

Hydrologisches Modell für das Einzugsgebiet der Simme

Berechnung von Abfluss mit Hilfe der Programmiersprache R



Literargymnasium, Maturitätsarbeit 2025

Aline Braun, 6b

betreut durch Tobias Riebler (LGR)

und Michael Fehlmann (Swiss Re)

Ich bestätige, dass ich diese Arbeit selbst geleistet habe, dass sie kein Plagiat und auch keine Fälschung ist, dass alle übernommenen Teile korrekt erwähnt, zitiert und bibliografiert sind und ich nur die erwähnten Hilfsmittel verwendet habe. Ich bin von den Konsequenzen, die eine Nichteinhaltung dieser Punkte nach sich zieht, in Kenntnis gesetzt worden.

Ich nehme zudem zur Kenntnis, dass meine Arbeit zur Überprüfung der korrekten und vollständigen Angabe der Quellen mit Hilfe einer Software (Plagiatserkennungstool) geprüft wird. Zu meinem eigenen Schutz wird die Software auch dazu verwendet, später eingereichte Arbeiten mit meiner Arbeit elektronisch zu vergleichen und damit Abschriften und eine Verletzung meines Urheberrechts zu verhindern. Falls Verdacht besteht, dass mein Urheberrecht verletzt wurde, erkläre ich mich damit einverstanden, dass die Schulleitung meine Arbeit zu Prüfzwecken herausgibt.

Ort, Datum: Zürich, 10.12.24 Unterschrift: Braun

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theorie	3
2.1. Wasserbilanzgleichung.....	3
2.2. Bodenwasser und Grundwasser.....	3
2.3. Einzugsgebiet	4
2.4. Hydrologisches Modell und Kalibrierung.....	4
2.5. Abflusshöhe.....	5
2.6. Schneewasseräquivalent (SWE).....	6
3. Material und Methoden	7
3.1. Einzugsgebiet der Simme	7
3.1.1. Einteilung des Einzugsgebietes in Höhenzonen	8
3.2. Das HBV-Modell	9
3.2.1 Vorgehen Programmierung Schneeroutine	9
3.2.2. Bodenroutine.....	11
3.3. Messdaten	13
3.3.1. Unvollständigkeit der Niederschlagsmessdaten	13
3.3.2. Messfehler.....	14
3.4. Kalibrierung.....	15
3.4.1. Kalibrierungszeitraum	15
3.4.2. Kalibrierung der Parameter der Schneeroutine	15
3.4.3. Kalibrierung der Parameter der Bodenroutine.....	17
4. Resultat.....	21
Exkurs: Erklärung der Tabelle auf S. 23, die immer wieder verwendet wird	21
4.1. Frühlingshochwasser Mai 1999	22
4.2. Sommerhochwasser August 2005.....	24
4.3. Winterhochwasser Dezember 2023.....	26
5. Diskussion.....	29
5.1. Repräsentativität der Niederschlagsmessdaten.....	29
5.1.1. Schneekorrekturfaktor	29
5.1.2. Anpassung des Niederschlags an die Höhenzonen?	32
5.1.3. Auswirkungen des Schneekorrekturfaktors auf das Resultat	33
5.1.4. Weitere Probleme der Repräsentativität der Niederschlagsdaten	34
5.2. Kalibrierung.....	35
5.2.1. u _z l (upper zone limit).....	35
5.2.2. Speicherkoeffizient k ₀	37
5.2.3. Speicherkoeffizient k ₁	38
5.2.4. Geeigneter Kalibrierungszeitraum.....	39
5.3. Flüssigwassergehalt	39
6. Schlusswort	41
7. Danksagung	41
8. Quellen- und Literaturverzeichnis.....	43
9. Anhang.....	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abflussmessstation Simme, Oberwil (Bundesamt für Umwelt BAFU).	2
Abbildung 2: Illustration Wasserbilanz (eigene Darstellung 2024).	3
Abbildung 3: Illustration Boden- und Grundwasser (eigene Darstellung 2024).	3
Abbildung 4: Illustration Einzugsgebiet (eigene Darstellung 2024).	4
Abbildung 5: Illustration Abflusshöhe (eigene Darstellung 2024).	5
Abbildung 6: Illustration Schneewasseräquivalent (eigene Darstellung 2024).	6
Abbildung 7: Einzugsgebiet der Simme im Kontext (Schwanbeck et al. 2018).	7
Abbildung 8: Einzugsgebiet der Simme (Schwanbeck et al. 2018, Beschriftung selbst eingefügt).	7
Abbildung 9: Höhenverteilung im Einzugsgebiet der Simme (Schwanbeck et al. 2018).	8
Abbildung 10: Illustration Höhenzoneneinteilung (eigene Darstellung 2024); %- und km ² Angaben nur beispielhaft.	8
Abbildung 11: Illustration HBV-Modell (eigene Darstellung 2024, basierend auf: Shrestha/Solomatine, 2008, S. 1568).	9
Abbildung 12: Illustration Anpassung der Temperatur an die verschiedenen Höhenzonen (eigene Darstellung 2024).	10
Abbildung 13: Illustration verschiedene Arten von Niederschlag (eigene Darstellung 2024).	10
Abbildung 14: Illustration Einzellinearspeicher (eigene Darstellung 2024).	12
Abbildung 15: Einzugsgebiet Simme, Stationen beschriftet (Schwanbeck et al. 2018, Beschriftungen selbst eingefügt).	13
Abbildung 16: Plot SWE tt (eigener Plot 2024, erstellt mit Code von Michael Fehlmann).	16
Abbildung 17: Tabelle Parameterbereiche (Werte von Michael Fehlmann zur Verfügung gestellt, 2024).	17
Abbildung 18: Plot Abfluss Simme, k1=lower (eigener Plot 2024).	17
Abbildung 19: Plot Abfluss Simme, k1=upper (eigener Plot 2024).	18
Abbildung 20: Plot Abfluss Simme, k1 optimiert (eigener Plot 2024).	18
Abbildung 21: Plot Abfluss Simme, vor Kalibrierung (eigener Plot 2024).	19
Abbildung 22: Plot Abfluss Simme, nach Kalibrierung (eigener Plot 2024).	19
Abbildung 23: Tabelle Werte der Parameter (eigene Tabelle 2024).	20
Abbildung 24: Plot Abfluss Simme 98/99 (eigener Plot 2024).	22
Abbildung 25: Plot SWE Färmel 1998/1999 (eigener Plot 2024).	22
Abbildung 26: Tabelle Hochwasser Mai 1999 (eigene Tabelle 2024).	23
Abbildung 27: Plot Abfluss Simme 2004/2005 (eigener Plot 2024).	24
Abbildung 28: Tabelle Hochwasser August 2005 (eigene Tabelle 2024).	25
Abbildung 29: Plot Abfluss Simme 2023/2024 (eigener Plot 2024).	26
Abbildung 30: Plot SWE Färmel 2023/2024 (eigener Plot 2024).	26
Abbildung 31: Tabelle Hochwasser Dezember 2023 (eigene Tabelle 2024).	27
Abbildung 32: Tabelle Hochwasser Dezember 2023, ohne Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors (eigene Tabelle 2024).	28
Abbildung 33: Plot SWE Kalibrierung tt (eigener Plot 2024, erstellt mit Code von Michael Fehlmann).	29
Abbildung 34: Tabelle Wasserbilanz, Angaben in mm (eigene Tabelle 2024).	30
Abbildung 35: Plot SWE Schneekorrekturfaktor (eigener Plot 2024, erstellt mit Code von Michael Fehlmann).	31
Abbildung 36: Tabelle Wasserbilanz 2000-2010 mit Berücksichtigung Schneekorrekturfaktor von 1.6, Angaben in mm (eigene Tabelle 2024).	31
Abbildung 37: Plot Abfluss Simme, Effekt corrsnow (eigener Plot 2024).	33

Abbildung 38: Plot SWE 1970 m ü.M., Effekt corrsnow (eigener Plot 2024).....	33
Abbildung 39: Illustration Parameter uzl (eigene Darstellung 2024, basierend auf: Seibert 2014, S.14).	35
Abbildung 40: Plot Abfluss Simme, Effekt uzl (eigener Plot, 2024).	36
Abbildung 41: Plot Abfluss Simme, Effekt k0 (eigener Plot 2024).	37
Abbildung 42: Plot Abfluss Simme, (eigener Plot 2024).	38
Abbildung 43: Illustration Flüssigwassergehalt (eigene Darstellung 2024).	39
Abbildung 44: Mittlerer Jahresniederschlag nach Höhenzonen in der Schweiz (Spreafico/Weingartner 2005, S. 15).	55

1. Einleitung

Einleitung ins Thema

Im Schuljahr 2023/2024 hatte ich die Möglichkeit, im Rahmen eines Schüler:innenstudiums zwei Module der physischen Geographie an der Universität Zürich zu besuchen. Dadurch hatte ich unter anderem einen tieferen Einblick in die Hydrologie¹. Besonders dieses Gebiet der physischen Geographie hat mein Interesse geweckt. Daher habe ich mich dazu entschieden, meine Maturitätsarbeit in diesem Bereich zu schreiben. Speziell interessierte ich mich für hydrologische Berechnungen.

Da ich meine Sommerferien schon immer am Untersee, einem Teil des Bodensees verbringe, war meine ursprüngliche Idee, mich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf diesen zu beschäftigen. Die Idee war es, mit einem hydrologischen Modell, einem sogenannten Niederschlag-Abfluss-Modell, die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserstand zu betrachten. Ein Niederschlag-Abfluss-Modell ist die mathematische Beschreibung der Vorgänge, wie in einem Einzugsgebiet aus Niederschlag Abfluss resultiert. Das heisst, man versucht aus Niederschlagsdaten Abflussmengen, also die Wassermengen in einem Fluss, zu berechnen. Es wurde aber schnell klar, dass das Einzugsgebiet des Untersees, welches 11'000 km² umfasst, für eine solche Modellierung im Rahmen einer Maturitätsarbeit viel zu gross ist. Die Idee, mit einem hydrologischen Modell zu arbeiten, hat mich aber trotzdem gepackt und ich wollte daran festhalten.

Ich musste also ein neues, besser geeignetes Einzugsgebiet finden. Dazu habe ich ein Einzugsgebiet gesucht, welches ungefähr 300 km² gross ist, eine passende Höhenverteilung besitzt und in welchem genügend Messdaten vorhanden sind (Abfluss, Niederschlag und Temperatur). Das Einzugsgebiet der Simme im Berner Oberland schien diese Kriterien gut zu erfüllen. Schnell wurde dann auch klar, dass die Arbeit mit dem hydrologischen Modell, das Programmieren und die Betrachtung der Modellierung von Spitzenabflüssen mehr als genug Stoff bieten, um sich zu vertiefen und eine ganze Maturitätsarbeit darüber zu schreiben. So habe ich auch darauf verzichtet, basierend auf den Klimaszenarien CH-2018 die Auswirkungen des Klimawandels auf die Simme zu betrachten. In dieser Maturitätsarbeit geht es also um ein hydrologisches Modell, genauer gesagt um das HBV-Modell (**H**ydrologiska **B**yrån **V**attenbalansavdelningen, Hydrologisches Amt, Abteilung Wasserhaushalt)² und insbesondere habe ich mich mit der Modellierung von Schnee vertieft auseinandergesetzt.

Zentrale Problemstellung und Forschungsfrage

Einen Teil des Codes des verwendeten hydrologischen Modells habe ich selbst geschrieben. In dieser Arbeit geht es einerseits darum, wie ich für die Modellierung der Schneedecke sowie der Schneeschmelze vorgegangen bin. Andererseits geht es um das Resultat des hydrologischen Modells, das heisst um die berechneten Abflussmengen. Mit dem Fokus auf Spitzenabflüssen wird betrachtet, wie genau die modellierten Abflussmengen mit den im Fluss gemessenen Messdaten übereinstimmen und welche Grössen die Qualität der Modellierung von Spitzenabflüssen beeinflussen.

¹ Definition Hydrologie im Fremdwörterduden: Wissenschaft vom Wasser, seinen Arten, Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen

² Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI) 2022; Wikipedia (17.05.2024), HBV hydrology model.

Eingrenzung des Themas

Diese Arbeit fokussiert sich auf das HBV-Modell und seine Schneeroutine. Zusätzlich sind speziell Spitzenabflüsse im Fokus. Einige mögliche Bestandteile des HBV-Modells, so zum Beispiel die Modellierung des Flüssigwassergehalts sowie die Anpassung des Niederschlags an die verschiedenen Höhenzonen wurden aufgrund ihrer Komplexität weggelassen.

Daten und Materialien

Der Code für die Bodenroutine sowie die Struktur der Schneeroutine dieses Modells wurden von Michael Fehlmann, dem Korreferenten dieser Arbeit, zur Verfügung gestellt. Es wurden ausserdem Niederschlags- und Temperaturdaten von MeteoSchweiz sowie Abflussmessdaten vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) verwendet.

Angewandte Methoden

Ich habe im Rahmen dieser Maturitätsarbeit die Grundlagen der Programmiersprache R gelernt. Meine Kenntnisse habe ich angewendet und den Code der Schneeroutine für das Modell vervollständigt. Ausserdem musste das Modell für das Einzugsgebiet der Simme kalibriert werden. Auch die Literaturrecherche war ein wichtiger Teil dieser Arbeit.

Aufbau der Arbeit

Anfangs wird die nötige Theorie, um das hydrologische Modell zu verstehen, erklärt. Anschliessend geht es um die angewandten Methoden und mein konkretes Vorgehen. Am Schluss geht es um die vom Modell berechneten Resultate und die Frage, welche Grössen die Qualität der Modellierung von Spitzenabflüssen beeinflussen.



Abbildung 1: Abflussmessstation Simme, Oberwil (Bundesamt für Umwelt BAFU).

2. Theorie

2.1. Wasserbilanzgleichung

Die Wasserbilanzgleichung ist eine grundlegende Gleichung in der Hydrologie. Sie beschreibt die wichtigsten Komponenten des Wasserkreislaufs für ein bestimmtes Untersuchungsgebiet (z.B. für ein Einzugsgebiet). Die klassische Wasserbilanzgleichung lautet³:

$$\text{Niederschlag} = \text{Abfluss} + \text{Verdunstung} + \text{Speicheränderung}$$

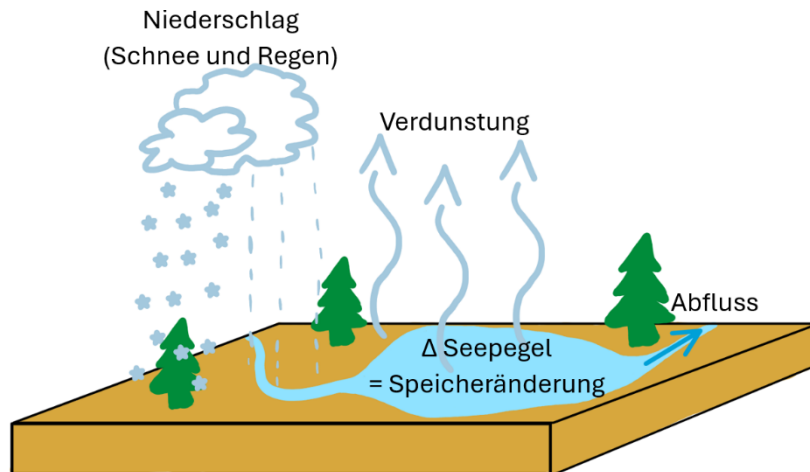


Abbildung 2: Illustration Wasserbilanz (eigene Darstellung 2024).

Diese Gleichung bildet die Grundlage für das hydrologische Modell, welches in dieser Arbeit verwendet wurde.

2.2. Bodenwasser und Grundwasser

In den Bodenporen (Hohlräume im Boden) hat es Wasser. Das Wasser, das in den Poren oberhalb des Grundwasserspiegels ist, wird als Bodenwasser bezeichnet. Diese Poren enthalten sowohl Wasser als auch Luft. Das Wasser, welches in den Poren unterhalb des Grundwasserspiegels ist, wird als Grundwasser bezeichnet. Diese Poren sind ausschliesslich mit Wasser gefüllt.

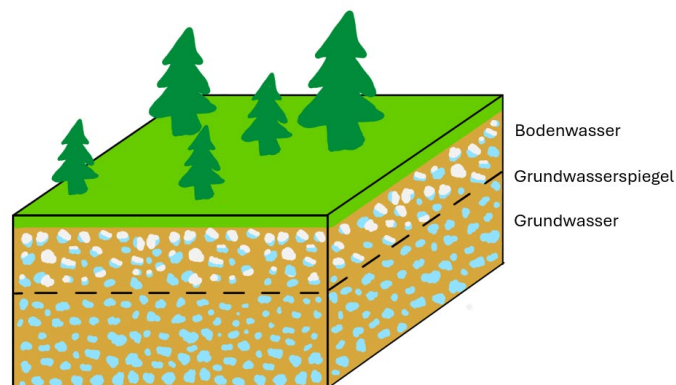


Abbildung 3: Illustration Boden- und Grundwasser (eigene Darstellung 2024).

³ Vgl. Bundesamt für Umwelt BAFU 2024, Wasserhaushalt der Schweiz.

Häufig wird die ungesättigte Zone (der Teil des Bodens, der über dem Grundwasserspiegel liegt, dort, wo sich das Bodenwasser befindet) mit einem Schwamm verglichen. Wasser wird aufgenommen und wenn ein gewisser Wert (die Feldkapazität) überschritten wird, wird Wasser in die darunterliegende gesättigte Zone (dort, wo sich das Grundwasser befindet) abgegeben.⁴

2.3. Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet ist das Gebiet, in welchem der Niederschlag fällt, der den Abfluss an der Abflussmessstation im Fluss bildet. Der ganze Niederschlag, der im Einzugsgebiet fällt, fließt an der Messstation vorbei, soweit er nicht verdunstet. Die Grenzen des Einzugsgebietes werden normalerweise durch die Topografie bestimmt. Die höchsten Stellen in der Landschaft, zum Beispiel Bergrücken, sind die Grenzen.⁵

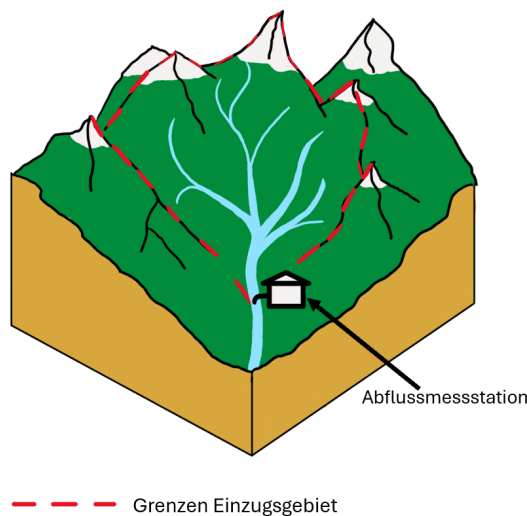


Abbildung 4: Illustration Einzugsgebiet (eigene Darstellung 2024).

2.4. Hydrologisches Modell und Kalibrierung

Ein hydrologisches Modell ist die vereinfachte mathematische Beschreibung der Prozesse, die in einem hydrologischen System, zum Beispiel in einem Einzugsgebiet, ablaufen.⁶

In dieser Arbeit wurde mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell gearbeitet. Genauer: Es wurde eine Version des HBV-Modells (**H**ydrologiska **B**yrån **V**attenbalansavdelningen, Hydrologisches Amt, Abteilung Wasserhaushalt)⁷ verwendet. Es handelt sich dabei um ein Computermode, also um Code, der in der Programmiersprache R geschrieben wurde. Die Programmiersprache R ist eine Programmiersprache, die häufig für statistische Fragestellungen Verwendung findet. Die Grundlagen von R habe ich im Rahmen dieser Maturitätsarbeit gelernt.

Das Ziel eines Niederschlag-Abfluss-Modells ist es, den Vorgang, wie in einem Einzugsgebiet aus Niederschlag Abfluss resultiert, möglichst genau mit mathematischen Gleichungen zu beschreiben.⁸ Aus gemessenen Niederschlagsdaten soll der Abfluss an einem bestimmten Punkt eines

⁴ Vgl. Rodhe 2020.

⁵ Vgl. Hendriks, 2010, S. 6.

⁶ Vgl. Spektrum Akademischer Verlag: hydrologisches Modell.

⁷ Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI) 2022; Wikipedia (17.05.2024), HBV hydrology model.

⁸ Vgl. Eckhardt 2014, S. 3.

Flusses berechnet werden. Als Input für ein solches Modell werden Niederschlagsdaten verwendet (z.B. tägliche Niederschlagsmessungen an einem bestimmten Ort) sowie eventuell weitere Daten (z.B. Temperatur). Der Output des Modells ist eine berechnete (nicht eine gemessene!) Abflussdatenreihe für das entsprechende Einzugsgebiet (z.B. vom Modell berechnete Abflussmengen in Kubikmeter Wasser pro Sekunde in einem bestimmten Fluss an einem bestimmten Ort). Ein solches Modell besteht meist aus einer Reihe von Speichern (z.B. Schneedecke, Grundwasserspeicher, See), welche jeweils unterschiedliche Zu- und Abflüsse haben.⁹ Das Ziel ist die möglichst genaue mathematische Nachbildung, wie diese Prozesse in der Natur ablaufen. Die vom Modell berechneten Abflussdaten sollen möglichst genau mit den an der Abflussmessstation im Fluss tatsächlich gemessenen Daten übereinstimmen.

Damit dies auch tatsächlich der Fall ist, muss das Modell für das Einzugsgebiet kalibriert werden. Das heisst, man passt die Parameter des Modells so lange an, bis die berechneten Werte möglichst nahe an den gemessenen sind. Bildlich gesprochen dreht man so lange an den Rädern des mathematischen Modells, bis es möglichst gut an das konkrete Einzugsgebiet angepasst ist und die Realität möglichst genau beschreibt.

Hydrologische Modelle können für Prognosen gebraucht werden: Hat man ein kalibriertes Modell für ein bestimmtes Einzugsgebiet und ändert man dann die Niederschlagsmenge (den Input), dann lassen sich Aussagen darüber gewinnen, wie sich der Abfluss verändert und wann zum Beispiel ein Hochwasser droht. Auch werden hydrologische Modelle eingesetzt, um Prognosen für die Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer zu erstellen.

Temperaturdaten spielen insofern eine Rolle, weil sie zum Beispiel einen wesentlichen Einfluss auf den (Zwischen-)Speicher «Schneedecke» haben. Niederschlag, der in Form von Regen fällt, führt wesentlich schneller zu Abfluss als Niederschlag in Form von Schnee.

2.5. Abflusshöhe

Die Abflusshöhe ist eine wichtige Grösse für hydrologische Berechnungen. Sie wird ermittelt, indem man den Abfluss, welcher in Kubikmetern pro Sekunde gemessen wird, durch die Fläche des Einzugsgebietes teilt.¹⁰ Die Abflusshöhe wird in Millimetern pro Zeiteinheit (z.B. pro Tag) angegeben. Wenn man sich vorstellt, dass das Wasservolumen, welches in einem Tag abfließt, gleichmässig über das ganze Einzugsgebiet verteilt wird, erhält man die Abflusshöhe.

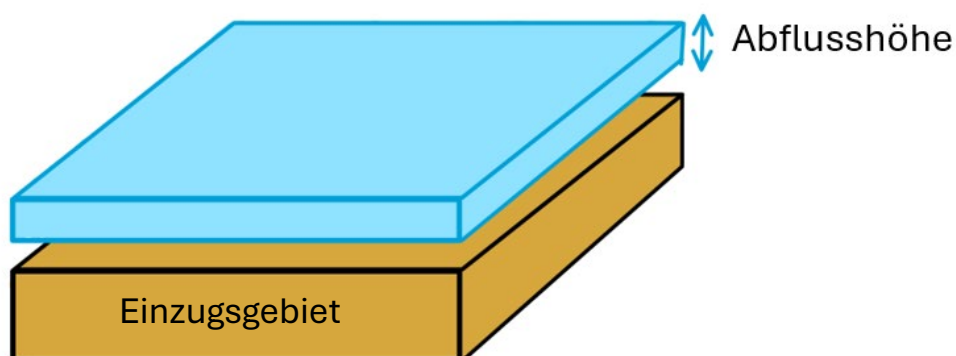


Abbildung 5: Illustration Abflusshöhe (eigene Darstellung 2024).

