Professur für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Johanna Geilen

Vergleich von modellierten und tracer-basierten Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i.Br., Dezember 2018

Professur für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Johanna Geilen

Vergleich von modellierten und tracer-basierten Abflusskomponenten aus Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze

-

Am Beispiel der Einzugsgebiete Schwarze- und Weisse Lütschine

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: Prof. Dr. Jan Seibert

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i.Br., Dezember 2018

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Weiler für die Bereitstellung eines individuellen Wunschthemas, sowie die Betreuung und Unterstützung bei der Ausführung der Arbeit. Wertvoll war auch die Zweitbetreuung durch Herrn Prof. Dr. Seibert mit zuverlässigen, schnellen und hilfreichen Antworten während der Modellierungsphase unter zeitlichem Hochdruck.

Auch habe ich die Hilfe im Feld durch Britta Kattenstroth und Jonas Zimmermann, sowie die Unterstützung bei der Laborarbeit durch Barbara Herbstritt sehr geschätzt. Danke auch an Daphné Freudinger und Irene Kohn für die Bereitstellung der HBV-Daten und die Unterstützung bei der Modellierung!

Mein besonderer Dank gilt den zahlreichen Helfer die mich bei Wind und Wetter in Flüsse und auf Berge begleitet haben: Marit, Anja, Robin, Elina G., Elina P., Raphael und Christian. Ohne Euch hätte ich die Datenerhebung in diesem Umfang nicht leisten können! Zudem ein großes Dankeschön an meine geduldigen Korrekturleserinnen Toni, Conny und Caro.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung ii

Abbildungsverzeichnis viii

Tabellenverzeichnis xii

Abkürzungsverzeichnis xiv

Zusammenfassung 1

1 Einleitung 2

2 Stand des Wissens 3

2.1 Alpine EZG 3

2.1.1 Hydrologische Prozesse alpiner EZG 3

2.1.2 Saisonalität des Abflusses 4

2.1.3 Einfluss des Klimawandels 5

2.2 Empirische Bestimmung der Abflussanteile 6

2.2.1 Die EMMA 7

2.2.2 Tracer der Abflusskomponenten 7

2.2.3 Wahl der End-Member-Werte 9

2.3 Modellierung der Abflussanteile 10

2.3.1 Modellierung der Abflussanteile auf Tagesbasis 10

2.3.2 Das HBV-Modell 11

3 Problemstellung und Zielsetzung 13

4 Methodik 14

4.1 Standort Beschreibung 14

4.1.1 Topographie und Geologie 15

4.1.2 Vergletscherung der Gebiete 16

4.1.3 Klima und Abfluss 17

4.1.4 Anthropogener Einfluss 17

4.2 Aufbau Messnetz 18

4.2.1 Wahl und Beschreibung der Messstandorte 18

4.2.2 Probennahme der Flusswasserproben 20
4.2.3 Leitfähigkeit- und Wasserstandmessung 21
4.2.4 Probennahme Schnee 22
4.2.5 Probennahme Eis 23
4.2.6 Probennahme Regen 24
4.2.7 Probennahme Grund- und Bodenwasser 25
4.3 Analyse im Labor 26
4.3.1 Stabile Isotope- Picarro 26
4.3.2 Anionen und Kationen- Ionenchromatograph (IC) 28
4.4 Aufbereiten der Rohdaten 29
4.4.1 Verdunstungseffekt bei genommenen Proben 29
4.4.2 Messdaten aus der Laboranalyse 29
4.4.3 Wasserstand, Temperatur und Leitfähigkeit 30
4.4.4 Abfluss- und Klimadaten des Kantons und BAFU 30
4.5 Hydrograph Separation mittels der EMMA 30
4.5.1 Analyse der Mischungsdreiecke - konservative Lösungen 31
4.5.2 Wahl der End-Member 32
4.5.3 Reduzierung der Dimensionen- PCA 32
4.5.4 Durchführung der EMMA 33
4.6 Modellierung der Abflussanteile mit HBV-Light 34
4.6.1 Kalibrierung der EZG 34
4.6.2 Modellierung 35
4.6.3 Verwendete Inputdaten 36
5 Ergebnisse 38
5.1 Datenerhebung in Feld und Labor 38
5.1.1 Probennahme der Flusswasserproben 38
5.1.2 Datenerhebung mit der CTD-Sonde 40
5.1.3 Probennahme der End-Member 42
5.1.4 Laboranalyse mit IC und Picarro 43

5.2 Empirische Abflussseparation- EMMA ... 45

5.2.1 Analyse der Mischungsdreiecke ... 45

5.2.2 Analyse der End-Member ... 47

5.2.3 Durchführung der EMMA ... 50

5.2.4 Punkte außerhalb der Mischungsdreiecke ... 52

5.3 Empirisch ermittelte Anteile der Abflusskomponenten ... 53

5.3.1 Tägliche Variation von Regen und Grundwasser ... 53

5.3.2 Tägliche Variation von Schnee- und Gletschereisschmelze ... 55

5.3.3 Kurzzeitlichen Variationen- 24h Messungen ... 55

5.3.4 Verlauf der Abflusskomponenten in der Schmelzsaison ... 57

5.3.5 Vergleich der TEZG innerhalb eines EZG sowie der EZG untereinander ... 61

5.4 Abflussseparation mit dem HBV-Light ... 62

5.4.1 Ergebnisse der Kalibrierung ... 62

5.4.2 Vergleich der gebrauchten Modellversionen ... 64

5.5 Vergleich gemessener und modellierter Abflussanteile ... 66

5.5.1 Wahl der Modellversion für den Vergleich mit den Messdaten ... 66

5.5.2 Abflussanteile im EZG der Schwarzen Lütschine ... 66

5.5.3 Abflussanteile im EZG der Weissen Lütschine ... 68

5.5.4 Vergleich der ermittelten Abflussanteile in beiden EZG ... 70

6 Diskussion der Ergebnisse ... 74

6.1 Aufbau des Messnetzes ... 74

6.1.1 Datenerhebung im Feld ... 74

6.1.2 Datenerhebung im Labor ... 75

6.2 Empirische Abflusstrennung mittels der EMMA ... 75

6.2.1 Ausschluss des Messstandortes BB ... 75

6.2.2 Wahl der betrachteten End-Member ... 76

6.2.3 Identifizierung sinnvoller End-Member-Werte ... 76

6.2.4 Wahl der Tracer ... 80

6.3 Modellierte Abflusstrennung mit dem HBV-Light Modell 81

6.3.1 Güte der Modellierergebnisse 81

6.3.2 Vergleich der Modellversionen 82

6.3.3 Unsicherheiten der Modellierung 82

6.4 Empirisch ermittelte und modellierte Abflussanteile 83

6.4.1 Anteil des Regenwassers 84

6.4.2 Anteil der Schneeschmelze 85

6.4.3 Anteile des Gletschereises 86

6.4.4 Anteile des Grundwassers 87

7 Schlussfolgerung 89

8 Literaturverzeichnis 92

9 Anhang 96

10 Ehrenwörtliche Erklärung 106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich von Niederschlags- und Abflussbildung in Europa mit (links) und ohne den Alpen (rechts) (Fohrer et al., 2016) ... 3

Abbildung 2: Beispielhaft ein glazio-nivale geprägtes Abflussregime, am Pegel Zweilütschinen. Farbig dargestellt der jahreszeitliche Verlauf der Abflussanteile von Regenwasser (Q_R) Schnee (Q_S) und Eisschmelze (Q_E) (Stahl et al., 2016) ... 5

Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebietes im Berner Oberland der Schweizer Alpen (Schulte et al., 2009) ... 14

Abbildung 4: Dominierendes Ausgangsgestein in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine als gemeinsame Draufsicht (oben) sowie in einem von Nord nach Süd gezogenen Längsschnitt (unten). Die Lage des Längsschnitts verläuft etwa zwischen den beiden EZG und ist in der Draufsicht eingezeichnet (Schulte et al., 2009) ... 16

Abbildung 5: Lage der Messstandorte der Flusswasser-, Schnee-, Gletschereis-, Grund- und Regenwasserproben. Außerdem Lage der Abfluss-, Klima- und Grundwassermessstation der BAFU/des Kantons Bern ... 19

Abbildung 6: Gefüllte Probenflaschen mit aufschwimmendem Styropor im ISCO Autosampler ... 20

Abbildung 7: Installiertes Pegelrohr mit CTD-Sonde am Standort Bärgelbach, links bei niedrigem Wasserstand und rechts bei hohem Abfluss mit viel Sedimentfracht ... 22

Abbildung 8: Schneeprobennahme mit dem Pegelrohr am Chrinnenhorn ... 23

Abbildung 9: Oberer Grindelwaldgletscher (links) und Rottalgletscher (rechts) ... 24

Abbildung 10: Niederschlagssammler nach dem Prinzip von Göring et al. (2012) ... 25

Abbildung 11: Grundwassermessstelle Schwarze Lütschine (alter GW-Brunnen des Kantons „Klecki“) ... 26

Abbildung 12: Picarro mit aufgesetztem Vaporization Modul (links) und mit Standards gefülltes Probentablett (rechts) ... 27

Abbildung 13: IC für Kationen (links) und Anionen (rechts) sowie die dazugehörigen Autosampler und der Steuerungs-PC ... 28

Abbildung 14: Beispiel eins Mischungsplots nach (Hooper et al., 1990). Hier dargestellt das Mischungsdreieck aus Silicat und Magnesium zwischen den End-Membern „Hillslope“, „Organic“, und „Groundwater“ für die Messparameter Sulfat und Alkalinität. ... 31

Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung der Ermittlung des Anteils einer Quellkomponente (EM1) an einer Flusswasserprobe innerhalb des Mischungsdreiecks (P1). Außerdem die Projizierung einer Flusswasserprobe außerhalb des Mischungsdreiecks (P2) auf den naheliegende Außenseite. ... 33

Abbildung 16: Lage der verwendeten Abfluss- und Klimastationen, sowie die Lage der betrachteten TEZG ... 37

Abbildung 17: Gemessene ^{18}O-Konzentrationen an allen Standorten im EZG der Schwarzen Lütschine über die gesamte Messzeitreihe. Grau hinterlegt die erste Messperiode, in der eine kontinuierliche Abnahme der ^{18}O-Konzentrationen zu verzeichnen ist, was mögliche Verdunstungsverluste indiziert ... 40

Abbildung 18 : Rohdaten der Ott-CTD Sonde von Temperatur, Wasserstand und Leitfähigkeit am Standort „Weiße Lütschine“ (WL) 41

Abbildung 19: Fehlerkorrigierte und auf Tageswerte aggregierte Zeitreihe von Wasserstand (WS), Leitfähigkeit (EC) und Temperatur am Standort SG. In Grün eingezeichnet, der Zeitpunkt der Entnahme der Sonde 41

Abbildung 20: Wahl der Messtage zum Nachmessen anhand von Klima- und Abflussdaten. Die dargestellten Abflussdaten sind vom Pegel Zweilütschine, die relativen Wasserstände (rel. WS) wurden mit der CTD-Sonde am Standort SG und WL erfasst 43

Abbildung 21: Vergleich von Messwerten im ^{17}O und ^{18}O Modus am Picarro 44

Abbildung 22: Mischungsdreieck aus den Komponenten Regen (links), Schnee (rechts, oben), Grundwasser (rechts, unten) und Gletschereis (zwischen Regen und Schnee), für die Parameter Natrium und Kalium für alle Standorte im EZG Schwarze Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert (dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weitere Messungen von Bodenwasser (BW) sowie Konzentrationen der Grundwassermessungen des Kantons Bern (GW-Kant.) eingezeichnet. 45

Abbildung 23: Mischungsdreieck aus den Komponenten Eis (links), Schnee (rechts, oben) und Regen (rechts, unten) für die Parameter Deuterium Excess (DEx) und 17O-Excess (D17O) an allen Standorten im EZG Weisse Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert (dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weite Messungen Festeisproben (Eis-Ind.) sowie die genommene Flüssigprobe (Eis-fl.) des End-Member Eis eingezeichnet. 46

Abbildung 24: Mischungsdreieck aus den Komponenten Eis, Schnee, Regen (links unten) und Grundwasser (rechts, oben) für die Parameter Calcium und Magnesium an allen Standorten im EZG Schwarze Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert(dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weitere Messungen von Bodenwasser (BW), sowie Konzentrationen der Grundwassermessungen des Kantons Bern (GW-Kant.) eingezeichnet. 48

Abbildung 25: Gemessene ^{18}O-Konzentrationen im Schnee am Honegg, Schilthorn (Schilt.), Rottalgletscher (Rott) und Chrinnenhorn (Chrin.), in Abhängigkeit der entsprechenden Höhenstufe 49

Abbildung 26: Über die Messzeitreihe erfasste Isotopenkonzentrationen im Regen, im EZG Weisse Lütschine. Rote Vertikale markieren die Zeitpunkte der Leerung des Niederschlagsammlers 50

Abbildung 27: Mischungsdreiecke zwischen den End-Member Regen (links, unten) Schnee (Mitte, oben) und Grundwasser (rechts, unten) am Messstandort WL. In Schwarz die Dreiecke zwischen den Mittelwerten entsprechender End- Member und in Blau die verwendeten Datenpunkte als Grundlage der Berechnung der fließenden Mittel. Außerdem eingezeichnet, der Mittelwert der Festeisproben und Wert der Flüssigeisprobe sowie der Mittelwert der eigenen Grundwassermessung, welcher nicht verwendet wurde 51

Abbildung 28: Mischungsdreieck zwischen den End-Member Regen, Schnee und Gletschereis für die Messparameter ^{17}O und ^{2}H im EZG Schwarze Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert (dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weite Messungen Festeisproben sowie die genommene Flüssigprobe des End-Member Eis eingezeichnet. 52

Abbildung 29: Abflussanteile über die gesamte Messperiode am Standort GG im EZG der Schwarzen Lütschine. Die Messtage, an denen die EMMA nicht korrekt durchgeführt werden konnten, sind mit einem X markiert. Ein beispielhaftes Regenereignis ist mit einem O markiert. 54

Abbildung 30: Abflussanteile über die gesamte Messperiode am Standort WL im EZG der Weissen Lütschine 55

Abbildung 31: Abflussanteile am Standort WL während der 24-h Messung zum Zeitpunkt des erwarteten Eisschmelze Peaks 56

Abbildung 32: Einteilung der Betrachtungsphasen nach klimatischen Gegebenheiten 57

Abbildung 33: Variation der Abflussanteile über die Schmelzsaison im EZG der Schwarzen Lütschine, am stark vergletscherten Messstandort SL sowie am Auslass des EZG GG. 58

Abbildung 34: Variation der Abflussanteile über die Schmelzsaison im EZG der Weissen Lütschine. Betrachtet werden das stark vergletscherte TEZG WL, das nicht vergletscherte TEZG SG und der Auslass des gesamten EZG WLP 60

Abbildung 35: Vergleich der Abflussanteile in den TEZG mit großem Anteil vergletscherter Fläche (SL,WL) und am Auslass (GG, WLP) sowie der Vergleich der Ergebnisse der EZG Schwarze (SL, GG) und Weisse Lütschine (WL,WLP) 61

Abbildung 36: Beobachtete(r) (blau) und mit dem besten Parametersetz modellierte(r) (rot) Schneehöhen und Gesamtabfluss im EZG der Schwarzen Lütschine über die gesamte Kalibriermessreihe. In Grau außerdem die modellierten Resultate durch das zweitbeste Parameterset. 63

Abbildung 37: Modellierte Abflussanteile des Regenwassers (Regen), der Schneeschmelze (Schnee), der Gletschereisschmelze (Eis) und des Grundwassers (GW) am Messstandort GG im EZG der Schwarzen Lütschine, für das Messjahr 2018. In Rot außerdem die observierte Abflussganglinie dieses Standortes und in blau der modellierte Niederschlag. 64

Abbildung 38: Modellierte Abflussanteile des Regenwassers (Regen), der Schneeschmelze (Schnee) und des Grundwassers (GW) am Messstandort SG (oben) und SL (unten) für das Messjahr 2018. In Grau/Schwarz der Anteil, der je nach Gebrauch der Modellversion „Complete Mixing“ oder „Magic Components“ dem Schnee oder dem Regen zugeschrieben wird. 65

Abbildung 39: Scatterplot zum Vergleich der durch Messung und Modellierung ermittelten Anteile von Schnee und Regen je nach gebrauchter Modellversionen „Complete Mixing“ (CM) oder „Magic Componets“ (MgC) für die Messstandorte im EZG der Weissen Lütschine. 66

Abbildung 40: Scatterplot zum Vergleich der gemessenen und modellierten Anteile von Grundwasser, Gletschereis, Schnee und Regen mit der Modellversionen „Complete Mixing“ für die Messstandorte im EZG der Schwarzen Lütschine. 67

Abbildung 41: Vergleich von gemessenen und modellierten Abflussanteilen des Regenwassers (Regen), Schneeschmelze (Schnee) und Grundwassers (GW) am Messstandort SL im EZG der Schwarzen Lütschine für das Messjahr 2018. 68

Abbildung 42: Scatterplot zum Vergleich der gemessenen und modellierten Anteile von Grundwasser, Gletschereis, Schnee und Regen mit der Modellversionen „Complete Mixing“ für die Messstandorte im EZG der Weissen Lütschine. 69

Abbildung 43: Vergleich von gemessenen und modellierten Abflussanteilen des Regenwassers (Regen), Schneeschmelze (Schnee) und Grundwassers (GW) am Messstandort WL im EZG der Weissen Lütschine für das Messjahr 2018. 70

Abbildung 44: Boxplot zum Vergleich von gemessenen (mss) und modellierten (md) Abflussanteilen Gletschereis (Eis), Grundwasser (GW), Regenwasser(Reg.) und Schneeschmelze (Shn.) für die stark vergletscherten TEZG WL (links) und SL (rechts). 71

Abbildung 45: Boxplot zum Vergleich von gemessenen (mss) und modellierten (md) Abflussanteilen Gletschereis (Eis), Grundwasser (GW), Regenwasser (Reg.) und Schneeschmelze (Shn.) für die Messstandorte am Auslass der EZG WLP (links) und GG (rechts). 73

Abbildung 46: Für die Kalibrierung festgelegten Parametergrenzen im HBV-Light..... 96

Abbildung 47: Mischungsdreieck zwischen gemessenen Calcium- und Magnesiumkonzentrationen im EZG der Weissen Lütschine..... 97

Abbildung 48: Mischungsdreieck zwischen den End Membern Regen, Schnee und Gletschereis für die Messparameter ^{17}O und ^{2}H . Die End Member werden als Mittelwert(dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weite Messungen Festeisproben sowie die genommene Flüssigprobe des End Member Eis eingezeichnet. 98

Abbildung 49: Messtage, die im EZG der Schwarzen Lütschine zum Nachmessen identifiziert wurden 97

Abbildung 50: Gemessene Isotopen-Konzentration im Regenwasser im EZG der Schwarzen Lütschine..... 98

Abbildung 51: Ergebnis der EMMA am Messstandort BB im EZg der Schwarzen Lütschine..... 99

Abbildung 52: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort SL..... 99

Abbildung 53: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort GG..... 100

Abbildung 54: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort SG 100

Abbildung 55: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort WL 101

Abbildung 56: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort WLP..... 101

Abbildung 57: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Eisschmelzpeaks am Messstandort WLP 102

Abbildung 58: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Eisschmelzpeaks am Messstandort GG 102

Abbildung 59: Kalibrierergebnisse des HBV-Light im EZG der Weissen Lütschine..... 103

Abbildung 60: Vergleich der ermittelten Abflussanteile, je nach Gebrauchtem Parameterset 103

Abbildung 61: Vergleich von empirisch ermittelten und modellierten Abflussanteilen am Messstandort GG im EZG der Schwarze Lütschine..... 104

Abbildung 62: Vergleich von empirisch ermittelten und modellierten Abflussanteilen am Messstandort sG im EZG der Weissen Lütschine 104

Abbildung 63: Vergleich von empirisch ermittelten und modellierten Abflussanteilen am Messstandort SG im EZG der Weissen Lütschine 105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtige Kenngrößen zur Beschreibung der EZG Schwarze und Weisse Lütschine. Für die Kennwerte des Abflusses wird im EZG der Weissen Lütschine der Pegel „Zweilütschine“ der BAFU verwendet. Für das EZG der Schwarzen Lütschine wird vereinfacht die Differenz der Abflusswerte des Pegels „Gsteig“ nach dem Zusammenfluss sowie dem Pegel „Zweilütschine“ verwendet. 15

Tabelle 2: Metadaten der Messstandorte mit Flusswasserprobensammler und Pegel 19

Tabelle 3: Gewichtung der Kalibrierkriterien von Abfluss und Schnee in der Kalibrierung mit dem HBV-Light-Modell 35

Tabelle 4: Verwendete Input Daten für die EZG Schwarze und Weisse Lütschine bei der Kalibrierung und Modellierung mit dem HBV-Light 36

Tabelle 5: Übersicht über erfolgreich genommene und gemessene Flusswasserproben, sowie Messlücken je Standort 39

Tabelle 6: Ergebnisse des Vorversuchs „Spülen der Probenflaschen“ 39

Tabelle 7: Zeitpunkt und Ort der Probennahme der Abflusskomponenten Regen, Schnee, Gletschereis und Grundwasser in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine 42

Tabelle 8: Ergebnis der Analyse der Mischungsdreiecke in Bezug auf konservatives Mischen der einzelnen Messgrößen. Konservative Tracer werden mit „ja“ gekennzeichnet, nicht konservative mit „nein“ 47

Tabelle 9: Durch die PCA erklärte Varianz des Datensatzes je Messstandort und Gebrauch von zwei PCs (bei drei End- Member) oder drei PCs (bei vier End-Member) 51

Tabelle 10: Punkte, die bei der EMMA beim Abtrennen der langsamen (EMMA 1) und schnellen Fließkomponenten (EMMA 2) außerhalb der Mischungsdreiecke liegen. 53

Tabelle 11: Ermittelter Zeitpunkt von maximalen und minimalen Anteilen der Schmelzkomponenten im Abfluss. Am Standort SG konnte kein Tagesgang festgestellt werden (-), am Standort SL fand die Messung nicht statt (x) 56

Tabelle 12: Gütemaße für die Übereinstimmung von modelliertem und beobachteten Abfluss und Schneedaten für den Lauf mit dem besten Parameterset in den EZG der Schwarzen und Weissen Lütschine 62

Tabelle 13: Durch empirische Analyse mittels EMMA sowie Modellierung mit HBV-Light ermittelte Abflussanteile (Mittelwert, Maximum, Minimum) für die Abflusskomponenten Grundwasser (QGW), Eisschmelzwasser (QE), Schneeschmelzwasser (QS) und Regenwasser (QR) an allen Messstandorten 72

Tabelle 14: Alle in der Multi-Kriterien-Kalibrierung verwendeten Gütemaße und zusätzliche nicht in der Kalibrierung verwendeten Maße von dieser Arbeit im Vergleich zu Stahl et al. (2016)(ASG-Rhein) für die EZG Weisse und Schwarze Lütschine 81

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung	Einheit
"G" Standard	Messstandard mit leichten Isotopenkonzentrationen (Gletscherschmelzwasser)	-
"M" Standard	Messstandard mit schwere Isotopenkomposition (Meerwasser)	-
"T" Standard	Laboreigener Validierungsstandart	-
17 O	natürliches, stabiles Isotop von Sauerstoff	‰
18 O	natürliches, stabiles Isotop von Sauerstoff	‰
^{2}H	Wasserstoff	‰
ASG-Rheinprojekt	Projekt, dass die Abflussanteile ausRegen, Schnee- und Gletschereischmelze am Abfluss des Rheins modelliert	-
BAFU	Bundesamt für Umwelt der Schweizerischen Eidgenossenschaft	-
BB	Bärgelbach	-
BW	Bodenwasser	-
Ch	Chrinnenhorn	-
CH4O3S	Methansulfonsäure	-
CM	Complete Mixing	-
D170	170-Excess	‰
DEx	Deuterium Excess	‰
EC	Leitfähigkeit	µS
Eis	Gletschereis	-
Eis-fl.	Flüssigeisprobe	-
Eis-Ind.	Festeisproben	-
ELA	Equilibrium Line Altitude, Höhenlage der Gletschergleichgewichtslinie	-
EM 25Qut.	End-Member 25% Quantil	-
EM 75Qut	End-Member 75% Quantil	-
EM Mean	End-Member Mittelwert	-
EM Med.	End-Member Median	-
EMMA	End-Member-Mixing-Analysis	-
EWL Genossenschaft	Energie-Elektro-Digitale Genossenschaft in Lauterbrunn. Schweiz	-
EZG	Einzugsgebiet(e)	-
FW	Flusswasser	-
GAP	HBV-Light Tool zur Modellkalibrierung "genetic algorithm for parameter optimization"	-
GG	Grindelwald Grund	-
GISP	Greenland Ice Sheet Precipitation	-
GW	Grundwasser	-
GW Kant.	Grundwassermessungen Kanton Bern	-
HBV	Hydrologiska Byrås Vattenbalansavdelning-Modell	-
HBV-Light	Modellversion basierend auf HBV (Universität Zürich)	-
HDPE	Hartplastikflaschen	-

HHQ	Höchster jemals gemessener Abfluss an einem Pegel	m^3/s oder mm/a
HOBO	Wasserstands- und Strömungs- Datenlogger	-
Hon	Honegg	-
HQ	Höchster gemessener Abfluss in 100 Jahren	m^3/s oder mm/a
IAEA	International Atomic Energy Agency	-
IC	Ionenchromatograph	-
ISCO	automatischer Probensammler: 3700Portable Samplers,Teledyne	
jähr.	jährlich	-
K2-Werte	Modellparameter des HBV, der bestimmt mit welcher Geschwindigkeit die untere Grundwasserbox ausläuft	-
Konz.	Konzentration	mg/l
LogReff	Kalibrierparameter zur Optimierung der Winterabflüsse	-
m.ü.M	Meter über dem Meeresspiegel	m.ü.M
md	modelliert	-
MeteoSchweiz	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie	-
MgC	Magic Components	-
mittl.	mittlerer	-
mss	gemessen abb. 43	-
MW	Megawatt	MW
MW	Mittelwert	-
NA2CO3	Natriumkarbonat	-
Nd.	Niederschlag	mm/a
Ott-CTD-Sonde	Datenlogger für Wasserstand, Temperatur und Leitfähigkeit und Druck	
PC	Principal Components	-
PCA	Principal Component Analysis	EC(uS/cm)
PVC-Pegel-rohre	Polyvinylchlorid-Pegelrohre	-
Q	Abfluss	m^3/s oder mm/a
Q obs	beobachteter Abfluss	m^3/s oder mm/a
Q sim	modellierter Abfluss	mm/a
Q1	obere Grundwasserbox	-
Q2	Ausfluss der unteren Grundwasserbox	-
ReffSeason	Kalibrierparameter zur Optimierung der Sommerabflüsse	-
Reg.	Regenwasser	-
RT	Rottalgletscher	-
Schi	Schilthorn	-
SG	Sefi-Litschena	-
Shn.	Schnee	-
SIGMA	automatischer Probensammler: 900 Composite Sampler,Hach	-
SL	Schwarze Lütschne	-

SLAP	Standard Light Antarctic Percipitation	-
SLF	Institut für Schnee- und Lawinenforschung	-
SMHI	Swedish Meteorolgical and Hydrolodical Institute	-
SWE	Schneewasseräquivalent	-
Temp.	Temperatur	°C
TEZG	Teileinzugsgebiet	-
VOL. ERR	Volumen Fehler	-
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water	-
WL	Weisse Lütschine	-
WLP	Weisse Lütschine Pegel	-
WS	Wasserstand	cm

Zusammenfassung

In alpinen EZG sind Schnee und Gletschereis wichtige Süßwasserspeicher, die durch Schmelze in den Sommermonaten für beständige Wasserverfügbarkeit sorgen. Da die meisten großen Flüsse Europas ihren Ursprung in den Alpen haben, ist das Schmelzwasser nicht nur für unmittelbar betroffene Regionen sondern auch weiter flussabwärts ein wichtiger Wasserlieferant. Durch den Klimawandel verändern sich Schnee- und Eisschmelzprozesse und mit ihnen die Wasserverfügbarkeit, vor allem in trockenen Monaten sowie insgesamt niederschlagsarmen Jahren. Dies hat weitreichende ökologische wie ökonomische Folgen. Um die Ressource Wasser nachhaltig managen zu können ist es wichtig, die Änderungen der Schmelzkomponenten im Abfluss zu erfassen. Diese Arbeit quantifiziert die täglichen Anteile der Komponenten Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze im Abfluss zweier alpiner Einzugsgebiete (EZG), der Schwarzen und Weissen Lütschine. Außerdem wird der Einfluss der langsamen Fließkomponenten, des Grundwassers auf die Abflussbildung erfasst. Die Abflusskomponenten werden empirisch über das Messen von Umwelttracern und anschließendem Anwenden des Mischungsmodells der **E**nd-**M**ember-**M**ixing-**A**nalysis (EMMA) separiert. In dieser Arbeit stellt sich dabei vor allem das stabile Wasserisotop ^{17}O als wichtiger Tracer heraus. Zudem werden die Abflussanteile durch das konzeptionelle Niederschlagsabflussmodell HBV-Light erfasst. Diese Arbeit ermittelt, dass im EZG der Schwarzen Lütschine der Abfluss durch die Schneeschmelze dominiert wird, während im EZG der Weissen Lütschine das Grundwasser den Hauptanteil am Abfluss ausmacht. Der Vergleich von Mess- und Modellierdaten ergibt im EZG der Weissen Lütschine eine bessere Übereinstimmung als im EZG der Schwarzen Lütschine. Die größten Unterschiede zwischen beiden Methoden der Abflussseparation liegen in den ermittelten Anteilen der Gletschereisschmelze und des Grundwassers. Die modellierten Anteile der Gletschereisschmelze werden durch zu groß festgesetzte Gletscherflächen (Stand 2010) überschätzt, während die empirisch ermittelten Anteile der Gletschereisschmelze unterschätzt werden. Diese Unterschätzung ist bedingt durch messtechnisch unzureichend erfasste Signaturen von Schnee- und Gletschereisschmelze. In dieser Arbeit können die täglichen Abflussanteile der Komponenten Schnee und Gletschereis deshalb durch die EMMA nicht zufriedenstellend separiert werden. Weder durch Messung noch Modellierung konnten die Gletschereisanteile somit ausreichen quantifiziert werden. Die Unterschiede zwischen Messung und Modellierung bei den ermittelten Grundwasseranteilen liegen vor allem im saisonalen Verlauf des Grundwasserabflusses. Die Modellierung gibt vor, dass der Grundwasserabfluss eng mit der Schneeschmelze zusammenhängt. Empirisch wird ermittelt, dass neben der Schneeschmelze auch die Gletschereisschmelze einen wichtigen Einfluss auf die Grundwasseranteile im Abfluss hat. Diese Arbeit kommt zu dem Schluss, dass es wichtig ist den Einfluss des Grundwassers zu erfassen und dabei vor allem auf die Interaktion des Untergrundes mit der Gletschereisschmelze einzugehen.

Keywords: Abflussanteile, Alpine EZG, Schnee- und Gletschereisschmelze, Grundwasser, Regen, Hydrograph Separation, EMMA, HBV-Light, ^{17}O

1 Einleitung

In der Schweiz war der Sommer 2018, einer der wärmsten und trockensten Sommer seit Beginn der Messungen (Bader et al., 2018). Trotz geringer Niederschläge führte ein Großteil der Schweizer Flüsse jedoch nur unmerklich geringere Wassermengen, als in den Vorjahren (BAFU, 2018c). Grund dafür waren die mit den hohen Temperaturen einhergehenden Rekordschmelzraten der Gletscher (Fischer und Hans Wiesenegger, 2018). In den trockenen Phasen des Sommers wurde der geringe Niederschlag also durch hohe Anteile der Gletschereisschmelze bei der Abflussbildung kompensiert. Durch das Schmelzwasser kam es somit zu konstanten Abflussraten und zu einer Pufferung der Niedrigwasserstände. Dies beschreibt die wichtige Funktion, die das Gletscherschmelzwasser für eine beständige Wasserverfügbarkeit in alpinen EZG hat.

Durch den Klimawandel sind die Gletscher am Zurückgehen. Der im Berner Oberland gelegene Untere Grindelwaldgletscher hat sich alleine im Jahr 2015 um 450 m zurückgezogen (GLAMOS, 2015). Durch den Rückgang der Gletscher entfällt auf lange Sicht der genannte Kompensationseffekt, den das Gletscherschmelzwasser in niederschlagsarmen Phasen des Jahres bzw. insgesamt trockenen Jahren auf den Abfluss hat (Fohrer et al., 2016; La Frenierre und Mark, 2014). Aufgrund des Klimawandels verändern sich außerdem die Schmelzprozesse der Schneeauflage. Diese ist neben den Gletschern ein wichtiger Wasserspeicher in den Wintermonaten und Frischwasserlieferant in den Sommermonaten (Stahl et al., 2016). Der Klimawandel hat somit Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit in alpinen EZG, aber auch weiter flussabwärts. Denn in den Alpen wird ein Großteil des Abflusses der Flüsse Europas gebildet (Fohrer et al., 2016). Auch der Rhein entspringt in den Alpen und führt somit in den Sommermonaten beträchtliche Anteile an Schmelzwasser. Im Trockenjahr 2003 wurden im Rhein bei Basel beispielsweise Tagesspitzen von über 20% Gletscherschmelzwasser im Abfluss festgestellt. Im gleichen Jahr konnten selbst hinter der Niederländischen Grenze, bei Lobith, noch Eisschmelzanteile von bis zu 15% am Abfluss ermittelt werden (Stahl et al., 2016). Ein Entfallen dieser Anteile hätte weitreichende Folgen. Neben der Natur sind auch Energiegewinnung, Binnenschifffahrt, Bewässerung sowie die Brauch- und Trinkwasserversorgung vom Wasser des Rheins abhängig (Stahl et al., 2016). Die aktuellen Anteile der Schmelzkomponenten im Abfluss abzuschätzen, um auf deren Basis Prognosen für die zukünftige Entwicklung machen zu können, ist deshalb von großem ökologischen als auch ökonomischem Interesse (Schmieder et al., 2018; Stahl et al., 2016).

Diese Arbeit quantifiziert für die Schmelzsaison 2018 die Abflusskomponenten in zwei stark vergletscherten Kopfeinzugsgebieten des Rheins, der Schwarzen und Weissen Lütschine. Dabei werden die Quellkomponenten Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze betrachtet sowie der Einfluss des Grund- und Bodenwassers auf die Abflussbildung abgeschätzt. Die einzelnen Abflussanteile werden empirisch über das Messen von Umwelttracern und die Hydrograph Separation mittels der EMMA bestimmt. Außerdem werden die messtechnisch erfassten Abflussanteile mit den, durch das konzeptionelle Niederschlagsabflussmodell HBV-Light ermittelten Anteilen, verglichen.

2 Stand des Wissens

2.1 Alpine EZG

Die Berge sind wichtige Wasserlieferanten für das flache Vorland, weshalb die Alpen auch als Wasserschloss Europas bezeichnet werden (Weingartner et al., 2007). Ein Beispiel, welches Niederschlag und generierten Abfluss in Europa mit und ohne Alpen vergleicht, macht die Bedeutung deutlich. So würde es in einem Europa ohne Alpen jährlich zu nur halb so hohen Niederschlagsbeiträgen und nur einem Viertel so hohen, daraus resultierenden Abflüssen kommen (Abbildung 1). In den Alpen wird somit pro Flächeneinheit ein vergleichsweise hoher Abfluss generiert, der einen wichtigen Beitrag zur Wasserverfügbarkeit in Europa leistet (Fohrer et al., 2016).

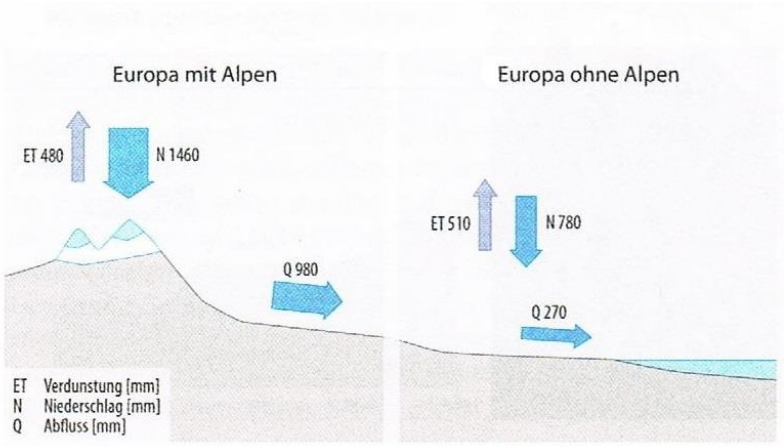


Abbildung 1: Vergleich von Niederschlags- und Abflussbildung in Europa mit (links) und ohne den Alpen (rechts) (Fohrer et al., 2016)

Die Besonderheit alpiner EZG ist, dass neben dem Regen auch Schnee- und Gletschereisschmelze zum Abfluss beitragen (La Frenierre und Mark, 2014). Schnee- und Gletschereisschmelze sind wichtige Frischwasserlieferanten, die ein großes Wasservolumen speichern und über die Saison verteilt wieder freigeben (Penna et al., 2014). Der Gletschereisschmelze kommt dabei vor allem in trockenen Phasen bzw. insgesamt trockenen Jahren eine wichtige Bedeutung zu. Denn durch kontinuierliches Freisetzen von Schmelzwasser in den Sommermonaten wirkt die Gletschereisschmelze kompensierend auf den niedrigen Wasserbeitrag von Regenniederschlägen (Kompensationseffekt) (Fohrer et al., 2016). Die Gletschereisschmelze hat somit eine wichtige Bedeutung für die Wasserverfügbarkeit, in alpinen EZG sowie in ganz Europa (La Frenierre und Mark, 2014).

2.1.1 Hydrologische Prozesse alpiner EZG

Wichtigste Steuerungsgröße alpiner EZG ist die Topographie. Über den höhenabhängigen Temperatur- und Niederschlagsgradienten bestimmt sie Anteil und Verteilung des Gebietsniederschlags sowie ob der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt (Fohrer et al., 2016). Außerdem bestimmt die Topographie, ob und wo es zum Ausbilden von Gletschern kommt.

Der Niederschlag unterliegt in alpinen EZG einem klaren orographischen Effekt, d.h. mit steigender Höhe kommt es auch zu steigenden Niederschlagsraten. Zudem unterliegt die Niederschlagsverteilung regionalen Unterschieden. Zu den höchsten jährlichen Niederschlagsraten von 3500 mm/Jahr kommt es in den Alpen, in den Regionen nördlich des Jungfraujoches. Der als Regen fallende Niederschlag kommt durch steile Topographie, geringe Vegetation sowie geringe Bodenmächtigkeit vor allem in den hohen Höhenlagen schnell zum Abfluss. Alpine EZG sind deswegen durch vermehrten Oberflächenabfluss und in Folge dessen durch schnelle Abflussreaktionen geprägt. Bei Starkniederschlägen führt dies schnell zu Hochwasserereignissen. Auch kommt es durch den Oberflächenabfluss zu verstärktem Sedimenteintrag in das Gerinne (Fohrer et al., 2016).

Der als Schnee fallende Niederschlag wird hingegen im EZG gespeichert und erst durch die Schneeschmelze im Frühjahr zum Abfluss freigegeben. Die Schneeakkumulation und Schneeschmelzprozesse sind maßgeblich durch die Topographie sowie die Exposition einzelner Hänge geprägt (Schmieder et al., 2016). Der Schnee ist in alpinen EZG ein wichtiger Wasserlieferant, der den Hauptanteil der Abflussbildung ausmacht. Entsprechende Anteile der Schneeschmelze sind stark von den klimatischen Gegebenheiten einzelner Jahre abhängig und unterliegen somit starken Schwankungen zwischen den einzelnen Betrachtungsjahren (Stahl et al., 2016).

Schmilzt die Schneedecke innerhalb eines Jahres nicht komplett ab, kann es über die Firnbildung nach mehreren Jahren zum Ausbilden von Gletschereis kommen (Fohrer et al., 2016). Gletscher bilden neben dem Schnee eine weitere wichtige Speichergröße der Winterniederschläge, die ebenfalls durch Schmelzprozesse in den Sommermonaten zum Abfluss kommt (Stahl et al., 2016). Anteil und zeitliche Verteilung der Gletscherschmelze am Abfluss kann von Jahr zu Jahr stark variieren, was dazu führt, dass in vergletscherten EZG die Wasserbilanz über mehrere Jahre unausgeglichen ist. Gleichzeitig ist die Gletschereisschmelze eine verlässliche Wasserquelle, weshalb in vergletscherten EZG, unabhängig vom jährlichen Niederschlag, stabile jährliche Abflussmengen generiert werden. Der Abfluss von gletschergeprägten EZG zeichnet sich somit durch geringe Variationen in den Abflussganglinien zwischen den einzelnen Jahren aus (Fohrer et al., 2016).

2.1.2 Saisonalität des Abflusses

Durch das Zusammenspiel von Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze bei der Abflussbildung sind alpine Abflussregime komplex (La Frenierre und Mark, 2014; Penna et al., 2014). Sie setzen sich aus nivalen, pluvialen und glazialen Elementen zusammen, wobei der Einfluss der entsprechenden Komponenten abhängig von der Höhenverteilung und des Vergletscherungsgrades des EZG ist. Meist kommen in alpinen EZG nivale oder glazio-nivale Abflussregime vor (Fohrer et al., 2016).

Der Abfluss in nicht vergletscherten alpinen EZG wird durch die Schneeschmelze dominiert und weist somit nival geprägte Abflussregime auf. Der Abfluss beginnt, Anfang April mit Einsetzen der Schneeschmelze, zu steigen. Maximale Abflüsse werden dann bei maximalen Schneeschmelzanteilen im Juni

erreicht. Nach Ende der Schneeschmelze im Juli steigt der Abfluss in nicht vergletscherten EZG nicht weiter an und das nivale Abflussregime geht in ein pluvial geprägtes Abflussregime über. Kommen in den alpinen EZG hingegen vergletscherte Flächen vor, schließt sich an die Schneeschmelze im Juli die Gletschereisschmelze an. Der Abfluss steigt dann durch die Gletscherschmelzkomponente weiter an, bis er im August sein Maximum erreicht. Mit stagnierender Gletschereisschmelze geht der Abfluss im September dann wieder zurück. Insgesamt kommt es im Vergleich von vergletscherten und nicht vergletscherten EZG, in vergletscherten EZG zu einem späteren Maximum in der Abflussganglinie sowie insgesamt höheren jährlichen Abflüssen (Fohrer et al., 2016).

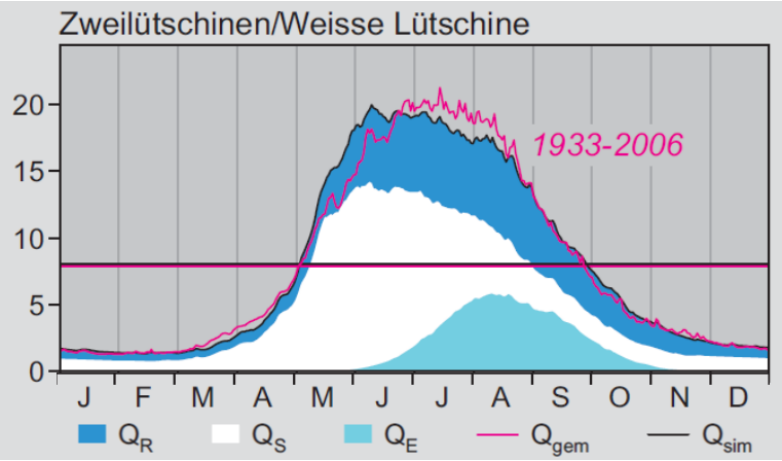


Abbildung 2: Beispielhaft ein glazio-nivale geprägtes Abflussregime, am Pegel Zweilütschinen. Farbig dargestellt der jahreszeitliche Verlauf der Abflussanteile von Regenwasser (Q_R) Schnee (Q_S) und Eisschmelze (Q_E) (Stahl et al., 2016)

Neben den Schwankungen der Abflussganglinie auf Monatsbasis zeigt das Schmelzwasser auch einen temperaturabhängigen Tagesgang. Dieser verstärkt sich im Laufe der Schmelzsaison durch das fortschreitende Ausbilden von natürlichen Entwässerungssystemen im und unter dem Gletscher. Durch Zufrieren der Eiskanäle stagniert der Tagesgang im September dann wieder (Fohrer et al., 2016).

2.1.3 Einfluss des Klimawandels

Im Zuge des Klimawandels werden sowohl steigende Temperaturen, als auch steigende jährliche Niederschläge vorhergesagt. Gleichzeitig wird ein Zunehmen der Extremereignisse prognostiziert. So sollen die Sommer insgesamt heißer und trockener werden, während die Niederschläge im Winter zunehmen. Auch steigt durch den Klimawandel die Klimavariabilität, d.h. das Klima einzelner Betrachtungsjahre wird sich zunehmend stärker unterscheiden (Stahl et al., 2016).

Die bedeutendste Auswirkung des Klimawandels für alpine EZG ist der vielseitig beschriebene, temperaturbedingte Gletscherrückgang. Kurzfristig führt dieser zu einer Erhöhung der Gletschereisschmelze im Abfluss, langfristig kommt es jedoch zu einer Abnahme des spezifischen Abflusses (Fohrer et al., 2016). Für vergletscherte EZG bedeutet das, dass sich das Abflussregime von einem glazio-nivalen Abflussregime hin zu einem ausschließlich nival geprägten Abflussregime verändert. Als Folge hat das

sowohl ein früheres Eintreten der maximalen Abflüsse in der Schmelzsaison, als auch insgesamt niedrigere jährliche Abflüsse (Stahl et al., 2016). Der wohl wichtigste Effekt ist jedoch, dass das Kompensationspotenzial des Gletschereisschmelzwassers entfällt. Die durch trockene Phasen des Jahres bzw. insgesamt trockene Jahre bedingten Niedrigwasserabflüsse werden somit nicht weiter durch die Gletschereisschmelze gepuffert (La Frenierre und Mark, 2014). Durch den Gletscherrückgang ist also die verlässliche Abflussbildung nicht weiter gegeben und es kommt sowohl zu größeren Schwankungen des Abflusses innerhalb eines Jahres, als auch zwischen den einzelnen Betrachtungsjahren. Für die Nutzung der Ressource Wasser durch Mensch und Umwelt hat das weitreichende Folgen (Fohrer et al., 2016; La Frenierre und Mark, 2014).

In der Literatur wird diskutiert, wann der Zeitpunkt der maximalen Gletschereisanteile erreicht wird „Peak Water“, der gleichzeitig auch den Anfang der endgültigen Abnahme der Gletschereisschmelze im Abfluss markiert (Farinotti et al., 2012; Huss und Fischer, 2016). Es wird angenommen, dass für kleine Gletscher der Alpen dieser Wendepunkt bereits überschritten ist (Huss und Fischer, 2016), währen für große Gletscher der Alpen das „Peak Water“ auf die Jahre zwischen 2020 und 2050 geschätzt wird (Farinotti et al. 2012). Die Unsicherheiten dieser Vorhersagen sind jedoch groß.

Durch den Rückgang der Gletscher gewinnt die Schneeschmelze an Bedeutung. Doch auch die Schneeschmelzprozesse verändern sich im Zuge des Klimawandels (Stahl et al., 2016). Es wird prognostiziert, dass die Schneeschmelze früher im Jahr einsetzt und auch die Maximalanteile der Schneeschmelze früher im Jahr erreicht werden (Horton et al., 2006). Da die Schneeschmelze sehr klimasensitiv ist, wird durch die zunehmende Bedeutung der Schneeschmelze mit größeren Schwankungen der Gesamtabflüsse zwischen den einzelnen Betrachtungsjahren gerechnet (Stahl et al., 2016).

2.2 Empirische Bestimmung der Abflussanteile

Ein gängiges Verfahren um den Abfluss empirisch zu trennen ist das Messen von Umwelttracern. Diese Methodik zur Abflussseparation macht sich zu Nutze, dass Wasser aus unterschiedlichen Herkunftsräumen einzigartige hydrochemische Signaturen aufweist (La Frenierre und Mark, 2014). Einzelne Ursprungskomponenten haben somit chemische Fußabdrücke, anhand derer sie im Flusswasser identifiziert werden können. Durch die Analyse der Wasserchemie einzelner Flusswasserproben kann der Abfluss dann in seine Ursprungskomponenten zerlegt werden (Christophersen und Hooper, 1992). Die Anteile einzelner Quellkomponenten am Abfluss können dann über Mischungsmodelle bestimmt werden. Es gibt sowohl einfache, lineare Mischungsmodelle die nur zwei Komponenten im Abfluss separieren und komplexe Mischungsmodelle, die unter Berücksichtigung mehrerer Umwelttracer auch mehrere Quellkomponenten voneinander trennen (La Frenierre und Mark, 2014).

Damit der Abfluss wie beschrieben in seine Ursprungskomponenten zerlegt werden kann muss gegeben sein, dass (Christophersen et al., 1990):

- Sich die hydrochemischen Signaturen der betrachteten Quellkomponenten deutlich voneinander unterscheiden.
- Sich die chemische Signatur der Ursprungskomponenten von der Quelle bis zum Mischungspunkt nicht verändert (konservative Tracer).
- Das Flusswasser ausschließlich aus den betrachteten End-Member besteht.

Kann die Methodik angewendet werden bringt sie einige Vorteile mit sich. So braucht es für diesen Ansatz zum Trennen der Abflusskomponenten, beispielsweise weder glaziologische oder meteorologisch Eingangsdaten, noch müssen EZG spezifische Parameter wie Grundwasserneubildung und Evapotranspiration berechnet werden. Zudem können die Abflussanteile räumlich und zeitlich hoch aufgelöst werden (La Frenierre und Mark, 2014). Es ist anzumerken, dass in dieser Arbeit die Bergriffe Quellkomponenten, Ursprungskomponenten und End-Member als Synonyme verwendet werden.

2.2.1 Die EMMA

Die EMMA ist schon ein lange verwendetes, Tracer basiertes Multikomponentenmodell (Hooper et al., 1990). Das heißt, dass unter Messung mehrerer Umwelttracer auch mehrere Quellkomponenten voneinander getrennt werden können. Die Abflussseparation mittels der EMMA unterscheidet sich von weiteren Mischungsmodellen vor allem dadurch, dass eine unbegrenzte Anzahl an Tracern in die Analyse eingehen kann (Christophersen und Hooper, 1992). Denn nach Christophersen und Hooper (1992) gehen nicht die einzelnen Tracerkonzentrationen in das Mischungsmodell ein, sondern die zuvor in einer Principal-Components-Analysis (PCA) kombinierten Informationen aller Umwelttracer.

Das Ergebnis der EMMA ist stark abhängig von den gewählten Umwelttracern sowie von den betrachteten End-Member-Werten. Die verwendeten Tracer sollten so gewählt werden, dass sich einzelne Quellkomponenten in den Tracerkonzentrationen deutlich unterscheiden. Die End-Member-Werte sollten so gewählt werden, dass sie Variationen der Quellkomponente in Raum und Zeit wiedergeben (Kronholm und Capel, 2015). Auf beides wird im Folgenden näher eingegangen.

Um mittels der EMMA ein besseres Verständnis für Wasserquellen und Dynamiken im EZG zu erhalten, sind außerdem hochaufgelöste Flusswasserproben nötig. Da diese durch bessere Messtechniken heutzutage einfacher generiert werden können, gehen Kronholm und Capel (2015) davon aus, dass die EMMA in Zukunft häufiger für die Hydrograph Separation angewendet werden wird.

2.2.2 Tracer der Abflusskomponenten

Tracer sind Markierstoffe, die in der Hydrologie verwendete werden um Rückschlüsse über Wasser- und Stoffflüsse in einem System ziehen zu können. Das Prinzip der Tracer-Hydrologie ist, bei bekannter Inputkonzentration der Markierstoffe die Konzentration des entsprechenden Stoffes an einem definierten Auslass des Systems zu messen. Anhand dieser gemessenen Konzentration können dann Rückschlüsse über die Eigenschaften des vorliegenden Systems gezogen werden (Fohrer et al.2016). Man unterscheidet zwischen künstlichen Tracern und Umwelttracern. Künstliche Tracer sind Stoffe, die dem

System durch eine Einspeisung zugeführt werden. Umwelttracer treten hingegen bereits auf natürliche Weise in einem hydrologischen System auf. Zudem unterscheidet man zwischen konservativen und reaktiven Tracern. Konservative Tracer sind Stoffe, die keine Reaktion mit anderen Wasserinhaltsstoffen oder der Bodenfestphase eingehen, reaktive Tracer hingegen schon (Fohrer et al., 2016). Die am häufigsten verwendeten Tracer für die Tracer basierte Abflusstrennung sind die Ionen einer Wasserprobe sowie die stabilen Wasserisotope.

