(2), 41–48. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0025>
- Sideris, I. V., Gabella, M., Erdin, R., & Germann, U. (2014). Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680), 1097–1111. <https://doi.org/10.1002/qj.2188>
- Stahl, K., Moore, R. D., Shea, J. M., Hutchinson, D., & Cannon, A. J. (2008). Coupled modelling of glacier and streamflow response to future climate scenarios. *Water Resources Research*, 44(2). <https://doi.org/10.1029/2007WR005956>
- Swisstopo. (2005). *DHM25: Das digitale Höhenmodell der Schweiz*. <http://www.swisstopo.ch/pub/down/pro>
- Uttinger, H. (1951). Zur Höhenabhängigkeit der Niederschlagsmenge in den Alpen. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B*, 2(4), 360–382. <https://doi.org/10.1007/BF02249011>
- Villarini, G., & Krajewski, W. F. (2010). Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. In *Surveys in Geophysics* (Bd. 31, Nummer 1, S. 107–129). <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9079-x>
- Villarini, G., Mandapaka, P. V., Krajewski, W. F., & Moore, R. J. (2008). Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge perspective. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(11). <https://doi.org/10.1029/2007JD009214>
- Wang, L., Zhang, F., Zhang, H., Scott, C. A., Zeng, C., & Shi, X. (2018). Intensive precipitation observation greatly improves hydrological modelling of the poorly gauged high mountain Mabengnong catchment in the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 556, 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.039>
- Wastl, C. (2008). *Klimatologische Analyse von orographisch beeinflussten Niederschlagsstrukturen im Alpenraum*.

- Wastl, C., & Zängl, G. (2007). Analysis of the climatological precipitation gradient between the Alpine foreland and the northern Alps. *Meteorologische Zeitschrift*, *16*(5), 541–552. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2007/0223>
- Wickham, H., Francois, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Wilkinson, L. (2011). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis by WICKHAM, H. *Biometrics*, *67*(2), 678–679. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2011.01616.x>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P. D., Allen, G. H., & Pavelsky, T. M. (2019). MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resources Research*, *55*(6), 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Zbinden, P., Defila, C., Gehrig, R., Bader, S., Bregert, M., Jeannet, P., & Stübi, R. (2008). 2007 *Annalen Annales Annali*.

## Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, sie oder Teile davon zuvor nicht für andere Qualifikationsarbeiten verwendet und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

St. Gallen, 26. Januar 2025

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Huber', with a long horizontal stroke extending to the right.

Angela Huber