⁹ Vgl. Eckhardt 2014, S. 8

¹⁰ Vgl. Hendriks 2010, S. 249

In der Hydrologie wird allgemein häufig mit Längenangaben (z.B. in mm) gerechnet. Anstatt anzugeben, wie gross das gesamte Volumen über eine gewisse Fläche ist (hier der Abfluss über das gesamte Einzugsgebiet in m^3), wird eine Höhe angegeben (hier die Abflusshöhe). Dies ist praktischer, da es sich meistens um kleinere Zahlen handelt, die man sich besser vorstellen kann und die man beispielsweise mit Niederschlagsdaten, welche ebenfalls in mm gemessen werden, vergleichen kann. Ausserdem sind diese Werte geeigneter, um sie z.B. mit Werten aus anderen Einzugsgebieten zu vergleichen, da sie unabhängig von der betrachteten Fläche (der Grösse des Einzugsgebietes) sind.

2.6. Schneewasseräquivalent (SWE)

Pulvriger Neuschnee und alter Firn haben nicht dieselbe Dichte, ihre Höhen sind daher nicht direkt vergleichbar. Für Abflussberechnungen ist es entscheidend, wie viel Wasser in der Schneedecke gespeichert ist, wie hoch die Wassersäule ist, die man erhalten würde, wenn man die Schneedecke schmelzen würde¹¹ (wenn man z.B. 10 cm Firn schmilzt, erhält man viel mehr Wasser, als wenn man 10 cm Neuschnee schmilzt). Dieses sogenannte Schneewasseräquivalent (SWE) wird verwendet, um Schneedecken zu beschreiben. Es wird angegeben, wie hoch die Schneedecke in mm wäre, wenn sie in flüssiger Form vorliegen würde. Die Fläche ist hierbei irrelevant; es ist egal ob man eine Probe von 10 cm mal 2 m^2 oder nur 10 cm mal 0.3 m^2 betrachtet. Vorausgesetzt, dass die Dichte bei beiden Proben gleich ist, sollte die Höhe der Wassersäule, die man erhält, wenn man den Schnee schmilzt, die gleiche sein).

Da auch die verwendeten Niederschlagsdaten den Schnee in *flüssiger* Form mitberücksichtigen, müssen im Modell keine Umrechnungen von Schneehöhen zu Schneewasseräquivalent gemacht werden. Lediglich für die Kalibrierung des Modells wird zusätzlich mit Schneehöhendaten gearbeitet, welche in Schneewasseräquivalent umgerechnet werden müssen.

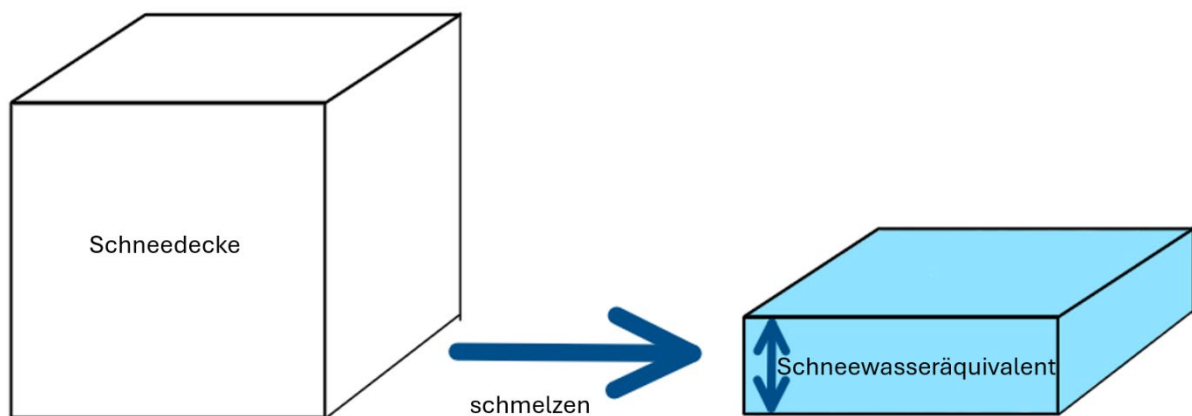


Abbildung 6: Illustration Schneewasseräquivalent (eigene Darstellung 2024).

¹¹ Vgl. Spreafico/Weingartner 2005, S. 29.

3. Material und Methoden

3.1. Einzugsgebiet der Simme

Das für diese Arbeit gewählte Einzugsgebiet befindet sich im Berner Oberland. Es handelt sich um das Einzugsgebiet der Simme und die Abflussmessstation liegt in Oberwil. Es wurde gewählt, weil es wegen seiner Grösse (344 km²), der Höhenverteilung (790 - 3200 m ü.M.) und der Anzahl Messstationen als ein für die Untersuchung geeignetes Gebiet beurteilt wurde.

Dass die Messreihen der Stationen zum Teil unvollständig oder zu kurz sind, wurde erst im Laufe der Arbeit festgestellt.

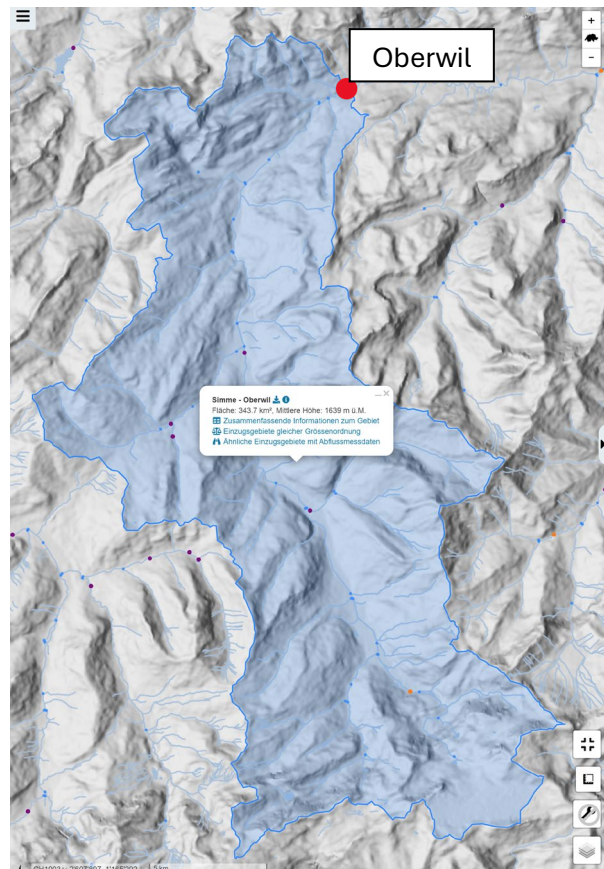


Abbildung 8: Einzugsgebiet der Simme (Schwanbeck et al. 2018, Beschriftung selbst eingefügt).

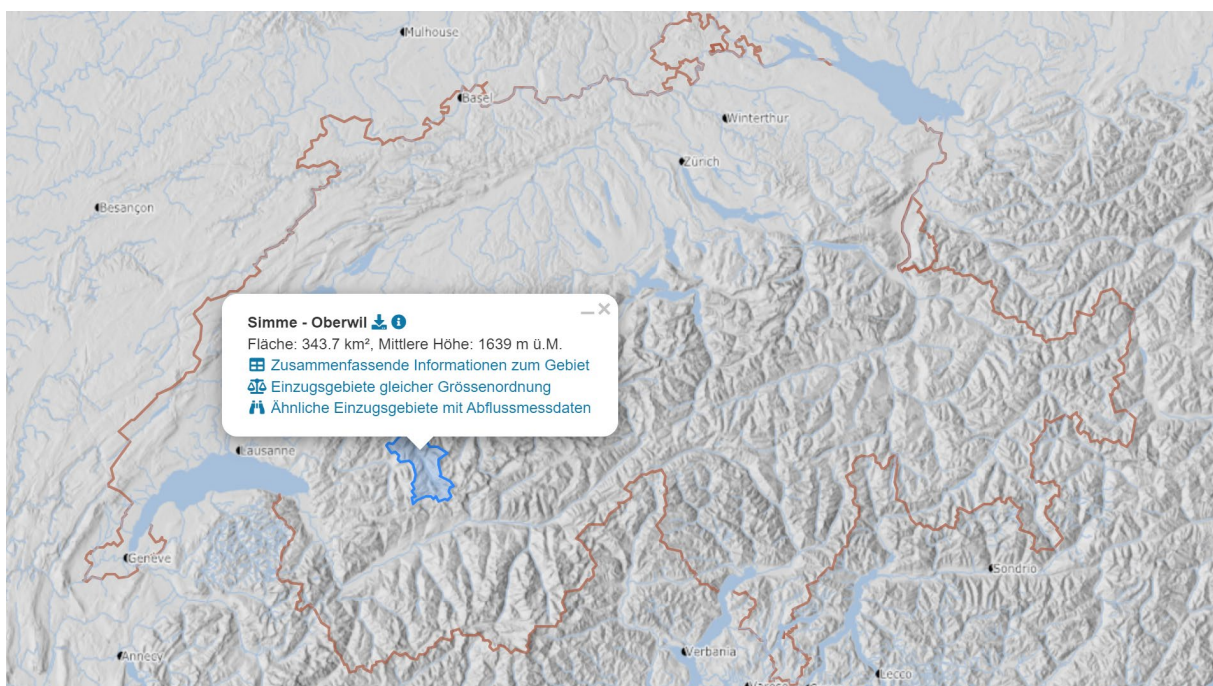


Abbildung 7: Einzugsgebiet der Simme im Kontext (Schwanbeck et al. 2018).

3.1.1. Einteilung des Einzugsgebietes in Höhenzonen

Das ausgewählte Einzugsgebiet der Simme liegt zwischen 778 m ü.M. und 3208 m ü.M. Es gibt daher grosse Höhenunterschiede. Diese haben einen Einfluss auf die Temperatur. Um trotz dieser unterschiedlichen Temperaturen aussagekräftige Resultate der Schneeroutine (= Teil des Modells, der alles berechnet, was mit Schnee zu tun hat, z.B. Mächtigkeit der Schneedecke, Schneeschmelze etc.) zu erhalten, wird das Einzugsgebiet in kleinere Teilgebiete, sogenannte Höhenzonen, unterteilt.

Die Berechnungen der Schneeroutine werden für jede Höhenzone einzeln ausgeführt, da die Temperaturunterschiede einen entscheidenden Einfluss darauf haben, ob der Niederschlag als Schnee oder als Regen fällt. Auch für die Schneeschmelze ist die Temperatur entscheidend. Weiter oben bleibt der Schnee länger liegen als unten im Einzugsgebiet.

Um diese Höhenzonen zu bestimmen, wurde aus den «Zusammenfassenden Informationen zum Gebiet CH-0098»¹² im Hydrologischen Atlas der Schweiz bestimmt, welcher Anteil des Gebietes zwischen zwei bestimmten Höhen liegt. Für jede Höhenzone wurde das Mittel zwischen oberer und unterer Grenze als repräsentative mittlere Höhe verwendet.

Dazu wurde aus nebenstehender Grafik (Abbildung 9) bestimmt, wie gross beispielsweise die Fläche ist, die zwischen 1000 und 1100 m ü.M. liegt. Dieser Zone wurde die mittlere Höhe 1050 m ü.M. zugewiesen (auch wenn dies nicht unbedingt genau stimmt).

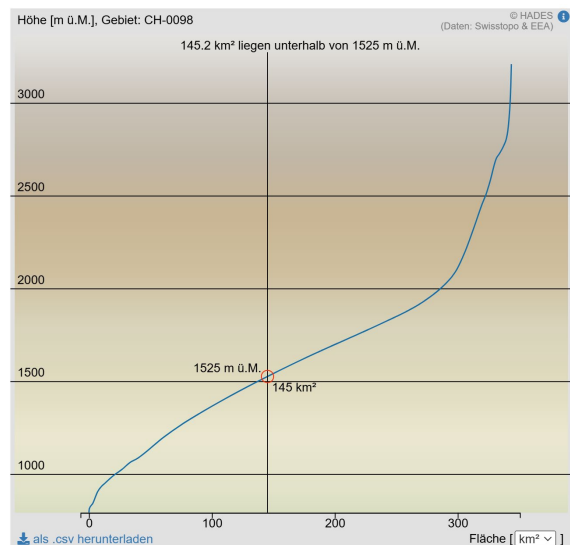


Abbildung 9: Höhenverteilung im Einzugsgebiet der Simme (Schwanbeck et al. 2018).

So wurde das Einzugsgebiet in 24 Höhenzonen mit jeweils einer zugehörigen mittleren Höhe unterteilt. Zu jeder Höhenzone gibt es Angaben zur absoluten Fläche und zum Flächenanteil am gesamten Einzugsgebiet.

Vereinfachte graphische Darstellung (Abbildung 10): Das Gebiet wird in Höhenzonen unterteilt. Für jede Höhenzone wird deren Grösse in km², der relative Flächenanteil am Gesamtgebiet und eine mittlere Höhe als für die ganze Zone repräsentativer Wert bestimmt:

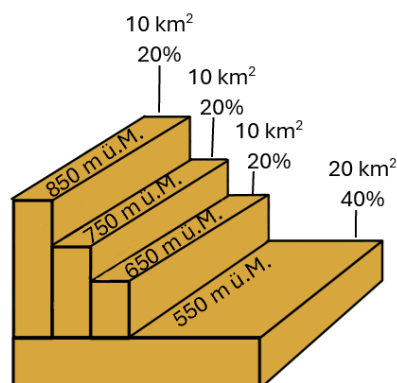


Abbildung 10: Illustration Höhenzoneneinteilung (eigene Darstellung 2024); %- und km² Angaben nur beispielhaft.

¹² Schwanbeck et al. 2018.

3.2. Das HBV-Modell

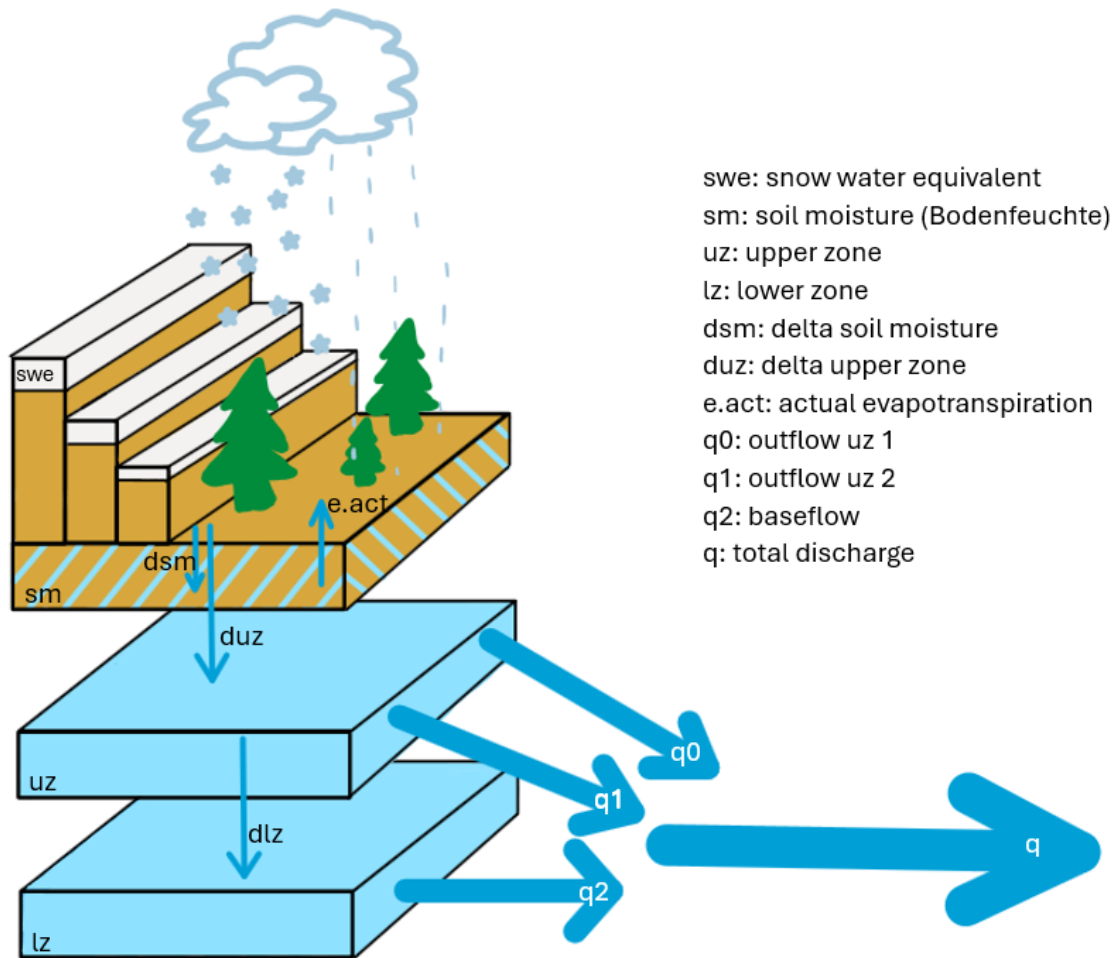


Abbildung 11: Illustration HBV-Modell (eigene Darstellung 2024, basierend auf: Shrestha/Solomatine, 2008, S. 1568)

Die Version des HBV-Modells, die für diese Arbeit verwendet wurde, wurde in der Programmiersprache R geschrieben und besteht aus zwei Teilen: Die Bodenroutine und das Gerüst der Schneeroutine wurden vom Korreferenten Michael Fehlmann zur Verfügung gestellt. Den Code für die Schneeroutine habe ich selbst in der Programmiersprache R vervollständigt.

Als Input werden für das HBV-Modell Niederschlags- und Temperaturdaten, Angaben zur potenziellen Verdunstung und Angaben zur Höhenverteilung des Einzugsgebietes (siehe Kapitel «3.1.1. Einteilung des Einzugsgebietes in Höhenzonen», S.8) gebraucht.

Für die Niederschlags- und Temperaturdaten werden tägliche Messdaten (siehe Kapitel «3.3. Messdaten», S.13) beigezogen und für die potenzielle Verdunstung (e.pot) wird eine Funktion verwendet, die den typischen Jahresverlauf der potenziellen Verdunstung darstellt. Auch diese Funktion stammt von Michael Fehlmann.

3.2.1 Vorgehen Programmierung Schneeroutine

Den Code für die Schneeroutine, also den Teil des hydrologischen Modells, der alle Berechnungen beinhaltet, die mit der Schneedecke und der Schneeschmelze zu tun haben, habe ich selbst in

der Programmiersprache R geschrieben. Um zu verstehen, wie das Modell funktioniert und was der Code beinhalten muss, habe ich die Folien einer Vorlesung über das HBV-Modell verwendet.¹³

Zuerst musste die Temperatur an die verschiedenen Höhenzonen angepasst werden. Man hat einen Messwert von einer Station auf einer gewissen Höhe. Da die Temperatur aber abhängig von der Höhe und nicht überall im Einzugsgebiet gleich ist, muss sie für die verschiedenen Höhenzonen angepasst werden. Die Temperaturabnahme mit der Höhe wird im Modell durch einen Temperaturgradienten von $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ berücksichtigt¹⁴ **(A) (diese blauen Buchstaben, die in diesem Kapitel vorkommen, sind Verweise auf den Code, der im Anhang (ab S. 45) zu finden ist).** Pro 100 m, die man sich also im Einzugsgebiet nach oben bewegt, wird es ca. 0.6°C kälter.

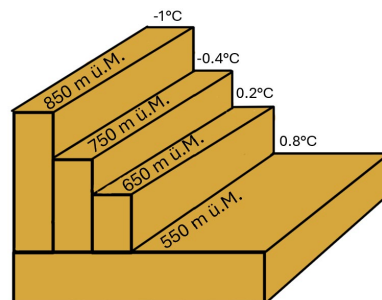


Abbildung 12: Illustration Anpassung der Temperatur an die verschiedenen Höhenzonen (eigene Darstellung 2024).

Genau genommen müssten auch die Niederschlagsmengen für jede Höhe angepasst werden. Darauf wurde in dieser Arbeit jedoch verzichtet. Es wurde vereinfachend angenommen, dass die Niederschlagsmengen überall im Einzugsgebiet gleich sind wie die an der Messstation gemessenen Werte **(B)**.

Anschliessend ging es darum, die Schneedecke selbst zu modellieren. Dazu muss man sich überlegen, was passiert, wenn Niederschlag fällt. Überall im Einzugsgebiet regnet es eine gewisse Niederschlagshöhe. Was nicht überall gleich ist, sind die Temperaturen. Bei hohen Temperaturen fällt Regen, dieser kann in den Boden infiltrieren und in relativ kurzer Zeit Abfluss bilden. Wenn es kälter ist, bleibt der Niederschlag in Form von Schnee an der Oberfläche liegen und trägt erst später, möglicherweise sogar erst im Frühling, zum Abfluss bei. Der Niederschlag wird also «gespeichert».



Abbildung 13: Illustration verschiedene Arten von Niederschlag (eigene Darstellung 2024).

¹³ Seibert 2014.

¹⁴ Vgl. Seibert 2014, S.8.

Um dies im Modell abzubilden, wurde mit einer If-Bedingung festgelegt, dass bei einer Temperatur unter einem gewissen Schwellenwert (**temperature threshold, tt**; violett = Variablen im Code) der Niederschlag zu der Schneedecke (**snow water equivalent, swe**) vom vorherigen Tag dazu-gezählt wird. Wenn die Temperatur darüber liegt, wird der Niederschlag als Infiltration in den Boden (**infiltration, inf**) gesehen und die Schneedecke entspricht der vom Vortag (**C**). Diese kann aber auch 0 sein, z.B. im Sommer.

Danach musste die Schneeschmelze (**mrاد**) modelliert werden. Diese ist ebenfalls abhängig von der Temperatur. Je wärmer es ist, desto mehr Schnee schmilzt. Auch mit einer If-Bedingung wurde festgelegt, dass bei einer mittleren Tagestemperatur über der Schwellentemperatur (**tt**) die Differenz zwischen der mittleren Tagestemperatur und der Schwellentemperatur berechnet wird. Diese wird mit dem Grad-Tag-Faktor (**cfmax**) multipliziert (**D**). Die Annahme ist hierbei, dass pro Grad pro Tag eine gewisse Schneemenge schmilzt. Wenn die gemessene Temperatur also beispielsweise 2° C beträgt, die Schwellentemperatur auf 0° C festgelegt wurde und der Grad-Tag-Faktor 4 ist, dann ist die berechnete Schneeschmelze 8 mm ((2° C – 0 °C) * 4 mm / °C). Die Schneeschmelze wird von der Schneedecke abgezogen. Zusammen mit dem Niederschlag, der als Regen fällt, bildet sie die Infiltration (**inf**) in den Boden (**E**). Diese ist der Input in die Bodenroutine.

Würde die Arbeit noch ausgebaut, könnte man als nächsten Schritt den Flüssigwassergehalt modellieren. Dieser Teil wurde aus Gründen der Komplexität weggelassen.

3.2.2. Bodenroutine

Hier wird beschrieben, wie die Bodenroutine dieses Modells aufgebaut ist (siehe Abbildung 11, S.9).

Bei der Bodenroutine wird zuerst berechnet, welcher Anteil der Infiltration (**inf**) im Speicher Bodenwasser (**soil moisture, sm**) bleibt (**delta soil moisture, dsm**) und wie viel in den oberen Grundwasserspeicher (**upper zone, uz**) geht (**delta upper zone, duz**) (**F**).

Der Speicher Bodenwasser (**sm**) funktioniert wie ein Schwamm. Ist schon viel Wasser in diesem Speicher, geht ein grösserer Teil der Infiltration (**inf**) in den oberen Grundwasserspeicher (**uz**), wo die Wassermenge den Abfluss beeinflusst (da der Abfluss als Produkt aus Speicher und Speicherkoeffizient berechnet wird). Ist nur wenig Wasser im Speicher Bodenwasser, z.B. weil es schon lange nicht mehr geregnet hat, bleibt ein grösserer Teil des infiltrierten Wasservolumens in dieser Schicht.