Geochemische Tracer: Ionen und Leitfähigkeit

Als geologische Tracer geben die Ionen einer Wasserprobe Einblick in die Wasserherkunft. Denn welche Ionen in welchem Maße gelöst sind, ist abhängig von der Geologie des EZG sowie der Kontaktzeit des Wassers mit der Geologie. Die Ionen sind somit geeignete Tracer zur Bestimmung von Fließwegen sowie Verweilzeiten. Sie werden deshalb hauptsächlich genutzt um den Einfluss von Boden- und Grundwasser auf die Abflussbildung zu ermitteln (Fohrer et al., 2016). Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Summenparameter der alle gelösten Ionen einer Wasserprobe zusammenfast. Sie wird häufig vereinfacht anstelle der Ionen im Wasser gemessen. Vor allem für die Trennung von Vorereigniswasser sowie Ereigniswasser wird sie in der Hydrologie häufig verwendet. In der Literatur wird jedoch diskutiert, ob die elektrische Leitfähigkeit ein konservativer Tracer ist (Fohrer et al., 2016; La Frenierre und Mark, 2014).

Stabile Wasserisotope

Die stabilen Wasserisotope unterliegen im hydrologischen Kreislauf verschiedenen Fraktionierungsprozessen. Das bedeutet, dass unter unterschiedlichen Umwelteinflüssen, unterschiedliche Kompositionen aus leichten und schweren Wasserisotopen entstehen. Als Tracer geben die stabilen Wasserisotope somit Auskunft über den Zeitpunkt zu welchem im hydrologischen Kreislauf einzelne Wassermassen gebildet wurden. Das macht sie zu idealen Tracern der Komponenten Regen, Schnee und Gletschereis (La Frenierre und Mark, 2014). Zur Fraktionierung der Isotopenkomposition kommt es vor allem bei Phasenübergängen zwischen gasförmiger, fester und flüssiger Phase des Wassers. Bei der Verdunstung und Schmelze kommt es aufgrund des Massenunterschieds zu einer bevorzugten Verflüchtigung/Ausspülen der leichten Isotope. Bei der Kondensation kommt es hingegen durch den Massenunterschied zu einem schnelleren Ausfallen der schweren Isotope (Clark und Fritz, 2013). Zudem unterliegt die Fraktionierung einigen übergeordneten Effekten. Die für diese Arbeit relevanten Effekte der Fraktionierung sind (Clark und Fritz, 2013):

- Saisoneffekt: Je höher die Umgebungstemperatur, desto mehr schwere Isotope reichern sich in der flüssigen Phase an. Sommerniederschläge enthalten somit schwerere Isotopenkompositionen als Winterniederschläge.

- Mengeneffekt: Bei länger anhaltenden Niederschlägen kommt es durch bevorzugte Kondensation von schweren Isotopen erst zum Abregnen der schweren Isotope. Mit anhaltendem Niederschlag wird die Komposition der Isotope dann zunehmend leichter.
- Höheneffekt: Die Luft kühlt beim Aufsteigen an einem Gebirge ab. Dies führt zur Kondensation und Niederschlagsbildung. Auch hier regnen sich die schweren Isotope als erstes aus, wodurch sich der Niederschlag in tieferen Lagen durch schwerere Isotopen-Kompositionen und der Niederschlag in höheren Lagen durch eine leichtere Zusammensetzung auszeichnet.

Durch verbesserte Messtechniken wird seit kurzem, neben dem schweren Wasserisotop ^{18}O, auch das leichtere Wasserisotope ^{17}O betrachtet. Dies macht nur 0.04% des natürlich vorkommenden stabilen Sauerstoffes aus. Auch ^{17}O und ^{18}O verhalten sich massenbezogen unterschiedlich bei Fraktionierungsprozessen. Bei einem Regenevent geht ^{17}O z.B. nur halb so häufig von der Gas- in die Flüssigphase über wie ^{18}O. Die Beziehung zwischen beiden Isotopen liegt jedoch nicht genau bei der Hälfte, sondern etwas höher. Das führt dazu, dass ^{17}O bei kinetischen Prozessen wie der Verdunstung oder Kondensation weniger sensitiv auf Temperaturänderungen reagiert (Picarro).

2.2.3 Wahl der End-Member-Werte

In der Literatur wird vielseitig angemerkt, dass das Ergebnis der Abflussseparation stark von den gewählten End-Member abhängt (Kronholm und Capel, 2015; La Frenierre und Mark, 2014). Dabei ist zum einen wichtig, dass sich die Signaturen einzelner End-Member deutlich unterscheiden. Zum anderen müssen die Quellkomponenten aber auch in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität erfasst werden (La Frenierre und Mark, 2014; Penna et al., 2014).

Wie stark einzelne End-Member räumlich und zeitlich aufgelöst in die Hydrograph Separation eingehen sollten, wird in der Literatur stark diskutiert. Penna et al. (2014) empfiehlt eine zeitlich hohe Auflösung der End-Member, Klaus und McDonnell (2013) betonen die Wichtigkeit des Erfassens von der räumlichen Variabilität einzelner End-Member. In hochalpinen EZG ist die räumlich und zeitlich hohe Auflösung der Quellkomponenten besonders wichtig, da die End-Member durch die Topographie besonders stark variieren (Penna et al., 2014). Die räumliche und zeitliche Variabilität im Tracersignal des End-Member auf der EZG-Skala korrekt zu erfassen, ist jedoch sehr anspruchsvoll. Es setzt ein gutes Verständnis, der Variation der Parameter in Raum und Zeit, voraus. Da dies meist nicht gegeben ist, kann durch die stark differenzierte Betrachtung der End-Member eine größere Unsicherheit der Messergebnisse entstehen (La Frenierre und Mark, 2014; Penna et al., 2014). Denn durch starke Variation der End-Member-Werte kann die Einzigartigkeit einzelner Signaturen verloren gehen (Schmieder et al., 2018). Auch kann eine hohe Auflösung der End-Member dazu führen, dass die bestimmten Abflussanteile sich durch die Variation der End-Member-Werte verändern, ohne dass es zu einer Konzentrationsänderung im Flusswasser kommt. Die Auflösung der End-Member sollte also unter Kenntnis der Limitation der Methode sowie unter Berücksichtigung der physikalischen Gegebenheiten des EZG angewendet werden (Kronholm und Capel, 2015).

Einige Autoren diskutieren, dass durch räumliche Punktproben die räumliche Variabilität der Quellkomponenten nicht erfasst werden kann (z.B. Schmieder et al., 2018). Statt reiner Proben der Quellkomponenten verwenden sie deshalb Flusswasserproben zum Zeitpunkt maximaler Anteile eines End-Members im Flusswasser. Diese Methodik führt jedoch dazu, dass entsprechende Quellkomponenten unterschätzt werden, da das Flusswasser nie zu 100% aus einer Quellkomponente besteht (Kronholm und Capel, 2015; Schmieder et al., 2018).

2.3 Modellierung der Abflussanteile

Die Modellierung ist der am häufigsten genutzte Ansatz um den Abfluss in seine Ursprungskomponenten zu zerlegen (Fohrer et al., 2016). Bei der Modellierung werden meteorologische, glaziologische und hydrologische Inputdaten verwendet. Diese werden durch lösen von Wasserbilanzgleichungen dann zu räumlich und zeitlich variierenden Werten von Grundwasser-, Regen-, Schnee und Eisschmelzflüssen transformiert (La Frenierre und Mark, 2014). Ein entscheidender Vorteil der Modellierung im Vergleich zur Messung ist, dass auch Prognosen für die Zukunft gemacht werden können (Fohrer et al., 2016).

Inzwischen gibt es eine Vielzahl hydrologischer Modelle, die unterschiedliche Komplexität aufweisen (Fohrer et al., 2016). Man unterscheidet vor allem zwischen physikalischen und konzeptionellen Modellen. Physikalische Modelle basieren auf physikalischen Prinzipien und zeichnen sich durch geringe Unsicherheiten aus. Aufgrund der hohen Komplexität benötigt es jedoch viele Inputdaten, die vor allem in kleinen EZG häufig nicht zur Verfügung stehen. Im Vergleich dazu, werden bei konzeptionellen Modellen nur wenige Inputdaten benötigt. Die Modellierung basiert hier auf statistischen Zusammenhängen von langen Zeitreihen hydrologischer Beobachtungsdaten. Konzeptionelle Modelle weisen jedoch größere Unsicherheiten auf. Häufigste Fehlerquelle bei konzeptionellen Modellen ist die " Äquifinalität". Diese beschreibt, dass es durch unterschiedliche Kombinationen einzelner Modellparameter zu dem gleichen Ergebnis kommen kann (La Frenierre und Mark, 2014). Auch unterscheiden sich einzelne hydrologische Modelle durch räumliche und zeitliche Auflösung. Die räumliche Auflösung kann dabei zwischen 25 Metern und mehreren Kilomet Äquifinalitäten-Fehler ern variieren, die zeitliche zwischen Stunden bis Monaten (La Frenierre und Mark, 2014).

2.3.1 Modellierung der Abflussanteile auf Tagesbasis

Die Modellierung der Abflussanteile auf Tagesbasis ist sehr herausfordernd, da einzelne Abflusskomponenten sich gegenseitig beeinflussen. So kommen die Quellkomponenten nach dem Eintrag in das hydrologische System nicht direkt zum Abfluss, sondern durchlaufen zuvor unterschiedliche Modellspeicher wie beispielsweise den Boden, das Grundwasser, aber auch Schnee und das Gletschereis selbst. In diesen Modellspeichern kommt es zur Mischung der Quellkomponenten, bevor das Auslaufen der Speicher den modellierten Abfluss generiert. Um die einzelnen Komponenten im Abfluss korrekt voneinander trennen zu können, müsste es möglich sein den einzelnen Komponenten durch das gesamte hydrologische System zu folgen. Das ist jedoch anspruchsvoll, da dafür komplexe Annahmen zu den

Mischungsprozessen, wie Fließgeschwindigkeit der einzelnen Abflusskomponenten und beteiligtes Mischungsvolumen des Speichers, definiert werden müssen (Weiler et al., 2018).

Die meisten Modelle ermöglichen es deshalb nicht, den einzelnen Abflusskomponenten vom Input bis zum Output durch das hydrologische System zu folgen. Stattdessen wird der Output häufig vereinfacht durch "Herkunftsräume" oder "Abfluss generierende Prozesse" abgeschätzt. Dem liegen weitreichende Vereinfachungen und Annahmen zur Systemvorstellung zugrunde, die fehlerbehaftet sind. Vor allem die Eisschmelzkomponente wird dabei meist unzureichend modelliert, da hier häufig nicht ausreichend Inputdaten zur Verfügung stehen und/oder diese separat zu den Abflusskomponenten aus Regen und Schnee berechnet wird. Kurzzeitliche Variationen auf Tagesbasis können durch diese Modelle nicht abgebildet werden und nur langzeitliche Abschätzungen der einzelnen Abflusskomponenten sind möglich (Weiler et al., 2018).

Die Betrachtung der Abflusskomponenten auf Tagesbasis ermöglicht im Vergleich zu langzeitlichen Abschätzungen jedoch einen detaillierten Einblick in die Dynamik der zugrundeliegenden hydrologischen Prozesse des entsprechenden EZG. Kurzzeitliche Betrachtungen ermöglichen zudem die Rolle der einzelnen Abflusskomponenten bei Extremereignissen wie Hoch- und Niedrigwasser abzuschätzen (Weiler et al., 2018). Um die Abflussanteile in ein EZG auf Tagesbasis jedoch zufriedenstellend modellieren zu können, muss den einzelnen Quellkomponenten auf ihrem Fließweg durch das hydrologische System gefolgt werden können (La Frenierre und Mark, 2014; Weiler et al., 2018).

2.3.2 Das HBV-Modell

Das Hydrologiska-Byrans-Vattenbalansavdelning-Modell (HBV) ermöglicht die Modellierung der Abflussanteile Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze auf Tagesbasis. Es ist ein semi-verteiltes, konzeptionelles Niederschlags-Abfluss-Modell, welches 1972 am Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) entwickelt wurde (Lindström et al., 1997). Seit dem wurde es an mehreren Instituten weltweit weiterentwickelt und modifiziert. Eine aktuelle, benutzerfreundliche HBV-Modellversion ist das HBV-Light (Seibert und Vis, 2012).

Das HBV-Light Modell versucht die Abflusskomponenten möglichst prozessgetreu zu simulieren. Eine klare Trennung der Quellkomponenten bei Input sowie eine Verfolgung der einzelnen Abflusskomponenten („Particel tracking") durch das hydrologische System sind möglich (Stahl et al., 2016). Zudem erlaubt das HBV-Light, den Effekt der einzelnen Komponenten auf den Abfluss in seinem Wellenverlauf zu erfassen („Effect tracking") (Stahl et al., 2016). Während das „Particel tracking" also den tatsächlichen Anteil einer Abflusskomponente im Abfluss bestimmt, wird durch das „Effect tracking" das durch die Abflusskomponenten verursachte Abflussvolumen dargestellt (Weiler et al., 2018). Grund der unterschiedlichen Betrachtungen ist, dass durch bestimmte Abflusskomponenten ausgelöste Abflussreaktionen den Pegel häufig vor dem tatsächlichen Eintreffen der entsprechenden Konzentrationen der Quellkomponente erreichen. Die bei „Effect tracking" ermittelten Abflussanteile zum Zeitpunkt eines

Ereignisses entsprechen somit weniger den tatsächlichen Konzentrationen der entsprechenden End-Member, sondern vielmehr dem Effekt, den ein End-Member auf den resultierenden Abfluss hat. Das „Effect tracking“ bietet im Vergleich zum „Particel tracking“ also detaillierte Einblicke in einzelne Extremereignisse zu Hoch- und Niedrigwasserphasen. Zudem ist im Vergleich zum „Particel tracking“ die Modellierung des „Effect tracking“ nicht abhängig von den Eigenschaften des hydrologischen Systems, sondern ausschließlich von der Wasserbilanz (Weiler et al., 2018).

3 Problemstellung und Zielsetzung

Im Zuge des Klimawandels ändern sich Schmelzprozesse von Schnee und Gletschereis und somit auch deren Beitrag zur Abflussbildung. Da beide Schmelzkomponenten wichtige Frischwasserlieferanten in den Sommermonaten sind, hat das weitreichende Folgen für Mensch und Natur. Um die Ressource Wasser nachhaltig managen zu können ist es deshalb wichtig, die Anteile von Schnee- und Eisschmelze im Abfluss zu erfassen, um daraus Prognosen für deren zukünftige Entwicklung abzuleiten (Fohrer et al., 2016; La Frenierre und Mark, 2014; Stahl et al., 2016). Die Anteile der Abflusskomponenten glazial geprägter EZG wurden bereits durch mehrere Studien erfasst (z.B. Engel et al., 2016, Huss, 2011; Schmieder et al., 2018). Nur wenige Studien betrachten jedoch die Quellkomponenten Regen, Schnee und Gletschereis gemeinsam (Penna et al., 2014; Stahl et al., 2016). Zudem sind die meisten der Studien zeitlich nur gering aufgelöst und ermitteln die Abflussanteile auf monatlicher bis jährlicher Basis (z.B. Huss, 2011; Penna et al., 2014). Kurze Zeitschritte würden hingegen einen detaillierteren Einblick in die der Abflussbildung zugrundeliegenden Prozesse geben (Stahl et al., 2016).

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, die Abflussanteile der Schwarzen und Weissen Lütschine für die Schmelzsaison 2018 auf täglicher Basis zu quantifizieren. Die Abflussanteile werden dabei sowohl empirisch, als auch durch hydrologische Modellierung bestimmt, wobei der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der messtechnischen Erfassung liegt. Für die empirische Bestimmung der Abflussanteile wird ein Messnetzt aufgebaut, das hauptsächlich aus sechs Messstandorten besteht, an denen tägliche Flusswasserproben entnommen werden. Der Abfluss wird dann durch die hydrochemische Analyse der Flusswasserprobe und anschließendes Anwenden der EMMA getrennt. In dieser Arbeit werden zum Beschreiben der Quellkomponenten die Umwelttracer der stabilen Wasserisotope sowie der Hauptionen des Flusswassers verwendet. Für die modelltechnische Erfassung der Anteile der Abflusskomponenten wird das konzeptionelle Niederschlags-Abflussmodell HBV-Light verwendet. Um die dieser Arbeit zugrundeliegende Methodik der Abflussseparation zu evaluieren, werden außerdem die folgenden, untergeordneten Forschungsfragen gestellt:

- **(a)** Ist der Aufbau des Messnetztes geeignet, um die Abflusskomponenten Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze gut zu erfassen?
- **(b)** Ist die EMMA als Analysewerkzeug für die Abflussseparation auf Tages-Basis geeignet?
    - **(i)** Beschreiben die stabilen Wasserisotope sowie die Hauptionen des Flusswassers als Tracer die betrachteten Quellkomponenten?
    - **(ii)** Ist es ausreichend die schnellen Fließkomponenten Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze zu betrachten oder spielen weitere langsame Fließkomponenten eine bedeutende Rolle bei der Abflussbildung?
- **(c)** Wie gut stimmen die empirisch ermittelten Abflussanteile mit denen im HBV-Light modellierten Abflussanteilen überein?

4 Methodik

4.1 Standort Beschreibung

Die EZG Schwarze und Weisse Lütschine liegen im Berner Oberland nördlich des Alpenhauptkammes, der die Gipfel Eiger, Mönch und Jungfrau sowie das Schreckhorn und Wetterhorn beinhalten (Abbildung 3). Die Weisse Lütschine fließt durch das Lauterbrunnental, während die Schwarze Lütschine das benachbarte Lütschental entwässert. Bei Zweilütschinen fließen Schwarze und Weisse Lütschine zusammen und heißen dann nur noch Lütschine, bis sie bei Interlaken in den Brienzersee mündet (Schulte et al., 2009).

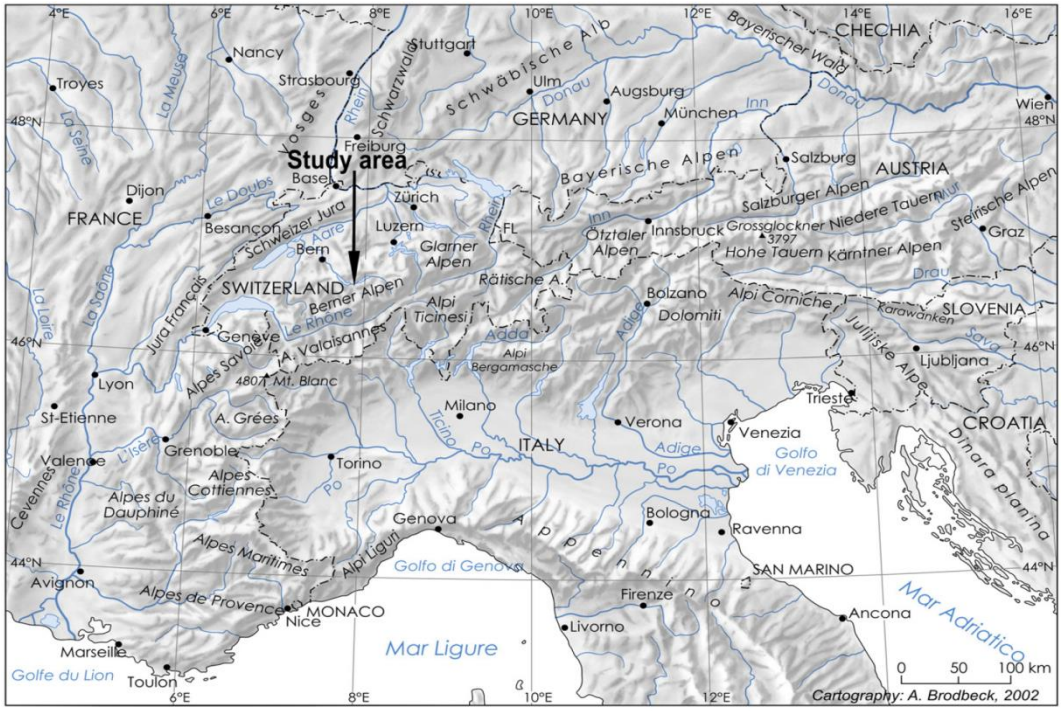


Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebietes im Berner Oberland der Schweizer Alpen (Schulte et al., 2009)

Die Weisse Lütschine entsteht südlich der Ortschaft Stechelberg durch den Zusammenfluss von drei Gletscherbächen, die den Tschingelfirn Gletscher, den Wetterrücken Gletscher und den Breithorn und Schadri Gletscher entwässern. In Stechelberg mündet die Sefinen-Lütschine, welche das westlich liegende Sefinental entwässert in die Weisse Lütschine. Über eine Länge von rund 18 km des Hauptlaufes entwässert die Weisse Lütschine eine EZG-Fläche von rund 165 km² (Tabelle 1).

Das EZG der Schwarzen Lütschine hat mit 180 km² eine ähnliche Größe wie das der Weissen Lütschine und auch die Länge des Gesamtflusslaufes weist die gleiche Größenordnung auf (Tabelle 1). Die Schwarze Lütschine entspringt dem Ausfluss des Oberen Grindelwaldgletschers. Unmittelbar nach dem Eintritt in das Tal, mündet der Bärgelbach als erster großer Zufluss in die Schwarze Lütschine.

Tabelle 1: Wichtige Kenngrößen zur Beschreibung der EZG Schwarze und Weisse Lütschine. Für die Kennwerte des Abflusses wird im EZG der Weissen Lütschine der Pegel „Zweilütschine“ der BAFU verwendet. Für das EZG der Schwarzen Lütschine wird vereinfacht die Differenz der Abflusswerte des Pegels „Gsteig“ nach dem Zusammenfluss sowie dem Pegel „Zweilütschine“ verwendet.

Kategorie	Kenngrößen der EZG	Weisse Lütschine	Schwarze Lütschine
Eckdaten	EZG Fläche [km²]	165	180
	Länge Hauptflusslauf [km]	18	19
	Höhenausdehnung [m ü. M.]	650-4150	650-4078
Gletscher	Vergletscherungsgrad 2010 [%]	17	21
	Vergletscherungsfläche 2010 [km²]	19.5	37.8
Abfluss	MQ 1933-2016 [m³/s]	7.66	11.54
	HQ 1933-2016 [m³/s]	63.5	66,5
	HHQ 1933-2016 [m³/s]	112 (2011)	145 (2005)
Klima	Mittl. jähr. Nd. Interlaken [mm/a]	1200	
	Mittl. jähr. Nd. Jungfrau [mm/a]	2800	
	Mittl. jähr. Temp. Interlaken [°C]	7.4	
	Mittl. jähr. Temp. Grindelwald [°C]	4.5	

4.1.1 Topographie und Geologie

Die EZG der Schwarzen und Weissen Lütschine umfassen je einen großen Höhenunterschied zwischen Auslass und den höchsten Gipfeln der EZG. Der tiefste Punkt beider EZG ist der Zusammenfluss von Weisser und Schwarzer Lütschine auf etwa 650 m ü. M. Der höchste Punkt im EZG der Weissen Lütschine liegt bei 4150 m ü. M., am Gebirgszug der Jungfrau. Der höchste Punkt im EZG der Schwarzen Lütschine ist am Schreckshorn auf 4078 m ü. M. Beide EZG weisen somit subalpine, alpine sowie hochalpine Charakteristiken auf (Schulte et al., 2009).

Das anstehende Gestein variiert in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine räumlich stark. Dabei lässt sich die Lithosphäre beider EZG vereinfacht in drei Zonen, von Norden nach Süden, einteilen (Abbildung 4). Die nördlichste Zone beschreibt das Gebiet bis zu einer Höhe von 2100 m ü. M. Diese Zone besteht überwiegend aus kalkhaltigem Gestein wie Mergel und Kalkstein. Der anschließende zentrale Bereich des EZG, der einen Höhenbereich bis 2928 m ü. M. beschreibt, besteht ebenfalls überwiegend aus Kalkstein sowie Sandstein. Außerdem erstreckt sich am südlichen Rand der zentralen Zone ein dünnes Band aus Mergel. Auch treten im zentralen Bereich der EZG Schiefereinlagerungen auf. Im EZG Schwarzen Lütschine sind diese für die namengebende charakteristische Farbe des Flusswassers verantwortlich. Der südliche Teil der Lithosphäre der EZG erstreckt sich bis zu den Gipfeln. In den tieferen Lagen steht hier ebenfalls Kalkgestein an, die Gipfelregionen werden jedoch durch kristallines Ausgangsgestein geprägt. Die Gletscher der EZG liegen somit überwiegend auf Granit und Gneis des Aare Massives (Schulte et al., 2009). Durch starke Erosion des anstehenden Gesteins, fließen die Schwarze und Weisse Lütschine auf einem Bachbett aus Geröll und fluvialem Sedimenten (Schulte et al., 2009).

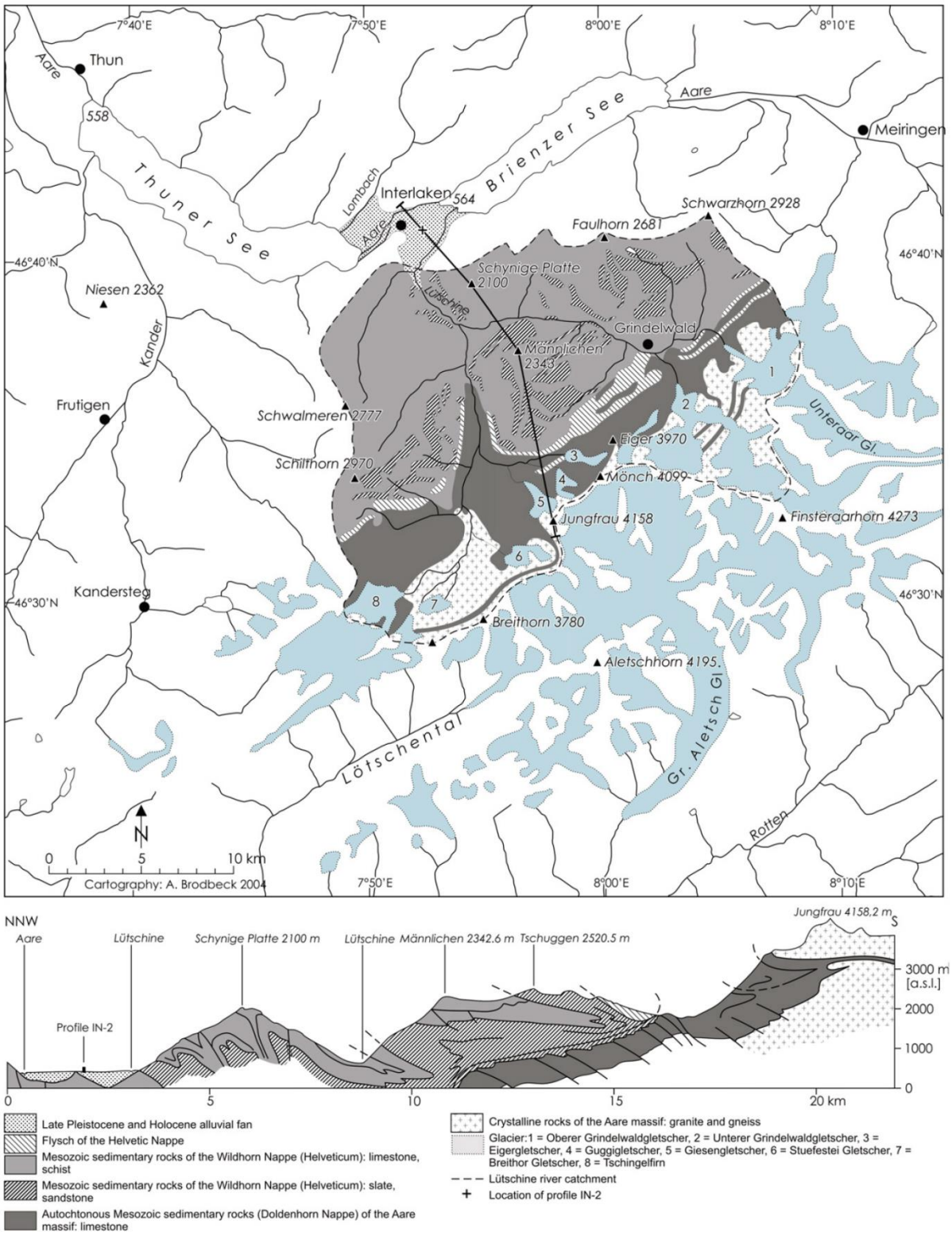


Abbildung 4: Dominierendes Ausgangsgestein in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine als gemeinsame Draufsicht (oben) sowie in einem von Nord nach Süd gezogenen Längsschnitt (unten). Die Lage des Längsschnitts verläuft etwa zwischen den beiden EZG und ist in der Draufsicht eingezeichnet (Schulte et al., 2009)

4.1.2 Vergletscherung der Gebiete

Die Weisse und Schwarze Lütschine sind mit rund 17% bzw. 21% zwei stark vergletscherte EZG der Schweiz (Tabelle 1). Der größte Gletscher im EZG der Weissen Lütschine ist der Tschingelfirn (Abbildung 4). Der Rottalgletscher ist im gleichen EZG nur der 11 größte Gletscher. Im EZG der Schwarzen

Lütschine sind der Obere und Untere Grindelwaldgletscher die größten Gletscher (Abbildung 4). Mit dem Ischmeer machen sie über 90% der vergletscherten Fläche des EZG aus.

Durch den Klimawandel sind die Gletscher in den EZG stark am Zurückgehen. Das Maß des Rückzuges ist dabei von der Höhenlage des entsprechenden Gletschers sowie von der Klimasituation einzelner Jahre abhängig. So wurde 2016 beispielsweise für den Oberen Grindelwaldgletscher ein Rückzug um 42 m und für den tiefergelegeneren Unteren Grindelwaldgletscher sogar ein Rückzug um 370 m gemessen (GLAMOS, 2015).

4.1.3 Klima und Abfluss

Die EZG der Schwarzen und Weissen Lütschine liegen in der Region mit den höchsten jährlichen Niederschlägen der Schweiz (Fohrer et al., 2016). Dabei unterscheiden sich die jährlichen mittleren Niederschlagsraten innerhalb der EZG mit dem Höhengradienten stark. Während es bei Interlaken zum mittleren jährlichen Niederschlag von rund 1200 mm kommt, liegt das Jahresmittel am Jungfrau Massiv (4150 m ü. M.) bei 2800 mm (Tabelle1) (Schulte et al., 2009). Auch zeigt der Niederschlag in den EZG eine klare Saisonalität, mit rund doppelt so hohen Niederschlägen im Sommer wie im Winter. Der Juli ist dabei der Monat mit den durchschnittlich höchsten Niederschlagsanteilen (Umbricht et al., 2013).

Auch die Temperatur folgt in den EZG einem starken Höhengradienten. Während sie bei Interlaken ein jährliches Mittel von 7.4°C hat, beträgt sie in Grindelwald durchschnittlich lediglich 4.5°C (Tabelle1). Ab etwa 1000 m ü. M. bildet sich in den EZG während der Wintermonate eine geschlossene Schneedecke aus. Mittlerer Niederschlag und Temperatur schwanken in den EZG jedoch je nach klimatischen Bedingungen von Jahr zu Jahr stark (Wyss, 2016).

Die Abflüsse in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine folgen einem glazio-nivalen Abflussregime. Der Abfluss beider Flüsse ist somit von Schnee- und Gletschereisschmelze in den Sommermonaten dominiert und hat sein Maximum zwischen Juni und August (BAFU, 2018a, 2018b). Der mittlere jährliche Abfluss (MQ) liegt im EZG der Schwarzen Lütschine mit rund 12 m^3/s etwas höher als der im EZG der Weissen Lütschine mit 8 m^3/s. Das gleiche gilt für die mittleren jährlichen Hochwasserwerte (HQ), die an der Weissen Lütschine Abflusswerte von 64 m^3/s und an der Schwarzen Lütschine Werte von 67 m^3/s erreichen. Der höchste gemessene Abflusswert (HHQ) wurde an der Weissen Lütschine 2011 gemessen und betrug 112 m^3/s. An der Schwarzen Lütschine belief sich der HHQ auf 145 m^3/s und wurde im Jahr 2005 aufgezeichnet (Tabelle 1, BAFU, 2018a, 2018b).

4.1.4 Anthropogener Einfluss

Die alpinen und subalpinen Zonen im EZG der Schwarzen und Weissen Lütschine werden durch Beweidung (44% der Fläche) und den Tourismus intensiv bewirtschaftet (Schulte et al., 2009). Für den hydrologischen Wasserkreislauf spielt dabei vor allem die mit dem Ski-Tourismus einhergehende Beschneiung eine wichtige Rolle.

Zum Hochwasserschutz wurde in beiden EZG stark in den Gewässerverlauf eingegriffen. Vor allem die Schwarze Lütschine ist gebietsweise stark befestigt, bis hin zu kanalisiert (LANAT, 2018; Kohler, 2018). In den steilen Flussabschnitten ist jedoch in beiden EZG der natürliche Flusslauf weitgehend erhalten (LANAT, 2018). Zudem sind in beiden EZG Wasserkraftwerke installiert. Im EZG der Weissen Lütschine, bei der Mündung der Sefinen Lütschine in die Weisse Lütschine, befindet sich nahe Stechelberg eine Wasserkraftanalage mit einer installierten Leistung von 4.3 MW (EWL Genossenschaft, 2014). Im EZG der Schwarzen Lütschine besteht das Kraftwerk Lütschental bei Stalden, welches eine installierte Leistung von 11,5 MW hat (Jungfraubahnen, 2018).

4.2 Aufbau Messnetz

Grundfunktion des aufgebauten Messnetzes ist es eine hohe Dichte an Flusswasserproben zu generieren. Dazu wurden an drei Standorten je EZG tägliche Flusswasserproben entnommen. Die Messstandorte wurden dabei so gewählt, dass sie am Auslass charakteristischer Teileinzugsgebiete (TEZG) liegen. Um außerdem Variationen der Abflussanteile im Tagesgang erfassen zu können, wurden an jedem Standort zwei 24h- Messungen durchgeführt. Neben den Flusswasserproben wurden außerdem reine End-Member-Proben genommen. Dabei handelt es sich um räumliche und zeitliche Mischproben von Schnee, Gletschereis und Regen sowie regelmäßige Grundwasserproben.

4.2.1 Wahl und Beschreibung der Messstandorte

Um Aussagen über die Abflussanteile im gesamten EZG der Schwarzen und Weissen Lütschine treffen zu können, wurde je ein Messstandort am Auslass der EZG aufgebaut. Um zudem detailliertere Einblicke in die abflussbildenden Prozesse von Schnee- und Eisschmelze zu erhalten, wurde pro EZG je ein Messstandort mit stark vergletschertem TEZG und ein Messstandort mit nicht vergletschertem TEZG aufgebaut. Mittels des stark vergletscherten TEZG soll der Anteil der Gletschereisschmelze im Abfluss, in seiner zeitlichen Variation, gut erfasst werden. Das nicht vergletscherte TEZG soll den Effekt der Schneeschmelze unabhängig von der Gletscherschmelze abbilden.

Die Messstandorte am Auslass der EZG wurden in unmittelbarer Nähe zu einem festen Pegel des Bundesamt für Umwelt (BAFU) bzw. des Kantons Bern aufgebaut, um die Abflussanteile später auf einen festen Abflusswert beziehen zu können. Der Messstandort „**Weisse Lütschine Pegel (WLP)**“ am Auslass des EZG der Weissen Lütschine liegt deshalb am Pegel „Zweilütschinen“ der BAFU (Abbildung 5; Tabelle 2). Im EZG der Schwarzen Lütschine gibt es unmittelbar vor dem Zusammenfluss mit der Weissen Lütschine keinen festen Pegel. Deshalb wurde der Messstandort **„Grindelwald Grund (GG)“** am Pegel „Grindelwald Grund“ des Kantons Bern platziert, welcher mittig im EZG liegt. Trotz der Lage des Messstandortes in der Mitte des EZG wird angenommen, dass er das ganze EZG repräsentiert, da er nach den Zusammenflüssen der größten Zuflüsse der Schwarzen Lütschine liegt.

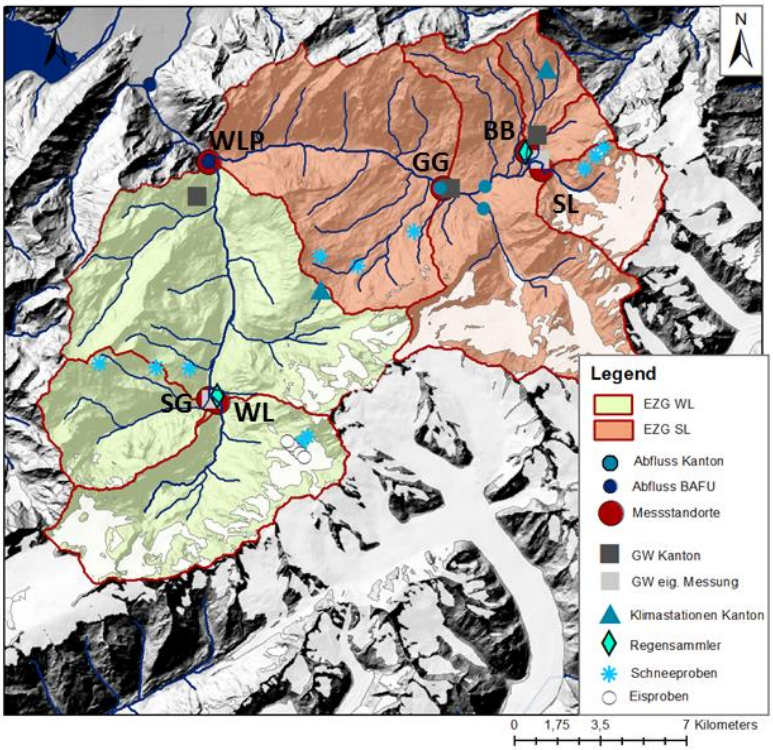


Abbildung 5: Lage der Messstandorte der Flusswasser-, Schnee-, Gletschereis-, Grund- und Regenwasserproben. Außerdem Lage der Abfluss-, Klima- und Grundwassermessstation der BAFU/des Kantons Bern

Im EZG der Weissen Lütschine repräsentiert der Standort „**Weisse Lütschine (WL)**“ das TEZG mit großem Anteil vergletscherter Fläche und der Standort „**Sefi-Litschena (SG)**“ das TEZG ohne Vergletscherung. Äquivalent dazu repräsentiert im EZG der Schwarzen Lütschine der Standort „**Schwarze Lütschine (SL)**“ das TEZG mit hohem Vergletscherungsgrad, während das TEZG des „**Bärgelbach (BB)**“ keine vergletscherte Fläche aufweist.

Tabelle 2: Metadaten der Messstandorte mit Flusswasserprobensammler und Pegel

EZG	Standort	Kürzel	Lage (GK)	Funktion	Probensammler	Pegel Inst.
Schwarze Lütschine	**Schwarze Lütschine**	**SL**	34.29414 51.66035	stark vergletschert	ISCO	ab 15.05.18
	Bärgelbach	**BB**	34.28813 51.66419	nicht vergletschert	ISCO	ab 15.05.18
	Grindelwald Grund	**GG**	34.25328 51.65219	gesamtes EZG	ISCO	nein
Weisse Lütschine	**Weisse Lütschine**	**WL**	34.15924 51.56671	stark vergletschert	ISCO	ab 15.05.18
	Sefi-Litschena	**SG**	34.15651 51.56875	nicht vergletschert	SIGMA	ab 15.05.18
	Weisse Lütschine Pegel	**WLP**	34.15873 51.66344	gesamtes EZG	ISCO	ab 02.07.18

4.2.2 Probennahme der Flusswasserproben

Über den Zeitraum vom 16.05.18 bis zum 01.09.18 werden auf täglicher Basis an allen sechs Standorten Flusswasserproben genommen. Vom 06.06.18 auf den 07.06.18 sowie vom 10.08.18 auf den 11.08.18 bzw. vom 11.08.18 auf den 12.08.18 werden außerdem 24h-Stundenmessungen durchgeführt, bei denen stündlich Flusswasserproben gezogen werden.

Die Flusswasserproben werden mit automatischen Probensammlern entnommen. Für fünf Standorte wird der 3700 Portable Samplers (Teledyne **ISCO**) verwendet (Teledyne Isco, 2009). Diese sind mit 24 x 1 Liter Hartplastikflaschen (HDPE) bestückt. An einem Standort wird ein **Sigma** 900 Composite Sampler (Hach) installiert (Hach Company, 2003). Dieser ist ebenfalls mit 24 HDPE ausgestatten, welche ein Fassungsvermögen von 0,5 l besitzen.

Die Probennahme findet über einen herkömmlichen Gartenschlauch statt, welcher im Flussbett befestigt ist. Diesem ist ein Filter aufgesetzt um ein Verstopfen des Schlauches mit Sediment zu vermeiden. Über den Schlauch gelangt das Flusswasser dann in die Probenflaschen der Probensammler. Diese haben einen mehreren cm breiten, offenen Flaschenhals, wodurch die Flusswasserproben nach der Entnahme der Verdunstung unterliegen. Um dies zu mindern bzw. zu vermeiden werden die Probenflaschen mit einer etwa 3 cm dicken Schicht aus Styroporkugeln (Ø=1mm) versehen (Abbildung 6). Um dem Styropor in der Flasche Platz zu geben, wird das Probevolumen in den ISCO-Sampler auf 800 ml und im Sigma-Sampler auf 450 ml eingestellt.

Abbildung 6: Gefüllte Probenflaschen mit aufschwimmendem Styropor im ISCO Autosampler

Nach je ca. 24 Tagen werden die automatisch genommenen Proben geleert und die Autosampler für den nächsten Messzyklus vorbereitet. Dazu werden die Flusswasserproben in 100 ml große Schmalhalsglasflaschen aus Braunglas gefüllt. Die Braunglasflaschen werden fest verschlossen und im Feld ungekühlt gelagert. Im Labor werden sie dann bis zur Analyse im Kühlschrank aufbewahrt. Die Sampler-Flaschen werden anschließend geleert und die Flaschen sowie die darin enthaltenen Styroporkugeln mit etwa 500 ml Reinstwasser gespült. Anschließend werden sie zurück in den Autosampler gestellt. Der entstehende Fehler durch anhaftendes Wasser an Flasche und Styropor wird in einem Vorversuch im Labor abgeschätzt.

Alle Probennehmer werden so programmiert, dass die Flusswasserprobe täglich um 16 Uhr aus dem Fluss gezogen wird. Die Uhrzeit wird gewählt, da zu diesem Zeitpunkt das Maximum des Schmelzwasseranteils geschätzt wird. Ab dem 02.07.18 wird die Probennahme am Standort „Pegel Weisse Lütschine“ auf 18 Uhr verlegt, da dort Bauarbeiten unmittelbar oberhalb der Probeentnahmestelle beginnen. Um 18 Uhr sind die täglichen Bauarbeiten beendet und die Flusswasserproben können so im möglichst ungestörten Zustand genommen werden.

4.2.3 Leitfähigkeit- und Wasserstandmessung

An den Standorten SL, BB, WL, SG und WLP wird zu den automatischen Probesammlern je ein Pegel installiert (Tabelle 2). Die Pegel bestehen aus einer Ott-**CTD-Sonde** (Version 01-1009), die geschützt in einem Pegelrohr, Temperatur, Leitfähigkeit sowie den Druck der Wassersäule im 5-Minutenintervall erfasst (OTT Hydromet GmbH, 2009).

Die verwendeten PVC-Pegelrohre sind Filterrohre mit einer Schlitzweite von 1mm. Die je 2 m langen Rohre haben einen Trapezgewindeverbinder, wodurch sie je nach Standort zu der benötigten Gesamtlänge zusammengeschraubt werden können. Bei der Installation der Geräte wird vor allem darauf geachtet, dass der Messstandort ein möglichst aufrechtes Installieren des Pegelrohres ermöglicht und (soweit möglich) das Pegelrohr in einer beruhigten Zone des Fließfeldes liegt. Das aufrechte Stehen des Rohres ist für die korrekte Wasserstandmessung von Bedeutung. Der beruhigte Fließbereich ist für die Messung der Leitfähigkeit wichtig, da dafür laminare Fließbedingungen gegeben sein sollten. Außerdem wird bei der Standortwahl darauf geachtet, dass der Pegel bei erhöhtem Sediment- bzw. Geschiebe-Transport im Fluss nicht beschädigt wird. Beispielhaft ist in Abbildung 7 das installierte Pegelrohr am Standort BB abgebildet.

Die CTD-Sonde wird anschließend so im Pegelrohr befestigt, dass sie unmittelbar über dem Grund des Pegelrohres schwebt. Mit der herstellereigenen Software wird die Sonde dann auf das gewünschte Messintervall von 5 Minuten eingestellt und auf die vorhandene Wasserhöhe kalibriert. Die Wasserhöhe wird zuvor mit dem Wasserlot gemessen und in Bezug zur Oberkante des Pegelrohres angegeben. Der Wasserstand wird später als Höhendifferenz, in Bezug zur eingemessenen Referenzhöhe des Wasserstandes, durch das Programm ausgegeben. Bei jeder Leerung der automatischen Probensammler werden die Pegeldaten ausgelesen und zu mehreren Zeiten der Wasserstand manuell mittels des Wasserlotes überprüft. Zudem wird am 11.07. und 12.07. an allen Pegelstandorten manuell die Wassertemperatur und Leitfähigkeit mit dem pH METER (Version PCE-228) gemessen. Dies dient später der Plausibilisierung der CTD-Messdaten.

Abbildung 7: Installiertes Pegelrohr mit CTD-Sonde am Standort Bärgelbach, links bei niedrigem Wasserstand und rechts bei hohem Abfluss mit viel Sedimentfracht

Bei dem Standort Grindelwald Grund wird aus Kapazitätsgründen auf die Installation eines Pegels verzichtet. Hier sowie am „Pegel-Weisse-Lütschine“ wird jedoch der Abfluss durch den Kanton Bern gemessen, wodurch nur die Parameter Leitfähigkeit und Temperatur an diesem Standort fehlen.

4.2.4 Probennahme Schnee

In den EZG Schwarze und Weisse Lütschine werden an vier Standorten Schneeproben genommen (Abbildung 5). Die Standorte **Schilthorn (Schi)** und **Rottalgletscher (RT)** liegen im EZG der Weissen Lütschine. Die Messstandorte **Honegg (Hon)** und **Chrinnenhorn (Ch)** liegen hingegen im EZG der Schwarzen Lütschine. Bei den Proben handelt es sich um zeitliche Punktproben, d.h. jeder Messstandort wird in der Schmelzsaison nur einmal beprobt. An den unterschiedlichen Schneemessstandorten werden die Proben jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten genommen. In den tieferen Lagen (Schilthorn und Honegg) am Anfang der Schmelzsaison und in den höheren Lagen (Rottal und Chrinnenhorn) aus Zugänglichkeitsgründen am Ende der Schneeschmelzsaison.

Je Schneemessstandort wird ein Höhentransekt aus meist drei Proben genommen, um die höhenabhängige Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Schnees zu erfassen. In Kombination mit den Zeitpunkten der Schneeschmelze je Höhenlage, kann daraus später, trotz zeitlich punktueller Proben, der End-Member Schnee zeitlich differenziert betrachtet werden. Die Entnahme der Schneeproben erfolgt mittels Pegelrohre, welche ebenfalls für die installierten Pegel gebraucht werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Pegelrohre werden senkrecht in die Schneeoberfläche getrieben und vorsichtig herausgezogen (Abbildung 8).

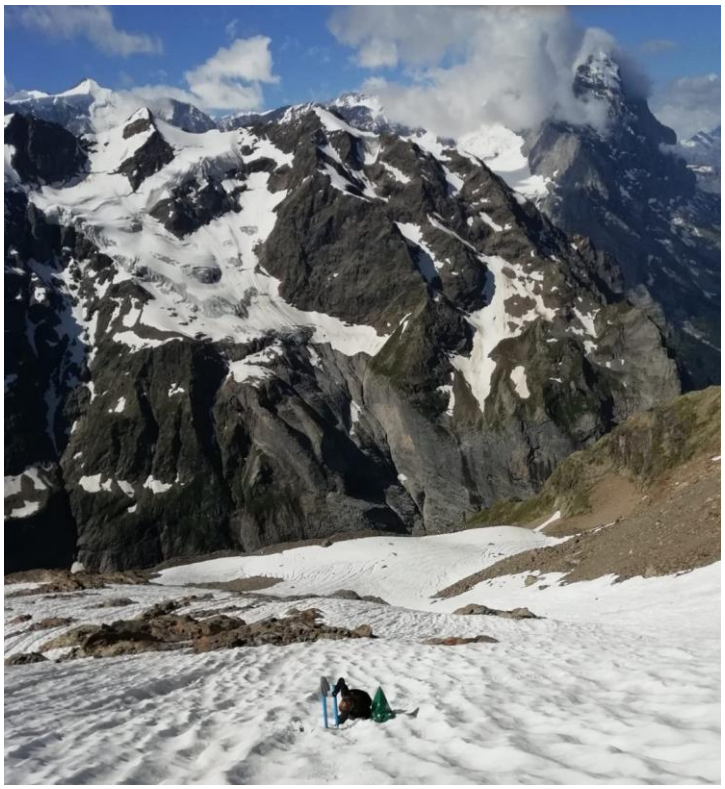


Abbildung 8: Schneeprobennahme mit dem Pegelrohr am Chrinnenhorn

Der im Rohr anhaftende Schnee wird dann in eine große Plastiktüte entleert. Dies wird so lange wiederholt, bis man auf Boden trifft oder die Maximallänge der Pegelrohre erreicht wird. In der Plastiktüte entsteht somit eine Mischprobe über die gesamte Tiefe der Schneedecke. Ist die Maximaltiefe erreicht, wird der Schnee in der Plastiktüte gut vermengt und eine Probe in eine Weithals-HPET mit dem Fassungsvolumen von 1 Liter gegeben. Auch hier ist wichtig darauf zu achten, den Deckel fest zu verschließen um Verdunstungsverluste zu vermeiden. Die Flasche wird ungekühlt gelagert, sodass der Schnee geschmolzen ist, bis die Probe das Labor erreicht. Dort wird ein Teil der Probe sofort in eine 100 ml Braunglasflasche gefüllt, welche später für die Analyse verwendet wird. Durch das Umfüllen in eine kleinere Flasche wird der Verdunstungsverlust über einen großen Headspace, welcher in der Plastikflasche durch Schmelzen des Schnees entsteht, vermieden.

4.2.5 Probennahme Eis

Die Probennahme der Eisproben erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie die Schneeprobennahmen. So handelt es sich auch hier um zeitlich und räumlich variierende Punktproben. Die Eisproben werden an zwei Standorten je EZG genommen. Für das EZG Schwarze Lütschine sollen repräsentative Eisproben am **Oberen Grindelwaldgletscher** genommen werden, für das EZG Weisse Lütschine am **Rottalgletscher** (Abbildung 5, Abbildung 9).

Abbildung 9: Oberer Grindelwaldgletscher (links) und Rottalgletscher (rechts)

Genau wie die Schneeproben wird auch die chemische Zusammensetzung des Gletschereises über ein Höhentransekt erfasst. Der Transekt besteht aus fünf Messpunkten, welche sich in regelmäßigen Abständen über die gesamte, zugängliche Längsausdehnung des Gletschers erstrecken. Bei der Entnahme der Eisproben wird darauf geachtet, dass nur dort eine Eisprobe genommen wird, wo in der Schmelzsaison auch Eisschmelze stattfindet, somit unterhalb der Equilibrium Line Altitude (ELA). Diese wird vereinfacht durch die Höhe der Schneedecke auf dem Gletscher abgeschätzt. Die Eisproben werden als Festeisproben von der Gletscheroberfläche genommen. Dazu werden mit dem Eispickel die ersten Zentimeter der Eisschicht abgetragen, um eine Verschmutzung der Proben zu vermeiden. Anschließend wird mit dem Pickel das Eis oberflächlich abgeschabt und in eine 250 ml HTPL gefüllt. Diese wird fest verschlossen und ungekühlt gelagert. Äquivalent zur Schneeprobe werden sie im Labor sofort in eine kleinere 100 ml Braunglasflasche gefüllt, um den Headspace zu verringern, und dort im Kühlschrank bis zur Analyse aufbewahrt. Zum Vergleich von Festeis- und Flüssigeisproben wurden außerdem zwei Flüssigeisproben an der Oberfläche des Gletschers genommen.

4.2.6 Probennahme Regen

Die Regenwasserproben werden als bulk sample mittels Regenwassersammlern nach dem Prinzip von Gröning et al. (2012) erfasst. Dazu wird je EZG ein Regensammler aufgestellt, der bei jeder Leerung der automatischen Probensammler geleert wurde. Die Mischproben umfassen somit meist 24 Tage. Kommt es über die Dauer der Leerung aller Messgeräte zu Niederschlagsereignissen, werden außerdem kurzzeitige Mischproben eines Events aufgenommen. Die Regensammler werden in den oberen Teilen der EZG aufgestellt. Im EZG Schwarze Lütschine unmittelbar am Messstandort BB, im EZG Weisse Lütschine etwa 1 km entfernt vom Standort WL (Abbildung 5).

Bei der Konstruktion der Regensammler wird nochmals nach dem Prinzip von Gröning et al. (2012) versucht die Verdunstung der Regenwasserprobe möglichst gering zu halten. Dazu wird der 20 l Sammelkanister möglichst luftdicht verschlossen. Das im Trichter (Ø 22 cm) gesammelte Regenwasser wird über ein Schlauchstecksystem in den Kanister geleitet (Abbildung 10). Durch das Stecksystem wird der

Durchmesser des Schlauches reduziert, wodurch er beim Eintritt in den Kanister nur noch einen Durchmesser von 7 mm hat. Der Schlauch tritt durch eine passgenaue Öffnung im Kanister Deckel, die zunächst durch Silikon und anschließend mit Epoxidharz abgedichtet wird. Druckausgleich findet über einen zweiten Schlauch im Deckel statt, welcher einen Durchmesser von 1 mm hat und 11 m lang ist. Die Öffnung des Kanisters nach oben, über welche Verdunstung stattfinden könnte, ist somit sehr gering gehalten. Als weiterer Verdunstungsschutz, wird der Kanister zu 2/3 in den Boden eingegraben.

Abbildung 10: Niederschlagssammler nach dem Prinzip von Göring et al. (2012)

Beim Aufbau der Niederschlagssammler wird darauf geachtet, dass der Sammler nicht in unmittelbarer Nähe von Bäumen oder Hauswänden steht. Auch der Trichter wird nach DIN-Norm auf einer Höhe von 1,5 m befestigt. Trotzdem handelt es sich in Bezug auf die Niederschlagsmenge um keine repräsentative Messung. Die Niederschlagsmenge wird deswegen nicht gemessen und nicht berücksichtigt. Bei der Probenleerung wird die Regenwasserprobe vor Ort in eine 1 l große Braunglasflasche abgefüllt. Handelte es sich um nur geringe Regenwassermengen wird eine 100ml Braunglasflasche verwendet. Im Labor werden die Proben dann mit den restlichen Proben bis zur Analyse gekühlt gelagert. Der Kanister wird nach der Leerung mit Reinstwasser gespült und für den nächsten Probenzyklus wieder eingegraben. Um die Verdunstung während des Messzeitraums über den abschraubbaren Deckel zu reduzieren, wird dieser vor jedem Messzyklus mit Panzertape verschlossen (Abbildung 10).

4.2.7 Probennahme Grund- und Bodenwasser

Die Grundwasserproben werden als räumlich und zeitlich variierende Punktproben erfasst. Es wird je ein Messstandort je EZG gewählt, bei dem bei jeder Leerung der automatischen Probensammler auch eine Grundwasserprobe entnommen wird. Im EZG der Schwarzen Lütschine liegt die Grundwassermessstelle am ehemaligen Grundwasserbrunnen des Kantons Bern „Klecki“ (Abbildung 11). Der Brunnen liegt mittig zwischen den Messstandorten SL und BB (Abbildung 5). Von Vorteil ist, dass neben den eigenen Messungen im Sommer 2018, eine Messzeitreihe des Kantons von 2010 bis 2014 vorliegt.

Im EZG der Weissen Lütschine dient ein herkömmlicher Brunnen der Probennahme. Die Gemeinde Stechelberg bereitet das Trinkwasser nur durch UV-Bestrahlung auf, wodurch hier die Grundwasser-Probe dem Leitungswasser entnommen werden kann. Der Brunnen liegt ebenfalls im oberen Teil des EZG zwischen den Messstandorten WL und SG (Abbildung 5). Die Grundwasserproben werden in 100 ml Braunglasflaschen gefüllt und im Feld ungekühlt gelagert. Im Labor werden sie dann im Kühlschrank aufbewahrt bis sie analysiert werden. Um neben dem Grundwasser den Einfluss von Bodenwasser auf die Abflussbildung einschätzen zu können, werden außerdem zeitlich und räumlich variierende, punktuelle Bodenwasserproben genommen. Dies findet zum einen in einer Feuchtfläche oberhalb des Messstandortes BB und zum anderen an einer Auenfläche in unmittelbarer Nähe zu Messstandort GG statt (Abbildung 5).

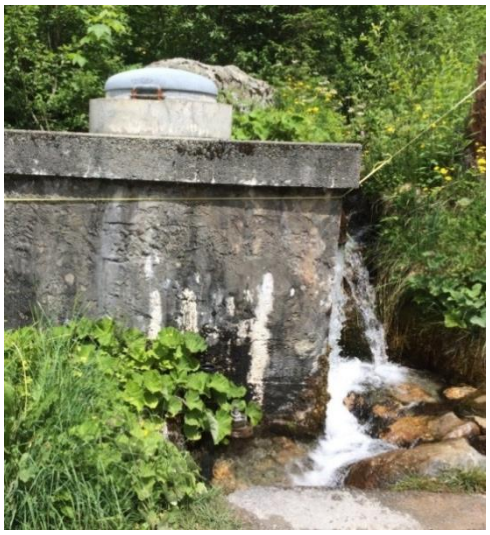


Abbildung 11: Grundwassermessstelle Schwarze Lütschine (alter GW-Brunnen des Kantons „Klecki“)

4.3 Analyse im Labor

Die Probenanalyse wird im Labor der Professur für Hydrologie an der Albert-Ludwigs-Universität-Freiburg unter Leitung von Barbara Herbstritt durchgeführt. Alle Wasserproben, sowie End-Member Proben werden sowohl auf stabile Wasserisotope als auch auf die Hauptkomponenten der Anionen und Kationen untersucht. Um das Probevolumen zu verringern wird zunächst jede zweite Probe eines Standortes gemessen. Später werden anhand von Abfluss- und Klimadaten weitere „Datenpunkte von Interesse“ ermittelt und entsprechende Proben nachgemessen. Dabei ist zu beachten, dass aus Kapazitätsgründen die Proben zu diesem Zeitpunkt nicht mehr im Kühlschrank, sondern bei Raumtemperatur gelagert wurden.

4.3.1 Stabile Isotope- Picarro

Alle Proben werden auf die stabilen Isotope δ^2H sowie $\delta^{18}O$ und $\delta^{17}O$ untersucht. Dafür wird ein Cavity Ringdown Spectrometer (Picarro L2140-i) mit einem aufgesetzten Vaporization Modul (Picarro A0211) verwendet (Abbildung 12) (Picarro Media Lab, 2013). Bei der Isotopenanalyse in Freiburg werden standartmäßig 40 Proben in einem Picarro Run analysiert. Dafür wird je 1 ml der zu analysierenden Probe

in ein Autosampler Vials aus Glas gefüllt und mit einem Deckel luftdicht verschlossen. Anschließend werden die Proben auf ein herstellereigenes Tablett gestellt, sodass sie dem Autosampler in einer festen Reihenfolge zugeführt werden (Abbildung 12). Die Reihenfolge ist so gewählt, dass Proben eines Standortes, in zeitlicher Abfolge der Probennahme, nacheinander gemessen werden. Dies dient dazu den Verschleppungseffekt zu vermeiden bzw. zu verringern. Zwischen den zu analysierenden Proben werden für die spätere Kalibrierung Standards mit bekannten Konzentrationen platziert. Pro Messdurchlauf werden drei verschiedene Standards jeweils drei Mal gemessen. Der „M“ Standard mit einer schweren Isotopensignatur, der „G“-Standard mit einer leichten Isotopensignatur und der „T“ Standard als Test- bzw. Validierungsstandard.

Abbildung 12: Picarro mit aufgesetztem Vaporization Modul (links) und mit Standards gefülltes Probentablett (rechts)

Bei den Standards handelt es sich um laboreigene Messstandards, welche mit den offiziellen Standards VSMOW („Vienna-Standard Mean Ocean Water“), SLAP („Standard Light Antarctic Percipitation“) und GISP („Greenland Ice Sheet Precipitation“) der International Atomic Energy Agency (IAEA) eingemessen wurden. Als laboreigener Standard mit schwerer Isotopenkomposition „M“ wurde eine Mischung aus Meerwasser der Nordsee und des Mittelmeers verwendet. Für den leichten „G“ Standard wurde Gletscherschmelzwasser aus den Alpen genutzt. Der Validierungsstandard „T“ ist herkömmliches demineralisiertes Wasser aus der Leitung im Labor in Freiburg.

Bei der Messung misst der Picarro die Isotopenkomposition im Wasserdampf einer gasförmigen Probe. Zuvor werden also 2,4 µL der Flüssigwasserprobe im Vaporizer Modul bei 110 °C verdampft. Um Verunreinigungen durch die Umgebungsluft zu vermeiden, wird anschließend die Probe über das Trägergas (elementarer Stickstoff) dem Picarro zugeführt. Hier werden die Isotope anhand einer Kombination aus zwei Methoden separiert. Zum einen wird die namengebende Abklingzeit („ring down“), vom Senden eines Laserimpulses in einem zu 99% verspiegelten Raum, bis zum Austritt gemessen. Zum anderen werden die für die einzelnen Isotope charakteristischen spektralen Wellenlängen analysiert. Jede Probe wird sechs Mal durch den Picarro gemessen, und die Rohwerte der Ergebnisse in eine Excel-Datei geschrieben.

4.3.2 Anionen und Kationen- Ionenchromatograph (IC)

Die Zusammensetzung von Anionen und Kationen wird mit zwei Ionenchromatographen (ICS-1100 von DIONEX) gemessen (Abbildung 13) (Thermo Fisher Scientific, 2013). Es werden die Kationen Chlorid, Nitrit, Bromid, Nitrat und Sulfat sowie die Anionen Natrium, Ammonium, Kalium, Magnesium und Calcium erfasst. Für die Messung werden nach Augenmaß 5 ml Filtrat der Probe in zwei Kunststoffröhrchen gefüllt. Die Röhrchen werden dann mit einem Ansaugstutzen verschlossen und in den Autosampler der Anionen (AS22) sowie den Autosampler der Kationen (CS12A) gestellt. Es wird dabei die gleiche Reihenfolge der Proben, wie bei der Analyse am Picarro, eingehalten (Kapitel 3.2.1). Somit werden etwa 40 Proben je Analyselauf gemessen.

Abbildung 13: IC für Kationen (links) und Anionen (rechts) sowie die dazugehörigen Autosampler und der Steuerungs-PC

Die Trennung der Ionen am IC erfolgt anhand charakteristischer Peaks der Ionen in der Leitfähigkeit. Dafür wird das gesamte Volumen der Probe aus dem Röhrchen gesaugt. Ein Teil davon wird zunächst zum Spülen der Leitungen des Gerätes verwendet, der Rest der Probe wird dann auf ein Laufmittel gegeben und die Leitfähigkeit im Durchfluss gemessen. Bei den Anionen wird die Base NA_2CO_3 als Laufmittel verwendet bei den Kationen die Säure CH_4O_3S.

Aus der Peak-Analyse des Verlaufs der Leitfähigkeitskurve kann dann die Konzentration in mg/l ermittelt werden. Die Lage des Peaks gibt Aufschluss darüber um welches Ion es sich handelt, die Amplitude des Peaks darüber welche Konzentration das Ion in der Probe hat. Die Auswertung der Peaks erfolgt automatisch über das Programm Chromeleon, welches zudem die Autosampler und ICs steuert. Damit das Programm die Konzentrationen aus der Leitfähigkeit berechnen kann, wird es zuvor mit Standards-bekannter Konzentrationswerten aller Ionen kalibriert. Dabei werden sowohl Standards mit geringen als auch mit hohen Konzentrationen der einzelnen Ionen verwendet. Die Kalibrierung des Gerätes mit Standards findet nur etwa alle zwei Monate statt. Um die Güte der Messung einer einzelnen Messreihe abschätzen zu können, werden zudem bei jeder Messung Validierungsstandards mitgemessen. Nach der Messung wird dann überprüft, wie gut das Gerät die erwarteten Konzentrationen der Ionen trifft und gegebenenfalls nachkalibriert. Zudem wird nach jeder Messung visuell geprüft, ob das Programm die

einzelnen Peaks jeder Probe richtig erfasst. Die Ergebnisse werden dann durch Chromeleon in Konzentrationen der einzelnen Ionen in jeder Probe als Excel-Tabelle ausgegeben.

4.4 Aufbereiten der Rohdaten

Die im Labor erhobenen Daten sowie die mittels der Ott-CTD-Sonde gemessenen Daten werden auf Fehler geprüft, kalibriert und gegebenenfalls korrigiert. Zudem werden die von der BAFU und dem Kanton Bern zur Verfügung gestellten Abfluss- und Klimazeitreihen vervollständigt.

4.4.1 Verdunstungseffekt bei genommenen Proben

Bei den Messungen von stabilen Wasserisotopen kann ein großer Fehler durch Verdunstungseffekte bei bereits genommenen Wasserproben entstehen. Um abzuschätzen ob ein solcher stattgefunden hat, werden die Zeitreihen der stabilen Wasserisotope auf Muster geprüft. Hat Verdunstung stattgefunden, müsste innerhalb eines Messzyklus zwischen Flasche 1 und 24 die Isotopenkonzentration beständig leichter werden. Denn in Flasche 1 konnte 24 Tage lang Verdunstung stattfinden, während auf Flasche 24 die Verdunstung nur einen Tag gewirkt hat. In der ersten Flasche müssten sich demnach am meisten schwere Isotope angereichert haben. Ist innerhalb eines Messzyklus kein klares abnehmendes Muster der Isotopenkonzentration erkennbar ist anzunehmen, dass keine Verdunstung auf die Flusswasserproben stattgefunden hat. Ob die Probennahme der End Member durch Verdunstung beeinflusst ist, kann über einen Vergleich mit Messwerten in der Literatur geprüft werden.

4.4.2 Messdaten aus der Laboranalyse

Die am IC gemessenen Ionenkonzentrationen werden wie im Kapitel 4.3.2 beschrieben visuell durch eine PeakAnalyse geprüft und gegebenenfalls über die Validierungsstandards nachkalibriert bzw. nachgemessen. Ansonsten können die Konzentrationen der Anionen und Kationen, die durch das Programm Chromeleon ausgegeben werden, für die Datenanalyse verwendet werden.

Bei den stabilen Wasserisotopen werden alle Messdaten über eine standardisierte ExcelVorlage der Professur für Hydrologie in Freiburg ausgewertet. Dabei werden die Rohmesswerte über die Messungen der Standards G und M nachkalibriert. Dafür wird die Abweichung der gemessenen Werte der Standards von dem zu erwartenden Wert der Standards berechnet und alle Messwerte um diese Differenz korrigiert. Über den T-Validierungsstandard kann dann die Güte der Messung inklusive der Nachkalibrierung abgeschätzt und der Standardfehler der Messung ermittelt werden. Auch werden alle sechs Messungen einer Probe zu einem Messwert zusammengerechnet. Dazu werden die ersten drei Werte der Probe verworfen um Verschleppung zu vermeiden und aus den drei weiteren Messwerten ein Mittelwert gebildet. Dieser ist dann das alleinige Messergebnis dieser Probe, welches für die nachfolgende Analyse weiterverwendet wird.

4.4.3 Wasserstand, Temperatur und Leitfähigkeit

Die mit der Ott-CTD-Sonde gemessenen Parameter werden zur Analyse von möglichen Fehlern auf Konsistenz der Zeitreihe geprüft. Dazu wird für jeden Parameter getestet, ob die Zeitreihe Sprünge enthält. Ein Sprung wird als solcher definiert, wenn der entsprechende Parameter innerhalb eines Zeitschritts (5 Minuten) mehr als 1/10 seiner Standardabweichung über die gesamte Messzeitreihe steigt bzw. fällt. Wird ein solcher Sprung detektiert, wird abhängig vom Parameter wie folgt vorgegangen:

Wird ein Sprung in der Zeitreihe der Temperatur oder der Leitfähigkeit detektiert, wird individuell geprüft ob dieser Sprung plausibel ist. Dazu werden die Daten mit vorliegenden Temperaturdaten und Niederschlagsereignissen verglichen. Wird ein nicht plausibler Sprung in der Leitfähigkeit detektiert, wird der Zeitabschnitt aus der Zeitreihe entnommen. Kommt es zu einem nicht plausiblen Temperaturwert, werden alle Messwerte der CTD-Sonde in dieser Zeitspanne verworfen . Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Temperaturmessung der Sonde am stabilsten ist. Kommt es bei diesem Messparameter zu unrealistischen Messergebnissen ist es wahrscheinlich, dass die beiden anderen Parameter ebenfalls fehlerhaft erfasst sind.

Bei Sprüngen der Wasserstandsmessung werden betreffende Zeitabschnitte um das Maß des Sprunges auf der Y-Achse verschoben. Dafür wird die Differenz aus dem Mittelwert der 24h vor und nach dem Sprung im Wasserstand gebildet und entsprechende Zeitspannen des Wasserstandes um diese Differenz korrigiert. Der als Abstrich erfasste Wasserstand wird neben der Korrektur auf Sprünge außerdem in Relation zur Messoberkante umgedreht. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Standorten zu ermöglichen werden die Wasserstandsdaten skaliert. Abschließend werden die Messwerte aller Parameter sowohl auf Stunden, als auch Tageswerte aggregiert.

4.4.4 Abfluss- und Klimadaten des Kantons und BAFU

Sowohl die Klima-, als auch die Abflussdaten des Kantons und der BAFU sind für das Jahr 2018 noch nicht fehlerkorrigiert. Da eine Fehleranalyse zu umfangreich wäre, werden die Daten ausschließlich visuell geprüft und ansonsten unkorrigiert weiter verwendet. Lücken in der Zeitreihe werden durch Mittelwertbildung aus dem vorangehenden und nachstehenden Messwert aufgefüllt.

4.5 Hydrograph Separation mittels der EMMA

Die empirische Hydrograph Separation in die Abflusskomponenten Regen, Schnee-, und Gletschereisschmelze wird mittels der End-Member-Mixing Analysis (EMMA) durchgeführt. Dabei wird wie von Christophersen und Hooper (1992) beschrieben vorgegangen. Zunächst werden über Mischungsdreiecke konservative Tracer sowie die Flusswasserkonzentrationen beschreibende End-Member ermittelt. Anschließend werden die Informationen der einzelnen Tracer in der PCA kombiniert und die EMMA in dem dadurch entstehenden U-Space durchgeführt. Die gesamte EMMA Analyse wird für jeden Messstandort getrennt durchgeführt, um räumliche Unterschiede in den TEZG zu berücksichtigen. In dieser

Arbeit werden die Begriffe Quellkomponenten, Ursprungskomponenten und End-Member als Synonyme verwendet.

4.5.1 Analyse der Mischungsdreiecke - konservative Lösungen

Nach Christophersen und Hooper (1992) sollen in die EMMA nur Parameter eingehen, welche sich konservativ mischen. Konservativ mischende Parameter sind gleichbedeutend mit konservativen Tracern, d.h. sie gehen keine Reaktion ein und tragen somit ein ungestörtes Signal des Tracers von der Wasserquelle bis zur Messstelle.

In einem ersten Schritt werden deswegen alle Anionen und Kationen aus der Analyse ausgeschlossen, welche stark reaktiv sind und/oder einer schnellen Transformation unterliegen. Dazu zählen die Stickstoffderivate Nitrat, Nitrit und Ammonium. Alle weiteren Anionen und Kationen sowie die stabilen Wasserisotope, werden dann paarweise durch lineare Mischungs-Plots auf konservatives Verhalten getestet. Dazu werden die Flusswasserkonzentrationen und potenziellen End-Member von je zwei Messparametern gegeneinander geplottet (Abbildung 14). Fallen die gemessenen Flusswasserkonzentrationen in ein, durch die entsprechenden Konzentrationen der End-Member aufgespanntes Mischungsdreieck, mischen sich die Parameter konservativ. Diese Parameter werden dann als systembeschreibend gewertet und für die weitere Analyse weiterverwendet. Fallen die Flusswasserkonzentrationen weit außerhalb des Mischungsdreiecks der End-Member, werden sie als nicht konservativ eingestuft und die entsprechenden Parameter gehen nicht in die EMMA ein.

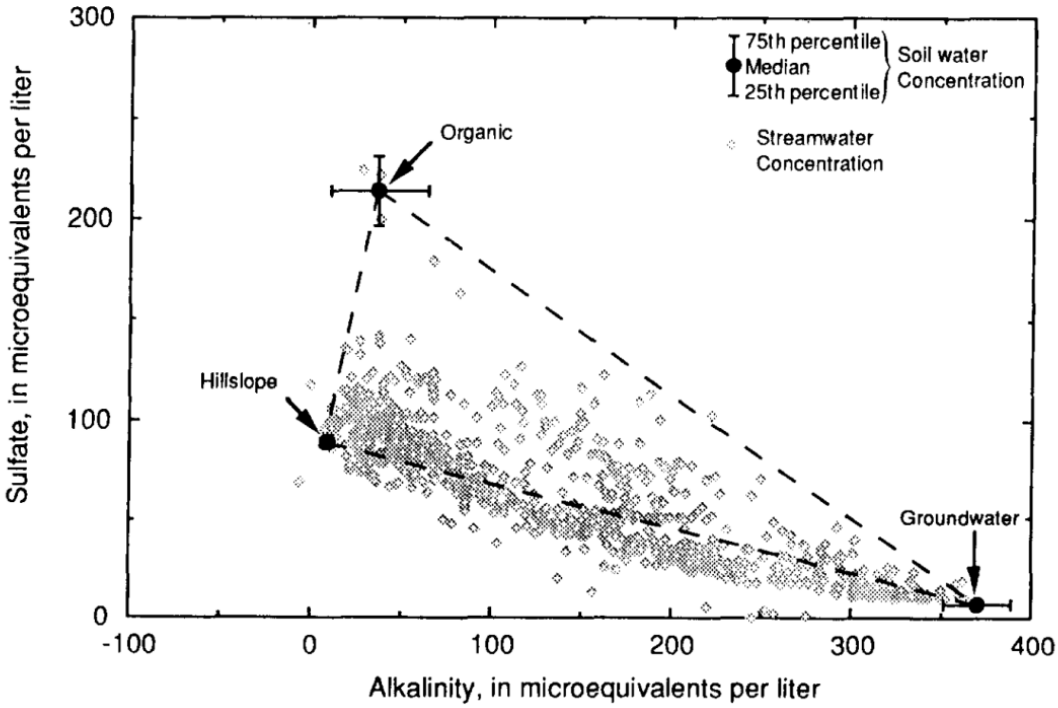


Abbildung 14: Beispiel eins Mischungsplots nach (Hooper et al., 1990). Hier dargestellt das Mischungsdreieck aus Silicat und Magnesium zwischen den End-Membern „Hillslope“, „Organic“, und „Groundwater“ für die Messparameter Sulfat und Alkalinität.

4.5.2 Wahl der End-Member

Ob beim Test auf konservatives Mischen die gemessenen Flusswasserkonzentrationen innerhalb des aufgespannten Mischungsdreiecks fallen, ist außerdem abhängig von den gewählten End-Membern. Damit die EMMA durchgeführt werden kann, müssen die betrachteten End-Member die gemessenen Flusswasserkonzentrationen beschreiben. In einem zweiten Schritt wird also getestet, welche der End- Member die gemessenen Flusswasserkonzentrationen am besten beschreiben. In dieser Arbeit stellt sich die Frage, ob das Verwenden der schnellen Fließkomponenten Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze ausreicht oder ob zudem langsame Fließkomponenten wie Grundwasser und/oder Bodenwasser berücksichtigt werden müssen. Dazu wird visuell geprüft, ob die Quellkomponenten Regen, Schnee und Eis ein Mischungsdreieck aufspannen, in welches die gemessenen Flusswasserkonzentrationen fallen. Ist dies nicht möglich, wird getestet, ob das Verwenden der gemessenen Bodenwasser- und Grundwasserkonzentrationen zu einer Verbesserung des Ergebnisses beitragen. Ist dies der Fall, wird der entsprechende End-Member mit in die weitere Hydrograph Separation einbezogen.

Sind die Quellkomponenten des Abflusses ermittelt, wird evaluiert, wie stark sich einzelne Messwerte entsprechender End-Member über die Messkampagne unterscheiden. Zeigt eine Quellkomponente eine deutliche zeitliche Variation, wird diese nicht als stationärer Wert, sondern über Bildung von fließenden Mitteln in die EMMA miteinbezogen. Unterscheiden sich einzelne Komponenten zudem räumlich stark, wird außerdem eine räumliche Zuordnung der End-Member Messungen zu einzelnen Messstandorten vorgenommen.

4.5.3 Reduzierung der Dimensionen- PCA

Abhängig von der zu bestimmenden Anzahl der End-Member (n), braucht man für die EMMA n-1 systembeschreibende Parameter. In dieser Arbeit werden je nach Berücksichtigung der langsamen Fließkomponente drei bzw. vier End-Member betrachtet, wodurch für die Trennung zwei bzw. drei Parameter benötigt werden. Damit in die Hydrograph Separation jedoch die Information aller systembeschreibenden Parameter eingeht, werden diese zuvor in einer PCA kombiniert.

Die PCA ist ein statistisches Verfahren, welches dazu dient die Variabilität eines multivariaten Datensatzes zu beschreiben (Barthold et al., 2011). Ergebnis der PCA sind sogenannte Principal Components (PC), welche die Variabilität des Datensatzes als Linearkombination erfassen. Sie sind somit Vektoren, die die Information aller Parameter vereinen. Durch Verwendung mehrerer PC lässt sich wiederum ein Raum aufspannen (U-Space) in dem alle gemessenen Proben liegen. Die Lage jeder Probe wird dabei über die Ladung („Scoring“) der Probe auf die entsprechenden PC ausgedrückt. Da in dieser Arbeit drei bzw. vier End-Member betrachtet werden, werden dementsprechend die PC1, PC2 und gegebenenfalls PC3 für die Hydrograph Separation benötigt.

Der PCA dient als Input eine Matrix, welche sowohl alle Flusswasserproben, als auch die entsprechenden End-Member-Proben eines Standortes enthält. Die systembeschreibenden Parameter sind dabei

standardisiert, wodurch sie mit gleicher Gewichtung in die Analyse eingehen. Auch bei den End-Membern wird darauf geachtet, dass sie in der Analyse gleich gewichtet werden. Von jedem End-Member geht deswegen eine gleiche Anzahl an Messpunkten in die PCA ein.

4.5.4 Durchführung der EMMA

Die Hydrograph Separation mittels der EMMA wird letztendlich über die Lage der Messpunkte im U-Space, in dem durch die End- Member aufgespannten Mischungsraum, durchgeführt. Im Folgenden wird die Durchführung der EMMA anhand des durch drei End-Member aufgespannten Mischungsdreiecks beschrieben. Die Hydrograph Separation für vier Quellkomponenten verläuft dazu identisch, abgesehen von der Verwendung einer „Mischungspyramide".

Die EMMA wird unter der Annahme durchgeführt, dass die gemessenen Flusswasserproben ausschließlich aus den ermittelten End-Member bestehen und somit die Massenerhaltung gegeben ist:

$$1 = Anteil_{EM1} + Anteil_{EM2} +_{\dots} + Anteil_{EMn}$$

Die einzelnen Anteile der Quellkomponenten einer Flusswasserprobe ergeben sich dabei über den Abstand der einzelnen Proben zu den Eckpunkten des Mischungsdreiecks (Abbildung 15). Je näher eine Flusswasserprobe dabei an einem Eckpunkt liegt, desto höher ist der Anteil der entsprechenden Wasserquelle an der Probe. Würde eine Flusswasserprobe auf einem der Eckpunkte liegen, würde sie zu 100% aus dem entsprechenden End-Member bestehen.

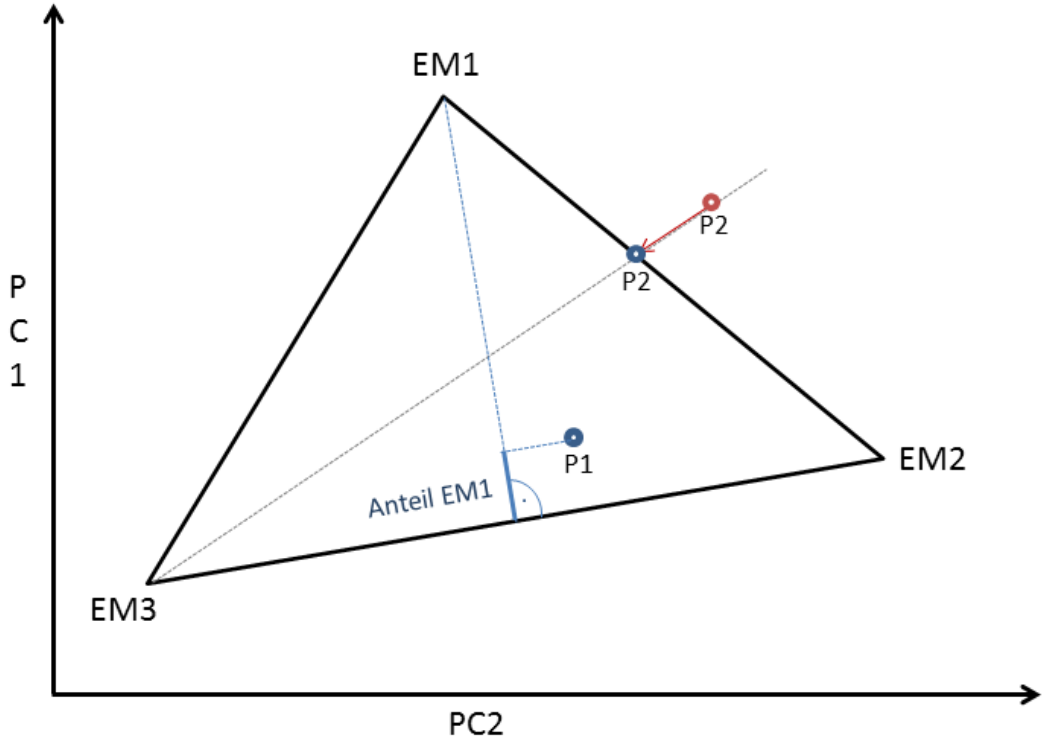


Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung der Ermittlung des Anteils einer Quellkomponente (EM1) an einer Flusswasserprobe innerhalb des Mischungsdreiecks (P1). Außerdem die Projizierung einer Flusswasserprobe außerhalb des Mischungsdreiecks (P2) auf den naheliegende Außenseite.

Fällt ein Messpunkt außerhalb des Mischungsdreiecks ist die Massenbilanz nicht mehr geschlossen und die EMMA kann nicht durchgeführt werden. Um für die Punkte außerhalb des Mischungsdreiecks trotzdem Anteile der Quellkomponenten zu ermitteln, werden entsprechende Punkte auf die Außenlinien des Dreiecks projiziert (Abbildung 15). Wenn ein Punkt also außerhalb des Mischungsdreieckes fällt, wird zunächst ermittelt, hinter welcher Grundseite der Punkt liegt. Die dieser Grundseite gegenüberliegende Quellkomponente wird dann auf 0 gesetzt und der Punkt anhand der Höhenlinie dieser Nullkomponente auf die Grundseite projiziert. Die Lage des Punktes auf der Grundseite bestimmt dann, aus welchen Anteilen der zwei verbleibenden Quellkomponenten die Flusswasserprobe besteht.

4.6 Modellierung der Abflussanteile mit HBV-Light

Um die erhobenen Messdaten vergleichen zu können, wurden außerdem die Abflussanteile Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze an allen Messstandorten mit dem Programm HBV-Light modelliert. Bei der Modellierung wird in dieser Arbeit wie von Stahl et al. (2016) beschrieben vorgegangen. Einzige Unterschiede sind, dass die Gletschergrenzen als stationär betrachtet werden und der Schneebedeckungsgrad nicht berücksichtigt wird. Zudem wird bei den Ergebnissen neben den Abflussanteilen Regen-, Schnee- und Gletschereisschmelze auch der Anteil der modellierten unteren Grundwasserbox betrachtet. Die Modellierung mit dem HBV-Light Modell wird mit der noch unveröffentlichten Modellversionen 4.0.0.23 durchgeführt. Die Besonderheit dieser Modellversion ist, dass ein begrenzter Mischungsbehälter eingeführt wird, welcher neben den Abflussanteilen einzelner Quellkomponenten auch deren Effekt im Wellenverlauf erfasst (Weiler et al., 2018).

4.6.1 Kalibrierung der EZG

Der Modellierung der Abflussanteile geht die Kalibrierung der EZG voraus, bei der für die Modellierung notwendigen EZG spezifischen Parameter gewonnen werden. Da für die Kalibrierung der EZG Beobachtungsdaten des Abflusses notwendig sind, wird ausschließlich auf die Messstandorte an den Auslässen der EZG WLP und GG kalibriert, an welchen Abflusszeitreihen vorliegen. Die Kalibrierung findet über die Zeitspanne vom 01.10.2012 bis zum 01.09.2018 statt.

Die EZG Schwarze und Weisse Lütschine werden mittels einer GAP- Optimization kalibriert. Dabei werden in 10 Kalibrierläufen je 5000 Parametervarianten getestet. Die Kalibrierung ist eine „Multi-Kriterien-Kalibrierung“ bei der vier Kriterien gleichzeitig kalibriert werden. Der Abfluss wird dabei mit drei Kalibrierkriterien und die Schneedecke mit einem Kriterium kalibriert (Tabelle 3). Bei der Kalibrierung des Abflusses wird am stärksten auf die allgemeine Dynamik und den Volumenfehler zwischen beobachteten und simulierten Abflussdaten über das Lindström-Maß (Lindstrom Measure) eingegangen. Außerdem wird der Abfluss auf zwei Nash-Sutcliffe-Model Effizienzparameter kalibriert, welche die Unterschiede des Abflusses im Jahresverlauf berücksichtigen. Der Nash-Sutcliffe-Parameter „LogReff“ berücksichtigt über logarithmierte Abflüsse Niedrigwasserphasen im Winter und der Nash-Sutcliffe-Parameter „ReffSeason“ geht im Besonderen auf die Schmelzphase in den Sommermonaten

ein. Die Schneedecke wurde auf das mittlere Schneewasseräquivalent (SWE) im Höhenbereich (m ü. M.) 600 bis 2500 m im EZG der Weissen Lütschine und 900 bis 2500 m im EZG der Schwarzen Lütschine kalibriert.

Tabelle 3: Gewichtung der Kalibrierkriterien von Abfluss und Schnee in der Kalibrierung mit dem HBV-Light-Modell

Parameter	Kriterien	Gewichtung	
Abfluss	Lindstrom Measure	0.3	60%
	Eff for log (Q)	0.15	
	Eff. for spc. Season	0.15	
Schnee	Mean abs. norm. Err. For SWE	0.4	40%

Da die in der Kalibrierung getesteten einzelnen Parameterwerte zufällig gewählt werden, werden vor der Kalibrierung für jeden Parameter sinnvolle Grenzwerte festgelegt (Anhang Abbildung 59). Ergebnis der Kalibrierung ist aus jedem der 10 Kalibrierläufe das am besten ermittelte Parameterset. Für die Modellierung wird dann aus den 10 Parametersets, das Parameterset mit der besten „Mean Weighted Objective Function“ verwendet. Um die Modellunsicherheit durch die ermittelten Parametersets abschätzen zu können, werden nach Abschluss der Kalibrierung die modellierten Anteile der besten fünf Parametersets verglichen.

4.6.2 Modellierung

Die Modellierung der Abflussanteile an allen Messstandorten findet mittels des in der Kalibrierung ermittelten Parametersets, ebenfalls über die Zeitspanne vom 01.10.2012 bis zum 01.09.2018, statt. Da die Kalibrierung der EZG ausschließlich auf die Messstandorte WLP und GG stattfindet, liegen nur für diese Standorte ermittelte Parametersets vor. Für die Modellierung der einzelnen TEZG wird deshalb die Annahme getroffen, dass die an den Auslässen ermittelten Parameter repräsentativ für das ganze EZG sind. Bei der Modellierung an den Messstandorten WL und SG wird also das für den Standort WLP gewonnene Parameterset verwendet und am Standort SL das Parameterset des Messstandortes GG.

Die Modellierung der Abflussanteile wird für zwei verschiedene Modellversionen durchgeführt. Bei der Modellversion „Magic Components“ wird der neu implementierte Parameter „Mix Zone“, welche die Größe eines begrenzten Mischungsbehälters beschreibt, auf 25 mm gesetzt. Für die Modellierung mit „Complete Mixing“ wird dieser Mischungsbehälter auf ein Volumen von 100000 mm gesetzt. Er ist dadurch so groß, dass er keinen Einfluss auf die Anteile des Abflusses hat. Zudem wird die in dieser Arbeit betrachtete langsame Fließkomponente „Grundwasser“ vereinfacht mit der Größe Q2 gleichgesetzt. Q2 beschreibt im HBV-Light den Ausfluss der unteren Grundwasserbox.

4.6.3 Verwendete Inputdaten

Als Input für die Kalibrierung und Modellierung mit HBV werden in dieser Arbeit Beobachtungsdaten von Abfluss, Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Höhengradient von Niederschlag und Temperatur, Schneehöhen sowie die Lage von Gletschergrenzen verwendet (Tabelle 4). Alle Inputdaten werden auf den für die Kalibrierung und Modellierung festgelegten Zeitraum vom 01.01.2012 bis zum 01.09.2018 zugeschnitten.

Tabelle 4: Verwendete Input Daten für die EZG Schwarze und Weisse Lütschine bei der Kalibrierung und Modellierung mit dem HBV-Light

Daten	Weisse Lütschine	Schwarze Lütschine
Abfluss	Pegel Zweilütschine (Q2200)	Pegel Grindelwald-Grund (A112)
Nied &Temp	R020 Lauterbrunnen Kl. Scheidegg	R021 Grindelwald, Oberläger
SWE-Daten	Rasterprodukt des SLF (MW 600-2500m)	Rasterprodukt des SLF (MW 900-2500m)
Gletschergrenzen 2010	Aus Eismächtigkeiten (unveröf. Matthias Huss)	
Höhengradient	Rasterprodukt Meto Schweiz	
Verdunstung	Monatsmittel aus Daten der Meto Schweizdaten	

Als, für die Kalibrierung notwendigen, Beobachtungsdaten des Abflusses werden am Standort WLP im EZG der Weissen Lütschine die täglichen Abflussdaten des BAFU am Pegel „Zweilütschine“ vom 01.01.2012 bis zum 01.09.2018 verwendet. Im EZG der Schwarzen Lütschine am Standort GG wird hingegen eine kurze Zeitreihe des Kantons Bern am Pegel „Grindelwald-Grund“ vom 01.01.2016 bis zum 01.09.2018 verwendet (Tabelle 4). Auch für die Niederschlags- und Temperaturdaten werden Stundendaten der Klimamessstationen des Kanton Berns verwendet. Im EZG Weisse Lütschine liegen Klimadaten der Station „Lauterbrunnen Kleine Scheidegg“ vor, im EZG der Schwarzen Lütschine Daten der Klimastation „Grindelwald Oberläger“ (Tabelle 4; Abbildung 16).

Temperatur und Niederschlag gehen außerdem als Höhengradient in das HBV-Light Modell ein. Dafür werden tägliche Daten beider Gradienten je EZG, bereitgestellt von Meteo Schweiz, verwendet. Die fast 60 Jahre lange Zeitreihe wird auf die letzten 30 Jahre gekürzt (ab 01.01.1988) und das Monatsmittel über die gekürzte Zeitreihe berechnet. Aus den Monatsmitteln werden dann wieder Tagesdaten berechnet, indem ein gleitendes Mittel über 15 Tage angewendet wird. Auch die verwendete Verdunstung basiert auf Tagesdaten der Meteo Schweiz, welche getrennt für jedes EZG vorliegen. Da die Verdunstung über die letzten Jahre einer starken Veränderung unterliegt, wurden hier Monatsmittel über die letzten 10 Jahre gebildet (ab 01.01.2007).

Für die Kalibrierung der Schneedecke werden als Beobachtungsdaten in beiden EZG tägliche SWE Werte des SLF interpoliert. Die Tageswerte des SLF stehen als Rasterprodukt mit einer Auflösung von 1 km auf 1 km für den Zeitraum vom 01.01.2009 bis zum 01.09.2018 zur Verfügung. Im EZG Weisse Lütschine wird über Höhenstufen von 600 m bis 2500 m gemittelt im EZG der Schwarzen Lütschine über die Höhenstufen von 900 bis 2500 m. Die Gletscherflächen in den EZG gehen in dieser Arbeit

stationär ein d.h. es wird mit keinem Gletscherrückgang über die Jahre gerechnet, sondern das catchment-setup für den Gletscherstand 2010 verwendet. Die Lage der Gletschergrenzen wird aus den durch Matthias Huss berechneten Eismächtigkeiten ermittelt (unveröffentlicht; Lage siehe Abbildung 16).

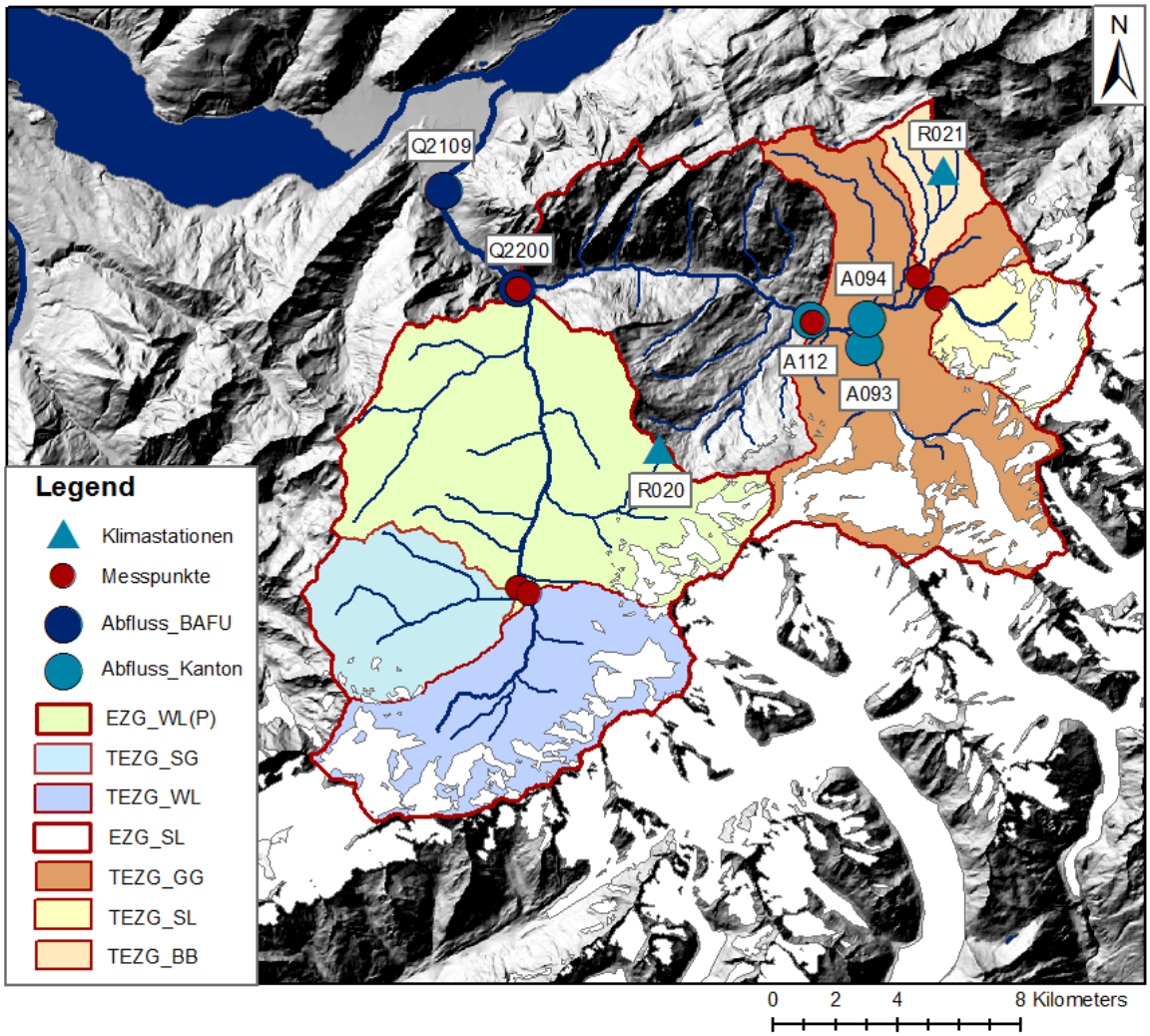


Abbildung 16: Lage der verwendeten Abfluss- und Klimastationen, sowie die Lage der betrachteten TEZG

5 Ergebnisse

5.1 Datenerhebung in Feld und Labor

Im Zuge der Messkampagne wurden 834 Proben im Feld erhoben. Dabei sind 788 der Proben Flusswasserproben, welche durch den automatischen Probensammler genommen wurden,46 der Proben End-Member Proben. Von den 834 Proben wurden 512 der Proben im Labor analysiert.

5.1.1 Probennahme der Flusswasserproben

Während der Messkampagne von 15.05.18 bis 01.09.18 kam es an allen Standorten zu vorübergehenden Messausfällen. Von den angesetzten täglichen Flusswasserproben wurden deshalb 136 Proben nicht genommen. Dies hatte folgende Gründe, welche nach der Häufigkeit des Auftretens gelistet werden:

- **Spannungsausfall**:
  Durch Wackelkontakt zwischen Messgerät und Batterie kam es zum Spannungsausfall, wodurch die Flusswasserprobe nicht gezogen werden konnte. Betroffen waren hier vor allem der Standort WL am Anfang der Messkampagne und der Standort SL am Ende der Kampagne.
- **Verstopfung des Ansaugschlauches**:
  Durch größere Regenereignisse kam es zu sehr hohem Sedimenttransport im Flusswasser und in Folge dessen zur Verstopfung des kompletten Ansaugschlauchs mit Sediment. Durch die Verstopfung konnte kein Wasser mehr gezogen werden und die Probennahme wurde automatisch abgebrochen. Hier waren vor allem die Standorte WL und BB betroffen.
- **Wasserstand zu niedrig**:
  Am Standort BB kam es an einigen Messtagen zu einem zu niedrigen Wasserstand, weshalb keine Flusswasserprobe genommen werden konnte. Die Probennahme wurde dabei jedoch nicht abgebrochen, sondern lediglich unterbrochen. Bei wieder steigendem Wasserstand wurde die Probennahme somit fortgesetzt.
- *******FATAL ERROR*****:**
  Am Standort WLP kam es zwei Mal zum Abbruch der Messung durch die Fehlermeldung *****Fatal Error****. Wie diese Fehlermeldung zustande kam konnte nicht evaluiert werden.

Zu welchem Zeitpunkt und an welchem Messstandort Messlücken entstanden sind, ist in Tabelle 5 zusammengetragen. Die Tabelle enthält außerdem, wie viele Flusswasserproben insgesamt an einem Standort entnommen und gemessen wurden, sowie ob die 24h Messung während des Schneeschmelzpeaks und des Eisschmelzpeaks erfolgreich durchgeführt werden konnten.

Tabelle 5: Übersicht über erfolgreich genommene und gemessene Flusswasserproben, sowie Messlücken je Standort

EZG	Standort	Messlücken	Schnee- Peak	Eis-Peak	genommen	gemessen
Weisse Lütschine	WL	25.05- 03.07	ja	ja	119	80
		01.08- 12.08				
	SG	15.05- 08.06	ja	ja	145	80
	WLP	16.05- 08.06	ja	ja	121	82
		29.07- 12.08				
		22.08- 01.09				
Schwarze Lütschine	SL	09.07- 29.07	ja	nein	107	58
		06.08- 01.09				
	BB	22.06- 05.07	ja	ja	137	67
		07.07- 16.07				
		17.08- 01.09				
	GG	-	ja	ja	159	99
gesamt					788	466

Für die Probennahme der Flusswasserprobe wurde versucht zwei Hauptfehlerquellen abzuschätzen. Zum einen wurde in einem Vorversuch geprüft, wie groß der entstehende Fehler durch das Spülen der Probennahmeflaschen im Feld ist. Im Mittel bleiben rund 3 g Spülwasser, durch Anhaften an Flaschenwand und Styroporkügelchen, in der Probenflasche zurück. Dies führt bei einem Probenvolumen von 800 ml zu einem Fehler von ca. 0.4 % (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ergebnisse des Vorversuchs „Spülen der Probenflaschen“

Flasche leer [g]	Fl. mit Styropor [g]	Fl. gespült [g]	Anhaft. Wasser [g]	Fehler [%]
90,41	90,83	93,54	2,71	0,34
90,41	90,83	94,07	3,24	0,41
90,41	90,83	93,57	2,74	0,34
90,41	90,83	94,03	3,20	0,40
			2,97	0,37

Zum anderen wurde abgeschätzt, ob Verdunstung bei den Flusswasserproben stattgefunden hat. Da dies vor allem Auswirkungen auf die Isotopenzusammensetzung hat, wurden alle gemessenen Isotopenkonzentrationen je Standort auf Muster in der Zeitreihe geprüft. Hat Verdunstung stattgefunden würde sich das in einer kontinuierlichen Abnahme der Konzentration innerhalb eines Zeitschrittes zeigen (Siehe Kapitel 4 „Methodik“). Ein Zeitschritt reicht dabei vom Zeitpunkt einer Leerung des Probensammlers bis zu seiner nächsten Leerung (Abbildung 17).

Die Analyse der Zeitreihen ergibt für alle Standorte und Isotopenparameter, dass es über die ersten Messphasen zu einer kontinuierlichen Abnahme der Isotopenkonzentrationen kam (Abbildung 17). Während des ersten Messzyklus war die Styroporschicht, welche als Verdunstungsschutz auf die Probensammlerflaschen gegeben wurde nur wenige cm hoch. Nach der ersten Leerung der Probensammler wurde das Volumen der Styroporschicht verdoppelt. Es ist also möglich, dass im ersten Messzyklus aufgrund einer zu geringen Styroporschicht Verdunstung stattgefunden hat und diese durch eine größere Styroporauflage reduziert werden konnte. Während allen weiteren Messphasen ist, in beiden EZG, an keinem der Standorte ein klares Muster in den Isotopenkonzentrationen zu erkennen. Es wird also angenommen, dass zu diesen Zeitpunkten keine Verdunstungsprozesse stattgefunden haben.