Für den Speicher Bodenwasser wird, wie für alle anderen Speicher auch, ein Wert in mm angegeben. Es handelt sich hierbei aber nicht um einen Wert, den man sich wie einen Wasserstand im Boden vorstellen kann. Er beschreibt die Höhe der Wassersäule, die man erhalten würde, wenn man das ganze Wasser aus diesem Speicher entfernen würde. Ein Millimeter Höhe entspricht hierbei einem Liter Wasser pro Quadratmeter Fläche. In der Realität ist dieses Wasser aber in den verschiedenen Bodenporen verteilt (siehe Abbildung 3).

Die tatsächliche Verdunstung (**actual evapotranspiration, e.act**) wird abhängig vom Bodenwasser berechnet. Ist das Bodenwasser (**sm**) über einem gewissen Wert («nasser Boden»), entspricht die tatsächliche Verdunstung (**e.act**) der potenziellen Verdunstung (**potential evapotranspiration, e.pot**) (**G**).

Wenn das Bodenwasser unter diesem Wert liegt («trockener Boden»), wird die tatsächliche Verdunstung abhängig von dem tatsächlich vorhandenen Bodenwasser berechnet. Die Verdunstung wird anschliessend vom Bodenwasser abgezogen.

Die Versickerung (**delta lower zone, dlz**) geht vom oberen (**uz**) zum unteren Grundwasserspeicher (**lower zone, lz**). Wenn der Wert des oberen Grundwasserspeichers einen Schwellenwert (**percolation, perc**) übertrifft, entspricht die Versickerung einer Konstante (**perc**). Wenn der Wert darunter liegt, versickert alles Wasser aus dem oberen Grundwasserspeicher (**uz**) in den unteren (**lz**) (**H**).

Einzellinearspeicher

Ein wichtiger Teil des HBV-Modells sind zwei Speicher: der obere Grundwasserspeicher (**uz**) und der untere Grundwasserspeicher (**lz**) (vgl. Abbildung 11, S.9). Bei beiden handelt es sich um sogenannte Einzellinearspeicher. Ein Einzellinearspeicher ist ein Speicher, bei dem der Abfluss linear abhängig vom gespeicherten Wasservolumen ist. Der Abfluss kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden¹⁵:

$$Q = S * k$$

Q: Abfluss
S: Speicher
k: Speicherkoeffizient

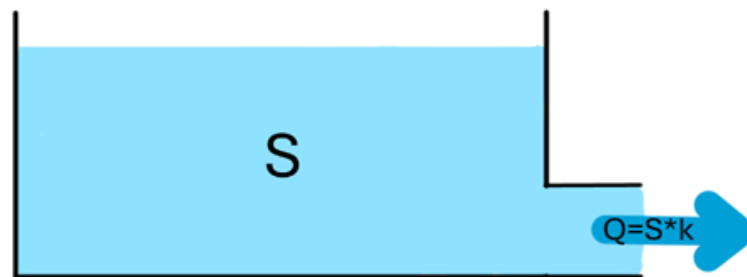


Abbildung 14: Illustration Einzellinearspeicher (eigene Darstellung 2024).

Die Abflüsse **q1** und **q2** entsprechen also den Produkten von dem oberen/unteren Grundwasserspeicher und ihren zugehörigen Speicherkoeffizienten (**k1** und **k2**) (**I**). Die Abflüsse werden von den jeweiligen Speichern abgezogen und das Modell kann die Werte für den nächsten Tag berechnen.

Bei sehr hohen Wassermengen (z.B. bei Starkniederschlagsereignissen) wird zusätzlich der Abfluss **q0** gebildet. Die Wassermenge aus dem oberen Grundwasserspeicher (**uz**), die über einem gewissen Wert (**upper zone limit, uzl**) liegt, wird mit einem Speicherkoeffizienten (**k0**) multipliziert, um diesen zusätzlichen Abfluss zu berechnen (**J**).

Alle Flüsse zusammengerechnet ergeben eine Abflusshöhe in mm. Dieser Wert muss mit der Einzugsgebietsfläche multipliziert werden, um das Volumen des Abflusses zu erhalten, das mit dem von der Abflussmessstation im Fluss gemessenen Abfluss verglichen werden kann (**K**).

¹⁵ Vgl. Hendriks, 2010, S. 257.

3.3. Messdaten

Als Input für das Modell wurden Daten der Schneemessstation des Interkantonalen Mess- und Informationssystems (IMIS-Schneestation) in **Färnel**, Berner Oberland, verwendet. Solche Niederschlags-, Temperatur- und Schneehöhendaten werden vom SLF (Institut für Schnee- und Lawinenforschung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft [WSL]) für etwa 200 verschiedene IMIS-Messstationen in der Schweiz erhoben und können zum Beispiel über das Datenportal für Lehre und Forschung von MeteoSchweiz (IDAweb) bezogen werden. Mit diesen Niederschlags- und Temperaturdaten erhält man den Input für das Modell.

Um das Modell zu kalibrieren, wurden Abflussmessdaten der Station **Simme-Oberwil** des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verwendet. Diese wurden über den Datenservice Hydrologie für Fließgewässer und Seen des BAFU bestellt. Mit diesen Daten erhält man mit anderen Worten Vergleichsdaten für den Output des Modells. Man kann also vergleichen, wie gut die Berechnungen des mathematischen Niederschlag-Abfluss-Modells der Realität entsprechen.



Abbildung 15: Einzugsgebiet Simme, Stationen beschriftet (Schwanbeck et al. 2018, Beschriftungen selbst eingefügt).

3.3.1. Unvollständigkeit der Niederschlagsmessdaten

Die Schneehöhendaten wurden für die Kalibrierung der Schneeroutine des Modells verwendet. Aus diesen Messwerten wurde das Schneewasseräquivalent geschätzt¹⁶, um dieses mit den vom Modell berechneten Werten vergleichen zu können. Bei diesem Vergleich ist aufgefallen, dass das modellierte SWE konstant sehr tief und weit von dem aus den Messdaten geschätzten SWE entfernt ist.

Bei der Problemanalyse habe ich mich auf die Niederschlagsmessdaten konzentriert, da mir bereits am Anfang die relativ tiefen Niederschlagsmesswerte im Winter aufgefallen sind.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Daten ist schnell aufgefallen, dass bei der Datenreihe in Färnel an Tagen mit tiefen Temperaturen und hohen Schneemessungen (z.B. 17 cm Neuschnee) gleichzeitig ein Niederschlag von 0 mm angegeben wurde. Schnee, der normalerweise in solchen Niederschlagsmessreihen in Form des Schneewasseräquivalents (der Schnee wird z.B. automatisch geschmolzen oder gewogen) mitgemessen wird, wird in den Messdaten von Färnel nicht mitberücksichtigt. Diese Vermutung wurde bestätigt durch den Beizug einer Messdatenreihe

¹⁶ Schätzung mit der Methode von Jonas/Marty/Magnusson 2009

einer benachbarten, von MeteoSchweiz betriebenen Station (Zweisimmen; dort am gleichen Tag 6.4 mm Niederschlag angegeben).

Damit ist der Niederschlag als Input für das Modell unvollständig. Diese Niederschlagsdaten der Station Färnel eignen sich daher nicht.

Um trotzdem zu einem vollständigen Input zu gelangen, musste eine vergleichbare, repräsentative Messstation gefunden werden, die den vollständigen Niederschlag, das heisst Regen *und* Schnee (bzw. Schneewasseräquivalent) misst. Neu wurden Niederschlagsdaten von der ebenfalls im Einzugsgebiet der Simme gelegenen Messstation **Boltigen** (siehe Abbildung 15), welche von MeteoSchweiz betrieben wird, verwendet. Ein kompletter Ersatz von Färnel durch Boltigen war aber nicht sinnvoll, da die Daten in Boltigen Temperaturdaten nur der letzten zwölf Jahre enthalten und ausserdem keine Schneehöhe messen.

Für die Temperatur- und Schneehöhendaten wurden weiterhin Messdaten der Station Färnel verwendet.

Da die bisherige Station Boltigen aber nur bis 2018 Daten gemessen hat, musste die Niederschlagsdatenreihe mit Messwerten einer neueren Messstation, welche ebenfalls in Boltigen liegt, aufgefüllt werden. Dazu wurde zuerst geprüft, wie vergleichbar die Daten der Stationen sind. Die Messwerte der Zeitperiode, in welcher beide Stationen Daten erhoben haben, zeigen einen durchschnittlichen Unterschied von 0.7 mm pro Tag. Die alte Station hat im Durchschnitt 0.7 mm mehr Niederschlag gemessen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die alte Station 72 m höher liegt als die neue. Diese Unterschiede wurden in Kauf genommen, könnten aber dazu führen, dass der Abfluss ab 2018 unterschätzt wird.

3.3.2. Messfehler

Auch wenn damit die Messstationen grundsätzlich festgelegt wurden, gibt es in den einzelnen Messreihen teilweise Lücken und Messfehler. Es kann zum Beispiel sein, dass an einem bestimmten Tag wegen eines technischen Problems eines Messgerätes keine Daten erhoben worden sind. In den Messreihen heisst es beim betreffenden Wert dann NA (not available) oder ähnlich. Da das hydrologische Computermodell diese NA-Werte nicht verarbeiten kann, wurden diese ersetzt. Bei der Niederschlagsmessreihe wurden sie durch den Wert 0 mm ersetzt. Die fehlenden Temperaturmessungen wurden durch lineare Interpolation (Durchschnitt der benachbarten Werte) ersetzt.

Die Schneehöhendaten der automatischen IMIS-Schneestation werden durch einen Ultraschallsensor gemessen, der die Distanz zur Schneeoberfläche bestimmt. Die Daten werden nicht kontrolliert oder korrigiert. Sie können Messfehler enthalten. Beispielsweise gibt es Stationen, bei denen im Sommer Gras wächst, welches vom Ultraschallsensor gemessen und als Schneehöhe aufgezeichnet wird.¹⁷ Offensichtliche Messfehler der Schneehöhendaten (z.B. 5m Schnee am 1. Juli) wurden korrigiert.

¹⁷ Vgl. SLF, Typische Messfehler

3.4. Kalibrierung

Die Kalibrierung ist die Anpassung der Parameter an das Einzugsgebiet, damit der berechnete Abfluss möglichst genau dem gemessenen entspricht. Im Folgenden wird das Vorgehen für die Kalibrierung beschrieben.

3.4.1. Kalibrierungszeitraum

Für die Kalibrierung wird ein gewisser Zeitraum ausgewählt. Hier wurden die Jahre 2000 - 2004 betrachtet. Die Parameter werden so angepasst, damit der modellierte Abfluss (oder auch die modellierte Schneedecke) in diesen fünf Jahren möglichst nahe an der Realität (den Messdaten) liegt. Die Berechnungen ausserhalb des Kalibrierungszeitraums zeigen häufig grössere Abweichungen von den Messdaten als die innerhalb des Kalibrierungszeitraums, da die Parameter für die Bedingungen während dem Kalibrierungszeitraum optimiert wurden. Diese Abweichungen zeigen aber auf wie verallgemeinerbar die Kalibrierung ist.

Normalerweise würde nach der Kalibrierung die Validierung folgen. Dazu wird eine separate Zeitperiode ausgewählt, anhand der geprüft wird, wie gut die vorgenommene Kalibrierung auf andere Zeiträume übertragbar ist. Auf die Validierung wurde in dieser Arbeit verzichtet.

3.4.2. Kalibrierung der Parameter der Schneeroutine

Zuerst wurden die Parameter der Schneeroutine kalibriert. Dafür wurde nur die Schneeroutine verwendet. Das heisst nur die Berechnungen, welche darüber bestimmen, wie gross die Schneedecke in den verschiedenen Höhenzonen ist, wann Schnee liegen bleibt und wann es Schneeschmelze gibt, wurden betrachtet.

In der Schneeroutine wurde ein Schneekorrekturfaktor von 1.6 (Niederschlag der als Schnee fällt, wird mit diesem Faktor multipliziert) berücksichtigt. Dazu mehr in Kapitel «Repräsentativität der Niederschlagsmessdaten», S. 29.

Die IMIS-Schneestation Färmel liefert Schneehöhendaten für die Höhe 1970 m ü.M. Aus diesen Schneehöhendaten wurde das Schneewasseräquivalent geschätzt¹⁸. Dieses geschätzte SWE wird in dieser Arbeit der Verständlichkeit halber als «gemessenes» anstatt als «aus Schneehöhendaten geschätztes» SWE bezeichnet. Für die Kalibrierung wurde also dieses Schneewasseräquivalent mit den vom Modell für diese Höhenzone berechneten SWE verglichen.

Zuerst wurde der Parameter tt (Schwellentemperatur, ab welcher Niederschlag als Schnee fällt) betrachtet.

¹⁸ Schätzung mit der Methode von Jonas/Marty/Magnusson 2009

Dazu wurden grafische Darstellungen, sogenannte Plots, erstellt. Die schwarze Linie stellt das gemessene und die farbigen Linien stellen das vom Modell berechnete SWE dar. Die verschiedenen Farben zeigen die unterschiedlichen Resultate, die man erhält, je nach Einstellung des betrachteten Parameters (hier der Parameter tt).

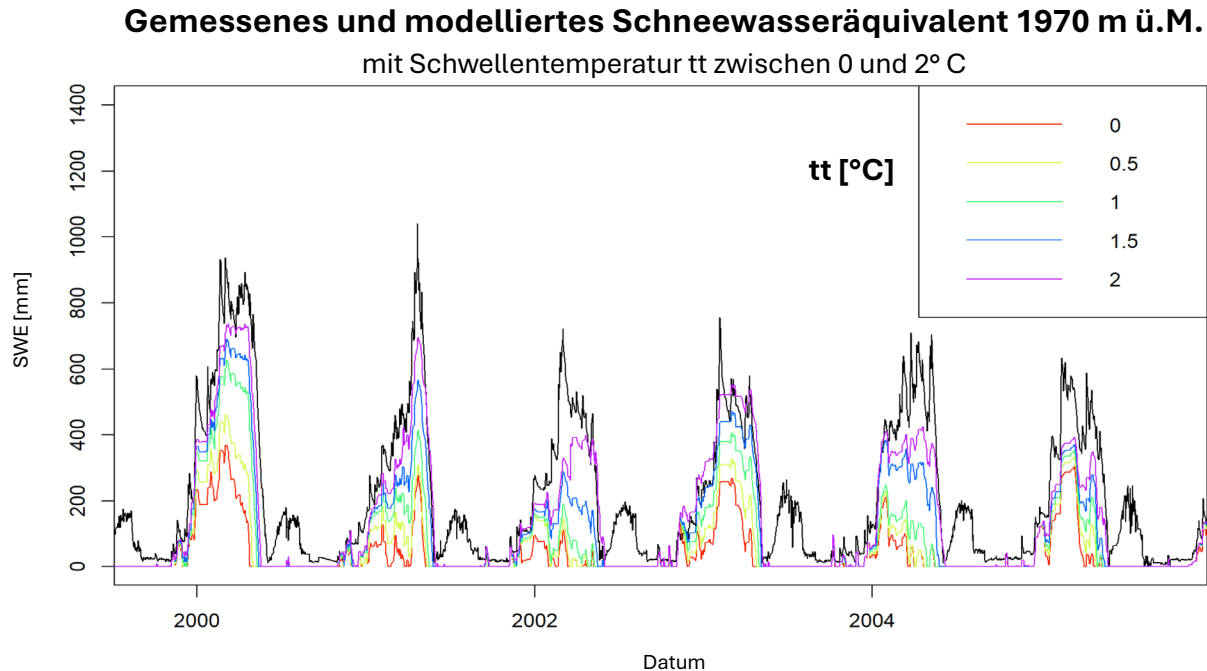


Abbildung 16: Plot SWE tt (eigener Plot 2024, erstellt mit Code von Michael Fehlmann).

In diesem Plot (Abbildung 16) dargestellt: Veränderung der modellierten Schneedecke, wenn man alle Parameter gleich lässt und nur der Parameter tt verändert wird. Rot zeigt, wie die Schneedecke aussieht, wenn der Parameter tt auf 0° C eingestellt ist und violett zeigt die Resultate für tt = 2° C. Die besten Resultate werden mit tt = 2° C (= violette Kurve) erzielt.

Obwohl das berechnete SWE immer noch relativ grosse Abweichungen vom gemessenen zeigt, wurde der Parameter tt auf 2° C eingestellt. Höhere Werte für tt sind nicht realistisch.

Das Vorgehen für die Kalibrierung des Parameters cfmax, der bestimmt, wie schnell der Schnee schmilzt (wie viel Millimeter pro Grad pro Tag), war das gleiche wie für tt. Der Parameter cfmax wurde auf $4\text{mm}^\circ\text{C}^{-1}\text{d}^{-1}$ gesetzt.

Damit waren die Parameter der Schneeroutine festgelegt. Als Nächstes mussten die Parameter der Bodenroutine kalibriert werden.

3.4.3. Kalibrierung der Parameter der Bodenroutine

Um die Parameter der Bodenroutine zu kalibrieren, wurde die nebenstehende Tabelle (Abbildung 17) verwendet. Sie zeigt den typischen Bereich, in dem die jeweiligen Parameter liegen. Beispielsweise der Parameter f_c («field capacity»), ein Parameter, welcher die maximale Kapazität des Speichers Bodenwasser angibt, liegt normalerweise zwischen 250 und 900 mm. Ein mittlerer Wert ist 500 mm.

parameter	lower	center	upper
f_c	250.00	500.00	900.00
l_c	0.40	0.75	1.00
β	0.50	0.75	1.00
k_0	0.20	0.40	0.90
k_1	0.01	0.30	0.60
k_2	0.01	0.05	0.15
u_{zl}	10.00	25.00	70.00
$perc$	0.50	2.00	5.00

Abbildung 17: Tabelle Parameterbereiche (Werte von Michael Fehlmann zur Verfügung gestellt, 2024).

Um das Modell rechnen zu lassen und Resultate zu erhalten, muss man allen Parametern einen Wert zuweisen. Die Parameter der Schneeroutine, welche bereits zuvor bestimmt wurden, wurden auf ihre festgelegten Werte gesetzt. Die Parameter der Bodenroutine wurden alle auf die Werte «center» aus der Tabelle (Abbildung 17) eingestellt. Ein Wert, hier k_1 , ein Speicherkoeffizient, wurde dann auf den Wert «lower», also 0.01 eingestellt. Das Modell wurde laufen gelassen und ein Plot des errechneten Abflusses wurde erstellt:

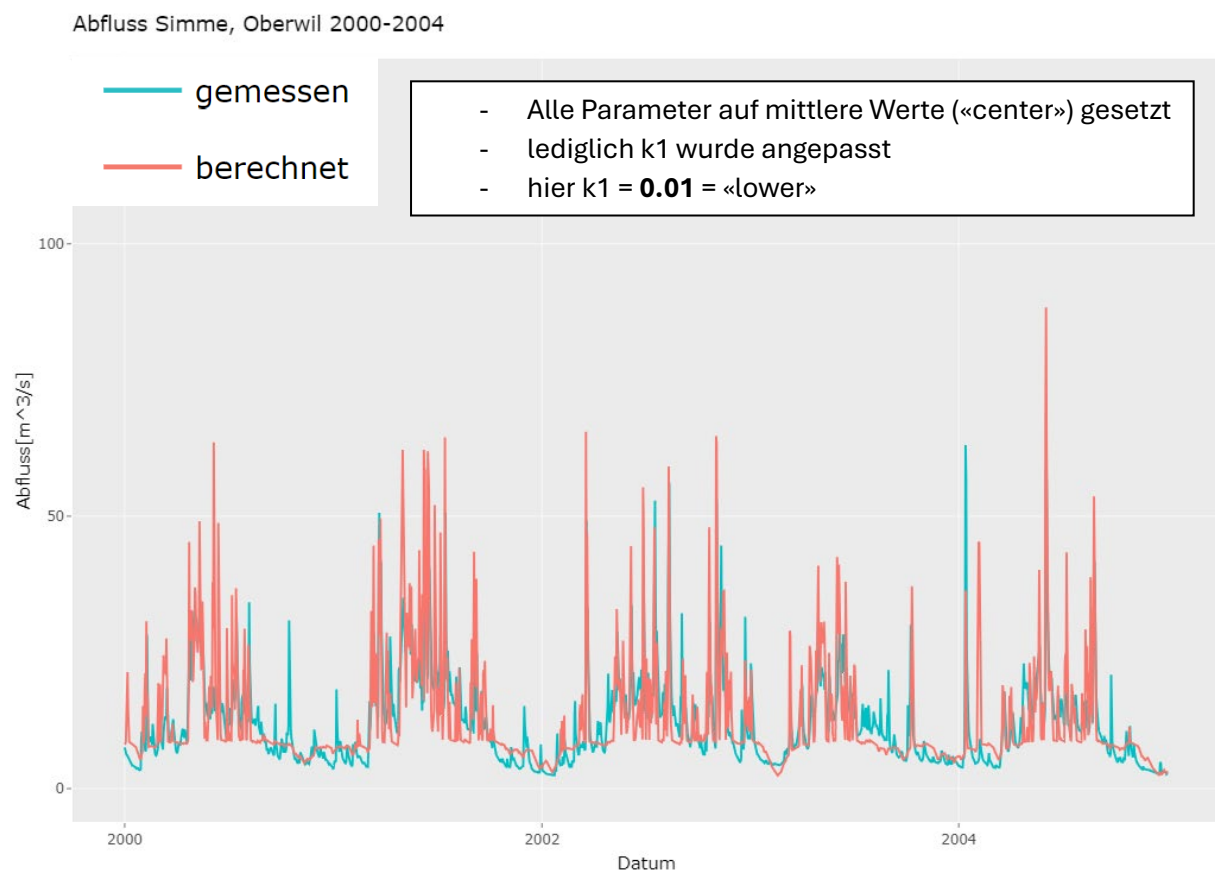


Abbildung 18: Plot Abfluss Simme, k_1 =lower (eigener Plot 2024).

Anschliessend wurde derselbe Wert auf den Wert «upper», also 0.60 eingestellt. Erneut wurde das Modell laufen gelassen und ein Plot erstellt:

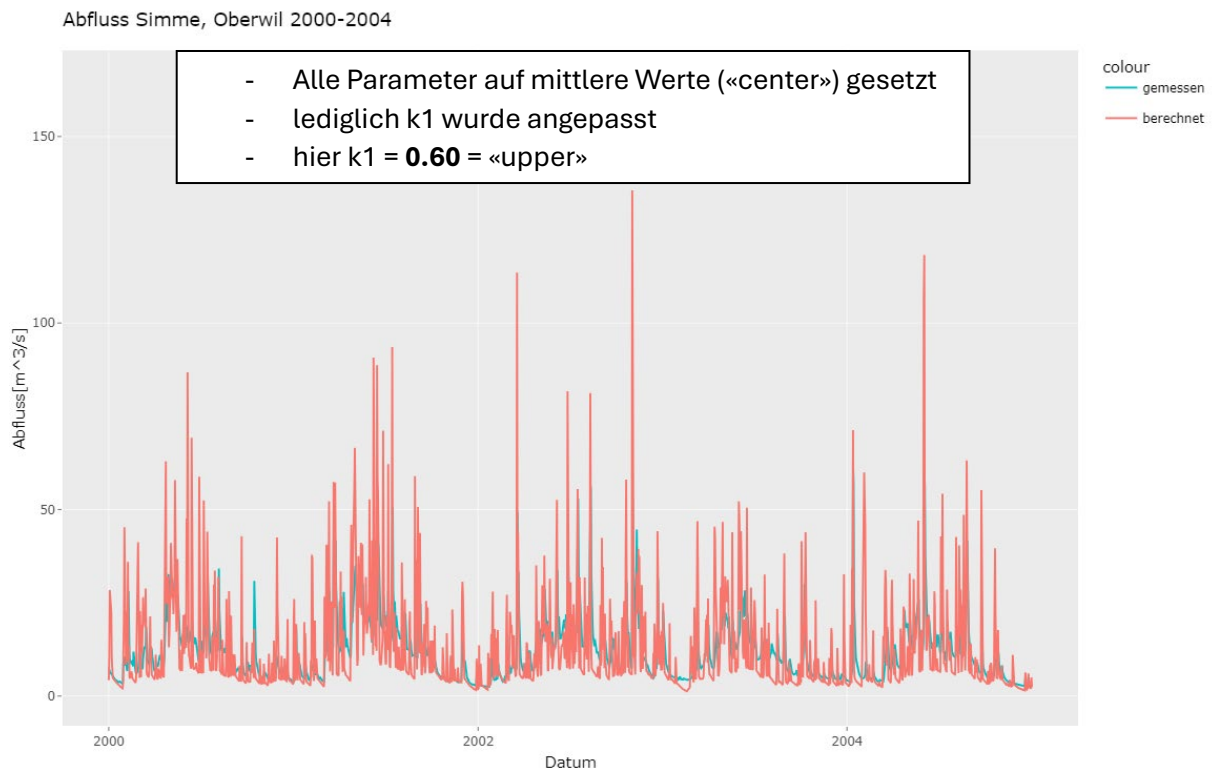


Abbildung 19: Plot Abfluss Simme, $k_1 = \text{upper}$ (eigener Plot 2024).