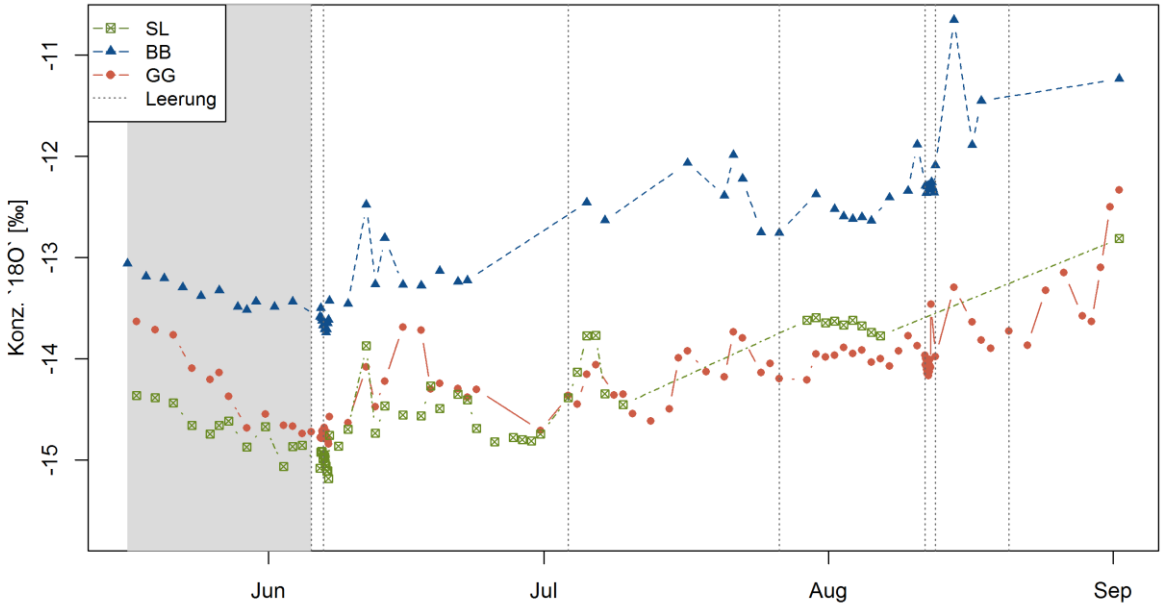


Abbildung 17: Gemessene ^{18}O-Konzentrationen an allen Standorten im EZG der Schwarzen Lütschine über die gesamte Messzeitreihe. Grau hinterlegt die erste Messperiode, in der eine kontinuierliche Abnahme der ^{18}O-Konzentrationen zu verzeichnen ist, was mögliche Verdunstungsverluste indiziert

5.1.2 Datenerhebung mit der CTD-Sonde

Bei den Messungen von Temperatur, Leitfähigkeit und Wasserstand mit der Ott-CTD-Sonde an den Standorten BB, WL, SG und WLP traten Probleme auf. Hauptproblem war der große Sedimenttransport der Weissen und Schwarzen Lütschine. Durch bereits kleine Regenereignisse kam es zu erhöhter Sedimentfracht im Flusswasser und in Folge dessen zum Aussedimentieren von feinem Sediment in den Pegelrohren. Das führte dazu, dass häufig bereits nach wenigen Tagen die CTD-Sonde im Sediment fest steckte und es zum Abbruch der Leitfähigkeitsmessung kam (Abbildung 18). Zudem führte das Herausnehmen und Spülen der Sonde, trotz Installation der Sonde auf gleicher Höhe beim Wiedereinsetzen, zu einem Versatz des Wasserstandes (Abbildung 18).

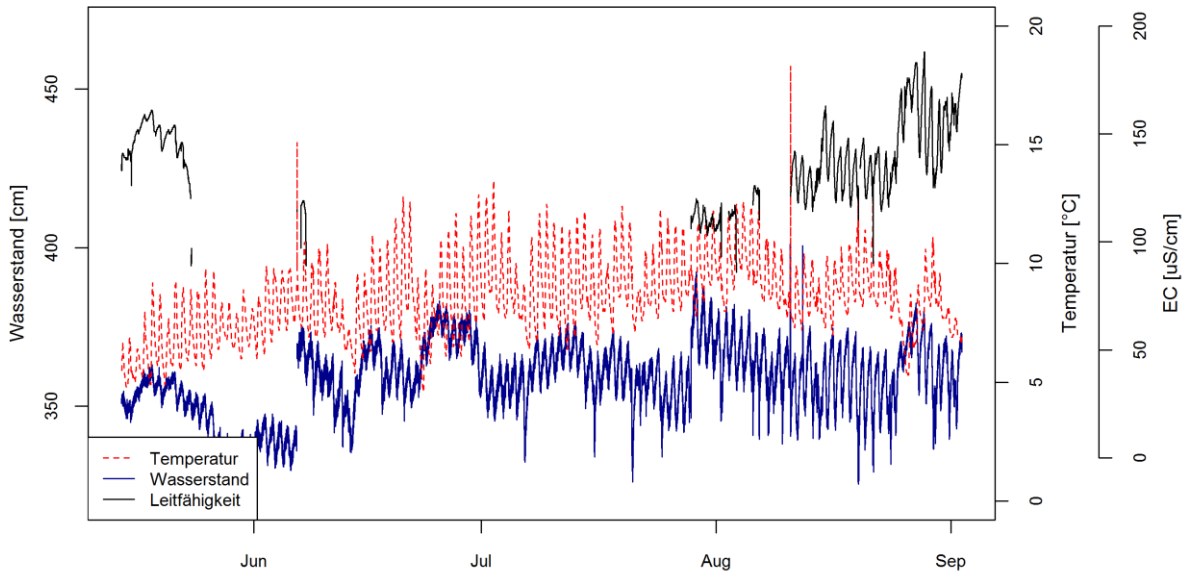


Abbildung 18 : Rohdaten der Ott-CTD Sonde von Temperatur, Wasserstand und Leitfähigkeit am Standort „Weiße Lütschine“ (WL)

Da nur am Standort SG im EZG der Weissen Lütschine die Leitfähigkeit zufriedenstellend erfasst und Fehler korrigiert werden konnten, wurde die Leitfähigkeit als Tracer für die weitere Arbeit verworfen (Abbildung 19). Der Wasserstand konnte an den Standorten SG und WLP erfasst und korrigiert werden. Da am Messstandort WLP Abfluss und Wasserstand ebenfalls durch das BAFU erfasst werden, wird nur der Wasserstand am Standort SG für den Bezug der Abflussanteile verwendet.

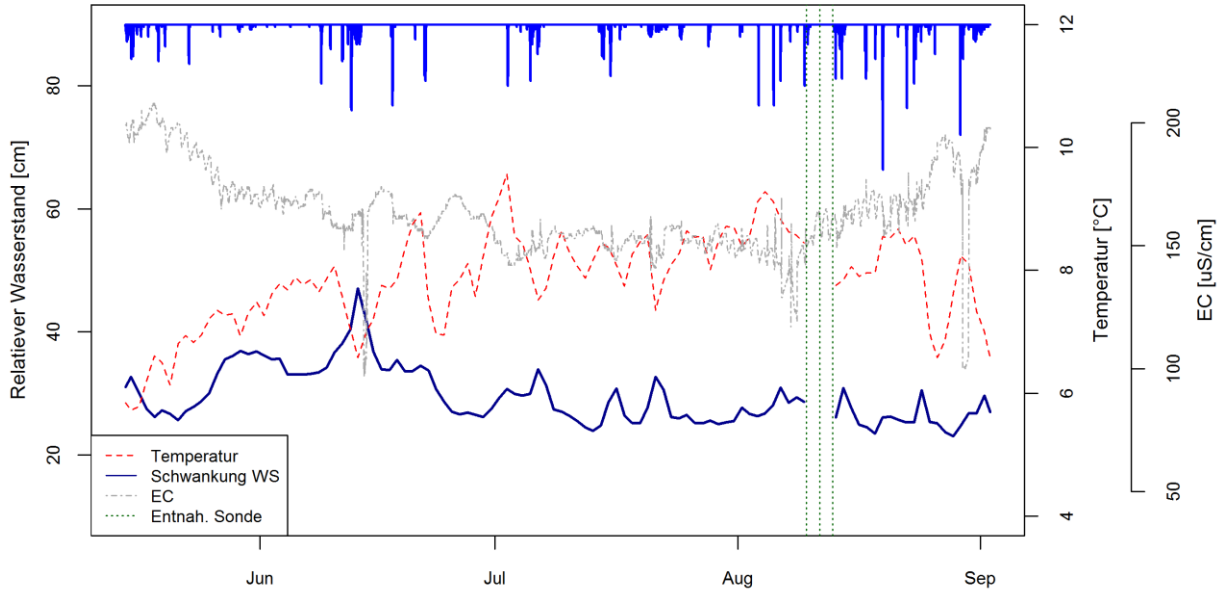


Abbildung 19: Fehlerkorrigierte und auf Tageswerte aggregierte Zeitreihe von Wasserstand (WS), Leitfähigkeit (EC) und Temperatur am Standort SG. In Grün eingezeichnet, der Zeitpunkt der Entnahme der Sonde

5.1.3 Probennahme der End-Member

Insgesamt wurden im EZG der Schwarzen Lütschine 14 und im EZG Weisse Lütschine 21 End-Member Proben genommen (Tabelle 7). Die unterschiedliche Anzahl der End-Member Proben je EZG liegt vor allem darin begründet, dass die Probennahme der Gletschereisproben am Oberen Grindelwaldgletscher abgebrochen werden musste. Im EZG der Schwarzen Lütschine liegen deshalb keine Gletschereisproben vor. Vereinfacht werden für beide EZG die Eisproben vom Rottalgletscher, im EZG der Weissen Lütschine verwendet. Am Rottalgletscher wurden am 03.08. Festeisproben als Transekt im Abstand von etwa 200 m erfasst. Da der begehbare Teil des Gletschers sehr flach ist, sind die Höhenunterschiede in diesem Transekt nur gering. Neben den Festeisproben wurden außerdem zwei Flüssigeisproben genommen. Eine dieser Proben stammt aus einer mit Wasser gefüllten Spalte an der Gletscher Zunge. Die zweite aus einem etwa 50 cm breiten, schießenden Gletscherbach an der Oberfläche des Gletschers. Der Rottalgletscher war zum Zeitpunkt der Probenahme komplett ausgeapert.

Tabelle 7: Zeitpunkt und Ort der Probennahme der Abflusskomponenten Regen, Schnee, Gletschereis und Grundwasser in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine

EZG	Schwarze Lütschine				Weisse Lütschine			
EM	Probenort	Höhe [m ü.M.]	Datum	Anzahl	Probenort	Höhe[m ü.M.]	Datum	Anzahl
Schnee	Honegg	1400	06.04	6	Schilthorn	1670	06.04	5
		1800	06.04			2070	06.04	
		2200	06.04			2750	06.04	
	Chrinnenhorn	2800	03.07		Rottalgletscher	2700	03.08	
		2900	03.07			2900	03.08	
		2950	03.07					
Eis				0	Rottalgletscher	2800	03.08	5
						2801	03.08	
						2802	03.08	
						2803	03.08	
						2804	03.08	
Regen	Messstandort "Bärgelbach"	1210	29.07	3	Stechelberg-Rütti	930	02.07	6
		1210	11.08			930	04.07	
		1210	01.09			930	29.07	
						930	12.08	
						930	01.09	
						930	02.09	
Grundwasser	Ehemalige GW-Messstelle "Ischboden"	1220	07.06	5	Stechelberg-Kraftwerk	910	07.06	5
		1220	03.07			910	03.07	
		1220	29.07			910	29.07	
		1220	12.08			910	12.08	
		1220	01.09			910	01.09	

Die Schneeproben wurden in den tiefen Lagen in beiden EZG am 06.04. genommen (Tabelle 7). In den höheren Lagen wurden sie im EZG der Schwarzen Lütschine am 03.07. und im EZG der Weissen Lütschine am 03.08. genommen. Die Schneeproben umfassen Höhenzonen zwischen 1400 m ü. M. und knapp 3000 m ü. M. Die genaue Lage der Höhentransekte der Schneeproben beider EZG ist Abbildung 5 im Kapitel „Methodik“ zu entnehmen.

Die Regenwasserproben wurden ab dem 07.06. im EZG der Weissen Lütschine und ab dem 03.07. im EZG der Schwarzen Lütschine genommen (Tabelle 7). Im EZG der Weisen Lütschine wurden außerdem zwei kurzzeitige Regenereignisse vom 02.07. bis zum 04.07. sowie vom 01.09. bis zum 02.09. erfasst. Da der Sommer 2018 sehr trocken war, war der gewählte 10 l Kanister häufig mit nicht mehr als 1,5 l gefüllt. Die Regenwasserproben unterlagen somit bis zur nächsten Leerung einem großen Headspace. Die Grundwasserproben wurden an beiden Standorten ab dem 07.06 bei jeder Leerung der automatischen Probensammler genommen. Somit liegen für beide EZG je fünf Grundwasserproben vor.

5.1.4 Laboranalyse mit IC und Picarro

Im Labor wurde durchschnittlich nur jede zweite der genommenen Flusswasserproben analysiert (siehe Kapitel 4 „Methodik“). Um bei der zufälligen Wahl der Proben keine interessanten Punkte im Abflussgang zu verpassen, wurde zudem am Ende der Messkampagne die Daten von Abfluss, Lufttemperatur und Niederschlag ausgewertet. Gegebenenfalls wurden dann die Flusswasserproben mit interessanten Klima-/Abflussparametern nachgemessen. Welche Zeitpunkte während der Messperiode als interessant klassifiziert wurden, ist für das EZG der Weissen Lütschine beispielhaft Abbildung 20 zu entnehmen. Die entsprechende Abbildung für das EZG Schwarze Lütschine ist im Anhang zu finden (Abbildung 47). Bei der Auswahl der Messpunkte wurde versucht folgende Gegebenheiten zu erfassen:

- Maxima und Minima in der Abflussganglinie, bei der Temperatur und dem Niederschlag
- Längere Perioden von anhaltenden Klimasituationen, wie Zeitabschnitte ohne Niederschlag, Zeitabschnitte mit viel Niederschlag oder Phasen mit langanhaltender hoher/niedriger Temperatur

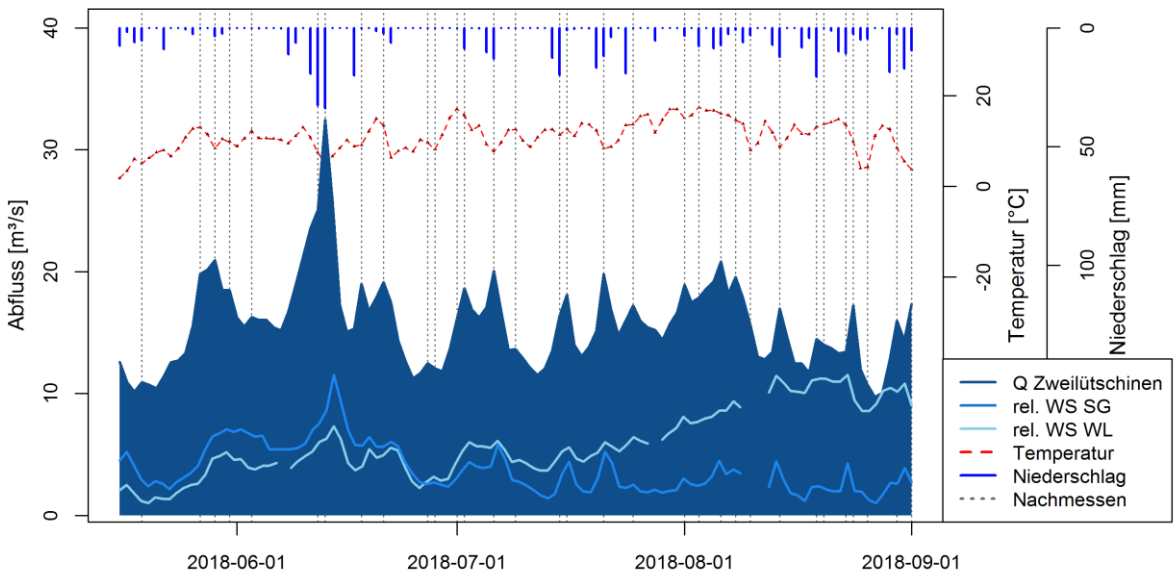


Abbildung 20: Wahl der Messtage zum Nachmessen anhand von Klima- und Abflussdaten. Die dargestellten Abflussdaten sind vom Pegel Zweilütschine, die relativen Wasserstände (rel. WS) wurden mit der CTD-Sonde am Standort SG und WL erfasst

Bei der Analyse der Hauptionen am IC kam es während der Messungen zu Unregelmäßigkeiten. Die verwendeten Probenröhrchen wurden durch unterschiedliche Projekte genutzt. Jeder der Nutzer ging beim Spülen unterschiedlich vor, wodurch es zu Rückständen von Calcium in machen Probenröhrchen kam. Dies wurde durch unterschiedlich hohe Konzentrationen von Calcium in dem denProben vorweggehenden Reinstwasser festgestellt. Da es nur bei manchen Probengefäßen zur Verunreinigung kam, ist der Fehler nicht systematisch und kann somit nicht korrigiert werden. Der Fehler befindet sich in der Größenordnung von 1 g/l für das Ion Calcium. Insgesamt liegt der betrachtete Fehler für alle Ionen über die gesamte Messreihe am IC bei 3,6 %.

Bei der Isotopenanalyse am Picarro wurde mit den ersten Flusswasserproben zunächst getestet, wie groß der Fehler durch die Verwendung des „High precision 17O Modus“ im Vergleich „High precision 18O Modus“ ist. Im Mittel kommt es zu Abweichungen zwischen den Modi von rund 0,03‰ bei ^{18}O und 0,13‰ bei ^{2}H. Die maximalen Abweichungen betragen 0,13‰ für ^{18}O und 0,59 ‰ für ^{2}H (Abbildung 21). Diese Werte liegen in der Größenordnung des Messfehlers des Gerätes, weshalb alle weiteren Proben in dem precision 17O Modus gemessen wurden. Über die gesamte Messreihe kam es am Picarro zu Standardabweichungen von im Mittel 0.09 ‰ für ^{18}O, 0.13 ‰ für ^{2}H und 0.05 ‰ für ^{17}O.

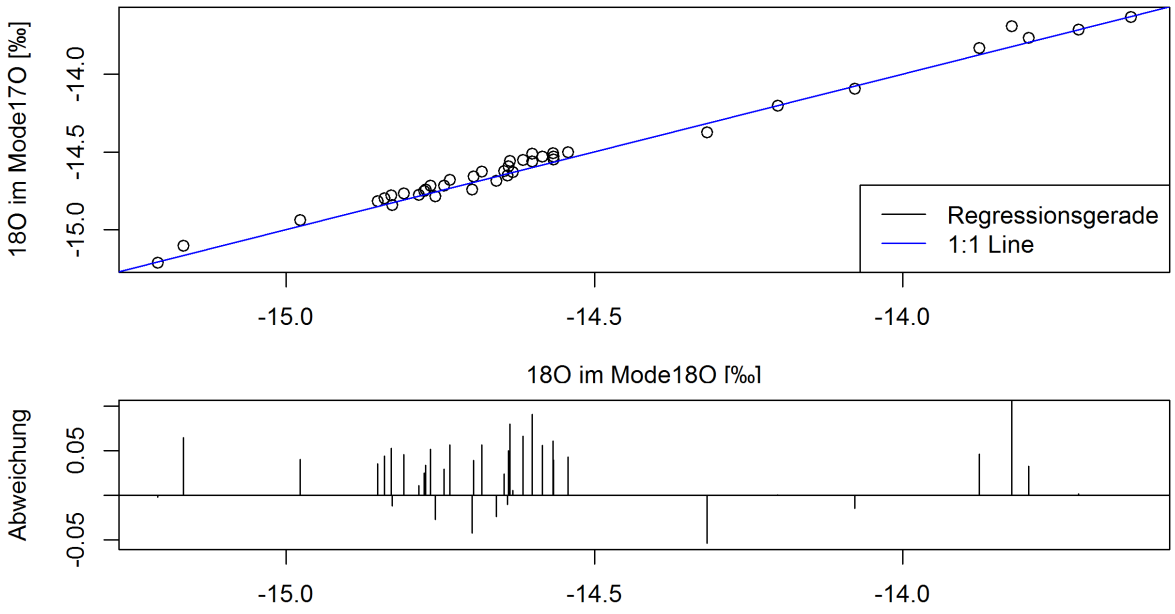


Abbildung 21: Vergleich von Messwerten im ^{17}O und ^{18}O Modus am Picarro

5.2 Empirische Abflussseparation- EMMA

Bevor die Hydrograph Separation mittels der EMMA durchgeführt werden kann müssen zunächst die systembeschreibenden Messparameter sowie die End-Member über die Analyse der Mischungsdreiecke bestimmt werden. Außerdem muss abgeschätzt werden wie stark sich die einzelnen Messwerte der Quellkomponenten räumlich und zeitlich unterscheiden und wie sie demensprechend in die EMMA eingehen.

5.2.1 Analyse der Mischungsdreiecke

Bei der Analyse der Mischungsdreiecke wird schnell deutlich, dass das Einbeziehen einer langsamen Fließkomponente nötig ist, um die gemessenen Flusswasserkonzentrationen zu beschreiben (Abbildung 22). So liegen die gemessenen Konzentrationen der End-Member Regenwasser, Schnee und Gletschereis meist fast auf einer Geraden. Zwischen diesen End-Member spannt sich somit, wenn überhaupt, nur ein sehr schmales Mischungsdreieck auf. Fast alle gemessenen Flusswasserkonzentrationen fallen dadurch außerhalb der Mischungsdreiecke. Bezieht man hingegen z.B. die Komponente Grundwasser mit ein, spannen die Mischungsdreiecke einen Raum auf, der die meisten gemessenen Flusswasserkonzentrationen erklärt (Abbildung 22).

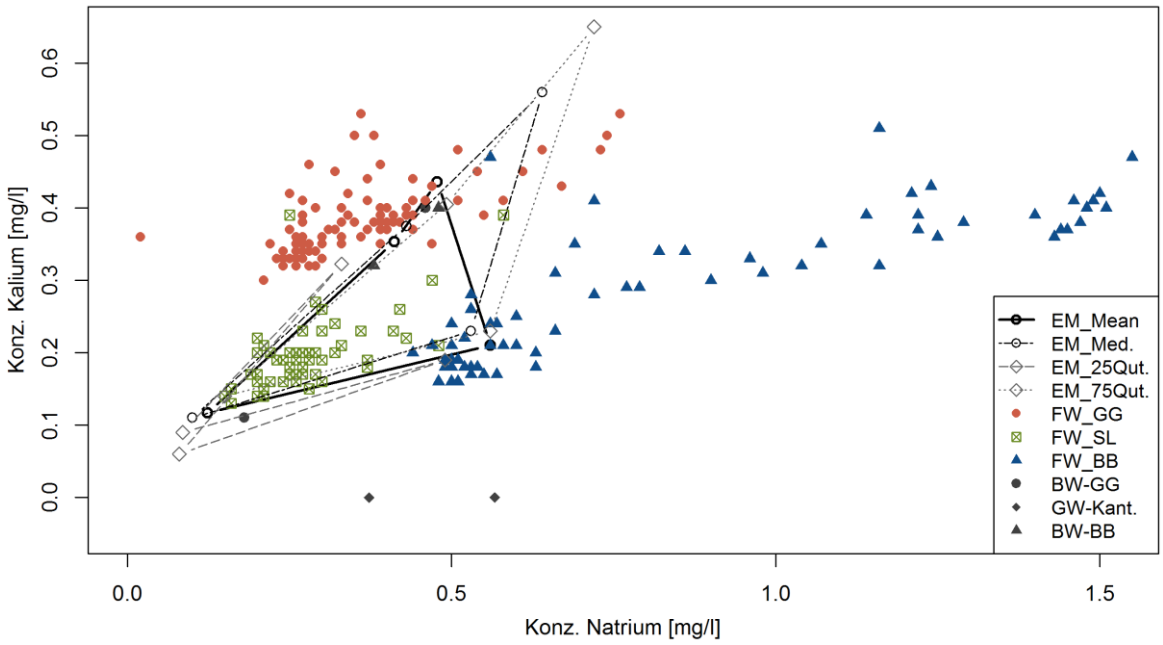


Abbildung 22: Mischungsdreieck aus den Komponenten Regen (links), Schnee (rechts, oben), Grundwasser (rechts, unten) und Gletschereis (zwischen Regen und Schnee), für die Parameter Natrium und Kalium für alle Standorte im EZG Schwarze Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert (dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weitere Messungen von Bodenwasser (BW) sowie Konzentrationen der Grundwassermessungen des Kantons Bern (GW-Kant.) eingezeichnet.

Bei der Analyse der Mischungsdreiecke sticht der Messstandort BB im EZG der Schwarzen Lütschine hervor. Hier kommt es bei den meisten Messparametern zu einer großen Streuung der Flusswasserkonzentration (Abbildung 22). Die im EZG Schwarze Lütschine gemessenen End-Member Konzentrationen

können diese Streuung am Standort BB nicht erklären. Auch weitere Messungen von Bodenwasser in nahen Nassflächen sowie der Vergleich der Grundwassermessdaten des Kantons Bern an den Standorten Gryth und Klecki bieten keine Erklärung der gemessenen Konzentrationen (Abbildung 22).

Betrachtet man ausschließlich die Mischungsdreiecke aus den Konzentrationen der stabilen Wasserisotope zwischen den End-Member Regenwasser, Schnee und Gletschereis, ist das aufspannen von Mischungsdreiecken möglich. Auch hier sind die Unterschiede der Konzentrationen der End-Member nur sehr gering, wodurch die aufgespannten Mischungsdreiecke sehr schmal sind und die gemessenen Flusswasserkonzentrationen häufig außerhalb der Dreiecke fallen (Abbildung 23).

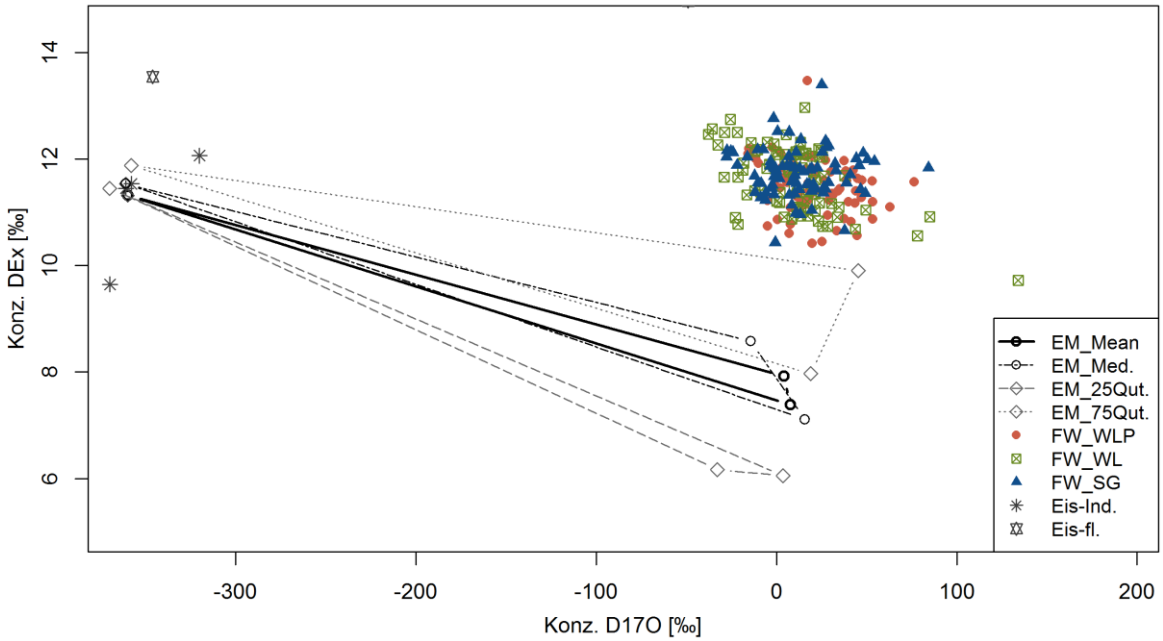


Abbildung 23: Mischungsdreieck aus den Komponenten Eis (links), Schnee (rechts, oben) und Regen (rechts, unten) für die Parameter Deuterium Excess (DEx) und 17O-Excess (D17O) an allen Standorten im EZG Weisse Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert (dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weite Messungen Festeisproben (Eis-Ind.) sowie die genommene Flüssigprobe (Eis-fl.) des End-Member Eis eingezeichnet.

Bei der Festlegung der systembeschreibenden Parameter je Messstandort wurde darauf geachtet, möglichst wenige Messgrößen aus der Analyse auszuschließen, um die Informationen vieler Parameter mit in die weitere Analyse einzubeziehen. Die Analyse der Mischungsdreiecke ergab im EZG der Weissen Lütschine am Standort WL und SG, dass die Ionen Chlorid und Bromid sowie der Deuterium Excess aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Am Standort WLP wurden gleichermaßen die Ionen Bromid und Kalium sowie ebenfalls der Deuterium Excess ausgeschlossen. Im EZG der Schwarzen Lütschine wurden am Standort SL die Parameter Bromid und Chlorid und am Standort GG die Messgrößen Chlorid, Bromid und Kalium als nicht systembeschreibend eingestuft. Am Standort BB werden die meisten Parameter als nicht systembeschreibend eingestuft. Hier werden die Größen Bromid, Natrium, Kalium und Magnesium aus der weiteren Analyse ausgeschlossen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Ergebnis der Analyse der Mischungsdreiecke in Bezug auf konservatives Mischen der einzelnen Messgrößen. Konservative Tracer werden mit „ja“ gekennzeichnet, nicht konservative mit „nein“

	Weisse Lütschine			Schwarze Lütschine		
Parameter	**WL**	**SG**	**WLP**	**SL**	**BB**	**GG**
Chlorid	nein	nein	ja	nein	nein	nein
Bromid	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Sulfat	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Natrium	ja	ja	ja	ja	nein	ja
Kalium	nein	nein	nein	ja	nein	nein
Magnesium	ja	ja	ja	ja	nein	ja
Calcium	ja	ja	ja	ja	ja	ja
17O	ja	ja	ja	ja	ja	ja
18O	ja	ja	ja	ja	ja	ja
2H	ja	ja	ja	ja	ja	ja
DEX	nein	nein	nein	ja	ja	ja
D17O	ja	ja	ja	ja	ja	ja

5.2.2 Analyse der End-Member

Aus der Analyse der Mischungsdreiecke ergibt sich, dass das Einbeziehen der langsamen Fließkomponente notwendig ist, um die gemessenen Flusswasserkonzentrationen der Anionen und Kationen zu erklären. Bei der Wahl der langsamen Fließkomponente kommt es in den EZG Weisse und Schwarze Lütschine jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Im EZG der Schwarzen Lütschine beschreiben die eigenen Grundwassermessungen die gemessenen Flusskonzentrationen am stärksten (Abbildung 24). Die durch das Kanton durchgeführten Grundwassermessungen am Standort Klecki und Gryth sowie die gemessenen Bodenwasserkonzentrationen aus den Feuchtflächen am Standort GG und BB führen zu keiner Verbesserung des Ergebnisses, wenngleich sie in der gleichen Größenordnung liegen. Im Vergleich dazu beschreiben die im EZG Weisse Lütschine durch das Kanton am Standort Isenfluh gemessenen Grundwassermessungen, die erfassten Flusswasserkonzentrationen am stärksten. Die eigenen Grundwassermessungen können vor allem die Hauptkomponenten von Calcium und Magnesium nur unzureichend erfassen (Anhang Abbildung 48). Im EZG der Weissen Lütschine wurden für die Separation der langsamen Fließkomponente also die Grundwassermesswerte des Standortes Isenfluh verwendet. Da das Kanton keine Isotopenkonzentrationen misst, wurden diese mit den eigenen Messwerten ergänzt. Die Konzentrationen der Grundwassermessungen unterscheiden sich über die Dauer der Messkampagne nur geringfügig. Deshalb wurde entschieden den End-Member Grundwasser als einen festen Messwert in der EMMA zu berücksichtigen.

Da der End-Member Gletschereis nur als räumliche und zeitliche Punktprobe erhoben wurde, kann dessen Variabilität nicht abgeschätzt werden. Auch er geht deshalb als stationärer Wert in die EMMA ein. Würde hierfür der Mittelwert aller Festeisproben verwendet werden, würden an den Standorten mit gro-

ßem Anteil vergletscherter Fläche einige der Messpunkte außerhalb der Mischungsdreiecke liegen (Anhang Abbildung 49). Deshalb wurde statt dem Mittelwert der Festeisproben die Flüssigeisprobe aus dem Gletscherbach verwendet. Das geschieht unter der Annahme, dass der Abfluss des Gletscherbaches, auf dem komplett ausgeaperten Gletscher, fast ausschließlich aus Gletschereisschmelze besteht. In diesem Falle hätte die Flüssigeisprobe den Vorteil, dass sie im Vergleich zu den Festeisproben keinen Headspace hat und somit keinem Verdunstungseffekt unterliegt.

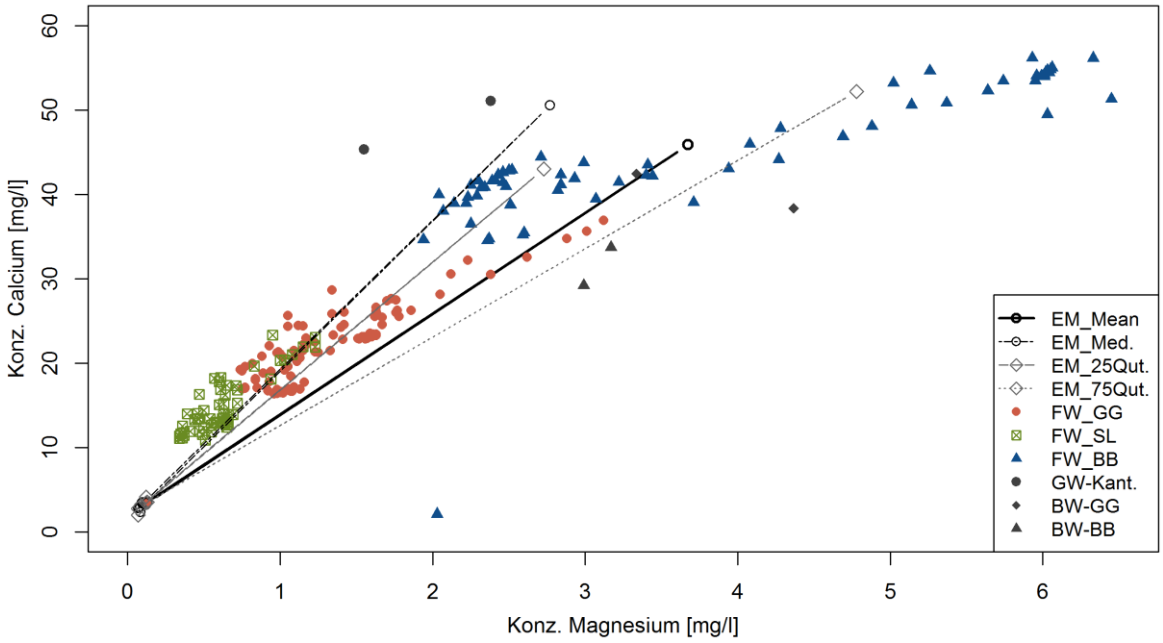


Abbildung 24: Mischungsdreieck aus den Komponenten Eis, Schnee, Regen (links unten) und Grundwasser (rechts, oben) für die Parameter Calcium und Magnesium an allen Standorten im EZG Schwarze Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert(dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weitere Messungen von Bodenwasser (BW), sowie Konzentrationen der Grundwassermessungen des Kantons Bern (GW-Kant.) eingezeichnet.

Die genommenen Schneeproben unterscheiden sich in Abhängigkeit des EZG und der gemessenen Höhe vor allem in den gemessenen Isotopenkonzentrationen stark (Abbildung 25). In den niederen Höhenlagen kann ein Zusammenhang von Isotopenkonzentrationen und Höhe festgestellt werden. So nimmt am Schilthorn und Honegg die gemessene ^{18}O- Konzentration je Höhenmeter um ca. 0.003 ‰ ab (Abbildung 25). Dabei sind am Honegg im EZG der Schwarzen Lütschine die gemessenen Isotopenkonzentrationen insgesamt niedriger als am Schilthorn im EZG der Weissen Lütschine. Der Höhenzusammenhang der Isotopenkonzentrationen ist am Schilthorn signifikant (P= 0.006), während er am Honegg nicht signifikant ist (P= 0.07).

In den höheren Lagen am Chrinnenhorn und Rottalgletscher kann der in den tieferen Lagen ermittelte Höhenzusammenhang nicht fortgesetzt werden. Hier kommt es in beiden EZG in den hohen Höhenlagen zu niedrigeren Isotopenkonzentrationen, als in den tiefen Höhenlagen. Zudem zeigen die einzelnen Messpunkte in den hohen Höhenlagen keinen Zusammenhang, sondern streuen stark. So werden am Chrinnenhorn und Rottalgletscher auf einer Höhe von knapp 3000 m ü. M. ^{18}O-Konzentrationen zwischen -14 ‰ und -12 ‰ gemessen (Abbildung 25).

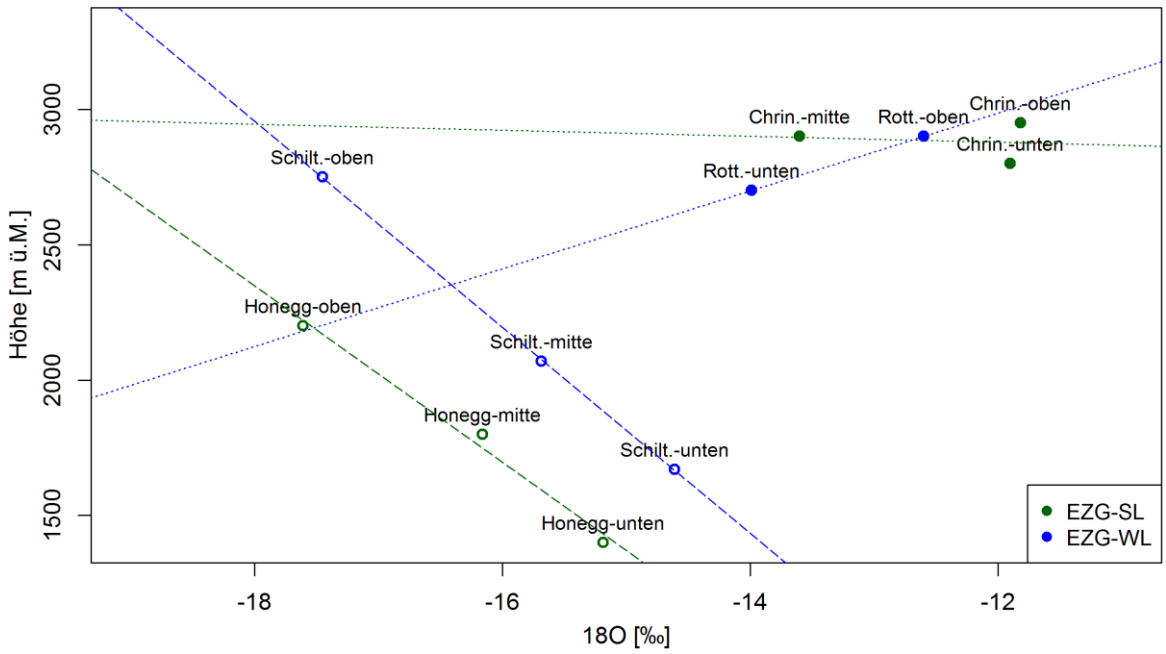


Abbildung 25: Gemessene ^{18}O-Konzentrationen im Schnee am Honegg, Schilthorn (Schilt.), Rottalgletscher (Rott) und Chrinnenhorn (Chrin.), in Abhängigkeit der entsprechenden Höhenstufe

Auch die gemessenen Isotopenkonzentrationen der Quellkomponente Regen unterscheiden sich zwischen den einzelnen Messungen der Kampagne stark (Abbildung 26). Von Juni bis Mitte August nehmen alle gemessenen Isotopenkonzentrationen an beiden Standorten zu. In der Trockenphase im August erreichen sie dabei die schwersten Kompositionen. So erreicht die ^{18}O-Konzentration im EZG der Weissen Lütschine beispielsweise Werte von rund -3 ‰. In der folgenden Regenphase, Ende August und Anfang September, nehmen die Isotopenkonzentrationen dann wieder ab. Die leichtesten ^{18}O-Konzentrationen werden im EZG der Weissen Lütschine Anfang September von rund -11 ‰ gemessen. Die gemessenen Isotopenkonzentrationen im EZG der Weissen Lütschine stimmen in allen Messparametern stark mit denen im EZG der Schwarzen Lütschine überein (Anhang Abbildung 50).

Um die Variabilität der Komponenten Schnee und Regen bei der Hydrograph Separation zu berücksichtigen, gehen diese nicht als stationäre Werte, sondern als fließende Mittel in die EMMA ein. Für die Schneekomponente werden dazu die Messwerte je Höhenstufe, dem Zeitpunkt der Schneeschmelze dieser Höhenstufe zugeordnet. Da die Schneeschmelze Anfang Mai schon bis auf 2000 m ü. M. stattgefunden hat, nehmen, für die Berechnung der fließenden Mittel der Schneeproben, vor allem die Messungen der hohen Höhenstufen eine wichtige Rolle ein.

Für die Berechnung der fließenden Mittel der Regenwasserproben werden die Messwerte der Mischprobe zeitlich der Mitte der einzelnen Messphasen zugeordnet. Die Messung des einzelnen Niederschlagsereignisses am 01.07/02.07 im EZG der Weissen Lütschine wird dabei nicht berücksichtigt, da sie sich kaum von den Messwerten aus der Messperiode davor unterscheidet (Abbildung 26).

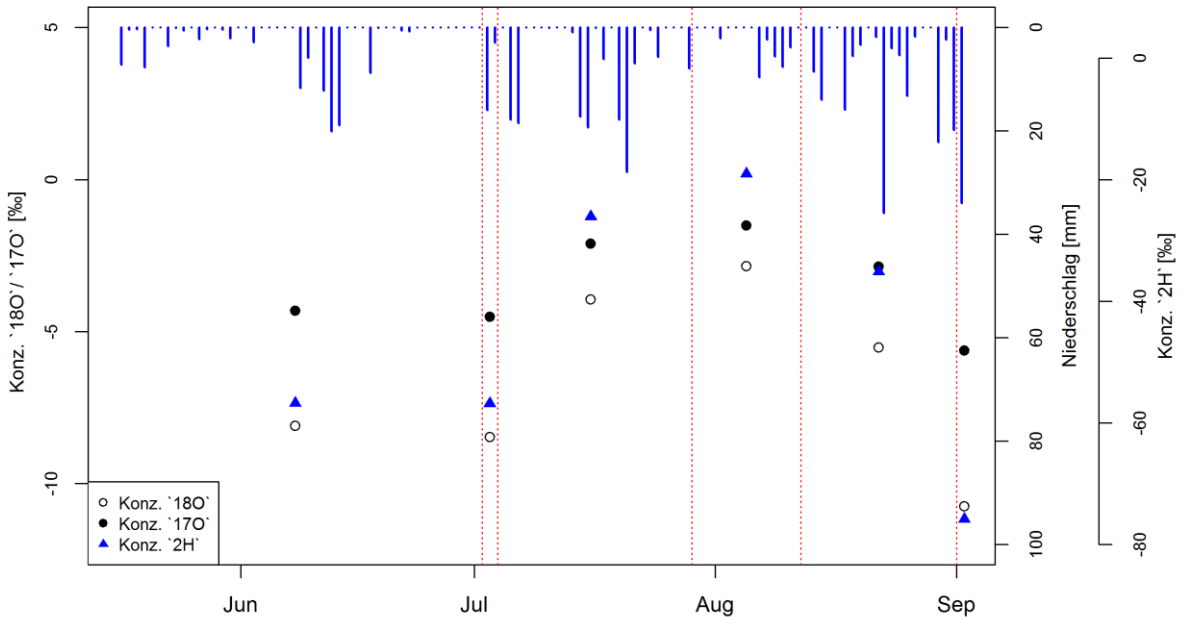


Abbildung 26: Über die Messzeitreihe erfasste Isotopenkonzentrationen im Regen, im EZG Weisse Lütschine. Rote Vertikale markieren die Zeitpunkte der Leerung des Niederschlagsammlers

5.2.3 Durchführung der EMMA

Zunächst wurde versucht die vier Abflusskomponenten Regen, Schnee, Gletschereis und Grundwasser in einem gemeinsamen Schritt voneinander zu trennen. Dazu wurde die EMMA mittels einer „Mischungspyramide“ durchgeführt. Die aus den Scorings der PCA aufgespannte Mischungspyramide zwischen den vier Abflusskomponenten ist jedoch durch geringe Unterschiede der Socres von Schnee und Gletschereis sehr flach. Ein Großteil der Flusswasserproben fällt außerhalb der Pyramide und die EMMA kann nicht durchgeführt werden. Deshalb wurde entschieden die EMMA in zwei Schritten durchzuführen. In einem ersten Schritt wird die langsame Fließkomponente Grundwasser vom Abfluss abgetrennt. Und in einem zweiten Schritt werden die schnellen Fließkomponenten Regen, Schnee und Gletschereis separiert.

Für das Trennen der Grundwasserkomponente gehen alle systembeschreibenden Parameter eines Standortes in die Hydrograph Separation ein. Dazu wird eine PCA durchgeführt und die Mischungsdreiecke anhand der Scorings auf die PC1 und PC2 aufgespannt. Die Ergebnisse der PCA geben dabei Aufschluss, wie gut die gewählten Parameter die Konzentrationen von Flusswasser und End-Member an einem Standort beschreiben. Im EZG der Weissen Lütschine wird an allen Standorten durch den Gebrauch von zwei PC knapp 80% der Varianz des Datensatzes erklärt, im EZG der Schwarzen Lütschine knapp 70% (Tabelle 9).

Tabelle 9: Durch die PCA erklärte Varianz des Datensatzes je Messstandort und Gebrauch von zwei PCs (bei drei End- Member) oder drei PCs (bei vier End-Member)

EZG	Standort	Erklärte Varianz 2 PCs [%]	Erklärte Varianz 3 PCs [%]
WL	WL	76	88
	SG	83	93
	WLP	78	90
SL	SL	67	82
	BB	79	92
	GG	73	84

Für die Trennung der langsamen Fließkomponenten werden dann die End-Member Schnee und Gletschereis, als gemeinsamen Schmelz-End-Member, betrachtet. Dazu werden die fließenden Mittel der Schneewerte mit dem stationären Messwert der Flüssigeisprobe gemittelt. Die Verwendung der fließenden Mittel für die End-Member Schnee und Regen ermöglichen dabei eine erfolgreiche Trennung der meisten Flusswasserproben in die Abflusskomponenten. Würde im Vergleich dazu für alle End-Member der Mittelwert verwendet, würden mehre Proben außerhalb der Mischungsdreiecke fallen und so strenggenommen nicht durch die EMMA separiert werden können (Abbildung 27).

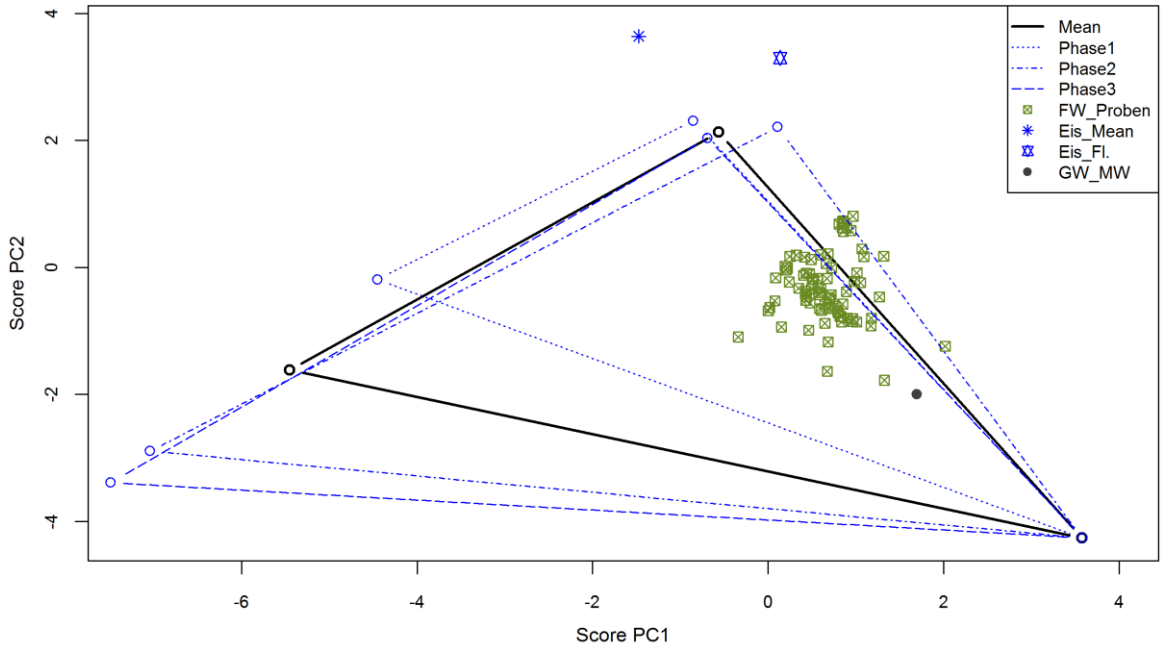


Abbildung 27: Mischungsdreiecke zwischen den End-Member Regen (links, unten) Schnee (Mitte, oben) und Grundwasser (rechts, unten) am Messstandort WL. In Schwarz die Dreiecke zwischen den Mittelwerten entsprechender End- Member und in Blau die verwendeten Datenpunkte als Grundlage der Berechnung der fließenden Mittel. Außerdem eingezeichnet, der Mittelwert der Festeisproben und Wert der Flüssigeisprobe sowie der Mittelwert der eigenen Grundwassermessung, welcher nicht verwendet wurde

Da sich die Konzentrationen der End-Member Regen, Schnee und Eis in den gemessenen Konzentrationen nur gering unterscheiden (siehe Kapitel 5.2.1) wurde entschieden, die Trennung der schnellen Abflusskomponenten nur mit zwei beschreibenden Messparametern durchzuführen. Das geschieht unter der Annahme, dass die Wahl von zwei stark beschreiben Parametern eine bessere Trennung der Komponenten ermöglicht, als die kombinierte Information mehrerer, jedoch nur schwach beschreibender

Parameterwerte. Für die Trennung der langsamen Fließkomponenten Regenwasser, Schnee-, und Gletschereisschmelze wurden deshalb in beiden EZG die stabilen Wasserisotope ^{17}O und ^{2}H verwendet. Auch bei diesen Messgrößen unterschieden sich die Konzentrationen von Schnee und Gletschereismessungen nur gering. Trotzdem fallen beim Aufspannen der Mischungsdreiecke zwischen diesen Parametern fast alle der Flusswasserkonzentrationen innerhalb dieser Dreiecke (für das EZG Weisse Lütschine Abbildung 28).

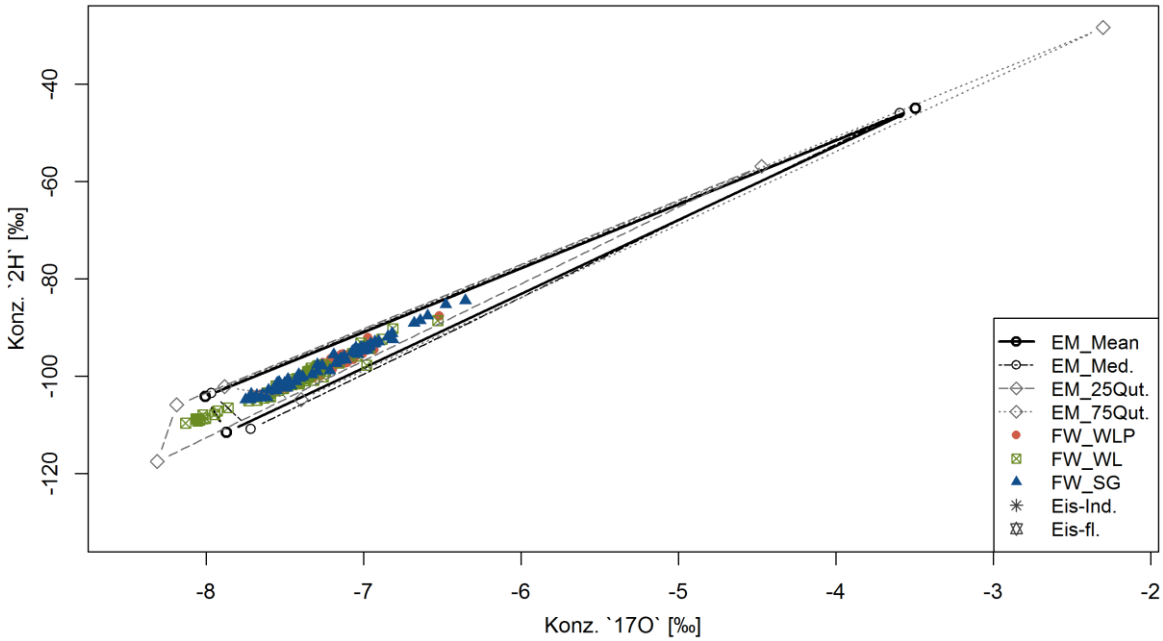


Abbildung 28: Mischungsdreieck zwischen den End-Member Regen, Schnee und Gletschereis für die Messparameter ^{17}O und ^{2}H im EZG Schwarze Lütschine. Die End-Member werden als Mittelwert (dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weite Messungen Festeisproben sowie die genommene Flüssigprobe des End-Member Eis eingezeichnet.

Die Trennung der Abflusskomponenten Regen, Schnee-, Gletschereisschmelze und Grundwasser in zwei Schritten konnte an allen Standorten erfolgreich durchgeführt werden, außer am Standort BB. Hier fielen bereits im ersten Schritt, das Abtrennen der langsamen Fließkomponente, der Großteil der Flusswasserproben außerhalb des Mischungsdreiecks (Anhang Abbildung 51). Die EMMA konnte am Standort BB also nicht durchgeführt werden, weshalb dieser aus der weiteren Analyse ausgeschlossen wurde.

5.2.4 Punkte außerhalb der Mischungsdreiecke

Bei der Hydrograph Separation im EZG der Weissen Lütschine liegen nur wenige Punkte außerhalb der Mischungsdreiecke (Tabelle 10). Fünf davon im Mischungsdreieck für das Abtrennen der langsamen Fließkomponente und nur einer beim Abtrennen der schnellen Fließkomponenten. Letzterer wurde am Standort WLP am 21.08 gemessen. Zu diesem Zeitpunkt regnete es bereits mehrere Tage. Es ist möglich, dass zu diesem Zeitpunkt der End-Member Regen nicht mehr repräsentativ für diesen Standort erfasst wurde und somit ein Fehler beim Trennen der Abflusskomponenten entstanden ist. So verändert sich zum einen die Komposition der Isotope über die Dauer eines Niederschlagsereignisses und zum anderen sind Niederschlagsereignisse starken, räumlichen Unterschieden ausgesetzt. Der Niederschlagssammler

befindet sich in ca. 10 km Entfernung im oberen Teil des EZG. An den Standorten WL und SG liegen die Messpunkte beim Trennen der langsamen Fließkomponente außerhalb des Mischungsdreiecks. Am Standort WL war am 25.05 sowie am 03.07 mehrere cm Sediment in der Probenflasche des Autosamplers.

Tabelle 10: Punkte, die bei der EMMA beim Abtrennen der langsamen (EMMA 1) und schnellen Fließkomponenten (EMMA 2) außerhalb der Mischungsdreiecke liegen.

EZG	Standort	EMMA 1	Zeitpunkt	EMMA 2	Zeitpunkt
Weisse Lütschine	WL	2	25.05; 03.07	keine	keine
	SG	3	06.06 17-21 Uhr	-	-
	WLP	keine	keine	1	21.08
Schwarze Lütschine	SL	keine	keine	keine	keine
	BB	-	-	-	-
	GG	2	31.08-01.09	6	09.06-12.06; 19.06-22.06

Im EZG der Schwarzen Lütschine konnte am Standort SL die EMMA auf alle Flusswasserproben problemlos angewendet werden. Am Standort GG fielen jedoch acht Messpunkte außerhalb der Mischungsdreiecke. Es ist somit der Standort, an dem die meisten Messpunkte außerhalb der Mischungsdreiecke fallen. Genau wie am Standort WLP im EZG der Weissen Lütschine fanden auch hier zu allen Zeitpunkten, an denen die Flusswasserproben außerhalb der Mischungsdreiecke liegen, Niederschlagsereignisse statt. Auch hier ist es also möglich, dass der Niederschlagssammler im oberen Teil des EZG zu diesen Zeitpunkten keine repräsentativen Werte für den Standort GG bietet. Auffällig ist auch, dass hier vor allem beim Trennen der schnellen Abflusskomponente Probleme auftraten. Dabei ist anzumerken, dass die genommenen Eisproben aus dem EZG der Weissen Lütschine stammen und deswegen ebenfalls möglicherweise nicht repräsentativ für diesen Standort sind.

5.3 Empirisch ermittelte Anteile der Abflusskomponenten

Um einen ersten Eindruck der empirisch ermittelten Abflusskomponenten zu bekommen, werden die Quellkomponenten zunächst als Zeitreihe betrachtet. Dabei wird evaluiert, wie stark einzelne End-Member zwischen den Messtagen schwanken und ob klare Muster über die Messzeitreihe erkennbar sind. Zudem wird geprüft, ob die Quellkomponenten einen Tagesgang aufweisen. Anschließend wird der Verlauf der Quellkomponenten über die Schmelzsaison an den einzelnen Messstandorten betrachtet. Abschließend werden die Ergebnisse der TEZG verglichen sowie die Unterschiede zwischen den EZG Schwarze und Weisse Lütschine genannt.

5.3.1 Tägliche Variation von Regen und Grundwasser

Die Abflusskomponente Regen nimmt in den EZG der Weissen und Schwarzen Lütschine an allen Standorten den kleinsten Anteil am Abfluss ein (Abbildung 29). Auch zeigt diese Abflusskomponente die kleinsten Variationen über die Zeitreihe. Größere Unterschiede in den Regenanteilen, zwischen einzelnen Tagen, entstehen vor allem durch Probleme bei der Trennung mittels der EMMA. So kommt es

beispielsweise am Standort GG vor allem an Tagen, zu denen die Messpunkte außerhalb des Mischungsdreiecks liegen, zu besonders niedrigen Anteilen des Regenwassers am Abfluss (in Abbildung 29 markiert durch ein X). Die langsame Fließkomponente des Grundwassers hat an allen Standorten einen Hauptanteil am Abfluss. Dabei nimmt sie vor allem am Anfang und am Ende der Messzeitreihe einen wichtigen Anteil am Gesamtabfluss ein, während ihr Anteil in der Mitte der Messphase stark zurückgeht (Abbildung 29).

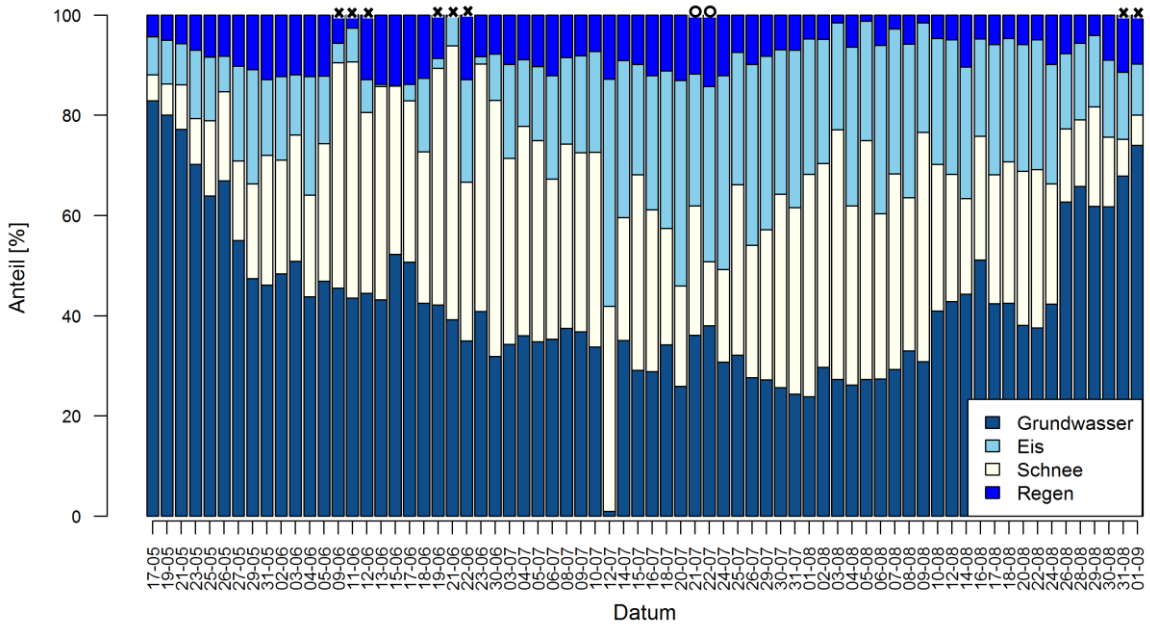


Abbildung 29: Abflussanteile über die gesamte Messperiode am Standort GG im EZG der Schwarzen Lütschine. Die Messtage, an denen die EMMA nicht korrekt durchgeführt werden konnten, sind mit einem X markiert. Ein beispielhaftes Regenereignis ist mit einem O markiert.

Zwischen den einzelnen Messtagen der Zeitreihe kommt es bei den Anteilen des Grundwassers immer wieder zu kleinen Spitzen, die aus der Zeitreihe ausbrechen. Vergleicht man die Zeitpunkte dieser Spitzen mit den Niederschlagsdaten, fällt auf, dass die Spitzen in der Messreihe der Grundwasserkomponente häufig kurz verzögert, nach Niederschlagsereignissen auftreten. Am Messstandort GG kommt es beispielsweise, nach dem zweitgrößten Regenereignis der Messzeitreihe am 20.07, zu erhöhten Grundwasseranteilen am 21.07. und 22.07. (Abbildung 29 mit einem O markiert). Genauso kommt es in der niederschlagsreichen Zeitspanne Ende August zu einem kontinuierlichen Anstieg der gemessenen Grundwasseranteile (Abbildung 29).

Auch der Anteil des Regenwassers im Abfluss reagiert auf einzelne Niederschlagsereignisse (Abbildung 29). Das es am Ende der Zeitreihe jedoch zu einer längeren Phase mit langanhaltenden und stärkeren Niederschlägen kommt, wird an keinem der Standorte, durch eine deutliche Zunahme der Regenwasserkomponente, deutlich. Der niederschlagsarme Zeitraum Anfang August wird hingegen durch die ermittelten Niederschlagsanteile erfasst, wenngleich die Variation zwischen den einzelnen Messtagen hier stark schwankt (Abbildung 29).

5.3.2 Tägliche Variation von Schnee- und Gletschereisschmelze

Die Schmelzkomponenten von Schnee- und Gletschereisschmelze machen neben dem Grundwasser an allen Standorten den Hauptanteil des Abflusses aus. Betrachtet man die Schmelzkomponenten gemeinsam, verhalten sie sich in ihrem Anteil komplementär zu den Anteilen des Grundwassers im Abfluss. So haben die Schmelzkomponenten maximale Anteile von Anfang Juni bis Mitte August und minimale Anteile am Anfang und Ende der Messzeitreihe (Abbildung 29, Abbildung 30).

Betrachtet man die Schmelzkomponenten getrennt, wird deutlich, dass eine klare Trennung beider Komponenten nicht möglich ist. Die Trennlinie zwischen den Komponenten verläuft unruhig und es sind keine deutlichen Spitzen der jeweiligen Komponente über eine längere Zeitspanne auszumachen. Die Komponente Gletschereisschmelze hat an allen Standorten bereits am Anfang der Zeitreihe deutliche Anteile am Abfluss. Die Komponente Schneeschmelze hat bis zum Ende der Messzeitreihe Anfang September beträchtliche Anteile am Gesamtabfluss (Abbildung 29, Abbildung 30).

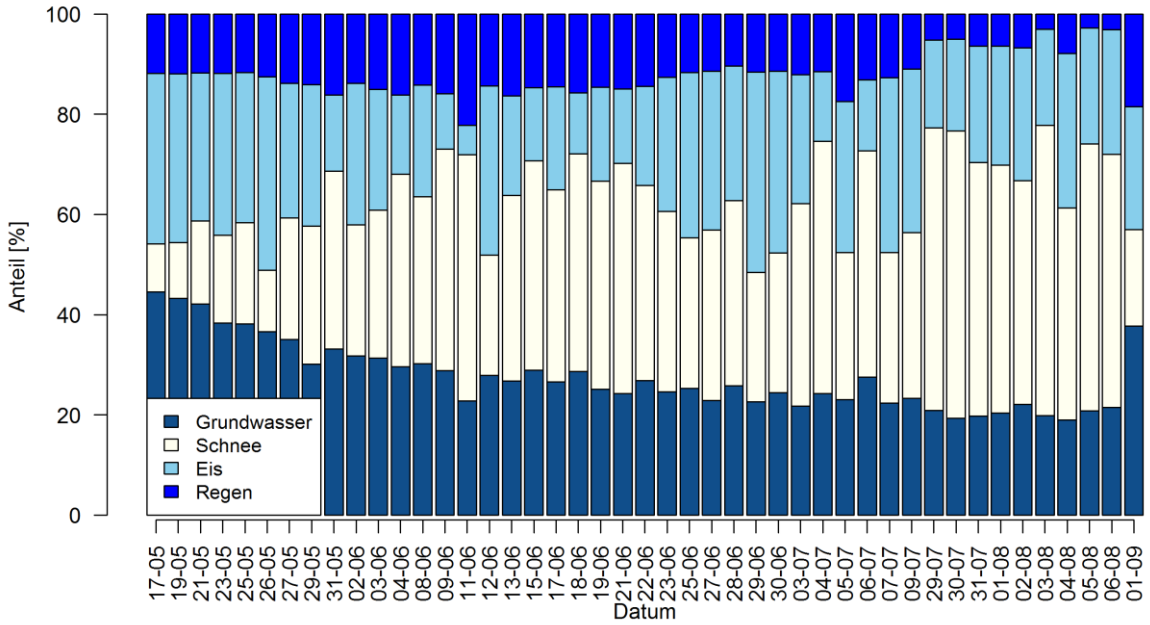


Abbildung 30: Abflussanteile über die gesamte Messperiode am Standort WL im EZG der Weissen Lütschine

5.3.3 Kurzzeitlichen Variationen- 24h Messungen

Während der 24h-Stunden Messung, zum erwarteten Schneeschmelze Peak am 06.06/07.06, kann an keinem der Standorte ein deutlicher Tagesgang ermittelt werden (Anhang Abbildung 52 bis Abbildung 56). Dabei ist jedoch unklar, ob eine höhere Auflösung auf Stundenbasis (nur jede zweite Probe wurde analysiert) zu einem eindeutigeren Ergebnis führen würde. Betrachtet man die Anteile der Schnee- und Eisschmelze als gemeinsame Schmelzkomponente so kann bei der 24h-Messung am 10.08/11.08, zum Zeitpunkt des erwarteten Eisschmelze Peaks, hingegen ein deutlicher Tagesgang erkannt werden. Dementsprechend nimmt die Schmelzkomponente am frühen Abend den Hauptanteil am Abfluss ein, während sie in den Morgenstunden stark zurückgeht (Abbildung 31, Tabelle 11).

Tabelle 11: Ermittelter Zeitpunkt von maximalen und minimalen Anteilen der Schmelzkomponenten im Abfluss. Am Standort SG konnte kein Tagesgang festgestellt werden (-), am Standort SL fand die Messung nicht statt (x)

EZG	Standort	Max [Uhrzeit]	Min [Uhrzeit]
Weisse Lütschine	WL	17-19	08-11
	SG	-	-
	WLP	19-23	09-13
Schwarze Lütschine	SL	x	x
	GG	19-23	13

Maximale und minimale Schmelzanteile werden an den Auslässen ca. 1-2 Stunden nach den gemessenen Maximal- und Minimalwerten am Messstandort WL gemessen, welcher im oberen Bereich des EZG liegt. An den Auslässen werden in beiden EZG maximale Anteile der Schmelzkomponenten zwischen 19 und 23 Uhr und minimale Anteile zwischen 09 und 13 Uhr gemessen. Am Standort WL wird das Maximum der Schmelze hingegen zwischen 17 und 19 Uhr erreicht, während minimale Schmelzanteile zwischen 08 und 11 Uhr auftreten (Tabelle 11).

Genau wie über die gesamte Messperiode, verhält sich der Grundwasseranteil auch im Tagesgang komplementär zu den Schmelzkomponenten. Im Vergleich dazu zeigt der Regenwasseranteil keinen Tagesgang, sondern variiert nur geringfügig zwischen den einzelnen Messungen (Abbildung 31). Betrachtet man die Schnee- und Gletschereisschmelze separat zeigt sich auch hier die gleiche, unruhige Trennlinie zwischen den beiden Abflusskomponenten wie zuvor über die gesamte Messzeitreihe. Eine klare Separation beider Komponenten ist auch während der 24h-Stundenmessung also nicht möglich.

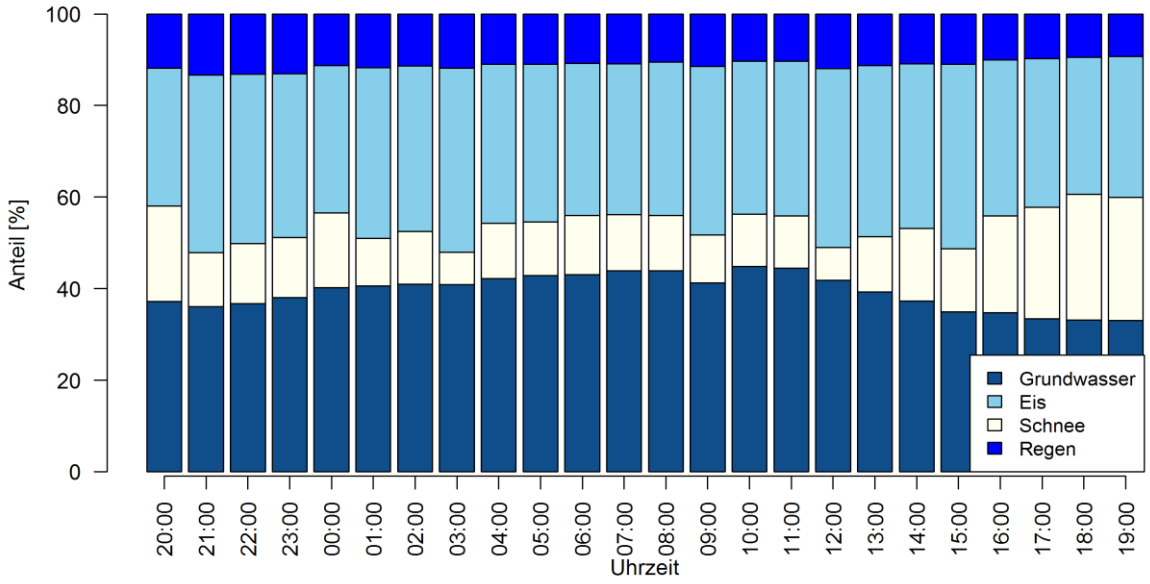


Abbildung 31: Abflussanteile am Standort WL während der 24-h Messung zum Zeitpunkt des erwarteten Eisschmelze Peaks

Betrachtet man jedoch die Tendenz von Zu- und Abnahme entsprechender Komponenten im Tagesverlauf fällt auf, dass die Schneeschmelze einen stärkeren Tagesgang hat als die Eisschmelze. So werden maximale Anteile der gemeinsamen Schmelzkomponenten maßgeblich durch eine Zunahme des

Schneeschmelzanteils geprägt. Die Eischmelzanteile variieren hingegen im Tagesgang ohne klaren Verlauf von Ab- und Zunahme (Abbildung 31). Dieses Phänomen ist an den Messstandorten im EZG der Weissen Lütschine deutlich sichtbarer als im EZG der Schwarzen Lütschine (Anhang Abbildung 57; Abbildung 58).

5.3.4 Verlauf der Abflusskomponenten in der Schmelzsaison

Um die Variation einzelner Abflusskomponenten in der Saison zu verdeutlichen und die einzelnen TEZG besser vergleichen zu können, wurden die ermittelten Abflussanteile über vier charakteristische Zeiträume zusammengefasst. Die Einteilung der Betrachtungsphasen orientiert sich dabei an klimatischen Gegebenheiten in den EZG Weisse und Schwarze Lütschine. Phase 1 beginnt am Anfang der Messreihe (15.05.) und endet am 07.06. unmittelbar vor dem ersten großen Regenereignis im Juni. Sie beschreibt den Anfang der Schmelzsaison. Phase 2 schließt an Phase 1 an und geht bis zum 29.07.. Sie beschreibt die Phase in der neben der Schneeschmelze auch steigende Anteile der Gletschereisschmelze erwartet werden. Die folgenden Phase 3, bis zum 12.08, beschreibt den sehr trockenen und warmen Zeitraum Anfang August, in dem ein Maximum der Gletschereisschmelze zu erwarten ist. Phase 4 geht bis zum Ende der Messreihe und beschreibt den von Niederschlagsereignissen beeinflussten Zeitraum der Messkampagne (Abbildung 32).

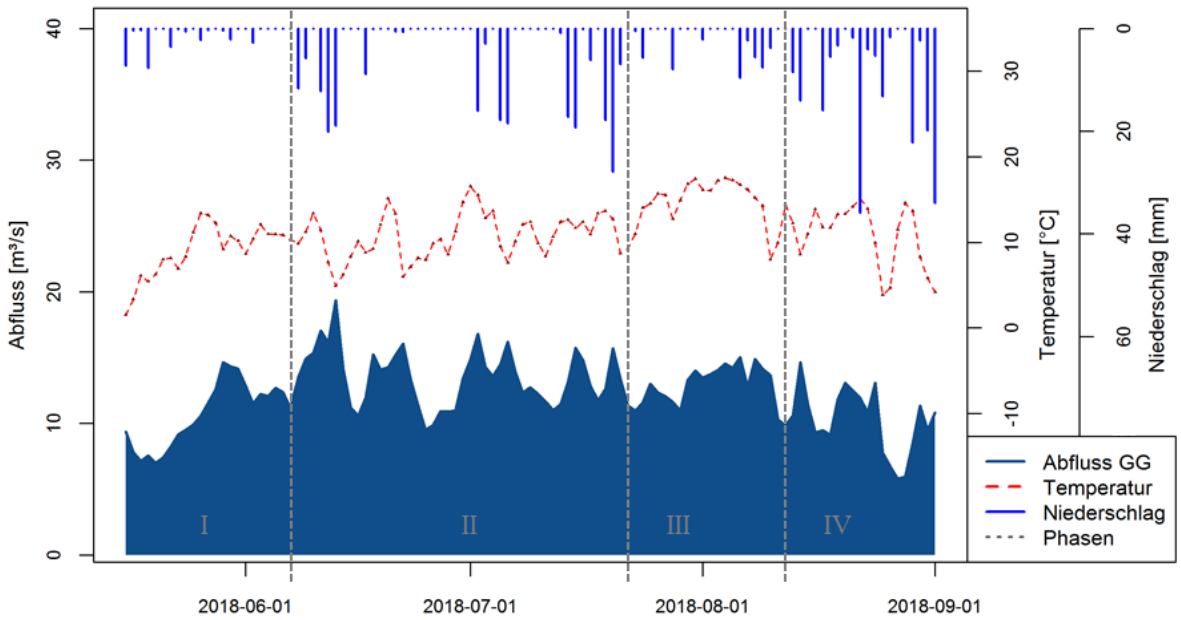


Abbildung 32: Einteilung der Betrachtungsphasen nach klimatischen Gegebenheiten

EZG Schwarze Lütschine

Am stark vergletscherten Messstandort SL im EZG der Schwarzen Lütschine kam es ab Mitte Juli zu teils starken Messausfällen. Betrachtungsphase 3 und 4 umfassen deshalb nur wenige Datenpunkte, weshalb die berechneten Mittelwerte nicht repräsentativ für diese Zeiträume sind. Am Standort GG wurden über die ganze Messzeitreihe kontinuierlich Proben erfasst.

Am stark vergletscherten Messstandort SL erreicht die Schneeschmelze die höchsten Anteile im Abfluss. An dem am Auslass gelegenen Messstandort GG dominiert hingegen die Grundwasserkomponente im Abfluss. Gleichzeitig kommt es an beiden Messstandorten, bei den Komponenten mit den größten Anteilen, auch zu den größten Schwankungen zwischen den einzelnen Messwerten (Abbildung 33).

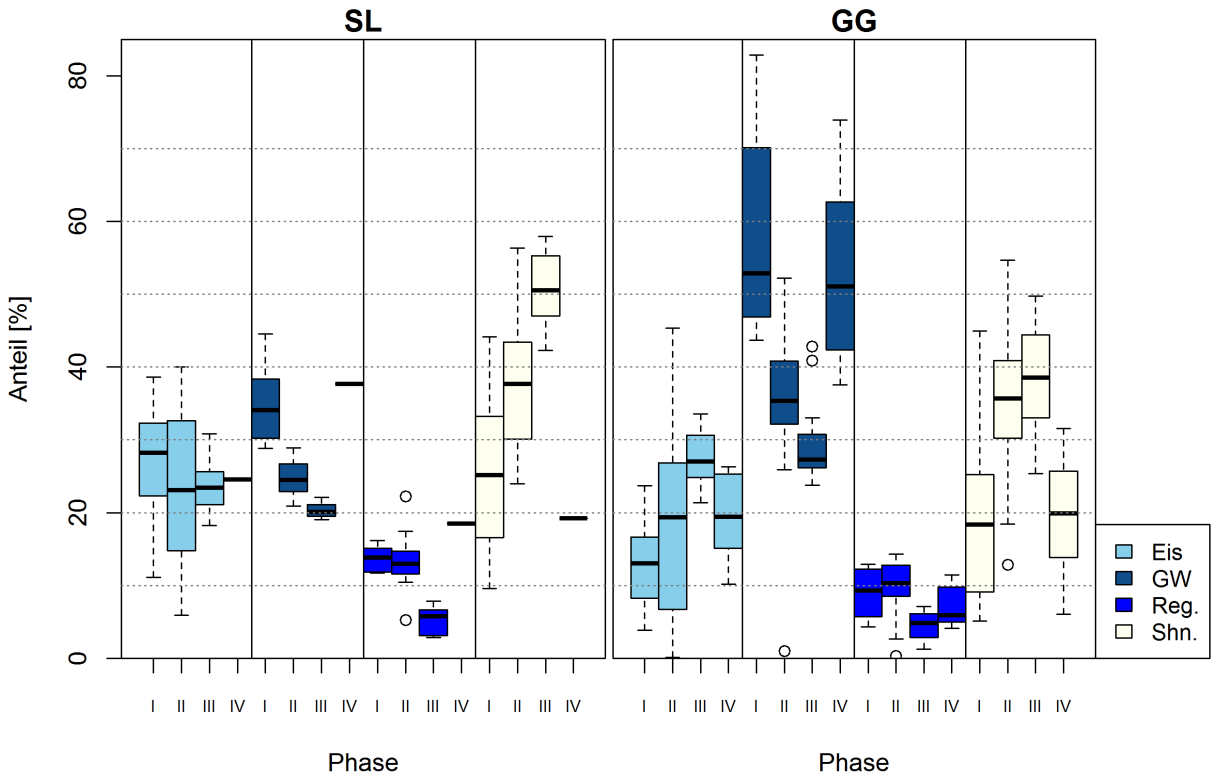


Abbildung 33: Variation der Abflussanteile über die Schmelzsaison im EZG der Schwarzen Lütschine, am stark vergletscherten Messstandort SL sowie am Auslass des EZG GG.

Zu Höchstanteilen der Schneeschmelze kommt es am Messstandort SL Anfang August (Abbildung 33). Hier macht sie im Mittel die Hälfte des Abflusses aus. Im Vergleich dazu ist in den Betrachtungsphasen am Anfang und Ende der Messperiode die Schneeschmelze nur halb so groß. Der Anteil der Gletschereiskomponente schwankt am Standort SL über die Schmelzsaison nur gering. Im Mittel liegt der Anteil der Gletschereisschmelze am Abfluss über die ganze Messdauer bei rund 25%. Zu den höchsten Anteilen der Gletschereisschmelze kommt es am Anfang der Zeitreihe. Die Komponente des Grundwassers verhält sich am stark vergletscherten Standort SL entgegengesetzt des Anteils der Schneeschmelze. Durchschnittlich macht das Grundwasser rund 30% des Abflusses aus. Der Anteil des Regenwassers spiegelt am Messstandort SL gut die Situation des Klimas im EZG wieder. Anfang August kommt es zu den niedrigsten Anteilen des Regenwassers von rund 5% am Gesamtabfluss, Anfang September zu rund viermal so hohen Anteilen.

Am flussabwärts gelegenen Standort GG zeigen die Komponenten Grundwasser, Regen und Schneeschmelze den gleichen Verlauf über die Betrachtungsphasen wie am Standort SL. Nur die Komponente Gletschereis verhält sich über den zeitlichen Verlauf am Standort GG anders. Sie folgt hier dem gleichen

Muster wie die Schneeschmelze und zeigt dementsprechend maximale Werte in der dritten Betrachtungsphase Anfang August. Mit mittleren Anteilen von rund 20% ist der Anteil der Gletschereisschmelze am Standort GG insgesamt etwas geringer als am Standort SL. Am Standort GG schwanken die Anteile der Grundwasserkomponente über die Saison stark. So sind die Anfang August erfassten, minimalen Anteile nur rund halb so groß wie die gemessenen Maximalanteile des Grundwassers. In den Phasen am Anfang und Ende der Messkampagne macht das Grundwasser am Standort GG mehr als die Hälfte des Gesamtabflusses aus. Die Schmelzkomponenten Schnee und Eis haben zum Zeitpunkt minimaler Grundwasseranteile ihren Hauptanteil am Abfluss. Sie nehmen im Mittel rund 30% (Eis) und 40% (Schnee) des Abflusses ein. Die minimalen Anteile beider Komponenten sind am Standort GG je halb so groß und werden am Anfang der Zeitreihe gemessen (Abbildung 33).

Auch am Standort GG werden minimale Regenanteile in der 3. Betrachtungsphase von rund 5% beobachtet, während der Anteil der Regenkomponente über die weiteren Phasen etwa doppelt so hoch ist. Der niederschlagsreiche Zeitraum Ende August wird am Messstandort GG messtechnisch nicht erfasst. An beiden Messstandorten schwanken, bei der Komponente Regenwasser, die einzelnen Messwerte einer Betrachtungsphase über den kleinesten Wertebereich (Abbildung 33).

EZG Weisse Lütschine

Im EZG Weisse Lütschine kommt zu dem stark vergletscherten Standort WL und dem Auslass des EZG WLP noch der Messstandort SG dazu, welcher ein nicht vergletschertes TEZG repräsentiert. Im EZG der Weissen Lütschine macht über die gesamte Messreihe, an allen Standorten, das Grundwasser den Hauptanteil des Abflusses aus. Am Messstandort WLP kommt es beim Erfassen der Grundwasserkomponente zu den größten Schwankungen zwischen den einzelnen Messungen, am Standort WL und SG beim Erfassen des End-Member Schnee. Zu beachten ist, dass es an den Standorten WL und WLP zu einigen Ausfällen bei den Messungen kam (Vergleich Kapitel 5.1.1).

Am Standort SG werden die höchsten Grundwasseranteile am Abfluss gemessen (Abbildung 34). Hier macht die langsame Fließkomponente im Mittel rund die Hälfte des Abflusses aus. Am Standort WLP liegen die Anteile etwas unter der Hälfte, am Standort WL bei rund 35%. Alle Messstandorte im EZG der Weissen Lütschine zeigen den gleichen zeitlichen Verlauf der Grundwasserkomponente. So kommt es am Anfang und Ende der Messzeitreihe zu den höchsten Grundwasseranteilen, während in den zwei mittleren Betrachtungsphasen die niedrigsten Grundwasseranteile gemessen werden. Insgesamt variieren die mittleren Anteile der Grundwasserkomponente über den gesamten Messzeitraum, an allen Messstandorten im EZG der Weissen Lütschine, nur sehr geringfügig.

Die Schneeschmelzkomponente verhält sich an allen Messstandorten im zeitlichen Verlauf über die Betrachtungsphasen komplementär zu den Grundwasseranteilen. Am Standort WL kommt es in der dritten Phase Anfang August zu den höchsten Schneeschmelzanteilen am Abfluss, an den Standorten SG und WLP in der zweiten Betrachtungsphase. Die mittleren Höchstanteile liegen am Standort WL mit rund

30% leicht über den mittleren Schneeanteilen am Standort WLP. Die durchschnittlichen Höchstanteile der Schneeschmelze sind am Standort SG mit 45% jedoch deutlich höher. Die kleinsten Schneeschmelzanteile werden in der vierten Betrachtungsphase gemessen. Hier sind die Anteile der Schneeschmelze an den Standorten SG und WL deutlich niedriger als die Höchstanteile. Am Standort WLP schwanken die Anteile der Schneeschmelze nur in geringem Maße. Hier liegen die mittleren Schneeschmelzanteile bei rund 20% (Abbildung 34).

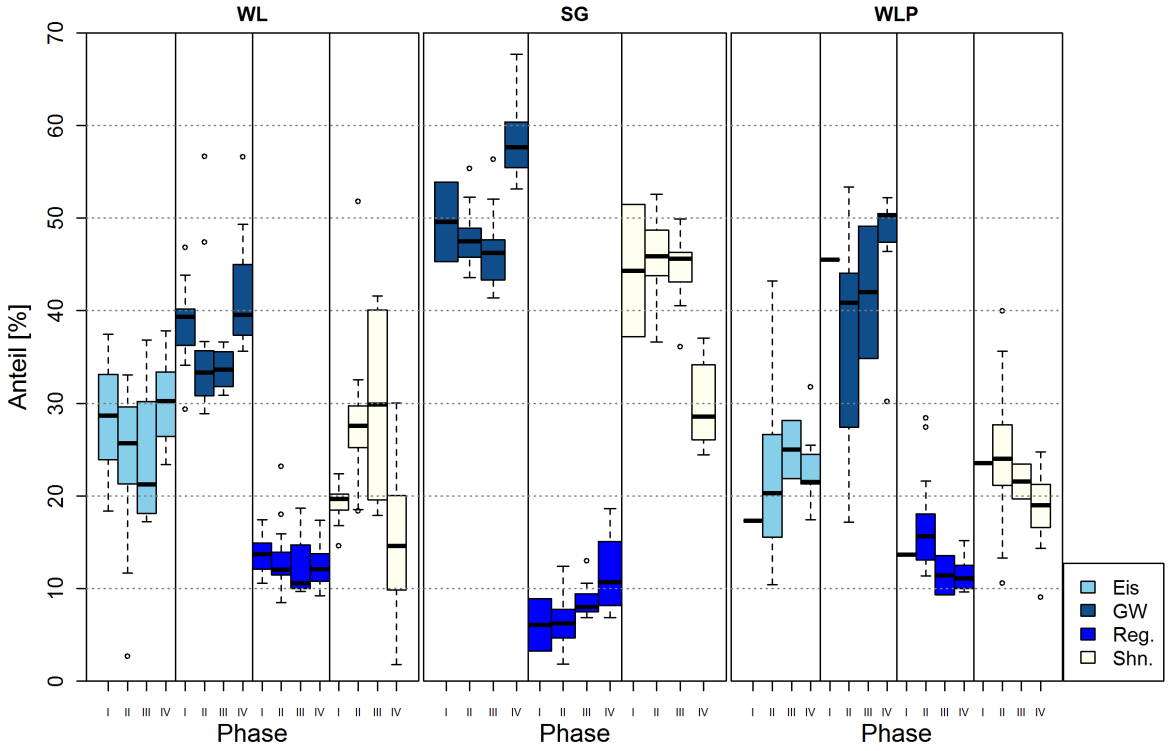


Abbildung 34: Variation der Abflussanteile über die Schmelzsaison im EZG der Weissen Lütschine. Betrachtet werden das stark vergletscherte TEZG WL, das nicht vergletscherte TEZG SG und der Auslass des gesamten EZG WLP

Auch die Anteile des End-Member Gletschereisschmelze schwanken an den Standorten WL und WLP im Mittel nur um einen geringen Wertebereich. Am Messstandort WL werden die höchsten Gletschereisanteile am Anfang und Ende der Messkampagne gemessen, während die niedrigsten Werte Anfang August erfasst werden. Im Mittel bildet die Gletschereisschmelze am Standort WL rund ein Viertel des Gesamtabflusses. Am Auslass des EZG WLP ist der Anteil der Gletschereisschmelze im Mittel geringfügig niedriger. Sie liegt hier in der gleichen Größenordnung wie die Schneeschmelze. Der saisonale Verlauf verhält sich am Standort WLP komplementär zu dem am Standort WL. Am Standort WLP werden die höchsten Gletschereisanteile Anfang August und die Niedrigsten Anfang und Ende der Messphase erfasst (Abbildung 34).

Der Anteil des Regenwassers am Gesamtabfluss ist an allen drei Standorten am Geringsten. An den Standorten WL und WLP werden über die gesamte Messphase etwa gleich große Regenwasseranteile gemessen, während der Anteil des Regenwassers im TEZG SG einen geringeren Anteil einnimmt. Im

Mittel macht er im EZG der Weissen Lütschine rund 10% des Abflusses aus. Der zeitliche Verlauf über die Schmelzsaison ist im EZG Weisse Lütschine an allen Standorten unterschiedlich (Abbildung 34).

5.3.5 Vergleich der TEZG innerhalb eines EZG sowie der EZG untereinander

Vergleicht man die Standorte mit großem Anteil vergletscherter Fläche (WL, SL) und die Messstandorte am Auslass (WLP, GG), der beiden EZG Weisse Lütschine und Schwarze Lütschine, werden zwei Dinge deutlich. Zum einen welche Tendenz es bei den Abflussanteilen in den gewählten TEZG gibt und zum anderen wie sich beide EZG voneinander unterscheiden.

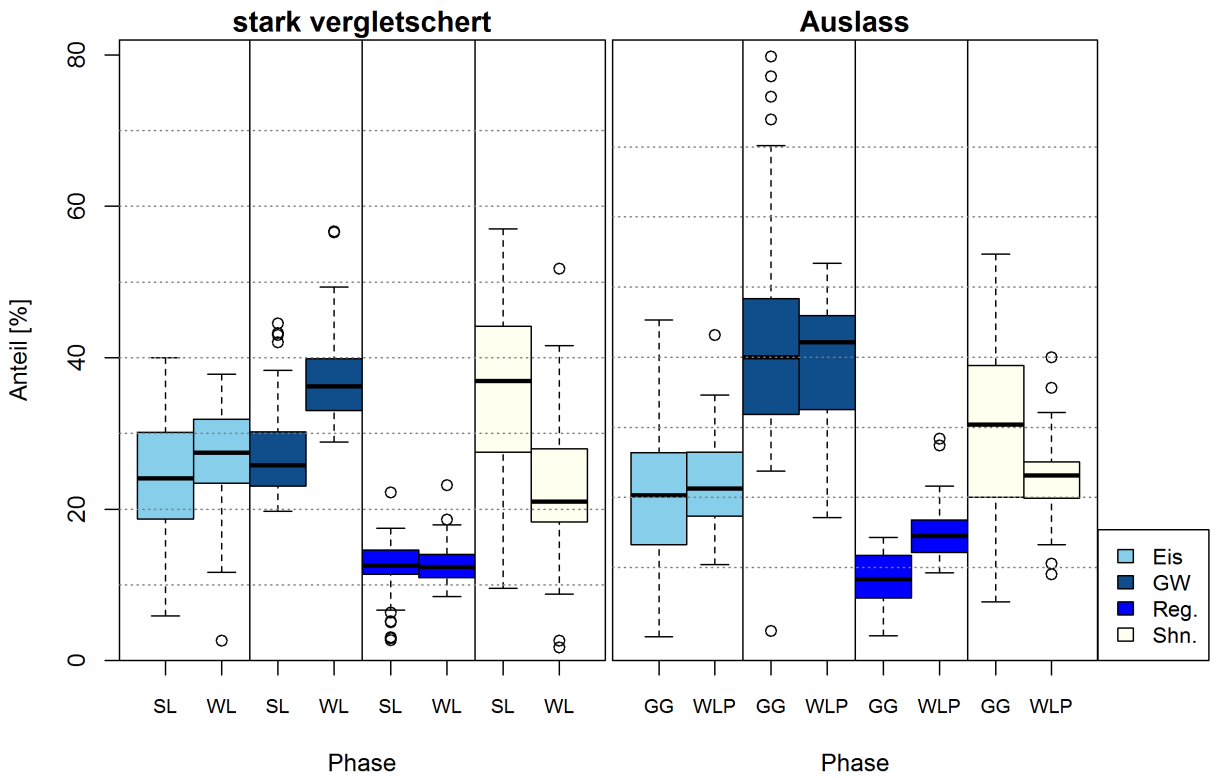


Abbildung 35: Vergleich der Abflussanteile in den TEZG mit großem Anteil vergletscherter Fläche (SL,WL) und am Auslass (GG, WLP) sowie der Vergleich der Ergebnisse der EZG Schwarze (SL, GG) und Weisse Lütschine (WL,WLP)

Die stark vergletscherten TEZG unterscheiden sich von den Auslässen vor allem in den gemessenen Anteilen der Schmelz- und Grundwasserkomponenten (Abbildung 35). An den Messstandorten mit hohem Anteil vergletscherter Fläche kommt es im Mittel zu höheren Anteilen an Schnee- und Gletschereisschmelzwasser, an den Auslässen im Mittel zu höheren Grundwasseranteilen. Der Vergleich der EZG Schwarze und Weisse Lütschine bezieht sich auf die gleichen Abflusskomponenten. Im Mittel werden im EZG der Weissen Lütschine höhere Grundwasseranteile erfasst, während im EZG der Schwarzen Lütschine die Schneeschmelze eine wichtigere Rolle bei der Abflussbildung einnimmt.

5.4 Abflussseparation mit dem HBV-Light

Bevor die empirisch ermittelten Abflussanteile mit den modellierten Abflussanteilen verglichen werden, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Modellierung evaluiert. Dazu werden die Ergebnisse der Kalibrierung dargestellt sowie die Simulationsergebnisse der verwendeten Modellversionen „Complete Mixing“ und „Magic Components“ verglichen.

5.4.1 Ergebnisse der Kalibrierung

Bei der Kalibrierung des EZG Schwarze Lütschine wurde festgestellt, dass der zulässige Wertebereich für den Modellparameter K2 mit $5*10^{-5}$ zu klein gewählt ist. Der Parameter K2 ist ein Speicherkoeffizient der unteren Grundwasserbox, der beschreibt mit welcher Geschwindigkeit diese ausläuft. Acht der zehn kalibrierten Parametersätze enthalten einen sehr kleinen K2-Wert und simulieren somit ein sehr langsames, kontinuierliches Auslaufen der unteren Grundwasserbox. Die Komponente des Grundwassers zeigt in der Modellierung mit sehr kleinen K2-Werten somit keine Dynamik im Jahresverlauf, sondern verläuft gleichbleibend niedrig. Dies wird als unrealistisch eingestuft, weshalb die acht Parametersätze mit sehr kleinen K2-Werten im Einzugsgebiet der Schwarze Lütschine verworfen werden. Für die Modellierung wird aus den zwei verbleibenden Parametersätzen das Parameterset mit der höheren Weighted Objective Function gewählt. Insgesamt ist dies das zweitbeste Parameterset der Kalibrierläufe im EZG der Schwarzen Lütschine. Im EZG der Weissen Lütschine verlief die Kalibrierung problemlos.

Die Modellierung mit den besten Parametersätzen führte in beiden EZG zu guter Übereinstimmung von beobachteten und simulierten Messdaten (Tabelle 12). Insgesamt kommt es im EZG der Weissen Lütschine jedoch zu einer besseren Übereinstimmung von Simulation und Messungen, als im EZG der Schwarzen Lütschine (Tabelle 12). In beiden EZG gibt es bei der Simulation der Abflüsse im Sommer sowie der Modellierung der Schneehöhen die größten Differenzen zu den Beobachtungsdaten (Tabelle 12; Abbildung 36; Anhang Abbildung 59).

Tabelle

12: Gütemaße für die Übereinstimmung von modelliertem und beobachteten Abfluss und Schneedaten für den Lauf mit dem besten Parameterset in den EZG der Schwarzen und Weissen Lütschine

Kalibriergröße	Gütemaß	Weisse Lütschine	Schwarze Lütschine
Abfluss	Spearman Rank	0.96	0.94
	R2	0.9	0.88
	Mod. EFF (NSA)	0.9	0.88
	VOL. ERR	1	0.92
	Lindstrom Measure	0.9	0.87
	log Reff	0.85	0.91
	Reff Season	0.72	0.67
Schnee	SWE_MANE	0.75	0.72

Der Vergleich von simulierten und beobachteten Schneehöhen ergibt, dass die modellierten Schneehöhen in beiden EZG fast durchgängig unterschätzt werden. Dabei stimmt häufig der Verlauf von Zu- und Abnahme der ermittelten Schneehöhen gut mit den Beobachtungsdaten überein, nicht aber die Maximalwerte. Im EZG der Schwarzen Lütschine werden z.B. im Jahr 2016 mittlere Schneehöhen von bis zu 400 mm beobachtet, aber nur Schneehöhen bis zu rund 200 mm simuliert. Im Betrachtungsjahr (2018) dieser Arbeit kommt es in beiden EZG zu einer guten Übereinstimmung zwischen beobachteten und simulierten Daten. So werden hier die modellierten Schneehöhen in beiden EZG nur leicht unterschätzt. Es fällt auf, dass die Schneehöhen im Jahr 2018 mit Maximalwerten von 600 mm in beiden EZG deutlich über dem langjährigen Mittel liegen (Abbildung 36).

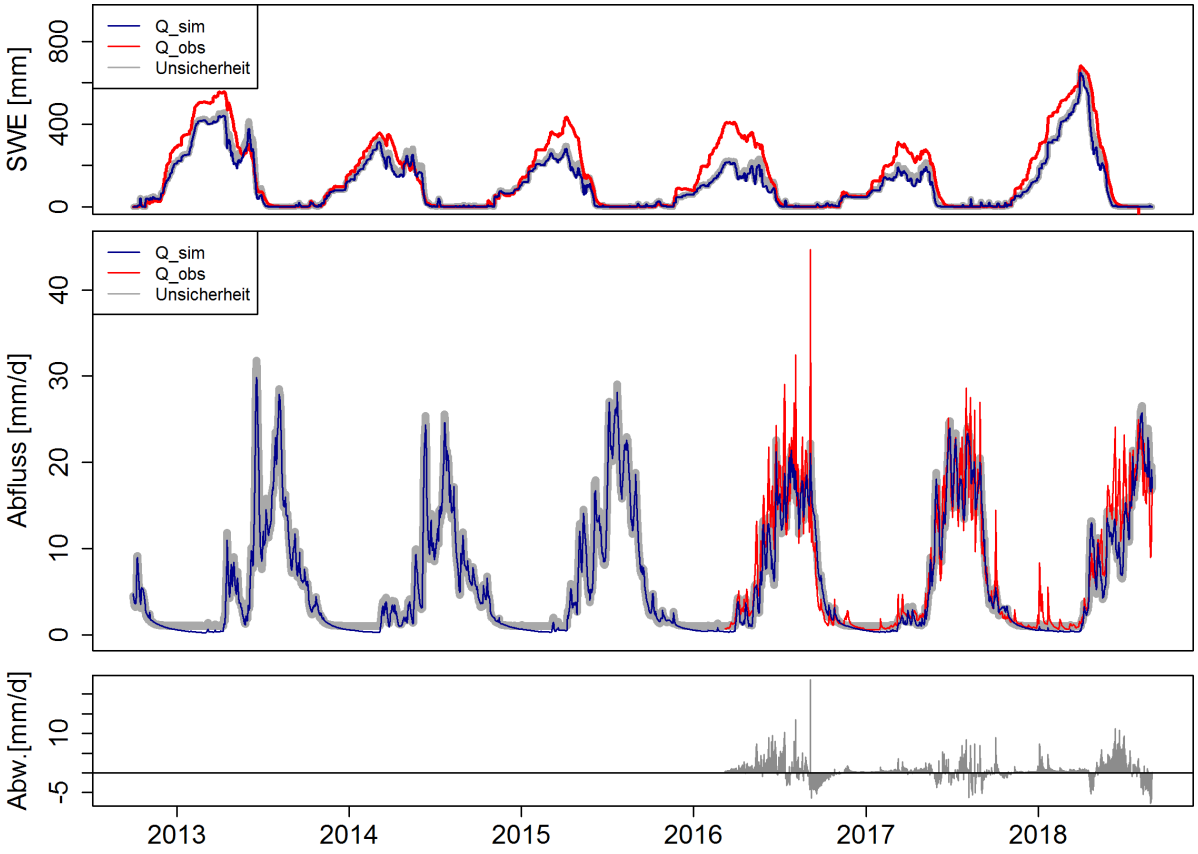


Abbildung 36: Beobachtete(r) (blau) und mit dem besten Parametersetz modellierte(r) (rot) Schneehöhen und Gesamtabfluss im EZG der Schwarzen Lütschine über die gesamte Kalibriermessreihe. In Grau außerdem die modellierten Resultate durch das zweitbeste Parameterset.

Bei der Simulation des Abflusses kommt es in beiden EZG zu keiner systematischen Über- oder Unterschätzung der Abflussganglinie. Im Mittel stimmen beobachteter und simulierter Abfluss also gut überein (Abbildung 36). Die saisonale sowie kurzzeitliche Dynamik des Abflusses wird im EZG der Weissen Lütschine jedoch besser erfasst als im EZG der Schwarzen Lütschine. So kommt es im EZG der Schwarzen Lütschine im Messjahr 2018, zwischen Juni und August, zu einer kontinuierlichen Unterschätzung des modellierten Abflusses und von August bis September zu einer leichten Überschätzung des Abflusses. Zudem werden die Abflussspitzen am Anfang der Schmelzsaison in ihrer Dynamik und Magnitude

nicht erfasst. Im Vergleich zur simulierten Abflussganglinie reagiert die gemessene heftiger und über einen kürzeren Zeitraum, auf Niederschlagsereignisse (Abbildung 37).

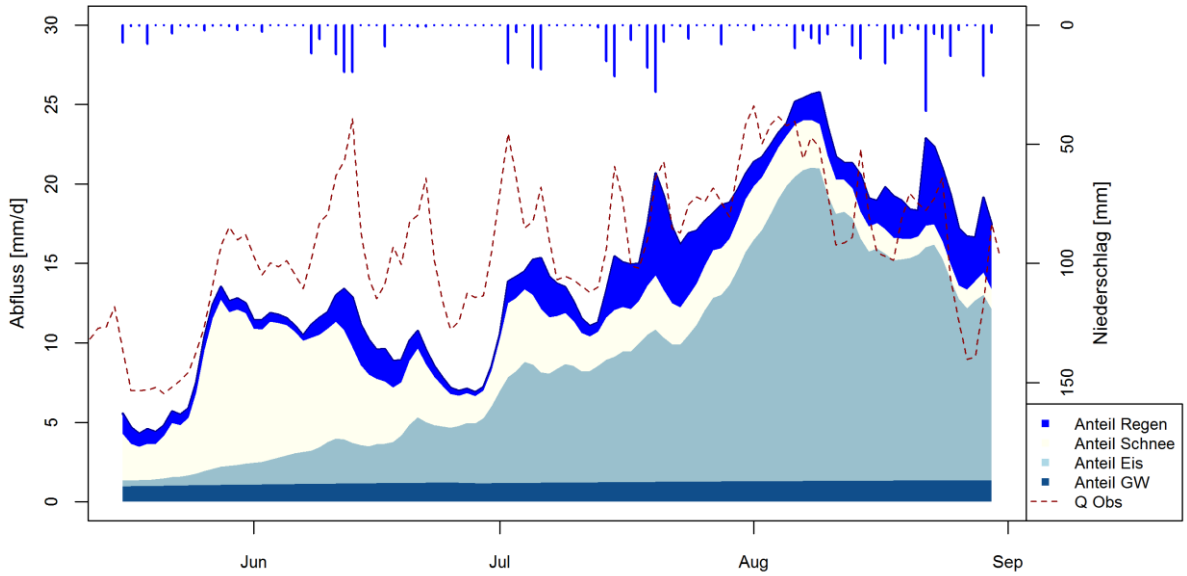


Abbildung 37: Modellierte Abflussanteile des Regenwassers (Regen), der Schneeschmelze (Schnee), der Gletschereisschmelze (Eis) und des Grundwassers (GW) am Messstandort GG im EZG der Schwarzen Lütschine, für das Messjahr 2018. In Rot außerdem die observierte Abflussganglinie dieses Standortes und in blau der modellierte Niederschlag.

Der Vergleich der durch das beste Parameterset modellierten Abflussganglinie, mit dem modellierten Abfluss der fünf (bzw. 1) folgenden, besten Parametersätze, ergibt keinen deutlichen Unterschied (Abbildung 36). Zu beachten ist jedoch, dass trotz ähnlich modelliertem Abflussvolumen die Anteile der einzelnen Abflusskomponenten, je nach verwendetem Parameterset, variieren können (Anhang Abbildung 60).