Man erhält also zwei Plots, aus denen man erkennen kann, welchen Einfluss der betrachtete Parameter – bei unveränderten anderen Parametern – auf den Abfluss hat. In diesem Beispiel sind die Unterschiede deutlich erkennbar. Man vergleicht also die Plots und überlegt sich, mit welcher Einstellung des Parameters die Berechnungen des Modells möglichst nahe an der Realität liegen.

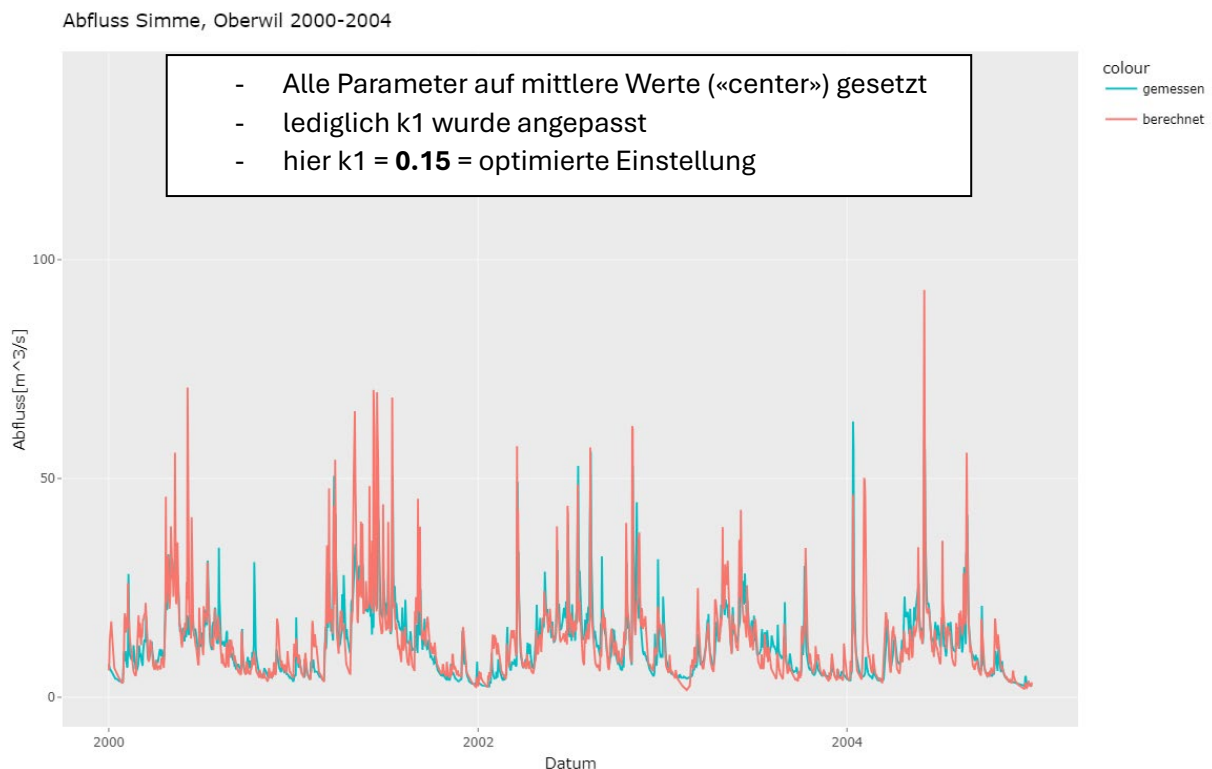


Abbildung 20: Plot Abfluss Simme, k_1 optimiert (eigener Plot 2024).

Mit Hilfe weiterer Plots, die Werte dazwischen abbilden, wurde der Parameter k_1 auf den Wert 0.15 festgelegt.

Der Parameter k_1 wurde also entsprechend «fixiert» und das Vorgehen wurde für alle weiteren Parameter der Bodenroutine wiederholt.

Vor der Kalibrierung:

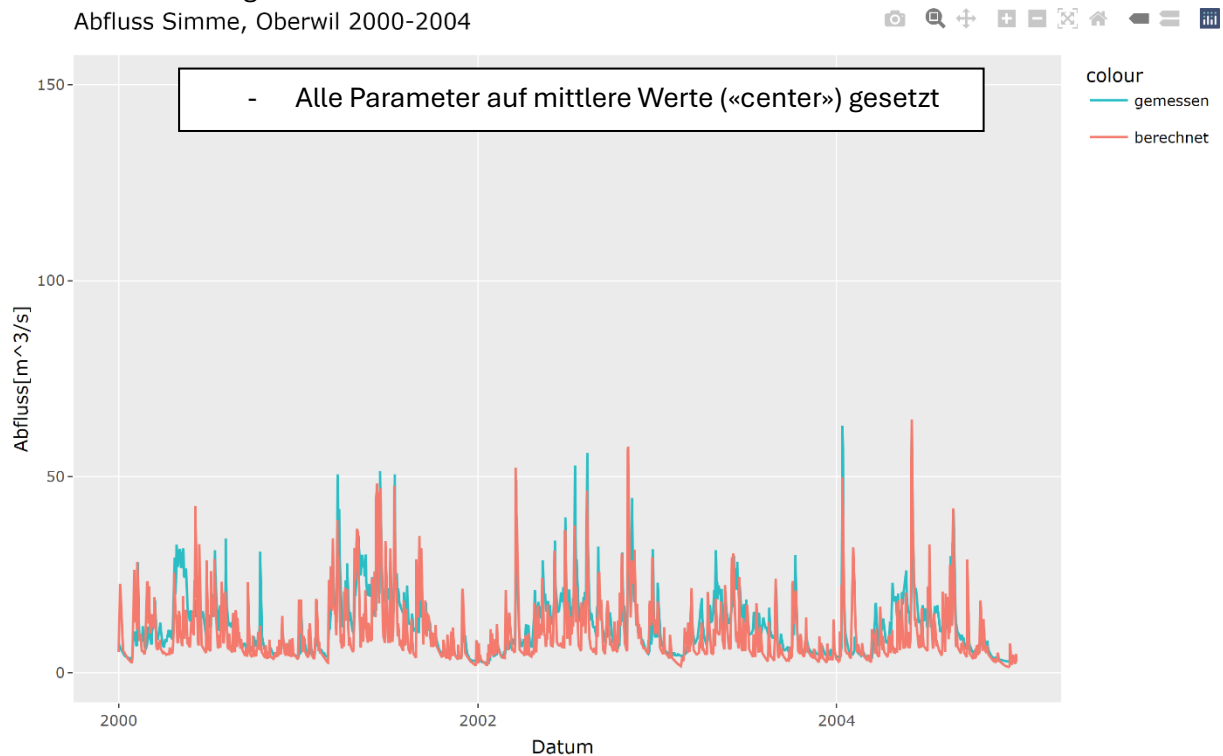


Abbildung 21: Plot Abfluss Simme, vor Kalibrierung (eigener Plot 2024).

Nach der Kalibrierung:

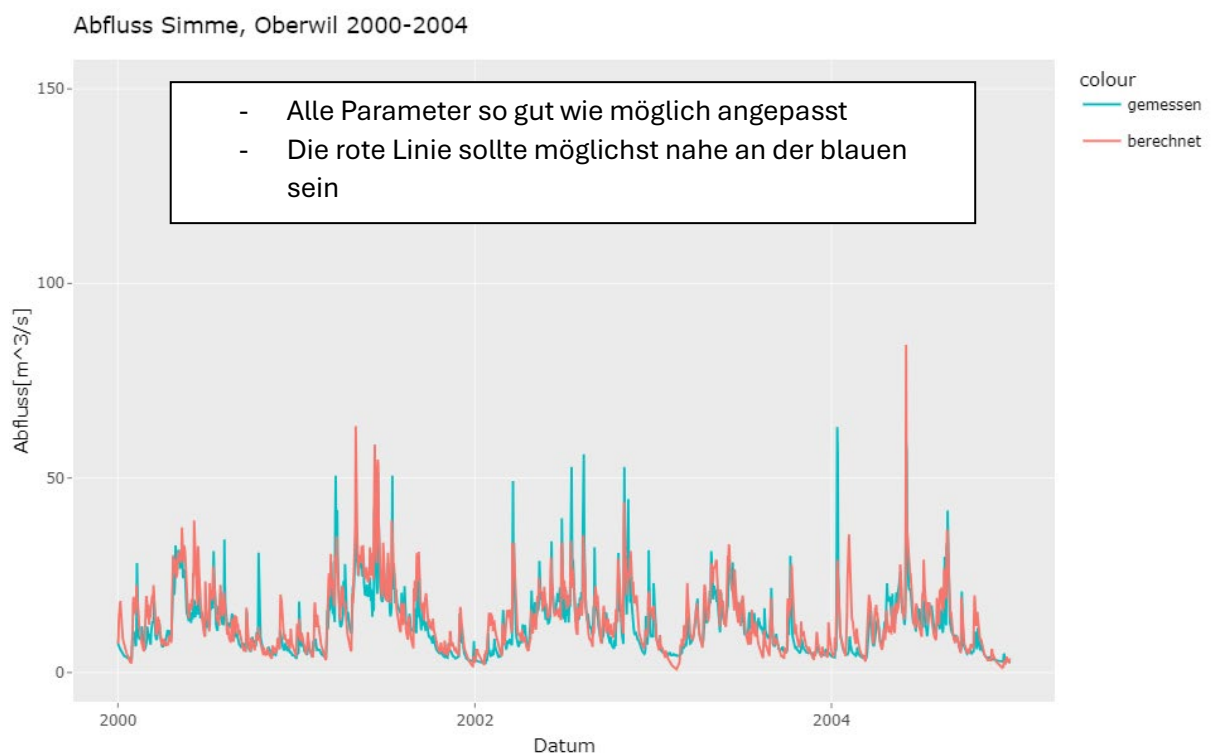


Abbildung 22: Plot Abfluss Simme, nach Kalibrierung (eigener Plot 2024).

Die entsprechenden (optimierten) Werte der Parameter:

parameter	value
fc	500.00
lc	0.80
beta	0.50
k0	0.60
k1	0.15
k2	0.08
uzl	50.00
perc	3.00

Abbildung 23: Tabelle Werte der Parameter (eigene Tabelle 2024).

4. Resultat

Mit dem kalibrierten Modell (mehr zur Kalibrierung im Kapitel «Kalibrierung» S. 15) wurde Abfluss berechnet. Um zu beurteilen, welche Grössen die Qualität der Modellierung von Spitzenabflüssen beeinflussen, wurden drei Hochwasser ausgewählt. In dieser Arbeit wird ab einem Abfluss von $80\text{m}^3/\text{s}$ in der Sprache von Hochwasser gesprochen. Der Wert von $80\text{m}^3/\text{s}$ stammt nicht aus einer wissenschaftlichen Definition, sondern stellt ein Ereignis dar, welches nicht jährlich, aber doch alle paar Jahre einmal vorkommt.

Das Modell berechnet jeweils mittlere Abflusswerte für einen ganzen Tag. Auch die verwendeten Messdaten sind mittlere Tageswerte. Die tatsächlich gemessenen Abflussspitzen, also die höchste Anzahl Kubikmeter pro Sekunde, die gemessen wurde, sind noch höher.

In dieser Arbeit wurde mit Daten von 26 Jahren gearbeitet (aufgrund der Datenverfügbarkeit). Darin finden sich ca. sechs Hochwasser, von denen drei ausgewählt wurden. Diese sollen möglichst verschieden sein, das heisst zum Beispiel, dass sie auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sind oder auch, dass die Schneedecke eine andere Rolle spielte. Die Qualität der Hochwassermodellierung soll an verschiedenen Hochwassern geprüft werden, um für die Aussagen darüber, welche Grössen die Qualität der Modellierung von Spitzenabflüssen beeinflussen, eine möglichst breite Grundlage zu haben.

Exkurs: Erklärung der Tabelle auf S. 23, die immer wieder verwendet wird

- **Abfluss_gemessen:** im Fluss gemessene Abflusswerte [Einheit m^3/s]
- **Abfluss_modelliert:** vom Modell berechnete Abflusswerte [m^3/s]
- **Abfluss_gemessen_in_mm:** aus Abfluss_gemessen berechnete Abflusshöhe (über das ganze Einzugsgebiet) [mm/d]
- **Abfluss_modelliert_in_mm:** zu Abfluss_modelliert gehörende Abflusshöhe [mm/d]
- **Niederschlag:** an der Station Boltigen (892 m ü.M.) gemessener Niederschlag (im Modell im ganzen Einzugsgebiet einheitlich) [mm]
- **Temperatur:** an der Station Färmel (1970 m ü.M.) gemessene Temperatur (wird im Modell an die Höhenzonen angepasst) [$^{\circ}\text{C}$]
- **SWE_gemessen:** aus Schneehöhendaten von Färmel geschätztes SWE, repräsentiert die Schneedecke auf der Höhe der Messstation Färmel [mm]
- **SWE_modelliert:** von Modell berechnetes SWE auf der Höhe der Station Färmel (von Modell berechnete Schneedecke sieht in jeder Höhenzone anders aus, für Vergleichbarkeit mit SWE_gemessen wird hier das SWE für die Höhe der Station betrachtet) [mm]
- **Schneeschnmelze:** vom Modell berechnete Schneeschnmelze (Durchschnitt über das ganze Einzugsgebiet, ebenfalls in flüssiger Form) [mm]
- **Schneebedeckte_Fläche:** Flächenanteil des Einzugsgebietes, der schneebedeckt ist

Grün in Tabelle: betrachtetes Hochwasser

Violett in Tabelle: für dieses Hochwasser wichtige Zeilen/ Spalten (entsprechende Verweise im Kapitel «Diskussion»)

4.1. Frühlingshochwasser Mai 1999

Die Simme führte vom 12. bis zum 14. Mai 1999 Hochwasser:

Abfluss Simme, Oberwil (Hydrologisches Jahr 1998/1999)

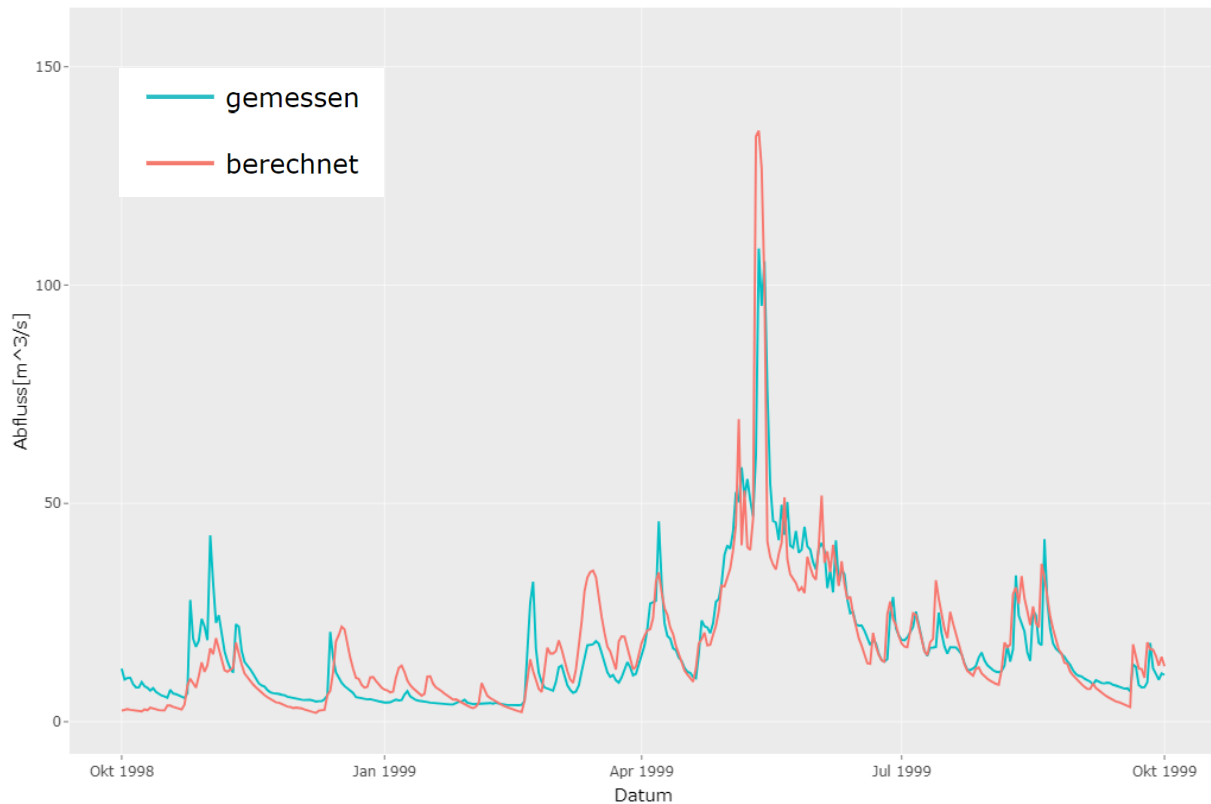


Abbildung 24: Plot Abfluss Simme 98/99 (eigener Plot 2024).

- Höchster Wert am 12.05.1999 mit einem durchschnittlichen Abfluss von **108.4 m³/s**
- Entspricht einer Abflusshöhe von **27.2 mm/d** (Abflusshöhe = Höhe in mm über das ganze Einzugsgebiet verteilt, über den ganzen Tag)
- Durch Modell berechneter Abfluss **135.3 m³/s**
- Entspricht Abflusshöhe von **34.0 mm/d**

Modellierung der Schneedecke in diesem hydrologischen Jahr:

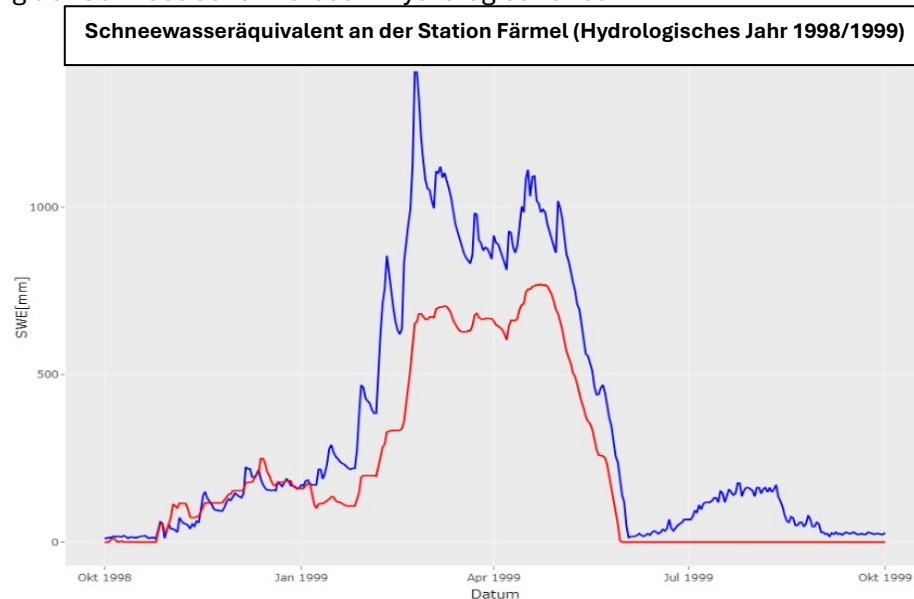


Abbildung 25: Plot SWE Färmel 1998/1999 (eigener Plot 2024).

51

Datum	Abfluss_gemessen	Abfluss_modelliert	Abfluss_gemessen_in_mm	Abfluss_modelliert_in_mm	Niederschlag	Temperatur	SWE_gemessen	SWE_modelliert	Schneeschnmelze	Schneebedeckte_Fläche
1999-04-30	38.2	31.0	9.6	7.8	0.0	4.9	863.8	694.7	10.1	0.684
1999-05-01	40.4	32.9	10.1	8.3	0.0	7.3	1018.9	682.6	14.9	0.684
1999-05-02	39.6	35.1	10.0	8.8	0.0	8.3	997.4	661.0	15.8	0.598
1999-05-03	43.5	39.3	10.9	9.9	0.0	10.5	965.2	635.3	21.1	0.598
1999-05-04	52.6	45.0	13.2	11.3	0.0	9.5	906.8	600.8	18.7	0.598
1999-05-05	50.2	69.3	12.6	17.4	13.8	6.8	859.5	570.3	12.1	0.598
1999-05-06	58.2	40.4	14.6	10.2	0.2	6.4	838.6	550.6	8.9	0.509
1999-05-07	51.4	53.0	12.9	13.3	6.2	8.9	802.3	532.6	13.9	0.509
1999-05-08	55.6	40.0	14.0	10.1	5.0	4.3	776.6	504.5	5.1	0.509
1999-05-09	50.8	39.3	12.8	9.9	0.0	7.8	751.0	494.8	11.6	0.509
1999-05-10	47.0	46.4	11.8	11.7	7.9	9.4	710.3	471.1	11.5	0.509
1999-05-11	61.1	134.0	15.4	33.7	45.4	7.3	695.2	441.0	7.9	0.415
1999-05-12	108.4	135.3	27.2	34.0	37.0	6.7	645.1	419.4	7.0	0.415
1999-05-13	95.2	126.7	23.9	31.9	29.9	8.2	600.4	400.1	9.4	0.415
1999-05-14	105.4	99.6	26.5	25.0	25.1	5.3	561.2	374.8	4.9	0.415
1999-05-15	75.8	41.3	19.1	10.4	4.3	3.7	556.3	361.1	2.7	0.415
1999-05-16	54.4	37.7	13.7	9.5	1.8	5.8	532.0	353.8	3.8	0.415
1999-05-17	46.0	36.0	11.6	9.0	0.0	9.6	512.6	338.2	8.2	0.317
1999-05-18	45.6	34.9	11.5	8.8	0.9	9.5	464.6	307.3	8.1	0.317
1999-05-19	41.6	38.5	10.4	9.7	15.1	6.1	440.9	276.8	3.9	0.317
1999-05-20	49.7	41.0	12.5	10.3	20.2	2.4	440.9	259.9	0.5	0.317
1999-05-21	42.8	51.4	10.8	12.9	21.5	1.9	459.9	257.8	0.2	0.317
1999-05-22	50.3	37.2	12.7	9.4	1.8	3.5	469.4	257.8	1.4	0.317
1999-05-23	40.3	33.8	10.1	8.5	0.0	7.0	445.6	251.3	4.4	0.317

Abbitdung 26: Tabelle Hochwasser Mai 1999 (eigene Tabelle 2024).

4.2. Sommerhochwasser August 2005

Die Simme führte am 22.08.2005 Hochwasser.