5.4.2 Vergleich der gebrauchten Modellversionen

Der Gebrauch der Modellversion „Complete Mixing“ oder „Magic Components“ wirkt sich ausschließlich auf die modellierten Anteile der Abflusskomponenten Regen und Schneeschmelze aus. Die Unterschiede zwischen den Modellversionen treten vor allem im Sommer, zu Zeitpunkten von niederschlagsbedingten Abflussspitzen in den Ganglinien, auf. So kommt es während dieser Abflussspitzen durch die Modellversion mit begrenztem Mischungsbehälter zu einem höheren Anteil an Regenwasser und einem niedrigeren Anteil der Schneeschmelzkomponente im Abfluss. Im EZG der Weissen Lütschine tritt dieser Effekt über einen kurzen Zeitraum auf, dafür aber heftig. Hier macht der durch den begrenzten Mischungsbehälter simulierte Anteil des Niederschlags, in den steilen Abflussspitzen der Sommermonate, den Hauptanteil des Abflusses aus. Im EZG der Schwarzen Lütschine ist der Effekt fast nicht sichtbar, erstreckt sich aber über eine längere Zeitspanne (Abbildung 38).

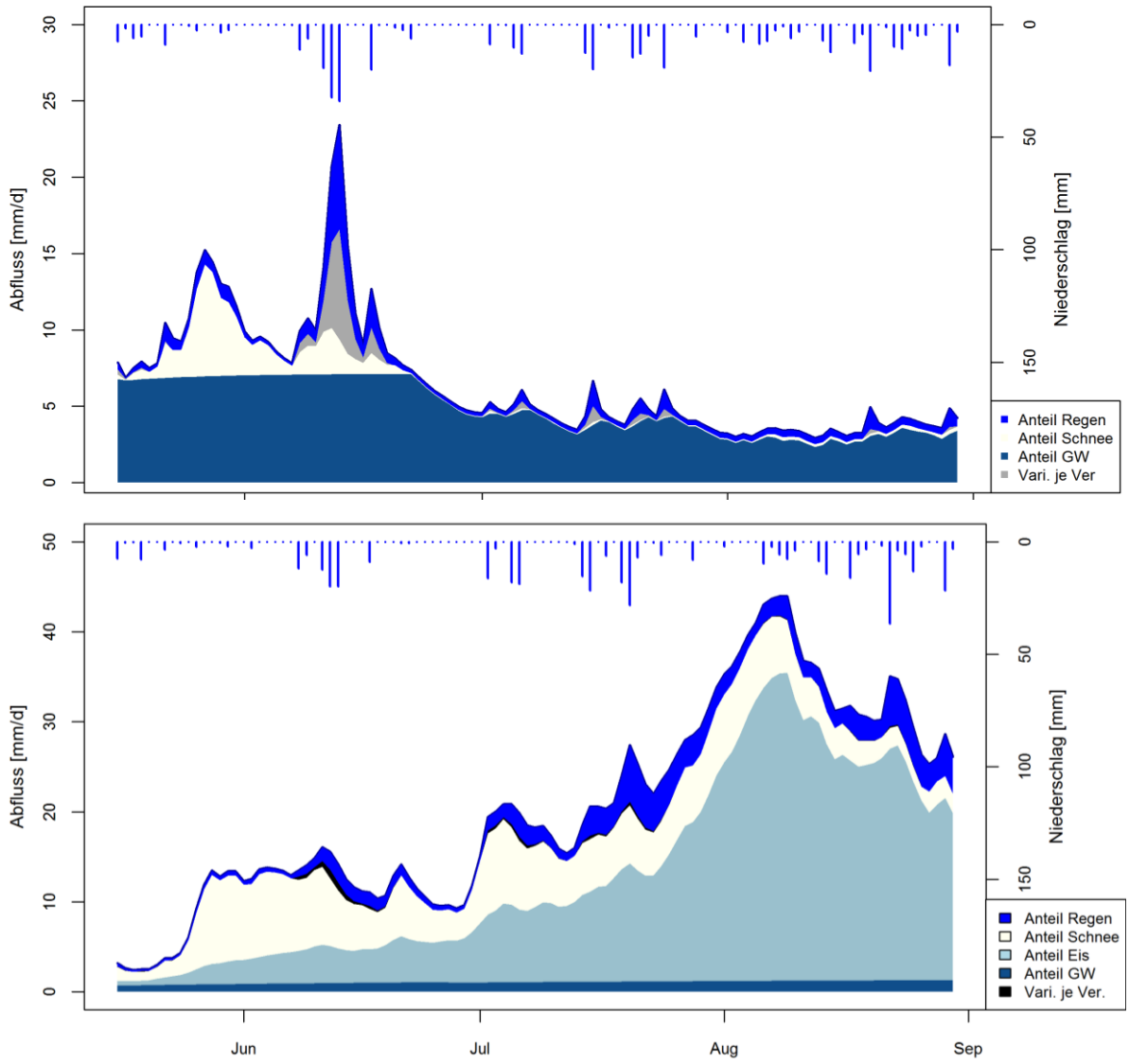


Abbildung 38: Modellierte Abflussanteile des Regenwassers (Regen), der Schneeschmelze (Schnee) und des Grundwassers (GW) am Messstandort SG (oben) und SL (unten) für das Messjahr 2018. In Grau/Schwarz der Anteil, der je nach Gebrauch der Modellversion „Complete Mixing“ oder „Magic Components“ dem Schnee oder dem Regen zugeschrieben wird.

5.5 Vergleich gemessener und modellierter Abflussanteile

Zunächst werden die Messdaten mit den durch beide Modellversionen ermittelten Abflussanteilen verglichen und danach entschieden, welche der gebrauchten Modellversionen für den Vergleich mit den Messdaten geeigneter ist. Die mit dieser Version simulierten Anteile werden dann mit den Messdaten für beide EZG getrennt verglichen. Abschließend werden Modellier- und Messergebnisse beider EZG betrachtet.

5.5.1 Wahl der Modellversion für den Vergleich mit den Messdaten

Vergleicht man die simulierten Abflussanteile mit den gemessenen Abflussanteilen wird deutlich, dass die mit der Modellversion „Complete Mixing“ simulierten Daten besser mit den Messdaten übereistimmen (Abbildung 39). So findet in beiden EZG durch die Modellversion „Magic Components“ eine stärkere Unterschätzung der Schneeschmelzanteile und im Mittel eine stärkere Überschätzung des Regenwasseranteils statt (Abbildung 39). Aus diesem Grund wurde entschieden, für den Vergleich von Mess- und Modellierdaten, ausschließlich die mit der Modellversion „Complete Mixing“ simulierten Abflussanteile zu verwenden.

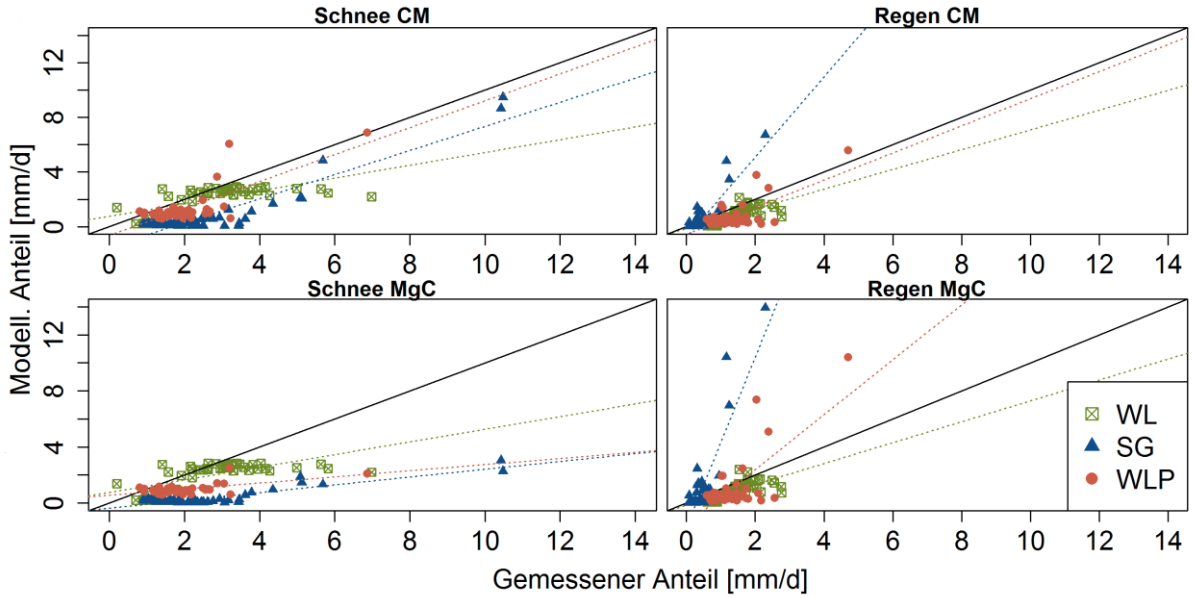


Abbildung 39: Scatterplot zum Vergleich der durch Messung und Modellierung ermittelten Anteile von Schnee und Regen je nach gebrauchter Modellversionen „Complete Mixing“ (CM) oder „Magic Componets“ (MgC) für die Messstandorte im EZG der Weissen Lütschine.

5.5.2 Abflussanteile im EZG der Schwarzen Lütschine

Im EZG der Schwarzen Lütschine gibt es einen klaren Zusammenhang zwischen gemessenen und modellierten Abflussanteilen aus Grundwasser, Gletschereisschmelze und Regenwasser. Bei allen drei Abflusskomponenten kommt es für sehr niedrige Abflussanteile zu einer guten Übereistimmung. Vergleicht man jedoch die ermittelten Werte von hohen Grundwasseranteilen, werden die Messwerte im Vergleich zur Modellierung stark überschätzt. Dies ist an beiden Messstandorte im EZG der Schwarzen Lütschine der Fall. Die Anteile der Gletschereisschmelze werden an beiden Messstandorten jedoch

durch die Messdaten im Vergleich zur Simulation unterschätzt. Hohe Anteile des gemessenen Regenwassers werden am Messstandort GG im Vergleich zu den simulierten Daten überschätzt und am Standort SL unterschätzt. Zwischen den gemessenen und modellierten Schneeschmelzanteilen gibt es im EZG der Schwarzen Lütschine keinen klaren Zusammenhang. Für mittlere Schneeschmelzanteile stimmen Mess- und Simulationsdaten gut überein. Für niedrige Schneeschmelzanteile werden die Messdaten im Vergleich zur Simulation tendenziell überschätzt, für hohe Anteile unterschätzt. Dieser Effekt ist am Standort GG deutlich sichtbarer als am Messstandort SL (Abbildung 40).

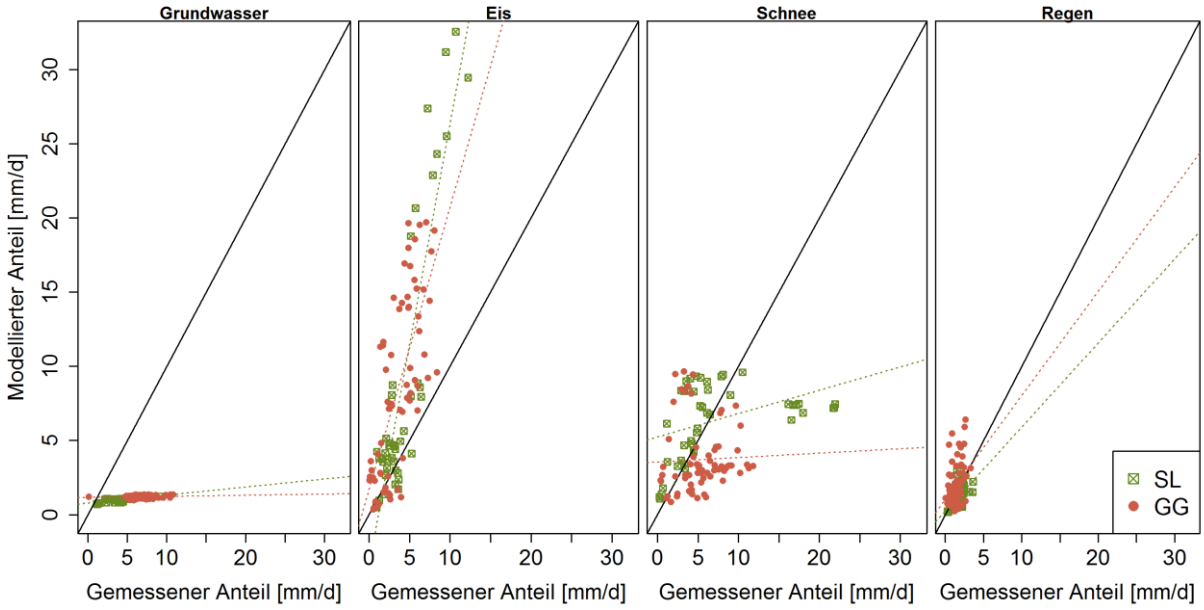


Abbildung 40: Scatterplot zum Vergleich der gemessenen und modellierten Anteile von Grundwasser, Gletschereis, Schnee und Regen mit der Modellversionen „Complete Mixing" für die Messstandorte im EZG der Schwarzen Lütschine.

Die Relevanz und zeitliche Dynamik der Über-/Unterschätzung einzelner Abflussanteile ergibt sich aus dem Vergleich von Modellier- und Messdaten über die gesamte Zeitreihe (Abbildung 41). So wird hier deutlich, dass im EZG der Schwarzen Lütschine die größten Differenzen zwischen Mess- und Simulationsdaten durch starke Unterschiede zwischen den Grundwasseranteilen entstehen. Während die gemessenen Grundwasseranteile über die Zeitreihe einer deutlichen Zunahme der absoluten Werte unterliegen, bleiben die modellierten Grundwasseranteile über den Zeitraum gleichbleibend niedrig. Dies resultiert nicht nur aus einer großen Differenz zwischen den modellierten und gemessenen Grundwasseranteilen, sondern wirkt sich auch auf Unterschiede der gemessenen und modellierten Anteile der Komponente Gletschereis- und Schneeschmelze aus. Durch höhere Messwerte der Grundwasseranteile, fallen am Anfang der Messzeitreihe die gemessenen Schneeschmelzanteile geringer aus als die simulierten Schneeschmelzanteile. In der Mitte und am Ende der Zeitreihe sind hingegen die gemessenen Gletschereisschmelzanteile geringer als die modellierten Anteile (Abbildung 41).

Zudem fallen zwei Dinge auf. Zum einen wird sowohl durch die Messung, als auch durch die Simulation der Beginn der Gletschereisschmelze Mitte Mai ermittelt. Anfang Juni hat die Eisschmelze dann sowohl durch Messung, als auch Modellierung bereits beträchtliche Anteile am Abfluss. Zum anderen fällt auf,

dass in der sehr warmen und trockenen Phase Ende Juli, Anfang August die modellierten und gemessenen Schneeschmelzanteile stark übereinstimmen. Insgesamt verläuft die Trennlinie zwischen den modellierten Schmelzanteilen ruhiger als zwischen den gemessenen Schmelzanteilen. Bei der Modellierung kommt es zwischen den einzelnen Betrachtungstagen nicht zu so starken Schwankungen zwischen Schnee- und Eisschmelzanteilen, wie durch die Messung bestimmt. Die gemessenen Regenwasseranteile stimmen im Mittel gut mit den simulierten Daten überein. Am Anfang der Zeitreihe werden die gemessenen Regenwasseranteile in Bezug auf die simulierten Anteile tendenziell überschätzt, am Ende der Zeitreihe tendenziell unterschätzt (Abbildung 41).

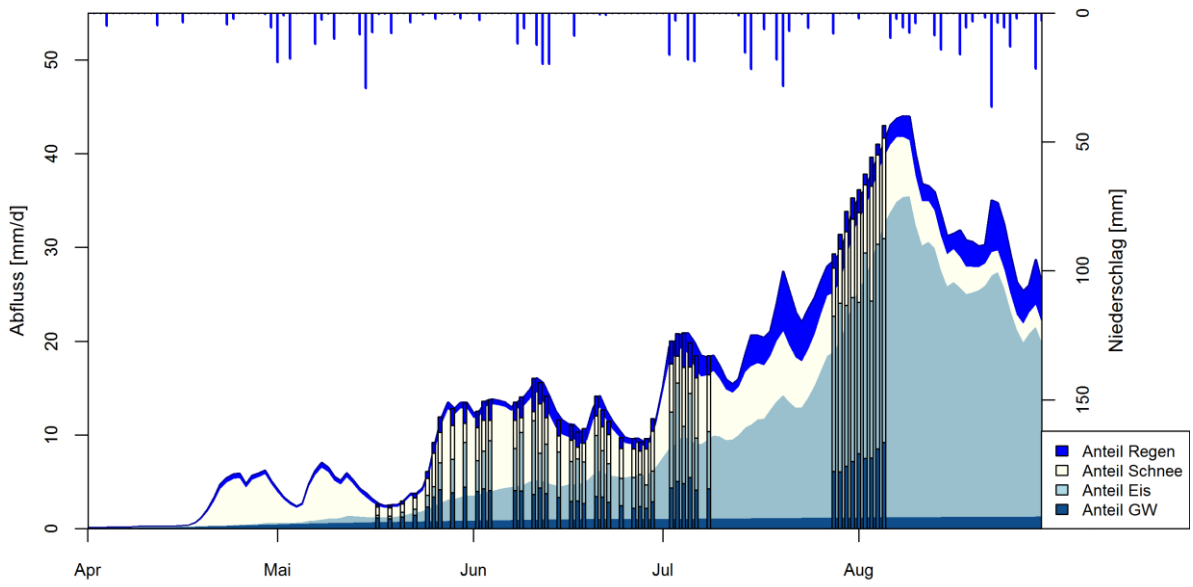


Abbildung 41: Vergleich von gemessenen und modellierten Abflussanteilen des Regenwassers (Regen), Schneeschmelze (Schnee) und Grundwassers (GW) am Messstandort SL im EZG der Schwarzen Lütschine für das Messjahr 2018.

5.5.3 Abflussanteile im EZG der Weissen Lütschine

Im EZG der Weissen Lütschine stimmen im Mittel die Mess- und Modellierdaten besser überein als im EZG der Schwarzen Lütschine. Hier kommt es jedoch teils zu größeren Unterschieden zwischen den einzelnen Messstandorten. An den Standorten SG und WLP werden die gemessenen Grundwasseranteile im Vergleich zu den simulierten Anteilen leicht unterschätzt. Dies gilt sowohl für hohe, als auch niedrige Anteile des Grundwassers am Gesamtabfluss. Am Messstandort WL werden hingegen niedrige Messwerte in Bezug auf die Simulation stark unterschätzt, während hohe gemessene Grundwasseranteile stark überschätzt werden (Abbildung 42). Dabei ist darauf hinzuweisen, dass für das EZG Weisse Lütschine die Messdaten der Grundwassermessstelle Isenfluh verwendet wurden, welche sich in unmittelbarer Nähe des Auslasses des EZG befindet. Der Standort WL hat zu dieser Messstelle die größte Entfernung.

Für niedrige Anteile der Gletschereisschmelze am Gesamtabfluss stimmen die gemessenen und modellierten Anteile gut überein. Bei hohen gemessenen Anteilen der Gletschereisschmelze kommt es am Standort WL jedoch, im Vergleich zu den modellierten Daten, zu einer deutlichen Unterschätzung und

am Standort WLP zu einer leichten Unterschätzung der Messwerte. Die gemessenen Schneeschmelzanteile werden im Mittel, an allen Messstandorten im EZG der Weissen Lütschine, im Vergleich zur Modellierung überschätzt. An den Standorten SG und WLP ist die Überschätzung für hohe und niedrige Anteile der Schneeschmelze etwa gleich, wobei die Überschätzung am Standort SG insgesamt höher ausfällt. Am Messstandort WL kommt es hingegen bei hohen Schneeschmelzanteilen zu einer stärkeren Überschätzung der Messwerte als bei niedrigen Anteilen. Die gemessenen und modellierten Anteile des Regenwassers stimmen im EZG der Weissen Lütschine stark überein. Nur bei sehr hohen gemessenen Regenwasseranteilen, kommt es an den Standorten SG und WLP zu einer Unterschätzung der Messdaten im Vergleich zur Simulation und am Standort WL zur Überschätzung der gemessenen Regenwasseranteile (Abbildung 42).

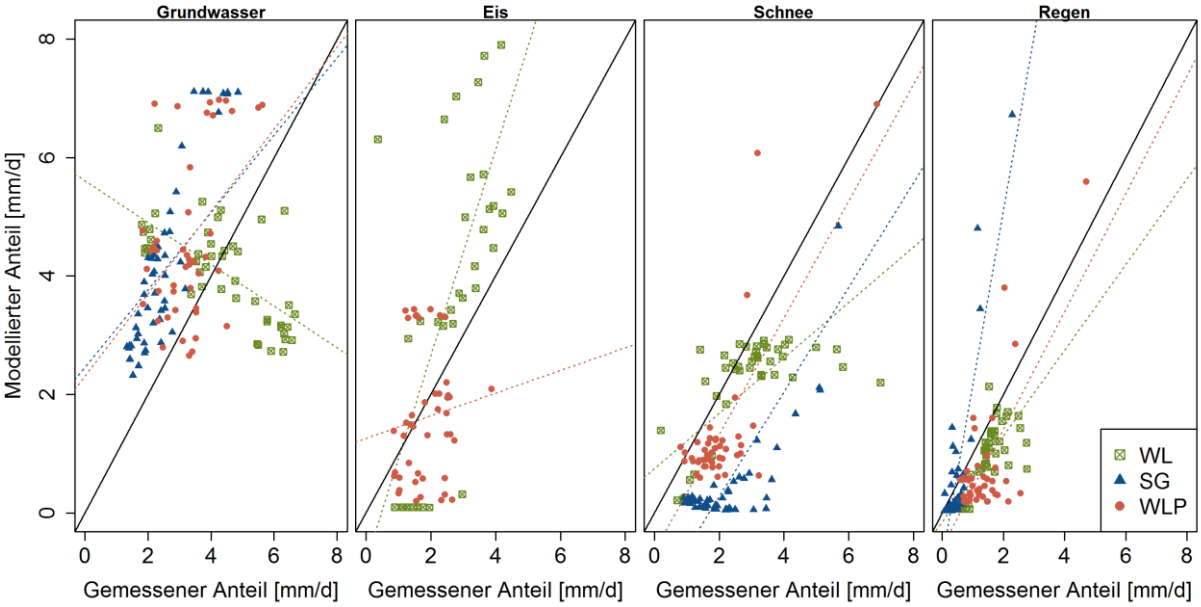


Abbildung 42: Scatterplot zum Vergleich der gemessenen und modellierten Anteile von Grundwasser, Gletschereis, Schnee und Regen mit der Modellversionen „Complete Mixing" für die Messstandorte im EZG der Weissen Lütschine.

Der Vergleich von gemessenen und modellierten Abflussanteilen über die Messzeitreihe gibt auch im EZG der Weissen Lütschine Aufschluss über saisonale Unterschiede und kurzzeitliche Dynamiken (Abbildung 43). So verläuft die ermittelte saisonale Dynamik der Grundwasserkomponente durch Modellierung und Messung komplementär. Die Modellierung ermittelt im Mai und Juni die höchsten Grundwasseranteile, die dann im Juli stark abnehmen und bis September gering bleiben. Durch die Messung werden Mitte Mai nur rund halb so große Grundwasseranteile ermittelt, am Ende der Messkampagne sind sie hingegen fast doppelt so hoch. Im Juli stimmen die gemessenen und modellierten Grundwasseranteile jedoch stark überein.

Auch die simulierten und gemessenen Schnee- und Gletschereisanteile stimmen im Juli gut überein, wobei die gemessene Eisschmelze etwas geringer ausfällt als die modellierte. Am Anfang der Zeitreihe werden jedoch die gemessenen Schmelzanteile im Vergleich zur Modellierung stark überschätzt. Die Messungen ergeben Mitte Mai bereits deutliche Anteile der Schmelzkomponenten im Abfluss, während

diese laut Modellierung erst ab Ende Mai/Anfang Juni stark zunehmen. Der simulierte Start der Schnee- und Eisschmelze fällt dabei, bei den einzelnen Messstandorten im EZG der Weissen Lütschine, sehr unterschiedlich aus (Anhang Abbildung 62; Abbildung 63). Am Ende der Messkampagne werden die gemessenen Gletschereisanteile im Vergleich zur Simulation stark unterschätzt und die Schneeschmelzanteile überschätzt. Dies gilt für die Messstandorte WL und WLP. Am Standort SG kommt es über die gesamte Zeitreihe zu einer Überschätzung der gemessenen Schneeschmelzanteile und einer Unterschätzung der Grundwasseranteile, im Vergleich zu den Modellierdaten (Anhang Abbildung 62). Für die Regenwasseranteile sind aus der Zeitreihe keine neuen Erkenntnisse zu ziehen (Abbildung 43).

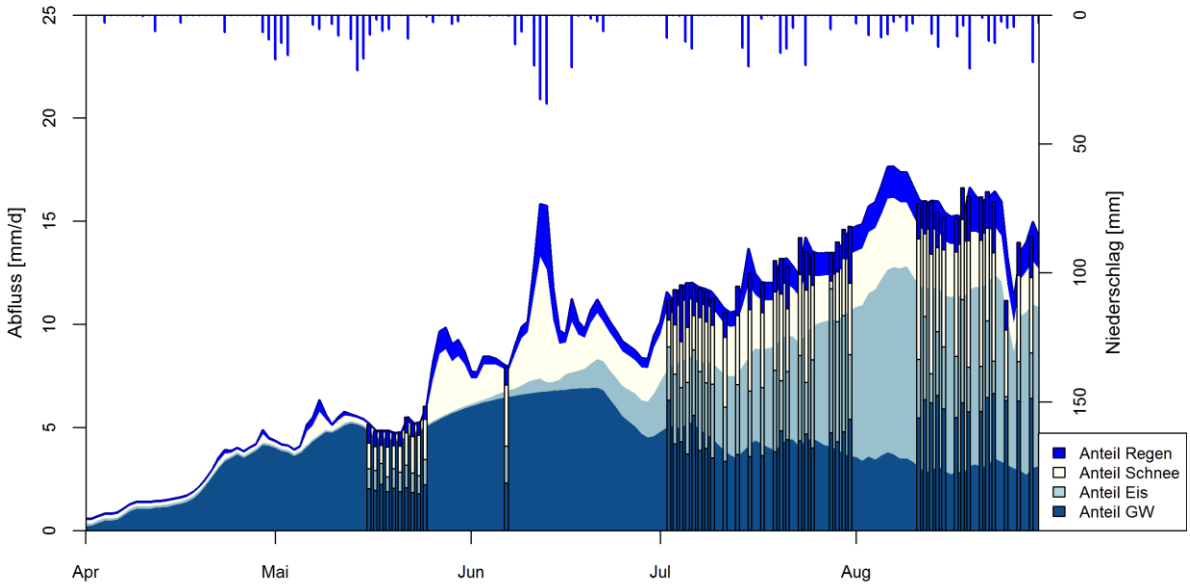


Abbildung 43: Vergleich von gemessenen und modellierten Abflussanteilen des Regenwassers (Regen), Schneeschmelze (Schnee) und Grundwassers (GW) am Messstandort WL im EZG der Weissen Lütschine für das Messjahr 2018.

5.5.4 Vergleich der ermittelten Abflussanteile in beiden EZG

Am Standort WL, mit großem Anteil vergletscherter Fläche im EZG der Weissen Lütschine, kommt es im Mittel zu der besten Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Abflussanteilen. Das Grundwasser macht hier mit rund 40% den Hauptanteil am Abfluss aus, gefolgt von den Komponenten Gletschereis und Schneeschmelze. Der Regen nimmt am stark vergletscherten Messstandort WL mit rund 10% den kleinsten Anteil am Abfluss ein (Tabelle 13). Bei den modellierten Anteilen von Gletschereisschmelze und Grundwasser kommt es jedoch zu einer größeren Variation zwischen den einzelnen Betrachtungstagen. Am Messstandort gibt es Tage, an denen fast keine Gletschereischmelze im Abfluss erfasst wird und Tage, an denen sie über die Hälfte des Abflusses ausmacht. Im Vergleich dazu, werden durch die Messung minimale Anteile von rund 10% und maximale Gletschereisanteile von rund 40% ermittelt. Auch die mittels Modellierung bestimmten Anteile der Grundwasserkomponente schwanken über einen größeren Wertebereich als die der Messungen. Die Modellierung erfasst Messtage, an denen der Abfluss fast ausschließlich aus Grundwasser besteht. Die Messung ermittelt maxi-

male Grundwasseranteile von knapp über der Hälfte des Gesamtabflusses. Gleichzeitig ergibt die Simulation, dass das Grundwasser am Messstandort WL nie unter 20% des Abflusses fällt. Die Messung ergibt minimale Anteile von rund 30%. Bei der Modellierung und Messung der Anteile der Regen und Schneeschmelze am Standort WL wird etwa die gleiche Variabilität der Einzelmessungen erfasst. Beiden Komponenten werden durch die Messung im Mittel jedoch höhere Anteile zugeschrieben als durch die Simulation.

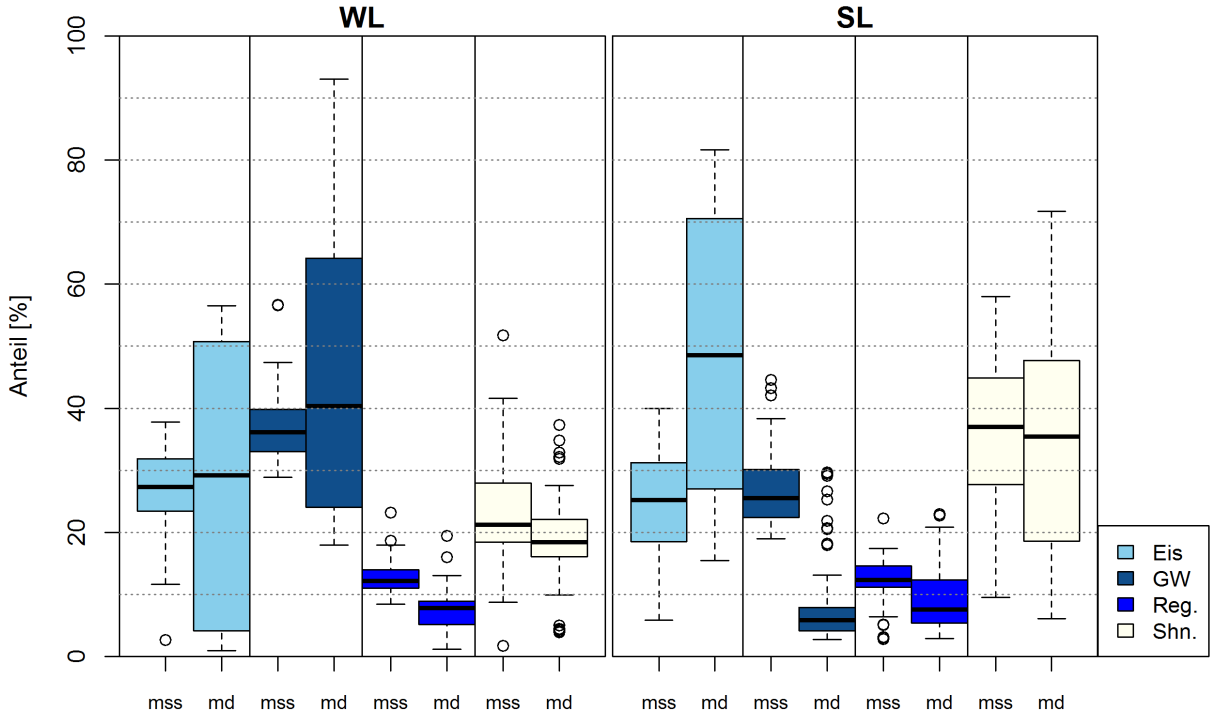


Abbildung 44: Boxplot zum Vergleich von gemessenen (mss) und modellierten (md) Abflussanteilen Gletschereis (Eis), Grundwasser (GW), Regenwasser(Reg.) und Schneeschmelze (Shn.) für die stark vergletscherten TEZG WL (links) und SL (rechts).

Am stark vergletscherten Messstandort SL im EZG der Schwarzen Lütschine kommt es zu größeren Unterschieden zwischen den empirisch und modelliertechnisch erfassten Abflussanteilen. Größte Unterschiede liegen hier bei den ermittelten Gletschereis- und Grundwasseranteilen im Abfluss vor. Die Simulation ergibt am Standort SL, dass die Gletschereisschmelze im Mittel rund die Hälfte des Abflusses ausmacht und sie über die gesamte Zeitreihe nie unter einen Anteil von 20% am Abfluss fällt. Dabei werden maximale Anteile der Eisschmelze von bis zu 80% am Gesamtabfluss modelliert. Die Messungen ergeben hingegen rund halb so große Anteile der Gletschereisschmelze am Abfluss. Dies gilt sowohl für die Extremwerte als auch für die mittleren Anteile der Gletschereisschmelze im Abfluss. Im Vergleich dazu fallen die simulierten Grundwasseranteile deutlich keiner aus. Empirisch werden im Mittel Grundwasseranteile von rund einem Viertel Anteil am Gesamtabfluss ermittelt. Durch Simulation werden dem Grundwasser im Mittel nur 5% des Gesamtabflusses zugeschrieben (Abbildung 44).

Für die Anteile von Regen- und Schneeschmelzanteilen werden am Standort SL im Mittel ähnliche Anteile ermittelt. Wie am Standort WL hat das Regenwasser etwa einen Anteil von 10% am Gesamtabfluss,

wobei durch Messungen höhere Anteile ermittelt werden als durch Simulation. Die simulierten und messtechnisch erfassten Schneeschmelzanteile am Standort SL sind jedoch im Mittel etwa doppelt so groß wie am Standort WL. Auch erreicht die Schneeschmelze im EZG der Schwarzen Lütschine sowohl durch Simulation, als auch durch Messung höhere Maximalanteile als im EZG der Weissen Lütschine.

Tabelle 13: Durch empirische Analyse mittels EMMA sowie Modellierung mit HBV-Light ermittelte Abflussanteile (Mittelwert, Maximum, Minimum) für die Abflusskomponenten Grundwasser (QGW), Eisschmelzwasser (QE), Schneeschmelzwasser (QS) und Regenwasser (QR) an allen Messstandorten

		Weisse Lütschine				Schwarze Lütschine			
		WL		WLP		SL		GG	
EM	St. Maß	gem.	mod.	gem.	mod.	gem.	mod.	gem.	mod.
QGW	Mean	36	41	41	58	27	7	45	9
	Max	57	93	53	98	45	30	83	23
	Min	29	18	17	34	19	3	1	5
QE	Mean	30	29	22	20	25	48	18	54
	Max	38	57	43	44	40	82	45	79
	Min	3	1	10	0	6	4	0	2
QS	Mean	22	19	23	14	37	37	28	25
	Max	52	37	40	36	58	79	55	80
	Min	2	4	9	1	10	6	5	5
QR	Mean	12	8	15	7	11	8	8	11
	Max	23	19	28	29	22	23	14	31
	Min	8	1	9	0	3	3	0	2

Am Standort GG, der sich am Auslass des EZG Schwarze Lütschine befindet, kommt es zu ähnlichen Ergebnissen wie im gleichen EZG gelegenen Standort SL. So wird der simulierte Gletschereisanteil hier um mehr als das Doppelte überschätzt, während der simulierte Grundwasseranteile rund ein Viertel des gemessenen Grundwasseranteils ausmacht. Im Mittel sowie in der Variation, verhalten sich die am Standort GG ermittelten Schneeschmelzanteile fast gleich wie am Standort SL. Durch die Modellierung werden am Standort GG jedoch im Mittel etwas niedrigere Schneeschmelzanteile ermittelt, die über einen größeren Wertebereich variieren. Modellierte und gemessene Regenwasseranteile stimmen am Messstandort GG im Mittel gut überein (Abbildung 45).

Am Messstandort WLP, der am Auslass des EZG Weisse Lütschine liegt, kommt es ebenfalls zu einem ähnlichen Bild wie am höher gelegenen Messstandort WL im gleichen EZG. So stimmen die gemessenen und simulierten Gletschereisschmelzanteile im Mittel gut überein, wobei es durch die Modellierung zu einer größeren Variation des Wertebereiches kommt als bei der Messung. Auch die empirisch ermittelten Abflussanteile von Grundwasser, Regen und Schneeschmelze liegen in ihrem Wertebereich am Messstandort in einem ähnlichen Wertebereich wie am Standort WL. Durch die Modellierung werden am Standort WLP im Mittel leicht höhere Grundwasseranteile sowie dementsprechend niedrigere Anteile von Regenwasser und Schneeschmelze im Abfluss ermittelt (Abbildung 45).

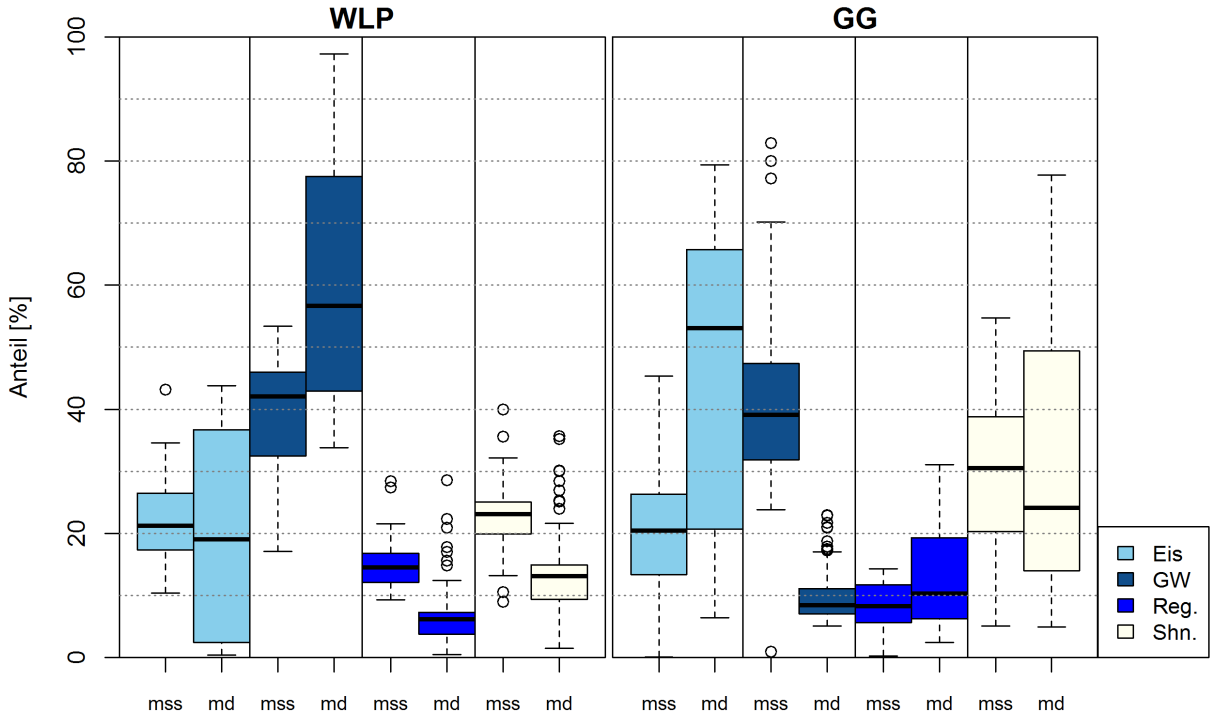


Abbildung 45: Boxplot zum Vergleich von gemessenen (mss) und modellierten (md) Abflussanteilen Gletschereis (Eis), Grundwasser (GW), Regenwasser (Reg.) und Schneeschmelze (Shn.) für die Messstandorte am Auslass der EZG WLP (links) und GG (rechts).

Vergleicht man die Messstandorte innerhalb eines EZG fällt auf, dass es durch die Modellierung zu größeren Unterschieden zwischen den TEZG kommt, als messtechnisch erfasst wird. Die Modellierung ergibt an den stark vergletscherten TEZG höhere Anteile der Schmelzkomponenten sowie des Regenwassers. An den Messstandorten am Auslass der EZG werden hingegen höhere Anteile des Grundwassers simuliert. Dies wird durch die Messungen ebenfalls erfasst, wenngleich die Unterschiede hier nicht so groß ausfallen (Abbildung 45).

Vergleicht man die EZG Schwarze und Weisse Lütschine ergibt sich durch Simulation das gleiche Ergebnis wie durch Messung. Im EZG der Weissen Lütschine wird der Abfluss durch die Komponente des Grundwassers dominiert, während im EZG der Schwarzen Lütschine die Schmelzkomponenten eine wichtigere Rolle einnehmen. Dabei wird durch Messung der Schneeschmelze ein größerer Anteil zugeschrieben, während die Modellierung ein Dominieren der Gletschereisschmelze ergibt (Abbildung 44, Abbildung 45).

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Aufbau des Messnetzes

Der Aufbau des Messnetzes aus einzelnen Messstandorten, die charakteristische TEZG entwässern, stellt sich als nützlich heraus. Die stark vergletscherten TEZG spiegeln überwiegend die Ergebnisse der Standorte an den Auslässen wider, zeigen aber auch gleichzeitig die Unterschiede zwischen den EZG stärker auf. Der Nutzen, des Vergleichsstandortes mit nicht vergletscherter Fläche, kann durch diese Arbeit nicht abgeschätzt werden. Am Messstandort BB im EZG der Schwarzen Lütschine können die Abflussanteile mittels EMMA nicht getrennt werden. Am Standort SG im EZG der Weissen Lütschine sind Beginn der Schneeschmelze sowie deren Höhepunkt messtechnisch nicht deutlich erfassbar. Hier wäre eine längere Messphase von Nutzen, die den Beginn und das Ende der Schneeschmelzkomponente im Abfluss erfasst.

Auch die Wahl von täglichen Flusswasserproben stellt sich als sinnvoll heraus, um die Dynamik der Komponenten im Abfluss zu erfassen (Kronholm und Capel, 2015; Schmieder et al., 2018). Die Analyse jedes zweiten Datenpunktes mit anschließendem Nachmessen „interessanter Punkte“ in der Abflussganglinie ist effektiv. Bei der Erfassung kurzeitlicher Variabilitäten auf Stundenbasis ist es jedoch notwendig jede Probe innerhalb der 24h zu analysieren, um die geringen Unterschiede der Abflusskomponenten im Tagesgang deutlich erfassen zu können.

6.1.1 Datenerhebung im Feld

Die Entnahme der Flusswasserproben mittels der automatischen Flusswasserprobensammler, für das erfassen täglicher Flusswasserproben, ist praktisch. So wird gesichert, dass die Proben immer zur gleichen Uhrzeit und unter den gleichen Bedingungen entnommen werden (vgl. Handprobennahme Hunkeler, 2013). Diese Arbeit ergab außerdem, dass der Verdunstungsschutz aus Styroporkügelchen mindestens 3-4 cm dick sein sollte. Dann ist er jedoch sehr effektiv, wenn auch nicht praktisch im Umgang.

Die Messung von Leitfähigkeit und Wasserstand mit der Ott-CTD-Sonde konnte in dieser Arbeit nicht erfolgreich durchgeführt werden. Grund dafür ist der hohe Sedimenttransport der Weissen und Schwarzen Lütschine. Das Problem könnte reduziert werden, indem andere Abflussrohre verwendet werden, die eine breitere Schlitzweite haben und nach unten geöffnet sind. Alternativ dazu könnte der Wasserstand mit einem robusteren Messgerät, wie z.B. einem HOBO gemessen werden und die Leitfähigkeit näherungsweise über die Haupt-Ionen-Konzentrationen bestimmt werden.

6.1.2 Datenerhebung im Labor

Die Datenerhebung im Labor führte zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Die ermittelten Standardabweichungen der Messungen der stabilen Wasserisotope am Picarro, sowie der Hauptionen am IC kommen zu einer sehr guten Performance. Die durchgeführten Vergleichsmessungen ergeben außerdem, dass der Gebrauch des ^{17}O-Modus zu keiner Verschlechterung der Messergebnisse führt.

6.2 Empirische Abflusstrennung mittels der EMMA

Die EMMA konnte erfolgreich für die Messstandorte WL, SG, WLP im EZG der Weissen Lütschine und im EZG der Schwarzen Lütschine an den Standorten SL und GG durchgeführt werden. Am Standort BB im EZG der Schwarzen Lütschine war die Trennung des Abflusses in seine End-Member jedoch nicht möglich. Insgesamt ergibt die Arbeit, dass mit den verwendeten Tracern eine plausible Trennung der Quellkomponenten Grund- und Regenwasser auf Tagesbasis möglich ist. Die Schmelzkomponenten Schnee- und Gletschereiskönnen durch den verwendeten Versuchsaufbau jedoch nicht zufriedenstellend in tägliche Abflussanteile unterteilt werden. Aggregiert über längere Zeiträume können aus EMMA jedoch die Dynamiken von Zu- und Abnahme der Schmelzkomponenten in der Schmelzsaison ermittelt werden. Außerdem geben Mittel- und Extremwerte einzelner End-Member Aufschluss über die Größenordnung entsprechender Quellkomponenten am Abfluss. Im Folgenden wird diskutiert, weshalb die Trennung der Abflusskomponenten am Standort BB nicht möglich ist, welche Rolle die Wahl der Tracer und End-Member auf das Ergebnis der EMMA hat und wie die Güte der gemessenen End-Member eingestuft wird.

6.2.1 Ausschluss des Messstandortes BB

Am Vergleichsstandort BB, welcher im EZG Schwarze Lütschine liegt und nicht vergletschert ist, konnte der Abfluss nicht in die Komponenten Regen, Schnee und Grundwasser getrennt werden. Mögliche Gründe dafür sind, dass die gemessenen End-Member Werte nicht repräsentativ für das EZG sind und/oder weitere nicht erfasste End-Member starken Einfluss auf die Abflussbildung haben. Auch ist es möglich, dass die gemessenen Tracer das System im TEZG nicht ausreichend beschreiben oder dass es bei der Messung der Flusswasserkonzentrationen im Feld oder Labor zu Fehlern kam (Christophersen und Hooper, 1992).

Da die Flusswasserproben am Standort BB auf gleiche Weise entnommen wurden, wie an allen anderen Standorten und die Wasserproben im Labor mit den Proben anderer Standorte gemessen wurden, sind Messfehler bei der Probenahme unwahrscheinlich. Der Einfluss weiterer nicht erfasster End-Member ist möglich. Die Probennahme von Feuchtflächen in unmittelbarer Nähe zum Messstandort führten jedoch zu keiner Verbesserung der Analyseergebnisse. Am wahrscheinlichsten ist also, dass sich das TEZG stark von den weiteren Messstandorten in EZG Schwarze Lütschine unterscheidet und somit die

gemessenen End-Member Konzentrationen nicht repräsentativ für den Standort sind. Vor allem die Probennahme von weiteren Grundwasserproben in unmittelbarer Nähe bzw. am Zufluss des TEZG könnten zu einer besseren Erklärung der gemessenen Flusswasserkonzentrationen führen.

6.2.2 Wahl der betrachteten End-Member

In der Literatur wird vielseitig angemerkt, dass das Ergebnis der empirischen Hydrograph Separation stark von dem gewählten End-Member abhängt. Dabei ist sowohl von Bedeutung welche Quellkomponenten betrachtet werden, als auch welche Messwerte den einzelnen End-Member zugeschrieben werden (Engel et al., 2016; La Frenierre und Mark, 2014; Penna et al., 2014).

In dieser Arbeit ist unter Verwendung der stabilen Wasserisotope sowie der Haupt-Ionen des Flusswassers als Tracer, das Einbeziehen des Grundwassers als Quellkomponente notwendig, um die ermittelten Flusswasserkonzentrationen erklären zu können. Diese Arbeit zeigt somit, dass das Grundwasser einen wichtigen Einfluss auf die Abflussbildung in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine hat. Zu dem gleichen Ergebnis kommen auch die Masterarbeit von Peier (2016) und Wyss (2016), welche in den gleichen EZG durchgeführt wurden. Beide Arbeiten können den Abfluss, durch Messung von so genannten "Anreicherungselementen", nicht in die Komponenten Regen, Schnee und Eisschmelze zerlegen. Grund dafür ist der starke Einfluss des Grundwassers auf die Hydrochemie des Flusswassers. Das Verwenden von "geologisch vorgeprägten End-Member-Proben" führt zu einer Verbesserung der Ergebnisse, wenngleich beide Arbeiten zu dem Ergebnis kommen, dass die Plausibilität der ermittelten Abflussanteile stark in Frage zu stellen ist (Peier, 2016; Wyss, 2016).

Auch weitere Studien betonen die wichtige Bedeutung der Wasserspeicher im Untergrund für die Abflussbildung in alpinen EZG (Engel et al., 2016; La Frenierre und Mark, 2014; Schmieder et al., 2018). In den Wintermonaten ist das Grundwasser für den Erhalt des Abflusses verantwortlich, aber selbst bei Schmelzevents im Sommer hat das Grundwasser einen Hauptanteil am Abfluss (Engel et al., 2016). Im Zuge des Klimawandels und den damit einhergehenden Gletscherrückgang ist es wahrscheinlich, dass die Bedeutung des Grundwassers in alpinen EZG weiter in den Fokus rückt (Schmieder et al., 2018). Denn neben der Gletschereischmelze, sorgt das kontinuierliche Auslaufen der Grundwasserspeicher für einen beständigen Abfluss, auch in niederschlagsarmen Phasen des Jahres oder insgesamt trockenen Jahren (Schmieder et al., 2018).

6.2.3 Identifizierung sinnvoller End-Member-Werte

Die Identifizierung sinnvoller End-Member-Werte ist, neben der Wahl der betrachteten End-Member, maßgeblich verantwortlich für das Ergebnis der EMMA (Engel et al., 2016). In der Literatur wird zum einen diskutiert wie stark einzelne End-Member räumlich und zeitlich aufgelöst in die Hydrograph Separation eingehen sollten. Zum anderen wird auf unterschiedliche Methoden für die Probennahme der End-Member verwiesen (Kapitel 0). Die in dieser Arbeit verwendeten End-Member-Werte werden im Folgenden in Bezug auf ihre Plausibilität diskutiert.

End-Member Grundwasser

Repräsentativ für die langsame Fließkomponente werden in dieser Arbeit räumlich und zeitlich diskretisierte Quellproben verwendet. Die im EZG der Schwarzen Lütschine verwendete Quellprobe passt, in den erfassten Konzentrationen, gut mit den Messwerten der Grundwasserbrunnen Klecki und Gyrth des Kanton Berns überein. Da die Brunnen in unmittelbarer Nähe zu den Standorten SL und GG liegen ist anzunehmen, dass trotz räumlicher Diskretisierung, die genommenen Grundwasserproben an den genannten Standorten repräsentativ sind. Am Standort BB ist dies jedoch nicht der Fall (s.o.). Im EZG der Weissen Lütschine stimmen die gemessenen Grundwasserproben nicht mit denen des Kantons, an der Messstelle Isenfluh, überein. Im EZG der Weissen Lütschine ist also anzunehmen, dass durch die räumliche Diskretisierung der Quellwasserprobe, ein Fehler bei der Separation der langsamen Fließkomponente entsteht. Der Fehler wird vor allem an den Messstandorten WL und SG auftreten, da diese in großer Entfernung zu der Grundwassermessstelle Isenfluh liegen. Auch Leibundgut (1987) beobachtet trotz der starken Interaktion des Grundwassers in den großvolumigen Karstsystemen, räumliche Unterschiede der Grundwasserkonzentrationen. Dies ist durch die starke Heterogenität des anstehenden Gesteins zu begründen (Leibundgut, 1987). Die Wahl einer einzigen Grundwasserprobe, welche das gesamte EZG repräsentiert, ist somit nicht ausreichend. Für spätere Arbeiten ist es zu empfehlen die Grundwasserproben räumlich höher aufzulösen, um die Variabilität der Grundwasserkörper in den EZG zu erfassen.

Sowohl die eigenen Grundwassermessungen, als auch die langzeitlichen Grundwassermessungen die in den EZG durchgeführt wurden, ermitteln eine geringe Variation der Grundwassermesswerte über die Zeit (Leibundgut, 1987). Die zeitliche Diskretisierung des End-Member Grundwasser ist in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine also gerechtfertigt und sinnvoll. Die Verwendung einer Quellprobe für die langsame Fließkomponente, anstelle von Flusswasserproben zu Low-Flow-Zeiten, erscheint in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine ebenfalls sinnvoll. Das Einbeziehen von Bodenwasserproben im EZG der Schwarzen Lütschine führt zu keiner Verbesserung der Ergebnisse. Es ist also anzunehmen, dass die geringmächtigen Bodenschichten in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine eine untergeordnete Rolle bei der Wasserspeicherung im Untergrund und somit auch beim Beitrag der langsamen Fließkomponente spielen (Leibundgut, 1987).

End-Member Gletschereis

Die in dieser Arbeit gemessenen Isotopenkonzentrationen des Gletschereises liegen in der gleichen Größenordnung wie die Messwerte weiterer Studien in den Alpen. Stichler und Schotterer (2000) messen in zwei Eisbohrkernen am Jungfraujoch, welches in unmittelbarer Nähe zum Rottalgletscher liegt, ^{18}O-Konzentrationen des Festeises zwischen -12.5 ‰ und -15.9 ‰. Diese Messwerte stimmen somit mit den gemessenen ^{18}O-Konzentrationen, der in dieser Arbeit genommenen Festeisproben, überein (-13.5 bis -15.3 ‰). Weitere aktuellere Studien in den Alpen ermittelten insgesamt einen größeren Wertebereich

der Isotopenkonzentrationen im Gletschereis. Schmieder et al. (2018) weist beispielsweise der Quellkomponente Gletschereis ^{18}O-Konzentrationen zwischen -12.2 ‰]und -17 ‰ zu. Dieser Wertebereich der Konzentrationen umfasst somit auch die genommenen Flüssigeisproben (-14 ‰ und -16.8 ‰).

Ob die Verwendung der Flüssigeisprobe sinnvoller ist, als die Verwendung des Mittelwertes der Festeisproben, kann aufgrund der geringen Datenbasis in dieser Arbeit nicht abgeschätzt werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die verwendete Flüssigeisprobe eine leichtere Isotopenkomposition (^{18}O-Konzentrationen -16.8 ‰) aufweist, als die Festeisproben. Durch die Literatur wird beschrieben, dass die Isotopenkonzentration im Gletschereis insgesamt schwerer ist als die in der Schneeschmelze (Penna et al., 2014; Stichler und Schotterer, 2000). Dies ist durch Verdunstungs- und Verlagerungseffekte zu begründen, die auf die Schneeauflage im Zuge der Eisbildung wirken (Stichler und Schotterer, 2000). Es ist also möglich, dass trotz ausgeapertem Gletscher die Flüssigprobe aus einer Mischung von Schnee- und Eisschmelze besteht. Stichler und Schotterer (2000) beschreiben, dass das Schmelzwasser von Schnee- und Eisschmelze zunächst den Eiskörper durchfließt, bevor es zum Abfluss freigegeben wird. Somit kann Schneeschmelzwasser durch den Gletscher zurückgehalten und zeitlich verzögert wieder freigesetzt werden (Stichler und Schotterer, 2000). Handelt es sich bei der Flüssigeisprobe tatsächlich um eine Mischprobe aus Schnee und Eis, ist eine klare Abgrenzung der Isotopensignatur beider Komponenten nicht mehr gegeben. Das führt zur erschwerten Separation von Schnee- und Eischmelze, bei der die Gletschereisschmelze insgesamt unterschätzt wird.

Da für diese Arbeit nur die Messungen der Gletschereisproben am Rottalgletscher vorliegen, welcher kaum einen Höhengradienten aufweist, muss die Quellkomponente der Eisschmelze räumlich und zeitlich diskretisiert betrachtet werden. In der Literatur wird jedoch beschrieben, dass die Isotopenkonzentration der Gletschereisschmelze einer hohen Variabilität in der Schmelzsaison unterliegt (La Frenierre und Mark, 2014; Penna et al., 2014; Schmieder et al., 2018). Es ist also wahrscheinlich, dass durch die Verwendung eines Festwertes eine große Unsicherheit bei den ermittelten Gletschereisanteilen entsteht. Schmieder et al., 2018 beschreibt, dass bei der Verwendung eines festen Messwertes die Gletschereisschmelze zwischen 5% -17% unterschätzt wird.

End-Member Schnee

Diese Arbeit ermittelt insgesamt deutlich schwerere Isotopenkompositionen in der Schneeauflage als weitere Arbeiten in den Alpen. In dieser Arbeit werden ^{18}O-Konzentrationen zwischen -9.9 ‰ und -17.6 ‰ ermittelt. Im Vergleich dazu ermittelt Schmieder et al. (2016) ^{18}O-Konzentrationen im Schnee von -17 ‰ bis zu -19 ‰ und Engel et al. (2016) Konzentrationen von im Mittel -20 ‰.

Zwischen den leichten Isotopenkonzentrationen in den niederen Höhenlagen kann in dieser Arbeit ein Höhenzusammenhang festgestellt werden. Dieser setzt sich jedoch nicht in den hohen Höhenlagen gemessenen, schweren Isotopenkompositionen fort. Dieses Ergebnis ist entgegengesetzt der Systemvorstellung, dass mit zunehmender Höhe die Isotopenkonzentrationen im Schnee leichter wird (Stichler

und Schotterer, 2000). Auch Dietermann und Weiler (2013) beobachten eine Unterbrechung des Höheneffekts der Isotopenkonzentrationen im Schnee. Sie erklären dies durch Schmelz-Frost bedingte Fraktionierungsprozesse während der Ablationsperiode (Dietermann und Weiler, 2013). Auch weitere Autoren beschreiben eine Homogenisierung sowie eine Anreicherung von schweren Isotopen in der Schneeauflage im Laufe der Schmelzsaison (Stichler und Schotterer, 2000; Penna et al., 2014). Es ist also anzunehmen, dass auf die Anfang Juli/Mitte August genommen Schneeproben der hohen Höhenlagen, bereits deutliche Verdunstung- und Verlagerungsprozesse gewirkt haben und es in Folge dessen zur Anreicherung schwerer Isotopen in der Schneedecke kam (Stichler und Schotterer, 2000).

Die Messwerte der hohen Höhenlagen gehen jedoch deutlich stärker in die Separation der Abflusskomponenten ein als die der tiefen Höhenlagen. Denn Anfang der Messkampagne (Mai 2018) war die Schneeschmelze schon bis auf 2000 m ü. M. vorgerückt, weshalb die tiefen Höhenlagen bei der Berechnung der fließenden Mittel kaum berücksichtigt wurden. Es ist also anzunehmen, dass die ermittelten Anteile der Schneeschmelze in dieser Arbeit eine große Unsicherheit aufweisen und tendenziell überschätzt werden. Für zukünftige Messungen ist zu empfehlen, einen besonderen Fokus auf die Probennahme der Schneeproben in hohen Höhenlagen zu legen. Dabei sollte darauf geachtet werden, die Probenahme früher im Jahr durchzuführen um mögliche Verdunstung- und Verlagerungsprozesse gering zu halten. In den EZG Schwarze und Weisse Lütschine wäre das gut möglich, da auch hohe Höhenlagen durch Skilifte früh im Jahr zugänglich sind (Jungfraubahnen, 2018).

End-Member Regen

Die erfassten Isotopenkonzentrationen der Quellkomponente Regen fallen im Mittel ebenfalls etwas schwerer aus, als die in weiteren Studien ermittelten Regenwasserkompositionen. Schmieder et al. (2018) misst beispielsweise mittlere ^{18}O-Konzentrationen des Regenwassers von -8.8 ‰, während diese Arbeit im Mittel Konzentrationen von -6.6 ‰ ermittelt. Der Sommer 2018 fiel in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine extrem niederschlagsarm aus (Bader et al., 2018). Laut Meteo Schweiz ist er der trockenste und wärmste Sommer (April-September) seit Anfang des Messbeginns 1864 (Bader et al., 2018). Das macht sich zweifach bei den Niederschlagsmessungen bemerkbar. Zum einen kann es zu sekundärer Fraktionierung bei der Niederschlagsmessung gekommen sein. In den einzelnen Messzyklen wurde in den Niederschlagssammlern nie mehr als 2 l Regenwasser gesammelt. Die Kanister waren also mit 10 l zu groß dimensioniert. Das gesammelte Regenwasser unterlag dadurch nach dem Ereignis einem großen Headspace und in Folge dessen Fraktionierungsprozessen zwischen Gas und Flüssigphase. Zum anderen zeichnen sich die Isotopenkonzentrationen im Niederschlag nach langen Trockenphasen durch schwere Isotopenkompositionen aus. Erst durch langanhaltende Niederschläge kommt es zum auswaschen der schweren Isotope aus der Atmosphäre und in Folge dessen zu leichteren Isotopenkonzentrationen im Niederschlag (Schotterer, 2010). Die durchschnittlich schwereren, gemessenen Isotopenkonzentrationen dieser Arbeit können somit auch verdeutlichen, dass der Sommer 2018 durch extrem wenig Niederschlag gekennzeichnet ist.

Die Isotopenkonzentrationen in den Niederschlagsmessern beider EZG liegen in der gleichen Größenordnung. Auch der saisonale Verlauf der Isotopenkonzentrationen zeigt in beiden EZG das gleiche Muster auf. Über die Sommermonate, mit langen trockenen Phasen, reichern sich schwere Isotopenkonzentrationen im Regen an. In den langanhaltenden Regenphasen werden die Isotopenkonzentrationen dann wieder leichter (s.o.). Die Verwendung von fließenden Mitteln ist für den End-Member Regenwasser somit wichtig und zielführend. Die räumliche Diskretisierung auf einen Niederschlagssammler pro EZG ist in Bezug auf Kosten-Nutzen sinnvoll, führt jedoch zu Unsicherheiten an den Standorten, welche in großer Entfernung zu den Niederschlagssammlern liegen (GG, WLP).

6.2.4 Wahl der Tracer

Anhand der gemessenen Hauptionen sowie der stabilen Wasserisotope ist die Trennung der Abflusskomponenten Regen, Schnee-, Gletschereisschmelze und Grundwasser möglich. Die gemessenen Hauptionen beschreiben vor allem die betrachtete langsame Fließkomponente des Grundwassers stark. Während die Isotope eine Trennung von Regen, Schnee-, und Eisschmelze ermöglichen (La Frenierre und Mark, 2014).

Auch in dieser Arbeit liegt die Schwierigkeit in der klaren Differenzierung der Signaturen der End-Member Schnee und Eis. Dies wird erreicht, indem die Trennung der Abflusskomponenten in zwei Schritten erfolgt. In einem ersten Schritt wird die sich stark unterscheidende langsame Fließkomponente abgetrennt und in einem zweiten Schritt werden die sich schwach unterscheidenden schnellen Abflusskomponenten separiert. Für die Trennung der langsamen Fließkomponente werden wie durch Christophersen und Hooper (1992) beschrieben, alle konservativen Messparameter gebraucht. Durch die geringen Unterschiede der schnellen Fließkomponente werden für die Trennung der Abflusskomponenten hingegen ausschließlich die am stärksten beschreibenden Parameter verwendet. Die Analyse ergibt, dass dies ^{2}H und ^{17}O sind. Im Vergleich zu ^{18}O ist ^{17}O weniger sensitiv auf temperaturbedingte Fraktionierungsprozesse (Picarro). Dass die Verwendung der ^{17}O-Konzentrationen zu besseren Ergebnissen führt als die ^{18}O-Konzentrationen könnte andeuten, dass auf die Flusswasserproben kinetische Fraktionierungsprozesse gewirkt haben. Dazu gehören z.B. Verdunstung und Kondensation. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen bei Verwendung von ^{17}O und ^{18}O sind jedoch nur gering, weshalb diese Hypothese weiterer Messungen zur Stützung bedarf. Bislang konnte keine Studie identifiziert werden, die für die Trennung der Abflusskomponenten Regen, Schnee-, Gletschereisschmelze und Grundwasser ^{17}O als Messparameter verwendet und mit der die Ergebnisse verglichen werden könnten. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Kontinuierliche Leitfähigkeitsmessungen konnten nicht erfolgreich durchgeführt werden, weshalb die Leitfähigkeit als Tracer in dieser Arbeit verworfen wurde. Für zukünftige Messungen wäre das Aufnehmen der Leitfähigkeit erstrebenswert, um auch Variationen der Abflussanteile, kleiner als auf Tagesbasis, abschätzen zu können.

6.3 Modellierte Abflusstrennung mit dem HBV-Light Modell

Die Modellierung mit HBV-Light wurde nach dem Vorgehen von Stahl et al. (2016) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden deshalb, vor allem in Bezug auf die Ergebnisse des ASG-Rhein-Projekts diskutiert (Stahl et al., 2016).

6.3.1 Güte der Modellierergebnisse

Die Güte der Modellierung kann über die Gütemaße der Multi-Kriterien-Kalibrierung sowie zusätzlichen Gütemaßen abgeschätzt werden (Tabelle 14). Dabei gilt, je näher der Wert eines Gütemaßes an 1 liegt, desto besser stimmen die Modellierwerte mit den zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten überein. Insgesamt kommt es durch die Kalibrierung des EZG Weisse Lütschine zu besseren Modellierergebnisse als bei der Kalibrierung des EZG der Schwarze Lütschine. Dies ist sowohl für diese Arbeit als auch für das ASG-Rheinprojekt der Fall.

Tabelle 14: Alle in der Multi-Kriterien-Kalibrierung verwendeten Gütemaße und zusätzliche nicht in der Kalibrierung verwendeten Maße von dieser Arbeit im Vergleich zu Stahl et al. (2016)(ASG-Rhein) für die EZG Weisse und Schwarze Lütschine

Kalibrier-größe	Gütemaß	Weisse Lütschine		Schwarze Lütschine	
		diese Arbeit	ASG-Rhein	diese Arbeit	ASG-Rhein
Abfluss	Spearman Rank	0.96	1	0.94	1
	R2	0.9	0.86	0.88	0.84
	Mod. Eff (NAS)	0.9	0.89	0.88	0.87
	Vol. ERR.	1	0.98	0.92	0.97
	Lindstrom Measure	0.9	0.88	0.87	0.87
	Eff for log (Q)	0.85	0.92	0.91	0.82
	Eff. for spc. Season	0.72	0.69	0.67	0.7
	MARE Measure	0.72	0.75	0.74	0.7
Schnee	Mean abs. norm. Err. For SWE	0.75	0.7	0.72	0.68

Die Kalibrierung der EZG Schwarze und Weisse Lütschine führt in dieser Arbeit zu ähnlichen Ergebnissen wie die Kalibrierung beider EZG im ASG Rhein-Projekt. Im Mittel fallen die Gütemaße durch diese Arbeit dabei etwas höher aus. Anhand der Gütemaße sind die Kalibrierungs- und somit auch die Modellierungsergebnisse dieser Arbeit in beiden EZG also als „akzeptabel“ einzustufen (Stahl et al., 2016). Betrachtet man bei welchen Gütemaßen diese Arbeit zu schlechteren Ergebnissen kommt als das ASG-Rheinprojekt, zeigen sich die Schwachstellen der durchgeführten Kalibrierung auf. Im EZG der Weissen Lütschine kommt es bei dem Kalibrier-Gütemaß „Log Eff“ zu den größten Defiziten dieser Arbeit. Da dieses Gütemaß die Niedrigwasserabflüsse im Winter beschreibt und diese Arbeit die Schmelzperiode im Sommer betrachtet, hat das jedoch keine Relevanz. Im EZG der Schwarzen Lütschine entstehen die größten Differenzen bei den modellierten Sommerabflüssen („log Season“) sowie dem betrachteten Gesamtvolumen des modellierten Abflusses („Vol. Err.“).

Der Vergleich der in dieser Arbeit ermittelten Gütemaße sowie denen aus dem ASG-Rhein Projekt unterstützt die beschriebenen Ergebnisse dieser Arbeit (Vergleich Kapitel 5.4.1). Für das EZG der Weissen Lütschine kommt die Modellierung zu einem zufriedenstellenden Ergebnis. Im EZG der Schwarzen Lütschine wird der Abfluss in seiner saisonalen Dynamik durch die Modellierung jedoch unzureichend erfasst.

6.3.2 Vergleich der Modellversionen

Der Gebrauch der Modellversionen „Magic Components“ führt im Vergleich zur Modellversion „Complete Mixing“ in beiden EZG bei eventbasierten Abflussanstiegen zu größeren modellierten Anteilen des Regenwassers und kleineren Anteilen der Schneeschmelze. Im EZG der Weissen Lütschine fallen die Unterschiede zwischen den verwendeten Modellversionen dabei groß aus, während im EZG der Schwarzen Lütschine kaum ein Unterschied zu erkennen ist. Das kann darin begründet sein, dass im EZG der Schwarzen Lütschine bereits durch die Modellversionen „Complete Mixing“, der oberen Grundwasserbox „Q1“ im HBV-Light eine kleine Speichergröße zugeschrieben wird. Der Unterschied der modellierten Abflussanteile, durch das Einbauen eines begrenzten Mischungsbehälters, würde dann nicht mehr so stark zum Tragen kommen. Um dieses Ergebnis zu stützen, ist jedoch eine genauere Analyse der ermittelten Modellspeichergrößen notwendig.

In dieser Arbeit werden die empirisch ermittelten Abflussanteile mit den modellierten Abflussanteilen der Modellversion „Complete Mixing“ verglichen. Welche Modellversion für die Modellierung der Abflussanteile verwendet werden sollte ist stark von der individuellen Fragestellung einer Arbeit abhängig (Stahl et al., 2016). Da in dieser Arbeit die modellierten Abflussanteile dem Vergleich der Messdaten dienen, ist das Erfassen der tatsächlichen Konzentrationen der einzeln End-Member wichtiger, als den Effekt eines Ereignisses durch den Wellenverlauf darzustellen. Der Gebrauch der Modellversion „Complete Mixing“, welche versucht die Abflussanteile getreu der Konzeptvorstellung des EZG zu modellieren, ist für die Fragestellung dieser Arbeit also sinnvoller.

6.3.3 Unsicherheiten der Modellierung

Die größte Unsicherheit bei der Modellierung der Abflussanteile Regen, Schnee-, Gletschereisschmelze und Grundwasser entsteht in dieser Arbeit durch die stationär betrachteten Gletschergrenzen (Gletscherstand 2010). Die Literatur betont, dass das korrekte Erfassen der aktuellen Gletscherausdehnung sowie eine Prognose der Entwickelung eben dieser von elementarer Wichtigkeit für die Modellierung vergletscherter EZG ist (La Frenierre und Mark, 2014; Stahl et al., 2016). Seit 2010 haben sich die Gletscher der Schweiz deutlich zurückgezogen. Unter anderem beinhalten die letzten acht Jahre dabei die heißen Jahre 2015 und 2017, die zu den schmelzintensivsten im letzten Jahrhundert zählen (BAFU, 2018d). Allein im Messjahr 2015 zog sich der Untere Grindelwaldgletscher im EZG der Schwarzen Lütschine um 450 m zurück (GLAMOS, 2015). Durch das Verwenden der Gletschergrenzen von 2010 kommt es also zu einer Überschätzung der Gletschereisschmelze im Abfluss der Schwarzen und Weissen Lütschine. Dabei ist anzunehmen, dass die Überschätzung in dem stärker vergletscherten EZG Schwarze

Lütschine höher ausfällt als im EZG der Weissen Lütschine. Auch kann durch die zu groß angesetzten Gletschergrenzen ein Fehler durch Äquifinalität begünstigt werden. Dieser kann entstehen, wenn das Modell versucht die simulierte Gletschereisschmelze mit dem beobachteten Abflussdaten zusammenzubringen und dies nur über die Variation weiterer Modellparameter möglich ist (Konz und Seibert, 2010). Diese Parameter können dann Werte annehmen, die zu plausiblen Abflusswerten führen, jedoch nicht die realen Gegebenheiten des hydrologischen Systems im EZG beschreiben (La Frenierre und Mark, 2014). Es ist wahrscheinlich, dass es im EZG der Schwarzen Lütschine bei der Modellierung zu einem solchen Äquifinalitäten-Fehler gekommen ist. Denn die kurzzeitliche Dynamik des modellierten Abflusses entspricht weder dem beobachteten Abfluss, noch den Konzeptvorstellungen des Systems. Nur im Mittel wird der Abfluss ausreichend erfasst (s.o.).

Eine weitere große Unsicherheit entsteht in dieser Arbeit durch die Übertragung der an den Auslässen gewonnenen Parametersätzen auf die TEZG. Die in der Kalibrierung gewonnenen Parametersätze sind EZG spezifisch und somit nicht im Raum übertragbar (La Frenierre und Mark, 2014). Die TEZG sind kleiner, umfassen höhere Höhenzonen und haben einen größeren Anteil vergletscherter Fläche bzw. keine vergletscherte Fläche. Es ist also anzunehmen, dass die Parameter für die TEZG nicht repräsentativ sind und es somit zu einem Fehler bei der Bestimmung der Abflussanteile in den TEZG kommt.

Auch spielt die Qualität der Inputdaten eine wichtige Rolle für das Modellierergebnis (La Frenierre und Mark, 2014). Die verwendeten Abfluss- und Klimadaten sind aufgrund ihrer Aktualität nicht fehlerkorrigiert. Vor allem die Abflussdaten können durch den hohen Geschiebetransport der Schwarzen und Weissen Lütschine fehlerbehaftet sein. Auch durch die Inputdaten der Schneehöhen kann eine Unsicherheit entstehen. Diese ist vor allem durch die geringe Auflösung des Input-Files der Schneehöhen von 1km x 1km bedingt, die im Kontrast zu der großen Heterogenität der Schneehöhen im Raum steht (La Frenierre und Mark, 2014; Stahl et al., 2016).

6.4 Empirisch ermittelte und modellierte Abflussanteile

Im Folgenden werden die in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine empirisch sowie modelltechnisch ermittelten Abflussanteile mit Ergebnissen weiterer Studien verglichen und so auf ihre Plausibilität geprüft. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass unterschiedliche Studien unter unterschiedlichen klimatischen, räumlichen und vor allem methodischen Bedingungen durchgeführt wurden und somit die Vergleichbarkeit begrenzt ist. Diese Arbeit unterscheidet sich vor allem dadurch, dass vier Quellkomponenten betrachtet werden. Alle weiteren, hier aufgeführten Studien teilen den Abfluss jedoch nur zwischen drei Quellkomponenten auf. Die folgenden Studien kommen somit insgesamt zu höheren Anteilen der entsprechenden End-Member.

6.4.1 Anteil des Regenwassers

Das Regenwasser nimmt sowohl durch Messung als auch Modellierung den geringsten Anteil am Abfluss ein. Die empirisch ermittelten Abflussanteile liegen im Mittel zwischen 7%-15% am Gesamtabfluss, die durch die Modellierung ermittelten Anteile zwischen 5% und 10%. Die im ASG-Rheinprojekt modellierten Regenwasseranteile fallen im Mittel in den Kopfeinzugsgebieten etwas höher aus (25% bis 40%). Vergleicht man jedoch die niedrigsten ermittelten Regenwasseranteile des ASG-Rheinprojekts zwischen Mai und September von 8 % und 15%, passen die Werte gut mit den modellierten Anteilen dieser Arbeit zusammen. Hier wird also deutlich, dass der Sommer 2018 einer der trockensten Sommer in der Schweiz seit Messbeginn war (Bader et al., 2018).

Auch empirische Studien weisen dem Regenwasser den kleinesten Anteil am Abfluss zu. Sie ermitteln mittlere Abflussanteile des Regenwassers von 11% bzw. 16%, wobei sie die Flusswasserproben vorwiegend zu Zeitpunkten nehmen, an denen kein Niederschlag fällt (Engel et al., 2016; Schmieder et al., 2018). Beide Paper weisen zudem darauf hin, dass das Regenwasser unabhängig von Niederschlagsereignissen im Abfluss auftritt. Dies wird ebenfalls in dieser Arbeit beobachtet. Grund dafür ist die Retention des Regenwassers im Untergrund (Schmieder et al., 2018). Um die Dynamik des Regenwassers im Abfluss korrekt erfassen zu können, benötigt es ein gutes Verständnis von Interaktion des Regenwassers mit den Wasserspeichern des EZG (Schmieder et al., 2018). Bislang gibt es jedoch nur wenige Studien, die den Anteil der Abflussbildung durch das Regenwasser in alpinen EZG berücksichtigen. Schmieder et al. (2018) bekundet deshalb weiteren Forschungsbedarf zum Verständnis der Regenwasserdynamik in glazial geprägten EZG. Denn trotz seines geringen Anteils am Gesamtabfluss, trägt das Regenwasser einen wichtigen Teil zur Abflussbildung in alpinen EZG bei (Engel et al., 2016; Schmieder et al., 2018).

Die durch die Literatur beschriebene, heftige kurzzeitige Reaktion des Abflusses der Schwarzen und Weissen Lütschine auf große Niederschlagsereignisse, wird durch die empirisch ermittelten Regenwasseranteile im Abfluss nicht erfasst (Leibundgut, 1987; Schulte et al., 2009). Grund dafür ist der Versuchsaufbau. Die verhältnismäßig leichten Isotopenkonzentrationen eines Starkregenereignisses werden durch das Sammeln einer Mischprobe mit den Isotopenkonzentrationen weiterer Ereignisse gemittelt und somit nicht in ihren Extremwerten erfasst. Als Folge davon variiert auch der berechnete Regenwasseranteil über einen geringeren Wertebereich. Durch das Einbeziehen hochaufgelöster Leitfähigkeitsmessungen könnte hier eine verbesserte Darstellung des Einflusses kurzzeitlicher Reaktion der Regenwasseranteile auf Abflussereignisse erzielt werden. Im EZG der Schwarzen Lütschine wird durch die Modellierung ebenfalls die kurzzeitige Reaktion des Abflusses auf Niederschlagsereignisse nicht erfasst. Hier ist dies Ausdruck davon, dass der modellierte Abfluss im EZG der Schwarzen Lütschine nicht die kurzzeitliche Dynamik erfasst (s.u.). Im EZG der Weissen Lütschine werden kurzzeitliche Reaktionen des Regenwasseranteils auf Niederschlagsereignisse gut erfasst.

6.4.2 Anteil der Schneeschmelze

Im EZG der Weissen Lütschine werden im Mittel gleiche Anteile von Schnee- und Gletschereisschmelze im Abfluss ermittelt. Sie machen hier rund ein Viertel des Gesamtabflusses aus. Im EZG der Schwarzen Lütschine wird über die gesamte Messperiode im Mittel ein 40% Anteil der Schneeschmelze im Abfluss gemessen. Die Schneeschmelze macht damit im EZG der Schwarzen Lütschine den Hauptanteil am Abfluss aus. Weitere empirische Studien ergeben ebenfalls, dass die Schneeschmelze phasenweise den Hauptanteil des Abflusses in alpinen EZG ausmacht (Peier, 2016; Penna et al., 2014; Schmieder et al., 2016). Das Maximum der Schneeschmelze tritt dabei, in den genannten Studien, Anfang der Schmelzsaison auf (Mai bzw. Juni). In dieser Arbeit treten jedoch Spitzenanteile der Schneeschmelze in der trockenen und heißen Phase Anfang August auf. Hier müsste, nach der Konzeptvorstellung eines glazio-nival geprägten Abflussregimes, stattdessen die Gletschereischmelze ihr Maximum haben. Der saisonale Verlauf der Schneeschmelzanteile verdeutlicht also, dass durch die empirische Abflusssseparation die Quellkomponenten Schnee und Gletschereis nicht klar voneinander getrennt werden können. Grund dafür ist, dass die Signaturen beider End-Member messtechnisch nicht ausreichend repräsentativ erfasst werden (Vergleich Kapitel 6.2.3). Diese Annahme wird durch große Schwankungen der Schneeschmelzanteile zwischen den einzelnen Messtagen gestützt. Die Analyse der Messdaten ergibt dabei, dass die empirisch ermittelten Schneeschmelzanteile in beiden EZG leicht überschätzt werden (Vergleich Kapitel 6.2.3).

Durch die Modellierung wird der Schneeschmelze in beiden EZG ein geringerer Einfluss auf die Abflussbildung zugeschrieben. Hier macht sie nach dem Grundwasser und der Gletschereisschmelze nur die drittwichtigste Komponente des Abflusses aus. Im EZG der Weissen Lütschine betragen die modellierten Schneeschmelzanteile im Mittel 15% und ergeben Spitzenanteile von rund 40%. Im EZG der Schwarzen Lütschine liegen die modellierten Schneeschmelzanteile im Mittel bei 35% und es werden Maximalanteile von bis zu 70% erreicht. Das ASG-Rhein-Projekt weist der Schneeschmelze im EZG der Schwarzen und Weissen Lütschine den Hauptanteil am jährlichen Abfluss zu (Stahl et al., 2016). Stahl et al. (2016) ermittelt, dass im Trockenjahr 2003 die Schneeschmelze rund die Hälfte des Abflusses ausmacht und Spitzenwerte von bis zu 90% des Gesamtabflusses einnimmt. Zu den großen Unterschieden zwischen den ermittelten Anteilen dieser Arbeit und dem ASG-Rheinprojekt kommt es vor allem aus zwei Gründen. Zum einen wird im ASG-Rheinprojekt der Anteil des Grundwassers am Abfluss nicht berücksichtigt, in dieser Arbeit schon. Die Grundwasserneubildung wird im HBV-Light größtenteils durch Schneeschmelze bedingt. Bei Betrachtung des Grundwassers als eigene Abflusskomponente wird dadurch ein Teil der Schneeschmelze dem Grundwasser zugeschrieben und dadurch “unsichtbar“. Dies hat vor allem im EZG der Weissen Lütschine eine wichtige Bedeutung, da es hier zu großen modellierten Grundwasseranteilen am Abfluss kommt. Ein weiterer Grund für geringere modellierte Schneeschmelzanteile ist, dass es durch die Verwendung der Gletschergrenzen 2010 zu einer Überschätzung der Gletschereisschmelze kommt (Kapitel 6.3.3), wodurch die Anteile der Schneeschmelze am Abfluss geringer ausfallen. Durch die Modellierung wird das Maximum der Schneeschmelze am Anfang

der Schmelzsaison ermittelt. Hier stimmt der saisonale Verlauf der Schneeschmelzkomponente somit mit der Konzeptvorstellung überein. Der genaue Zeitpunkt des Erreichens des Maximums variiert abhängig vom Messstandort stark. Ein Vergleich mit Messdaten könnte an dieser Stelle sehr aufschlussreich sein.

6.4.3 Anteile des Gletschereises

Im EZG der Weissen Lütschine kommen Messung und Modellierung im Mittel zu vergleichbaren Anteilen der Gletschereisschmelze am Abfluss. Beide ordnen der Eisschmelze im Mittel in etwa ein Viertel des Abflusses zu und bestimmen Tagesspitzen der Gletschereisschmelze von bis zu 40% am Gesamtabfluss. Sowohl modellierte, als auch empirisch ermittelte Eisschmelzanteile fallen damit in dieser Arbeit geringer aus, als durch die Literatur beschrieben. Im Trockenjahr 2003 werden im EZG der Weissen Lütschine durch Stahl et al. (2016) beispielsweise Tagesabflussspitzen der Gletschereisschmelze von bis zu 70% modelliert. Auch andere empirische Studien in den Alpen mit vergleichbarer EZG Größe und Flächenvergletscherung kommen zu höheren Tagesspitzen der Gletschereisschmelze von 65% bis 71% (Engel et al., 2016; Penna et al., 2014; Schmieder et al., 2018). Dies ist erstaunlich, da sich meteorologische Extremjahre in der Eisschmelzkomponente widerspiegeln und der Sommer 2018 der wärmste und trockenste Sommer der Schweiz, seit Beginn der Messungen war (Bader et al., 2018). Es ist also zu erwarten, dass die Gletschereischmelze im Sommer 2018 besonders hoch ausgefallen ist. Ein Grund für die relativ geringen Anteile der Gletschereisschmelze im EZG der Weissen Lütschine ist, wie bereits mehrfach angesprochen, das Verwenden von vier anstelle von nur drei Abflusskomponenten. Dadurch werden insgesamt für alle Abflusskomponenten kleinere Anteile ermittelt. Bei der empirischen Ermittlung der Gletschereisschmelzanteile kommt dazu, dass wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben, keine deutliche Trennung der Quellkomponenten Schnee und Gletschereis möglich ist. Dies führt dazu, dass die empirisch ermittelten Gletschereisanteile, vor allem in ihren Maximalanteilen, unterschätzt werden.

Im EZG der Schwarzen Lütschine machen die modellierten Gletschereisanteile den Hauptanteil des Abflusses aus. Im Mittel besteht der Abfluss der Schwarzen Lütschine gut zur Hälfte aus Eisschmelzwasser und es kommt zu Tagesspitzen von bis zu 80% Gletschereisschmelze am Gesamtabfluss. Grund dafür ist die Überschätzung der Gletschereisschmelzanteile durch die zu groß angesetzten Gletscherflächen. Im EZG der Schwarzen Lütschine ist diese Überschätzung dabei stärker als im EZG der Weissen Lütschine. Die empirisch bestimmten Anteile der Gletschereischmelze im EZG der Schwarzen Lütschine fallen deutlich geringer aus. Ihr Mittel- und Maximalwert liegt in der gleichen Größenordnung wie die empirisch ermittelten Gletschereisanteile im EZG der Weissen Lütschine. Auch hier wird die Gletschereisschmelze jedoch durch unzureichende Separation von Schnee- und Eisschmelze unterschätzt.

6.4.4 Anteile des Grundwassers

Die empirisch und modelltechnisch ermittelten Grundwasseranteile unterscheiden sich in beiden EZG. Die Unterschiede liegen sowohl in den Absolutwerten, als auch im jahreszeitlichen Verlauf der Grundwasserkomponenten. Um die gemessenen und modellierten Grundwasseranteile dieser Arbeit einordnen zu können, wird ein Vergleich zu einer ausführlichen Studie der Grundwasserkörper um Grindelwald von Leibundgut (1987) gezogen. Diese Studie beinhaltet unter anderem die Analyse der Quelle „Klecki“, welche für die eigenen Messungen des Grundwassers im EZG der Schwarzen Lütschine genutzt wurde und in unmittelbarer Nähe des Messstandortes SL liegt. Da sowohl das EZG der Schwarzen als auch der Weissen Lütschine durch Kalkgrundwasserleiter geprägt wird, werden die durch Leibundgut ermittelten Prozesseigenschaften im EZG der Schwarzen Lütschine auf das EZG der Weissen Lütschine übertragen.

Die modellierten Grundwasseranteile im EZG der Schwarzen Lütschine, mit mittleren Anteilen von 5% und keiner kurzzeitlichen Variation, passen nicht zu den durch Leibundgut (1987) ermittelten Eigenschaften der untersuchten Quellen. So bewertet Leibundgut (1987) die Schüttung der Quelle „Klecki“ mit durchschnittlich 6300 l/min als sehr hoch. Es ist also anzunehmen, dass auch der Anteil des Grundwassers im Abfluss deutlich über 5% liegt. Die modellierten Grundwasseranteile werden im EZG der Schwarzen Lütschine dementsprechend als nicht plausibel gewertet. Es wird angenommen, dass es zu den geringen Grundwasseranteilen durch den beschriebenen Äquifinnalitäts-Fehler kommt. Die empirisch ermittelten Abflussanteile des Grundwassers am Standort GG sind mit durchschnittlich 40% plausibel, die durchschnittlichen Anteile von 25% am Standort SL ebenfalls etwas gering. Leibundgut (1987) stellt außerdem eine große kurzzeitliche Variabilität des Kalkgrundwasserleiters fest. Der Grundwasserkörper ist geprägt durch schnelle Reaktionszeiten auf Ereignisse (1-4 Tage) und zeigt dadurch im Jahresverlauf große kurzfristige Schwankungen der Schüttung. Schwankungen der Grundwasseranteile werden modelltechnisch im EZG der Schwarzen Lütschine nicht erfasst. Durch die Messungen werden jedoch deutliche Variationen über die Saison sowie kurzzeitliche Reaktionen auf z.B. Niederschlagsereignisse dargestellt (Vergleich Kapitel**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Im EZG der Weissen Lütschine werden durch Messung und Modellierung etwa ähnliche mittlere Grundwasseranteile am Abfluss ermittelt. Das Grundwasser macht im EZG der Weissen Lütschine mit rund der Hälfte, den Hauptanteil am Abfluss aus. Auch weitere Studien ermitteln in den Alpen die Grundwasserkomponente als bestimmende Abflusskomponente (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Sowohl gemessene, als auch modellierte Grundwasseranteile unterliegen im EZG der Weissen Lütschine kurzzeitlichen Schwankungen auf Tagesbasis. Der größte Unterschied zwischen Messung und Modellierung liegt hier im Verlauf der Grundwasseranteile über die Schmelzsaison. Während die Modellierung ein Abnehmen des Grundwassers nach dem Ende der Schneeschmelze simuliert, werden durch die Messung auch am Ende der Schmelzsaison im August hohe Grundwasseranteile erfasst. Weitere Paper, die die Abflussanteile empirisch ermitteln stellen ebenfalls eine Zunahme

der Grundwasseranteile von Juli bis September fest (Penna et al., 2014; Schmieder et al., 2018). Begründet wird dies durch Gletscherschmelzwasser bedingte Grundwasserneubildung (Schmieder et al., 2018). Dem HBV-Light liegt die Systemvorstellung zu Grunde, dass Gletscherschmelzwasser direkt zum Abfluss im Gerinne kommt und somit nicht an der Grundwasserneubildung beteiligt ist. Ob die Gletschereisschmelze zur Grundwasserbildung beiträgt oder nicht und welchen Anteil das Grundwasser somit in den Monaten Juli-September am Gesamtabfluss hat, bestimmt das Ergebnis der gesamten Abflussseparation in großem Maße. In der Literatur gibt es bislang nur wenig Information über die Rolle des Grundwassers in hochalpinen EZG und vor allem in Bezug auf den Zusammenhang von Gletschereisschmelze und Grundwasserabfluss besteht weiterer Forschungsbedarf (La Frenierre und Mark, 2014; Schmieder et al., 2018).

7 Schlussfolgerung

Die in dieser Arbeit ermittelten Abflusskomponenten spiegeln deutlich wider, dass der Sommer 2018 durch geringe Niederschläge gekennzeichnet war. Sowohl empirisch als auch modelltechnisch wird dem Regenwasser in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine nur ein kleiner Anteil von rund einem Zehntel an der Abflussbildung zugeschrieben. Bei der empirischen Ermittlung der Regenwasseranteile fällt dabei auf, dass auch an Tagen, an denen es nicht zum Niederschlag kommt, Regenwasser im Abfluss nachgewiesen werden kann. Es ist also anzunehmen, dass das Regenwasser im EZG zurückgehalten wird und es so zu einem verzögerten Abfluss kommt.

Trotz großer Trockenheit unterscheiden sich die Wasserstände der Schwarzen und Weissen Lütschine im Sommer 2018 im Mittel kaum zu den Vorjahren. Die modellierten Anteile der Abflusskomponenten im EZG der Weissen Lütschine zeigen deutlich, dass die niedrigen Regenwasseranteile zwischen Juli und September durch hohe Gletscherschmelzanteile im Abfluss kompensiert werden. Die modellierte Gletschereisschmelze nimmt hier Tagesspitzen von knapp 60% am Abfluss ein. Maximale Eisschmelzanteile werden dabei im Zeitraum der langanhaltenden, heißen und trockenen Wetterlage, Anfang August simuliert. Die modellierte Schneeschmelze trägt von Mitte Mai bis September kontinuierlich zum Abfluss der Weissen Lütschine bei und weist ein leichtes Maximum Anfang Juni auf.

Durch die empirische Hydrograph Separation kann im EZG der Weissen Lütschine hingegen kein deutliches Maximum der Gletscherschmelzanteile über die Messperiode festgestellt werden. Die ermittelten Schneeschmelzanteile weisen jedoch Maximalwerte in der beschrieben trockenen und warmen Zeitspanne, Anfang August, auf. Das spiegelt wider, dass Schnee- und Eisschmelze durch tracerbasierte Abflussseparation in dieser Arbeit nicht klar voneinander getrennt werden können. Folge davon ist, dass die Schneeschmelze leicht überschätzt wird, während die Gletschereisschmelze, vor allem in ihren Spitzenanteilen, unterschätzt wird. Über die ganze Messperiode betrachtet, kommen Messung und Modellierung im EZG der Weissen Lütschine jedoch zu ähnlichen Ergebnissen. Durch beide Methoden wird der Schnee- und Eisschmelze je ein Viertel am Abfluss der Weissen Lütschine zugeschrieben.

Die Analyse der Tracerkonzentrationen ergibt außerdem die Notwendigkeit das Grundwasser bei der Abflussseparation beider EZG zu berücksichtigen. Im EZG der Weissen Lütschine wird durch Messung, sowie Modellierung ermittelt, dass das Grundwasser den Hauptanteil am Abfluss hat. Im Mittel macht das Grundwasser hier rund die Hälfte des Gesamtabflusses aus. Der saisonale Verlauf der Grundwasseranteile unterscheidet sich jedoch durch Messung und Modellierung. Das HBV-Light simuliert einen engen Zusammenhang von Schneeschmelze und Grundwasser im Abfluss. Zu maximalen Grundwasseranteilen kommt es somit bei maximaler Schneeschmelze am Anfang der Schmelzsaison. Durch die Messungen werden dem Grundwasser jedoch sowohl am Anfang, als auch am Ende der Schmelzsaison beträchtliche Anteile am Abfluss zugeschrieben. Die empirische Datenanalyse ergibt also, dass der Anteil des Grundwasserabflusses sowohl durch die Schneeschmelze, als auch die Gletschereisschmelze

bedingt ist. Weitere Studien kommen zu dem gleichen Ergebnis und fordern: Forschungsbedarf für ein besseres Verständnis von Interaktion zwischen Gletschereischmelze und Grundwasserneubildung.

Im EZG der Schwarzen Lütschine kommt es zu größeren Unterschieden zwischen den empirisch und modelltechnisch erfassten Abflussanteilen. Die Unterschiede entstehen vor allem durch eine modellierte, starke Dominanz der Gletschereisschmelze über die gesamte Messperiode. Im Mittel macht sie rund die Hälfte des Abflusses aus und es kommt zu Spitzenwerten von fast 90% Eisschmelze am Gesamtabfluss. Hier kommt zum Ausdruck, dass es durch die bereits erwähnte Verwendung der stationären Gletschergrenzen zu einer Überschätzung der simulierten Gletschereisanteile kommt. Im EZG der Schwarzen Lütschine wirkt sich das auch auf weitere Modelliergrößen aus (Äquifinalität). Vor allem die simulierten, konstant sehr geringen Grundwasseranteile, die trotz extrem trockener Wetterlage kleiner ausfallen als die Anteile des Regenwassers, werden als nicht plausibel eingestuft.

Empirisch werden dem Grundwasser im EZG der Schwarzen Lütschine hingegen im Mittel rund 35% des Abflusses zugeschrieben. Der saisonale Verlauf der Grundwasseranteile verhält sich dabei gleich wie im EZG der Weissen Lütschine. Messtechnisch wird ermittelt, dass im EZG der Schwarzen Lütschine die Schneeschmelze den größten Anteil am Abfluss ausmacht. Sie nimmt mittlere Anteile von rund 40% am Abfluss ein und erreicht Tagesspitzen von bis zu 80% am Gesamtabfluss. Die Eisschmelze macht im EZG der Schwarzen Lütschine etwa ein Viertel des Abflusses aus und kommt zu Maximalanteilen von knapp der Hälfte am Abfluss. Bei empirischer Erfassung der Schmelzkomponenten kam es im EZG der Schwarzen Lütschine jedoch zu den gleichen Schwierigkeiten wie im EZG der Weissen Lütschine. Durch keine klare Differenzierung der Schmelzkomponenten wird die Schneeschmelze überschätzt, während die Gletschereisschmelze unterschätzt wird. Durch starke Messausfälle am stark vergletscherten Messstandort im August, ist anzunehmen, dass die Unterschätzung der Gletschereisschmelze im EZG der Schwarzen Lütschine stärker ausfällt als im EZG der Weissen Lütschine.

Um die in dieser Arbeit, zur Erfassung der Abflusskomponenten, angewendete Methodik kritisch zu bewerten, wird auf die untergeordneten Forschungsfragen dieser Arbeit geantwortet (Vergleich Kapitel 0). Diese Arbeit kommt zu dem Schluss, dass das Aufbauen des Messnetzes aus mehreren Messstandorten sowie die tägliche Entnahme von Flusswasserproben geeignet ist, um die zeitliche und räumliche Variabilität der Abflusskomponenten zu erfassen (a). Durch die Wahl von mehreren Messstandorten in einem EZG können einzelne abflussbildende Prozesse genauer erfasst werden. In dieser Arbeit wird die Aussagekraft der einzelnen TEZG jedoch durch starke Messausfälle limitiert. Das Verwenden von täglichen Flusswasserproben gibt detaillierte Einblicke in kurzzeitliche Dynamiken des Regens und vor allem des Grundwassers in den EZG. Die Abflusskomponenten Schnee- und Gletschereisschmelze können auf Tagesbasis durch diese Arbeit jedoch nicht zufriedenstellend separiert werden. Grund dafür ist, dass die End-Member Signaturen beider Komponenten nicht repräsentativ erfasst wurden. Um die Quellkomponente Schnee aussagekräftiger ermitteln zu können, müsste ein größerer Wert auf die Beprobung hoher Höhenlagen gelegt sowie die Probennahme früher im Jahr durchgeführt werden. Um die

Signatur der Gletschereiskomponente repräsentativer zu erfassen, müssen die Komponenten vor allem räumlich und gegebenenfalls auch zeitlich höher aufgelöst werden. Die Auflösung der End-Member ist jedoch gleichzeitig die Limitation der Methodik der EMMA. Denn eine zu starke Variation der End-Member kann zu einer Variation der Abflussanteile führen, ohne dass sich die gemessenen Flusswasserkonzentrationen verändern. Es ist also fraglich, ob die End-Member Signaturen von Schnee und Eis für die EMMA so aussagekräftig erfasst werden können, dass eine plausible Trennung beider Komponenten auf Tagesbasis möglich ist (b).

Die in dieser Arbeit verwendeten Tracer sind für die empirische Trennung der Abflusskomponenten geeignet (bi). Anhand der stabilen Wasserisotope können die Abflusskomponenten Regen, Schnee- und Gletschereisschmelze separiert werden. Durch die Verwendung des Isotops ^{17}O kommt es dabei zu einer deutlicheren Unterscheidung der End-Member Signaturen als durch das Sauerstoffisotop ^{18}O. Die gemessenen Ionen geben Aufschluss über die Rolle der langsamen Fließkomponenten im hydrologischen System. Die Betrachtung des Grundwassers ist durch die oben aufgeführten Gründe in den EZG Schwarze und Weisse Lütschine sinnvoll (bii).

Empirisch und modelltechnisch ermittelte Abflussanteile weisen in dieser Arbeit vor allem bei den bestimmten Grundwasser- und Gletschereisanteilen Unterschiede auf (c). Zu Differenzen bei den ermittelten Grundwasseranteilen kommt es durch einen unterschiedlich ermittelten saisonalen Verlauf der Grundwasserkomponente. Die Unterschiede der bestimmten Gletschereisanteile entstehen durch eine messtechnische Unterschätzung der Gletschereisanteile sowie eine modelltechnische Überschätzung der Eisanteile durch die verwendeten stationären Gletschereisgrenzen.

Es gibt nur wenige Studien, die den Einfluss des Grundwassers in hochalpinen EZG berücksichtigen. Denn es gilt die Systemvorstellung, dass in flachgründigen, steilen EZG die Wasserspeicherung im Untergrund eine untergeordnete Rolle spielt. Vor allem im Zuge des Gletscherrückgangs ist es jedoch wichtig die räumliche und zeitliche Variabilität der Abflussbildung durch Grundwasser zu erfassen, da das Grundwasser neben der Eisschmelze kontinuierlich zur Abflussbildung beiträgt. Forschungsbedarf besteht dabei vor allem in Bezug auf die Interaktion von Regenwasser mit den Wasserspeichern im Untergrund sowie dem Zusammenhang von Gletschereisschmelze und Grundwasserneubildung (La Frenierre and Mark, 2014; Schmieder et al., 2018). In Bezug auf die tracerbasierte Abflusstrennung wäre außerdem interessant, durch weitere Arbeiten abzuschätzen, ob durch die Verwendung von ^{17}O als Tracer anstelle von ^{18}O die Komponenten Schnee und Gletschereis besser unterschieden werden könnten.

8 Literaturverzeichnis

Bader, S., Burgstall, A., Casanueva, A., Duguay-Tetzlaff, A., 2018. Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 – eine klimatologische Übersicht. Fachbericht MeteoSchweiz (272). Accessed.

BAFU, 2018a. Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser) Lütschine - Gsteig (EDV: 2109). Jahreshochwasser der gesamten Beobachtungsperiode 1908-2016. http://hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/hq_studien/hq_statistics/2109hq.pdf.

BAFU, 2018b. Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser) Weisse Lütschine - Zweilütschinen (EDV: 2200). Jahreshochwasser der gesamten Beobachtungsperiode 1933-2016. http://hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/hq_studien/hq_statistics/2200hq.pdf.

BAFU, 2018c. Lütschine - Gsteig. LH 2109. http://hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/jahrestabellen/2109Q_16.pdf.

BAFU, B.f.U., 2018d. Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2017. Abfluss, Wasserstand und Wasserqualität der Schweizer Gewässer. www.bafu.admin.ch/uz-1804-d. Accessed 11.12.18.

Barthold, F.K., Tyralla, C., Schneider, K., Vaché, K.B., Frede, H.-G., Breuer, L., 2011. How many tracers do we need for end member mixing analysis (EMMA)? A sensitivity analysis. Water Resour. Res. 47 (8), 2313.

Christophersen, N., Hooper, R.P., 1992. Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal components analysis for the end-member mixing problem. Water Resour. Res. 28 (1), 99–107.

Christophersen, N., Neal, C., Hooper, R.P., Vogt, R.D., Andersen, S., 1990. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members — A step towards second-generation acidification models. Journal of Hydrology 116 (1-4), 307–320.

Clark, I.D., Fritz, P., 2013. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton.

Dietermann, N., Weiler, M., 2013. Spatial distribution of stable water isotopes in alpine snow cover. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17 (7), 2657–2668.

Engel, M., Penna, D., Bertoldi, G., Dell'Agnese, A., Soulsby, C., Comiti, F., 2016. Identifying run-off contributions during melt-induced run-off events in a glacierized alpine catchment. Hydrol. Process. 30 (3), 343–364.

EWL Genossenschaft, 2014. Wasserkraftwerk Stechelberg. Accessed December 4, 2018.

Farinotti, D., Usselmann, S., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., 2012. Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. Hydrol. Process. 26 (13), 1909–1924.

Fischer, A., Hans Wiesenegger, 2018. Gletscher leiden unter langer Schmelze. Der Rekordsommer 2018 hat den heimischen Gletschern zugesetzt: Große Eisflächen gingen verloren, wie die Gletscherforscher Andrea Fischer und Hans Wiesenegger berichten. Nur ein Kälteeinbruch kann die ungewöhnlich lange Schmelzperiode beenden. https://science.orf.at/stories/2942562/. Accessed 17.12.

Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., Casper, M., Bronstert, A., Schumann, A., Weiler, M. (Eds.), 2016. Hydrologie. Haupt Verlag, Bern.

GLAMOS, S.G., 2015. Gletscher Längenänderungen. http://swiss-glaciers.glaciology.ethz.ch/glacier-list.html. Accessed December 4, 2018.

Gröning, M., Lutz, H.O., Roller-Lutz, Z., Kralik, M., Gourcy, L., Pöltenstein, L., 2012. A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for δ18O and δ2H analysis of cumulative precipitation samples. Journal of Hydrology 448-449, 195–200.

Hach Company, 2003. Sigma 900 Composite Sampler. INSTRUMENT MANUAL (8544). http: //www.hach.com.

Hooper, R.P., Christophersen, N., Peters, N.E., 1990. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members — An application to the Panola Mountain catchment, Georgia, U.S.A. Journal of Hydrology 116 (1-4), 321–343.

Hunkeler, S., 2013. Bestimmung der Wasserzusammensetzung in den Abflüssen im Gebiet des Plaine-Morte Gletschers. Durchführung einer End-Member-Mixing Analyse zur Bestimmung verschiedener Ursprungswasser des Abflusses im Kanton Bern. Masterarbeit der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der. Publikation Gewässerkunde (551).

Huss, M., 2011. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. Water Resour. Res. 47 (7), 469.