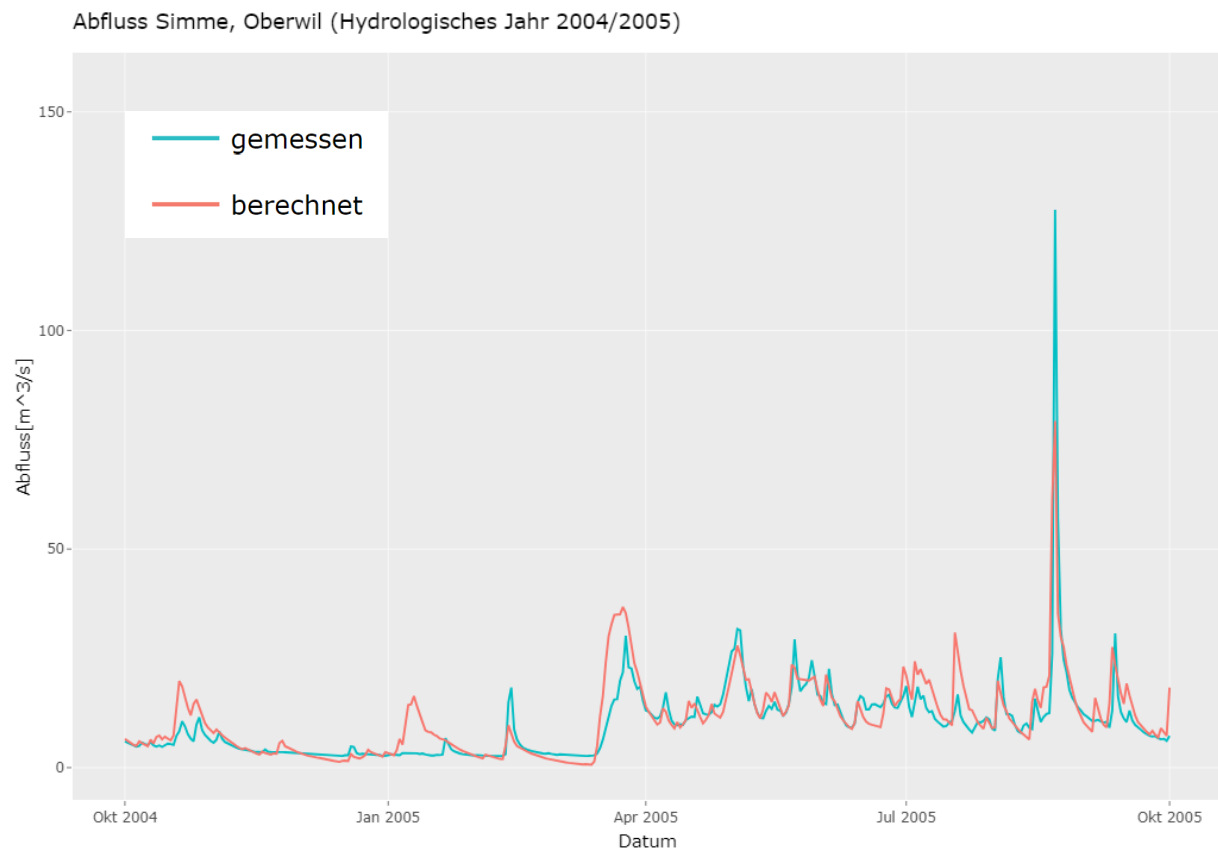


Abbildung 27: Plot Abfluss Simme 2004/2005 (eigener Plot 2024).

- Abfluss von **127.6 m^3/s** am 22.08.2005
- Entspricht einer Abflusshöhe von **32.1 mm/d**
- Durch Modell berechneter Abfluss **79.3 m^3/s**
- Entspricht Abflusshöhe von **19.9 mm/d**

Datum	Abfluss gemessen	Abfluss modelliert	Abfluss gemessen in mm	Abfluss modelliert in mm	Niederschlag	Temperatur	SWE gemessen	SWE modelliert	Schneeschnelze	Schneebedeckte Fläche
2005-08-14	8.8	15.0	2.2	3.8	27.2	5.9	4.2	0.0	0.0	0.006
2005-08-15	15.8	18.0	4.0	4.5	16.4	2.9	16.7	0.0	0.0	0.049
2005-08-16	13.0	15.3	3.3	3.8	0.0	6.6	33.5	0.0	0.8	0.130
2005-08-17	10.4	13.7	2.6	3.4	0.0	12.5	12.5	0.0	2.4	0.130
2005-08-18	11.6	18.3	2.9	4.6	16.8	12.0	20.9	0.0	1.0	0.049
2005-08-19	12.3	18.5	3.1	4.6	7.3	10.6	33.5	0.0	0.7	0.049
2005-08-20	12.5	21.1	3.1	5.3	14.6	6.1	0.0	0.0	0.0	0.049
2005-08-21	26.2	61.2	6.6	15.4	66.9	6.2	16.7	0.0	0.0	0.049
2005-08-22	127.6	79.3	32.1	19.9	32.1	7.0	4.2	0.0	0.0	0.036
2005-08-23	56.8	35.2	14.3	8.9	0.2	7.1	4.2	0.0	0.0	0.036
2005-08-24	31.8	29.9	8.0	7.5	0.0	9.3	12.5	0.0	0.3	0.036
2005-08-25	24.7	27.6	6.2	6.9	5.1	10.9	8.3	0.0	0.6	0.036
2005-08-26	21.9	23.5	5.5	5.9	0.0	9.0	4.2	0.0	0.3	0.036
2005-08-27	17.8	20.7	4.5	5.2	1.9	9.0	16.7	0.0	0.3	0.036
2005-08-28	16.0	17.7	4.0	4.4	0.2	8.2	20.9	0.0	0.2	0.036
2005-08-29	14.8	15.3	3.7	3.8	0.0	13.1	25.1	0.0	0.9	0.036
2005-08-30	13.8	13.3	3.5	3.3	0.0	14.2	25.1	0.0	1.0	0.036
2005-08-31	13.1	11.6	3.3	2.9	0.0	15.3	25.1	0.0	1.1	0.036
2005-09-01	12.2	10.4	3.1	2.6	0.0	14.3	11.6	0.0	0.4	0.014
2005-09-02	11.7	9.6	3.0	2.4	0.0	14.2	11.6	0.0	0.4	0.014
2005-09-03	11.1	8.9	2.8	2.2	0.0	14.8	11.6	0.0	0.3	0.014
2005-09-04	10.6	8.2	2.7	2.1	0.0	13.5	11.6	0.0	0.1	0.006
2005-09-05	10.7	15.9	2.7	4.0	22.6	12.2	11.6	0.0	0.1	0.006

Abbildung 28: Tabelle Hochwasser August 2005 (eigene Tabelle 2024).

4.3. Winterhochwasser Dezember 2023

Die Simme führte am 12.12.2023 Hochwasser.

Abfluss Simme, Oberwil (Hydrologisches Jahr 2023/2024)

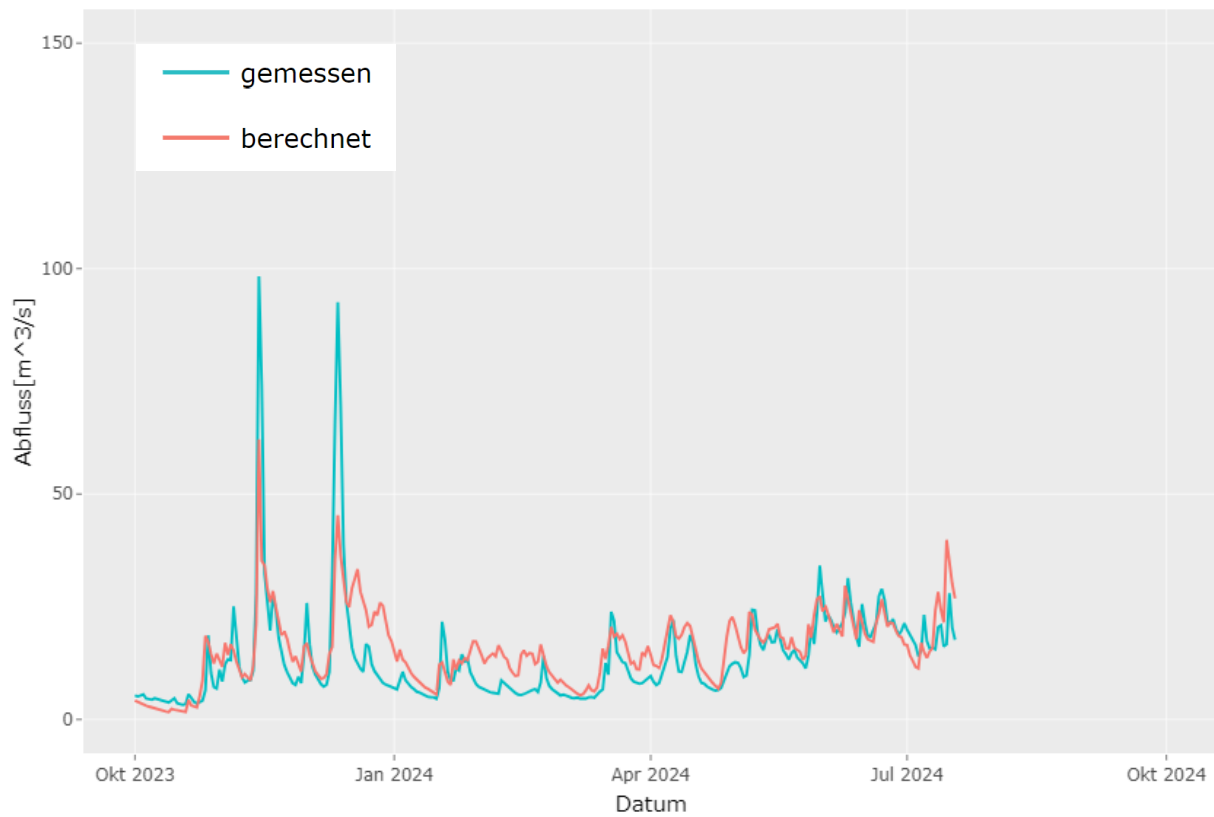


Abbildung 29: Plot Abfluss Simme 2023/2024 (eigener Plot 2024).

- Abfluss von **92.6 m³/s** am 12.12.2024
- Entspricht einer Abflusshöhe von **23.3 mm/d**
- Durch Modell berechneter Abfluss **45.3 m³/s**
- Entspricht Abflusshöhe von **11.4 mm/d**

Modellierung der Schneedecke in diesem hydrologischen Jahr:

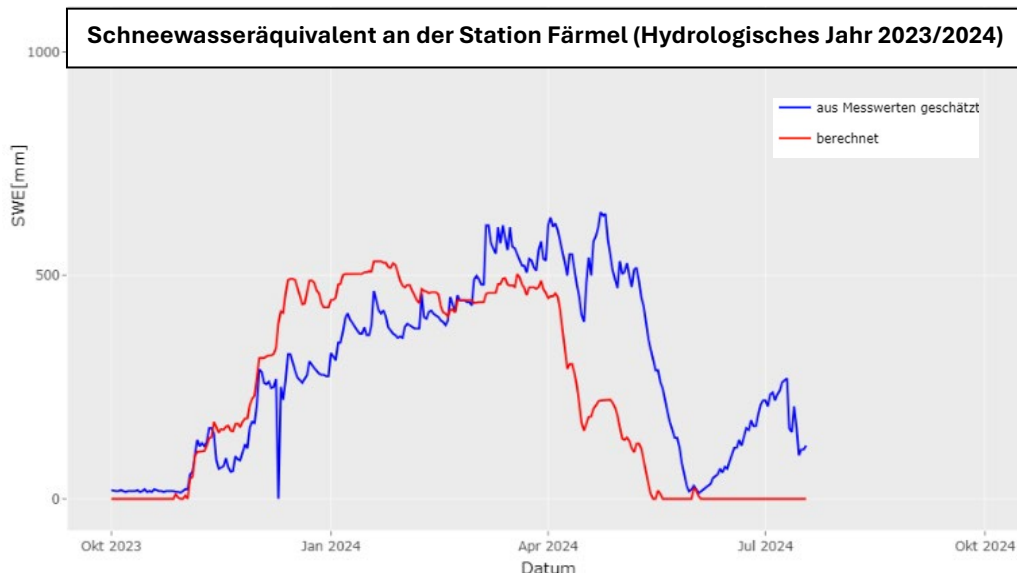


Abbildung 30: Plot SWE Färmel 2023/2024 (eigener Plot 2024).

Winterhochwasser Dezember 2023:

Vom Modell berechnete Werte (mit Schneekorrekturfaktor 1.6)

Mit 1.2 auf S. 28 vergleichen

Datum	Abfluss gemessen	Abfluss modelliert	Abfluss gemessen in mm	Abfluss modelliert in mm	Niederschlag	Temperatur	SWE gemessen	SWE modelliert	Schneeschmelze	Schneebdeckte Fläche
2023-12-05	8.9	9.8	2.2	2.5	1.6	-5.4	256.3	318.3	0.0	0.874
2023-12-06	7.9	9.1	2.0	2.3	0.0	-6.2	262.3	320.9	0.0	1.000
2023-12-07	7.3	9.2	1.8	2.3	2.0	0.2	247.5	320.9	2.7	1.000
2023-12-08	7.7	10.0	1.9	2.5	8.8	-0.5	250.5	324.1	1.0	0.821
2023-12-09	10.5	14.6	2.7	3.7	34.4	-0.7	268.2	338.2	0.6	0.821
2023-12-10	31.8	16.1	8.0	4.0	16.3	-0.3	0.0	393.2	0.8	0.756
2023-12-11	66.0	35.5	16.6	8.9	50.1	2.7	250.5	419.3	6.2	0.756
2023-12-12	92.6	45.3	23.3	11.4	26.4	1.8	221.6	416.0	4.1	0.756
2023-12-13	69.8	36.3	17.5	9.1	19.7	-2.3	265.2	458.2	0.0	0.756
2023-12-14	38.8	30.8	9.7	7.7	1.7	-3.6	323.6	489.8	0.0	0.756
2023-12-15	26.3	26.1	6.6	6.6	0.0	-3.9	323.6	492.5	0.0	0.936
2023-12-16	19.9	24.9	5.0	6.3	0.0	2.5	301.7	492.5	6.2	0.936
2023-12-17	16.0	29.1	4.0	7.3	0.0	6.9	286.3	490.0	17.5	0.756
2023-12-18	13.6	31.1	3.4	7.8	0.0	6.5	271.2	469.9	14.2	0.684
2023-12-19	12.2	33.3	3.1	8.4	3.2	5.9	265.2	451.4	12.0	0.684
2023-12-20	11.3	28.4	2.8	7.1	1.3	-2.5	259.3	435.4	0.0	0.598
2023-12-21	10.5	26.6	2.6	6.7	17.3	-1.7	268.2	437.4	0.1	0.821
2023-12-22	16.7	24.2	4.2	6.1	14.6	-2.3	277.2	465.1	0.0	0.756
2023-12-23	16.1	20.6	4.1	5.2	0.0	-1.4	307.9	488.5	0.1	0.756
2023-12-24	12.3	21.0	3.1	5.3	0.1	3.2	298.6	488.5	7.5	0.756
2023-12-25	10.7	23.9	2.7	6.0	0.0	6.0	292.5	483.2	13.2	0.756
2023-12-26	9.8	23.1	2.5	5.8	0.0	3.6	286.3	466.7	6.0	0.684

Abbildung 31: Tabelle Hochwasser Dezember 2023 (eigene Tabelle 2024).

Winterhochwasser Dezember 2023:

Vom Modell berechnete Werte ohne Schneekorrekturfaktor

Datum	Abfluss gemessen	Abfluss modelliert	Abfluss gemessen_in_mm	Abfluss modelliert_in_mm	Niederschlag	Temperatur	SWE gemessen	SWE modelliert	Schneeschnmelze	Schneebedeckte Fläche
2023-12-05	8.9	9.4	2.2	2.4	1.6	-5.4	256.3	181.5	181.5	0.0
2023-12-06	7.9	8.6	2.0	2.2	0.0	-6.2	262.3	183.1	183.1	0.0
2023-12-07	7.3	8.7	1.8	2.2	2.0	0.2	247.5	183.1	183.1	2.0
2023-12-08	7.7	9.2	1.9	2.3	8.8	-0.5	250.5	185.1	185.1	0.6
2023-12-09	10.5	13.7	2.7	3.5	34.4	-0.7	268.2	193.9	193.9	0.4
2023-12-10	31.8	15.3	8.0	3.8	16.3	-0.3	0.0	228.3	228.3	0.8
2023-12-11	66.0	34.4	16.6	8.7	50.1	2.7	250.5	244.6	244.6	6.2
2023-12-12	92.6	39.6	23.3	9.9	26.4	1.8	221.6	241.3	241.3	3.1
2023-12-13	69.8	35.6	17.5	9.0	19.7	-2.3	265.2	267.7	267.7	0.0
2023-12-14	38.8	30.2	9.7	7.6	1.7	-3.6	323.6	287.4	287.4	0.0
2023-12-15	26.3	25.5	6.6	6.4	0.0	-3.9	323.6	289.1	289.1	0.0
2023-12-16	19.9	24.3	5.0	6.1	0.0	2.5	301.7	289.1	289.1	6.0
2023-12-17	16.0	27.5	4.0	6.9	0.0	6.9	286.3	286.7	286.7	15.4
2023-12-18	13.6	28.5	3.4	7.2	0.0	6.5	271.2	266.6	266.6	11.6
2023-12-19	12.2	30.2	3.1	7.6	3.2	5.9	265.2	248.1	248.1	10.2
2023-12-20	11.3	25.7	2.8	6.5	1.3	-2.5	259.3	232.0	232.0	0.0
2023-12-21	10.5	24.3	2.6	6.1	17.3	-1.7	268.2	233.3	233.3	0.1
2023-12-22	16.7	22.2	4.2	5.6	14.6	-2.3	277.2	250.6	250.6	0.0
2023-12-23	16.1	18.9	4.1	4.7	0.0	-1.4	307.9	265.2	265.2	0.1
2023-12-24	12.3	19.3	3.1	4.8	0.1	3.2	298.6	265.2	265.2	7.1
2023-12-25	10.7	21.7	2.7	5.5	0.0	6.0	292.5	259.9	259.9	11.7
2023-12-26	9.8	20.2	2.5	5.1	0.0	3.6	286.3	243.5	243.5	3.9
2023-12-27										
2023-12-28										
2023-12-29										
2023-12-30										
2023-12-31										

Abbildung 32: Tabelle Hochwasser Dezember 2023, ohne Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors (eigene Tabelle 2024).

5. Diskussion

In diesem Kapitel wird auf die Frage eingegangen, welche Grössen die Qualität der Modellierung der Spitzenabflüsse beeinflussen. Mit anderen Worten: Welche Faktoren sind wichtig, damit die modellierten Spitzenabflüsse möglichst nahe an der Realität sind? Dazu werden ausgewählte Grössen betrachtet, die einen Einfluss darauf haben. Basierend auf den Hochwassern, welche im Kapitel «Resultat» beschrieben wurden, werden die entsprechenden Überlegungen dargelegt. Am Anfang wird darauf eingegangen, dass aussagekräftige Niederschlagsdaten eine wichtige Rolle spielen. Dieses Thema wird unter dem Titel «Repräsentativität der Niederschlagsmessdaten» abgehandelt. Dann geht es um die Kalibrierung. Hier geht es um die Anpassung der Parameter des Computermodells an das betrachtete Einzugsgebiet. Zum Schluss wird auf den Flüssigwassergehalt eingegangen.

5.1. Repräsentativität der Niederschlagsmessdaten

Eine wichtige Grösse, die die Qualität der Modellierung von Spitzenabflüssen beeinflusst, ist die Repräsentativität der Niederschlagsmessdaten. Der Input für das Modell (die Niederschlagsdaten) muss dem durchschnittlichen Niederschlag über das ganze Einzugsgebiet möglichst genau entsprechen, damit die Resultate (der berechnete Abfluss) aussagekräftig sind.

5.1.1. Schneekorrekturfaktor

Bei der Kalibrierung der Parameter der Schneeroutine ist aufgefallen, dass die berechnete Schneedecke, also eigentlich das berechnete Schneewasseräquivalent SWE, immer zu tief ist. (Dies, mit Niederschlagsdaten von Boltigen, Ausführungen dazu siehe Kapitel «Ungenauigkeit der Niederschlagsmessdaten» S. 13) Auch wenn die Parameter auf extreme, teilweise unrealistische Werte (z.B. $tt = 5^{\circ}\text{C}$, das heisst, bis zu einer durchschnittlichen Tagestemperatur von bis zu $+5^{\circ}\text{C}$ (!) hinauf wird immer noch angenommen, dass der Niederschlag als Schnee fällt) eingestellt wurden, erreichte die modellierte Schneedecke nicht das Ausmass der aus den Schneehöhendaten geschätzten Schneedecke.

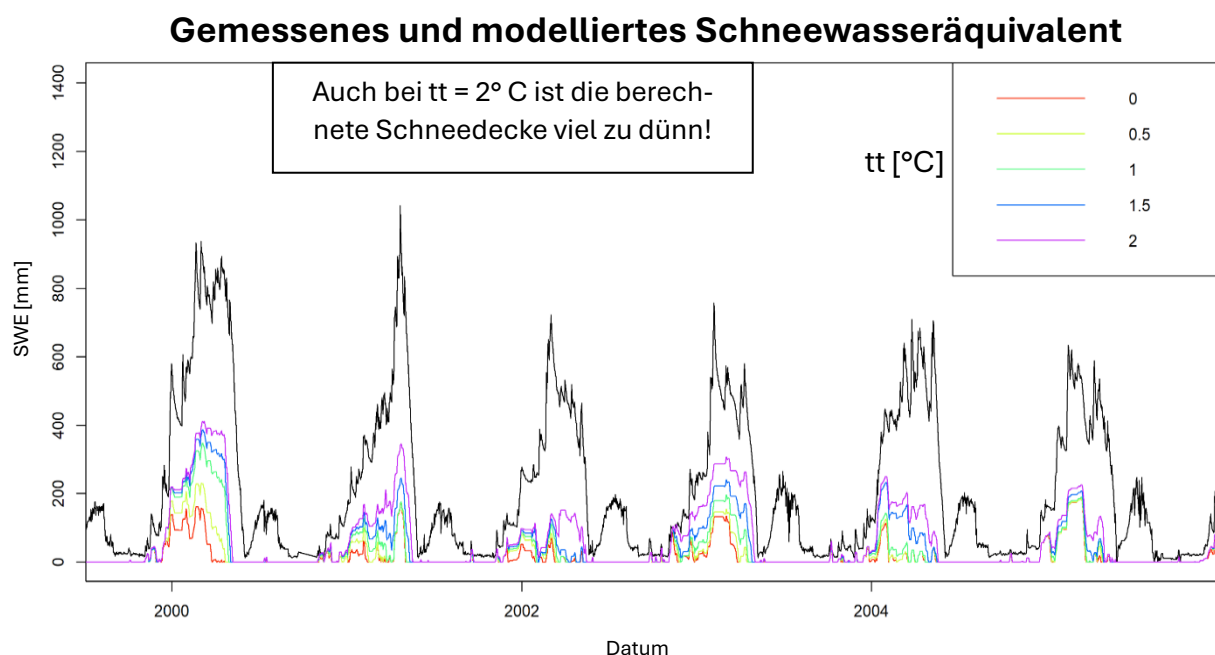


Abbildung 33: Plot SWE Kalibrierung tt (eigener Plot 2024, erstellt mit Code von Michael Fehlmann).

In dieser Grafik (Abbildung 33) ist das aus den Schneehöhendaten geschätzte SWE (schwarz) und das vom Modell berechnete SWE (farbig) zu sehen. Die Legende zeigt die Schwellentemperatur t_t , ab der der Niederschlag als Schnee fällt. Die farbigen Kurven zeigen die entsprechend modellierte Schneedecke. Hier werden für den Parameter t_t nur Temperaturwerte bis 2°C dargestellt, da höhere Werte nicht plausibel sind.

Die schwarze Kurve liegt wesentlich über den farbigen Kurven. Die vom Modell berechnete Schneedecke ist also deutlich zu klein. Das Ziel wäre es, eine Kurve zu finden, die möglichst dem Verlauf der schwarzen Kurve entspricht. Damit würde die berechnete Schneedecke den gemessenen Werten entsprechen.

	Jahr	Nieder-schlag	Verduns-tung	Abflusshöhe gemessen	Abflusshöhe berechnet	Unterschied
1	2000	1351.2	518.2142	1031.8807	859.1668	-172.7139
2	2001	1678.4	538.4066	1295.7016	1071.5695	-224.1321
3	2002	1331.8	517.4338	1041.2711	842.5997	-198.6714
4	2003	1303.3	521.5565	1096.3675	863.2171	-233.1504
5	2004	1413.3	502.3777	1025.7598	860.5974	-165.1624
6	2005	1251.9	489.4658	918.9219	751.8011	-167.1208
7	2006	1392.7	513.0758	1140.3156	868.9287	-271.3869
8	2007	1536.5	539.4288	1194.9967	997.0952	-197.9015
9	2008	1151.8	493.6279	982.1644	710.1815	-271.9829
10	2009	1127.0	482.2617	895.6686	686.8904	-208.7782
11	2010	1273.5	476.9161	920.6597	728.5166	-192.1432

Abbildung 34: Tabelle Wasserbilanz, Angaben in mm (eigene Tabelle 2024).

Auch in der Wasserbilanz, welche jeweils für ein hydrologisches Jahr (01.10 – 30.9) berechnet wurde (Abbildung 34), fällt auf, dass die modellierten jährlichen Abflusshöhen tiefer sind als die tatsächlich gemessenen. Hier verwendet man das hydrologische Jahr, da man davon ausgeht, dass die Schneedecke am 1. Oktober i.d.R. geschmolzen ist. So verhindert man, dass Niederschläge aus dem einen Jahr (z.B. Schnee im Dezember) in der Wasserbilanz erst im nächsten Jahr zum Abfluss gezählt werden, da sie beispielsweise erst

dann abflusswirksam sind (weil der Schnee z.B. erst im März schmilzt). «Jahr 2000» heisst also strenggenommen «hydrologisches Jahr 1999/2000», da die Daten der ersten drei Monate (Oktober bis Dezember) aus dem Jahr 1999 stammen.

Diese beiden Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Niederschlagswerte zu tief sind. Insbesondere im Winter fällt auf, dass nicht genug Niederschlag fällt, um die Schneedecke zu bilden. Dies führt im Modell dazu, dass der berechnete Abfluss zu tief ist.

Wind kann Messfehler in Niederschlagsmessungen verursachen. Insbesondere bei Schneefall können diese Abweichungen bedeutend sein.¹⁹ Schnee wird von Wind leichter abgelenkt als Regen. Dies führt dazu, dass Niederschlagsmengen bei Schneefall häufig unterschätzt werden. Dies könnte eine mögliche Erklärung für die zu tiefen Niederschlagswerte sein.

Um diese Ungenauigkeit zu korrigieren, wurde ein Schneekorrekturfaktor eingefügt. Das heisst Niederschlag, der als Schnee fällt, wird im Modell mit einem sogenannten Schneekorrekturfaktor multipliziert. Man nimmt an, dass immer ein Teil des gefallenen Schnees nicht gemessen wird. Mit diesem Korrekturfaktor wird dieser Messfehler «behoben».

¹⁹Vgl. Seibert et al. 2021, S. 96.

Um den Schneekorrekturfaktor zu bestimmen, wurde ähnlich vorgegangen wie bei der Kalibrierung der anderen Parameter. Die Schwellentemperatur t_t wurde auf 2°C festgelegt und in Abbildung 35 ist zu sehen wie sich die Schneedecke je nach Schneekorrekturfaktor verändert.

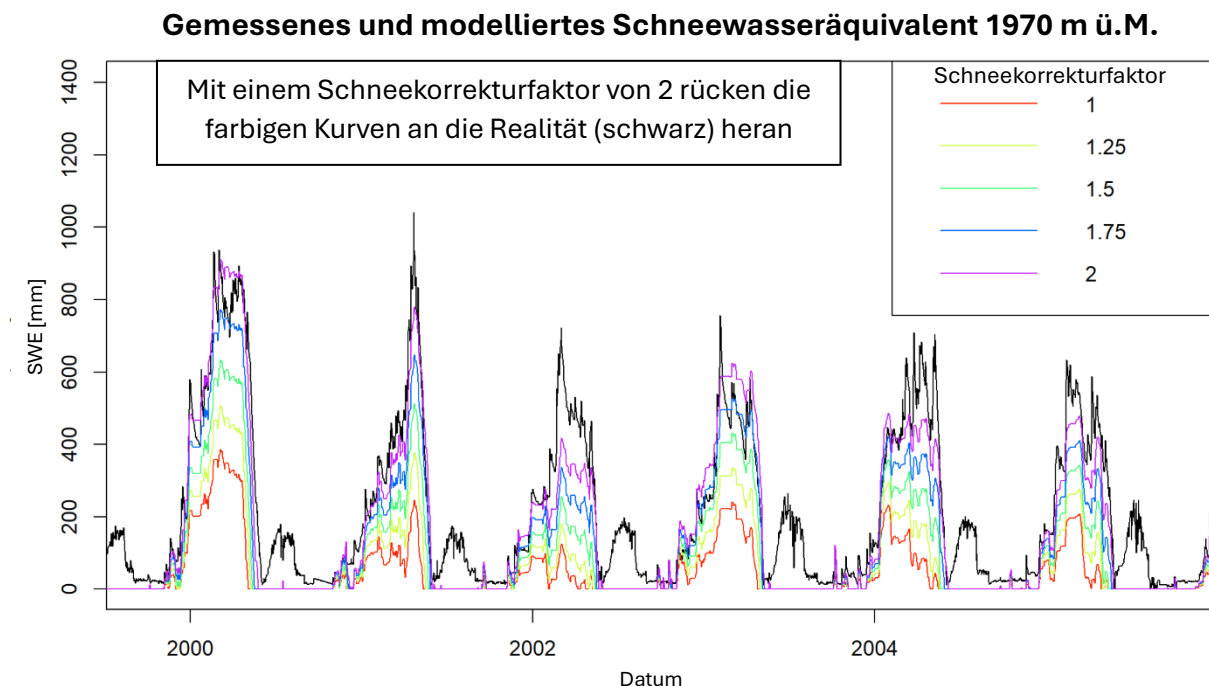


Abbildung 35: Plot SWE Schneekorrekturfaktor (eigener Plot 2024, erstellt mit Code von Michael Fehlmann).

Mit dieser Methode rücken die farbigen (die berechneten) Kurven näher an die schwarze (gemessene) Kurve. Die modellierte Schneedecke ist somit näher an der Realität. Allein mit diesen Überlegungen, wäre die violette Kurve der schwarzen am nächsten, der Korrekturfaktor 2 also am besten geeignet.

Um die Grösse dieses Schneekorrekturfaktors weiter zu prüfen, wurde eine weitere Überlegung gemacht:

	Jahr	Nieder-schlag	Verdunstung	Abflusshöhe gemessen	Abflusshöhe berechnet	Unterschied
1	2000	1351.2	562.6375	1031.8807	1112.2442	80.363490
2	2001	1678.4	577.8003	1295.7016	1350.4873	54.785685
3	2002	1331.8	552.8737	1041.2711	1030.7578	-10.513304
4	2003	1303.3	559.0776	1096.3675	1092.5680	-3.799495
5	2004	1413.3	542.9438	1025.7598	1089.0796	63.319806
6	2005	1251.9	528.5063	918.9219	936.9382	18.016243
7	2006	1392.7	550.3230	1140.3156	1093.3245	-46.991137
8	2007	1536.5	570.5125	1194.9967	1184.4158	-10.580887
9	2008	1151.8	533.6278	982.1644	919.9452	-62.219182
10	2009	1127.0	527.9896	895.6686	910.8835	15.214915
11	2010	1273.5	511.7984	920.6597	882.3886	-38.271176

Abbildung 36: Tabelle Wasserbilanz 2000-2010 mit Berücksichtigung Schneekorrekturfaktor von 1.6, Angaben in mm (eigene Tabelle 2024).

Auch die Wasserbilanz (Abbildung 36) verändert sich mit dem Schneekorrekturfaktor: Wenn der Niederschlag, der als Schnee fällt, mit einem Faktor multipliziert wird, führt dies automatisch dazu, dass mehr Wasser im System ist. Damit ist auch der Abfluss grösser.

Wenn man im Modell den Schneekorrekturfaktor verändert und die Wasserbilanz betrachtet (jährliche gemessene/berechnete Abflusshöhen), dann zeigt sich, dass man mit

einem Schneekorrekturfaktor von 1.6 auf die genauesten Resultate kommt.

Abbildung 36 zeigt, dass der Abfluss mit dieser Anpassung teilweise zwar immer noch unterschätzt wird (negative Werte in der Spalte «Unterschied»). Weil es aber auch Jahre gibt, in welchen

der berechnete Abfluss mit der Berücksichtigung eines Schneekorrekturfaktors von 1.6 nun zu gross ist (positive Werte in der Spalte «Unterschied»), scheint über alles betrachtet der Faktor 1.6 doch passend zu sein. Ein Schneekorrekturfaktor von 2.0 ist jedenfalls zu hoch.

5.1.2. Anpassung des Niederschlags an die Höhenzonen?

Die zu tiefen Niederschlagswerte könnten aber auch darauf zurückzuführen sein, dass die Niederschlagsmengen mit der Höhe grundsätzlich zunehmen. Mit der Höhe nimmt die Temperatur und damit auch der Sättigungsdampfdruck ab. Das heisst, die maximale Menge an Wasserdampf, die die Luft halten kann, nimmt ab.²⁰ Dies führt grundsätzlich zu mehr Niederschlag. In der Realität ist dies aber nicht ganz so einfach. Es gibt viele weitere Einflussfaktoren, wie z.B. die tatsächlich vorhandene Luftfeuchte oder die Windverhältnisse. Zwischen dem Standort der Niederschlagsmessstation Boltigen und der IMIS-Schneestation Färnel, wo die Schneehöhendaten herkommen, liegt ein Höhenunterschied von mehr als 1000 m. Im Modell wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Niederschlagshöhen überall gleich sind. Diese vereinfachende Annahme könnte auch die Ursache für die vom Modell unterschätzte Schneedecke sein.

Um diese Vermutung zu untersuchen, wurden Niederschlagsdaten im Sommer (die Messstation in Färnel misst Schnee nicht mit, daher sind die Daten im Winter nicht vergleichbar) der beiden Stationen verglichen. Dieser Vergleich zeigte jedoch, dass die Unterschiede kein eindeutiges Muster aufzeigen. Tendenziell fällt bei der oberen Station mehr Niederschlag. Es gibt aber vereinzelt auch Jahre, in denen die untere Station mehr Niederschlag gemessen hat als die obere.

Ich habe versucht, einen Niederschlagsgradienten im Modell zu berücksichtigen (10% / 100 m)²¹. Die Resultate, also die berechneten Niederschlagsmengen (insbesondere auf hohen Höhen) schienen aber nicht mehr plausibel (teilweise mehr als 10'000 mm Niederschlag in einem Jahr) und der entsprechend berechnete Abfluss war viel zu hoch (ca. doppelt so viel wie gemessen). Die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhen über das ganze Einzugsgebiet liegen mit dieser Anpassung zwischen 4000 und 6000 mm. Realistisch wären hier ca. 1500 mm.

Dass dieser Ansatz hier keine sinnvollen Resultate liefert, liegt vermutlich daran, dass die Zunahme von Niederschlagsmengen mit der Höhe, insbesondere in hohen Höhen, ziemlich komplex ist. (vgl. Abbildung 44, S. 55 im Anhang)

Die Anpassung der Niederschlagsmengen an die verschiedenen Höhenzonen wurde nicht im Modell berücksichtigt und ein Schneekorrekturfaktor von 1.6 wurde im Modell verwendet. Dieser Wert wurde gewählt, da die modellierten jährlichen Abflusshöhen (siehe Abbildung 36) damit am nächsten an den gemessenen liegen.

Zusammengefasst gibt es durch die Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors im Modell mehr Schnee. Dies führt zu mehr Schneeschmelze, was zusätzlichen Abfluss bedeutet. Insbesondere bei der Modellierung von Spitzenabflüssen im Winter oder im Frühling, bei denen Schneeschmelze eine wichtige Rolle spielt, kann die Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors zu einer genaueren Modellierung des Abflusses führen.

²⁰ Vgl. Brönnimann 2018, S. 64.

²¹ Vgl. Seibert 2014, S. 8.

5.1.3. Auswirkungen des Schneekorrekturfaktors auf das Resultat

Beim Hochwasser im Dezember 2023 (S. 26) spielte die Schneeschmelze eine (untergeordnete) Rolle. Der berechnete Abfluss verändert sich durch die Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors wie folgt (vgl. Abbildung 37): Die rosa Linie stellt den berechneten Abfluss ohne diese Anpassung dar, die grüne mit der Anpassung. Schwarz gestrichelt sind die Messdaten.

Abfluss Simme, Effekt des Schneekorrekturfaktors

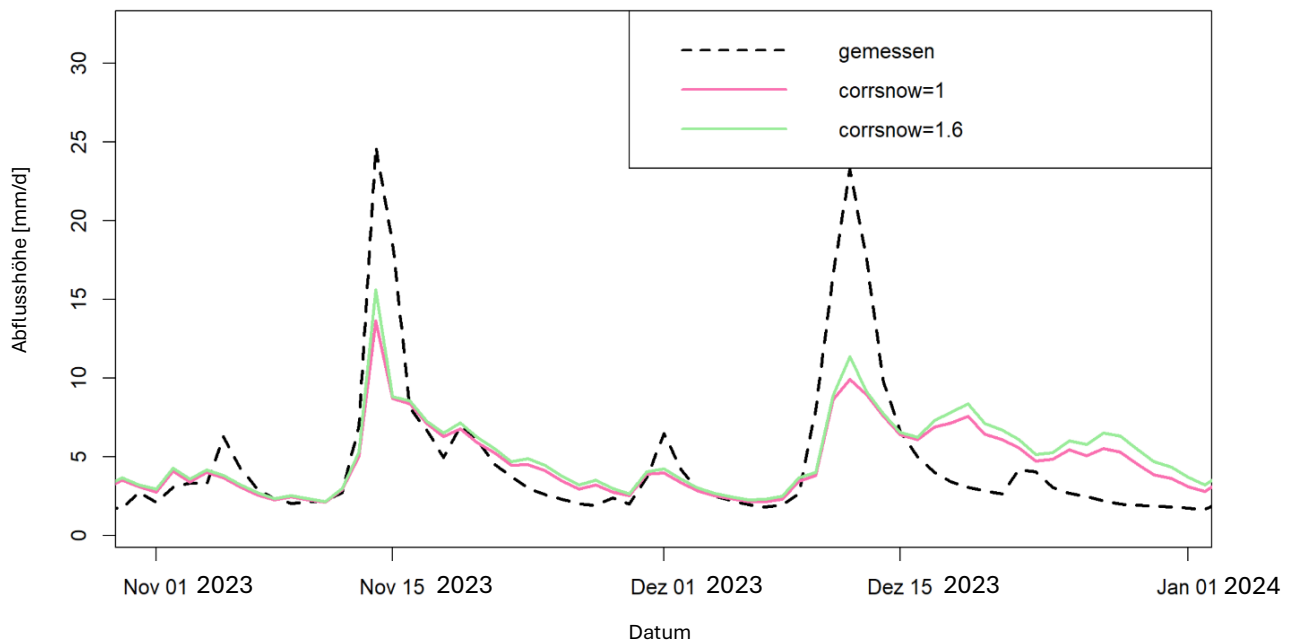


Abbildung 37: Plot Abfluss Simme, Effekt corrnsnow (eigener Plot 2024).

Die Abflussspitzen der grünen Linie liegen etwas näher an der gemessenen Abflussspitze als die der rosa Linie.

Die Modellierung der Schneedecke in dem entsprechenden hydrologischen Jahr (1970 m ü.M.):

SWE 1970 m ü.M. Effekt des Schneekorrekturfaktors

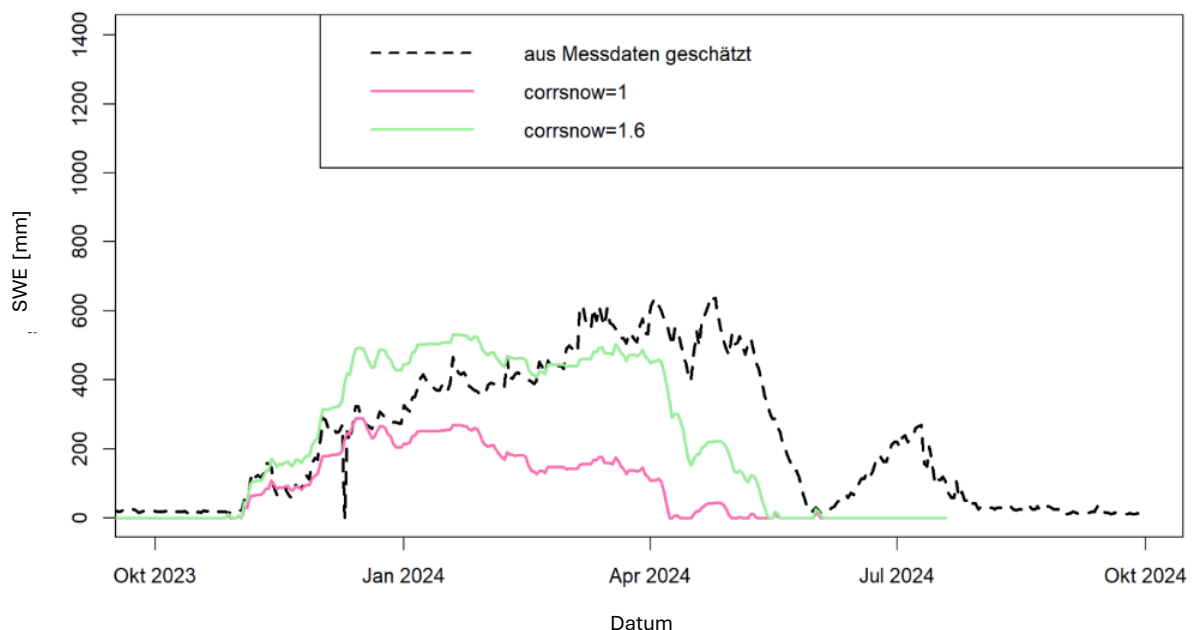


Abbildung 38: Plot SWE 1970 m ü.M., Effekt corrnsnow (eigener Plot 2024).

Dass die Unterschiede in den Abflussmengen (mit und ohne Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors) hier nicht so gross sind, hängt vermutlich damit zusammen, dass die schneebedeckte Fläche auch nach diesem Ereignis noch relativ gross war.

Die mögliche Schneeschmelze wird im Modell abhängig von der Temperatur berechnet (vgl. Kapitel «Vorgehen Programmierung Schneeroutine», S. 9). Nur wenn die mögliche Schneeschmelze grösser ist als die vorhandene Schneedecke (wenn nicht genug Schnee, der geschmolzen werden kann, vorhanden ist) spielt die tatsächlich vorhandene Schneedecke eine Rolle. Das heisst, es kommt nicht darauf an, ob die Schneedecke 100 mm SWE oder nur 10mm SWE enthält, wenn die berechnete mögliche Schneeschmelze z.B. 6 mm beträgt. In beiden Fällen schmilzt 6 mm. Wenn die mögliche Schneeschmelze aber 20 mm ist, dann gibt es bei einer Schneedecke von 100 mm SWE 20 mm Schneeschmelze. Für den Fall, dass das SWE aber nur 10 mm ist, können auch nur 10 mm schmelzen. Nur da, wo der ganze Schnee schmilzt (d.h. nach diesem Tag liegt dort gar kein Schnee mehr, sofern es nicht wieder schneit), hat die Dicke der Schneedecke und somit der Schneekorrekturfaktor einen direkten Einfluss auf die Schneeschmelze und somit auf den Abfluss.

Im Falle des Hochwassers im Dezember 2023 war auch nach dem Hochwasser noch eine relativ **grosse Fläche schneebedeckt (1)²²**. Auch ohne Schneekorrekturfaktor sind es noch 68.4%. Das heisst bei 68.4% des Einzugsgebietes hatte der Schneekorrekturfaktor gar keinen Einfluss auf die Schneeschmelze im Modell in den Tagen vor dem Hochwasser. Dies erklärt vermutlich, weshalb die durch die Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors verursachten Unterschiede in der **durchschnittlichen Schneeschmelze über das ganze Einzugsgebiet (2)** relativ klein sind. Somit sind auch die zusätzlichen **Abflussmengen, welche durch die Berücksichtigung des Schneekorrekturfaktors entstehen (3)** relativ klein.

Im Frühling, wenn die ganze Schneedecke schmilzt, hat der Schneekorrekturfaktor einen wesentlich grösseren Einfluss auf den modellierten Abfluss. Vergleicht man beispielsweise die Schneeschmelze in Abbildung 38 von April bis ca. Juni: bei der rosa Linie beträgt die Schneeschmelze grob knapp 200mm, bei der grünen Linie sind es grob ca. 500mm, was schon deutlich näher an den Messdaten liegt. Dieser Unterschied wird auch auf den modellierten Abfluss einen deutlich grösseren Effekt zeigen.

Beim betrachteten Hochwasser spielte die Schneeschmelze vermutlich aber nur eine untergeordnete Rolle. Die Hauptursache dieses Hochwassers waren die **hohen Niederschläge (4)**, die aufgrund der **Temperatur (5)** bis in hohe Höhen als Regen fielen. Trotzdem wurde dieses Ereignis ausgewählt, um die Effekte der Berücksichtigung eines Schneekorrekturfaktors aufzuzeigen, da aufgrund der Datenverfügbarkeit, keine grosse Auswahl an Hochwassern, bei denen Schneeschmelze eine Rolle spielte, vorhanden war.

5.1.4. Weitere Probleme der Repräsentativität der Niederschlagsdaten

Nicht nur bei Schneefall, sondern auch wenn der Niederschlag als Regen fällt, kann es sein, dass die Messdaten nicht repräsentativ für das ganze Einzugsgebiet sind. Insbesondere

²² **Diese violetten Zahlen sind Verweise auf Werte in den Tabellen auf S.27/28. Seite 27 zeigt die vom Modell berechneten Werte (mit Schneekorrekturfaktor). S. 28 zeigt die Werte, wie sie aussehen würden, wenn man keinen Schneekorrekturfaktor berücksichtigt. Die Werte von bspw. 2.1 und 2.2 sollten nebeneinander betrachtet werden.**

Starkniederschlagsereignisse sind oft kleinräumig. Es ist also beispielsweise möglich, dass das Zentrum einer Gewitterzelle an der Station vorbeizieht.

Um dies zu vermeiden und allgemein zuverlässigere Niederschlagsdaten zu erhalten, werden für solche Modelle häufig mehrere Niederschlagsmessstationen verwendet. Als Input für das Modell nimmt man dann ein gewichtetes Mittel der Messungen der verschiedenen Standorte. Darauf wurde in dieser Arbeit aber verzichtet.

5.2. Kalibrierung

Die Kalibrierung hat, wie in den Plots auf S. 19 deutlich erkennbar ist, einen wichtigen Einfluss auf die Qualität der Abflussmodellierungen im Allgemeinen. Die berechneten Abflussmengen liegen nach der Kalibrierung deutlich näher an den gemessenen als vor der Kalibrierung.

Folgend werden einige Parameter, die für die Spitzenabflussmodellierung besonders entscheidend sind, speziell untersucht. **Am Beispiel des Sommerhochwassers 2005 (S.24) wird aufgezeigt, wie sich die Einstellung dieser Parameter konkret auf die berechneten Abflussmengen auswirkt.** Dieses Ereignis befindet sich (wie auch die anderen Im Kapitel «Resultat» behandelten Hochwasser) ausserhalb des Kalibrierungszeitraums. Das heisst, die Parameter wurden nicht an dieses Ereignis konkret angepasst. Das Ziel der Kalibrierung ist es, dass sie möglichst gut auch auf andere Zeiträume angewendet werden kann.

5.2.1. uzl (upper zone limit)

Beim Parameter «uzl» (upper zone limit) handelt es sich um einen Schwellenwert im oberen Grundwasserspeicher. Wenn dieser Schwellenwert übertroffen wird, wird zusätzlich zu den üblichen Abflüssen q_1 (Abfluss vom oberen Grundwasserspeicher) und q_2 (Abfluss vom unteren Grundwasserspeicher) auch ein Abfluss q_0 gebildet.

Betrachtet wird der obere Grundwasserspeicher (uz). Dieser ist ein Einzellinearspeicher (vgl. S. 12). Wenn die Wassermengen in diesem Speicher den Schwellenwert uzl übertreffen, wird die Wassermenge oberhalb dieses Wertes wie ein eigener, zusätzlicher Einzellinearspeicher behandelt. Sie wird mit einem eigenen Speicherkoeffizienten multipliziert, der i.d.R. sehr hoch ist (bis zu 0.9).