Huss, M., Fischer, M., 2016. Sensitivity of Very Small Glaciers in the Swiss Alps to Future Climate Change. Front. Earth Sci. 4 (54), 248.

Jungfraubahnen, 2018. Kraftwerk Lütschental. https://www.jungfrau.ch/de-ch/unternehmen/jungfraubahnen/jungfraubahn-holding-ag/kraftwerk-jungfraubahn/. Accessed December 4, 2018.

Klaus, J., McDonnell, J.J., 2013. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. Journal of Hydrology 505, 47–64.

Kohler, B., 2018. Geld für Grossbaustelle gesprochen. Es wird in naher Zukunft viel gebaut im Grund. Der Gemeinderat hat Arbeiten im Umfang von 2,6 Millionen Franken für Hochwasserschutzarbeiten vergeben. Accessed December 4, 2018.

Konz, M., Seibert, J., 2010. On the value of glacier mass balances for hydrological model calibration. Journal of Hydrology 385 (1-4), 238–246.

Kronholm, S.C., Capel, P.D., 2015. A comparison of high-resolution specific conductance-based end-member mixing analysis and a graphical method for baseflow separation of four streams in hydrologically challenging agricultural watersheds. Hydrol. Process. 29 (11), 2521–2533.

La Frenierre, J., Mark, B.G., 2014. A review of methods for estimating the contribution of glacial meltwater to total watershed discharge. Progress in Physical Geography 38 (2), 173–200.

LANAT, 2018. Angeln in den Lütschinen. https://www.vol.be.ch/vol/de/index/natur/fischerei/angelfischerei/pachtgewaesser/luetschinen.html. Accessed December 4, 2018.

Leibundgut, C. (Ed.), 1987. Hydroökologische Untersuchungen in einem alpinen Einzugsgebiet (Testgebiet Grindelwald). Schlussbericht zum Schweizerischen MAB-Programm, Bern.

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.

OTT Hydromet GmbH, 2009. Grundwasser-Datensammler OTT CTD. Betriebsanleitung V 01-1009. www.ott.com.

Peier, G., 2016. Bestimmung des Regen-, Schneeschmelz- und Gletscherschmelzanteils des Abflusses der Weissen Lütschine mithilfe von End-Member Mixing Analyse und Bilanzanalyse. Masterarbeit am geographischen Institut der philosophisch- naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Publikation Gewässerkunde (689).

Penna, D., Engel, M., Mao, L., Dell'Agnese, A., Bertoldi, G., Comiti, F., 2014. Tracer-based analysis of spatial and temporal variations of water sources in a glacierized catchment. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18 (12), 5271–5288.

Picarro. Why 17O-excess? And, what is it? https://science.picarro.com/support/library/documents/why_17o_excess_and_what_is_it_flyer. Accessed December 17, 2018.

Picarro Media Lab, 2013. PICARRO L2140-i δ 18 O/δ 17 O/δD/ 17 O-excess High-Precision Isotopic Water Analyzer. High-precision triple oxygen isotope research in water is finally simple and affordable. http://www.apellaser.com/wp-content/uploads/2014/09/L2140-i_17O-excess_IsotopicWaterAnalyzer_DataSheet.pdf.

Schmieder, J., Garvelmann, J., Marke, T., Strasser, U., 2018. Spatio-temporal tracer variability in the glacier melt end-member - How does it affect hydrograph separation results? Hydrological Processes 32 (12), 1828–1843.

Schmieder, J., Hanzer, F., Marke, T., Garvelmann, J., Warscher, M., Kunstmann, H., Strasser, U., 2016. The importance of snowmelt spatiotemporal variability for isotope-based hydrograph separation in a high-elevation catchment. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20 (12), 5015–5033.

Schotterer, U., 2010. Wasserisotope in der Schweiz. Neue Ergebnisse und Erfahrungen aus dem nationalen Messnetz iSOt. GAS WASSER ABWASSER (12).

Schulte, L., Veit, H., Burjachs, F., Julià, R., 2009. Lütschine fan delta response to climate variability and land use in the Bernese Alps during the last 2400 years. Geomorphology 108 (1-2), 107–121.

Seibert, J., Vis, M.J.P., 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrol. Earth Syst. Sci. 16 (9), 3315–3325.

Stahl, K., Weiler, M., Freudinger, D., Kohn, I., Seibert, J., Vis Marc, Gerlinger Kai, Böhm, M., 2016. Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) Überarbeitete Endfassung Dezember 2016.

Stichler, W., Schotterer, U., 2000. From accumulation to discharge: modification of stable isotopes during glacial and post-glacial processes. Hydrol. Process. 14 (8), 1423–1438.

Teledyne Isco, I., 2009. 3700 Portable Sampler. Installation and Operation Guide.

Thermo Fisher Scientific, 2013. Thermo Scientific Dionex ICS-1100 Product Specifications. http://dionex.su/en-us/webdocs/70837-PS70299_ICS-1100_Product-Specifications.pdf.

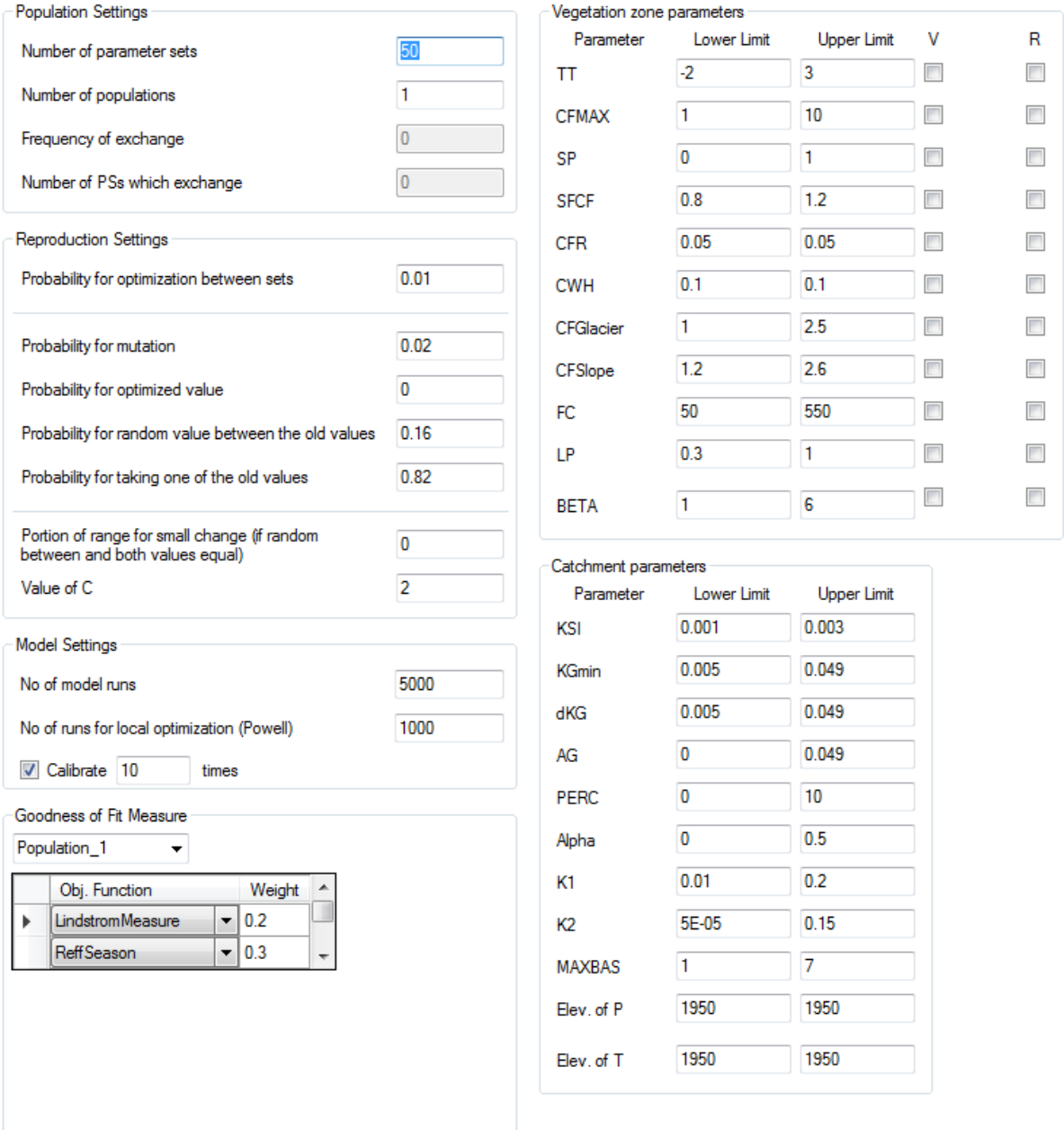
Umbricht, A., Fukutome, S., Liniger, M.A., Frei, C., Appenzeller, C., 2013. Seasonal Variation of Daily Extreme Precipitation in Switzerland. Scientific Report MeteoSwiss (97).

Weiler, M., Seibert, J., Stahl, K., 2018. Magic components-why quantifying rain, snowmelt, and ice-melt in river discharge is not easy. Hydrological Processes 32 (1), 160–166.

Weingartner, R., Viviroli, D., Schädler, B., 2007. Water resources in mountain regions: a methodological approach to assess the water balance in a highland-lowland-system. Hydrol. Process. 21 (5), 578–585.

Wyss, M., 2016. Bestimmung des Regen-, Schneeschmelz- und Gletscherschmelzanteils am Abfluss der Schwarzen Lütschine mit Hilfe der End-Member Mixing Analyse und der Bilanzanalyse. Masterarbeit.

9 Anhang



Population Settings

Number of parameter sets	50
Number of populations	1
Frequency of exchange	0
Number of PSs which exchange	0

Reproduction Settings

Probability for optimization between sets	0.01
Probability for mutation	0.02
Probability for optimized value	0
Probability for random value between the old values	0.16
Probability for taking one of the old values	0.82
Portion of range for small change (if random between and both values equal)	0
Value of C	2

Model Settings

No of model runs	5000
No of runs for local optimization (Powell)	1000

☑ Calibrate 10 times

Goodness of Fit Measure

Population_1

Obj. Function	Weight
LindstromMeasure	0.2
ReffSeason	0.3

Vegetation zone parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit	V	R
TT	-2	3		
CFMAX	1	10		
SP	0	1		
SFCF	0.8	1.2		
CFR	0.05	0.05		
CWH	0.1	0.1		
CFGlacier	1	2.5		
CFSlope	1.2	2.6		
FC	50	550		
LP	0.3	1		
BETA	1	6		

Catchment parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
KSI	0.001	0.003
KGmin	0.005	0.049
dKG	0.005	0.049
AG	0	0.049
PERC	0	10
Alpha	0	0.5
K1	0.01	0.2
K2	5E-05	0.15
MAXBAS	1	7
Elev. of P	1950	1950
Elev. of T	1950	1950

Abbildung 46: Für die Kalibrierung festgelegten Parametergrenzen im HBV-Light

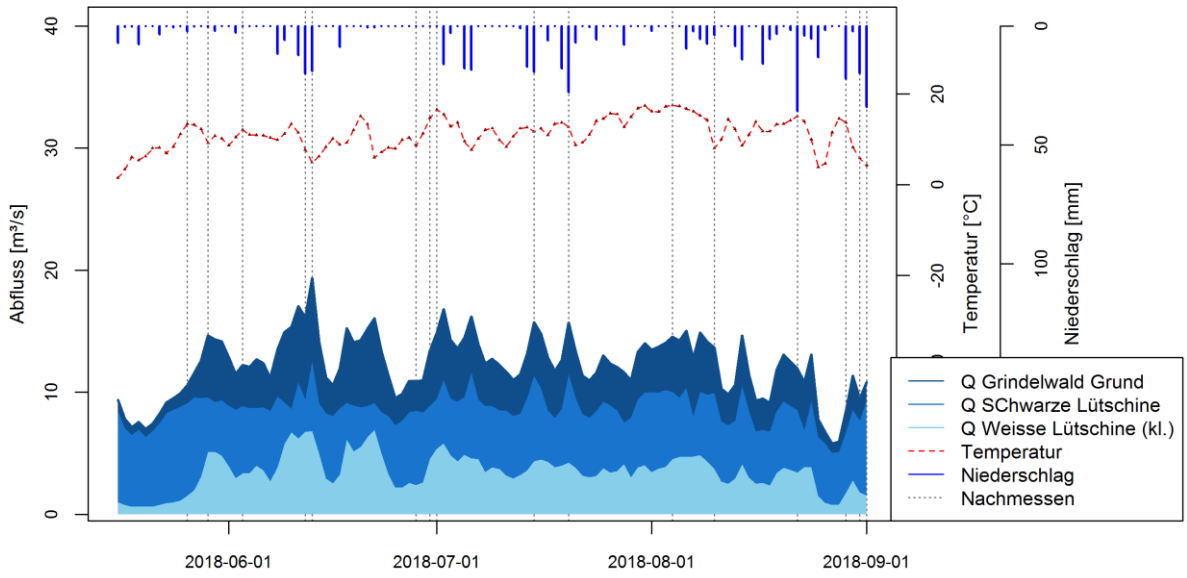


Abbildung 47: Messtage, die im EZG der Schwarzen Lütschine zum Nachmessen identifiziert wurden

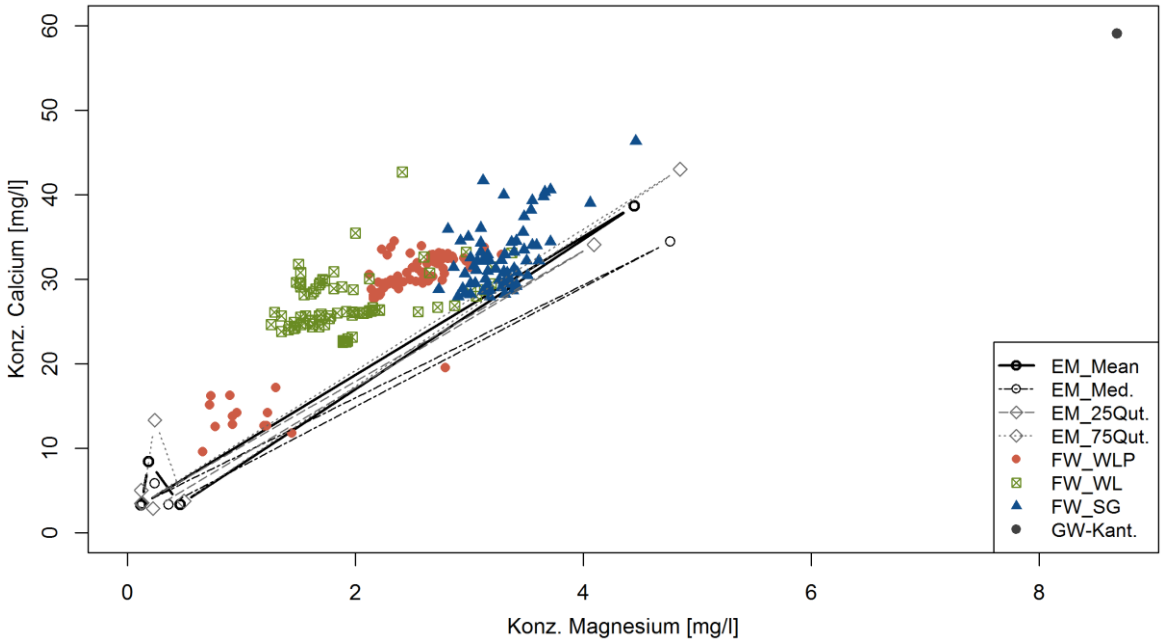


Abbildung 48: Mischungsdreieck zwischen gemessenen Calcium- und Magnesiumkonzentrationen im EZG der Weissen Lütschine

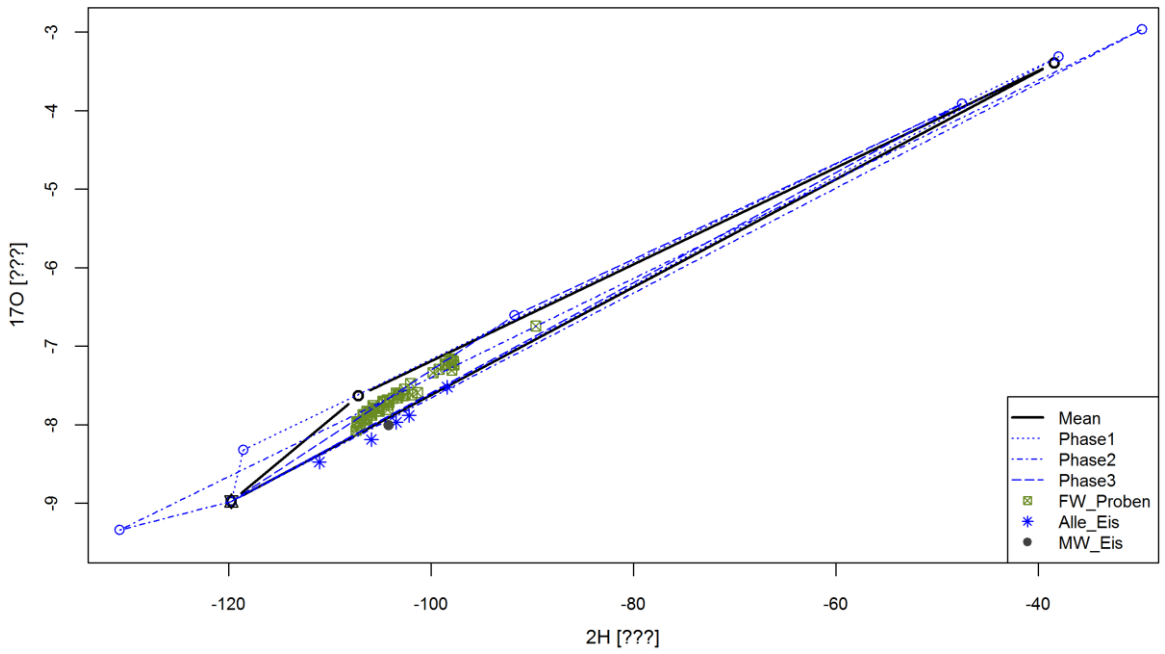


Abbildung 49: Mischungsdreieck zwischen den End Membern Regen, Schnee und Gletschereis für die Messparameter ^{17}O und ^{2}H . Die End Member werden als Mittelwert(dick), Median sowie 25% und 75% Quantil dargestellt. Außerdem sind weite Messungen Festeisproben sowie die genommene Flüssigprobe des End Member Eis eingezeichnet.

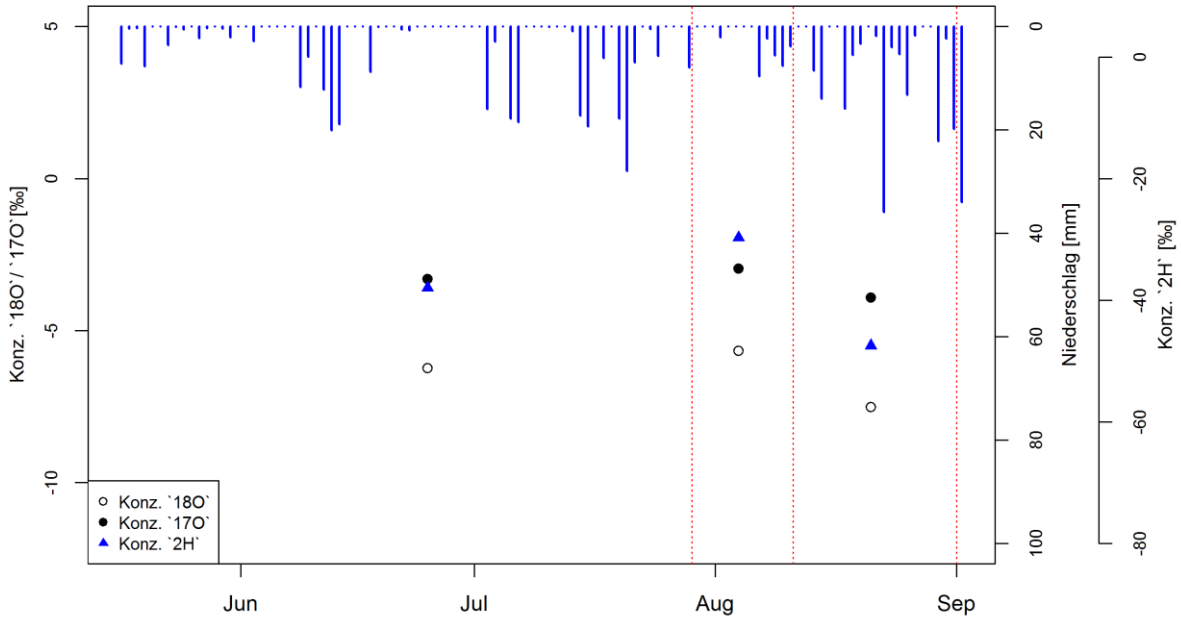


Abbildung 50: Gemessene Isotopen-Konzentration im Regenwasser im EZG der Schwarzen Lütschine

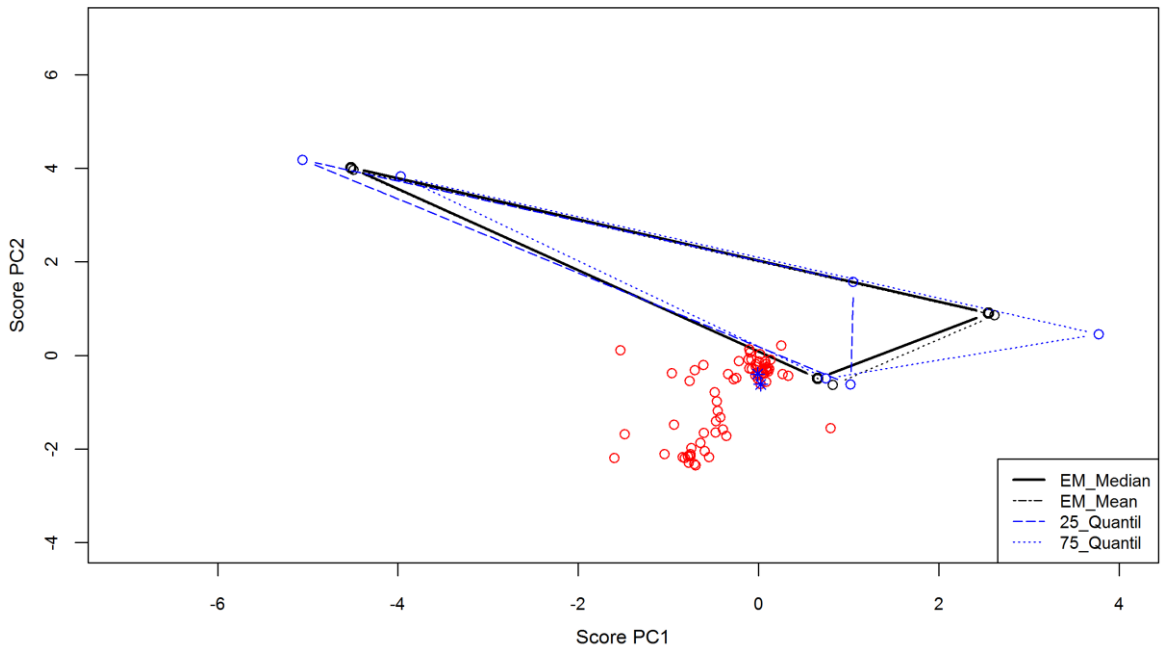


Abbildung 51: Ergebnis der EMMA am Messstandort BB im EZg der Schwarzen Lütschine

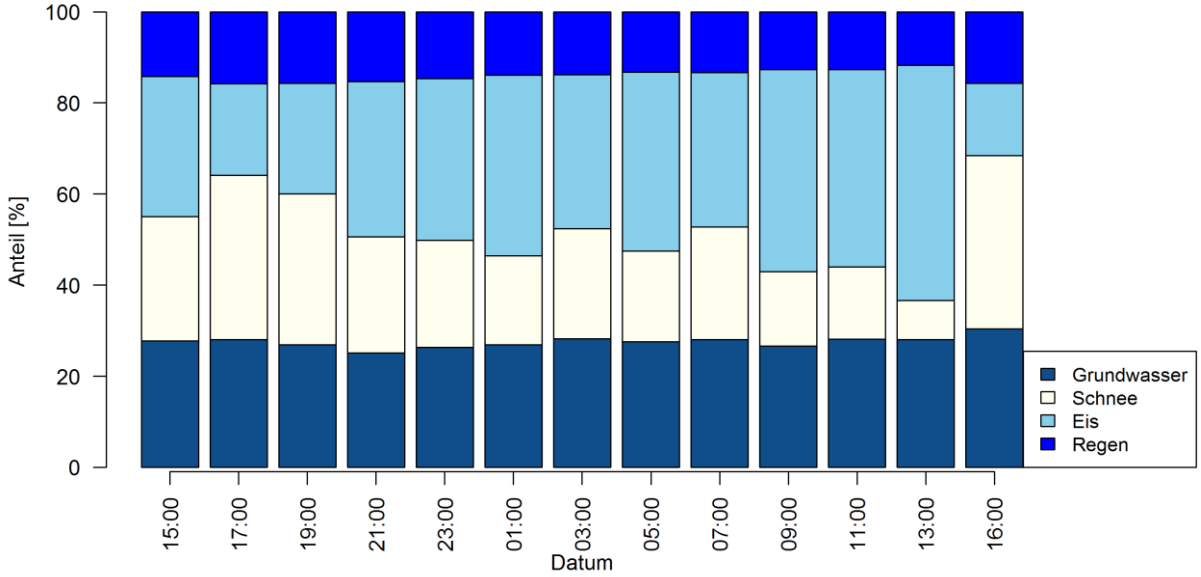


Abbildung 52: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort SL

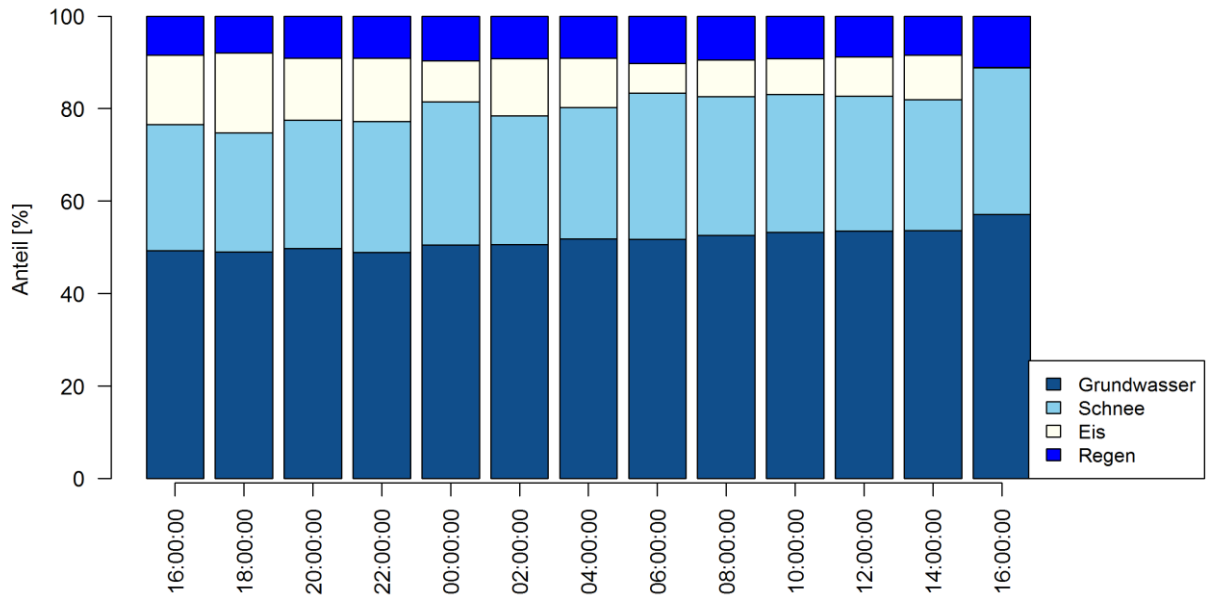


Abbildung 53: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort GG

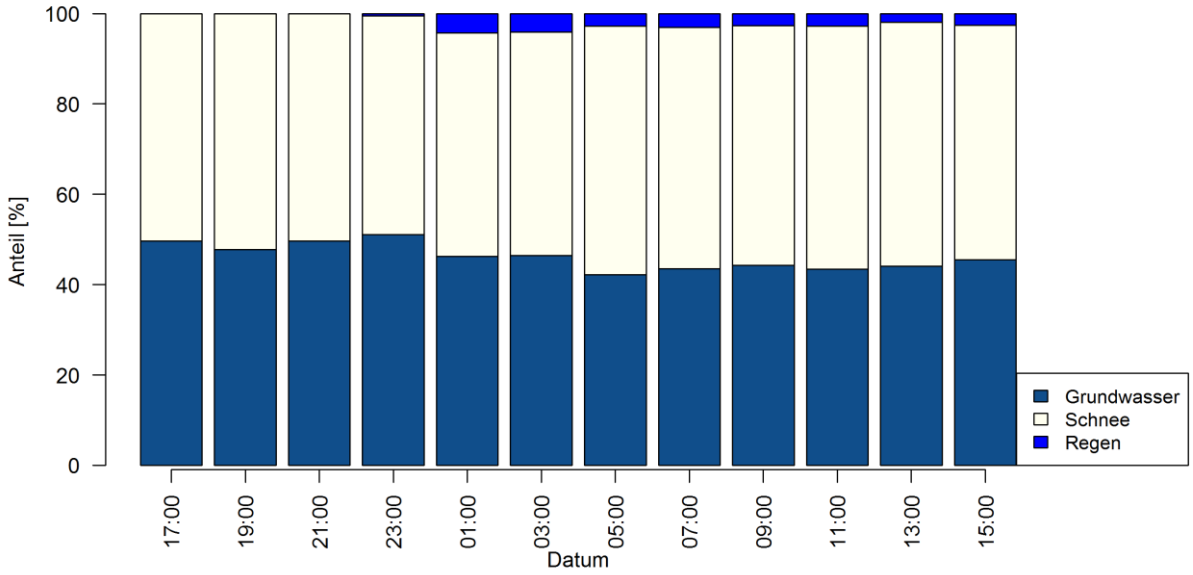


Abbildung 54: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort SG

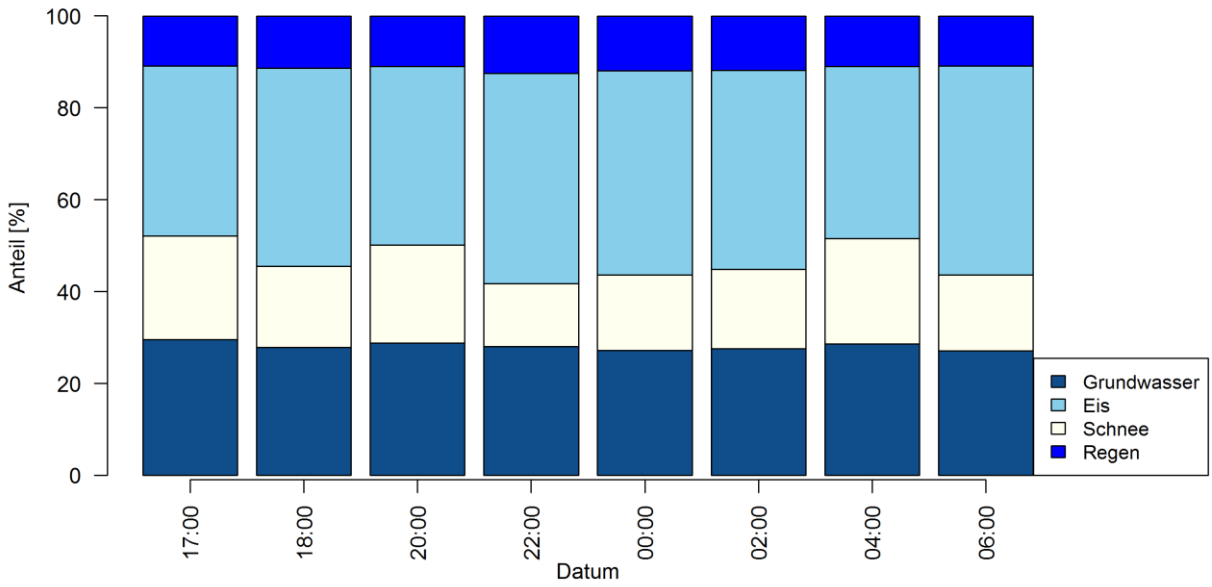


Abbildung 55: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort WL

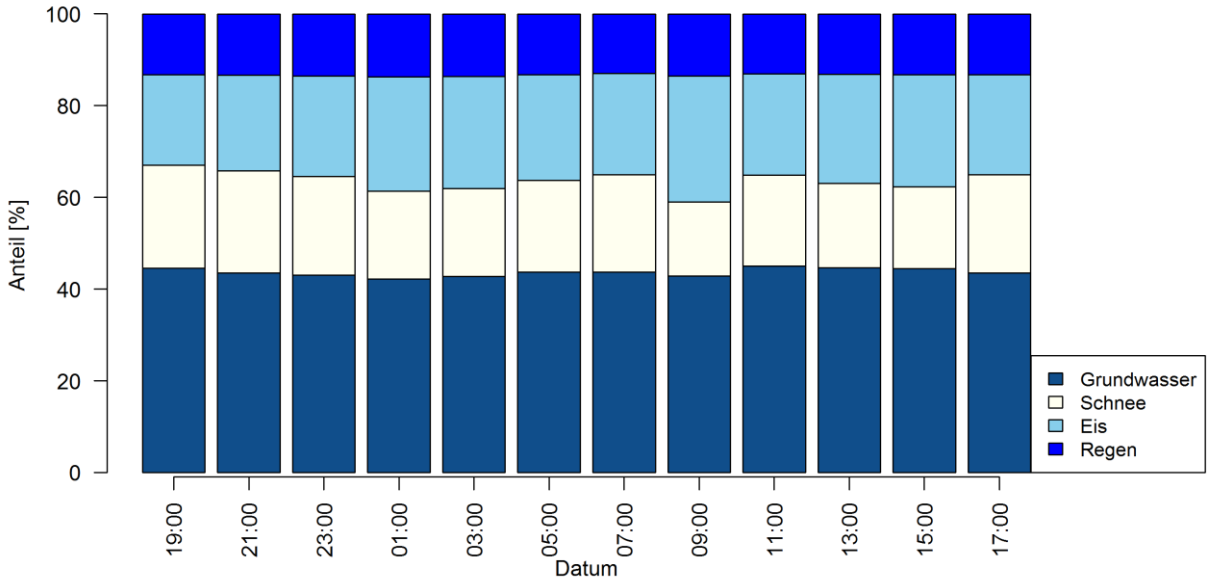


Abbildung 56: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Schneeschmelzpeaks am Messstandort WLP

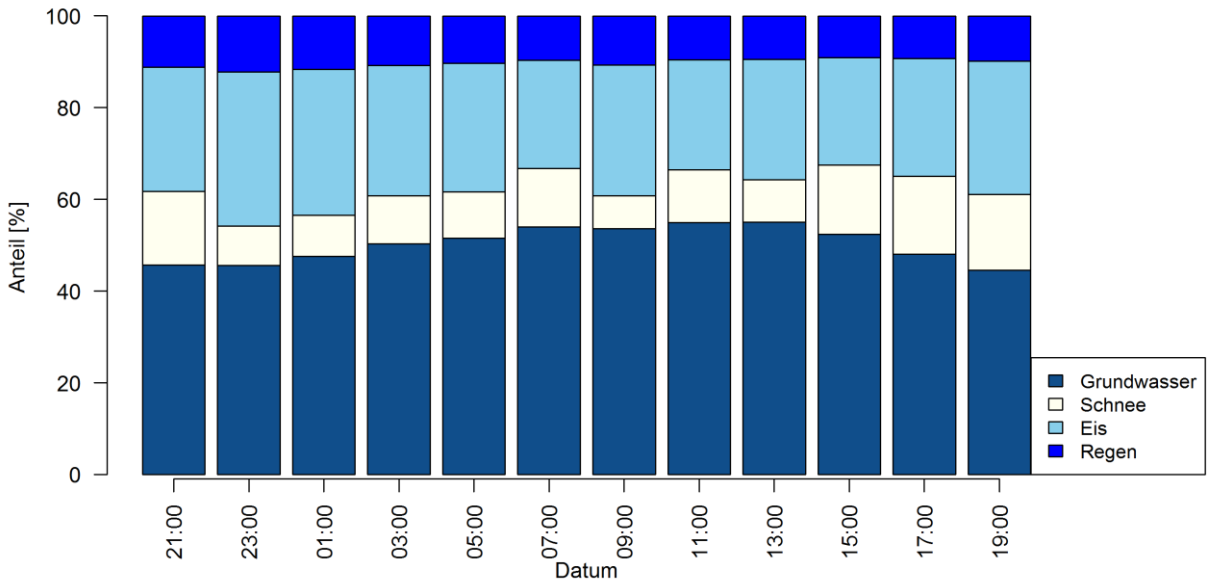


Abbildung 57: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Eisschmelzpeaks am Messstandort WLP

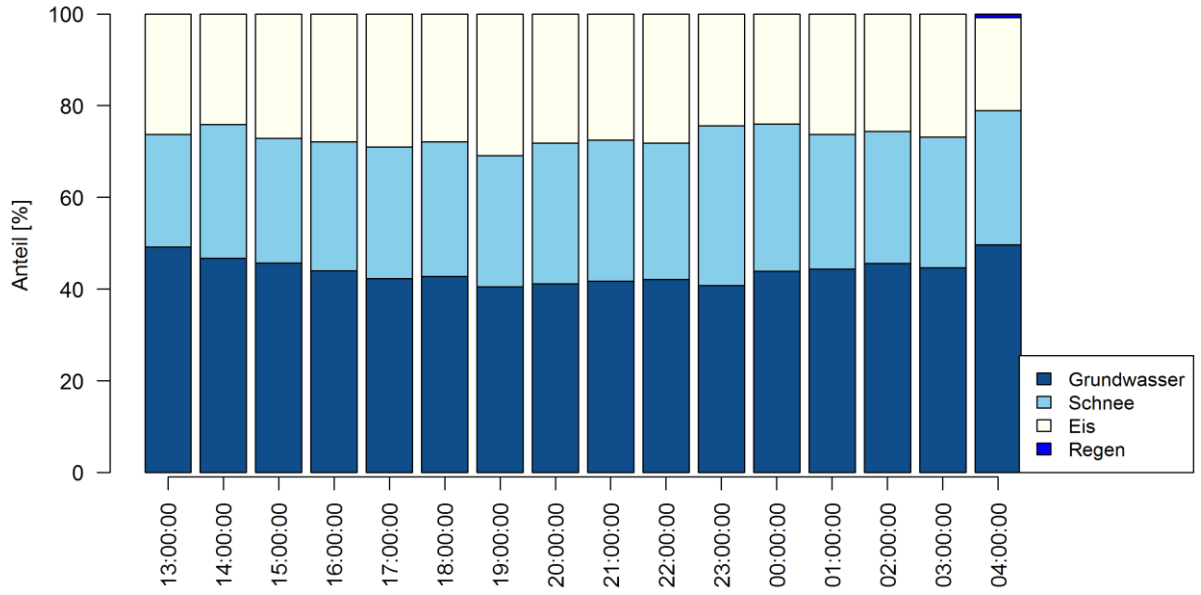


Abbildung 58: 24-Stundenmessung zum Zeitpunkt des Eisschmelzpeaks am Messstandort GG

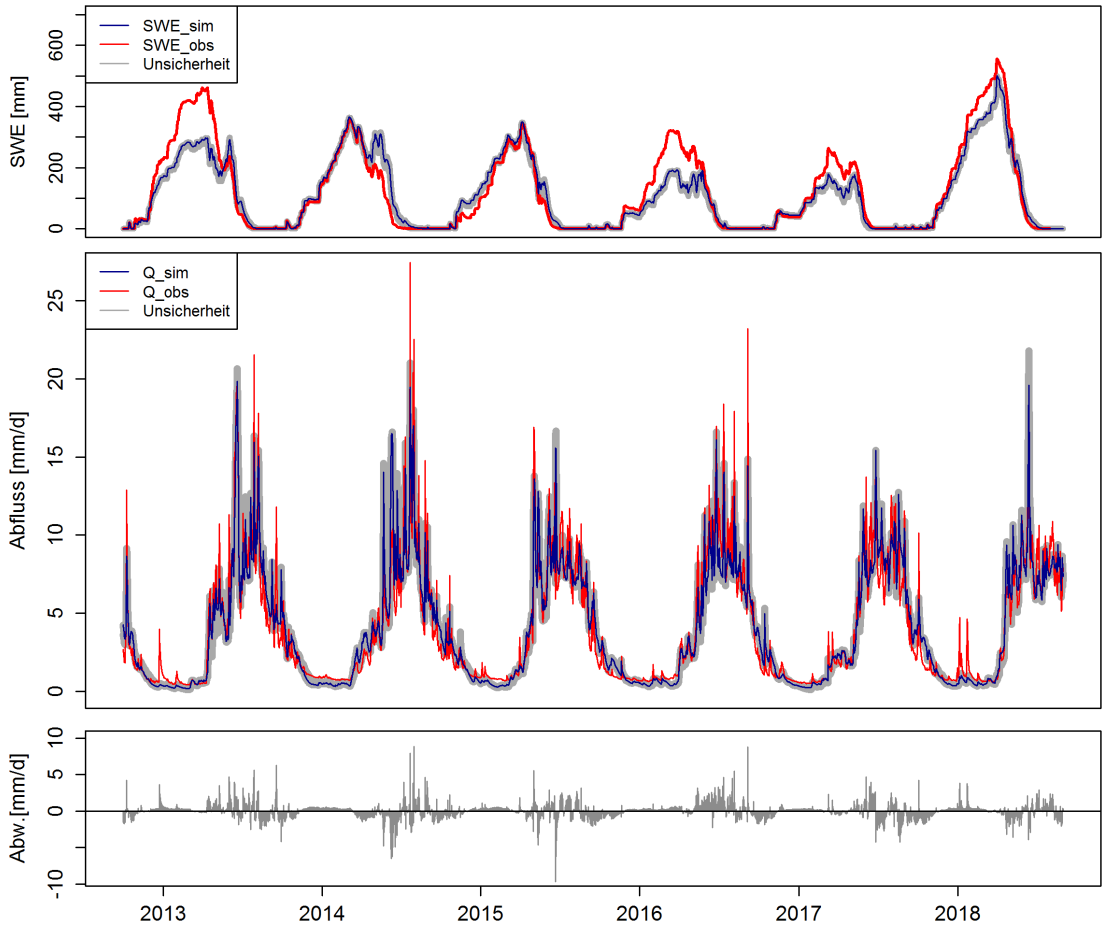


Abbildung 59: Kalibrierergebnisse des HBV-Light im EZG der Weissen Lütschine

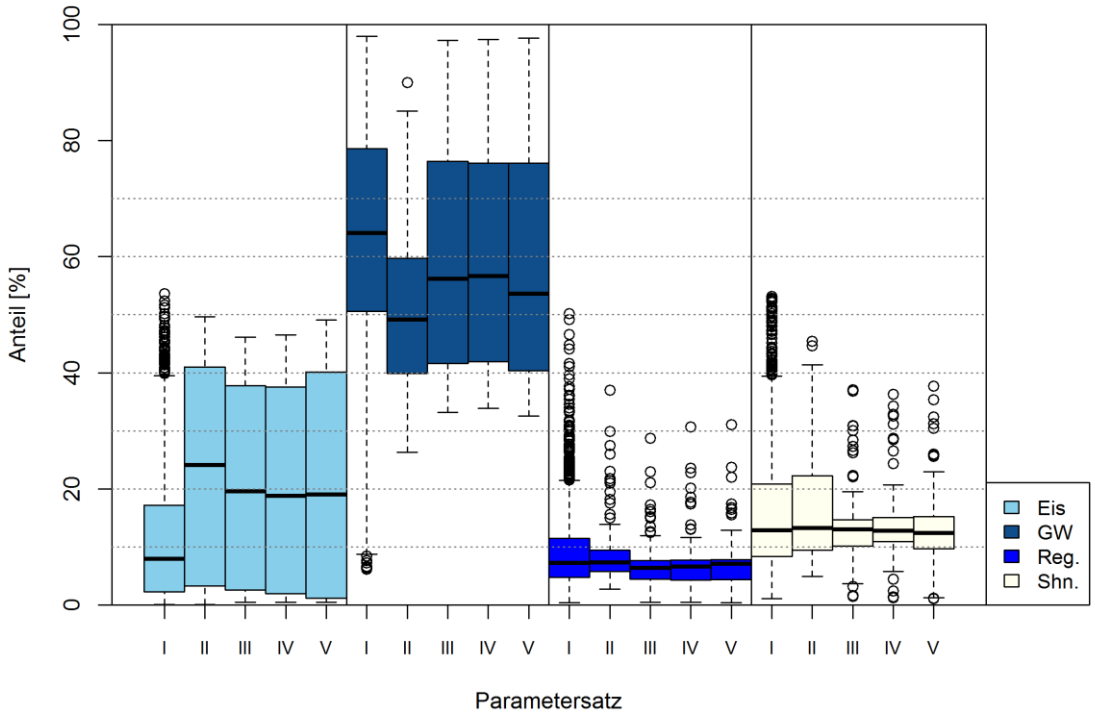


Abbildung 60: Vergleich der ermittelten Abflussanteile, je nach Gebrauchtem Parameterset

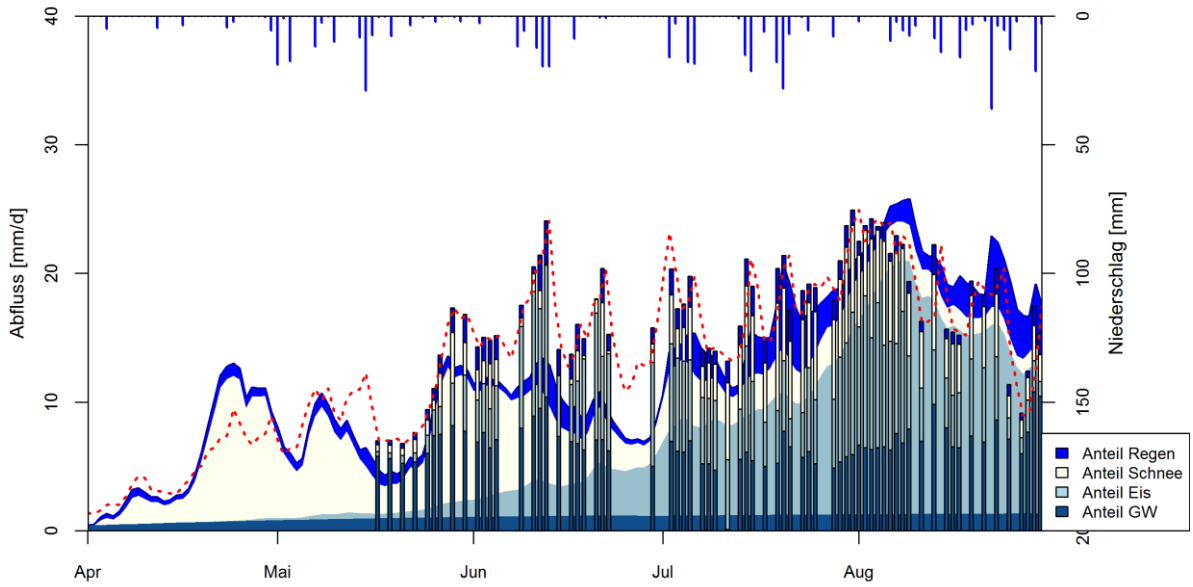


Abbildung 61: Vergleich von empirisch ermittelten und modellierten Abflussanteilen am Messstandort GG im EZG der Schwarze Lütschine

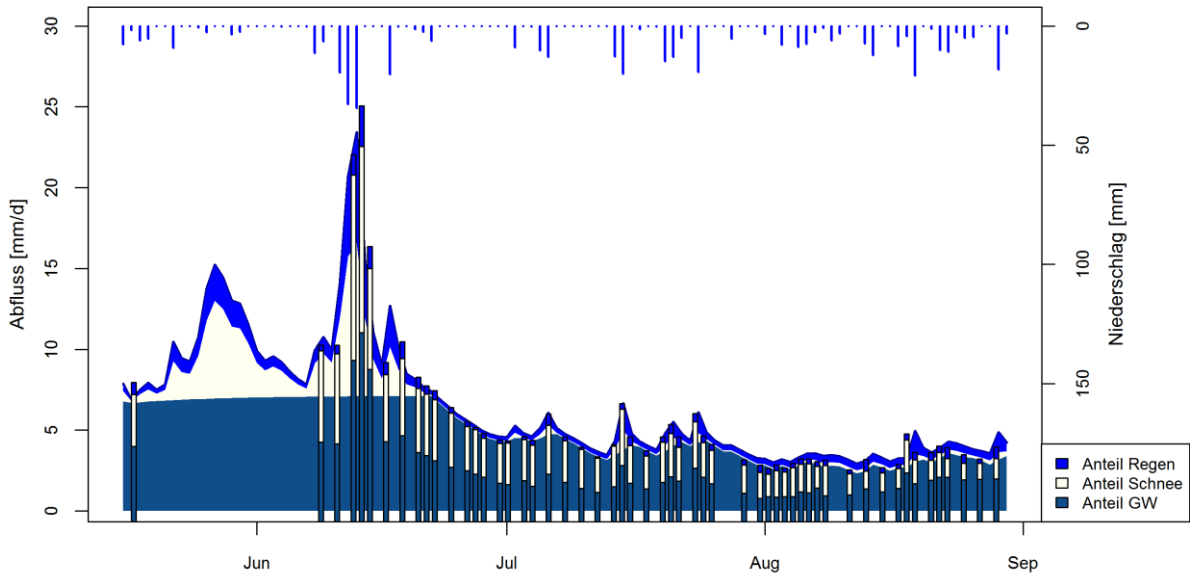


Abbildung 62: Vergleich von empirisch ermittelten und modellierten Abflussanteilen am Messstandort sG im EZG der Weissen Lütschine

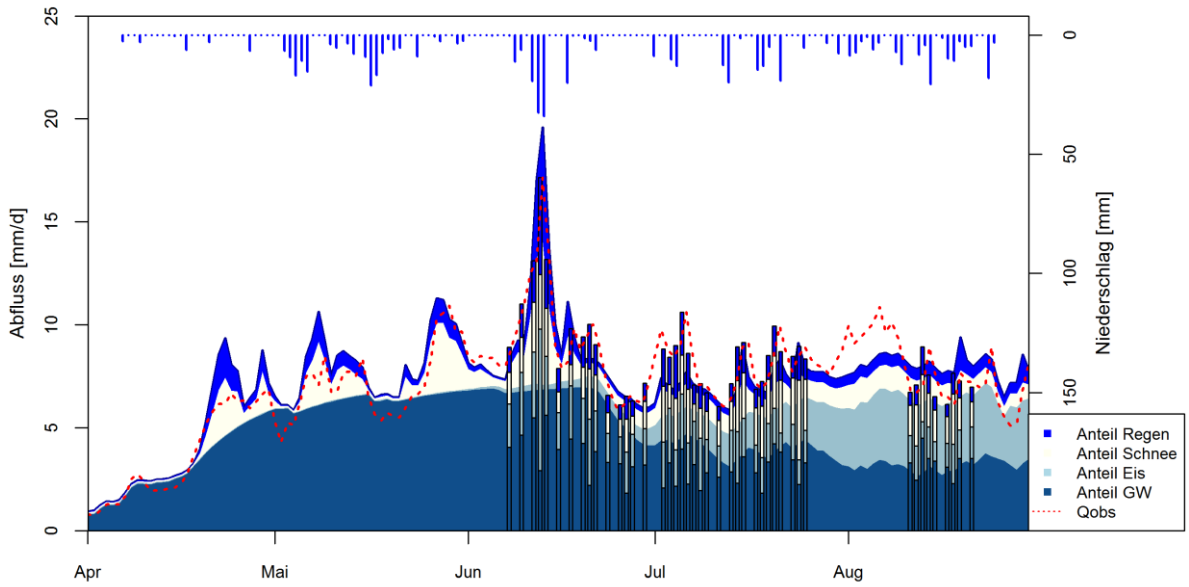


Abbildung 63: Vergleich von empirisch ermittelten und modellierten Abflussanteilen am Messstandort SG im EZG der Weissen Lütschine

10 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum Unterschrift