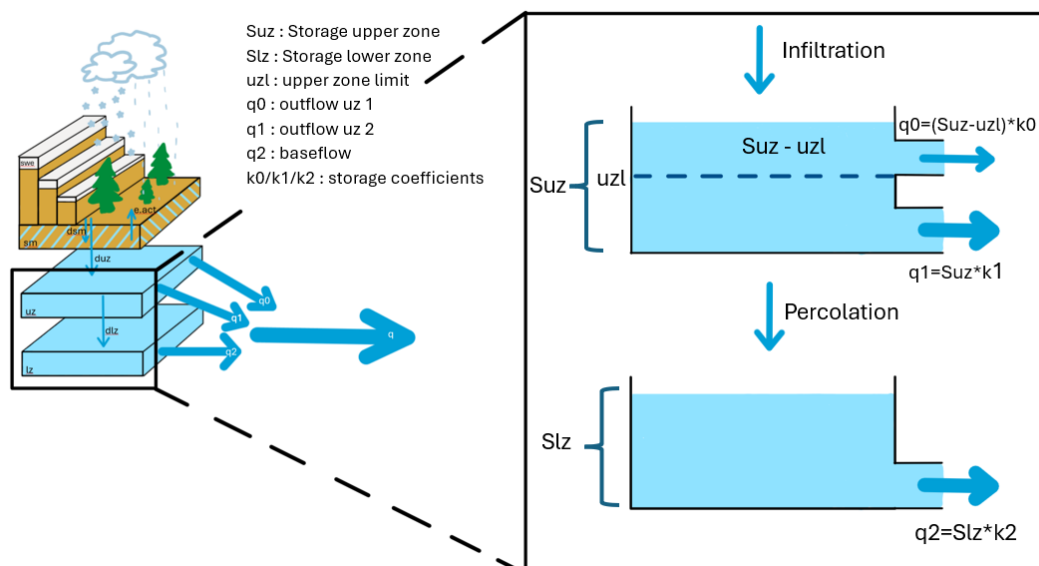


Abbildung 39: Illustration Parameter uzl (eigene Darstellung 2024, basierend auf: Seibert 2014, S. 14).

Konkret heisst das, dass wenn der obere Grundwasserspeicher grosse Wassermengen enthält, ein zusätzlicher Abfluss vom Modell berechnet wird, was zu sehr hohen Abflussmengen führen kann.

Die Kalibrierung des Parameters uzl ist für die Qualität der Spitzenabflussmodellierung besonders wichtig, da dieser Parameter festlegt, ab wann dieser «zusätzliche» Abfluss gebildet wird. Wenn man sich die Anpassung dieses Parameters in der Abbildung 39 vorstellt: wenn der Parameter uzl auf einen höheren Wert eingestellt wird, verschiebt man die gestrichelte Linie « uzl » weiter nach oben. Der Speicher muss grössere Wassermengen enthalten, damit der Abfluss q_0 zum Zug kommt. Wird der Parameter uzl auf einen tieferen Wert eingestellt, wird die gestrichelte Linie nach unten verschoben. Kleinere Wassermengen genügen, damit der zusätzliche Abfluss vom Modell berechnet wird.

Wenn der Parameter uzl zu hoch ist, führt dies dazu, dass der Abfluss q_0 zu selten oder sogar nie gebildet wird. Spitzenabflüsse werden dadurch unterschätzt. Wenn er hingegen zu tief eingestellt ist, kommt der Abfluss q_0 zu oft zum Zug. Insbesondere kleinere Abflussspitzen werden dadurch deutlich überschätzt.

In diesem Plot (Abbildung 40) wird am Beispiel des Sommerhochwassers 2005 (S. 24) dargestellt, wie sich der berechnete Abfluss anpasst, wenn der Parameter uzl verändert wird. Die rosa Linie zeigt den berechneten Abfluss für $uzl = 10$, dieser Wert entspricht dem Wert «lower» (siehe Abbildung 17), $uzl = 70$ (= «upper») ist in grün dargestellt. In blau werden die Berechnungen mit dem in der Kalibrierung festgelegten Wert für uzl abgebildet.

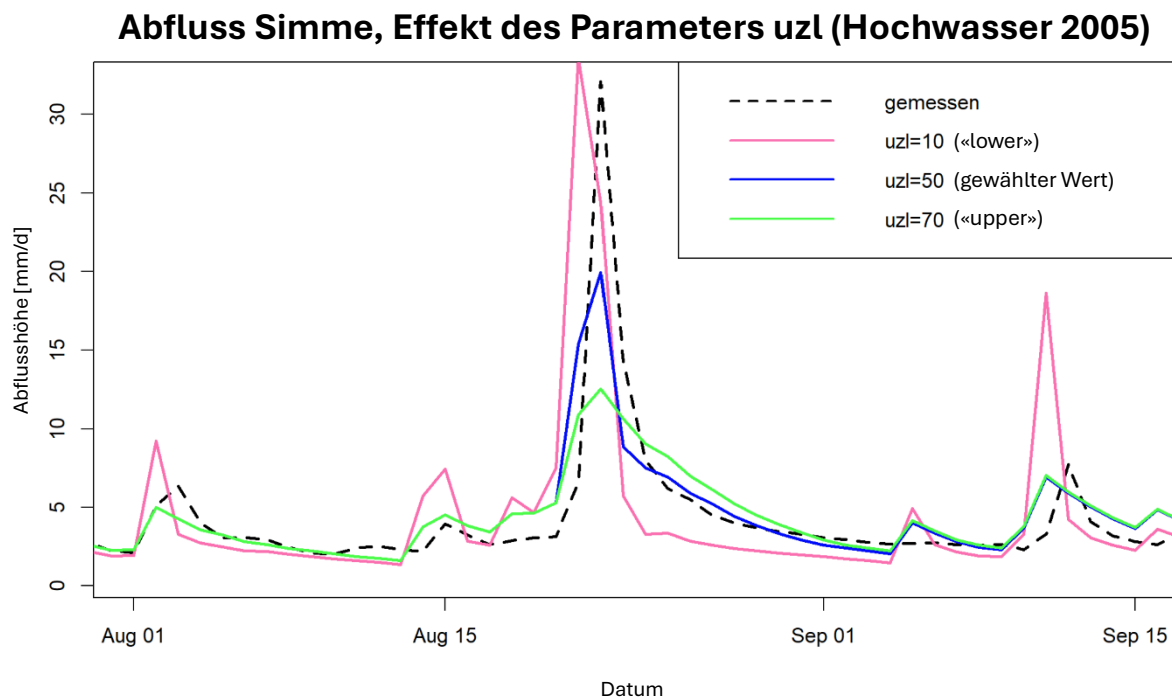


Abbildung 40: Plot Abfluss Simme, Effekt uzl (eigener Plot, 2024).

Es ist deutlich erkennbar, dass bei $uzl = 10$ die kleineren Abflussspitzen überschätzt werden, dieser Wert ist also zu tief. Bei $uzl = 70$ wird die Abflussspitze vom 22. August deutlich unterschätzt, dieser Wert ist also zu hoch. Mit $uzl = 50$ (blau) werden die kleineren Abflussspitzen nicht bedeutend überschätzt (da wo die blaue Linie nicht erkennbar ist, liegt sie unter der grünen), der betrachtete Spitzenabfluss vom 22. August wird aber immer noch unterschätzt. Möglicherweise hätte man hier mit einem tieferen Wert (zwischen 10 und 50) ein genaueres Resultat für den

Abfluss vom 22. August erzielt. Gleichzeitig würden aber vermutlich die Abweichungen bei den kleineren Abflussspitzen zunehmen.

5.2.2. Speicherkoeffizient k_0

Der Parameter k_0 ist der Speicherkoeffizient, der für das Wasservolumen entscheidend ist, welches über dem Schwellenwert uzl liegt. Das Wasservolumen, welches über dem Schwellenwert uzl liegt, wird mit diesem multipliziert. Dieses Produkt bildet den Abfluss q_0 . Die beiden Parameter uzl und k_0 kommen also nur zum Einsatz, wenn die Wassermengen im oberen Grundwasserspeicher besonders hoch sind. Dies kann zum Beispiel bei Starkniederschlagsereignissen der Fall sein. Bei der Modellierung von Hochwassern spielt also auch der Speicherkoeffizient k_0 eine wichtige Rolle, da er darüber entscheidet, wie gross dieser zusätzliche Abfluss ist.

Ist er zu hoch eingestellt, ist die Abflussspitze zu hoch und die Rezessionskurve zu steil. Das heisst, der Rückgang der Abflussmengen in den Tagen nach dem Spitzenabfluss ist zu schnell. Schon bald nach dem Ereignis werden die Abflussmengen unterschätzt. Der Speicher wird im Modell also zu schnell geleert.

In diesem Plot (Abbildung 41) wird ebenfalls am Beispiel des Sommerhochwassers 2005 aufgezeigt, wie die Einstellung des Parameters k_0 die Modellierung eines konkreten Hochwasserereignisses beeinflusst.

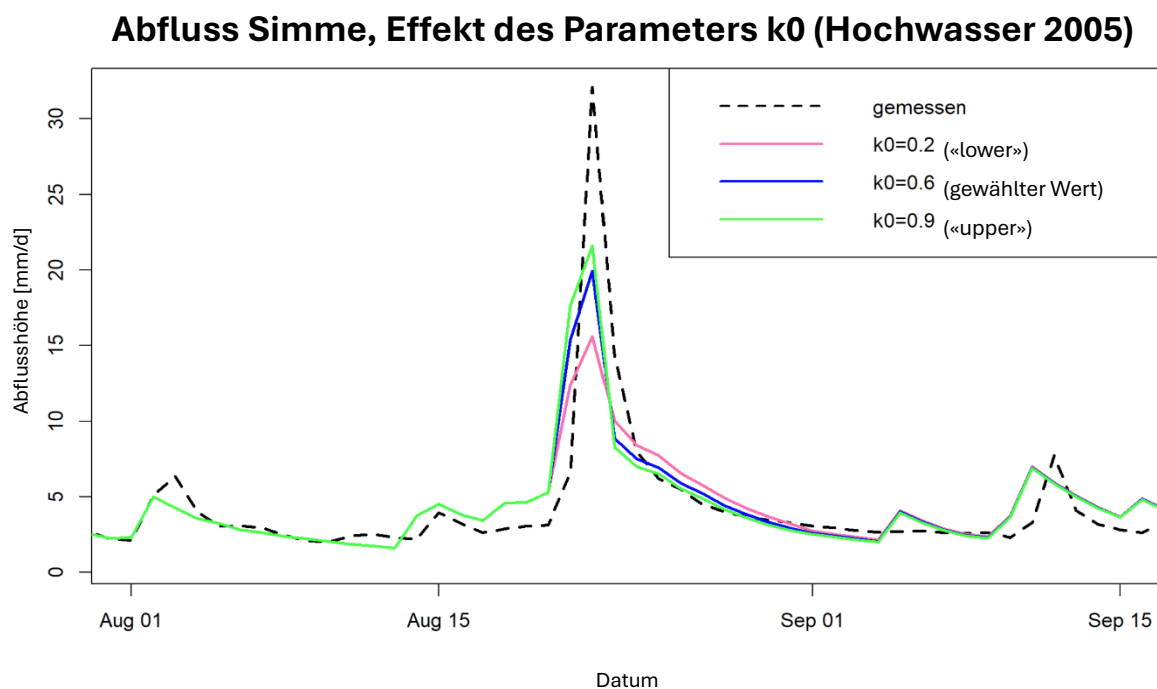


Abbildung 41: Plot Abfluss Simme, Effekt k_0 (eigener Plot 2024).

In diesem Plot ist der Effekt der Einstellung des Parameters k_0 klar ersichtlich. Je höher der Parameterwert, desto höher ist die modellierte Abflussspitze und desto steiler ist die Rezessionskurve.

Für dieses konkrete Ereignis hätte man mit $k_0 = 0.9$ genauere Resultate erhalten. Die grüne Spitze ($uzl = 0.9$) liegt näher an der schwarz gestrichelten (= Messdaten) als die blaue ($k_0 = 0.6$). Andere Abflussspitzen würden mit dieser Einstellung aber vermutlich überschätzt werden (nicht in diesem Plot erkennbar).

5.2.3. Speicherkoeffizient k_1

Der Parameter k_1 ist wie der Parameter k_0 ein Speicherkoeffizient. Er wird mit dem *gesamten* oberen Grundwasserspeicher uz multipliziert, ist aber deutlich tiefer als k_0 . Der Speicherkoeffizient k_1 bestimmt also wie gross die Abflussmengen aus dem oberen Grundwasserspeicher sind, wie schnell der Speicher geleert wird.

Die Kalibrierung dieses Parameters beeinflusst, wie schnell das Wasser aus dem oberen Grundwasserspeicher im Allgemeinen abfließt. Der zu k_1 gehörende Abfluss q_1 kommt viel häufiger zum Zug als q_0 . Da der «normale/alltägliche» Abfluss auch den Abfluss bei einem Hochwasserereignis beeinflusst, ist auch dieser Parameter für die Spitzenabflussmodellierung entscheidend.

Im Gegensatz zu dem Parameter k_0 ist der Parameter k_1 meistens von Bedeutung und durch die Anpassung des Parameters k_1 ist über das ganze Jahr eine Veränderung zu sehen. Wird der Parameter k_0 angepasst, gibt es nur bei den Spitzenabflüssen Änderungen.

Erneut wird anhand des Sommerhochwassers 2005 der Effekt des Parameters k_1 erläutert (Abbildung 42). Ist der Parameter k_1 sehr tief eingestellt (hier rosa) wird der Abfluss zwischen den Abflussspitzen überschätzt, da der Speicher zu langsam geleert wird. Dies führt dazu, dass die Wassermenge im Speicher häufig überschätzt wird. Wenn also bereits viel Wasser in diesem Speicher ist und dann z.B. an einem Tag viel Niederschlag fällt, ist die Wassermenge, welche über dem Schwellenwert uz_l liegt, grösser. Dies führt dazu, dass der Abfluss q_0 grösser ist. Das heisst also, dass die Abflussspitze trotz einem tieferen Speicherkoeffizienten k_1 höher sein kann als bei einem grösseren Speicherkoeffizienten k_1 . Dies erklärt vermutlich, weshalb der berechnete Wert für den 22. August grösser ist bei $k_1 = 0.01$ (= rosa) als bei $k_1 = 0.15$ (= blau). Ist der Speicherkoeffizient k_1 zu hoch eingestellt (hier grün), werden insb. kleinere Abflussspitzen überschätzt und der Abfluss zwischen den Abflussspitzen wird unterschätzt, da der Speicher im Modell zu schnell geleert wird.

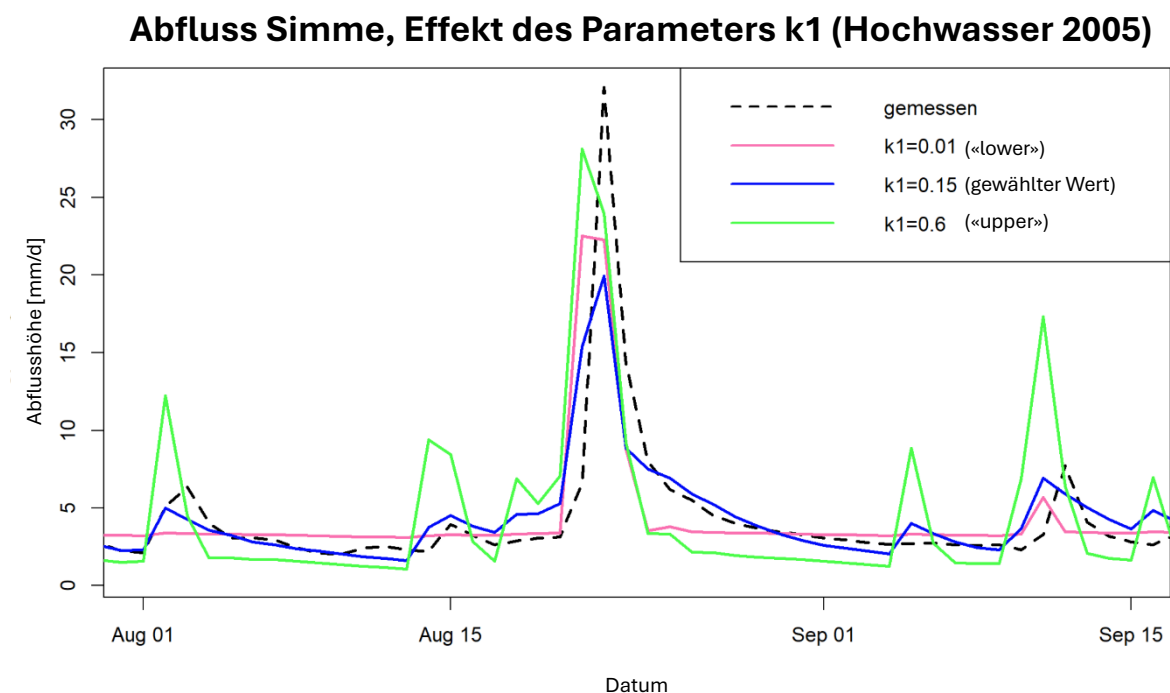


Abbildung 42: Plot Abfluss Simme, (eigener Plot 2024).

5.2.4. Geeigneter Kalibrierungszeitraum

Um ein gut kalibriertes Modell zu erhalten, das auch für Zeiträume ausserhalb des Kalibrierungszeitraums aussagekräftige Resultate berechnen kann, muss ein geeigneter Kalibrierungszeitraum gewählt werden. Das heisst, der betrachtete Zeitraum sollte möglichst verschiedene Abflüsse abdecken.

Möglicherweise hätte die Kalibrierung in dieser Arbeit bessere Resultat gezeigt, wenn eine andere Zeitperiode dafür ausgewählt worden wäre. In den betrachteten fünf Jahren (2000-2004) wurden keine sehr hohen Abflusswerte gemessen. Der höchste gemessene Wert war $63.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.3. Flüssigwassergehalt

Wenn Regen auf eine Schneedecke fällt, fliesst dieser häufig nicht direkt ab. Die Schneedecke kann bis zu ca. 10% des eigenen Schneewasseräquivalents in flüssiger Form speichern. Wenn also eine Schneedecke zu schmelzen beginnt oder Regen darauf fällt, müssen diese 10% zuerst überschritten werden, bevor Wasser abfließt.

Im Modell, das in dieser Arbeit verwendet wurde, wurde dieser sogenannte Flüssigwassergehalt aus Gründen der Komplexität nicht mitberücksichtigt. Wenn Niederschlag als Regen fällt oder Schnee schmilzt, geht das Wasser im Modell direkt in den Boden und wird als Input in die Bodenroutine gesehen. In einem solchen Fall kann der Input in die Bodenroutine im Modell also höher sein als die tatsächliche Infiltration, die in der Natur stattfindet.

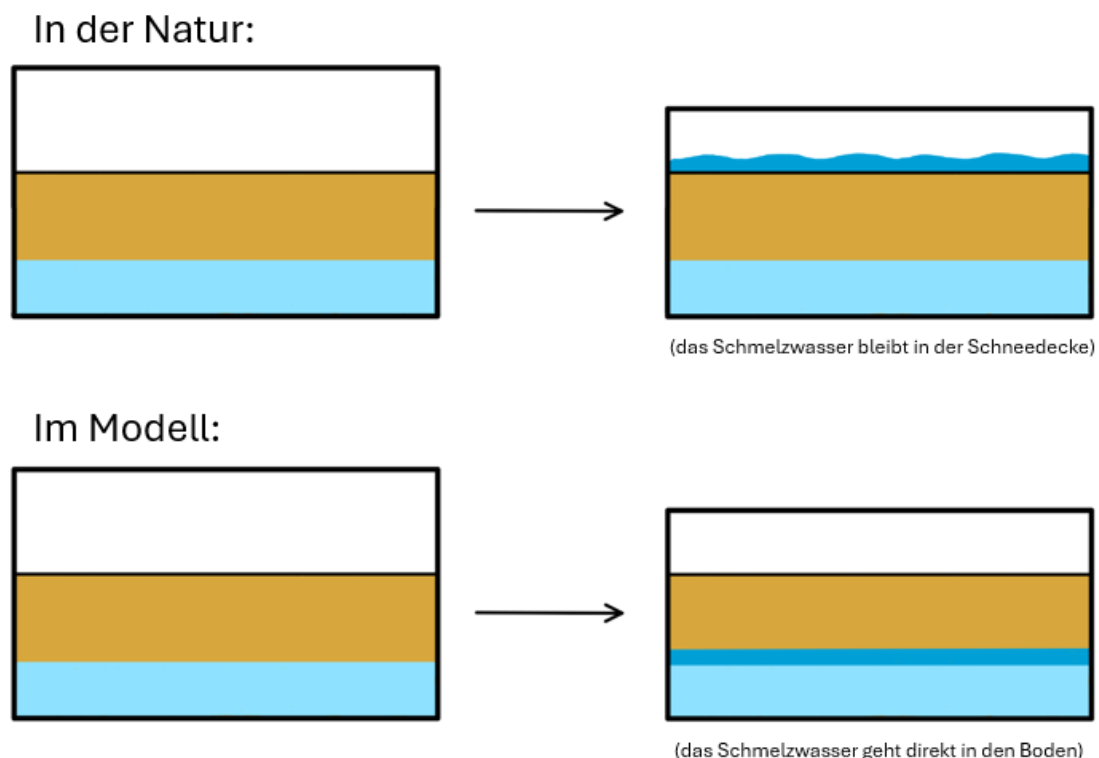


Abbildung 43: Illustration Flüssigwassergehalt (eigene Darstellung 2024).

Für das **Frühlingshochwasser 1999** (S. 22) könnte dies eine Erklärung sein, weshalb der Abfluss vom Modell überschätzt wurde. **Schnee, der in den Tagen vor dem Hochwasser geschmolzen ist (1)²³**, geht im Modell direkt in den Boden. In der Natur wird ein Teil davon zuerst zwischengespeichert. Nicht das ganze Schmelzwasser geht direkt in den Boden. Somit wurden die Wassermengen, welche sich in den Speichern im Boden befinden, vermutlich überschätzt.

Die **starken Niederschläge (2)** in Kombination mit dem gesättigten Boden führten hier zum Hochwasser. Eine Überschätzung der Wassermengen in den Bodenspeichern könnte eine Ursache für die **Überschätzung der Abflussspitze (3)** des Modells sein, da der Abfluss aus Produkten von den Speichern mit einem Speicherkoeffizienten berechnet wird. Wenn der Speicher überschätzt wird, wird entsprechend auch der Abfluss (das daraus berechnete Produkt) überschätzt. Ein weiterer Punkt, der auffällt, ist, dass bereits am **Tag vor dem eigentlichen Hochwasser, der Abfluss vom Modell deutlich überschätzt wurde (4)**. Dies spricht ebenfalls dafür, dass die Infiltration in den Boden in dieser Zeit überschätzt wurde.

Dass der Regen, der auf die Schneedecke fiel und im Modell direkt abfließt, die Ursache ist für die Überschätzung des Abflusses scheint jedoch unwahrscheinlich. Da es schon in den Tagen vor dem Hochwasser **relativ warm (5)** war und **viel Schnee geschmolzen (1)** war, war der Flüssigwassergehalt von ca. 10% vermutlich schon erreicht. Regen konnte also nicht «zwischengespeichert» werden.

Es gibt weitere Größen, die die Qualität von Spitzenabflussmodellierungen beeinflussen. Die drei betrachteten Aspekte «Repräsentativität der Niederschlagsmessdaten», «Kalibrierung» und «Flüssigwassergehalt» wurden in dieser Arbeit hervorgehoben, da sie als besonders wichtig beurteilt wurden.

²³ Diese violetten Zahlen sind Verweise auf Werte in der Tabelle auf S. 23.

6. Schlusswort

Im Rahmen dieser Maturitätsarbeit habe ich gelernt, was ein hydrologisches Modell ist, wie es funktioniert und wie man damit arbeitet. Die hydrologischen Grundlagen, welche ich letztes Jahr im Rahmen meines Schüler:innenstudiums gelernt hatte, konnte ich auf ein Beispiel übertragen. Es war faszinierend, wie diese hydrologischen Prozesse mathematisch beschrieben und nachgebildet werden können.

Die hydrologischen Grundlagen konnte ich vertiefen. Ich habe auch sehr viel Neues gelernt, insbesondere im Zusammenhang mit hydrologischen Berechnungen. Im Rahmen dieser Arbeit habe ich ausserdem die Grundlagen der Programmiersprache R gelernt. Herausfordernd waren auch die Planung und Zeiteinteilung, die eine so lange Arbeit erforderlich machen.

Was mir nicht immer leichtgefallen ist, war es, einzelne Teile abzuschliessen und so zu belassen, wie sie waren. So musste ich beispielsweise die Kalibrierung an einem gewissen Punkt abschliessen, obwohl ich noch lange daran hätte weiterarbeiten können. Bei jedem Durchlesen habe ich mich gefragt, ob gewisse Parameter nicht noch besser hätten kalibriert werden können.

Besonders gut gefallen hat mir das Schreiben des Codes für die Schneeroutine in der Programmiersprache R. Das Umsetzen der Theorie und der Formeln in Code hat Spass gemacht.

Müsste ich nochmals beginnen, würde ich die Zeiteinteilung noch sorgfältiger und mit grösseren Reserven vornehmen, um den Stress am Schluss etwas zu reduzieren. Auch wäre es gut gewesen, die Datenreihen schon früher auf Plausibilität zu prüfen. Als ich erst zwei Monate vor der Abgabe merkte, dass die Niederschlagsdaten in Färmel Schnee nicht enthalten, sorgte dies für kurze Aufregung.

Wenn ich diese Arbeit jetzt noch fortführen würde, könnte man sich beispielsweise mit der Modellierung des Flüssigwassergehaltes nochmals auseinandersetzen. Die Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Simme wäre ebenfalls eine spannende Weiterführung.

Vor allem das Thema dieser Arbeit hat mir sehr gut gefallen. Es hat mir Spass gemacht, diese Arbeit zu verfassen.

7. Danksagung

Diese Arbeit wurde nur ermöglicht durch die Unterstützung und Betreuung durch Tobias Riebler und Michael Fehlmann. Ohne die vielen hilfreichen Besprechungen, diversen E-Mails, wertvollen Inputs und das von Michael Fehlmann zur Verfügung gestellte Material wäre diese Arbeit so nicht zustande gekommen. Ich danke dafür herzlich!

8. Quellen- und Literaturverzeichnis

Brönnimann, Stefan (2018): Klimatologie. Bern.

Bundesamt für Umwelt (BAFU): Hydrologische Daten und Vorhersagen, Simme-Oberwil 2151. <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/2151> (Zugriff: 05.12.2024).

Bundesamt für Umwelt (BAFU): Wasserhaushalt der Schweiz. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/zustand-der-gewaesser/wasserhaushalt-schweiz.html> (letzte Änderung: 04.06.2024; Zugriff: 08.10.2024).

Eckhardt, Klaus (2014): Hydrologische Modellierung – Ein Einstieg mithilfe von Excel. Berlin.

HBV hydrology model. In: Wikipedia. Bearbeitungsstand: 17.05.2024. https://en.wikipedia.org/wiki/HBV_hydrology_model (Zugriff: 07.10.2024).

Hendriks, Martin R. (2010): Introduction to Physical Hydrology. Oxford.

Jonas, Tobias / Marty, Christoph / Magnusson, Jan (2009): Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. In: Journal of Hydrology 378 (2009), S. 161 - 167.

Rodhe, Allan (2020): Field capacity and wilting point. EarthScienceMovies. 24.11.2020. https://www.youtube.com/watch?v=9BYxTrX_ynU

Schwanbeck, Jan / Kan, Caroline / Bühlmann, Alain / Etter, Simon / Kummer, Dominic / Morf, Silvia / von Wattenwyl, Nastascia (2018): Hydrometrische Netze – Einzugsgebiete und Datenreihen. In: Daten- und Analyseplattform. Hydrologischer Atlas der Schweiz. [https://hydro-maps.ch/#de/8/46.830/8.190/bl_hds--a05_a05_20180118a_outlets_epsg2056\\$0/NULL](https://hydro-maps.ch/#de/8/46.830/8.190/bl_hds--a05_a05_20180118a_outlets_epsg2056$0/NULL) (letzter Zugriff: 11.11.2024).

Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI) (2022): Das HBV-Modell im Jahr 1972. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/historisk-aterblick/hbv-modellen-1.17857> (Zugriff: 02.10.2024), automatisch mit dem Google-Übersetzer übersetzt.

Seibert, Jan (2014): Introduction to the HBV model. (Vorlesungsfolien). Vorgängerversion abrufbar unter: <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model.html> (Zugriff: 03.12.2024).

Seibert, Jan / Jenicek, Michael / Huss, Matthias / Ewen, Tracy / Viviroli, Daniel (2021): Snow and ice in the hydrosphere. In: Haeberli, Wilfried / Whiteman, Colin (Hrsg.): Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters, S. 93 - 135.

Shrestha, Durga / Solomatine, Dimitri (2008): Assessing uncertainty in rainfall-runoff models: Application of data-driven models. In: Samuels / Huntington / Allsop / Harrop (Hrsg.): Flood Risk Management: Research and Practice, London, S. 1568, https://www.researchgate.net/publication/265000319_Assessing_uncertainty_in_rainfall-runoff_models_Application_of_data-driven_models.

SLF (WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung): Details zur Schneemessung, Typische Messfehler. In: Lawinenbulletin und Schneesituation. https://www.slf.ch/de/lawinenbulletin-und-schneesituation/messwerte/details-zur-schneemessung/#page_title (Zugriff: 06.10.2024). [zit. SLF, Typische Messfehler]

Spektrum Akademischer Verlag (Hrsg.): Hydrologisches Modell. In: Lexikon der Geowissenschaften (online). <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/hydrologisches-modell/7239> (Zugriff: 07.10.2024).

Spreafico, Manfred / Weingartner, Rolf (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie), Serie Wasser Nr.7, Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/hydrologie-der-schweiz.html> (Zugriff: 17.3.2024).

9. Anhang

Code des verwendeten hydrologischen Modells

Das Zeichen # bedeutet, dass dieser Teil vom Programm nicht beachtet wird. Es wird verwendet, um Kommentare einzufügen oder um Codeteile nicht zu berücksichtigen.

Grün: Kommentare

Orange: Ansätze, Überlegungen für Codeteile, die letztlich nicht mitberücksichtigt wurden

Blau: Verweise von Kapitel «Das HBV-Modell» S.9 (nicht Teil von Code)

```
##### Schneeroutine
#####

# Simuliert die Schneedecke und Bodeninfiltration auf verschiedenen
# Höhenzonen

# Output wird als Input für die Bodenroutine verwendet

#####
#####

model.hydro.sr <- function(input,
                             elev,
                             ini,
                             para)
{
  ### Inputs
  # Input: Temperatur und Niederschlagsdaten, Tagesauflösung
  # input$date: Date (yyy-mm-dd)
  # input$t: Temperatur (°C)
  # input$p: Precipitation (mm)
  # elev: Liste mit der Höhenzoneninformation:
  # elev$nr: Anzahl Höhenzonen
  # elev$area.m2: Totale Fläche des Einzugsgebietes(alle Höhenzonen)
  # elev$mean: Mittlere Höhe jeder Höhenzone
  # elev$area: Relativer Flächenanteil jeder Höhenzone
  # elev$stn: Höhe der Station (1: Schnee- und Temperaturmessstation
  (Färmel), 2: Niederschlagsstation (Boltigen))
  # ini: Liste mit Initialwerten für
```

```

# ini$swe.nr: Snow water equivalen (mm)
# ini$lwc.nr: liquid water content (mm)
# para: Liste (sowohl freier als auch konstanter) Parameter
# tt: Schwellenwert für alles mit Schnee; Schmelztemperatur und
fällt Niederschlag als Schnee oder als Regen
# tt2: Fällt Niederschlag als Schnee oder Regen? #tt und tt2 sind
jetzt ein Parameter tt
# cfmax: Schmelzkoeffizient
# corrsnow: Schneekorrekturfaktor
# cfr:refreezing (wie viel gefriert wieder pro Grad pro Tag) #wie-
der entfernt, da irgendwo in Code Problem

### Outputs
# mdata.ini: Modellierte Speicher (pro Höhenzone)
# mdata.ini$swe: Snow water equivalent (mm)
# mdata.ini$lwc: Liquid water content (mm)
# mdata.ini$sca.tot: Snow covered area over entire catchment (-)
# mdata: Modellierte Flüsse (pro Höhenzone)
# mdata$prec: Precipitation (mm)
# mdata$temp: Temperature (°C)
# mdata$mrاد: Schmelze der Schneedecke (mm)
# mdata$inf: Infiltration in den Boden (mm)

#Aufsetzen der Modellstruktur für jede Höhenzone
# Modellierte Flüsse
mdata <- lapply(1:4, matrix, data= NA, nrow=elev$nr, ncol=nrow(in-
put))
names(mdata) <- c("prec","temp","inf", "mrاد")
# Modellierte Speicher
mdata.ini <- lapply(1:2, matrix, data= NA, nrow=elev$nr,
ncol=nrow(input)) #repräsentiert immer den Anfang des Tages
names(mdata.ini) <- c("swe","lwc")
mdata.ini$swe[,1] <- ini$swe.nr
mdata.ini$lwc[,1] <- ini$lwc.nr

```

```
mdata.ini$sca.tot[1] <- sum((mdata.ini$swe[,1] > 0)*elev$area)
```

```
#Für jeden Zeitschritt t
```

```
for(t in 1:(nrow(input)-1)){
```

```
## Wie lassen sich Temperatur und Niederschlag für jede Höhenzone be-  
stimmen?
```

```
input$p[t] # Hier ist der gemessene Niederschlag an der Station
```

```
input$t[t] # Hier ist die gemessene Temperatur an der Station
```

```
elev$mean # Hier ist die mittlere Höhe jeder Höhenzone
```

Stelle B: Niederschlag für jede Höhenzone

```
( mdata$prec[,t] <- rep(input$p[t],elev$nr) #jeder Höhenzone wird die  
gleiche Niederschlagshöhe zugewiesen )
```

```
## Wie lassen sich der Schneedeckenaufbau bzw. die Schneeschmelze für  
jede Höhenzone bestimmen?
```

```
for(z in 1:elev$nr){
```

```
  #Hier sind Niederschlag und Temperatur für die entsprechenden  
  Höhenzone
```

```
    # mdata$prec[z,t]
```

```
    # mdata$temp[z,t]
```

```
  #Hier ist das aktuelle SWE
```

```
    # mdata.ini$swe[z,t]
```

```
  #Hier ist der aktuelle Flüssigwassergehalt
```

```
    #mdata.ini$lwc[z,t]
```

```
#Temperatur für jede Höhenzone
```

Stelle A: Temperatur für jede Höhenzone

```
( mdata$temp[z,t] <- input$t[t]-(elev$mean[z]-elev$stn[1])*0.6/100  
#die Temperatur wird an die Höhenzonen angepasst )
```

```
#verschiedene Ansätze ausprobiert für Anpassung des Niederschlags an  
die verschiedenen Höhenzonen, keine sinnvollen Resultate...
```

```
    #mdata$prec[z,t] <- input$p[t]*(1.1^((elev$mean[z]-  
elev$stn[2])/100))
```



```

#mdata$prec[z,t] <- min(input$p[t]*(1.1^((elev$mean[z]-
elev$stn[2])/100)), input$p[t]*(1.1^((1500-elev$stn[2])/100)))

#mdata$prec[z,t] <- input$p[t]+(elev$mean[z]-
elev$stn[2])/100*0.1*input$p[t]

#mdata$prec[z,t] <- input$p[t]+min(((elev$mean[z]-
elev$stn[2])/100*0.1*input$p[t]), ((1500-elev$stn[2])/100*0.1*in-
put$p[t]))

```

Flüsse: Wie lassen sich die Schneeschmelze und Bodeninfiltration bestimmen?

Stelle D: Schneeschmelze

```

mdata$mrاد[z,t] <- if(mdata$temp[z,t]>=para$tt){
  min((mdata$temp[z,t]-para$tt)*para$cfmax,mdata.ini$swe[z,t])
}else{
  0
}

```

Stelle E: Infiltration

```

mdata$inf[z,t] <- mdata$mrاد[z,t]+
  if(mdata$temp[z,t]<=para$tt){
    0
  }else{
    mdata$prec[z,t]
  }

```

Speicher: Wie lässt sich das SWE im nächsten Zeitschritt bestimmen?

Stelle C: SWE

```

mdata.ini$swe[z,t+1] <- if(mdata$temp[z,t]<=para$tt){
  mdata.ini$swe[z,t]+para$corrnsnow*mdata$prec[z,t]
}else{
  max(mdata.ini$swe[z,t]-mdata$mrاد[z,t],0)
}

```

Berechnungen, die für den Flüssigwassergehalt sind, wurden nicht mitberücksichtigt, hier aber ein Versuch, irgendwo gibt es hier ein Problem...

```
#      dlwc <-  
if(mdata.ini$lwc[z,t]+mdata$inf[z,t]>=0.1*mdata.ini$swe[z,t+1]){  
#      0.1*mdata.ini$swe[z,t+1]-mdata.ini$lwc[z,t]  
#    }else{  
#      mdata$inf[z,t]  
#    }  
  
#      mdata.ini$lwc[z,t+1] <- mdata.ini$lwc[z,t]+dlwc # <-  
min((mdata.ini$lwc[z,t]+mdata$mrad[z,t]), 0.1*mdata.ini$swe[z,t+1])
```

```
      #refreezing  
#      mdata.ini$swe[z,t+1] <- if(mdata$temp[z,t]<=para$tt){  
#      mdata.ini$swe[z,t+1]+mdata.ini$lwc[z,t+1]  
#    }else{  
#      mdata.ini$swe[z,t+1]  
#    }  
#      mdata.ini$lwc[z,t+1] <- if(mdata$temp[z,t]<=para$tt){  
#      mdata.ini$lwc[z,t+1]-  
min(para$cf*para$cfmax*(mdata$temp[z,t]-para$tt),  
mdata.ini$lwc[z,t+1])  
#    }else{  
#      mdata.ini$lwc[z,t+1]  
#    }
```

```
      #was passiert mit Wasser, das "keinen Platz mehr hat in LWC"?  
#      dlwc2 <- if(mdata$temp[z,t]>=para$tt){  
#      max(mdata.ini$lwc[z,t]-mdata.ini$lwc[z,t+1], 0)  
#    }else{  
#      0  
#    }
```

```

#      mdata$inf[z,t] <- mdata$inf[z,t]-dlwc+dlwc2

      #+ ifelse(0.1*mdata.ini$swe[z,t+1]<mdata.ini$lwc[z,t+1],
mdata.ini$lwc[z,t+1]-0.1*mdata.ini$swe[z,t+1], 0)

      #mdata.ini$lwc[z,t+1] <- mdata.ini$lwc[z,t+1]-
ifelse(0.1*mdata.ini$swe[z,t+1]<mdata.ini$lwc[z,t+1],
mdata.ini$lwc[z,t+1]-0.1*mdata.ini$swe[z,t+1], 0)

}

##### Aggregation über das gesamte Einzugsgebiet (alle Höhenzonen)
#SCA kann vom SWE jeder Höhenstufe abgeleitet werden
mdata.ini$sca.tot[t+1] <- sum((mdata.ini$swe[,t+1] > 0)*elev$area)

#Totale Schneeschmelze
mdata$mrad.tot[t] <- sum(mdata$mrad[,t]*elev$area) #in mm

# Totale Bodeninfiltration (MELT+DLWC)
mdata$inf.tot[t] <- sum(mdata$inf[,t]*elev$area) #in mm
}

##### Output vorbereiten
#Für Fluesse am letzten Tag noch NA anfuegen
a <- nrow(input)
mdata$inf.tot[a] <- NA
mdata$mrad.tot[a] <- NA

return(list("input"=input,
           "mdata"=mdata,
           "mdata.ini"=mdata.ini,
           "elev"=elev,
           "para.snow"=para
))
}

```

```
#####
#####

##### Bodenroutine #####

# Simuliert die Abflussprozesse im Boden, keine Differenzierung nach
Höhenzonen

# Input ist sowohl der Output der Schneeroutine sowie die Bodenparame-
ter

#####
#####

model.hydro.rr <- function(input.sr,
                           ini,#list with initial values (soil boxes)
                           para)
{
  ### Inputs
  # input.sr: Dies ist der Output der Schneeroutine, s. oben
  # ini: Liste mit Initialwerten für
    # ini$sm: Soil moisture (mm)
    # ini$uz: Upper zone (mm)
    # ini$lz: Lower zone (mm)
  # para: Liste (sowohl freier als auch konstanter) Parameter
    # para$fc: Maximum storage capacity of sm (mm)
    # para$lc: Fraction of FC at which e.act = e.pot
    # para$beta: Partitioning of soil moisture and runoff
    # para$k0: Very fast storage coefficient
    # para$k1: Fast storage coefficient
    # para$k2: Slow storage coefficient
    # para$perc: Constant percolation rate to lower zone (mm)
    # para$uzl: Storage threshold between fast/very fast outflow (mm)

  ### Outputs
  # mdata.ini: Modelllierte Speicher
    # mdata.ini$sm: Soil moisture (mm)
    # mdata.ini$uz: Upper zone (mm)
    # mdata.ini$lz: Lower zone (mm)
}
```

```

# mdata: Modellierte Flüsse
# e.act: Actual evapotranspiration (mm)
# mdata$q0: Outflow uz 1 (mm)
# mdata$q1: Outflow uz 2 (mm)
# mdata$q2: Baseflow (mm)
# mdata$q: Total discharge (mm)
# mdata$qspez: Total specific discharge (m3/s)

```

```

#initialisierung Bodenspeicher

```

```

input.sr$mdata.ini$sm <- ini$sm
input.sr$mdata.ini$uz <- ini$uz
input.sr$mdata.ini$lz <- ini$lz

```

```

# Simulation für jeden Zeitschritt

```

```

for(t in 1:(nrow(input.sr$input)-1)){

```

```

# #Partitioning infiltration to sm and uz

```

Stelle F: Infiltration wird auf Bodenwasser und obere Grundwasserzone aufgeteilt

```

    dsm <- (1-(input.sr$mdata.ini$sm[t]/para$fc)^para$beta)*input.sr$mdata$inf.tot[t]
    duz <- (input.sr$mdata.ini$sm[t]/para$fc)^para$beta*input.sr$mdata$inf.tot[t]

```

```

# mass balance sm

```

```

input.sr$mdata.ini$sm[t+1] <- input.sr$mdata.ini$sm[t]+dsm

```

Stelle G: Verdunstung

```

    input.sr$mdata$e.act[t] <- ifelse(input.sr$mdata.ini$sm[t+1] >=
para$lc*para$fc, input.sr$input$e.pot[t], input.sr$input$e.pot[t]*input.sr$mdata.ini$sm[t+1]/(para$lc*para$fc))
    input.sr$mdata.ini$sm[t+1] <- input.sr$mdata.ini$sm[t+1]-input.sr$mdata$e.act[t]

```

```

# Mass balance uz (Percolatin to lz)

```

```

input.sr$mdata.ini$uz[t+1] <- input.sr$mdata.ini$uz[t]+duz

```

Stelle H: Versickerung

```
dlz <- min(input.sr$mdata.ini$suz[t+1], para$perc)
input.sr$mdata.ini$suz[t+1] <- input.sr$mdata.ini$suz[t+1]-dlz

#Mass balance lz
input.sr$mdata.ini$lz[t+1] <- input.sr$mdata.ini$lz[t]+dlz
```

Stelle J: Abfluss q0

```
input.sr$mdata$q0[t] <- max(para$k0 * (input.sr$mdata.ini$suz[t+1]-
para$suzl),0)
```

Stelle I: Abflüsse q1 und q2

```
input.sr$mdata$q1[t] <- para$k1 * input.sr$mdata.ini$suz[t+1]
input.sr$mdata$q2[t] <- para$k2 * input.sr$mdata.ini$lz[t+1]

input.sr$mdata.ini$suz[t+1] <- input.sr$mdata.ini$suz[t+1] - in-
put.sr$mdata$q0[t] - input.sr$mdata$q1[t]
input.sr$mdata.ini$lz[t+1] <- input.sr$mdata.ini$lz[t+1] - in-
put.sr$mdata$q2[t]
input.sr$mdata$q[t] <- input.sr$mdata$q0[t]+input.sr$mdata$q1[t]+in-
put.sr$mdata$q2[t]
}
```

#Spezifischer Abfluss

Stelle K: Abfluss in m³/s umrechnen

```
input.sr$mdata$qspez <- input.sr$mdata$q/1000*in-
put.sr$elev$area.m2/(24*60*60)
```

#Für Fluesse am letzten Tag noch NA anfüegen

```
a <- nrow(input.sr$input)
input.sr$mdata$e.act[a] <- input.sr$mdata$q0[a] <- in-
put.sr$mdata$q1[a] <- input.sr$mdata$q2[a] <- input.sr$mdata$q[a] <-
input.sr$mdata$qspez[a] <- NA
```

#parameters anhängen

```
input.sr$para.runoff <- para
```

```

    return(input.sr)
}

#####
#####

##### Gesamtes Modell
#####

#####
#####

model.hydro <- function(input,
                        elev,
                        ini.sr,
                        ini.rr,
                        para.sr,
                        para.rr){

  #Schneeroutine
  snow <- model.hydro.sr(input=input,
                        elev=elev,
                        ini=ini.sr,
                        para=para.sr)

  #Bodenroutine
  runoff <- model.hydro.rr(input.sr=snow,
                        ini=ini.rr,
                        para=para.rr)

  return(runoff)
}

```

Mittlerer Jahresniederschlag nach Höhenzonen in der Schweiz

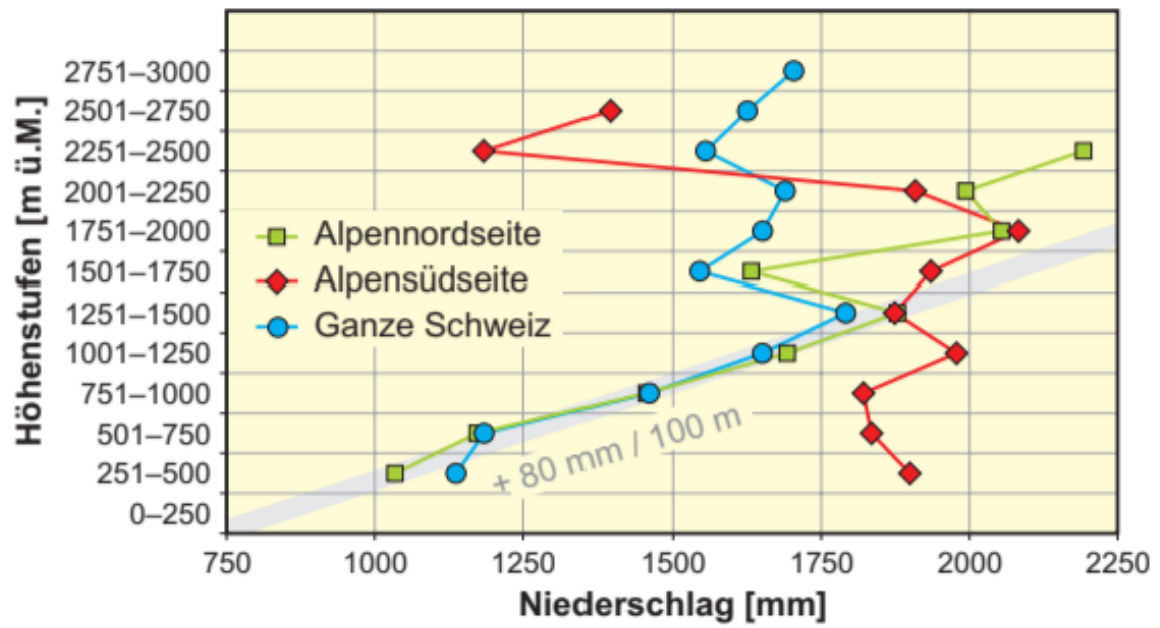


Abbildung 44: Mittlerer Jahresniederschlag nach Höhenzonen in der Schweiz (Spreafico/Weingartner 2005, S. 15).